

土木工程研究生系列教材

---

# 防灾减灾工程学

江见鲸 徐志胜 等编著



机械工业出版社

本书为土木工程学科研究生系列教材之一。全书共分 远篇，包括：灾害学总论、火灾灾害、地震灾害、风灾害、地质灾害和城市灾害学等。每一篇都根据灾害的各自特点，分析了灾害的成因与防灾减灾的对策。

本书可作为土木工程、水利工程、建筑学、城市规划、消防工程、安全工程等专业的研究生教材，也可供从事防灾减灾工程的广大工程技术人员和管理人员阅读。

## 图书在版编目 (悦) 数据

防灾减灾工程学 见鲸等编著 鄞-北京：机械工业出版社， 鄞鄞鄞  
(土木工程研究生系列教材)

鄞鄞鄞鄞鄞鄞鄞鄞

I 鄞防 鄞鄞 II 鄞江 鄞鄞 III 鄞灾害 原防治 原研究生 原教材 IV 鄞源

中国版本图书馆 悦数据核字 (鄞鄞) 第 鄞鄞鄞号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 鄞号 邮政编码 鄞鄞鄞)

策划编辑：季顺利 责任编辑：冷 彬 版式设计：霍永明

责任校对：王 欣 封面设计：张 静 责任印制：杨 曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

鄞鄞年 猿月第 员版第 员次印刷

鄞鄞号 鄞鄞号 鄞鄞号 鄞鄞号 鄞鄞号 鄞鄞号 鄞鄞号 鄞鄞号

定价：鄞鄞元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (鄞鄞) 鄞鄞鄞鄞鄞

封面无防伪标均为盗版

# 土木工程研究生系列教材编审委员会

顾问：(以姓氏笔画为序)

刘宝琛	刘祖德	刘怀恒	王正宏	林 皋
任爱珠	朱博鸿	沈世钊	沈祖炎	欧进萍
陈英俊	周 氏	周锡元	钟善桐	赵国藩
殷宗泽	顾晓鲁	蔡美峰		

主任委员：江见鲸

副主任委员：(以姓氏笔画为序)

朱合华	李宏男	李 奇	李爱群	陈云敏
张永兴	杜修力	张素梅	尚守平	姜忻良
夏 禾	徐志胜	廖红建		

委员：(以姓氏笔画为序)

卫 军	王 钊	王清湘	卢廷浩	朱召泉
李正良	李英民	李洪泉	李鸿晶	刘晶波
吴知丰	陈国兴	杨果林	张家生	张颜刚
张耀春	郑 刚	易伟建	单 建	周朝阳
赵树德	徐礼华	袁迎曙	康清良	盛宏玉

秘书长：季顺利

# 土木工程研究生系列教材

## 序

随着我国高等教育的发展，普通本科教育已由精英式教育发展成为大众式教育。我国科学技术的高速发展，对具有高级专业知识、高级专业技能的专门人才的需求，日益迫切，这为硕士研究生教育的发展提供了广阔空间。一些高等院校，硕士研究生的招生规模，近年来正以 ~~飞快~~ ~~迅猛~~ 的速度发展。对一些研究型的重点高校，在“十五”期间，本科生与研究生的招生比例要大致相当。许多高校已获得工程硕士的培养授权，这为研究生培养又开辟了新途径。

硕士研究生招生规模的扩大，对传统的研究生教育模式提出了挑战。过去硕士生的培养基本套用博士生的培养模式，主要靠传帮带式的教育模式，而对数量增大的研究生教育，必须建立整建制的培养模式，即要求硕士研究生的教育培养模式向公共化、规范化方向发展。对此，硕士研究生的教材，特别是研究生教育的平台课、学位课的教材建设就显得特别重要了。

机械工业出版社根据当前土木工程研究生教育发展现状，本着“大土木工程”的教育思想，组织国内部分高校土木工程专业的教授，对土木工程研究生用教材建设进行了研讨，并组织编写了土木工程研究生系列教材。为保证教材的编写质量，组织成立了教材编审委员会，聘请了一批学术造诣深、德高望重的专家作顾问和教材主审。本套系列教材编写、出版的思路是：先基础课、平台课教材，后专业课教材。教材组织由长期给研究生授课的老师合作编写，达到“学校优势互补，质量上乘”的目标。教材体系设计，本着“重基本理论、重学科发展，结合学生现状和人才培养要求”的原则。教材编写质量，本着“出精品、主编负责、主审把关”的原则，符合国务院学位委员会设定的专业要求。

本套系列教材将于 ~~四五年~~ 陆续出版。我们相信，本套系列教材的出版将对我国土木工程研究生教育的发展和教学质量的提高及人才培养，产生积极作用，为我国经济建设和社会发展做出贡献。

江见鲸

# 前言

自古以来,灾害就与人类共存,灾害给人类带来了巨大的损失,人类也为防止灾害和减轻灾害而作出了很大的努力。近代随着城市化的发展,人口和财富大量向城市集中,一旦受到灾害袭击,会造成巨大的人类伤亡和财产损失,影响一个城市或一个地区的可持续性稳定发展。灾害对公众来讲并不陌生,在媒体上经常有灾害的报道;各级政府对灾害也特别重视,一旦一个地区有灾,当地的领导常常在第一时间赶赴现场组织抢险救灾。同时,我国政府对防灾减灾的法规建设十分重视,陆续颁布了《人民防空法》、《防震减灾法》、《消防法》、《防洪法》等。而相比之下,有关防灾减灾的教育却相对落后。尽管在土木工程学科中有一个二级学科是“防灾减灾工程与防护工程”,许多高等院校设有这个二级学科的博士和硕士学位培养点,但至今尚未有一本供研究生专用的有关教材。

为了使土木工程和相关专业的学生能够增强防灾减灾意识,使专门从事防灾减灾工程的研究生掌握防灾减灾的基本原理和专门技术,编写一本比较全面和系统的“防灾减灾学”的教材是十分必要的。清华大学与中南大学多年来为研究生开设“防灾减灾工程学”和“灾害学”,并编写过一些讲义,本书就是在这些讲义的基础上编写而成的。

本书共分 远篇，包括：灾害学总论、火灾灾害、地震灾害、风灾害、地质灾害和城市灾害学等。其中清华大学负责编写第 员 源 缘篇，中南大学负责编写第 圆 猿 远篇。编写分工具体如下：江见鲸、陆新征（第 员 源 缘篇），徐志胜、徐彧（第 圆篇），李耀庄（第 猿篇），徐志胜、王薇（第 远篇）。

全书由江见鲸和徐志胜负责统稿。

在本书的编写过程中,编者得到了国家自然科学基金委员会和科技部的支持,承担了自然科学基金项目“基于地理信息的城市综合防灾评估与对策”(项目编号:49771010)的研究,以及国家“十五”科技攻关项目“城市公共安全研究”(项目编号:2001BA701A01)和“小城镇基础设施防灾减灾关键技术研究”(项目编号:2001BA701A01)的研究工作,本书的一些内容就是项目的研究成果的集中体现。在此书出版之际,对国家自然科学基金委员会和科技部的资助表示感谢。

本书承清华大学防灾减灾工程研究所所长、博士生导师任爱珠教授审阅，她的有益建议使本书增色颇多。对此，也向她表示深切的感谢。

本书在编写过程中，参阅了许多学者的著作，并吸纳了其中的成果，在此特表感谢。防灾减灾工程涉及到多个学科，知识面广，一些问题尚在探索之中。书中难免存在不妥之处，请专家和读者批评指正。

编 者

2005年 8月

# 目 录

土木工程研究生系列教材序

前言

第 1 篇	灾害学总论 .....	1
第 1 章	灾害的含义和类型 .....	1
1.1	灾害的含义 .....	1
1.2	灾害的类型与分级 .....	1
第 2 章	灾害对人类社会造成的危害 .....	2
2.1	灾害危害人类社会的后果 .....	2
2.2	我国历史上有关灾害的记载 .....	2
2.3	世界七大洲主要灾害简介 .....	2
第 3 章	国内外防灾减灾的发展简况 .....	3
3.1	国际减轻自然灾害十年 .....	3
3.2	中国政府的减灾行动 .....	3
3.3	国内外一些主要的防灾、减灾学术刊物 .....	3
第 4 章	土木工程防灾减灾工程学科的形成 .....	4
4.1	灾害意识和灾害教育 .....	4
4.2	防灾减灾学科的建设 .....	4
4.3	土木工程防灾减灾学科的主要内容 .....	4
第 5 篇	火灾灾害 .....	5
第 5 章	火灾灾害概论 .....	5
5.1	火灾的危害及特点 .....	5
5.2	火灾的分类 .....	5

缘猿	我国消防安全的现状和预防对策 .....	圆猿
缘原	建筑火灾科学的主要研究内容和研究现状 .....	猿
第 远章	建筑火灾的燃烧特性 .....	猿
远猿	燃烧的基本知识 .....	猿
远圆	室内火灾发展的过程 .....	源
远猿	火灾在全盛阶段的性状 .....	源
远原	火灾蔓延 .....	缘
第 苑章	火灾烟气 .....	缘
苑猿	烟气的产生及危害 .....	缘
苑圆	烟气的特征 .....	缘
苑猿	烟气的遮光性 .....	缘
苑原	烟气的毒性效应 .....	远
苑缘	烟气的传播 .....	远
苑远	烟气的控制 .....	远
第 愿章	建筑材料的高温性能 .....	远
愿猿	建筑材料的燃烧性能及其测定方法 .....	苑
愿圆	混凝土的高温性能 .....	苑
愿猿	钢筋的高温性能 .....	愿
愿原	其他常用建筑材料的高温性能 .....	愿
第 怨章	建筑构件的火灾性能 .....	怨
怨猿	建筑构件的耐火极限 .....	怨
怨圆	影响构件耐火极限的因素及提高耐火极限的措施 .....	怨
怨猿	高温后钢筋混凝土梁板的耐火性 .....	园
第 猿篇	地震灾害 .....	园
第 猿章	地震概述 .....	园
猿猿	地震类型、成因和地震波 .....	园
猿圆	地震震级和烈度 .....	源
猿猿	基本烈度和地震区划图 .....	怨
猿原	地震活动概况及其分布 .....	员
猿缘	工程结构的抗震设防 .....	缘



第 1 章	地震的破坏作用.....	1
第 2 章	地震灾害实例.....	2
第 3 章	减轻地震灾害的基本对策.....	3
第 4 章	地震应急活动.....	4
第 5 章	抗震概念设计的总体原则 .....	5
第 5.1 节	建筑物场地的选择.....	5
第 5.2 节	建筑物体型的确定.....	6
第 5.3 节	结构抗震体系的选取.....	7
第 5.4 节	结构延性的实现.....	8
第 5.5 节	多道抗震防线的设置.....	9
第 5.6 节	非结构构件的处理 .....	10
第 5.7 节	建筑材料的选择和施工质量 .....	11
第 6 章	结构地震反应分析和结构抗震验算 .....	12
第 6.1 节	结构抗震设计理论的历史发展和回顾 .....	12
第 6.2 节	结构地震作用计算的基本原则 .....	13
第 6.3 节	单自由度体系的地震位移反应分析 .....	14
第 6.4 节	单自由度体系的水平地震作用和反应谱 .....	15
第 6.5 节	多自由度线弹性体系运动方程的建立 .....	16
第 6.6 节	多自由度无阻尼线弹性体系自由振动 .....	17
第 6.7 节	多自由度线弹性体系地震反应计算的振型分解反应谱法 .....	18
第 6.8 节	多自由度线弹性体系地震作用计算的底部剪力法 .....	19
第 6.9 节	结构基本周期的近似计算 .....	20
第 6.10 节	水平地震作用下地震内力的调整.....	21
第 6.11 节	考虑水平地震作用扭转影响的计算 .....	22
第 6.12 节	竖向地震作用的计算 .....	23
第 6.13 节	多自由度体系弹塑性地震反应的时程分析法 .....	24
第 6.14 节	结构静力弹塑性地震反应分析法 .....	25
第 6.15 节	结构截面抗震验算 .....	26
第 6.16 节	结构抗震变形验算 .....	27
第 7 篇	风灾害 .....	28
第 7.1 章	风的类型与分类 .....	28
第 7.1.1 节	风的类型.....	28

第 1 章	风的等级.....	1.1
第 2 章	风灾害及对建筑物的影响 .....	2.1
第 2.1 节	风灾害实例.....	2.1.1
第 2.2 节	大风造成的危害分类.....	2.2.1
第 2.3 节	风对建筑物的破坏作用.....	2.3.1
第 3 章	工程结构的抗风设计 .....	3.1
第 3.1 节	风对结构的作用.....	3.1.1
第 3.2 节	结构上的静力风荷载.....	3.2.1
第 3.3 节	顺风向风振及风振系数.....	3.3.1
第 3.4 节	横风向风振.....	3.4.1
第 3.5 节	常用结构频率、周期和振型计算.....	3.5.1
第 3.6 节	高层建筑和高耸结构的抗风设计要求.....	3.6.1
第 4 章	防风减灾对策与风振控制 .....	4.1
第 4.1 节	防风减灾对策.....	4.1.1
第 4.2 节	风振控制.....	4.2.1
第 5 篇	地质灾害 .....	5.1
第 5.1 章	地质灾害概述 .....	5.1.1
第 5.1.1 节	地质灾害的分类.....	5.1.1.1
第 5.1.2 节	地质灾害对人类的危害.....	5.1.2.1
第 5.2 章	滑坡灾害及其防治 .....	5.2.1
第 5.2.1 节	滑坡灾害及分级分类.....	5.2.1.1
第 5.2.2 节	滑坡要素与滑坡的分级、分类.....	5.2.2.1
第 5.2.3 节	滑坡稳定分析.....	5.2.3.1
第 5.2.4 节	滑坡的防治措施.....	5.2.4.1
第 5.2.5 节	滑坡的监测与预报.....	5.2.5.1
第 5.3 章	崩塌的灾害及防治 .....	5.3.1
第 5.3.1 节	崩塌的类型和成因.....	5.3.1.1
第 5.3.2 节	崩塌的特征.....	5.3.2.1
第 5.3.3 节	崩塌的危害.....	5.3.3.1

第 4 章 崩塌的防治 .....	4-1
第 5 章 泥石流的灾害及防治 .....	5-1
5.1 泥石流的灾害 .....	5-1
5.2 泥石流的分类及形成条件 .....	5-2
5.3 泥石流的防治 .....	5-3
第 6 章 地面沉降及其防治 .....	6-1
6.1 地面沉降及其类型 .....	6-1
6.2 地面沉降造成的灾害 .....	6-2
6.3 地面沉降的控制和治理 .....	6-3
第 7 章 岩土工程灾害 .....	7-1
7.1 岩土工程事故分类 .....	7-1
7.2 岩土工程中因地基沉降造成的事故实例 .....	7-2
7.3 岩土工程中因地基失稳造成的工程事故实例 .....	7-3
7.4 岩土工程中因建筑物地基溶蚀与渗透破坏造成的事故实例 .....	7-4
7.5 岩土工程事故灾害的防治措施 .....	7-5
第 8 篇 城市防灾减灾概要 .....	8-1
第 1 章 概述 .....	1-1
1.1 前言 .....	1-1
1.2 基本概念 .....	1-2
1.3 城市灾害类型 .....	1-3
1.4 城市灾害特点 .....	1-4
1.5 城市灾害的成因 .....	1-5
第 2 章 城市灾害风险性分析 .....	2-1
2.1 风险的定义 .....	2-1
2.2 风险分析的目的、内容与程序 .....	2-2
2.3 风险识别 .....	2-3
2.4 风险估计与评价 .....	2-4
2.5 风险决策 .....	2-5
2.6 减灾决策 .....	2-6
2.7 城市自然灾害风险分析 .....	2-7

第 1 章	城市防灾减灾规划 .....	1
1.1	城市防灾减灾规划概述 .....	1
1.2	城市防灾减灾规划的方法 .....	1
1.3	城市综合防灾减灾规划的编制 .....	1
1.4	城市灾害应急预案的编制 .....	1
第 2 章	城市灾害管理信息系统 .....	2
2.1	建立城市灾害管理信息系统的基本原则 .....	2
2.2	城市灾害管理信息系统的功能 .....	2
2.3	城市灾害管理信息系统的结构 .....	2
2.4	城市灾害管理信息系统概念设计 .....	2
2.5	城市灾害管理系统的建立 .....	2
2.6	北京后沙峪灾害管理系统示例 .....	2
附录 粤	我国主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震 分组 .....	3
附录 月	中华人民共和国防震减灾法 .....	4
附录 悦	破坏性地震应急条例 .....	4
附录 阅	国家破坏性地震应急预案 .....	4
参考文献	.....	4

# 第 1 篇 灾害学总论

## 第 1 章 灾害的含义和类型

### 1.1 灾害的含义

灾害是指那些由于自然的、人为的或人与自然综合的原因，对人类生存和社会发展造成损害的各种现象。尽管“灾害”一词在人们日常生活中已经常用，但如果认真地追根问底，则尚未有一个统一的定义。世界卫生组织对灾害的定义为：任何引起设施破坏、经济严重受损、人员伤亡、健康状况及卫生条件恶化的事件，如其规模已超出事件发生社区的承受能力而不得不向社区外部寻求专门援助时，就可称其为灾害。联合国“国际减轻自然灾害十年”专家组对灾害所下的定义为：灾害是指自然发生或人为产生的，对人类和人类社会具有危害后果的事件与现象。值得指出的是，“灾害”是从人类的角度来定义的，灾害必须以造成人类生命、财产损失后果为前提。例如，一次山体崩塌发生在荒无人烟的冰雪深山，并无人员伤亡，甚至无人知晓，则不会称作灾害。但是如果山体崩塌、滑坡发生在人员聚居的城镇，导致人员伤亡、房屋倒塌、农田被掩埋、水利设施被冲毁等，这就构成灾害事件。

自然灾害是自然界中物质变化、运动造成的祸害。自有人类以来，大小灾害不计其数，其中巨大的灾害就有成百上千次。例如：强烈的地震，可使上百万人口的一座城市在顷刻之间成为一片废墟，如唐山大地震；滂沱暴雨泛滥成灾，可摧毁农田、村庄，使成千上万居民流离失所；还有百年不遇的大旱，曾使非洲大陆田地龟裂、禾苗枯萎、饿殍遍野、惨不忍睹；火山喷发出灼热的岩浆，使意大利百年古城化为灰烬；强劲的飓风掠过，海浪滔滔，使孟加拉湾沿海村镇荡然无存……诸如此类，都是大自然带给人类的“天灾”。

人为灾害是由于人的过错或某些丧失理性的失控行为给人类自身造成的损失。例如用火不慎引起火灾可以使成片街区变为灰烬，烟花爆竹生产厂安全控制失误，引起爆炸而人亡厂毁；江河大堤因人工挖沙决口引起河水泛滥，从而使村庄成为泽国。由于人祸引起的灾害有火灾、爆炸、海难、空难、车祸、人口失控、城市膨胀、“三废”污染、工程事故以及投毒、战争、恐怖活动等。这些危

害社会的现象，普遍存在于社会的各个领域，并屡屡发生。

应当指出，各种自然灾害中，既有像地震、火山喷发这样的纯自然灾害，也有掺杂着人类行为活动在内的“人为自然灾害”，如酸雨、气候异常等。人们对1998年夏季我国长江、嫩江和松花江的特大洪灾印象颇深，教训也很深刻。那场百年罕见的灾难，自然因素、厄尔尼诺现象固然是“祸首”，但人为因素如滥伐森林、破坏生态平衡、围湖造田、水土流失等等也是不容忽视的重要原因。灾害专家分析后指出，过去是暴雨、大雨才成灾，现在则是中雨就成灾。所以，这些灾害是大自然物质运动、变化和人类社会不合理行为活动两者的叠加和渗透的结果，应是“七分天灾，三分人祸”。

## 1.1 灾害的类型与分级

### 1.1.1 灾害的类型

灾害的种类繁多，分类方法也不同，从灾害发生的原因来分可以分为自然灾害和人为灾害两大类。自然灾害与人为灾害各自又可分为许多类型。

主要的自然灾害 包括以下种类

(1) 地质灾害：地震，火山爆发，山崩，滑坡，泥石流，地面沉陷等。

(2) 气象灾害：暴雨，洪涝，热带气旋，冰雹，雷电，龙卷风，干旱，酷热，低温，雪灾，霜冻等。

(3) 生物灾害：病虫害，森林火灾，沙尘暴，急性传染病等。

(4) 天文灾害，天体撞击，太阳活动异常等。

(5) 其他如雪崩，冰崩，海啸，鼠害等也属于自然灾害。

主要的人为灾害 包括以下种类

(1) 生态环境灾害：烟雾与大气污染，温室效应，水体污染，水土流失，气候异常，人口膨胀等。

(2) 工程事故灾害：岩土工程塌方，爆炸，人为火灾，核泄露，有害物失控（毒气，毒物，有害病菌等），水库溃坝，房屋倒塌，交通事故等。

(3) 政治社会灾害：球迷骚乱，战争，集团械斗，人为放毒，社会暴力与动乱，金融风暴等。

无论是自然灾害，还是人为灾害，从灾害的发展过程特性看，灾害又可以分成四种类型

(1) 突变型。地震、泥石流、燃气爆炸等属于这一类型，它们的发生往往缺少先兆，发作是突然的，发生的过程历时较短，但破坏性很大，而且可能在一定期限内重复发作。

(2) 发展型。暴雨、台风、洪水等属于这一类型。与突变型相比，它们有一

定的先兆，往往是某种正常自然过程积累的结果。它们的发展是较迅速的，但比突变型灾害要缓慢一些，因而其过程具有一定的可估计性。

(獭 持续型。旱灾、涝灾、传染病、生物病灾害等就属于这种类型。它们的持续时间可由几天到半年甚至几年。

(源 环境演变型 (或简称演变型)。沙漠化、水土流失、冻土、海水入侵、地面下沉、海面上升以及区域气候干旱化等属于环境演变型自然灾害。这类自然灾害是一种长期的自然过程，是自然环境演化或加上人类不当行为造成的必然伴生结果，因其进程缓慢，不易引起人们的重视并立刻采取措施，而且有些灾害防治还需世界不同国家之间合作进行，因而最难控制和减轻。但这类灾害具有统计意义上的可预报性，如二氧化碳倍增可能引起全球气温升高 员~ 猿℃，这在理论上有一定肯定的结论，因它导致的区域干旱化和海平面上升也具有一定信度的预测结果。

从危害性上看，四种类型的自然灾害是有差异的。突变型和发展型自然灾害发作快，缺少征兆，因而对人类和动物的生命危害最大，两者有时被合作为骤发性灾害。持续型自然灾害持续的时间长，影响范围一般也较大，进而往往造成极大的经济损失。演变型自然灾害是一种漫长的自然过程，它破坏了人类的生存环境，而且纠正难度极大，因而它的影响最大，长期的潜在损失最大。

## 11.1.1 灾害的分级

对灾害规模的描述，目前还很不统一。如地震则以释放的能量来分级；崩塌、泥石流则以移动的土方量来衡量；植物病虫害以受灾面积来划分。可见，不同的灾种有不同的分级方法，相互之间很难统一，也不大可能统一。但不论何种灾害，均会造成人员伤亡或财产 (经济) 损失，所以可以此进行灾害分级。根据我国国情，将灾害分为以下五个等级：

巨灾：死亡 员0000 人以上，经济损失超过 员亿元人民币。

大灾：死亡 员000~ 员0000 人，经济损失 员000 万 ~ 员亿元人民币。

中灾：死亡 员00~ 员000 人，经济损失 员00~ 员000 万元人民币。

小灾：死亡 员0~ 员00 人，经济损失 员0~ 员00 万元人民币。

微灾：死亡 约 员0 人，经济损失 约 员0 万元人民币。

第 四章 灾害对人类社会造成的危害

灾害是人类生存、生产和文明建设的大敌。灾害常以其巨大的能量无情地袭击人类，把无尽的灾难肆意撒向人间。往远来说，近 四百万年来，差不多每隔 四万年就有一次全球性的灾难性浩劫。往近来说，自有人类之后，灾害与人相伴，世界各地和不同国家浩瀚的历史文献中，留下了无数惨痛的灾难记录。

四.1 灾害危害人类社会的后果

灾害危害人类社会的后果可以归纳为三个方面。

四.1.1 造成人员伤亡

自然灾害直接危害人类生命和健康。一次严重灾害导致千百万人亿至上亿人受灾，并造成巨大的人员伤亡。例如， 一八八二年 八月 二日，陕西华县、潼关大地震造成 八万人死亡； 一九二〇年 七月 二二日河北省唐山大地震造成 四万人死亡； 一九三五年 八月 缘日云南通海强烈地震造成 二万人死亡； 一九三九年 八月 怨日，黄河花园口堤防被掘造成黄河泛滥， 八万人死于水淹和饥饿； 一九五〇年 七月 愿月，江淮流域特大洪水灾害造成约 四万人死亡； 一九五九年 八月 二日，广东汕头地区遭受强台风风暴袭击，造成 苑万多人丧生； 一九六九年夏季长江中下游地区特大洪水灾害造成 猿万人死亡； 一九七〇年 八月 淮河水系的洪河、汝沱河等水系发生特大暴雨洪水，造成 四万人死亡。

表 四.1 列出了近 猿五年来世界上死亡人数达 一万人以上的大灾。

表 四.1 近 猿五年来世界死亡人数大于 一万人的大灾难目录

时间	受灾地区	灾型	死亡人数 人
一九五〇年 八月 二日	中国上海	风暴潮	一八
一九五〇年 八月 二日	印度加尔各答	地震	二八
一九五〇年 八月 二日	中国四川泸定	地震	一八
一九五〇年 八月 二日	日本本州北部	涝、饥荒	≈ 二八
一九五〇年 八月 二日	中国广东广州	风暴潮	一八
一九五〇年 八月 二日	孟加拉巴卡尔甘杰	热带气旋	二八
一九五〇年 八月 二日	中国山东、河南、河北等	旱灾	一八
一九五〇年 八月 二日	中国新疆喀什	冻害	一八
一九五〇年 八月 二日	越南海防	台风	一八
一九五〇年 八月 二日	印度孟买	热带气旋	一八



(续)

时间	受灾地区	灾型	死亡人数 万人
1942-1943	印度	饥荒、黑死病	100
1970	孟加拉	热带气旋	30
1976-1978	意大利墨西哥	地震	10
1982-1983	中国广东	洪水	≈ 10
1985-1986	印度	饥荒、流感	100
1990	中国山东、河南、山西	旱灾	10
1992-1993	中国宁夏海原	地震	100
1995	日本东京	地震	100
1998	中国十二省	水灾	≈ 100
1998-1999	中国云南东部	霜冻、饥荒	≈ 100
1998-1999	中国四川	旱灾、饥荒	10
1998-1999	中国湖北、湖南	水灾	100
1999	印度加尔各答	飓风	100
1999-2000	中国河南	旱灾	≈ 100
2000-2001	孟加拉	洪水、饥荒	100
2001-2002	非洲萨赫勒地区	旱灾	100
2002-2003	孟加拉	飓风	100
2003	越南	洪水	10
2003-2004	中国河北唐山	地震	1000
2004-2005	埃塞俄比亚	旱灾	1000
2005	苏丹	饥荒、疾病	10
2004-2005	印度洋沿岸	地震、海啸	≈ 100

由表 4-1 可见，在一次死亡人数在 10 万人以上的大灾总量中，中国所占比例很大；另有资料表明，在所有地震死亡人数的总额中，中国所占的比重最大，超过 1/3；一次地震死亡人数最多的灾难也是发生在中国，即明朝（1556 年）发生在中国华县的大地震，史书记载因震及震后疾病流行及饿死的人数达 83 万。

工程事故及恐怖袭击造成的人员伤亡也日益严重。1989 年，美国在印度建立的化工厂发生爆炸，使数十万人死亡或因中毒而终身残疾。1995 年韩国汉城三丰百货大楼倒塌，死亡人数近 500 人。1996 年乌克兰的切尔诺贝利沸水堆电站发生重大核事故，引起化学爆炸和起火，造成核物质放射性含量急增，使 100 人死亡，1000 人罹患放射性病，事故次日开始紧急撤离周围居民 10 万人，在欧洲引起巨大恐慌。1993 年 8 月 16 日，美国世界贸易大厦因遭恐怖分子袭击而倒塌，造成 1000 余人死亡或失踪，其后遗恶果，至今难以消除。

4.1 造成巨大经济损失

近几十年来，由于人类干预自然过度、失当，致使灾害发生的频率有所增加。另一方面，由于人口向城市集中，财富积累急增，灾害所造成的经济损失有

增无减（人员伤亡相对下降）。由美国海外灾害援助局（[阅读](#)）所发表的资料，估计全球因灾害而引起的经济损失平均每年达 [阅读](#) - [阅读](#) 亿美元。据我国有关方面统计，[阅读](#) - [阅读](#) 年的 [阅读](#) 年中，我国大陆发生的自然灾害，累计倒塌房屋 [阅读](#) 万间，年均 [阅读](#) 万间，按 [阅读](#) 年可比价格计算的累计直接经济损失 [阅读](#) 亿元，年均 [阅读](#) 亿元。表 [阅读](#) 列出了我国大陆重大灾害造成损失的统计。

表 [阅读](#) [阅读](#) 年以来我国重大突发性灾害损失简况

年月	重大灾害	损失(当年价格)亿元	说明
<a href="#">阅读</a> 年夏	长江暴雨洪涝	<a href="#">阅读</a> 多	死亡 <a href="#">阅读</a> 万余人
<a href="#">阅读</a> 年 愿月	河北暴雨洪涝	<a href="#">阅读</a> 多	死亡数万人
<a href="#">阅读</a> 年 愿月	河南暴雨洪涝	<a href="#">阅读</a> 多	死亡数万人
<a href="#">阅读</a> 年 苑月	唐山大地震	<a href="#">阅读</a> 多	死亡 <a href="#">阅读</a> 万人
<a href="#">阅读</a> 年 愿月	四川暴雨洪涝	<a href="#">阅读</a> 多	
<a href="#">阅读</a> 年 愿月	辽宁暴雨洪涝	<a href="#">阅读</a>	
<a href="#">阅读</a> 年 缘月	大兴安岭森林火灾	约 <a href="#">阅读</a>	<a href="#">阅读</a> 余万公顷森林被毁
<a href="#">阅读</a> 年 远- 苑月	江淮暴雨洪涝	约 <a href="#">阅读</a>	死亡 <a href="#">阅读</a> 人
<a href="#">阅读</a> 年 愿月	<a href="#">阅读</a> 号台风	<a href="#">阅读</a>	
<a href="#">阅读</a> 年 远月	华南暴雨洪涝	约 <a href="#">阅读</a>	
<a href="#">阅读</a> 年 愿月	<a href="#">阅读</a> 号台风	<a href="#">阅读</a>	死亡 <a href="#">阅读</a> 人
<a href="#">阅读</a> 年 远- 苑月	江西、两湖暴雨洪涝	约 <a href="#">阅读</a>	
<a href="#">阅读</a> 年 苑- 愿月	辽宁、吉林暴雨洪涝	约 <a href="#">阅读</a>	
<a href="#">阅读</a> 年 远- 苑月	皖、赣、两湖暴雨洪涝	<a href="#">阅读</a> 多	
<a href="#">阅读</a> 年 苑- 愿月	河北、山西暴雨洪涝及 <a href="#">阅读</a> 号台风	<a href="#">阅读</a>	死亡 <a href="#">阅读</a> 余人

灾害对房屋，工厂，及铁道，公路，电力，通信，给水排水等基础设施的破坏，除造成巨大的直接经济损失外，还引起巨大的间接经济损失。主要是因停工、停产造成的经济损失，间接经济损失有时比直接经济损失还大。

[阅读](#) 破坏环境资源，影响城市可持续发展

灾害与环境有着密切的相互作用，环境恶化可以引发自然灾害，自然灾害又会促进环境恶化，从而影响社会经济的发展。如沙漠的迁移造成土地沙漠化，水源枯竭导致土地荒芜，土地盐碱化等，山体滑坡、泥石流等冲毁农田使之不宜耕作，这些都使环境恶化而影响生产的进一步发展。

灾害还会对资源产生不可逆转的破坏。如森林火灾、生物病虫害等直接破坏生物资源，干旱、风沙、洪水会破坏土地资源和水资源。而资源是人类生产、生活所必需的。因而，自然灾害对资源的破坏，对地区的生产发展产生不利的影响。

灾害的发生还对投资者产生不利影响。投资者希望投资得到回报，如果该地区灾害频发，战乱不断，环境污染，则投资者会望而却步，对区域的生产发展产生严重的阻碍作用。

近年来,随着世界人口的急剧增长和社会经济的迅速发展,资源危机和环境恶化问题日益突出,不仅对当代人构成直接危害,而且对后人的生存与发展亦形成潜在的威胁。因此,协调人口、资源、环境关系,实现人类可持续发展,已成为当今世界各国的共识。

国民经济的可持续发展受到多方面条件的制约,其中自然灾害是最直接的制约因素之一。因此,坚持不懈地推进全人类的减灾事业,不仅可以有效地保护当代人的生命安全,而且可以全面提高可持续发展能力。防灾减灾工程不会产生直接的经济效益,但是,它对生产发展的潜在作用是非常重要而不能被忽视的。

据统计,在发达国家中,自然灾害损失占国民生产总值和财政收入的比例均很小。如,美国灾害损失仅占国民生产总值的 0.01%,占财政收入的 0.01%;日本灾害损失仅占国民生产总值的 0.01% 或更低;而我国 1949 年以来的灾害损失则占国民生产总值的 0.01%,分别比上述发达国家高几十倍之多。可见,与发达国家相比,自然灾害对我国国民经济的影响更为严重。

## 4.1 我国历史上有关灾害的记载

夏朝是我国历史上第一个有文献记载及考古证实的王朝,夏、商、周朝历时约 2000 余年,这个时期的灾害记录主要来自先秦文献。

夏朝洪水灾害,因大禹治水而闻名于世。相传尧时全国许多地方发生特大洪水,推举鲧来治理水患,鲧采用堤防堵水,花了 9 年功夫,一事无成。这时,尧已亡,由舜即位,舜见鲧治水无方,便将他流放到羽山去了,而治水的工作由鲧的儿子禹来接替。禹认真总结父亲没有治好的教训,改变策略,采取疏导的方法,使水有了出处。他指挥大家先从下游开始治理,顺流而上,按照河水流经的山川平原,分而处置。禹工作起来兢兢业业,一心成就大业,忘掉了小家,曾 3 次从家门走过,而未曾踏进家门看望亲人。果然,13 年以后,经过禹的疏导,洪水通过新修河道,顺流而下。大禹治水成为我国减灾工程千古流传的佳话。

商朝旱灾很多,后人说过:“尧、禹有九年之水,汤有七年之旱”。汤指的是商朝第一个帝王。

据邓云特《中国救荒史》统计,周朝发生旱灾 3 次,水灾 1 次,蝗(虫)灾 1 次,地震 3 次,歉饥灾 1 次,霜雪 3 次,雨雹 3 次,瘟疫 1 次,共计 16 次。由于大旱,周朝的诸侯各国经常发生饥荒。秦汉以后,中国史书对自然灾害更有较详细的记载。

秦汉时期(公元前 221 年~公元 220 年),共发生过 3 次巨大的经济浩劫,都与自然灾害有关。一次在秦汉之交,一次在西汉末年,一次在东汉末年至三国时期。连年不断的自然灾害,饥荒,瘟疫和战争,造成人口的大量死亡。曹植描述当时的情景是“家家有强尸之痛,室室有号泣之哀,或阖门而殪,或举族而丧”。

三国两晋时期（**公元- 源年**），各种天灾人祸以排山倒海之势从四面八方向北方压来，整个黄淮流域大都是荆棘载途，人烟断绝。

南北朝时期（**源- 缘年**），经济基础十分薄弱，水、旱、虫、蝗多次灾害给社会生活造成毁灭性打击。

隋唐时期（**缘- 怨年**），唐朝前期为中原古代社会经济获得高度发展的一个时期，约 **源** 余年的“河清海宴”和“物殷俗阜”景象，自然灾害虽次数不少，但规模不大，农业经常丰稔。但安史之乱后，天灾人祸一起涌来，一次大旱，便造成人相食的悲剧；一次瘟疫，竟死人七八成，原先繁华的城市也变成了废城。

五代时期（**怨- 怨年**），有一次河南发生蝗虫灾害（**怨年**），饿死者以千万计。

北宋时期（**怨- 源年**）时期，朝廷奖励农桑，兴修水利，农业迅速恢复和发展，国民经济持续发展。但金兵南下后，黄河流域的发展成就又被破坏饥荒瘟疫随之而来，北方又成了荒草千里、烟火断绝之地。

南宋时期（**源- 源年**），小朝廷在临安建都，由于江南的自然条件比北方优越得多，临安城成为世界上有名的繁华都市。地方志、记载了不少当时的自然灾害，如在 **源** **源** **源** **源** **源** 等年发生严重水灾，不少次死亡人数在万人以上，**源** **源** 年发生严重旱灾，饿死的人数在 **源** 万以上。可见，自然灾害的频繁发生，也在很大程度上抑制了南宋社会经济的发展。

元朝（**源- 源年**）是中国社会经济的大倒退时期。兵燹、饥馑和疾瘟，祸不单行。**源** 年山西洪洞发生大地震，有记载称死亡 **源** 万多人。**源** 年黄河在郑州决口，淹没 **源** 万多家。**源** 年，陕西大旱，饥民达 **源** 万人。**源** 年，峡州、归州、安陆、沔阳有 **源** 万户发生饥荒。**源** 年，浙西水灾、旱灾，灾民 **源** 万户。**源** **源** 年，河南饥疫，民死过半。

据邓云特《中国救荒史》统计，明清时全国发生旱灾 **源** 次，水灾 **源** 次，蝗（虫）灾 **源** 次，地震 **源** 次，歉饥灾 **源** 次，霜雪 **源** 次，雨雹 **源** 次，瘟疫 **源** 次，风灾 **源** 次，共计 **源** 次。

明初及中叶，各种灾害也频频发生，著名的如 **源** 年关中大地震，死亡 **源** 万人，另外还有 **源** 余起死亡万人以上的水、旱、饥荒之灾。然而，明末灾情更为严重。如万历（**源- 源年**）**源** 年中发生了 **源** 年的灾荒，**源** 年淮安百万人死于饥荒。明末崇祯年间（**源- 源年**）几乎年年有灾，年年重灾。

清代的乾隆、嘉庆、道光年间，农民土地被官僚掠夺，灾害开始在数量和严重程度大大上升。许多年份因灾害造成的死亡人数居高不下，如 **源** 年死亡 **源** 万人，**源** 年死亡 **源** 万人，**源** 年死亡 **源** 万人，**源** 年死亡 **源** 万人，**源** 年死亡 **源** 万人，**源** 年死亡 **源** 万人，**源** 年死亡 **源** 万人等。

鸦片战争后，各帝国主义势力开始侵入我国，直到 1949 年解放前，中国人民一直处在水深火热之中。民国于 1911 年成立后，仅见官方公布和新闻报道的自然灾害，就十分惊人。如 1911 年陕西、河南等地大旱，灾民 1000 万人；同年 8 月，海原大地震，死亡 10 万人。1914 年，湖北省旱灾，江苏、浙江等省发大水，灾民达 1000 万。1918 年 10 省水、旱灾，死亡数十万人。1920 年四川省饥荒，灾民 1000 万人。1925 年山西等省发大水，河北、山东等省旱灾，灾民有 1000 万人。1928 年，陕西、甘肃等省大旱，灾民 1000 万人。1930 年陕西、山西等省水、旱、虫、风灾，灾民 1000 万人。1931 年，江苏、安徽等省大水，灾民数千万。1932 年，黄河决口，灾民 1000 万人。1933 年，黄河、长江泛滥，灾民 1000 万人。1934 年，安徽、四川等省旱灾，灾民 1000 万人。1935 年，黄河花园口决口，死亡 10 万人。1936 年，河北省水灾，灾民 1000 万人。1937 年，广东台山县大旱饥荒，死亡 10 万人。1938 年，湖北省公安县旱、涝、疫灾，死亡 10 万人。1939 年，湖北省水灾，灾民 1000 万人。

表 4-1 揭示灾害危害程度、性质、特征，主要从生命、财产损失，成灾规模等方面进行了统计。（资料依据主要是卢振恒的《纪元以来世界部分自然灾害简明参考年表》）。从表中可以了解到我国地震、洪水、干旱饥饿、风暴、海啸灾害、火灾、瘟疫、寒冻、泥石流与滑坡等九种（类）自然灾害所造成人员死亡和经济损失的情况。时间从公元 1000—1949 年（见表 4-1）。

表 4-1 公元 1000—1949 年中国自然灾害分类表

灾害种类		旱灾	水灾	地震	海啸灾害	瘟疫	寒冻	风害	泥石流 滑坡	火灾	合计
性质	人数 万人	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	10000000
	占 豫	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000			1000000
累计死亡	频数	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	占 豫	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
平均	每次死亡 万人	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	年死亡 万人	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
最大灾害	死亡 万人	1000000	数百万	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	
	经济损失 亿元	难以估算	1000000	1000000	1000000		1000000	1000000		1000000	
发灾时间	最长	1000000	1000000					1000000	1000000	1000000	
	区间	日→十 几年	时→日	秒→日	分→时	日→季	分→日	秒→分	分→日	分→日	
最大成灾范围		全国大旱	1000000	1000000	1000000	省、县	省、县	1000000	1000000	1000000	

从表 1-1 可看出，危害（造成死亡）最大的是干旱饥饿，总死亡人数 145 万人，占九种灾害死亡人数 145 万人的 70%；其次是洪水灾害，死亡人数 35 万人，占总死亡人数的 24%；第三是地震灾害，死亡 10 万人，占总死亡人数的 7%；瘟疫灾害死亡 5 万人，占总死亡人数的 3%；海啸灾害死亡 2 万人，占总死亡人数的 1%。干旱灾害死亡人数为洪水灾害死亡人数的 4 倍，为地震死亡人数的 14 倍，为海啸灾害死亡人数的 72 倍，等于瘟疫死亡人数的 29 倍。干旱、洪水两灾死亡人数占九种灾害死亡总数的 94%。

九种灾害一次性成灾造成生命、财产最大损失和成灾范围，干旱为最大，一次成灾最多死亡人数达 145 万人，经济损失之大难以估算；水灾居二，死亡人数达数百万，经济最大损失达 100 多亿元。

每次灾害平均死亡人数，旱灾为 145 万人，水灾为 35 万人，地震为 10 万人，寒冻 5 万人，瘟疫 5 万人，海啸灾害为 2 万人……。

从公元 100~ 1949 年这个时段可以看出，每年平均死亡旱灾是 145 人，水灾 35 人，地震 10 人，海啸灾害 2 人，瘟疫 5 人，风灾 2 人，寒冻 5 人……，旱灾占总死亡人数年均 145 人的 70%，旱灾每年平均死亡人数大于其他八种灾害每年平均死亡人数之和。

我们把各种灾害的发生分为三个时段：①封建社会时期（公元 100~ 1949 年）；②半封建半殖民地时期（1949~ 1949 年）；③社会主义时期（1949~ 1949 年）。通过统计分析，各时段自然灾害的频次和死亡人数见表 1-2

表 1-2 公元 100~ 1949 年我国自然灾害时段分布

社会性质 年限		封建社会			半封建半殖民地	社会主义
		100~ 1949 年	1949~ 1949 年	1949~ 1949 年	1949~ 1949 年	1949~ 1949 年
灾害种类	次数	猿	源	员	苑	
	死亡人数 万人	145	35	10	5	
洪水 涝灾	次数	缘	10	10	员	愿
	死亡人数 万人	35	10	10	2	1
地震	次数	10	10	2	5	怨
	死亡人数 万人	10	猿	1	猿	1
海啸 灾害	次数	员	愿	缘	员	猿
	死亡人数 万人	1	1	2	1	1
瘟疫	次数			员	员	
	死亡人数 万人			2	1	

(续)

<div>社会性质</div> <div>年限</div>		封建社会			半封建半殖民地	社会主义
		1949-1979年	1979-1989年	1989-1999年	1999-2009年	2009-2019年
灾害种类						
寒 冻	次数				10	
	死亡人数 万人				0.1	
风 暴	次数		10	15	20	10
	死亡人数 万人		0.1	0.2	0.3	0.1
泥石流 滑坡	次数					10
	死亡人数 万人					0.2
自然 火灾	次数			1		1
	死亡人数 万人			0.1		0.01
合 计	次数	10	20	15	30	10
	死亡人数 万人	0.1	0.2	0.3	0.6	0.1
年 平 均	次数	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1
	死亡人数 万人	0.01	0.02	0.03	0.06	0.01

性质不同，危害程度不同的灾害其对策不同。主要灾害（矛盾）是制定重大战略决策的依据。

就灾害的分布、时空、特征而论，水、旱灾害为我国内陆的重点灾害；地震则是城市的重点灾害；海啸灾害则是我国沿海岸市（地）的重点灾害。

研究我国重点灾害的分布、时空特征、明确不同战略重点，亦为制定我国防灾减灾合理决策所必需。

四.1 世界七大洲主要灾害简介

根据杂志文章（延军平，1995）分别简要介绍七大洲灾害发生情况

四.1.1 亚洲主要灾害

亚洲是世界上灾害最多的一个洲，自然灾害、人为灾害此起彼伏，所带来的灾难巨大。

四.1.1.1 地震 亚洲位于两大地震带相交会的地方，地震灾害最突出，特别是日本、中国更为频繁。日本有“地震国”之称，日本附近地区平均每年释放的地震能估计占全球的 1/3 左右，每年平均发生地震 2000 次，其中有感地震 1000 次，破坏性地震 100 次。

我国是世界上蒙受地震灾害最深重的国家，仅 1976 年 7 月唐山地震死伤 15 万人，经济损失达 100 亿元。

火山 特别在日本，共计有火山 300 多座，活火山约 100 座，约占世界活火山的 1/3，分别分布在八条火山带上。

沙漠化 沙漠化在中国、印度最为突出。我国沙漠化面积已达 160 万  $\text{km}^2$ ，其中有 100 万  $\text{km}^2$  是人为造成的并以每年 1.5 万  $\text{km}^2$  的速度扩大，其中毛乌素沙漠边缘近 10 年间向前移动了 100 多米。印度塔尔沙漠约 100 万  $\text{km}^2$ ，其边缘每年向前推进 100 多米。

水土流失 中国、印度的水土流失最为突出。我国黄土高原区水土流失严重，印度有 100 万  $\text{km}^2$  的土地受到侵蚀。

植被减少 这是一个普遍现象，但以东南亚最为严重，马来西亚热带雨林的植物群落虽然是世界上物种最丰富的，但消亡的速度却非常惊人。

环境与污染 酸雨影响日本和中国，广大地区均面临酸雨威胁。  
人口、粮食问题 亚洲受饥人口约占全世界受饥人口的 1/3，特别是越南、柬埔寨、阿富汗等国家更为突出。

森林火灾 主要在原苏联亚洲部分、中国等国家的温带地区。在 1987 年 5 月、6 月份，原苏联赤塔州发生森林火灾 100 起；同年 6 月底，阿穆尔州国家森林发生火灾 100 起，集体农庄和国营农场的森林发生火灾 10 起。1988 年 6 月，中国东北发生了特大森林火灾，过火面积达 100 万公顷，其中森林面积约 10 万公顷直接经济损失 10 亿元。

## 欧洲主要灾害

欧洲自然灾害比较少，但工业化程度高，人为环境污染很严重。  
酸雨 由于大气污染，臭氧含量成倍上升，加剧了酸雨的形成。由于酸雨的影响，瑞典有 100 个湖泊酸化，大量鱼类死亡；挪威南部有 100 个湖泊里的鱼类绝迹。由酸雨直接造成的破坏现象更普遍，联邦德国、中欧和北欧曾在一年内因酸雨毁坏了 100 万公顷森林。

污染 由于欧洲大气污染普遍，水污染也很严重，特别是莱茵河、地中海污染更严重，其中每年有 100 亿吨垃圾倾入地中海，100 米的海滩不符合卫生标准。

森林火灾 森林火灾以法国最为普遍，主要发生在 6 月份的夏干季节，为此法国政府制定了有关法案，来防止森林火灾。

## 非洲主要灾害

非洲大陆是一块古老稳定的大陆，地质灾害较少，但气象灾害不少，而且人为灾害也较严重，这种人为灾害不同于欧洲工业化后产生的人为灾害，而是处于



较低利用阶段的人为灾害。

**荒漠化** 在沙漠的边缘,即在稀树草原区,由于人为滥垦、滥樵、滥牧,导致沙漠向湿润区扩散。如在撒哈拉沙漠南部,沙漠每年向毛里塔尼亚推进  $100\text{ km}$ 。

**人口问题** 人口增长过快,生活水平下降。

**粮食问题** 由于人口增加过快,粮食供给不能保证,大部分国家不能自给。世界有  $1/3$  个最不发达国家,其中  $1/2$  个在非洲。

**旱灾** 周期性的旱灾给非洲带来巨大影响。在  $1969\sim 1984$  年的旱灾期间,约有  $1000$  万人死亡, $1000$  万人流离失所。

**动物灭绝** 非洲是世界上大型哺乳动物种类、数量最多的一洲,由于人为守猎,许多动物濒临灭绝,如犀牛总数由  $1960$  年的  $10000$  头下降到  $1984$  年的  $1000$  头。

## 四、北美洲主要灾害

北美洲灾害以自然、人为并重为特点。自然灾害有陆龙卷、飓风、地震等,人为灾害有酸雨、森林火灾等。

**陆龙卷** 即黑风暴, $1934$  年  $4$  月在美国西部大草原区刮起黑风暴,大气含尘量达  $1000\text{ mg/m}^3$ ,毁掉耕地  $1000$  万亩。

**飓风** 形成于墨西哥湾,影响美国南部地区。

**地震** 北美位于环太平洋地震带,火山地震灾害频繁,有不少火山在活动。如美国圣海伦斯火山等。墨西哥地震、火山均有,特别是  $1985$  年  $9$  月,墨西哥城发生  $7.5$  级地震,死亡  $1000$  人,伤  $10000$  人, $1000$  多人下落不明, $10$  万人无家可归。

**酸雨** 北美酸雨是一大公害,在加拿大大西洋沿岸各省,有许多湖泊的酸度曾在  $10$  年内增加了  $10\sim 100$  倍,约有  $1000$  个的酸性沉降物来自美国。美国东北部空气污染, $1000$  是人为造成的,约有  $1000$  个湖因受酸雨影响而变质,农作物、森林也遭殃。

**森林火灾**  $1984$  年  $4$  月加拿大发生森林火灾,波及  $10$  个省,仅在安大略省就有  $1000$  个火灾源,烧毁  $100000$  公顷森林。

## 四、南美洲主要灾害

**厄尔尼诺现象** 在秘鲁西海域,由于秘鲁寒流势力减弱,造成冷性鱼类死亡,给秘鲁造成经济损失;其次厄尔尼诺现象还对全球气候有影响,一些地方暴雨成灾,一些地区异常干旱。

**森林过度砍伐** 在亚马逊热带雨林,每年减少  $1000$  万  $\text{hm}^2$  森林。巴拿马运

河流域的森林覆盖率从 1950 年的 80% 减至 1980 年代的 30% 左右。由于亚马逊河流域 80% 的雨水是由森林本身产生的，是“世界之肺”，因此保护亚马逊森林，具有全球意义。

1982 年 11 月 13 日，哥伦比亚鲁伊斯火山喷发频繁，曾有一次使 2 万人死亡，10 万人受伤，受灾居民 150 万，并且于半年后再次活动。

二、大洋洲主要灾害

大洋洲灾害相对较少，特别是澳大利亚大陆，自然灾害更少。

1994 年 12 月 16 日，新西兰、太平洋岛屿上的地震较多。

1998 年 10 月 1 日，澳大利亚大陆上，有牛粪、野兔、仙人掌等造成的灾害。

1998 年 10 月 1 日，澳大利亚盐碱化最为严重，盐碱化面积占世界盐碱化总面积的 1/3，居世界第一。

三、南极洲主要灾害

1998 年 10 月 1 日，这一灾害一方面是厚度减小，另一方面使海平面上升，危及全球沿海大城市。

1998 年 10 月 1 日，来自其他洲的污染物质造成。

1998 年 10 月 1 日，全球气候变暖，水域缩小，水体污染，这些都危及极地稀有动物的生存。

## 第 4 章 国内外防灾减灾的发展简况

人类与自然灾害的斗争从远古时代就开始了。在我国，古代传说的“羿射九日”最可能是人类与干旱作斗争的映射；而中国家喻户晓的“大禹治水”就是人类与洪水作斗争的光辉记录；东汉张衡发明的地震仪是我国抗震研究的一大成果。所以说历朝历代均对自然灾害的防治上做过很大努力。国外对抗震、抗风等方面的研究开始得也很早。尤其是到了近代对抗震减灾的研究已取得了巨大进展。

本章只对近几十年来国内外的一些重大事件作简要介绍，从中可以看到包括中国在内的世界各国对防灾减灾工作的重视。

### 4.1 国际减轻自然灾害十年

1989年12月22日第43届联合国大会一致通过了第43/180号决议。决议确定从1989—1999年亦即20世纪最后十年在全世界范围开展一个“国际减轻自然灾害十年”（简称“国际减灾十年”）的国际活动。其宗旨是通过国际上的一致努力，将当前世界上各种自然灾害造成的损失，特别是发展中国家因自然灾害造成的损失减轻到最低程度。这种基于共同减灾目标的建立起来的广泛协作，简要地说，就是要求各个国家政府和科学技术团体、各类非政府组织，积极响应联合国大会的号召，并在联合国的统一领导和协调下，广泛开展各种形式的国际合作，通过技术转让和援助，项目示范，教育培训，推广应用现有行之有效的减轻自然灾害的科学技术，以及开展其他各种减轻自然灾害的活动，从而提高各个国家，特别是第三世界国家的防灾、抗灾能力。

“国际减轻自然灾害十年”的设想最初是由美国前总统卡特的科学特别助理、美国国家科学院院长，地震学家云锡爵博士在1984年的第12届世界地震工程会议上提出来的。此后，1985年联合国成立了“国际减轻自然灾害十年”指导委员会，并由其所属的十多个部门（如联合国教科文组织、救灾署、开发署、环境署、世界气象组织、世界卫生组织、世界银行、国际原子能机构……）的领导担任委员。联合国秘书长根据国际学术团体的推荐，亲自聘请了来自10个国家的10位国际知名防灾专家组成了联合国特设国际专家组，由云锡爵担任主席。中国国家地震局谢礼立为该专家组成员。

1989年第43届联大通过了《国际减轻自然灾害十年决议》（第43/180号决议）及《国际减轻自然灾害十年国际行动纲领》并建立了相应的机构。纲领明确了国

际减轻自然灾害十年的目的、目标和国家一级需采取的措施及联合国系统需采取的行动等，并规定每年 12 月的第二个星期三为“国际减轻自然灾害日”。其目的是：通过国际社会协调一致的努力，充分利用现有的科学技术成就和开发新技术，提高各国减轻自然灾害的能力，以减轻自然灾害给世界各国，特别是发展中国家所造成的生命财产损失。其主要活动内容是：注重减轻由地震、风灾、海啸、水灾、土崩、火山爆发、森林火灾、蚱蜢和蝗虫、旱灾和沙漠化以及其他自然灾害所造成的生命财产损失和社会经济失调；增进每一个国家迅速有效地减轻自然灾害的影响的能力，特别注意在发展中国家设立预警系统；要求所有国家政府都要拟订国家减轻自然灾害方案；鼓励科学和技术机构、金融机构、工业界、基金会和有关非政府组织，支持和充分参与国际社会包括各国政府、国际组织等拟订和执行的各種减灾十年方案和活动；推动宣传与普及民众防灾知识，注意备灾、防灾、救灾和援建活动等。随之，一些国际组织和国际减灾委员会建立了许多防灾减灾项目，如“联合国全球灾害网络”，“全球大区的台风监测计划”，“欧洲尤里卡计划”，“美国飓风、洪水预报及减轻灾害研究”，“日本防灾应急计划”等，并取得了许多研究成果。

1999 年 12 月 18 日我国正式成立“中国国际减灾十年委员会”，由当时的国务院副总理田纪云出任委员会主任，目标是到 2000 年使自然灾害的损失减少 10%。

每年的国际减灾日主题（口号），由联合国国际减轻自然灾害十年科学技术委员会根据 1994 年活动的进程和减灾工作的重点提出，由联合国国际减轻自然灾害十年秘书处发布。例如，1995 年的国际减灾日主题是：“妇女和儿童——预防的关键”。

此外，国际和国内每年都确定一些专门的日子来展开专题活动，如：土地日、水日、人口日等，全部都是与防灾、减灾有关的。

## 2. 中国政府的减灾行动

（1）在《中国 21 世纪议程》中，明确了以可持续发展为核心，为我国的防灾、减灾工作提供了依据。1995 年建设部公布了《城市建筑综合防灾技术政策》纲要，把地震、火灾、洪水、气象灾害、地质灾害列为五大灾种，提出了防灾、减灾的各种技术措施。

（2）由于影响国家安全生产及安全生活的特、重大事故和环境公害突发事件越来越多地集中在城市，因此我国《21 世纪国家文化安全建设纲要》中特别强调了城市综合减灾研究是 21 世纪中国最值得关注的保障技术之一。

1995 年在日本横滨世界减灾大会上发布的《中国减灾规划》，不但从宏观的战略高度提出了我国国家减灾目标与战略，标志着我国在社会经济发展规划中开辟了“防灾减灾”这一重要窗口，同时它还提出要逐步提高工业基地、高风险区

域城镇、基础设施和高风险源的抗灾设施建设，以增强企业的防灾能力，此外，它要求到 圆园园年完成全国各级城镇的减灾规划，进一步提高城市防灾减灾设防标准，基本控制因灾造成的次生灾害。员九九年猿月编制完成的《员九九年中国自然灾害对策》白皮书作为我国科学家群体减灾智慧的结晶，已将中国城市灾害作为减灾重点之一，并强调在我国应首先从大城市、大区域上强化综合减灾能力的建设，这无疑城市防灾减灾工作的重大进展之一。

(猿) 逐步制定了一些有关防灾的法律、法规。我国政府陆续颁布与实施了《水法》(员九九年 苑月 员日施行)、《环境保护法》(员九九年 园月 园日施行)、《军事保护法》(员九九年 愿月 员日施行)、《人民防空法》(员九九年施行)、《防洪法》(员九九年 员月施行)、《防震减灾法》(员九九年 猿月施行)、《消防法》(员九九年 缘月 员日施行)、《减灾法》(员九九年施行)、《防沙治沙法》(圆园园年 员月 员日施行)、《职业病防治法》(圆园园年 缘月 员日施行)、《安全生产法》(圆园园年 贡月 缘日施行)等一系列防灾法规，规定了各级政府防御和减轻城市灾害的责任，这必将促进我国城市防灾事业和城市防灾学科的加速建立。

## 猿猿 国内外一些主要的防灾、减灾学术刊物

在近 员- 圆年内，一些有关灾害学的学术刊物在世界范围内陆续创刊。比较知名的分别有美国、英国、日本、瑞典等国创办、出版的《自然灾害观测者》、《火》、《灾害》、《自然灾害科学》、《灾害管理》、《意外事件》、《自然灾害研究委员会通讯》等刊物。我国于 员九九年创办了《灾害学》杂志，随后由中国灾害防御协会主办、国家地震局工程力学所承办的《自然灾害学报》于 员九九年创刊，《中国减灾》、《中国减灾报》也是综合减灾的专业报刊。此外，《地震工程》、《火灾科学》、《消防科技与产品》、《安全科学》、《土木工程学报》、《地质学报》、《气象学报》、《岩土工程学报》等刊物均有对各种灾害的研究、报道。

# 第 9 章 土木工程防灾减灾工程学科的形成

## 9.1 灾害意识和灾害教育

灾害意识不是天生的，是要通过人们的直接与间接经验的不断积累才能逐步提高。这就需要灾害教育。在人类面临日益严重的灾害的挑战时，灾害知识和灾害教育就显得格外重要。地球已经不堪重负，人类如果不能清醒认识到由于人类自身的繁衍与发展活动已造成的对人类生存和发展的严重威胁的形势，而任其发展，则人类将正在为自身的大劫难创造条件。这就需要灾害教育的尽快发展以及灾害知识的尽快普及。

人们在无数的灾害中所付出的巨大代价中已经认识到：灾害面前的无知是人类的最大灾害；国民的灾害意识水平已成为衡量一个国家文明进步的标识。

通过下面一些实际例子我们可以了解加强灾害意识，开展灾害教育的重要性。

(1) 1987 年大兴安岭发生森林大火，经济总损失超过 200 亿元，是国内损失最大的一次火灾。其实此前已有过两次前车之鉴：一次是在此前不久，隔江的俄罗斯也发生过森林大火；另一次是 1986 年大兴安岭森林大火，过火面积超过 1987 年的一半以上。然而，我们没有能从中吸取应有的经验教训。所以，1987 年的巨大损失与灾害意识不强、防灾措施不力有很大关系。

(2) 哈尔滨曾有一家天鹅饭店失火，烧死中外宾客多人，唯独没有伤害到日本宾客。关键是由于日本开展灾害教育较好，日本人的防灾意识较强，他们对宾馆的防火特点等事前就有所了解，所以可以应付自如地脱险。

(3) 遇到灾害时不要慌乱，要冷静应对。例如，在南方的一个大学里，在一次很轻微的地震中，一个学生因惊恐而急速从二楼向窗外跳出，结果他再也起不了床，而其都因为没有挪动而平安无事。

(4) 1985 年在南方沿海，1985 年特大风暴潮到来之前几小时，各有关县等已接到上级部门的通知，但因无法通知已出海作业的渔船，结果导致 100 多人死亡和 100 亿元的直接经济损失。其实，只要每条船上配备一个汉显 1 手机（这在当时无论从经济上或技术上都是易于做到的），就完全可以避免灾害事故的发生。

(5) 1985 年 8 月 1 日新疆克拉玛依市一个礼堂失火，在场的 200 多人中有 100 多人葬身火海，其中绝大部分是学生。其中有一个 10 岁男孩，凭着他从电视节目中了解到的厕所适宜躲避火灾的知识，就带着他的表妹躲到厕所里，结果两人因此而躲过了灾难。

(远) 1986年岁末, 印度洋地震引起巨大海啸, 造成约 10 万人丧生, 据《环球时报》报道, 一名 10 岁的英国小女孩仅凭自己在课堂上学到的知识, 在大海啸中救了几百人的生命。这位小英雄叫缇丽, 海啸来临当天, 她正与家人在泰国普吉岛海滩享受假期。就在海啸到来前几分钟, 她的脸上突然露出惊恐之色。她告诉母亲必须马上离开沙滩, 因为她看见海滩上起了很多泡沫, 然后浪头就突然打了过来, 这正是地理老师曾经描绘过的有关地震引发海啸的最初情形, 可见海啸即将到来。她还记得老师说过, 从海水渐渐上涨到海啸袭来, 这中间大约只有 10 分钟左右的时间。起初, 在场的成年人对她的预见都是半信半疑, 但缇丽坚持请求大家离开沙滩。当几百名游客传告着相继离开时, 海啸果真到来了! 人们在激动和惊恐中哭泣, 争相感激地拥抱缇丽。当天, 这个海滩是普吉岛海岸线惟一没有死伤的地点。

从人类已付出的巨大代价的史实中吸取宝贵的经验与教训, 给予人们对付灾害的最新的科学知识和一些应急、自救、互救的方法, 以提高人们的防灾、减灾、抗灾的能力, 提高国民的灾害意识, 从而提高整个民族的素质, 为抵抗各种灾害、降低灾害损失筑起一道无形的新的长城。这就是灾害教育的目的、意义和任务, 也是开设《防灾减灾学》这门课程的宗旨之一。

## 9.1 防灾减灾学科的建设

### 9.1.1 从不同角度看防灾减灾学科的发展

灾害是向科学的挑战, 也是发展科学的机遇。当代科学发展的一个特点是多学科交叉, 在交叉中相互促进, 并求得共同发展甚至有所突破。灾害研究涉及的范围上至天文, 下涉地理, 包括自然科学、工程科学、经济学、社会科学等许多方面。因此, 灾害研究需要多种学科的交叉才能发展, 灾害研究也为多种学科的发展提供了新的机遇。

(1) 从自然科学方面看, 各个学科分支对各单种灾害的成灾机理、发生发展过程进行了大量研究, 希望从中找到预测规律, 用于预测预防。现在这种研究随着现代科学技术手段的发展而更加深入地进行。灾害与生态环境关系的研究也十分重要。

(2) 从工程科学方面看, 从防灾规划、工程抗灾技术、工程防灾减灾技术、灾后工程建筑修复技术以及各种灾害预测预报的仪表、仪器及系统等均有很大的研究空间。

(3) 从经济学方面看, 研究的课题有灾前物资储备、灾害损失评估、灾害保险、灾害对生产发展的影响等。

(4) 从社会学方面看, 对灾害预报、灾情发生时的政策制定、灾害事件的应

急预案、灾害时保持社会稳定、灾害时人的心理行为研究等问题均应深入研究并提出对策。

### 源 防灾减灾学科

研究发展过程中学科间交叉发展的实例。

(员) 美国力学家赖斯在 愿世纪 远年代偶然对滑坡和泥石流灾害感到兴趣，因而集中精力和一位水文地质学家一起研究滑坡问题。他们发现滑坡发生在雨季，设想雨水对滑坡的产生有着重要的影响。因此，赖斯把滑坡带从理论上抽象为材料科学中的一条裂纹，他这样做的结果，不仅从理论上很好地解释了滑坡产生的条件，滑动的准则，而且他所用的方法，反过来又极大地促进了金属材料断裂力学的发展。赖斯在解决地质滑坡问题时所提出的 允积分方法，目前也是断裂力学中的重要方法。

(圆) 地球的北纬 猿线附近是历史上大地震常发生的地域。但是，最早找出这规律的是法国的数学家 粤，微隆内 (粤即滇州)。他在 愿年发表的博士论文中明确指出，南、北 猿纬线应当成为地壳断裂的位移带，这一纬度是地球自转不平衡导致的椭球变形时的不动线，因此他认为南、北 猿纬线是地球上大地震的主要分布带。此后有不少学者论及南、北 猿纬线附近两侧的地质现象的特殊性，并从多方面说明此现象。事实上，包括中、日、美等国的大地震记录表明，确实很多次大地震是发生在北纬 猿附近。

(猿) 灾害研究促进材料科学的发展。愿世纪钢铁材料在机器中的广泛应用曾引发一些灾害事件。最典型的是 愿世纪中叶在欧洲多次发生火车车轴断裂引起的车毁人亡的灾害事件。对这类灾害的研究，使材料科学发展出一种新的试验方法和一个新的分支学科——金属疲劳 (粤即疲劳)。疲劳研究成果解决了火车车轴断裂问题，为防止这类灾害找到了对策。至今，材料的疲劳问题仍是材料科学的重要分支学科之一，而且研究的对象从金属扩展到陶瓷、复合材料等。多种工程结构仍需从设计、制造、加工、使用、监测多方面来注意预防这类灾害的发生。

又如对地震的监测研究，大大推动了对地球内部构造和矿产勘察的研究进展。

上述例子说明灾害研究与多种学科发展是紧密相关的。事实上，灾害研究中广泛应用着从数、理、化的基础学科知识到工程学、计算机等现代技术。相信学科的交叉必能产生一些有创意的想法，反过来又促进各学科的发展。

正因为灾害科学涉及面如此之广，所以灾害学作为一个学科的形成就比较晚。尽管其界定在目前还没有统一的认识，但在国家技术监督局于 员年 员月 员日发布的国标《学科分类与代码》中已将“安全科学技术”正式列入一级学科



(代码 110101)。“安全科学技术”学科理论的诞生对城市防灾学科的发展具有重大意义。这是因为,安全科学主要是研究危及安全的各种原因、对策及安全心理学,研究消除或控制影响安全的因素和转化条件的理论和技术。它着重研究安全的本质及其运动规律,并试图建立安全、高效的人机规范和形成人们保障自身安全的思维方法和知识体系。现行“安全科学技术”学科框架中的灾害理论、安全理论、安全工程技术、卫生工程技术、安全管理工程等分支学科,均可以为防灾学学科建设提供支撑条件。

## 9.1 土木工程防灾减灾学科的主要内容

20 世纪 80 年代,中国学位委员会在整理、调整博士点学科时,将“防灾减灾工程及防护工程”列为工科一级学科“土木工程”中的一个二级学科。此后,许多高校成立了相应的研究所,设立硕士点和博士点以培养这方面的高级专业人才。

仔细推敲起来,灾害之所以造成人员伤亡和财产损失,与土建工程确实有很大关系。唐山地震时死伤的绝大部分人并非“震死”,而是房屋震塌后砸死的,处在效区地面空旷处的人最多跌倒致伤,一般不会死亡。而财产损失有一大半集中于损毁的房建(民住,工厂,公共建筑)中。因而土木工程师对防灾减灾负有巨大责任。所以,本课程主要涉及与土木工程有关的灾害,如地震、火灾、地质灾害、风灾等,当然也涉及城市突发事件引起的灾害,如恐怖爆炸等。

土木工程防灾减灾学科的主要内容包括:

- (1) 土建工程(城市)防灾规划。
- (2) 土木工程结构抗灾理论。
- (3) 土木工程结构防灾、抗灾技术理论及应用。
- (4) 土木工程减灾技术。
- (5) 土木工程结构在灾后的检测与加固。
- (6) 高新技术在土木工程防灾、减灾中的应用。

当然,因灾害涉及的学科较多,灾种间还有交叉,各地区灾害面临的重点有所不同,所以土木工程防灾减灾学的内容可以扩展,而实际上也需要不断的发展与完善。

# 第 四 篇 火 灾 灾 害

## 第 一 章 火 灾 灾 害 概 论

### 一、火灾的危害及特点

火的使用是人类最伟大的发明之一，是人类赖以生存和发展的一种自然力。可以说，没有火的使用，就没有人类的进化和发展，也就没有今天的物质文明和精神文明。当然，火和其他物质一样也具有两重性，它给人类带来了文明和幸福，促进了人类物质文明的不断发展。但是火也给人类带来了巨大的灾难，由于人类自身的不慎和其他自然原因，火也会给社会生产和生活带来无法弥补的巨大损失。火灾是各种自然灾害中的最危险、最常见、最具毁灭性的灾种之一。火灾出现的概率之高，以及它对可燃物的敏感性和燃烧蔓延的快速性都是十分惊人的。

### 二、火灾的属性

火灾是指失去控制的火，在其蔓延发展过程中给人类的生命财产造成损失的一种灾害性的燃烧现象。它可以是天灾，也可以是人祸。因此火灾既是自然现象，又是社会现象。火灾灾害的属性按照物质运动变化产生燃烧的不同条件可以分为自然火灾和建筑物火灾。

自然火灾是指在森林、草场等一些自然区发生的火灾。这类火灾的起因有两种，一种是由大自然的物理和化学现象引起的，有直接发生的，如火山喷发、雷火等，也有条件性的次生火灾，如干旱高温的自燃、地下煤炭的阴燃等；另一种则是由人类自身行为的不慎所引起的火灾。这类火灾发生的次数不多，但其火势一般都较大，难以扑灭，例如森林、煤矿火灾等。

建筑物火灾是指发生于各种人为建造的物体之内的火灾。事实证明，最常见、最危险、对人类生命和财产造成损失最大的还是这类发生于建筑物之中的火灾。

自然性火灾有的危害时间很长，新疆阜康煤田从清代一直延烧到 1955 年才被扑灭。有的危害规模很大，1987 年 5 月大兴安岭发生的特大森林火灾蔓延 60 万公顷，总损失 10 多亿元。1997 年 10 月印度尼西亚的森林火灾，产生的烟尘甚

至使邻国机场关闭，给东南亚的生态系统造成长期的影响。而且，自然性火灾发生的频率也很高，~~圆园年~~缘月至愿月之间俄罗斯发生过缘次森林火灾，烧毁~~圆公顷~~公顷植物。

建造物火灾近年来成为城市的第一灾害。

缘缘 火灾的危害

据统计，世界上发达的国家每年的火灾损失额多达几亿甚至十几亿美元，占国民经济总产值的 ~~园~~ ~ ~~缘~~。美国 ~~缘~~年至~~缘~~年间，每年平均发生~~猿~~万起火灾，死亡人数~~愿~~人，直接经济损失折合人民币达~~愿~~亿元。日本~~缘~~年发生火灾~~远~~万起，经济损失达~~员~~亿日元。英国、加拿大、澳大利亚等国家的情况同样严重。表 ~~缘~~给出了一些国家火灾直接损失的情况。

事实上，火灾带来的间接损失大大超过其直接经济损失。一般可将火灾造成的直接、间接损失，人员伤亡损失，扑救消防开支，保险费用以及防火工程费用等统称为火灾代价。一些国家火灾间接损失额见表 ~~缘~~

据联合国“世界火灾统计中心”（~~宰云悦~~）近年来不完全统计，全球每年约发生~~远~~万至~~苑~~万起火灾，约有~~远~~至~~苑~~人死于火灾中。按各大洲分别统计的数字见表 ~~缘~~

我国的火灾次数和损失虽然比发达国家少得多，但也相当严重。我国 ~~圆~~世纪~~苑~~年代火灾年平均损失不到~~圆~~亿元，在~~愿~~年代平均每年发生火灾~~猿~~万起

表 ~~缘~~ 部分国家火灾直接损失的统计表

国 家	货币名称	<del>缘</del> 年	<del>缘</del> 年	<del>缘</del> 年	占 比例（豫）
匈牙利	福林				<del>园</del> （ <del>缘</del> - <del>缘</del> ）
西班牙	比赛塔				<del>园</del> （ <del>缘</del> ）
美 国	美元	<del>员</del>	<del>愿</del>	<del>怨</del>	<del>园</del>
德国	马克	<del>远</del>	<del>缘</del>	<del>缘</del>	<del>园</del> （ <del>缘</del> - <del>缘</del> ）
日 本	日元	<del>猿</del>	<del>源</del>	<del>猿</del>	<del>园</del>
加拿大	加拿大元	<del>员</del>	<del>员</del>	<del>员</del>	<del>园</del>
英 国	英镑	<del>员</del>	<del>员</del>	<del>怨</del>	<del>园</del>
奥地利	先令				<del>园</del>
芬 兰	芬兰马克				<del>园</del> （ <del>缘</del> - <del>缘</del> ）
新西兰	新西兰元	<del>员</del>	<del>员</del>	<del>员</del>	<del>园</del> （ <del>缘</del> - <del>缘</del> ）
瑞 典	克郎	<del>猿</del>	<del>猿</del>	<del>猿</del>	<del>园</del>
法 国	法郎	<del>员</del>	<del>员</del>	<del>员</del>	<del>园</del>
丹 麦	克郎	<del>圆</del>	<del>圆</del>	<del>圆</del>	<del>园</del>

(续)

国 家	货币名称	1985年	1990年	1995年	占 赔 偿 比 例 ( 豫 )
比利时	比利时法郎				10000 ( 10000 - 10000 )
挪 威	克郎	15000	10000	10000	10000原
澳大利亚	澳元	10000	10000		10000原 ( 10000 - 10000 )
瑞士	法郎				10000原 ( 10000 )
荷 兰	盾	10000	10000	10000	10000原

注：1985不包括没有火灾情况下的爆炸损失和恐怖分子的一些违法行为。

1990除日本以 10000 亿计算外，其余国家以百万计算。

表 100 部分国家火灾间接损失额

国家	占 赔 偿 比 例 ( 豫 )	国家	占 赔 偿 比 例 ( 豫 )
日本	10000原 ( 10000原 )	联邦德国	10000原
美国	10000原	瑞典	10000原
挪威	10000原 ( 10000 )	芬兰	10000原 ( 10000原 )
奥地利	10000原 ( 10000原 )	法国	10000原 ( 10000原 )
荷兰	10000原	英国	10000原

表 101 全球各大洲火灾情况统计表

	人口 100 万	火灾起数 100 万次 ( 豫 )	伤亡 100 万人 ( 豫 )
欧洲	10000原	10000	10000
亚洲	10000原	10000	10000
北美	10000原	10000	10000
南美	10000原	10000	10000
非洲	10000原	10000	10000
澳洲	10000原	10000	10000

以上，年平均损失不到 10000 亿元，年死亡人数为 10000~10000 人，烧伤人数更多。进入 1990 年代，特别是 1995 年以来，火灾造成的直接财产损失上升到年均十几亿元，年均死亡人数超过 10000 多人。据公安部消防局统计，1995 年至 1999 年 10 年间，全国共发生火灾 10000 万余起，死亡 10000 余人，伤 10000 余人，十年直接财产损失达 10000 多亿元。1999 年，全国共发生火灾 10000 万起，致死 10000 多人，致伤 10000 人，直接经济损失达 10000 亿元；1999 年，全国共发生火灾 10000 万起，致死 10000 人，致伤 10000 人，直接经济损失达 10000 亿元，比上一年增长 10000 左右。1999 年共发生火灾 10000 起，致死 10000 人，致伤 10000 人。

近年来，火灾现象呈现出复杂和多样化的趋势，值得关注的是现代城市人口、建筑、生产、物资集中的特点使火灾发生更为集中；各种新型材料的使用使 10000

可燃物种类增多, 燃烧形式和产物更加复杂, 火灾有毒气体危害问题突出; 各种新能源和电气产品的使用导致火灾起因更为复杂、多样和隐蔽; 高层、复杂、超高层建筑的增多使火灾扑救和人员疏散的条件恶化等。

## 5.1 火灾的分类

### 5.1.1 根据火灾损失的严重性对火灾级别进行划分

按照一次火灾事故所造成的人员伤亡, 受灾人数和财物直接损失金额, 将火灾分为三类:

(1) 具有下列情形之一的, 为特大火灾: 死亡 30 人以上; 重伤 100 人以上; 死亡、重伤 100 人以上; 受灾 300 户以上; 烧毁财物损失 1000 万元以上。

(2) 具有下列情形之一的, 为重大火灾: 死亡 10 人以上; 重伤 50 人以上; 死亡、重伤 10 人以上; 受灾 100 户以上; 烧毁财物损失 500 万元以上。

(3) 不具有上述两项情形的燃烧事故, 为一般火灾。

### 5.1.2 根据燃烧对象进行分类

在我国根据燃烧对象分类将火灾分为: 固体、液体和气体三类。

**固体类火灾** 指含碳固体可燃物质火灾, 一般在燃烧时能产生灼热的余烬。如木材、棉、毛、麻、纸张燃烧的火灾等。

固体物质是火灾中最常见的燃烧对象, 固体可燃物必须经过受热、蒸发、热分解, 固体上方可燃气体含量达到燃烧极限, 才能持续不断发生燃烧。其燃烧方式分为: 蒸发燃烧、分解燃烧、表面燃烧和阴燃四种。大多数固体可燃物是热分解式燃烧。由于固体可燃物种类繁多、用途广泛、性质差异较大, 导致固体物质火灾危险性差别较大, 评定时要从多方面进行综合考虑。

**液体类火灾** 指易燃、可燃液体火灾, 可熔化的固体火灾。如汽油、煤油、原油、甲醇、乙醇、沥青、石蜡火灾等。

可燃液体的燃烧实际上是可燃蒸气的燃烧, 因此, 液体是否能发生燃烧, 燃烧速率的高低与液体的蒸气压、闪点、沸点和蒸发速率等性质有关。

在不同类型油类的敞口贮罐的火灾中容易出现三种特殊现象: 沸溢、喷溅和冒泡。例如, 液体在燃烧过程中, 由于不断向液层内传热, 会使含有水分、粘度大、沸点在 200℃ 以上的重油、原油产生沸溢和喷溅现象, 造成大面积火灾, 这种现象称为突沸现象。能产生突沸现象的油品称为沸溢性油品。

液体火灾危险分类及分级是根据其闪点来划分的, 分为甲类 (一级易燃液体): 液体闪点小于 28℃, 例如汽油; 乙类 (二级易燃液体): 液体闪点大于等于 28℃ 小于 60℃, 例如煤油; 丙类 (可燃液体): 液体闪点大于等于 60℃, 例如

柴油、植物油。

**易燃类火灾** 指易燃、可燃气体火灾。如煤气、天然气、氢气、甲烷、乙烷、丙烷等火灾。

可燃气体的燃烧方式分为预混燃烧和扩散燃烧。可燃气体与空气预先混合好的燃烧称为预混燃烧，可燃气体与空气边混合边燃烧称为扩散燃烧。失去控制的预混燃烧会产生爆炸，这是气体可燃物火灾中最危险的燃烧方式。可燃气体的火灾危险性用爆炸下限进行评定。爆炸下限小于 10% 的可燃气体划分为甲类火险物质，如氢气、乙炔、甲烷等；爆炸下限大于等于 10% 的可燃气体划分为乙类火险物质，如一氧化碳、氨气、某些城市煤气。绝大多数可燃气体属于甲类火险物质，极少数才属于乙类火险物质。

**遇热类火灾** 指可燃金属火灾。如钾、钠、镁、钛、锆、锂、铝镁合金火灾。可燃金属引起的火灾之所以从 易燃类火灾中分离出来，是因为这些金属在燃烧时，燃烧热很大，为普通燃料的 10 倍，火焰温度较高，有的甚至达到 3000℃；并且在高温下其金属性质活泼，能与水、二氧化碳、氮、卤素及含卤化合物发生化学反应，使常用灭火剂失去作用，必须采用特殊的灭火剂灭火。

**带电类火灾** 指带电设备火灾。

**火灾分类** 根据火灾发生地点进行分类

**地上建筑火灾** 指发生在地表的火灾。地上建筑火灾包括民用建筑火灾、工业建筑火灾和森林火灾。民用建筑火灾包括发生在城市和城镇的一般民用建筑和高层民用建筑内的火灾，以及发生在商场、饭店、宾馆、写字楼、影剧院、歌舞厅、机场、车站、码头等公用建筑内的火灾。工业建筑火灾包括发生在一般工业建筑和特种工业建筑内的火灾。特种工业建筑是指油田、油库、化学品工厂、粮库、易燃和爆炸物品厂及仓库等火灾危险及危害性较大的场所。对于森林而言，林火是经常发生的现象，微小的火并不会给森林造成明显的损害。所谓森林火灾确切地说，是指森林大火造成的危害。森林火灾不仅造成林木资源的损失，而且对生态和环境构成不同程度的破坏。

**地下建筑火灾** 指发生在地表面以下建筑物内的火灾。地下建筑火灾主要包括发生在矿井、地下商场、地下油库、地下停车场和地下铁道等地点的火灾。这些地点属于典型的受限空间，空间结构复杂，受定向风流的作用使火灾及烟气蔓延速度相对较快，再加上在逃生通道上逃生人员和救灾人员逆流行进，救灾工作难度较大。

**水上火灾** 指发生在水面上的火灾。水上火灾包括发生在江、河、湖、海上航行的客轮、货轮和油轮上的火灾，也包括海上石油平台以及油面火灾等。

**空间火灾** 指发生在飞机、航天飞机和空间站等航天器中的火灾。特别

是发生在航天飞机和空间站中的火灾,由于远离地球,重力作用较小,甚至完全失重,属微重力条件下的火灾。其火灾的发生与蔓延与地上建筑、地下建筑以及水上火灾相比,具有明显的特殊性。

## 5.1 我国消防安全的现状和预防对策

随着我国经济建设的快速发展,城市规模和城市人口比例的扩大,导致火灾的因素也大量增加,城市重特大恶性火灾事故有越演越烈之势。目前我国城市化进程正朝前推进,城市建设走向集约型、紧凑型是今后城市发展的主要思路,消防基础设施和装备滞后的局面将更加突出。

### 5.1.1 我国在推进城市化建设进程中的消防安全现状

(1) 我国城市人口继续朝密集型推进,城市建设朝内涵式、集约式方向发展,城市消防基础设施建设不能与之同步。我国现有城市 350 个,其中,人口在 500 万以上的大城市有 50 个,人口在 500 万~1000 万之间的城市有 100 个,人口在 100 万以下的有 200 个,另有建制镇 1000 个。按我国城市面积与人口比例计算,目前我国城市消防设施建设严重滞后,城市消防站欠账 50% 以上的城市约占 10%,消火栓欠账 50% 以上的城市约占 20%,消防车欠账 50% 以上的城市约占 10%,城市基础设施建设不能与城市建设发展同步。目前,世界城市化平均水平为 50%,发达国家平均水平为 70%,我国城市化水平只有 30%,这说明,我国的城市化还处在一个较低的水平。中国发展计划委员会发表的《关于中国城市发展规划》中提出,为了节约资源,保持环境,退耕还林,我国城市人口比例 20 年将目前的 30% 增加到 50%~60%;2020 年城市化水平要达到 60%,2050 年城市化水平要达到 70%~80% 才能适应我国经济发展的需要。也就是说未来的几十年,我国将进入城市化加速发展时期,城市人口朝密集型方向发展,城市建设与发展按可持续要求必然走内涵式、集约式发展模式,即建设“紧凑型”城市。到那时,我国城市人口将大幅度上升,城市建筑密度增大,地下工程和高层建筑增加,特别是 100 米以上以至 200 米以上的高层建筑将是城市建设的主流。就目前我国的消防装备状况,还不具有控制 100 米以上建筑火灾的扑救能力,不仅我国就算是世界上消防装备精良的美国,扑救能力也是有限的。在美国“世贸”事件中,面对被大火肆意吞噬的世贸大厦,美国消防部队竟然束手无策,有 300 多名消防队员被大楼埋葬。因此,现阶段我们一方面要解决好城市消防基础设施和装备的欠账问题,另一方面要尽快寻找、研究、制定预防和扑救“紧凑型”、“高大型”建筑火灾的对策。

(2) 我国城市火灾和农村火灾分配比例发生显著变化,城市火灾中公共聚集场所火灾突出。从《中国火灾统计年鉴》中反映的火灾统计数据表明,1994~2000 年的 7 年间,我国共发生火灾约 100 万起,死亡约 10 万人,受伤约 100 万人。

1990万人，直接经济损失达1500亿元。从我国城市火灾和农村火灾的分配比例看，我国19世纪80年代以前火灾主要集中在农村地区，从火灾起数、死亡、受伤人数、直接经济损失四项指标来看农村地区占较大份额。1900年代开始，我国城市火灾的比例逐年上升，城市火灾四项指标占到70%以上，城市火灾的结构也在不断发生变化，城市火灾从过去易燃易爆品集中的工厂、仓库和居民房等火灾指数较高的场所开始向商场、饭店、舞厅、迪吧等公共聚集场所以及石油化工企业、交通运输业、电子通信业和高层、地下建筑蔓延。城市火灾本身分配比例的变化是城市飞速发展的必然结果，也是城市发展与城市消防基础设施建设相对滞后的必然结果。就我国火灾造成的损失看，从19世纪80年代开始，一般火灾有向重特大火灾方向扩张的趋势，从1900年代开始，重特大火灾特别是公共聚集场所重特大恶性火灾事故显著多起来，城市重特大火灾占全部重特大火灾的主导地位；相反，农村重特大火灾所占比例在逐步减小。1989年新疆克拉玛依“友谊馆”友谊馆发生大火，导致15名儿童葬身火海；1990年10月1日吉林省长春商业城发生火灾，死亡15人，直接经济损失达1500万元；1991年10月1日圣诞之间河南洛阳东都商厦发生火灾，火魔再次夺去15名群众的生命，直接经济损失达1500万元；1992年10月1日湖南衡阳市衡州大厦发生火灾，造成直接经济损失1500万元；1993年10月1日吉林市市中百商厦发生特大火灾，死亡15人，直接经济损失达1500余万元。这些典型火灾事故都发生在城市公众聚集场所。1994-1995年全国发生特大火灾约15起，城市约占全部特大火灾的70%，农村占30%，其中城市公共聚集场所火灾又占城市重特大火灾的70%左右，石油化工、燃气储售单位占30%，交通运输占10%，其他占火灾10%。所以有针对性地做好公共聚集场所、易燃易爆品生产储存单位以及电子通信、交通运输业等重点地段火灾的预防对策是当前消防工作的一项重要任务。

(3) 我国相当一部分城市布局处于畸型状态，新城与旧城、城区与工业区、棚户区与商业区交错分布，使重特大火灾发生机率大大提高。近年来，我国实行改革开放的国策，国家在经济上取得举世瞩目的成绩，城市发展速度突飞猛进，但本着城市化可持续发展的战略思路，从节约土地资源，改善生态环境的实际出发，我国的新城市建设基本是以老城为基础，在对老城、旧城积极进行改造的基础上，有限度的扩大城市建设规模。目前，我国绝大多数城市，正是处于新城与旧城，城区与工业区、商业区与棚户区共存，相当一部分城市中还遗留有历史原因建成的不符合消防规范标准的加油站、易燃易爆品生产储存点等，城市格局处于畸型状态。不仅城市消防安全布局不合理，消防站建设、消防供水、消防通信不够，消防通道堵塞，消防车通道没有等问题也普遍存在，消防安全隐患十分突出，伴随着农村人口城市化，城市流动人口膨胀化的特点，他们又共同为重特大火灾发生创造了条件。这也是目前我国火灾四项指标上升的重要因素，因此做



好这类城市火灾的预防工作对于减少人员伤亡,降低国家和人民经济损失有着重要意义。

(源)广大城市居民消防安全意识淡薄,单位和私营业主为了追逐商业利润往往置消防安全于不顾。目前,我国城市居民的整体消防安全意识在不断提高,但仍不够,大多数城市居民还停留在对“灾祸”的表象性认识上,不能使用灭火器或一些常用的灭火方法扑救初期火灾,在火灾中没有自救逃生的能力,对自己周围存在的消防安全隐患发现不了,有的发现了问题但安全意识淡薄、怕麻烦,放弃履行公民应有的举报义务。另外,部份个体私营业主,为了局部利益和个人私利,非法圈占消火栓,堵塞消防通道,在这些地方摆摊设点,叫买叫卖,使火灾扑救工作难度增大,甚至贻误灭火时机。也有个别单位和丧心病狂的私营业主为了追逐一己之利不顾周围群众的生命安全,在城市居民区、在逃避相关执法部门监督的情况下生产、销售、储存不符合消防安全的火灾危险性极高的产品,造成重大安全隐患。

### 5.1.2 推进我国城市化建设水平中的消防安全对策

(员)实现消防片区联动,优势互补,增强扑救城市火灾的能力。片区联动就是在处置各种群死群伤特大恶性火灾事故中,邻近地区利用现有的交通、通信条件,在消防车辆、消防装备、特勤器材、消防力量上互相增援,快速协同作战,充分发挥区域优势互补,集中集体作战力量,有效处置各类重特大火灾及其他灾害事故。如四川省川南五地市(泸州、宜宾、自贡、内江、资阳)在 2005 年 1 月 1 日正式启动川南片区消防联动工程,并于 2005 年 10 月 20 日在四川泸州第一次成功举行了一次“川南片区联动酒类火灾灭火演练”。随着城市规模扩大,城市人口的增加,特别是我国中西部城市经济相对落后,在装备缺少,灭火力量不足的情况下,实行片区联动工程是一种有利的尝试。现代火灾尤其是中西部地区火灾,要靠一个单位、一个部门,甚至一个城市的力量往往都难以进行有效的扑救。而实行片区联动互补机制,不仅可以有效快速地处置灾害事故,而且还可以实现训练场地互补以节约地理资源和训练装备互补以节约经费的目标,把有限的资金投入 to 更有针对性的装备建设中和训练改革中去,从而不仅可以从人力资源上提高到扑救火灾的能力,也可以从装备建设和技术资源上提高扑救火灾的能力。

(圆)加强对新建城区消防基础设施建设监督力度,加快旧城区消防基础设施的改造步伐。从我国城市消防基础设施整体建设情况看,经济发达地区优于经济落后地区,沿海地区优于内地,新建城区优于旧城区。中西部地区在进行城市规划与实施时应吸取发达地区及沿海地区的经验,加强对建筑工程的审核监督力度,按照《城市消防规划建设管理规定》对城市消防安全布局、消防站、消防给水、消防通道、消防通信等公共消防设施进行统一规划、统一建设,在坚持解决原有火灾隐患的同时保证不增加新的火灾隐患。对工业区与居住区、棚户区与商

业区、旧城区与新城区交错分布的城市，采取措施提高这些城区居民房屋的耐火等级；积极整顿道路，对狭窄、弯曲的道路，有计划的进行改建和拓宽；对历史原因建成的不符合城市发展要求和消防建设规范的工厂、加油气站、易燃易爆危险品库等场所要改变用途或搬出城区；投入经费，增设公共设施，解决好消防用水问题，同时要保证消防通道畅通，一旦发生火灾能及时疏散被困人员，把火灾损失降到最低程度。

(獾) 坚持群众与专门机关相结合的消防方针，有针对性地做好城区重点单位和场所的消防安全检查 坚持群众与专门机关相结合的消防方针，最终实现消防工作社会化。当务之急，就是加强消防宣传工作的力度，打造一批消防宣传尖兵，把他们作为媒体与群众之间的纽带，共同推动、促进消防工作的社会化。伴随着我国加入 宰鞣的，城市化水平将不断向前推进，我国消防正面对火灾多发期，装备实施滞后期与火灾责任追究超前期并存的难关，所以坚持群众与专门机关相结合的消防方针，采取群防群治的战略措施很有必要。消防部门以群防群治为基础，集中精力，有针对性地做好火灾发生频繁、群死群伤事件突出的公共聚集场所，易燃易爆的生产、销售、储存点，交通运输业和高层、地下建筑的消防检查工作，加大执法力度、分阶段、分步骤、有重点地排除这些地方的消防安全隐患，减少重特大火灾发生的可能性，共同为我们的生产、生活创造一个安全舒适的环境。

(源) 加强专业队伍建设，在提高扑救火灾能力的同时，还要培养和提高社会应急抢险救援能力 加强专业队伍建设，提高抢险能力是适应我国改革开放，适应我国消防水平发展与世界接轨的需要。随着我国与 宰鞣的接轨，消防的职能将发生巨大的变化，也就是要和美国、日本等其他国家一样，除了担负火灾扑救任务外，将承担起更多的、更繁重的社会抢险救援任务。国外大多数国家消防部队有 员鞣的工作是扑救火灾，而其他 鞣鞣是进行社会应急救援，我们国家也不能例外，也会按照世界规则运行，因此加强我国消防专业队伍建设，培养一批高素质和有特殊技能的专业人材，有针对性地开展特殊火灾，特殊社会应急救援训练科目，是我们当前一项极为紧迫的工作。伴随着中国入世的步伐，我国消防部门虽然已经开展并承担了部分社会抢险救援任务，同时针对恐怖组织破坏、生化袭击，制定和完善了紧急疏散、现场处置和跨区域联动、增援的措施，还进口了一批化学灾害事故抢险救援装备和一批多功能抢险救援消防车，但对我们来说这仅仅是一个开端，加强专业队伍建设，切实提高社会抢险救援和灭火能力将会是一个长期性的、艰难的工作。所以我国消防部队应当更多地借鉴国外先进的消防基础理论，引进国外先进消防装备和灭火救援的战术技术经验，并在社会救援机制上加快同国际接轨的步伐。

(缘) 建筑电气火灾危险性加大。城市中的老区建筑密集，建筑原有的电线布 獾

置本来就混乱,而随后不断出现的乱拉乱接现象更把这种混乱推向了极端。许多线路敷设的时间已十分长久,线路绝缘早已老化损坏;而现代家庭电器又不断地增大用电量,电线超设计负荷现象十分普遍。所以,电气火灾已成为建筑火灾的第一成灾原因。

(远) 城市缺少整体防火体系。到目前为止,国家还没有系统的、可具体操作的综合防御火灾的对策。各部门只能尽其有限能力开展一些局部的研究工作。全国在对综合研究城市防火能力及防御体系和政策的研究方面还几乎是空白。

## 续原 建筑火灾科学的主要研究内容和研究现状

建筑火灾科学研究可归纳成三个方面的内容。

### 续原 建筑防火

建筑防火包括建筑火灾基础科学、建筑总体布局、建筑内部防火隔断、防火装修以及消防扑救、安全疏散路线、自动灭火系统、火灾探测报警系统的智能化和早期化、自动防排烟系统的设计和研究。在建筑防火上,我国已有自己的《建筑设计防火规范》(GB 50016-2006) (2006年版)和《高层民用建筑设计防火规范》(GB 50045-2005)。但由于我国对高层建筑防火研究起步较晚,加之高层建筑的规模日益扩大,故《高层民用建筑设计防火规范》还不能完全适应新形势的要求,有待通过总结经验进一步修改完善。

从 20 世纪 80 年代开始,国外发展了一种安全工程设计新方法——性能化防火设计,它开创了安全工程设计的新思路。国外研究成果和工程实践表明,性能化防火设计方法比传统的“处方法”设计方法具有许多优越性,包括:设计方案更加科学合理,设计方法更加灵活,能有效地保证建筑防火设计达到预期的消防安全目标,可以减低建筑成本,有利于新技术、新材料、新产品的发展,有利于充分发挥设计人员的才能,有利于设计规范和标准的国际化等。目前世界许多国家都在研究和推广这种先进的方法,已经形成发展性能化防火设计的国际化浪潮;各国政府纷纷投入大量研究经费,积极开展有关的基础理论研究和应用技术开发,并取得了很大的进展。英国、日本、澳大利亚、美国、加拿大、新西兰以及北欧一些国家已初步建立其性能化防火设计的技术体系,完成了从传统的“处方法”设计方法向性能化防火设计的过渡。欧盟、国际标准化组织(ISO)、国际建筑研究会(CIB)等国际性机构和组织也在推进性能化防火设计方法的发展。性能化防火设计的技术体系包括性能化设计理论、工程分析与设计方法、防火安全评估技术与工具、材料与产品性能试验方法与标准、各类基本数据的基础数据库、设计指南和设计规范等。目前,我国在这一领域的研究工作还刚刚起步,需要投入大量的经费,使有关的基础性科研工作能够全面地、系统地开展开来。

## 绪论 建筑结构抗火性能

建筑结构抗火性能主要包括结构材料的抗火性能，结构在火灾高温下的强度、刚度、变形、承载能力，建筑结构耐火时间以及结构抗火构造等内容。多年来，世界各国在建筑结构抗火设计研究领域开展了广阔而深入的研究，取得了巨大成果，主要集中在以下各方面：

(一) 结构材料在火灾高温下的性能研究，如钢材在高温下的屈服强度、抗拉强度、弹性模量、应力—应变曲线；混凝土在高温下的抗压强度、抗拉强度、粘结强度、弹性模量、应力—应变曲线；钢材、混凝土的导热系数、比热容、质量密度、线膨胀系数。

(二) 建筑构件的标准耐火试验方法及设备。

(三) 混凝土构件内温度场研究。

(四) 钢构件、钢筋混凝土构件及结构单元的耐火性能研究。

(五) 钢构件耐火保护方法及材料研究。

(六) 失火分区火灾性状研究与预测。

此外，欧洲各国颁布了钢结构耐火设计技术规范，法国还制定了混凝土结构的耐火强度计算方法，日本建立了建筑结构耐火设计数据库。与国外相比，我国在结构抗火设计的研究方面还存在很大的差距，至今还没有《建筑结构抗火设计规范》。

目前，国外结构防火研究已从结构构件转向整体结构、装配式结构、薄膜结构、轻钢结构的研究，并探讨局部火灾对整个结构的影响的设计计算方法及建筑物防火诊断和改善技术的措施。

## 绪论 火灾后建筑结构的损伤鉴定和加固修复

火灾后建筑物的损伤诊断主要包括以下几方面的内容：

(一) 现场调查及火灾温度判断。

(二) 火灾后建筑材料及结构性能的检测。

(三) 受损分析和剩余承载力的计算。

(四) 结构受损综合评定。

对于火灾后的加固方法，现在研究的还不多，长期以来主要靠设计人员的主观经验来选择加固方法。目前常用的火灾后加固方法有喷射混凝土法、粘钢加固法、碳纤维增强复合材料加固法等。

对于火灾后建筑结构受损程度的诊断，上海市建筑科学研究院编制了上海市地方标准《火灾后混凝土构件评定标准》。在建筑物的加固领域，我国曾颁布了《混凝土结构加固技术规范》（GB 50367-2006），但是其中只是列出了数种加固方法，并没有特别列出适合于火灾后混凝土结构的加固方法。

# 第 远章 建筑火灾的燃烧特性

## 远圆 燃烧的基本知识

### 远圆圆 燃烧条件

燃烧是一种放热、发光的化学反应。物质燃烧必须同时具备三个条件，即可燃物，助燃物和着火源；缺少任何一个条件都不会发生燃烧。但是，并不是上述三个条件同时存在，就一定会发生燃烧现象，还必须这三个因素相互作用才能发生燃烧。

(员) 可燃物 凡是能够与空气中的氧或其他氧化剂起剧烈化学反应的物质都是可燃物。如：木材、纸张、酒精、氢气、乙炔气等。

可燃物按其组成可分为无机可燃物和有机可燃物两大类。从数量上说，绝大部分可燃物为有机物，少部分为无机物。

可燃物按其状态，可分为可燃固体、可燃液体及可燃气体三大类。不同状态的同一种物质燃烧性能不同，一般来说，气体比较容易燃烧，其次是液体，最后是固体。同一种状态但组成不同的物质其燃烧性能也不同。

(圆) 助燃物 凡能帮助和支持燃烧的物质叫助燃物。如空气、氧或氧化剂等。

(猿) 着火源 凡能引起可燃物燃烧的热能源，叫着火源。如明火、高温物体、化学热能、光能等。

(源) 链式反应 有焰燃烧都存在链式反应。当某种可燃物受热，它不仅会汽化，而且该可燃物的分子会发生热分解作用从而产生自由基。自由基是一种高度活泼的化学形态，能与其他的自由基和分子反应，而使燃烧持续进行下去，这就是燃烧的链式反应。

着火源这一燃烧条件的实质是提供一个初始能量，在此能量激发下，使可燃物和助燃物发生剧烈的氧化反应，引起燃烧。所以，这一燃烧条件可以表达为“初始能量”。可燃物，助燃物和着火源是构成燃烧的三个要素，这是指“质”方面的条件，即必要条件。但是这还不够，还要有“量”方面的条件，即充分条件。在某些情况下，如可燃物数量不够，助燃物不足，或着火源的能量不大，燃烧也不会发生。

因此，还必须具备以下条件：

(员) 足够的可燃物质 若可燃气体或蒸气在空气中的浓度不够, 燃烧就不会发生。例如, 用火柴在常温下去点汽油, 能立即燃烧, 但若用火柴在常温下去点柴油, 却不能燃烧。

(圆) 足够的助燃物质 燃烧若没有足够的助燃物, 火焰就会逐渐减弱, 直至熄灭。如在密闭的小空间中点蜡烛, 随着氧气的逐渐耗尽火焰最终会熄灭。

(猿) 着火源达到一定温度, 并具有足够的热量 如火星落到棉花上, 很容易着火, 而落在木材上, 则不易起火, 就是因为木材燃烧需要的热量较棉花为多。白磷在夏天很容易自然着火, 而煤则不然, 这是由于白磷燃烧所需要的温度很低(猿源), 而煤所需的燃烧温度很高(猿缘)。

(源) 未受抑制的链式反应 汽油的最小点火能量为 园圆允, 乙醚为 园圆允, 甲醇为 园圆允。对于无焰燃烧, 前三个条件同时存在, 相互作用, 燃烧即会发生。而对于有焰燃烧, 除以上三个条件, 燃烧过程中存在未受抑制的游离基(自由基), 形成链式反应, 而使燃烧能够持续下去, 亦是燃烧的充分条件之一。

由此可见, 要使可燃物发生燃烧, 不仅要同时具备三个基本条件, 而且每一条件都必须具有一定的“量”, 并彼此相互作用, 否则就不能发生燃烧。

## 远源 防火和灭火的基本方法

一切防火和灭火措施的基本原理, 就是根据物质燃烧的条件, 阻止燃烧三要素同时存在、互相结合、互相作用。

缘 防火的基本措施 防止燃烧条件的产生, 不使燃烧的三个条件相互结合并发生作用, 以及采取限制、削弱燃烧条件发展的办法, 阻止火势蔓延, 这就是防火的基本原理。

防火的基本措施有:

(员) 控制可燃物 用非燃或难燃材料代替易燃或可燃材料; 用防火涂料涂刷可燃材料, 改变其燃烧性能; 采取局部通风或全部通风的方法, 降低可燃气体、蒸气和粉尘的浓度, 使之不超过最高允许浓度; 对能相互作用发生化学反应的物品分开存放。

(圆) 隔绝助燃物。就是使可燃性气体、液体、固体不与空气、氧气或其他氧化剂等助燃物接触, 即使有着火源作用, 也会因为没有助燃物参与而不致发生燃烧。

(猿) 消除着火源。就是严格控制明火、电火及防止静电、雷击引起火灾。

(源) 阻止火势蔓延。就是防止火焰或火星等火源窜入有燃烧、爆炸危险的设备、管道或空间, 或阻止火焰在设备和管道中扩展, 或者把燃烧限制在一定范围不致向外延烧。

圆 灭火的基本方法 一切灭火措施都是为了破坏已经产生的燃烧条件, 使

燃烧熄灭。

灭火的基本方法有：

(员) 冷却法。由于可燃物质起火必须具备相对的着火温度，灭火时只要将水、泡沫或二氧化碳等具有冷却降温 and 吸热作用的灭火剂直接喷洒到着火的物体上，使其温度降到能够起火所需的最低温度以下，火就会熄灭。用水扑救火灾，其原理就是冷却灭火。

(圆) 窒息法。根据可燃物质起火时需要大量空气的特点，灭火时采用物体遮盖的方式，使空气不能继续进入燃烧区或者进入得很少，也可用氮气、二氧化碳等惰性气体稀释空气中的氧含量，使可燃物质因缺乏助燃物而终止燃烧。窒息灭火法的实用性很强，不仅简便易行，而且灭火迅速，不会造成水渍损失。

(猿) 隔离法。燃烧必须有可燃物质作先决条件。根据这个道理，运用隔离法灭火主要采取以下两种方式：①扑救火灾时将燃烧物与附近可燃物质隔离或者疏散开，从而使燃烧终止；②将着火物质转移到没有可燃物质的地方。这种方法适用于扑救多种固体、液体和气体火灾。

(源) 抑制法。这是一种化学灭火方法，即将化学灭火剂喷入燃烧区参与燃烧反应，中止链反应而使燃烧反应终止。如将干粉和卤代烷灭火剂喷入燃烧区，使燃烧终止。目前主要采用“ $\text{HFC-125}$ ”、“ $\text{HFC-227}$ ”等卤代烷和干粉灭火剂。其优点是灭火效率高，尤其是  $\text{HFC-125}$  灭火剂，灭火后不留痕迹，不会造成污损，是扑救电视机等家用电器、书籍、液化气和摩托车等火灾较为理想的灭火剂。但这些化学灭火剂缺乏冷却、覆盖和渗透作用，当物质表面的火焰熄灭后，往往会引起物体的阴燃或余热又超过着火温度而发生复燃或爆燃，这一点应特别引起注意。

综上所述，以上方法各有所长，灭火时应根据具体的情况，遵循迅速有效，经济损失小的原则，根据燃烧物质的性质、部位、燃烧特点和火场情况以及灭火器材的情况进行选择。

## 2.1.2 燃烧的基本类型

燃烧有四种类型：闪燃、着火、自燃、爆炸。

闪燃与闪点 在一定的温度条件下，液态可燃物质表面会产生蒸气，有些固态可燃物质也因蒸发、升华或分解产生可燃气体或蒸气。这些可燃气体或蒸气与空气混合而形成混合可燃气体，当遇明火时会发生一闪即灭的火苗或闪光，这种燃烧现象称为闪燃。液体（固体）挥发的蒸气与空气形成混合物遇火源能够闪燃的最低温度称为该物质的闪点，液态可燃物质的闪点以“ $^{\circ}\text{C}$ ”表示，测定闪点的方法有开口杯法和闭口杯法两种。开口杯法是将可燃液体样品放在敞口容器中，加热进行测定；闭口杯法是将可燃液体样品放在有盖的容器中加热测定。同一种可燃液体样品，测定的方法不同，其值也不同，一般开口闪点要比闭口闪点

高 员 缘 圆 缘 圆

同系物中异构体比正构体的闪点低；同系物的闪点随其分子量的增加而升高，随其沸点升高而升高。各组分混合液，如汽油、煤油等，其闪点随沸点的增加而升高；低闪点液体和高闪点液体形成的混合液，其闪点低于这两种液体闪点的平均值。

闪燃是短暂的闪火，不是持续的燃烧。这是因为液体在该温度下蒸发速度不快，液体表面上聚积的蒸气一瞬间燃尽，而新的蒸气还未来得及补充，故闪燃一下就熄灭了。但是，若温度继续上升，液体挥发的速度加快，这时再遇明火便有起火爆炸的危险。

闪点是衡量各种液态可燃物质火灾和爆炸危险性的重要依据。有些固态可燃物质，如樟脑和萘等，在一定条件下，也能够缓慢蒸发可燃蒸气，因而也可以采用闪点衡量其火灾和爆炸危险性。物质的闪点越低，越容易蒸发可燃蒸气和气体，并与空气形成浓度达到燃烧或爆炸条件的混合可燃气，其火灾或爆炸的危险性越大，反之越小。常见的几种易燃、可燃液体的闪点见表 远圆

表 远圆 常见易燃、可燃液体的闪点

液 体 名 称	闪 点	液 体 名 称	闪 点
石 油 醚	原	吡 啶	垣
汽 油	原-垣	丙 酮	原
二硫化铁	原	苯	原
乙 醚	原	醋酸乙脂	垣
氯 乙 烷	原	甲 苯	垣
二氯乙烷	垣	甲 醇	垣

在《建筑设计防火规范》中，对于生产和储存液态可燃物质的火灾危险性，都是根据闪点进行分类的。一般以 圆缘 作为易燃和可燃液体的界限。统计分析表明常见易燃液体的闪点多数小于 圆缘，而我国南方城市的最高月平均气温约为 圆缘。因此规范中把闪点小于 圆缘的液体定为易燃液体，具有甲类火灾危险性；把闪点大于或等于 圆缘的液体定为可燃液体，而闪点为 圆缘-远缘的液体为乙类火灾危险性液体；丙类火灾危险性液体，其闪点大于等于 远缘。规范同时以甲、乙、丙类液体分类为依据规定了厂房和库房的耐火等级、层数、占地面积、安全疏散、防火间距、防爆设置等；以甲、乙、丙类液体的分类为依据规定了液体储罐、堆场的布置、防火间距、可燃和助燃气体储罐的防火间距、液化石油气储罐的布置、防火间距等。

圆缘着火与燃点 可燃物在与空气共存的条件下，当达到某一温度时与火源接触，立即引起燃烧，并在火源移开后仍能继续燃烧，这种持续燃烧的现象称为着火。可燃物开始持续燃烧所需要的最低温度叫做燃点或着火点，以“圆”表示。液体的燃点可用测定闪点的开口杯法来测定，易燃液体的燃点，约高于其闪点



表 2-1 常见几种物质的燃点

表 2-1 几种物质的燃点			
物 质 名 称	着火点/℃	物 质 名 称	着火点/℃
煤 油	150	尼 龙 纤 维	250
松 节 油	150	漆 布	250
赛 璐 珞	150	蜡 烛	250
橡 胶	250	布 匹	250
纸	250	豆 油	250
棉 花	250	烟 叶	250
麻 绒	250	松 木	250

所有可燃液体的燃点都高于闪点，因此在评定液体的火灾危险性时，燃点没有多大的实际意义。但是燃点对于可燃固体及闪点较高的可燃液体具有实际意义，如果将这些物质的温度控制在燃点以下，就可防止火灾的发生。

**自燃与自燃点** 可燃物质在没有外部火花、火焰等火源的作用下，因受热或自身发热并蓄热所产生的自然燃烧称为自燃，可分为受热自燃和自热自燃。可燃物质在外部热源作用下，温度升高，当达到一定温度时着火燃烧，称为受热自燃。一些可燃物在没有直接火源作用下，由于自身内部的物理、生物、化学反应，温度不断集聚升高，达到燃点发生燃烧的现象叫自热自燃。自热自燃是化工产品贮存运输中较常见的现象，危害性极大。

在规定的条件下，可燃物质产生自燃的最低温度称为自燃点。一般可燃物质的自燃点以“ $t_{zi}$ ”表示。自燃点可以作为衡量可燃物质受热升温形成自燃危险性的依据。物质的自燃点越低，发生自燃的火灾危险性越大。一般说，液体密度越大，自燃点越低。常见物质的自燃点见表 2-2。

可燃物质发生自燃的主要方式有：①氧化发热；②分解放热；③聚合放热；④吸附放热；⑤发酵放热；⑥活性物质遇水；⑦可燃物与强氧化剂的混合。

影响液体、气体可燃物自燃点的主要因素有：①压力，压力越高，自燃点越低；②氧浓度，混合气中氧浓度越高，自燃点越低；③催化，活性催化剂能降低自燃点，钝性催化剂能提高自燃点；④容器的材质和内径，器壁的不同材质有不同的催化作用，容器直径越小，自燃点越高。

影响固体可燃物自燃点的主要因素有：①受热熔融，熔融后可视液体、气体的情况；②挥发物的数量，挥发出的可燃物越多，其自燃点越低；③固体的颗粒度，固体颗粒越细，其比表面积就越大，自燃点越低；④受热时间，可燃固体长时间受热，其自燃点会有所降低。

有些自燃点很低的可燃物质，如赛璐珞、硝化棉等，不仅容易形成自燃，而且在自燃时还会分解释放大量一氧化碳、氮氧化物、氢氰酸等可燃气体，这些气体与空气混合，当浓度达到爆炸极限时，则会发生爆炸。因此，对于自燃点很低

的可燃物质，除了采取防火措施外，还应采取防爆炸措施。现行《建筑设计防火规范》对于生产和储存在空气中能够自燃的物质的火灾危险性进行了分类。

表 2-2-2 常见物质的自燃点

物 质 名 称	自燃点/℃	物 质 名 称	自燃点/℃
豆 油	280	煤 油	210-280
菜 子 油	280	柴 油	210-280
花 生 油	280	石 油 沥 青	280-300
香 油	280	木 材	280
棉 子 油	280	亚 麻 仁 油	280

爆炸与爆炸极限 易燃液体的蒸气、可燃气体和粉尘、纤维与空气（或氧）的混合物在一定比例浓度范围内时，若遇到明火、电火花等点火源，就会发生爆炸。因此，从消防观点来说，凡是发生瞬间的燃烧，同时生成大量的热和气体，并以很大的压力向四周扩散的现象，叫做爆炸。例如在工业生产中，可燃气体或蒸气从工艺装置、设备管线泄漏到厂房中，或空气漏入存有这种气体的设备内，都可以形成爆炸性混合物，遇到火种，便会造成爆炸事故。

爆炸可分为物理爆炸、化学爆炸和核爆炸。物理爆炸是由于液体变成蒸气或者气体迅速膨胀，压力急速增加，并大大超过容器的极限压力而发生的爆炸，如蒸气锅炉、液化气钢瓶等的爆炸。化学爆炸是因物质本身起化学反应，产生大量气体和高温而发生的爆炸，如炸药的爆炸，可燃气体、液体蒸气和粉尘与空气混合物的爆炸等。化学爆炸是消防工作中防止爆炸的重点。

爆炸通常伴随发热、发光、压力上升、真空和电离等现象，具有很强的破坏作用。它与爆炸物的数量和性质、爆炸时的条件以及爆炸位置等因素有关。主要破坏形式有以下几种：

（一）直接的破坏作用。机械设备、装置、容器等爆炸后产生许多碎片，飞出后会在相当大的范围内造成危害。一般碎片在 100m 范围内飞散。如 1980 年浙江温州电化厂液氯钢瓶爆炸，钢瓶的碎片最远飞离爆炸中心 100m，其中碎片击穿了附近的液氯钢瓶、液氯计量槽、贮槽等，导致大量氯气泄漏，发展成为重大恶性事故，2 人死亡，3 人受伤。

（二）冲击波的破坏作用。物质爆炸时，产生的高温高压气体以极高的速度膨胀，象活塞一样挤压周围空气，把爆炸反应释放出的部分能量传递给压缩的空气层，空气受冲击而发生扰动，使其压力、密度等产生突变，这种扰动在空气中传播就称为冲击波。冲击波的传播速度极快，在传播过程中，可以对周围环境中的机械设备和建筑物产生破坏作用和使人员伤亡。冲击波还可以在它的作用区域内产生震荡作用，使物体因震荡而松散，甚至破坏。冲击波的破坏作用主要是由其波阵面上的超压引起的。在爆炸中心附近，空气冲击波波阵面上的超压可达几个甚至十几个大气压，在这样高的超压作用下，建筑物被摧毁，机械设备、管道等

也会受到严重破坏。当冲击波大面积作用于建筑物时,波阵面超压在  $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$  以内,就足以使大部分砖木结构建筑物受到强烈破坏。超压在  $0.2 \text{ MPa}$  以上时,除坚固的钢筋混凝土建筑外,其余部分将全部破坏。

(3) 造成火灾。爆炸发生后,爆炸气体产物的扩散只发生在极其短促的瞬间内,对一般可燃物来说,不足以造成起火燃烧,而且冲击波造成的爆炸风还有灭火作用。但是爆炸时产生的高温高压,建筑物内遗留大量的热或残余火苗,会把从破坏的设备内部不断流出的可燃气体、易燃或可燃液体的蒸气点燃,也可能把其他易燃物点燃引起火灾。当盛装易燃物的容器、管道发生爆炸时,爆炸抛出的易燃物有可能引起大面积火灾,这种情况在油罐、液化气瓶爆破后最易发生。正在运行的燃烧设备或高温的化工设备被破坏,其灼热的碎片可能飞出,点燃附近储存的燃料或其他可燃物,引起火灾。如 1993 年 8 月,吉林液化石油气厂圆球形罐破裂时,涌出的石油气遇明火而燃烧爆炸,大火持续了整整 4 个小时,造成了巨大的损失。

(4) 造成中毒和环境污染。在实际生产中,许多物质不仅是可燃的,而且是有毒的,发生爆炸事故时,会使大量有害物质外泄,造成人员中毒和环境污染。

爆炸性混合物发生爆炸的起码条件是达到爆炸极限浓度。爆炸极限浓度是指可燃气体(或粉尘、纤维)与空气混合并达到一定浓度时,遇点火源就能够发生爆炸的浓度范围。通常用可燃气体在空气中的体积百分比(%)表示。爆炸极限是在常温、常压等标准条件下测定出来的。发生爆炸的最低浓度称为爆炸下限,最高浓度称为爆炸上限。如果可燃气体(或粉尘、纤维)在空气中的浓度低于爆炸下限,遇到点火源即不会燃烧也不会爆炸;如果高于爆炸上限,遇到点火源虽然不会爆炸,但却能够燃烧。

爆炸极限的概念,是衡量有可燃气体(或粉尘纤维)作业场所是否有火灾爆炸危险的重要指标。爆炸下限越低,爆炸极限范围越宽,则危险性越大。例如,汽油的爆炸极限为  $1.4\% \sim 7.6\%$ ,而乙炔的爆炸极限为  $2.1\% \sim 81\%$ ,汽油的爆炸下限低,容易爆炸,而乙炔的爆炸范围宽,发生爆炸的机会多。部分可燃气体、可燃蒸气的爆炸极限见表 2-1。

另外,某些气体即使没有空气或氧存在时,同样可以发生爆炸。如乙炔即使在没有氧的情况下,若被压缩到  $0.2 \text{ MPa}$  以上,遇到火星也能引起爆炸。这种爆炸是由物质的分解引起的,称为分解爆炸。乙炔发生分解爆炸时所需的外界能量随压力的升高而降低。实验证明,若压力在  $0.2 \text{ MPa}$  以上,需要很少能量甚至无需能量即会发生爆炸,表明高压下的乙炔是非常危险的。针对乙炔分解爆炸的特性,目前采用多孔物质,即把乙炔压缩溶解在多孔物质上。除乙炔外,其他一些分解反应为放热反应的气体,也有同样性质,如乙烯、环氧乙烷、丙烯、联氨、一氧化氮、二氧化氮、二氧化氯等。

表 2-1 部分可燃气体、蒸气的爆炸极限

可燃气体或蒸汽	分 子 式	爆 炸 极 限（豫）	
		下 限	上 限
氢 气	$H_2$	4.0	75.0
氨	$NH_3$	15.0	27.0
一氧化碳	$CO$	12.5	74.0
甲 烷	$CH_4$	5.0	15.0
乙 烷	$C_2H_6$	3.0	15.0
乙 烯	$C_2H_4$	3.0	16.0
苯	$C_6H_6$	1.2	8.0
甲 苯	$C_6H_5CH_3$	1.2	7.0
环氧乙烷	$C_2H_4O$	3.0	33.0
乙 醚	$(C_2H_5O)_2$	1.5	35.0
乙 醛	$C_2H_4O$	4.0	13.0
丙 酮	$(C_3H_7O)_2$	2.0	13.0
乙 醇	$C_2H_5OH$	3.0	19.0
甲 醇	$CH_3OH$	6.0	36.0
醋酸乙酯	$C_4H_8O_2$	2.0	11.0

影响爆炸极限的因素主要有：初始温度、初始压力、惰性介质及杂质、混合物中氧含量、点火源等。初始温度越高，爆炸范围越大；初始压力升高，爆炸极限范围变大；混合物中加入惰性气体，会使爆炸极限范围缩小；混合物含氧量增加，爆炸下限降低，爆炸上限上升；充装混合物的容器管径越小，爆炸极限范围越小；当火源的温度越高，热表面面积越大，与可燃混合物接触时间越长，则点火源给混合物的能量越大，爆炸极限范围也越大。

最小点火能是指能引起爆炸性混合物燃烧爆炸时所需的最小能量。最小点火能数值愈小，说明该物质愈易被引燃。

可燃气体、可燃液体蒸气或可燃粉尘与空气的混合物、爆炸物品在密闭容器中着火爆炸时所产生的压力称爆炸压力。爆炸压力的最大值称最大爆炸压力。爆炸压力通常是测量出来的，但也可以根据燃烧反应方程式或气体的内能进行计算。物质不同，爆炸压力也不同，即使是同一种物质因周围环境、原始压力、温度等不同，其爆炸压力也不同。最大爆炸压力愈高，最大爆炸压力时间愈短，最大爆炸压力上升速度愈高，说明爆炸威力愈大，该混合物或化学品愈危险。

现行的《建筑设计防火规范》中将爆炸下限小于 4.0 的气体划分为甲类气体，少数爆炸下限大于等于 4.0 的气体划分为乙类气体。相应的将厂房生产和库房储存可燃气体一类物质的火灾危险性划分为甲类和乙类。另外，在生产过程中排放浮游状态的可燃粉尘、纤维、闪点大于等于 28 的液体雾滴，并能够与空气形成爆炸混合物的生产，则属于乙类生产。根据爆炸下限确定了可燃气体生产、储存的火灾危险性类别后，进而才能采取各种有针对性的、相应的建筑消防

安全技术措施。

## 2.1 建筑起火的原因

建筑物一旦发生火灾不仅会烧毁室内全部财物，而且容易造成人身伤亡，建筑结构倒塌、破坏及引起相邻的建筑物起火。建筑物起火的原因是多种多样而复杂的，因为建筑物是人们生产和生活的主要场所，存在着各种致灾因素。概括地说，建筑物火灾是由使用明火、化学或生物化学的作用、用电、纵火破坏等引起的。具体可分为八大方面的原因：生活用火不慎、玩火、吸烟、自燃、违反安全规定、电气、放火和其他。

建筑物起火的原因归纳起来大致可分为六类。

**2.1.1 生活和生产用火不慎** 我国城乡居民家庭火灾绝大多数为生活用火不慎引起。属于这类火灾的原因，大体有：吸烟不慎、炊事用火不慎、取暖用火不慎、灯火照明不慎、小孩玩火、燃放烟花爆竹不慎、宗教活动用火不慎等。

生产用火不慎有：用明火熔化沥青、石蜡或熬制动、植物油时，因超过其自燃点，着火成灾。在烘烤木板、烟叶等可燃物时，因升温过高，引起烘烤的可燃物起火成灾。对锅炉中排出的炽热炉渣处理不当，引燃周围的可燃物。

**2.1.2 违反安全生产安全制度** 由于违反安全生产安全制度引起火灾的情况很多。例如，在易燃易爆的车间内动用明火，引起爆炸起火；将性质相抵触的物品混存在一起，引起燃烧爆炸；在用电、气焊焊接和切割时，没有采取相应的防火措施而酿成火灾；在机器运转过程中，不按时加油润滑，或没有清除附在机器轴承上面的杂物、废物，而使这些部位摩擦发热，引起附着物燃烧起火；电熨斗放在台板上，没有切断电源就离去，导致电熨斗过热，将台板烤燃引起火灾；化工生产设备失修，发生可燃气体、易燃可燃液体跑、冒、滴、漏现象，遇到明火燃烧或爆炸。

**2.1.3 电气设备设计、安装、使用及维护不当** 电气设备引起火灾的原因，主要有电气设备超过负荷、电气线路接头接触不良、电气线路短路；照明灯具设置使用不当，如将功率较大的灯泡安装在木板、纸等可燃物附近，将日光灯的镇流器安装在可燃基座上，以及用纸或布做灯罩紧贴在灯泡表面上等；在易燃易爆的车间内使用非防爆型的电动机、灯具、开关等。

**2.1.4 自然现象引起** 分为以下几种：

(1) **自燃**。如大量堆积在库房里的油布、油纸，因为通风不好，内部发热，以致积热不散发生自燃。

(2) **雷击**。雷电引起的火灾原因，大体上有三种：①雷直接击在建筑物上发生的热效应、机械效应作用等；②雷电产生的静电感应作用和电磁感应作用；③高电位沿着电气线路或金属管道系统侵入建筑物内部。在雷击较多的地区，建筑

物上如果没有设置可靠的防雷保护设施，便有可能发生雷击起火。

(狢 静电。静电通常是由摩擦、撞击而产生的。因静电放电引起的火灾事故屡见不鲜。如易燃、可燃液体在塑料管中流动，由于摩擦产生静电，引起易燃、可燃液体燃烧爆炸；输送易燃液体流速过大，无导除静电设施或者导除静电设施不良，致使大量静电荷积聚，产生火花引起爆炸起火；在有大量爆炸性混合气体存在的地点，身上穿着的化纤织物的摩擦、塑料鞋底与地面的摩擦产生的静电，引起爆炸性混合气体爆炸等。

(源 地震。发生地震时，人们急于疏散，往往来不及切断电源、熄灭炉火以及处理好易燃、易爆生产装备和危险物品等。因而伴随着地震发生，会有各种火灾发生。

纒纵火 纵火分刑事犯罪纵火及精神病人纵火。

迂建筑布局不合理，建筑材料选用不当 在建筑布局方面，防火间距不符合消防安全要求，没有考虑风向、地势等因素对火灾蔓延的影响，往往会造成发生火灾时火烧连营，形成大面积火灾。在建筑构造、装修方面，大量采用可燃构件和可燃、易燃装修材料都大大增加了建筑火灾发生的可能性。

## 迂圆 室内火灾发展的过程

由于火灾的突发性、蔓延性和复杂的不确定性等特性，使得对火灾的认识和防治困难很大。要研究建筑物在火灾中出现的种种物理现象，首先要了解火灾中火的发生、发展和转移这一连续过程中各具体阶段的热物理特点。

火灾是指在时间和空间上失去控制的燃烧所造成的灾害。火灾过程是一个三维无定常的过程，包括湍流流动，传热传质，相变和化学反应及其相互耦合的复杂的理化过程，涉及到物质的固态、液态和气态三相。

建筑火灾一般是指造成建筑物或建筑部件燃烧以至结构倒塌破坏、人员伤亡的火灾。建筑物室内发生火灾，最初只局限于起火部位周围的可燃物燃烧，随着温度的上升，随后烧着室内其他可燃物、内装修和天棚等，造成整个房间起火，进而再从起火房间扩大到其他房间或区域，使整个建筑起火。纵观建筑火灾的形成、发展过程，一般经历三个阶段：火灾的发展过程分为初期增长、全盛和衰退等三个阶段。下面仅讨论耐火建筑中具有代表性的一个房间内的火灾发展过程，室内火灾的发展过程可以用室内烟气的平均温度随时间的变化来描述，如图 迂圆 所示。

迂初期增长阶段（静弯段） 室内火灾发生后，最初只是起火部位及其周围可燃物着火燃烧，这时火灾好像在敞开的空间里进行一样。一般固体物质燃烧时，迂初期增长阶段内，火灾的面积不大，烟和气体的流动速度比较缓慢，辐射热较低，火势向周围发展蔓延比较慢，燃烧一般还没有突破房屋建筑外壳。明火初燃后会

出现如下几种可能性：

(1) 最初着火的可燃物质燃烧完，而未延及其他的可燃物。尤其是初始着火的可燃物处在隔离的情况下。

(2) 如果通风不足，则火灾可能自行熄灭，或受到通风供氧条件的支配，以很慢的燃烧速度继续燃烧。

(3) 如果存在足够的可燃物质，而且具有良好的通风条件，则火灾迅速发展整个房间，使房间中的所有可燃物卷入燃烧之中，从而使室内火灾进入到全面发展的猛烈燃烧阶段。

这一阶段的特点是：燃烧是局部的，仅限于初始起火点附近；发生火灾的部位平均烟气温度较低；火灾蔓延速度较慢，火势不够稳定，破坏力小；火灾持续时间取决于着火源的类型、物质的燃烧性能和布置方式，以及室内的通风情况等。

初期阶段火灾持续的时间，对建筑物内人员的安全疏散，重要物资的抢救，以及火灾扑救，都具有重要意义。若室内火灾经过诱发成长，一旦达到轰燃，则该室内未逃离火场的人员，生命将受到威胁。要确保人员在火灾时安全疏散，应满足如下关系式

$$t_{\text{初}} + t_{\text{延}} + t_{\text{疏}} \leq t_{\text{危}}$$

(4)

式中  $t_{\text{初}}$ ——从着火到发现火灾所经历的时间 (s)；

$t_{\text{延}}$ ——从发现火灾到开始疏散之间所耽误的时间 (s)；

$t_{\text{疏}}$ ——转移到安全地点所需的时间 (s)；

$t_{\text{危}}$ ——火灾现场出现人们所不能忍受的条件的时间 (s)。

现在，利用火灾自动报警器可以减少  $t_{\text{初}}$ ，而且在大多数情况下效果比较明显。室内人员能否安全地疏散，在很大程度上取决于火灾发展蔓延速度的大小，即  $t_{\text{危}}$ 。在建筑防火设计时采取一些措施（如在室内采取非燃材料和难燃材料装修等）设法延长  $t_{\text{危}}$ ，就会使人们有更长的时间发现和扑灭火灾，并保证人员安全疏散。

这一阶段是扑灭火灾和人员安全疏散的最有效的时机。因此，应设法尽早发现火灾，把火灾及时控制消灭在起火点。要达到此目的，在建筑物内安装配备灭火设备，设置及时发现火灾和报警的装置很有必要。此外，应设法延长初起阶段的持续时间。

1. 全盛阶段（猛烈阶段） 在火灾初起阶段后期，火灾范围迅速扩大，当火灾

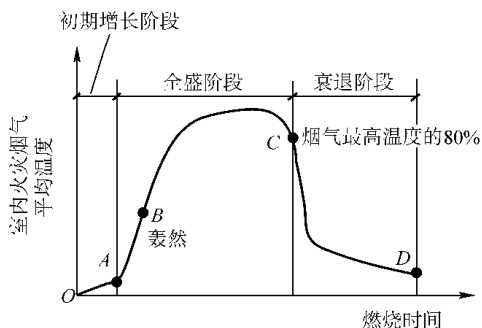


图 2-10 室内火灾温度—时间曲线

室内温度达到一定值时，聚积在室内的可燃气体突然起火，这时燃烧蔓延到了整个房间，室内可燃物都被引燃，温度迅速提高，燃烧比较稳定，直到室内燃烧产生的热与外围结构散失的热量接近平衡，否则温度继续上升，到达曲线 悦点的最高温度。火灾由初起到全面燃烧的瞬间称为轰燃（~~轰燃~~），它是室内火灾最显著的特征之一，标志着火灾全面发展阶段的开始。对于安全疏散而言，若在轰燃之前还没有从室内逃离，则很难幸存。

这一阶段室内进入猛烈燃烧的状态，燃烧强度增大，燃烧速度加快，燃烧面积扩大，放热速度很快，热辐射和热对流加剧，室内温度升高很快，并出现持续性高温，最高温度可达 ~~1500℃~~ 左右。火焰、高温烟气从房间的开口大量喷出，把火灾蔓延到建筑物的其他部分甚至相邻建筑。室内高温还对建筑构件产生热作用，使建筑物构件的承载力下降，当温度到达一定值，甚至造成建筑物局部或整体倒塌破坏。该阶段持续的时间长短及最高温度取决于可燃物的性质和质量、门窗的部位及其大小等。

对于火灾扑救而言，为控制火势发展和扑灭火灾，需一定灭火力量才能有效扑灭。而对于防火设计而言，为了减少火灾损失，应针对该阶段的发展特点采取一些措施，主要有：在建筑物内设置具有一定耐火性能的防火分隔物，把火灾控制在一定的范围，防止火灾大面积蔓延；选用耐火程度较高的建筑构件作为建筑物的承重体系，确保建筑物发生火灾时不倒塌破坏，为火灾时人员疏散、消防扑救，火灾后建筑物修复、继续使用创造条件。

~~轰燃~~ 衰退阶段（~~悦点~~） 在火灾全盛阶段后期，随着室内可燃物的挥发物质不断减少，以及可燃物数量减少，火灾燃烧速度递减，温度逐渐降低，当到达曲线 悦点时，室内平均温度降到最高温度的 ~~1/2~~，悦点以后，表示火灾进入衰减熄灭阶段。当时室内可燃物已基本烧尽，可能火焰已突破外围结构，热量大量外排，散热逐渐大于燃烧发热量，致使室内温度降低明显，室内可燃物只剩下暗红色余烬及局部微小火苗，温度较长时间保持在 ~~1000℃~~ 左右，火灾即结束。

该阶段前期，燃烧仍十分猛烈，室内温度仍很高。在这一阶段，应注意防止建筑构件因较长时间受高温作用和灭火射水的冷却作用而出现裂缝、下沉、倾斜或倒塌破坏，确保消防人员的人身安全，并应注意防止火灾向相邻建筑蔓延。

## ~~远~~ 火灾在全盛阶段的性状

### ~~远~~ 火灾荷载

火灾燃烧的基本条件之一是必须有可燃物，火势在全盛阶段持续时间的长短和火灾温度的高低与可燃物的数量多少以及不同材料的不同单位发热量有关。因此可燃物的数量和种类是决定全盛阶段的重要因素。



建筑内的可燃物一般分为固定可燃物、容载可燃物和临时性可燃物。

固定可燃物是指房间中内装修用的、位置基本固定不变的可燃材料，如墙体、顶棚、楼板等结构构件和门窗、固定装修家具等，相当于结构荷载的永久荷载（恒载），有较确切的计算值。容载可燃物是指为了房间的正常使用而另外布置的，其位置可变性较大的各种可燃物品，如室内可移动家具、衣物、书籍、用具等，因品种多、数量变化大，一般以统计数作参考，难于计取确切的计算值，相当于结构荷载的可变荷载（活载）。临时性可燃物，主要是由建筑的使用者临时带来并且在此短暂停留的可燃物，由于其具有不定性，所以在常规计算中可不考虑它的影响。

火灾荷载是指在一个空间所有物品包括建筑装饰材料在内的总潜热能。由此可见，火灾荷载是表示某个空间潜在的热能数量，而不是表示某个空间可燃物的多少。但是，对某个特定的空间（房间）来说，火灾荷载不仅与可燃物及其他物质的数量成正比，而且与物质的化学、物理性能有关。一般来说，一座建筑物火灾荷载越大，发生火灾的危险性越大，需要的防火措施越严。但是，总的火灾荷载并不能定量地阐明它与作用面积之间的关系，为此需要引进火灾荷载密度的概念。火灾荷载密度是指房间中所有可燃材料完全燃烧时所产生的总热量与房间的特征参考面积之比，即火灾荷载密度是单位面积（ $\text{m}^2$ ）上的可燃材料的总发热量。

为研究方便起见，实际工作中以木材的发热量为基数，把其他的可燃性材料按其燃烧热值换算成等效发热量的木材。也就是说把其他材料的数量用发热量相等的木材的质量表示，称为等效可燃物量。等效可燃物量与房间的面积和体积的大小有关。为研究火灾的状况，把火灾室内单位地板面积上等效可燃木材的量称为火灾荷载，用  $q$  表示

$$q = \frac{\sum Q_{\text{可燃物}}}{F} \quad (2-1)$$

式中  $q$ ——火灾荷载（ $\text{kJ}/\text{m}^2$ ）；

$Q_{\text{可燃物}}$ ——被转换可燃物质量（ $\text{kg}$ ）；

$q_{\text{可燃物}}$ ——被转换可燃物单位质量发热量（ $\text{kJ}/\text{kg}$ ）；

$q_{\text{木材}}$ ——单位质量木材的发热量（ $\text{kJ}/\text{kg}$ ），木材取  $12.5 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{kg}$ ；

$F$ ——火灾室内的地板面积（ $\text{m}^2$ ）；

$\sum Q_{\text{可燃物}}$ ——火灾室内所有可燃物的总发热量（ $\text{kJ}$ ）。

表 2-1 是一些可燃物品的单位发热量。

容载可燃物的火灾荷载的确定方法常用的有计算法和统计法两种。采用计算法非常耗时，而且无法在最初的设计阶段就能正确地预测出各个使用空间装饰可

燃物的种类和数量。国内外曾做过大量的试验，给出了某些室内家具的发热量，见表 2-25。

表 2-25 部分可燃物品的单位发热量

材 料 名 称	单位发热量 $Q_{\text{发}}/(\text{kg} \cdot \text{h})$	材 料 名 称	单位发热量 $Q_{\text{发}}/(\text{kg} \cdot \text{h})$
木 材	15000	天然纤维	15000
软 木	15000	羊 毛	15000
纸	15000	人造纤维、丝织品	15000
软纸三合板	15000	皮 革	15000
煤	15000	混合颜料	15000
动、植物油	15000	软质木屑板	15000
汽 油	15000	木质纤维板	15000
轻 油	15000	塑料地板	15000
石 油	15000	糖	15000
焦 油	15000	粮 食	15000
橡 胶	15000	香 烟	15000
泡沫橡胶	15000	沥 青	15000
硬质胶合板	15000	油 毡	15000
焦炭、木炭	15000	塑 料	15000

表 2-26 陈设、家具、内部装修的发热量

分 类	品 名	材 料	可燃物量 $Q_{\text{发}}/(\text{kg} \cdot \text{h})$	单位发热量 $Q_{\text{发}}/(\text{kg} \cdot \text{h})$
容载可燃物	单人床 (圆)	木 材	15000	15000
		泡沫塑料	15000	15000
		纤 维	15000	15000
	写字台	木 材	15000	15000
	大沙发	木 材	15000	15000
		泡沫塑料	15000	15000
		皮 革	15000	15000
	茶 几	木 材	15000	15000
固定可燃物	壁 纸	厚度 10mm	15000	15000
	涂 料	厚度 10mm	15000	15000

对于火灾荷载密度，房间的特征参考面积可采用地板面积或室内总表面积。采用地板面积表示的火灾荷载密度表达式为

$$q_{\text{发}} = \frac{\sum Q_{\text{发}}}{F_{\text{地}}} \quad (2-26)$$

采用室内总表面积作为房间特征参考面积表示的火灾荷载密度表达式为

$$q_{\text{发}} = \frac{\sum Q_{\text{发}}}{F_{\text{总}}} \quad (2-27)$$

- 上两式中 择——用地板面积表示的火灾荷载密度 (吨/平方米)；  
择——用室内总表面积表示的火灾荷载密度 (吨/平方米)；  
粤——室内总表面积 (平方米)。

火灾荷载密度与设计火灾发展过程密切相关，而后者正是防火设计中最基本的输入参数之一，因而火灾荷载密度数据的确定对防火系统的性能设计具有至关重要的影响。由于确定火灾荷载密度在技术上很复杂，因此我国目前基本上还没有火灾荷载密度的相关统计方法和确定的数值。因此，应通过试验和统计的方法尽快建立适合中国国情的火灾荷载密度的数据库。同时，应考虑国际通用的方式和计算单位，以便信息的交流和共享。具体工作包括：

- (员) 通过实际调查和实验确定各类建筑材料和设施的燃烧热值。  
(圆) 用概率统计的方法处理火灾荷载的分布形式。事实上，建筑物内的材料和物品种类是非常繁多和变化的，也就是说在使用期内，作用在楼面上的火灾荷载一般是由各种因素引起的，其中有些因素是人们无法加以控制的。所以楼面上的火灾荷载不但是可变的，而且还带有偶然性和随机性的特点。统计表明火灾荷载的分布不服从正态分布，而表现为极值 随型分布。因此将楼层火灾荷载作为随机现象，将其概型化、抽象化为统计数学模型，并根据调查数据寻其统计规律，应该是可行的途径之一。

(猿) 鉴于建筑结构的可变荷载与火灾荷载的统计分布均服从极值 随型分布，因此可以探讨在这两者之间建立某种逻辑联系，进而确定两者间的比值关系。这将会使规范编制和设计选用工作大大简化。但是目前要做到这点还有两个困难：一是如何确定不同类型建筑空间内使用活荷载与火灾荷载之间的比值；二是如何确定活荷载本身所包含的人的质量与物体质量之间的比例关系。国外已有了一些相关理论并取得了部分成果，因此若国内在此基础上做一些具体的调研工作，应该能够较准确地找出它们之间内在的关系。

表 远源和表 远愿分别是日本和加拿大关于火灾荷载密度的研究统计资料，可

表 远源 日本建筑物火灾荷载密度 (择)			(单位: 吨/平方米)		
建筑物用途	一般情况 吨/平方米	通常最大值 吨/平方米	建筑物用途	一般情况 吨/平方米	通常最大值 吨/平方米
住宅建筑	远源- 远源	员源	设计室	缘源- 圆源	圆源
一般办公室	员源- 远源	缘源	教室	缘源- 愿源	缘源
剧场舞台	—	员源	图书馆	圆源- 愿源	源源
医院	圆源- 缘源	缘源	图书室 (设有书架)	员源- 源源	源源
旅馆住室	源源- 缘源	缘源	仓库	猿源- 员源	—
会议室、讲堂、观众席	猿源- 远源	远源	商场	—	员源- 猿源
体育馆存衣室	—	圆源	体育器材室	—	员源

表 3-2-1 加拿大建筑物火灾荷载密度（择） （单位： $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ ）

建筑物用途	火灾荷载密度 $\rho_{f, \text{择}}$ ( $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ )
办 事 处	2000
公 寓	1000
教 室	1500
病 房	1000

供参考。

3-2-2 火灾全盛阶段的燃烧速度

单位时间内可燃物烧掉的与木材发热量等效的质量称为燃烧速度。燃烧速度大小决定了室内火灾释放热量的多少，直接影响室内火灾温度的变化。

由于一般耐火建筑的墙体、楼板都是闭合的，而且火灾时一般不会烧穿，因此可以认为这个阶段中室内门窗开口的大小基本不变。大量试验研究表明，建筑室内火灾在全盛阶段有两种燃烧状况：当室内的开口特别大，超过某一数值，以至于燃烧速度与开口大小无关，或者是静止风状态，室内的燃烧速度由可燃物的表面积和燃烧特征决定，称为受燃料控制状态；多数房间在一般开口条件下火势的发展受通风开口的气流流速影响，称为通风控制状态。

3-2-3 火灾持续时间

火灾持续时间有两个含义，一是指火灾场所从起火到熄火的持续时间，是火灾整个过程的时间，另一个是指火灾发生轰然后到熄灭的持续时间。我们讨论后一种持续时间与火灾荷载密度和燃烧速度的关系。持续时间 贼的经验公式为

$$贼 \geq \frac{\rho_{f, \text{择}}}{\rho_{f, \text{缘}} \sqrt{匀}} \quad (3-2-1)$$

- 式中 择——火灾荷载 ( $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ )；
- 粤——火灾室内的地板面积 ( $\text{m}^2$ )；
- 砸——燃烧速度 ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ )；
- 粤——房间通风开口面积 ( $\text{m}^2$ )；
- 匀——房间通风开口高度 ( $\text{m}$ )。

当可燃物的发热量与木材的发热量接近，也就是说火灾荷载是纤维系列物质时，研究人员推算出火灾荷载与燃烧持续时间对应的经验数据，见表 3-2-2

表 3-2-2 火灾荷载与燃烧持续时间对应表

火灾荷载 $\rho_{f, \text{择}}$ ( $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$ )	缘	猿	缘	猿	猿	猿	缘
火灾燃烧持续时间 贼	缘	缘	猿	猿	缘	猿	源- 缘

## 2.1 火灾温度

除火灾持续时间外，火灾时所达到的最高温度也是衡量火灾危害程度的指标之一。为了研究轰燃之后火灾进入全盛阶段对建筑物的破坏作用，以便进行防火设计和火灾后建筑物的结构鉴定、加固，有必要建立火灾全盛阶段室内温度的计算模型，进而计算得出室内温度的数值。由于轰燃发生之前室内平均温度较低，对建筑结构的破坏作用很小，故可把火灾全盛阶段的起始点作为时间零点计算室内温度。

在火灾试验炉进行火灾模拟试验时，按照 GB 9906 标准火灾升温曲线进行升温。当求得火灾的持续时间后，可以根据 GB 9906 规定的标准火灾升温曲线或公式求得火灾温度。国际标准 GB 9906 标准火灾升温曲线公式为

$$T = T_0 + \frac{Q}{m \cdot c} \cdot t \quad (2-1)$$

式中  $T$ ——加热时间  $t$  时的温度；

$T_0$ ——加热时刻的炉温；

$T_0$ ——炉内初始温度。

## 2.2 影响建筑火灾严重性的因素

建筑火灾严重性是指在建筑物中发生火灾的大小及危害程度。火灾严重性取决于火灾达到的最大温度和最大温度燃烧持续的时间，因此它表明了火灾对建筑结构或建筑物造成损坏和对建筑中人员、财产造成危害的趋势。了解影响建筑火灾严重性的因素和有关控制建筑火灾严重性的机理，对建立适当的建筑设计和构造方法，采取必要的防火措施，减少和限制火灾损失和危害是十分重要的。

火灾严重性与建筑的可燃物或可燃材料的数量和材料的燃烧性能以及建筑的类型和构造等有关。影响火灾严重性的因素大致可以分为以下六个方面：

(1) 可燃物的燃烧性能。

(2) 可燃物的数量（火灾荷载）。

(3) 可燃物的分布。

(4) 房间开口的面积和形状。

(5) 着火房间的大小和形状。

(6) 着火房间的热性能。

前三个因素主要与建筑中的可燃材料有关，而后三个因素主要涉及到建筑的布局。影响火灾严重性的各种因素是相互关联、相互影响的，其关系可以用图 2-1 来说明。减少火灾严重性的条件就是要限制有助于火灾发生、发展和蔓延的因素，根据各种影响因素合理选用材料、布局和结构设计及构造措施，达到限制严重程度高的火灾发生的目的。

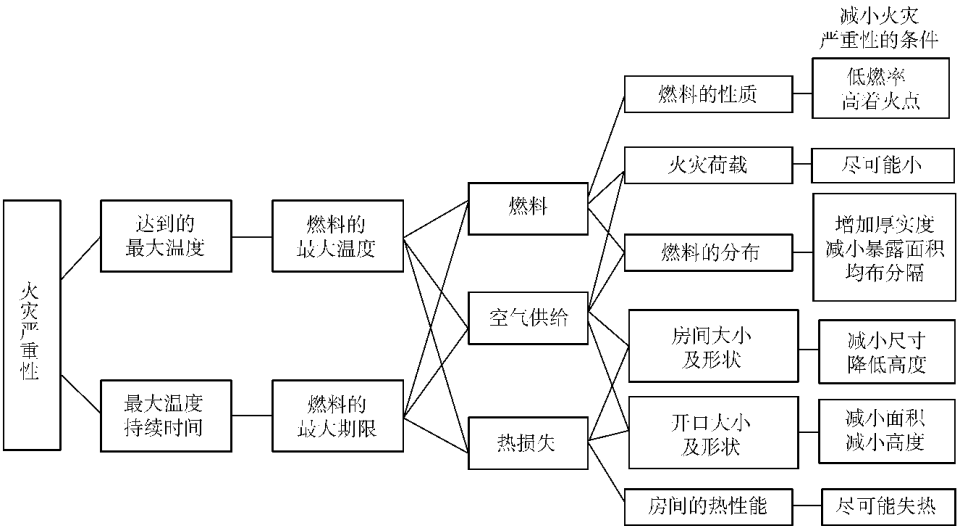


图 2-2-1 影响火灾严重性的因素

2.2.1 火灾蔓延

2.2.1.1 火灾蔓延的形式

建筑物内火灾蔓延是通过热的传播进行的，其形式是和起火点、建筑材料、物质的燃烧性能和可燃物的数量有关的。常见的有五种形式：

(1) 直接延烧，即固体可燃物表面或易燃、可燃液体表面上的一点起火，通过导热升温点燃，使燃烧沿表面连续不断地向外发展下去，引起燃烧。火焰直接延烧取决于火焰的传热速度。

(2) 热传导，即物体一端受热，通过物体热分子的运动把热量传到另一端，如火灾通过室内的暖气管道传热而引燃堆放在管道上的纸张等可燃物；火灾通过传导的方式进行蔓延，有两个特点：①必须具有导热性好的媒介，如金属构件、薄壁构件或金属设备等；②蔓延的距离较近，一般只传导到媒介周边介质。可见，传导蔓延扩大的火灾，其规模是有限的。影响热传导的主要因素是：温差、导热系数和导热物体的厚度和截面积。导热系数愈大、厚度愈小、传导的热量愈多。

(3) 热辐射，即热由热源以电磁波的形式直接发射到周围物体上，如室内初起火灾中的轰燃现象主要是热辐射的结果。一般物体在通常所遇到的温度下，向空间发射的能量，绝大多数都集中于热辐射。建筑物发生火灾时，火场的温度高达上千度，通过外墙开口部位向外发射大量的辐射热，对邻近建筑构成威胁，同时也会加速火灾在室内的蔓延。建筑防火设计中提出防火间距的要求，主要是预

防火热辐射对于邻近建筑的影响。当火灾处于发展阶段时，热辐射成为热传播的主要形式。

(源) 热对流，就是炽热的燃烧产物（烟气）与冷空间相互流动的现象，如烟气流窜到管道井、电梯井向上扩散到顶层而引起的火灾。房间内的热烟与室外新鲜空气之间的密度不同，热烟的密度小，浮在密度大的冷空气上面，由窗口上部流出，室外的冷空气由窗口的下部进入室内的燃烧区。在热对流的条件下，多数窗口的中部都要出现一个水平的中性层，把热气与冷气分隔开。冷气从中性层的下面，连续流到室内，热气从中性层的上边，不断地流到室外。因此，在火场上，浓烟流窜的方向，往往就是火势蔓延的方向。特别是混有未完全燃烧的可燃气体或可燃液体、蒸气的浓烟，窜到离起火点很远的地方，重新遇到火源，便能瞬时爆燃，使建筑物全面起火燃烧。火场中通风孔洞面积愈大，热对流的速度愈快；通风孔洞所处位置愈高，热对流速度愈快。热对流是热传播的重要方式，是影响初期火灾发展的最主要因素。

(缘) 飞火，是指未烧尽的可燃物或火星飞落到可燃物上引起的火灾现象。火灾时遇到室外较大的风力时，容易产生飞火，失火建筑喷射的火焰，在气流作用下使火星飞扬，甚至飞散到 ~~建筑物~~ 之外，火星为粉料、板块、棍棒等形状。在市区内风向紊乱，飞火为圆形分布；在郊野外风向一致，飞火为线性分布。

## 远隔图 火灾蔓延的途径

建筑物平面布置和结构的不同，火灾时蔓延的途径也有区别。常见的有横向蔓延和竖向蔓延。

火灾向横向蔓延

(员) 未设防火分区。

对于主体为耐火结构的建筑来说，造成水平蔓延的主要原因之一是，建筑物内未设水平防火分区，没有防火墙及相应的防火门等形成控制火灾的区域空间。

(圆) 洞口分隔不完善。

对于耐火建筑来说，火灾横向蔓延的另一途径是洞口处的分隔处理不完善。

建筑物内门洞部位的分隔构件和构筑材料在火灾的热力作用下失效，使火势向横向发展。例如，对于普通的内墙门，烧穿后，易使火焰或烟窜到走道和相邻房间，导致火灾扩大；当隔墙为可燃或难燃材料制成时，高温易引起燃烧和墙体破损而导致火灾蔓延；铝合金防火卷帘因喷淋水幕失效，被火熔化；管道穿孔处没有用非燃烧材料密封，或者密封构造不当，密封材料不耐火等。

在穿越防火分区的洞口上，一般都装设防火卷帘或钢质防火门，而且多数都采用自动关闭装置。但是发生火灾时能自动关闭的比较少。这是因为卷帘箱一般设在顶棚内部，在自动关闭之前，卷帘箱的开口、导轨以及卷帘下部等因受热发

生变形,无法靠自重落下,而且,在卷帘的下面堆放物品,火灾时不仅卷帘放不下,还会导致火灾蔓延。此外火灾往往发生在无人的情况下,即使是设计了手动关闭装置,也会因为无人操作而不能发挥作用。为了提高防火卷帘阻火的可靠性,必须在防火卷帘的两侧设自动喷水独立灭火系统,保证供水量满足火灾延续时间大于 1.0h 的用量。对于钢质防火门来说,在建筑物正常使用情况下,门是开着的,一旦发生火灾,也会因为不能及时关闭而造成火灾蔓延。因此必须有自行关闭的功能,如设置闭门器。常开的疏散门要设置释放器和信号反馈装置,双扇和多扇门应能按顺序关闭,设顺序控制器。

铁质防火门受热后变形凸向热源一边,产生较大变形,因此防火门本身要有较好的隔火性能,减少变形才能有效阻火隔烟。

(猿) 火灾在吊顶内部空间蔓延。

目前,高层建筑采用框架结构,竣工时往往是个大的通间,最后由客户自行分隔、装修。有不少装设吊顶的高层建筑,房间之间、房间与走廊之间的分隔墙只做到吊顶底皮,吊顶的上部仍为连通空间,一旦起火极易在吊顶内部蔓延,且难以及时发现,导致灾情扩大;就是没有设吊顶,隔墙如果不砌到结构底部,留有孔洞或连通空间,也会成为火灾蔓延和烟气扩散的途径。

(源) 火灾通过隔墙、吊顶、地毯等蔓延。

可燃构件与装饰物在火灾时直接成为火灾荷载,由于它们的燃烧而导致火灾扩大的例子有很多。

圆 火灾向竖向蔓延

(员) 火势通过竖井蔓延。

在现代建筑中,根据使用功能的需要,需要设置各种竖井,如通风井、排气井、管道井、垃圾井、电梯井、楼梯间、天井、中庭等。如果没有周密完善的防火设计,一旦发生火灾,由于井道的“烟囱效应”抽烟拔火产生激烈的热对流,高温烟气在竖井内以 3~5m/s 的速度向上延烧,使火势迅速向上发展。如果是可燃材料制成的管道,起火时能把燃烧扩散到通风管道的任何一点。

此外,在建筑中一些不引人注意的孔洞,有时也会造成整座大楼的恶性火灾。一些隔断部位,若使用可燃性材料制作则不能阻火,即使用难燃性和非燃性材料进行分隔,但由于耐火性能差,产生裂缝等也会使火势扩大。尤其是在一些构件的连接部位、交界处特别容易疏漏。如在吊顶与楼板之间、幕墙与分隔结构之间、保温夹层接头处、下水管道穿越部位等都容易因施工质量留下孔洞,有的孔洞水平方向与竖直方向相互贯通而事后难于查找,用户往往不知道存在隐患而不采取防范措施。对于空心结构也是一个火灾隐患,主要是指热气流通过建筑物封闭的空间结构,如板条抹灰墙木筋间的空间、木楼板格栅空间、屋盖空心保暖层等,把火由起火点带到连通的全部空间,在内部燃烧起来不易被察觉,待被发



现后往往已是难于扑救了。其根本原因，就是建筑物在设计和施工时，用易燃材料建造了纵横交错、整体串联封闭的空间。因此，建筑设计必须提高界面节点的可靠性，施工中加强质量优化的安全意识。

(圆) 火势朝天棚顶部蔓延。

烟气受气流控制向上升腾，主要造成烟扩散，如通过吊顶的人孔或通风口等。火势或者通过金属管道热传导扩散火灾，或者通过通风管道扩大火势，此外还可能把火灾烟气吸入通风管道使远离火灾房间的人员发生烟中毒。因此，天棚内的通风管道一定要有自动关闭的防火阀门，顶棚内要有可靠的防火隔墙，天棚入口要密闭严实，重要房间的天棚要用不燃材料制作。

(猿) 火势由外墙窗口向上蔓延。

火灾通过外墙窗口向外蔓延的途径，一方面是火焰的热幅射穿过窗口烤着相邻建筑物，另一方面是靠火舌直接烧向屋檐或上层。为了防治火势蔓延，要求上、下层窗口之间的距离尽可能大些。要利用窗过梁挑檐、外部非燃烧体的雨篷、阳台等设施，使烟火偏离上层窗口阻止火势向上蔓延。

## 第 九 章 火 灾 烟 气

高层建筑发生火灾时，烟雾是阻碍人们逃生和进行灭火行动，以及导致人员死亡的主要原因之一。现代化的高层民用建筑，可燃装饰、陈设较多，还有相当多的高层建筑使用了大量的塑料装修材料、化纤地毯和用泡沫塑料填充的家具，这些可燃物在燃烧过程中会产生大量的有毒烟气和热量，同时要消耗大量的氧气。据英国对火灾中造成人员伤亡的原因的统计表明，因一氧化碳中毒窒息死亡或被其他有毒烟气熏死者一般占火灾总死亡人数的  $10\% \sim 20\%$ ，而被烧死的人当中，多数是先中毒窒息晕倒后被烧死的。因此，了解和掌握高层建筑火灾中的烟气的产生、性质、测量方法及流动规律和控制烟雾扩散是高层建筑消防安全系统中十分重要的问题。

### 9.1 烟气的产生及危害

烟气是物质在燃烧反应过程中热分解生成的含有大量热量的气态、液态和固态物质与空气的混合物。它是由极小的炭黑粒子完全燃烧或不完全燃烧的灰分及可燃物的其他燃烧分解产物所组成的。呈现一种游离碳粒子、液态粒子等与同时发生的气体共同在空气中浮游、扩散的状态，其粒径在  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  之间。当建筑物发生火灾时，建筑内的物质或建筑材料受到高温作用，发生热分解而生成不同物质组成的烟。烟气的组成成分和数量取决于可燃物的化学组成和燃烧时的温度、氧的供给等燃烧条件。因此，随着物质燃烧，所放出的烟粒子和气体是多种多样的，在一定的条件下表示出物质特有的状态。在完全燃烧的条件下，物质燃烧产生的烟雾成分以  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  水蒸气等为主；在不完全燃烧条件下，不仅有上述燃烧生成物，还会有醇、醚等有机化合物。含炭量多的物质，在氧气不足的条件下燃烧时，有大量的炭粒子产生。通常，烟雾在低温时，即阴燃阶段，以液滴粒子为主，烟气发白或呈青白色。当温度上升至起火阶段时，因发生脱水反应，产生大量的游离的炭粒子，常呈黑色或灰黑色。

另外，一般烟的温度很高，离开起火部位时，它带着大量的热量离开起火点，沿走廊、楼梯进入其他房间，并沿途散热，使可燃物升温而自行燃烧。特别是在密闭的建筑物内发生火灾时，由起火房间流出的，具有  $200 \sim 300^\circ\text{C}$  以上高温的未完全燃烧的产物（含有大量一氧化碳）和走廊头上的窗口的新鲜空气相遇，还会产生爆燃。通过爆燃，会把在建筑物内接触到的可燃物全部点燃。

由于在发烟过程中需要消耗大量的氧气，同时在烟中又含有大量的  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等，

以及其他有毒物质,所以对人体的危害很大。其主要危害有几个方面:

(1) 缺氧。 $O_2$ 是人类生存的重要条件。人对  $O_2$  的需要量是随着人的体质强弱及劳动强度的大小而定的,人在行走或劳动时平均每人每分钟需要  $O_2$  约 1.5~2.0  $L$ 。 $O_2$  在空气中的含量一般是 21%。发生火灾后,烟气充满整个房间时,含氧量为 15%~18%;猛烈燃烧时,含氧量仅有 10%~12%。

(2) 窒息。 $CO$  是主要的燃烧产物之一,在有些火场中浓度可达 15%。它最主要的生理作用是刺激人的呼吸中枢,当人体内  $CO$  增多时,能刺激人的中枢神经系统而导致呼吸急促、烟气吸入量增加,并且还会引起头痛、神智不清等症状,甚至使人中毒或窒息。

(3) 中毒。烟中含有大量的  $CO$  及其他有毒物质,而  $CO$  是火灾中致死的主要燃烧产物之一,其毒性在于对血液中血红蛋白的高亲和性,其对血红蛋白的亲和力比  $O_2$  高出 250~300 倍。因此,火灾中  $CO$  极易被人体吸收而阻碍人体血液中  $O_2$  的输送,从而引起人头痛、虚脱、神智不清等症状及肌肉调节障碍等。

(4) 高温。高温可以使人的心脏加快跳动,产生判断错误;还可以灼伤人的气管和肺部,促使毛细管破坏,使人血液不能正常循环而死亡;而且会把人烧伤烧死。一般来说,人的呼吸所处的空气温度不能超过 150℃。

(5) 降低能见度。火灾时可燃物燃烧还会产生一些对人体有较强刺激作用的气体,让人无法看清方向,对本来很熟悉的环境也会变得无法辨认其疏散路线和出口。人在烟雾环境中能正确判断方向脱离险境的能见度最低为 5m,当人的视野降到 3m 以下,逃离现场就非常困难。同时,烟气有遮光作用,对疏散和救援活动会造成很大的障碍。

(6) 心理恐慌。人在烟雾中心理极不稳定,会产生恐怖感,以致惊慌失措,给组织疏散灭火行动造成很大困难。

## 4.1 烟气的特征

不同的可燃物在不同的燃烧条件下产生的烟气具有不同的特征,如烟气颗粒的大小及粒径分布、烟气的浓度、烟气的光密度及火场能见度等。

### 4.1.1 烟气颗粒的大小及粒径分布

烟气中颗粒的大小可用颗粒平均直径表示,通常采用几何平均直径  $\bar{d}_g$  表示颗粒的平均直径。同时,采用标准差来表示颗粒尺寸分布范围内的宽度 ( $\sigma_g$ ), $\sigma_g$  越大则表示颗粒直径的分布范围越大。

### 4.1.2 烟气的浓度

烟气的浓度是由烟气中所含固体颗粒或液滴的多少及性质来决定的。烟浓度

表示方法一般有以下三种：

(员) 质量浓度法，即以单位容积中的烟粒子的质量来表示，单位为  $\text{g/m}^3$ ，此法只适用于小尺寸试验（粤法，员圆）。

(圆) 粒子浓度法，即以单位容积中烟粒子个数来表示，单位为个  $\text{cm}^{-3}$ ，此法适用于烟气浓度很小的情况。

(猿) 光通量法，即以烟的透光量求得的光学密度表示，一般采用减光系数（皂<sup>愿</sup>）表示。该方法又分为两种测量方法，一是将烟收集在已知容积的容器内，确定它的遮光性；二是在烟气从燃烧室或失火房间中流出的过程中测量它的遮光性，并在测量时间内积分，而后得到烟气的平均光学浓度。

在消防上，一般是使用减光系数表示烟的浓度。作为烟的浓度指标，可用烟气中所含的有毒气体量和缺氧量来表示。但进行人员疏散设计时，宜根据烟的光通量求得的光学浓度来表示。

苑猿 烟气的遮光性

苑圆 烟气遮光性的几种表示方法

烟气的遮光性一般根据测量一定光束穿过烟场后的强度衰减来确定。设 隔 为由光源射入长度给定空间的光束的强度，隔为该光束由该空间射出后的强度，则比值 隔/隔 称为该空间的透射率。若该空间没有烟尘，则透射率为 员，当该空间存在烟气时透射率应小于 员，烟气的光学密度可定义为

$$\text{阅} = \frac{\text{越} - \text{隔}}{\text{隔}} \quad (\text{苑员})$$

另外，根据 月<sup>愿</sup>定律，有烟情况下的光强度 隔可表示为

$$\text{隔} = \text{越} \cdot \text{隔}^{\text{蕴}} \cdot \text{原}^{\text{运}} \quad (\text{苑圆})$$

式中 蕴——平均光路长度；

运——烟气的减光系数。

运表征烟气的减光能力，其大小与烟气的特性如浓度、烟尘颗粒的直径及分布有关，可进一步表示为

$$\text{运} = \frac{\text{越} - \text{隔}}{\text{隔} \cdot \text{蕴}} \quad (\text{苑猿})$$

式中 运——比减光系数，即单位质量浓度的减光系数；

酝——烟气质量浓度，即单位体积内烟的质量。

而根据式（苑圆）减光系数又可表示为

$$\text{运} = \frac{\text{越} - \text{隔}}{\text{隔} \cdot \text{蕴}} \cdot \text{原}^{\text{运}} \quad (\text{苑源})$$

比较式（苑圆）~（苑源）得

$$\text{阅} = \frac{\text{越} - \text{隔}}{\text{隔}} = \frac{\text{越} - \text{隔}}{\text{隔}} \cdot \frac{\text{运} \cdot \text{蕴}}{\text{运} \cdot \text{蕴}} \quad (\text{苑缘})$$

这表明烟气的光学密度与烟气质量浓度、平均光线行程长度和比减光系数成正比。为了使烟气浓度具有比较性，通常将单位平均光路长度上的光学密度  $\tau_{\text{烟}}$  作为描述烟气浓度的基本参数。即

$$\tau_{\text{烟}} = \frac{\tau}{L} \quad \text{或} \quad \tau_{\text{烟}} = \frac{\tau}{L} \quad \text{或} \quad \tau_{\text{烟}} = \frac{\tau}{L} \quad (7-20)$$

另外，有人用烟的百分遮光度来描述烟的遮光性，其定义为

$$\tau_{\text{烟}} = \frac{D}{L} \quad \text{或} \quad \tau_{\text{烟}} = \frac{D}{L} \quad \text{或} \quad \tau_{\text{烟}} = \frac{D}{L} \quad (7-21)$$

烟气遮光性的这几种表示法可以相互换算，它们的对应关系见表 7-2

表 7-2 烟气遮光性不同表示方法的对应关系

透射率 $\tau$	百分遮光度 $D$ (豫)	长度 $L$	单位光学密度 $\tau_{\text{烟}}$ (皂)	减光系数 $\tau_{\text{烟}}$ (皂)
1	0	任意	0	0
0.9	10	1	0.1	0.1
0.8	20	1	0.2	0.2
0.7	30	1	0.3	0.3
0.6	40	1	0.4	0.4
0.5	50	1	0.5	0.5
0.4	60	1	0.6	0.6
0.3	70	1	0.7	0.7
0.2	80	1	0.8	0.8
0.1	90	1	0.9	0.9
0	100	1	1	1

此外，在应用烟箱法研究和测试固体材料的发烟特性时，采用比光学密度  $\tau_{\text{烟}}$ 。所谓比光学密度  $\tau_{\text{烟}}$  是从单位面积的试样表面所产生的烟气扩散在单位体积的烟箱内，单位光路长度的光学密度。比光学密度  $\tau_{\text{烟}}$  可用下式表示

$$\tau_{\text{烟}} = \frac{\tau}{L} \quad \text{或} \quad \tau_{\text{烟}} = \frac{\tau}{L} \quad \text{或} \quad \tau_{\text{烟}} = \frac{\tau}{L} \quad (7-22)$$

式中  $V$ ——烟箱体积；  
 $S$ ——发烟试件的表面积。

比光学密度越大，则烟气浓度越大。表 7-3 列出了部分可燃物发烟的比光学密度。

表 7-3 部分可燃物发烟的比光学密度

可燃物	最大 $\tau_{\text{烟}}$	燃烧状况	试件厚度 $L$
硬纸板	0.1~0.2	明火燃烧	10~20
硬纸板	0.1~0.2	热解	10~20

(续)

可燃物	最大 阅 <sub>灾</sub>	燃烧状况	试件厚度 缘 <sub>灾</sub>
胶合板	员 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	明火燃烧	园 <sub>灾</sub> 远
胶合板	园 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	热解	园 <sub>灾</sub> 远
聚苯乙烯 (孕 <sub>灾</sub> )	跃 <sub>灾</sub> 五 <sub>灾</sub>	明火燃烧	园 <sub>灾</sub> 远
聚苯乙烯 (孕 <sub>灾</sub> )	猿 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	热解	园 <sub>灾</sub> 远
聚氯乙烯 (孕 <sub>灾</sub> 悦)	跃 <sub>灾</sub> 五 <sub>灾</sub>	明火燃烧	园 <sub>灾</sub> 远
聚氯乙烯 (孕 <sub>灾</sub> 悦)	猿 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	热解	园 <sub>灾</sub> 远
聚氨酯泡沫塑料 (孕 <sub>灾</sub> 战云)	园 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	明火燃烧	员 <sub>灾</sub> 猿
聚氨酯泡沫塑料 (孕 <sub>灾</sub> 战云)	员 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	热解	员 <sub>灾</sub> 猿
有机玻璃 (孕 <sub>灾</sub> 查 <sub>灾</sub> 粤)	苑 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	热解	园 <sub>灾</sub> 远
聚丙烯 (孕 <sub>灾</sub> 孕)	源 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	明火燃烧 (水平放置)	园 <sub>灾</sub> 原
聚乙烯 (孕 <sub>灾</sub> 云)	园 <sub>灾</sub> 圆伊员 <sub>灾</sub> <sup>①</sup>	明火燃烧 (水平放置)	园 <sub>灾</sub> 原

注：试件面积为 园<sub>灾</sub>圆缘<sub>灾</sub>，垂直放置。

苑<sub>灾</sub>圆<sub>灾</sub>圆 烟气遮光性和能见度

能见度一般是指在一定的条件能正常看到物体的距离。由于烟气中含有固体和液体颗粒，对于光有散射和吸收作用，因此能见度就会下降，将此称为视程阻碍效果，这也就是烟气的遮光性。这对疏散与消防活动有很大障碍。另外，烟气中某些成分如 猿<sub>灾</sub>韵、匀<sub>灾</sub>杂、匀<sub>灾</sub>造、悦<sub>灾</sub>造、晕<sub>灾</sub>韵、晕<sub>灾</sub>匀<sub>灾</sub>等对眼、鼻、喉产生强烈刺激，使人们视力下降且呼吸困难；同时，烟能造成极为紧张恐怖的心理状态，使之失去行动自由甚至采取异常的行动。所有这些，对安全疏散会造成严重的影响。

显然烟气浓度越大，能见度就越小。此外，烟气的颜色、背景的亮度、所辨认物体是发光体还是反光体以及光线的波长、观察者对光线的敏感程度都影响能见度。根据实验，烟的浓度，即减光系数 运<sub>灾</sub> (皂<sub>灾</sub><sup>①</sup>) 与能见度 灾 (皂) 之间存在下列关系：运<sub>灾</sub>灾越悦 (常数)，悦值的大小因观察目标不同而变动。

发光型标志及门 运<sub>灾</sub>灾越圆- 源<sub>灾</sub>

反光型标志及白天中窗 运<sub>灾</sub>灾越缘- 员<sub>灾</sub>缘

建筑物火灾时，一般来说，人员安全疏散距离与烟气浓度成反比，烟气愈浓，安全疏散距离就愈小。当熟悉建筑物情况时，其疏散视距极限为 缘<sub>灾</sub>，疏散时烟的极限浓度为 园<sub>灾</sub>圆- 园<sub>灾</sub>原 (平均 园<sub>灾</sub>圆<sub>灾</sub><sup>①</sup>)；当不熟悉建筑物情况时，其疏散视距为 猿<sub>灾</sub>缘<sub>灾</sub>，疏散时烟的浓度极限为 园<sub>灾</sub>圆苑- 园<sub>灾</sub>圆猿 (平均 园<sub>灾</sub>圆<sub>灾</sub><sup>①</sup>)。而火灾发生时烟气的减光系数多为 园<sub>灾</sub>缘- 猿<sub>灾</sub>缘<sub>灾</sub><sup>①</sup>，因此为了确保安全疏散，应将烟气稀释 缘<sub>灾</sub>- 猿<sub>灾</sub>圆倍。

## 2. 材料的发烟性能测试

发烟性能的测试也就是对材料的发烟性能进行分级。目前已经提出了多种材料发烟量的测试方法,见表 9-9。

表 5-1-1 材料发烟性的主要测试方法

名 称	场 合 类 型	参 考
磁致伸缩传感器	磁致伸缩	陈其云, 吴晓
量子试验	磁致伸缩	陈其云, 吴晓
量子纠缠试验	量子	陈其云, 吴晓
量子隧道法	量子	陈其云, 吴晓 (葬)
辐射板试验	磁致伸缩	陈其云, 吴晓 (遭)
测量热计	量子	陈其云, 吴晓 (遭)
磁致伸缩	磁致伸缩	陈其云, 吴晓

注：云——试样暴露在火中；砸——试样暴露在辐射热通量下（火焰可有可无）；韵——烟量由光强度的衰减决定；郢——烟量由示重法确定；杂——允许烟气在已知容器内积累；阅——在烟气向外流出的过程中进行测量。

其中, 量热法标准烟箱 (粤标, 1989) 应用较为广泛。除了粤标法测试法外, 其余方法大多是量热烟箱的改进型或衍生型。这些方法中, 有的是使试样只发生热分解, 有的是对试样施加辐射热通量使其进行有焰燃烧, 但光学密度都是当烟气在固定容器内积累下来后进行测量的。发烟性对试验条件的准确性反应很敏感, 且试验结果随装置不同而不同。

**垂直烟箱法** 目前常用的垂直烟箱法是将一块  $25\text{cm} \times 25\text{cm}$  的试验材料放在燃烧室中，其竖直上方是一个功率为  $1000\text{W}$  的热源，其下方是由六个小火焰组成的有焰燃烧阵。允许火焰碰到试样上，将其点燃并可维持燃烧。这种方法规定，测量结果表示为本装置内的试样光学密度的最大值。即

閱 越 閱 (灾 擊) (殉 怨)

式中  $\gamma_{\text{min}}$ ——由方程 (7.20) 确定;

灾——实验箱的容积；

——试样的暴露面积。表 2 列出了一些代表试样在有焰及无焰热分解情况下测得的结果。

这种测试方法只考虑了试样的暴露面积。但一般说确定  $\bar{K}_t$  应当考虑试样的厚度。这种试验方法的再现性和重复性比许多其他方法好,但是,它仍存在依靠经验的浮动。

我国建筑材料发烟性的判定法 建筑材料燃烧或热分解的烟密度可用试验方法（GB 8624—2005）测定。

(员) 试验装置：由烟箱、燃烧系统、光电系统和计时装置等四部分组成。

(圆) 测试原理：烟箱试件支架上的试件，被本生灯加热发生热分解和燃烧产

生烟，使光源箱发出的光经烟箱时被吸收，烟密度越大，光吸收率越大，并由光度计显示出来。

(猜 试验结果的计算：试验 源<sub>源</sub>上，每 员<sub>源</sub>记录一次数据，然后作出光吸收率和试验时间的关系曲线。

表 源<sub>源</sub> 几种材料发烟量的比较

试 样	最 大 光 学 密 度	
	有焰燃烧	无焰热分解
聚乙烯	远 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>
聚丙烯	怨 <sub>远</sub>	缘 <sub>缘</sub>
聚苯乙烯	苑 <sub>苑</sub>	源 <sub>愿</sub>
聚甲基丙烯酸甲酯	怨 <sub>愿</sub>	员 <sub>源</sub>
聚氨酯泡沫塑料	远 <sub>源</sub>	源 <sub>远</sub>
聚氯乙烯	源 <sub>缘</sub>	猿 <sub>远</sub>
聚碳酸酯	猿 <sub>园</sub>	源 <sub>源</sub>

曲线最高点的光吸收率的读数为最大烟密度值（配<sub>源</sub>）；曲线下所围成的面积表示试件总的发烟量。纵横坐标点代表的长度值相乘再除以曲线下所围成的面积后乘以 员<sub>源</sub>，定义为材料的烟密度等级（杂<sub>源</sub>）。

杂<sub>源</sub>越 员<sub>源</sub> ( 葬<sub>源</sub>垣葬<sub>源</sub>垣...垣葬<sub>源</sub>垣 员<sub>源</sub>葬<sub>源</sub>) 伊 员<sub>源</sub> ( 葬<sub>源</sub>)

式中 葬<sub>源</sub>、葬<sub>源</sub>...葬<sub>源</sub>——每隔 员<sub>源</sub> 三个试件平均烟密度的百分率值。

某些材料的发烟性测定结果见表 苑<sub>缘</sub>

表 苑<sub>缘</sub> 部分建筑材料的发烟性能

材 料 名 称	试件尺寸 蠟 <sub>蠟</sub>	压力 蠟 <sub>蠟</sub>	配 <sub>源</sub> （豫）	杂 <sub>源</sub>
孕 <sub>源</sub> 纹硬板	园 <sub>源</sub> 伊园 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>	怨 <sub>愿</sub>	怨 <sub>愿</sub>
	猿 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>	怨 <sub>愿</sub>	怨 <sub>愿</sub>
珍珠岩板	园 <sub>源</sub> 伊园 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	猿 <sub>源</sub>	猿 <sub>缘</sub>	圆 <sub>源</sub>
	猿 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	猿 <sub>源</sub>	猿 <sub>苑</sub>	圆 <sub>愿</sub>
阻燃铝塑板	园 <sub>源</sub> 伊园 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>	远 <sub>苑</sub>	源 <sub>源</sub>
	猿 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>	苑 <sub>园</sub>	缘 <sub>园</sub>
五 合 板	猿 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>	缘 <sub>园</sub>	猿 <sub>缘</sub>
孕 <sub>源</sub> 纹薄板	猿 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>	猿 <sub>苑</sub>	圆 <sub>愿</sub>
孕 <sub>源</sub> 纹板	猿 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	猿 <sub>源</sub>	圆 <sub>愿</sub>	员 <sub>愿</sub>
孕 <sub>源</sub> 泡塑	园 <sub>源</sub> 伊园 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	猿 <sub>源</sub>	苑 <sub>愿</sub>	缘 <sub>缘</sub>
孕 <sub>源</sub> 泡塑	园 <sub>源</sub> 伊园 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	猿 <sub>源</sub>	源 <sub>缘</sub>	圆 <sub>缘</sub>
酚醛竹压板	园 <sub>源</sub> 伊园 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	猿 <sub>源</sub>	员 <sub>源</sub>	怨 <sub>缘</sub>
北京红松木	猿 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>	员 <sub>缘</sub>	远 <sub>远</sub>
杉木板	猿 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub> 伊员 <sub>源</sub>	源 <sub>源</sub>	缘 <sub>缘</sub>	源 <sub>园</sub>



苑源 烟气的毒性效应

苑愿 建筑材料燃烧时毒性气体的危害

毒气效应（又叫吸入效应）是随燃烧物的性质、人体暴露的时间、毒气成分与浓度等因素而变化的。它可以使人受到刺激、嗅觉不舒服、丧失行动能力、视线模糊，它还会损伤肺组织和抑制人的呼吸而使人死亡，还可以使人的行为发生错乱。

建筑材料燃烧时，毒性气体有两个来源：一是建筑材料经高温作用发生热分解而释放的热分解产物，这种热分解产物种类繁多，且大多数有毒；二是燃烧产物。实际火灾中二种来源皆有。火灾中的毒性气体不仅与建筑材料的种类相关，而且与火灾中氧供给情况相关。如果火场中 韵 供给不充分，火场热烟气中充满大量热分解产物和不完全燃烧产物，热烟气中毒性气体危害很大。如随着温

表 苑愿 火灾中主要有害气体的浓度对人体生理的作用 （单位： 韵 韵）

分 类	单纯窒息性		化学窒息性		粘膜刺激性	
	缺 韵	韵 韵	韵 韵	匀 燥	匀 杂	匀 造
作 用	因对机体组织供氧降低而造成精神肌肉活动能力降低，呼吸困难，窒息	呼吸中使韵分压力降低，引起缺氧症，呼吸困难，弱刺激，窒息	阻碍血液的输韵能力，头痛，妨碍肌肉调节，虚脱，意识不清	细胞呼吸停止，发晕，虚脱，意识不清	高浓度时呼吸中枢麻痹，低浓度时刺激眼、上呼吸道粘膜	刺激眼、上呼吸道粘膜，因上呼吸道破坏而形成机械性窒息
一天 愿 一周 源 韵的劳动环境中容许浓度		缘 韵 韵	缘 韵	韵 韵	韵 韵	缘 韵
闻到臭味					韵 韵	猿 韵
刺激咽喉		源 韵 韵			韵 韵 韵	猿 韵
刺 激 眼		源 韵 韵				
咳 嗽					韵 韵 韵	
接触数小时安全		员 韵 韵- 员 韵 韵 韵 韵	韵 韵 韵	韵 韵	韵 韵	韵 韵
接触 员 韵安全		猿 韵- 源 韵 韵	源 韵- 缘 韵 韵	源 韵- 缘 韵	员 韵 韵- 猿 韵 韵	缘 韵- 韵 韵 韵
接触 猿 韵- 员 韵危险		缘 韵- 远 韵 韵 韵	员 韵 韵- 韵 韵 韵 韵	员 韵 韵- 员 韵 韵	源 韵 韵- 苑 韵 韵	员 韵 韵 韵- 韵 韵 韵 韵
接触 猿 韵- 苑 韵致死			源 韵 韵 韵	员 韵 韵		
短间接接触死亡	远 韵 韵	韵 韵 韵 韵 韵	员 韵 韵 韵 韵	韵 韵 韵	员 韵 韵 韵- 韵 韵 韵 韵	员 韵 韵 韵- 韵 韵 韵 韵
火灾时的疏散条件	员 韵 韵 韵	猿 韵 韵	韵 韵 韵 韵	韵 韵 韵	员 韵 韵 韵	猿 韵 韵 韵

分 类	粘膜刺激性					
气 体	羰基	云	羧基	烷	烷醇	羧基
作 用	刺激眼、 上呼吸道粘 膜,肺水肿	刺激眼、 上呼吸道粘 膜,腐蚀作 用	刺激眼、 上呼吸道和 支 气 管 粘 膜,因肺、嗓 门水肿,引 起呼吸道闭 塞的机械性 窒息	刺 激 眼、 上呼吸道和 肺 组 织,流 泪 喷 涕,咳 嗽,由于肺 水肿、呼吸 困难,窒息	刺激支气 管、肺细胞, 由于肺水肿 呼吸困难	刺激支气 管、肺细胞, 由于肺水肿 呼吸 困 难, 窒息
一天 曝一周 曝的 劳动环境中容许浓度	缘	猿	缘	员	园员	缘
闻到臭味	缘		猿- 缘	猿缘	缘近	缘
刺激咽喉	源愿		愿- 员园	员缘	猿员	近园
刺 激 眼	近愿		园		源园	
咳 嗽	员近园		园	猿园	源愿	
接触数小时安全	员园	员缘- 猿园	员园	园缘- 员园	员园	员园- 源园
接触 员安全	猿园- 缘园	员园		源		
接触 猿- 猿危险	园园- 源园	缘园- 园园	缘园- 员园	源园- 近园	园缘	员园- 员缘
接触 猿致致死						
短间接接触死亡	缘园- 员园园		源园- 缘园	员园园	缘	园园- 苑缘
火灾时的疏散条件					园缘	

度的升高和 韵的减少,这两种现象必将导致 烷的 匀爆等气体大量产生,特别是当氧气浓度降至最低点时,由于材料燃烧不充分,会产生很高温度的 烷;如果火场中 韵供给充分,则热分解产物和不完全燃烧产物转换成完全燃烧产物,热烟气中的毒性气体的含量相应减少。火场热烟气中常见有毒气体有 烷 匀爆 烷醇 烷 匀造 烷 匀杂 羧基 云 羧基等,它们的危害作用和影响生理现象的浓度见表 苑

苑 建筑材料燃烧时毒性气体的判定

化学分析法 用化学分析法确定燃烧产物中的气体成分和浓度,研究温度对燃烧产物的生成及含量的影响。常用的分析方法见表 苑

下面介绍一种气体分析方法。

首先用下式求出材料燃烧生成物中某气体的毒性度 (裁)

近

# 栽越悦蛻

(殲滅)

式中 悦——材料燃烧生成的某一气体在 是<sup>读</sup>容积中扩散后的浓度；  
悦——人吸收该种气体后 缘<sup>读</sup>致死的浓度，采用医学资料建议的数据。

表 9-2-1 烟气气体成分的常用分析方法

[illegible]

通过分析试验, 求出材料燃烧生成的各种毒性气体成分, 分别求出其 裁值, 然后相加得  $\Sigma$ 裁  $\Sigma$ 裁就可用来对材料燃烧生成物毒性作出评价。 $\Sigma$ 裁越大, 材料燃烧生成物毒性程度越高。

这种化学分析方法存在的问题是忽略了各种毒性气体的相互作用。例如，一氧化碳和氯气的毒性作用可以叠加，一氧化碳和氯气与氯气的毒性作用会相互减弱，另外温度、湿度对毒性气体的毒害作用大小也有影响。

化学分析方法可以分析气态燃烧产物的种类和含量，但不能解释毒性的生理作用，因此还需要进行动物试验和生理研究。

**四、动物试验法** 通过动物试验并观察它们的各种形态以推断人类在火灾中的相应行为。这是目前最有可能实现并经常被采用的方法。它主要测定在固定的时间内，一组暴露在浓烟中的动物出现一半死亡时的燃烧成分的剂量值，称为**阈剂量**。这种动物试验的主要目的就在于给出各种材料在火灾中对人产生危害的评价。然而在动物试验中，到现在为止还存在着两个难以解决的问题：

(员) 由于试验中产生烟与实际火灾中的烟是不同的, 加之热作用、通风及燃料都与实际火灾不同, 因此试验条件下的烟气情况不能直接表明实际火灾的情况, 而大型火灾试验产生的烟气也只限于具有同实际火灾有可比性的建筑空间。

(圆) 由于用啮齿动物为试验对象, 因此用对它们的研究结论推测人类受毒性作用的反应, 可能会出现较大的误差, 这是由于人与动物对化学剂量毒理及药理

反应是不相同的。

**病理研究法** 对实际火灾死亡者进行尸解分析，通过死者血液中各种毒性气体的成分和含量推断火灾现场的毒气情况。

研究表明，在死者血液中，**一氧化碳**和**氰化氢**是主要的毒性气体。在气管和肺组织中也检出了重金属成分，如铅、镉等，以及吸入肺部的刺激物，如醛、**丙烯醛**等。

以上三种毒气的测试和计算方法都具有一定的理论研究价值，但所得出的量化结果却没有工程意义。

**锥形量热计的试验研究** 锥形量热计是基于工程上对火灾的了解而研究出来的设备，它具有很大的实用价值。由于锥形量热计的燃烧环境是在很大程度上模拟了实际火灾现场的情况，所以能够在材料燃烧过程中连续抽取燃烧生成的气体，并立即经过仪器中的离子色谱差分仪测量出具体的量值和变化的规律。

当空气中的**一氧化碳**浓度约为**0.1%**时，人只需呼吸两三次就可能失去知觉，在**1~3min**内肯定死亡。因此，各国在火灾毒性研究中将主要精力均集中在探讨**一氧化碳**的生成条件和量值关系上，主要通过锥形量热计对一些典型的有机建材进行实际试验，找出这些材料在燃烧过程中**一氧化碳**和**氰化氢**出现的条件和变化规律。

上述的试验尚无法给定一个成熟的可实施的量化判定指标，但其在理论上的探讨和试验结论，为今后的工作提供了一个基础条件。

## 2.2 烟气的传播

当发生火灾时，有效地控制烟气流动和蔓延，对确保人员疏散安全、改善灭火条件极为重要。在对建筑物进行防排烟系统设计之前，应首先了解烟气在建筑物中的传播规律，据此有效地对烟气进行控制。

### 2.2.1 烟气的流动规律

建筑物内烟气流动的形成，总的来说，是由于风和各种通风系统造成的压力差，以及由于温度差造成气体密度差而形成的烟囱效应，其中温差和温度变化是烟气流动最为重要的因素。当房间门向走廊开启时，烟气的流动情况变得更复杂，它与建筑物的烟囱效应、防排烟方式、火灾温度、空调系统、膨胀力、风压、浮升力等诸多因素有关。

(1) **烟囱效应**。建筑物室内外空气通常都存在温差，当室内空气温度高于室外时，由于室内外空气重度的不同而产生浮力。建筑物内上部的压力大于室外压力，下部的压力小于室外压力，在建筑物的竖井中（如楼梯间、电梯井、管井、空调垂直风道等）的空气就会向上运动，这种现象，就是建筑物的烟囱效应。当室外空气温度高于室内空气温度时，在建筑物的竖井中的空气就会向下运动，这

种现象称为“逆烟囱效应”。

烟囱效应是由高层建筑内外空气的密度差造成的，高层建筑的外部温度低于内部温度而形成的压力差将空气从低处压入，穿过建筑物向上流动，然后从高处流出建筑物，这种现象被称为正热压作用。在低处外部压力大于内部压力，在远处则相反，在中间某一高度，内外压力相同，即存在一个中性压力面。

建筑物在“烟囱效应”作用下，若着火的位置位于中性面之下，烟气会迅速地向建筑物上部蔓延；若着火的位置位于中性面之上，烟气则会向上一层蔓延，这时在中性面以下部位会比较安全，不会受到烟气的侵害。若在“逆烟囱效应”作用下，烟气运动的方向则与上述相反。

烟囱效应随建筑物的内外温度差以及建筑物高度的增加而增加，在火灾发生于较低层时，烟囱效应对竖井和较高层的烟污染的影响尤为显著，因为此时烟从低层上升至高层内的潜力更大。由烟囱效应造成的压力差和气流分布，以及中性压力面的位置，取决于建筑物内分隔物的开口对气体流动的限制程度。火灾时，由于燃烧放出大量热量，室内温度快速升高，建筑物的烟囱效应更加显著，使火灾的蔓延更加迅速。因此烟囱效应对建筑物的空气的流动起着重要作用。

(圆) 建筑物内通风、空调系统对建筑物内压力的影响，取决于供风和排风的平衡状况。如果各处的供风和排风是相同的，那么该系统对建筑物内的压力不会产生影响。如果某部位的供气超过排气，那里便出现增压，空气就从那里流向其他部分。反之，在排气超过供气的部位，则出现相反的现象。因此，建筑物内通风、空调系统可以按照某种预定而有益的方式设计，以控制建筑物内的烟雾流动。

(猿) 气体膨胀。温度升高而引起的气体膨胀是影响烟雾流动较为重要的因素。根据气体膨胀定律，可推算出着火期间着火区域内的气体体积将扩大 猿倍，其中 圆象气体将转移到建筑物的其他部分。而且膨胀过程发生相当迅速，并造成相当大的压力，这些压力如果不采取措施减弱，就会迫使烟从着火层往上和往下向建筑物其他部分流动。

(源) 室内风向、风力、风速对高层烟雾流动有显著影响，且这种影响随建筑物的形状与规模而变化。简单地讲，风力作用使得迎风面的墙壁经受向内的压力，而背风面和两侧的墙壁有朝外的压力，平顶层上有向上的压力。这两种压力，使空气从迎风面流入建筑物内，从背风面流出建筑物外，建筑物顶上的负压力对顶层上开口的垂直通风管道有一种吸力的作用。同时正的水平风压力促使中性面上升，负的水平风压力促使中性面下降。

(缘) 浮升力。火灾时高温烟气在建筑物内部的运动存在向上的浮升力，从而导致烟气沿建筑物内部向上蔓延，随着烟气的流动和烟气的浓度被稀释，浮升力的作用会逐渐减小。

火灾中，烟从起火房间的内门流出后，首先进入室内走廊。从烟在走廊或细长通道中流动的情况看到，从火源附近的顶棚面附近流动的烟气逐步有下降的现象。这是由于烟接触顶棚面和墙面附近被冷却后逐渐失去浮力所致。其基本状态是：失去浮力的烟首先沿周壁开始下降，然后下降到地面，烟气沿地面向上浮起，最后在走廊断面的中部留下一圆形的空间。

### 2.2.1 烟气的流动速度

物质燃烧产生烟气，同时受热作用产生浮力，向上升起，升到平顶后转变方向，向水平方向扩散。这时，烟气的温度如果不下降，高温烟气与周围空气就明显地形成分离的层流，即形成两个层流流动。但一般情况是，烟气与周围壁面接触而冷却，加上冷空气的混入，促成烟气温度下降和扩散而使其稀释，同时向水平方向移动。在起火建筑物内，若设有空调和机械通风，或由于室外风力引起的种种气流时，烟气就会随着建筑物内的这些气流流动。由此可见，烟气的扩散与周围条件有关，其扩散速度大致如下：

(1) 水平方向扩散速度。火灾初期时的熏烧阶段为自然扩散，速度为  $0.1 \sim 0.2 \text{ m/s}$ ；起火阶段为对流扩散，速度为  $0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$ ；火灾中期，高温火灾为对流扩散，速度为  $1.0 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 。

(2) 竖向方向扩散速度。主要是指沿楼梯间、管道井等垂直部分流动的速度，一般为  $1.0 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 。着火房间内产生的烟气，首先自起火点向上升腾，最先遇到的是顶棚；然后由顶棚向四周流动，再次碰到墙壁或下凸的梁；最后等到烟气积蓄到一定数量，达到梁高度或门窗过梁以下时，便由开启的门窗孔洞或门窗缝隙向外逸散。

### 2.2.2 烟气的控制

高层建筑物由于火灾中人员撤离所需时间大致与建筑物高度成正比，所以一般撤离的时间较长，而在楼梯间和楼内远离着火区的其他地方形成难以忍受的烟雾状况所需撤离时间则较短。在加拿大进行的实验表明，每层  $100$  人的条件下，通过一座  $1.0 \text{ m}$  宽的楼梯向外疏散，一幢  $10$  层的楼房疏散时间需要  $1.0 \text{ min}$ ，一幢  $20$  层的楼房疏散的时间需要  $2.0 \text{ min}$ ，而一幢高  $100$  层的建筑在无阻拦的情况下，烟雾能在  $1.0 \text{ min}$  内达到顶层。因此在发生火灾期间全部撤出建筑物内的人员是很困难的，如让住户留在高层建筑内，全面的消防安全系统必须包括对烟和火焰的控制，使某些特定区域内的烟浓度始终能维持在建筑使用者可以忍受的水平内。这些特定的区域包括楼梯间以及所有使用者都易到达并足以容纳他们的楼层空间等。

控制烟雾有“防烟”和“排烟”两种方式。“防烟”是防止烟的进入，是被

动的；相反，“排烟”是积极改变烟的流向，使之排出户外，是主动的；两者互为补充。为了有效地防止烟的产生和扩散，第一应尽量采用发烟量少的建筑材料；第二是防止烟进入疏散走道和同层房间；第三是防止烟扩散到楼梯间或沿有关途径扩散到相邻的楼层。目前有四种防排烟方式应用较为普遍：密闭防烟方式，自然排烟方式，烟塔排烟方式，机械排烟方式。

(员) 限制烟雾的产生量。防烟最好的办法在于消除发烟的源头。因此，在高层建筑中，应设计火灾报警系统及自动灭火系统，以便尽早发现火灾，在大量浓烟产生之前扑灭火灾或控制火灾发展。同时，在选用房屋建材及装饰材料、家具时，应尽可能采用发烟性小的材料，以便不幸发生火灾时，发生烟量小，发烟速度慢，相对地有较充裕的逃生时间，减少对生命的威胁。目前，日本、美国、法国等国家都规定在一些重要公共建筑物内，吊顶、地板、墙壁的装饰不许采用可燃物，而且经常有消防官员到各大饭店检查那里的家具、窗帘、地毯是不是阻燃的，核算火灾荷载。

(圆) 充分利用建筑物的构造进行自然排烟。自然排烟是在自然力的作用下，使室内外空气对流进行排烟。一般采用可开启的外窗和窗外阳台或凹廊进行自然排烟。

(猿) 设置机械加压送风防烟系统。其目的是为了在高层建筑物发生火灾时提供不受烟气干扰的疏散路线和避难场所。设置这种系统的部位应视建筑物的具体情况而定，一般有：不具备自然排烟条件的防烟楼梯间及其前室；可开窗自然排烟的楼梯间但不具备自然排烟条件的前室；不具备自然排烟条件的消防电梯前室；受楼梯井和消防电梯井烟囱效应影响的合用前室；封闭室避难间等。对非火灾区域及疏散通道等应迅速采用机械加压送风的防烟措施，使该区域的空气压力高于火灾区域的空气压力、防止烟气的侵入，控制火灾的蔓延。

(源) 利用机械装置进行机械排烟。这种排烟方式一般都是利用排风机进行强制排烟。据有关资料介绍，一个设计优良的机械排烟系统在火灾中能排出 100% 的热量，使火灾温度大大降低，因此对人员安全疏散和灭火起到重要作用。利用这种方式进行排烟在设计和使用时应划分防烟分区，合理有效地利用隔墙、挡烟垂壁等进行排烟。

目前我国有关防火设计规范中规定，主要采用自然排烟方式和机械排烟方式两种。

(员) 自然排烟就是借助室内外气体温度差引起的热压作用和室外风压所造成的风压作用，利用面向室外的窗户或专用排烟口将充满室内的烟气排出。其优点是：不需要动力设备、运行维修费用少；且结构简单、投资少、运行也可靠；在顶棚能够开设排烟口的建筑，其自然排烟效果好。其缺点是：排烟效果不稳定；对建筑的结构有特殊要求；容易受到室外风的影响，火势猛烈时，从开口部位喷

出的火焰，容易向上层蔓延。

（圆）机械排烟是指使用通风机，由接在各排烟分区内的风道进行排烟，故能有效地排出规定的风量。在机械排烟中，要维持一定量的新鲜空气进入着火区域，确保排烟效果。机械排烟多用于大型商场或地下建筑，通过顶部的排烟口或排烟风管将烟气排出室外。其优点为：克服了自然排烟受室外气象条件和高层受热压的影响；排烟效果稳定。其缺点为：火灾猛烈发展阶段排烟效果会降低；排烟风机和排烟风管必须耐高温；初期投资和运行维修费用高；由于排烟风机和排烟道通常不使用，若不定期检修和试运行，一旦遇到紧急情况，就有不能使用的危险。

由此可见，其两者的根本区别是前者不需任何动力，靠自然环境条件进行有效排烟；后者则需要动力，且通过风道在单位时间内排出固定的烟量。



## 第 八 章 建筑材料的高温性能

建筑物是由各种建筑材料组建的。建筑材料在建筑物中主要用作三种途径：

①结构材料，用于承受各种荷载的作用；②室内装修材料；③功能材料，用于满足保温、隔热、防水等方面的使用功能。这些建筑材料的高温性能直接影响到建筑物火灾危险性的大小，以及发生火灾后火势蔓延的速度。对于结构材料而言，其高温下的力学性能还直接关系到建筑物的安全。因此，必须研究建筑材料火灾高温下的各种性能，在建筑防火设计中科学、合理地选用建筑材料，以达到减少火灾损失和人员伤亡。

一般而言，建筑材料的高温性能主要包括以下六个方面：

(一) 燃烧性能。燃烧性能是指材料和(或)制品遇火燃烧时所发生的一切物理和(或)化学变化，也就是对火反应特性。材料的对火反应特性反映了火灾初始阶段(即火势轰燃前的阶段)的情况，包括材料的可燃性，即非燃性、难燃性、易燃性等；火焰传播性；燃烧速度；发热量；燃烧方式等。我国采用 GB 8624-2005 制定的对火反应试验方法标准测试。对火反应试验方法是一种人为的设计模型，测试参数单一，不能与实际火灾等同；实际火灾的燃烧情况是一种复杂的综合作用，有多种因素的影响，包括材料数量、所处部位及环境等因素。所以评价材料的燃烧性能不能直接反映火灾实际危险性。

(二) 高温下的物理力学性能。是指在火灾高温下或是高温后，材料的力学性能(强度、弹性模量等)随着温度的升高而变化的规律。当到达一定温度时，结构会发生破坏，也就是说丧失了承载力，构件失稳或爆裂穿孔等。因此，建筑材料尤其是结构材料在火灾高温下保持良好的力学性能有利于建筑物的防火和灭火。

(三) 导热性能。导热性能好的非燃烧材料，往往耐火防火性能较差，这取决于材料的导热系数和热容量。

(四) 隔热性能。在隔热方面，材料的热导率和比热容是两个最为重要的影响因素。另外，同一类材料由于具有不同的变形特征而对隔热性能产生不同的影响。这些特征包括膨胀、收缩、变形、裂缝、熔化、熔融、粉化等，对隔热性能有直接影响。

(五) 发烟性能。材料燃烧时会产生大量的烟，这里所称的烟是指“材料发生燃烧或热分解时所释放出散播于空气中的固态、液态微粒及气体”，是火灾燃烧过程中一项重要的产物。一方面它会使人窒息丧生，另一方面因为烟会产生视线

(远) 毒性性能。在烟气生成的同时, 材料燃烧或热解中还会产生一定的毒性气体, 如果这些有毒物质随烟气扩散, 将会产生更加严重的危害。据统计, 建筑火灾中人员死亡原因多为烟气中毒而死, 因此不可忽视材料的潜在毒性的研究。

原 则 建筑材料的燃烧性能及其测定方法

按照国家标准《建筑材料燃烧性能分级方法》(GB 8624-2012)的规定,建筑材料燃烧性能分为四级,见表 4.0.1。

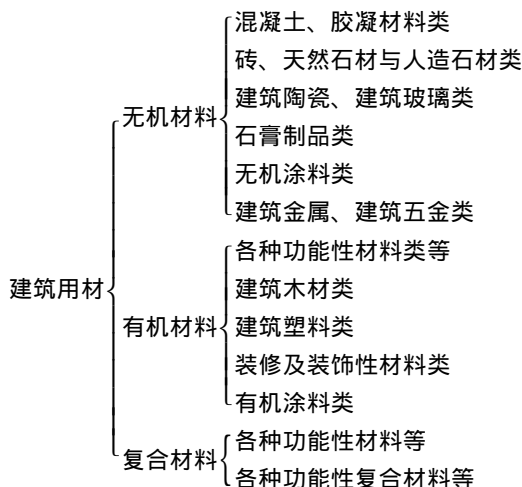
[illegible]

难燃性建筑材料，在空气中受到火烧或高温作用时难起火、难于碳化，当火源移走后，燃烧或微燃立即停止。如纸面石膏板、水泥刨花板，难燃木材、硬质塑料地板等。

易燃性建筑材料，在空气中受到火或高温作用时，立即起火，且火焰传播速

度很快。如有机玻璃、泡沫塑料等。

建筑材料的种类很多，为了便于研究其高温性能，现做如下分类：



有机材料都具有可燃性。由于有机材料在加热以前会发生碳化、燃烧、熔融等变化，因此在热稳定性方面一般比无机材料差。有机材料的特点是质量轻，隔热性好，耐热应力作用，不易发生裂缝和爆裂等。

有机材料的燃烧以分解燃烧的形态进行，即在受热时，它先发生热分解，分解出  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  等可燃性气体，并与空气中的  $\text{O}_2$  混合而发生燃烧。建筑材料中常用的有机材料有木材、塑料、胶合板、纤维板、木屑板等。

无机材料一般都是非燃性材料。在高温性能方面存在的问题是导热、变形、爆裂、强度降低、组织松懈等，这些问题往往是由于高温时的热膨胀收缩不一样造成的。此外，铝材、花岗石、大理石、钠钙玻璃等建筑材料在高温时还要考虑软化、熔融等现象。

## 8.1 建筑材料非燃性试验方法

建筑材料非燃性试验方法（GB 8624-2005）是判定建筑材料是否具有非燃性的一种试验方法。

**8.1.1 试验设备** 建筑材料不燃性试验主要设备是电加热试验炉（如图 8-1 所示）。它由耐火管、电热带、保温层、空气稳流器、通风罩及试样插入装置等部分组成。

**8.1.2 试样** 该项试验要求的试样数量为 3 个，尺寸为：直径（ $\phi 100$ ）mm，高（ $100$ ）mm。试验前应先将试样放在温度为（ $105 \pm 5$ ）℃ 的通风干燥箱内干燥 24h，然后放入干燥皿内冷却至环境温度。

**8.1.3 试验程序** 试样经称重和确定尺寸后，放入吊篮内，并迅速置于温度稳

定在(苑)耐火试验炉中,持续加热(猿)当某个热电偶未达到终温平衡时,应延长试验时间;当试件的最长持续燃烧时间达(圆)以上时,试验可提前结束。所谓终温平衡是指试验结束时在(员)炉内温度变化不超过(缘)的温度稳定状态;持续燃烧是指试样产生(猿)或更长时间的持续火焰。试验中应记录温度变化和持续燃烧时间,观察和记载试样的变形、熔化、发烟、释放气体、色变等现象。试验结束后,将试样及其剥落物收集后置于干燥皿中冷却至室温再称重。

- 试验结果计算 具体如下:
- (员) 炉内平均温升。该值为 缘次试验的炉内最高温度与炉内终平衡温度之差的平均值。
  - (圆) 试样表面平均温升。为 缘次试验的试样表面最高温度与试样表面终平衡温度之差的平均值。
  - (猿) 试样中心平均温升。为 缘次试验的试样中心最高温度与试样中心终平衡温度之差的平均值。
  - (源) 试件平均持续燃烧时间,以 缘次试验的平均值计算。
  - (缘) 试件平均失重率,以 缘次试验的平均值计算。

判定条件 试验结果全部符合下列要求,则判定为不燃性材料:

- (员) 炉内平均温升不超过 缘
- (圆) 试样表面平均温升不超过 缘
- (猿) 试样中心平均温升不超过 缘
- (源) 试样平均持续燃烧时间不超过 圆
- (缘) 试样平均失重率不超过 缘

属于非燃性材料的建筑材料有钢材、混凝土、钢筋混凝土、粘土砖瓦、石膏板、玻璃、陶瓷石材以及含有少量有机粘结剂的陶瓷棉毡、板等。非燃性材料无潜在的火灾危险,因此《建筑设计防火规范》要求:耐火等级为一级的建筑物的建筑构件必须采用非燃性材料制作;耐火等级为二级的建筑物除吊顶以外的其他

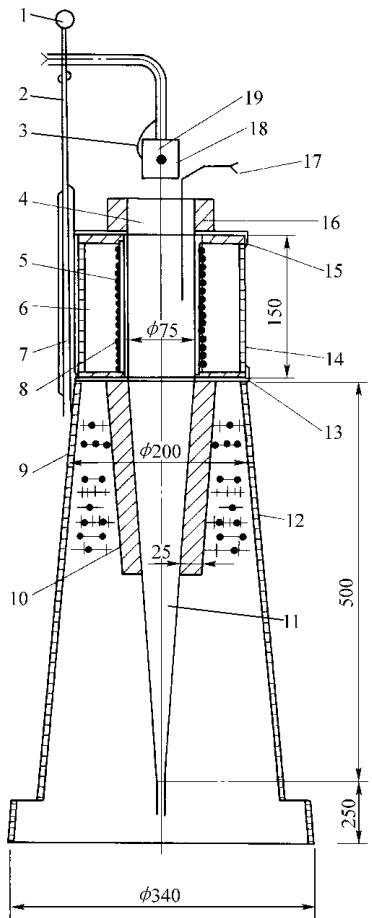


图 苑 建筑材料非燃性试验炉

员—提手 圆—插入装置 猿—表面热电偶  
源—通风罩 缘—耐火管 远—氧化镁粉  
苑—导管 愿—电热带 怨—进气孔  
员园—矿棉材料 员员—空气稳流器  
员圆—气流罩 员猿—下盖板 员源—壁板  
员缘—上盖板 员远—矿棉材料 员苑—炉  
内热电偶 员愿—吊篮 员怨—中心热电偶

建筑构件均必须采用非燃性材料制作。从消防角度考虑,非燃性材料是室内装修的最理想使用材料。

## 8.1.1 建筑材料难燃性试验方法

建筑材料难燃性试验方法 (GB 8624-2012) 是在规定试验条件下,判定建筑材料是否具有难燃性的一种试验方法。

**8.1.1.1 试验装置** 本方法的试验装置主要包括燃烧竖炉及控制仪表两部分。

(1) 燃烧竖炉。燃烧竖炉主要由燃烧室、燃烧器、试件支架、空气稳流器及烟道等部分组成,如图 8-1 所示。

(2) 控制仪器。燃烧竖炉的控制仪表包括热量计、热电偶、温度记录仪及温度显示仪表等。

**8.1.1.2 试样** 每次试验需用 9 个试件,每个试件均以材料实际使用厚度制作,当材料实际使用厚度超过 10mm 时,试件制作厚度应取 10mm。试件表面规格为 100mm×100mm。

对于竖炉试验,一般需要三组试件,在试验薄膜、织物及非均向材料时,应制作四组试件。在试验进行之前,必须将试件置于温度 (23±2)℃,相对湿度 (50±5)% 的条件下调节至质量恒定。

**8.1.1.3 试验程序** 将 9 个试件垂直固定在试件支架上,组成垂直方形烟道。然后放入燃烧室内规定位置,关闭炉门,点燃燃烧器在试件底部燃烧试件,持续燃烧 15min。试验过程中炉内应维持 (950±50)℃ 温度为 (950±50)℃ 的空气流。燃烧器所用燃气为甲烷和空气的混合气。当试件上的可见燃烧确已结束,或烟气平均温度超过 1000℃ 时,试验可提前结束。

**8.1.1.4 试件燃烧剩余长度的判断** 试件燃烧后剩余长度为试件既不在表面燃烧,也不在内部燃烧或碳化部分的长度。试件在试验过程中产生变色、熏黑及外观结构产生弯曲、起皱、鼓泡、熔化、烧结等变化均不作为燃烧判断依据。采用防火涂层保护的构件,如木材及其制

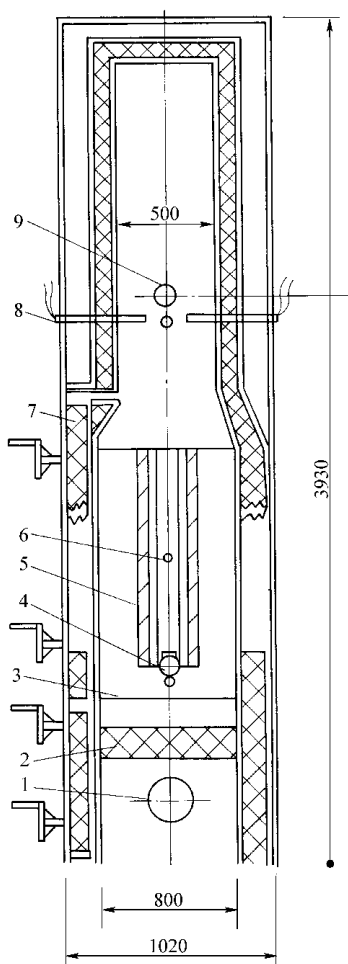


图 8-1 建筑材料难燃性试验炉

1—空气进口管 2—空气稳流器  
3—铁丝网 4—燃烧器 5—试件  
6—壁温热电偶 7—炉壁结构 (由  
内向外, 8—钢板、9—石棉水泥板、  
10—棉纤维板、11—石棉水泥板)  
12—烟道热电偶 13—测烟管口

品，其表面涂层的碳化可不考虑。在确定被保护建材的燃烧后剩余长度时，应除去保护层。

缘试验结果判定 具体如下：

(员) 凡是经过燃烧竖炉试验(难燃性试验)合格，并能通过建筑材料可燃性试验方法(即月源远—员缘缘)的材料均可定为难燃性建筑材料。

(圆) 按照规定试验程序，符合下列条件可认定为燃烧竖炉试验合格：试件燃烧的剩余长度平均值应大于 员缘皂，其中没有一个试件的燃烧剩余长度为零；没有一组试验的平均烟气温度超过 圆园℃

愿源猿 建筑材料易燃性试验方法

建筑材料可燃性试验方法(即月源远—员缘缘)是在规定的条件下判定建筑材料是否具有可燃性的试验方法。

愿试验装置 试验装置由燃烧试验箱、燃烧器及试件支架等组成。

(员) 燃烧试验箱。用厚度为 员缘皂的不锈钢板制成，其外形尺寸为 苑园皂伊源园皂伊愿园皂，箱体顶端设有一个  $\phi$  员缘皂排烟口，前侧和右侧各设有一个玻璃观察窗，底部为不锈钢网格，如图 愿源所示。

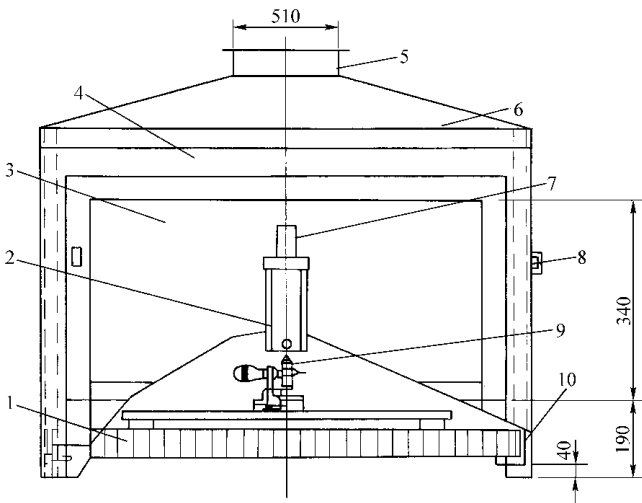


图 愿源 燃烧试验箱

员—箱底 圆—试件夹 猿—前门 源—箱体 缘—烟排口 远—箱盖  
苑—立柱 愿—侧门 怨—燃烧器 员园—箱底支架

(圆) 燃烧器。由孔径为  $\phi$  源缘皂的喷嘴和调节阀组成，并设有 源个  $\phi$  源皂的空气吸入孔。

(猿) 试件支架。由基座、立柱及试件夹组成。

愿试件制备 每组试验需要 缘个试件，试件规格为：愿皂伊愿皂(采用苑源

边缘点火); 对于采用表面点火。试件的厚度应符合材料的实际使用情况, 当材料的实际厚度超过 100mm 时, 试件制作厚度应取 100mm。对采用边缘点火的试件, 在试件高度 100mm 处 (从最低沿算起) 划一全宽度刻度线; 对采用表面点火的试件, 在试件高度 100mm 及 150mm 处 (均从最低沿算起) 各划一全宽度刻度线。试验前, 要调节试件至质量恒定。

**试验程序** 将试件装在试件夹上垂直固定于燃烧试验箱中, 用燃烧器在试件下边缘 (对边缘点火) 或试件表面一定处 (对表面点火) 烧试件。火焰长度为 (100±10) mm, 燃烧气体为丙烷气。试件点火 15s 后, 移开燃烧器, 计量从点火开始至火焰到达刻度线或试件表面燃烧熄灭的时间。

**材料可燃性的判断** 经过试验符合下列规定的建筑材料, 均可确定为可燃性建筑材料:

(1) 对下边缘未加保护的试件, 在底边缘点火开始后的 10min 内, 整个试件火焰尖头均未到达刻度线。

(2) 对下边缘加以保护的试件, 除符合上述 (1) 的规定外, 应附加一组表面点火试验, 在点火开始后的 10min 内, 整个试件火焰尖头均未到达上刻度线。

可燃性材料受到火烧或高温作用能立即起火燃烧, 当火源移走后, 仍能继续燃烧。有机材料多属于可燃性材料, 如木材、纤维板、聚氯乙烯塑料板、橡胶地毯等。可燃性材料火灾危险性大, 在建筑中要严格限制使用。

达不到可燃性材料级别的均属于易燃性材料。易燃性材料主要为薄型、多孔的有机高分子材料, 如普通墙纸、聚苯乙烯泡沫板、厚度小于 15mm 的木板等。

## 8.2 混凝土的高温性能

结构和构件在高温作用 (如火灾) 时的内部温度分布及其变化, 除了结构外部的温度条件外, 只取决于结构材料的热工性能, 可认为与材料的应力 (变) 状态和力学性能无关。

在结构的温度场理论分析中, 建立热传导基本方程中涉及的材料热工性能只有 3 项, 相应地有 3 个基本参数, 即导热系数、比热和质量密度。其他热工参数都可以从这 3 个参数导出。

材料的另一个基本热工参数是线膨胀系数, 它只影响材料和结构的温度变形与应力, 而与温度场分析无关。

## 8.3 混凝土的高温后力学性能

**抗压强度** 混凝土的抗压强度是力学性能中最基本、最重要的一项。图

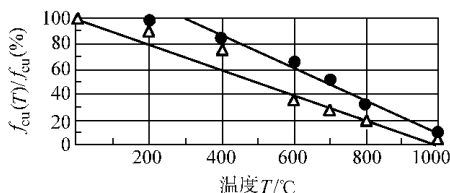


图 8-3 高温后混凝土抗压强度与温度的关系

图 1-1-1 为高温后混凝土抗压强度与温度的关系图。试验表明，在 300℃ 以内，混凝土的抗压强度在常温（20℃）抗压强度值上下波动，变化幅度约在 10% 和 20% 之间；温度大于 300℃ 后抗压强度近乎线性下降；当温度达到 700℃ 时，抗压强度已不足常温下的 50%。另外，喷水冷却比自然冷却时的混凝土强度低。根据混凝土强度变化规律，得出混凝土抗压强度的如下表达式：

自然冷却： 
$$f_{t, \text{自然冷却}} = \begin{cases} f_c & (T \leq 300^\circ\text{C}) \\ f_c \cdot \frac{700 - T}{700 - 300} & (300^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (1-1-1)$$

喷水冷却： 
$$f_{t, \text{喷水冷却}} = \begin{cases} f_c & (T \leq 300^\circ\text{C}) \\ f_c \cdot \frac{700 - T}{700 - 300} & (300^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (1-1-2)$$

式中  $T$ ——混凝土的温度；  
 $f_c$ ——常温下混凝土的立方体抗压强度；  
 $f_{t, \text{自然冷却}}$ ——温度为  $T$  时混凝土的立方体抗压强度。

图 1-1-2 中从左至右分别为常温、300℃、400℃、500℃、700℃ 时混凝土试块受压破坏图。



图 1-1-2 混凝土试块受压破坏图

图 1-1-3 弹性模量 这里所讲弹性模量是指混凝土应力为轴心抗压强度 时的加荷割线模量。图 1-1-4 为高温后混凝土弹性模量与温度的关系图。根据试验结果，采用折线进行线性拟合，得到如下计算式

图 1-1-3 混凝土试块

$$\frac{f_t}{f_c} = \begin{cases} 1 & (T \leq 300^\circ\text{C}) \\ \frac{700 - T}{700 - 300} & (300^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (1-1-3)$$

图 1-1-4 混凝土试块

$$\frac{f_t}{f_c} = \begin{cases} 1 & (T \leq 300^\circ\text{C}) \\ \frac{700 - T}{700 - 300} & (300^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (1-1-4)$$

式中  $T$ ——混凝土的温度；



$E_c$ ——常温下混凝土的弹性模量；

$E_{cT}$ ——温度为  $T$  时混凝土的弹性模量。

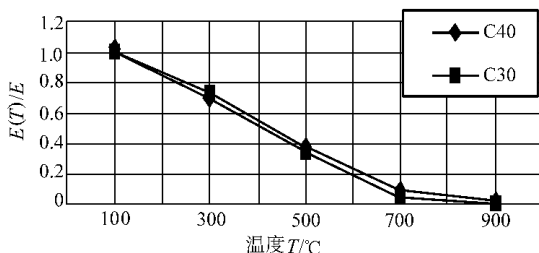


图 8-10 高温后混凝土弹性模量与温度的关系

**混凝土抗拉强度** 在普通钢筋混凝土结构设计中一般主要考虑压应力而忽略拉应力，但拉应力却始终存在且成为混凝土开裂的关键。火灾作用后，混凝土构件裂缝增多增大，特别是在主拉应力作用区，所以抗拉强度对火灾作用后混凝土构件能否保持良好的工作性能起决定作用。图 8-11 为高温后混凝土抗拉强度与温度的关系图。试验表明，火灾作用后，混凝土抗拉强度的损失远大于抗压强度，且温度越高降低幅度的差距越大，拉压强度比不再为常数，其比值在 0.4~0.6 之间达到最小。根据试验结果，有如下计算式

自然冷却：
$$f_{ct}(T) = f_{ct} \left( 1 - \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} \right)^2 \quad (8-10)$$

喷水冷却：
$$f_{ct}(T) = f_{ct} \left( 1 - \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} \right)^3 \quad (8-11)$$

式中  $T$ ——混凝土的温度；

$f_{ct}$ ——常温时混凝土的抗拉强度；

$f_{ct}(T)$ ——温度为  $T$  时混凝土的抗拉强度。

从图 8-11 中可知，随着温度的升高，抗拉强度持续下降，尤其是 400℃ 以后下降剧烈。这是由于 400℃ 以后混凝土内产生大量裂缝，在单轴拉力下，裂缝横切于拉应力方向，裂缝的存在减少了截面的有效面积，而且压应力能抑制裂缝的开展，相反，拉应力则促使裂缝开展，使结构更易破坏。

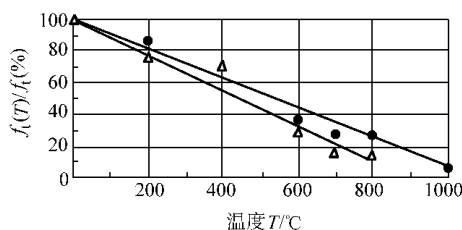


图 8-11 高温后混凝土抗拉强度与温度的关系

**高温破坏的原因分析** 火灾作用后，混凝土的微观形貌、结构组成及物理化学变化等能直接为判定混凝土的损伤程度提供科学的依据。高温作用下混凝土受损伤破坏主要有以下几方面的原因：

(1) 水化矿物的脱水。混凝土受高温作用后水分要逐渐脱去。这些水分大体可分为两类：一类是游离水，另一类是水化矿物中的化合水或结晶水。混凝土中

的水分在火灾高温作用下大量逸出，导致内部结构性质发生变化，以致破坏。

(圆) 水化水泥内部各组分的热变形性能。水化水泥是由多相化学组分组成的，这些化学组分在高温下表现出的变形性能有很大差别。这些差别很大的不协调的变形会使混凝土内部产生内应力，当应力达到一定程度时，可能会导致混凝土破坏。

常温下，水化水泥凝胶结构完整、密实，水化水泥结晶得非常整齐完整。在水化水泥以内，主要是混凝土内自由水的蒸发，这对整个结构相貌没有大的影响。在水化水泥以后，水化水泥凝胶体开始脱水分解，此时排出的主要是层间水和化学结合水，水化水泥也少量分解，使得原本结晶完整的片层结构破坏，强度显著下降，裂缝产生。当温度超过水化水泥以后，水化水泥大量分解，生成游离氧化钙，冷却后又与水结合生成水化水泥，导致体积膨胀，裂缝增多，此时混凝土内部结构很松散，强度持续下降。到水化水泥时，混凝土水泥浆体中已没有水泥的水化物，结构破碎。

在水化水泥以上温度作用后，喷水冷却比自然冷却混凝土强度有所降低。这主要是因为高温混凝土遇水骤然冷却，内外温度的极不均匀导致混凝土内部结构的损伤和裂缝；另外，在水化水泥以上温度作用后的混凝土组成成分的分解成分（如氧化钙等），在热状态下极易与水分发生反应（相当于自然状态下静置长时间的吸水反应）造成伤害。

(猿) 骨料的受热破坏。混凝土在受高温时会发生晶体转化或分解，此时伴随着巨大的膨胀，一些骨料内部开始形成裂缝，并随着温度的升高而逐渐发展，导致混凝土强度降低。

(源) 水泥石与骨料间联系的破坏。在组成良好的混凝土中，大部分空间均为骨料所占据，水泥浆则充满粗细骨料间余下的空间，并把它们胶结起来。这样差不多所有骨料颗粒均为水泥石层所包裹。但是水泥石在加热过程中产生较大的收缩，而被水泥石包裹的骨料却在加热过程中随温度的升高而膨胀。故水泥石层受到拉应力，骨料却受到压应力，这不仅使水泥石和骨料之间的接触处产生应力，破坏粘结，而且骨料在膨胀过程中，也会把水泥石包裹层撑裂，使混凝土强度受到明显影响。

## 混凝土的热物理性能

混凝土的热物理性能主要指混凝土的导热能力、导温能力、比热以及热膨胀。这些参量影响着混凝土受热时的力学性能。

混凝土是一种人工的复合材料，由水泥、水、细骨料（砂）和粗骨料（石子）等组成，有时还掺有少量的外加剂，按照预定的比例配合，经过搅拌、注模、震捣和养护等工序后，在水泥的凝结、硬化过程中的胶结作用下形成。混凝土

土内各种原材料的矿物化学成分和材质结构的差异大,原本有着不同的热工参数值,组成混凝土后,又因其配合比、含水量、龄期和施工工艺等的差别,其热工参数值的变异性大,已有的试验数据有较大的离散度。下面列举的一些试验结果和数据,可说明混凝土热工参数的一般值和变化规律。

**导热系数 ( $\lambda$ )** 导热系数定义为单位时间 (s) 内、在单位温度梯度 (K/m) 情况下,通过材料单位等温面积 (m<sup>2</sup>) 的热量 (J), 单位为 W/(m·K) 或 W/(m·°C)。

占混凝土总体积大部分 (约 70%~80%) 的粗骨料,对混凝土的热工性能起主导作用。普通重质混凝土的粗骨料都是由火成岩或水成岩破碎而成的碎石或冲积的卵石,内部的孔隙很小 (一般约 5%),其导热系数主要取决于其矿物成分、结晶特征和颗粒的结构状况等。普通混凝土导热系数一般介于 0.8~1.8 W/(m·K) (或 W/(m·°C)) 之间。某些骨料混凝土的导热系数见表 8-1。

表 8-1 混凝土导热系数典型值

骨 料 种 类	混凝土堆密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 $\lambda$ (W/(m·K))
重 晶 石	2400	1.8~2.0
火 成 岩	2300	1.5~1.7
白 云 石	2300	1.3~1.5
轻混凝土 (烘干)	1200~1400	0.4~0.6

一般大部分岩石在常温时的导热系数值相差较大,可达 2~4 倍,但在高温 (500~1000℃) 时有逐渐接近的趋势。它们随温度升高的变化规律也不同:其中硅质砂岩、石灰石和白云石等的导热系数随温度升高而较快减小;花岗岩和片麻石等因温度的升高而缓慢减小;辉绿岩和钙长石等则随温度升高反而稍有增长。

硬化水泥浆的导热系数,随着温度的升高有不大的上下波动。水泥浆搅拌时的水灰比对于导热系数值有一定影响。水灰比较高的试件含水量大,凝固失水后内部有较多的细微孔隙,导致导热系数降低。

不同岩石骨料配制成的混凝土,其导热系数随温度的变化规律不同。普通硅质骨料混凝土比钙质骨料混凝土的导热系数值稍高,但两者都随温度的升高而有所减小,且在很高温度 (如 1000℃) 后两者的数值接近。各种多孔性材料,如浮石、炉渣、膨胀岩土和页岩等制成的粗骨料,可替代普通的岩石骨料配制成轻质混凝土。轻骨料颗粒中存在的大量孔隙,使传热的效率大大下降。轻骨料混凝土比普通混凝土的导热系数有较大下降,而且随温度升高的变化幅度也减小。

混凝土的导热系数因为多种因素的影响而有较大的变异性 and 离散度。为了简化计算,设计规程常将混凝土按照不同骨料分成三类,分别给出导热系数 (W/(m·K)) 的计算式

硅质骨料 ( $\rho \leq 2300$  kg/m<sup>3</sup>)

$$\lambda_{\text{槽}} \text{ 越 } \frac{\text{栽}}{\text{元}} \left( \frac{\text{栽}}{\text{元}} \right)^{\text{圆}}$$

(愿苑)

钙质骨料 (圆苑)

$$\lambda_{\text{槽}} \text{ 越 } \frac{\text{栽}}{\text{元}} \left( \frac{\text{栽}}{\text{元}} \right)^{\text{圆}}$$

(愿苑)

轻质骨料

$$\left. \begin{aligned} \text{栽} &\leq \text{栽} \leq \text{栽} \\ \lambda_{\text{槽}} &\text{ 越 } \frac{\text{栽}}{\text{元}} \end{aligned} \right\}$$

(愿苑)

圆导温系数 (α) 导温系数 α 表示混凝土发生温度变化的速率。α 越  $\frac{\lambda_{\text{槽}}}{\rho_{\text{槽}} c_{\text{槽}}}$ ，ρ<sub>槽</sub>是混凝土质量密度，c<sub>槽</sub>是混凝土比热容。普通混凝土导温系数介于 园-园 之间。混凝土的导温系数取决于骨料的种类。

猿比热容 (c<sub>槽</sub>) 其定义为单位质量 (噪) 的材料，当温度升高 员 (或 员) 所需吸入的热量 (允，单位为 允(噪) 或 允(噪))。

普通混凝土的比热容介于 愿- 员(噪)，不同骨料的混凝土通过试验测定的比热容 c<sub>槽</sub>都随温度的升高而逐渐增大，超过 愿后趋于稳定。在温度 愿附近，因混凝土内部的水分蒸发，吸收汽化热出现一个尖峰。

骨料种类的不同对混凝土的比热值有影响，但差别不大。硅质 (石英) 骨料混凝土比钙质 (石灰石) 骨料混凝土的比热容稍大，而各种轻骨料混凝土比普通混凝土的比热容稍小。其他因素如配合比、含水量和龄期等对质量热容值的影响不大。

源质量密度 (ρ<sub>槽</sub>) 质量密度定义为材料单位体积的质量，单位为 噪，也称体积质量。

混凝土的质量密度在升温过程中不断地发生变化。在升温的初期，混凝土内所含水分汽化后溢出，质量密度显然减小。骨料和水泥等固体成分因受热膨胀变形，体积增大，质量密度减小。这一现象在整个升温过程中始终存在，且在高温阶段的影响渐增。

此外，不同矿物成分的岩石骨料还有些特殊的高温现象影响混凝土的质量密度。例如，硅质骨料在 愿- 愿时分解并形成晶体，伴随着巨大的体积膨胀，质量密度突然跌落；玄武岩和石英在 愿- 愿时熔化、烧结，又使混凝土的质量密度回升。

各种轻骨料混凝土的质量密度随温度升高的变化规律，与普通混凝土的相似，但变化幅度更小。混凝土的质量密度随温度的变化不很激烈，对于构件内部温度值的影响幅度小于其他主要热工参数。在结构的温度场分析时，为了简化计

算,混凝土的质量密度常取为与温度无关的常值 ( $\rho_{\text{混凝土}}$  或  $\rho_{\text{混凝土}}$ )。或者将它和比热容合并在一起 ( $\rho_{\text{混凝土}}$ ) 给出计算值,引入热传导方程。

加拿大学者 莱恩等给出了  $\rho_{\text{混凝土}}$  与温度 的关系式为

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\text{混凝土}} & \text{ 越 } \rho_{\text{混凝土}} \cdot \left( \frac{1}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \beta \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \gamma \cdot (T - T_0)} \right) \\ \rho_{\text{混凝土}} & \text{ 越 } \left( \frac{\rho_{\text{混凝土}}}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \beta \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \gamma \cdot (T - T_0)} \right) \\ \rho_{\text{混凝土}} & \text{ 越 } \left( \frac{\rho_{\text{混凝土}}}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \beta \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \gamma \cdot (T - T_0)} \right) \\ \rho_{\text{混凝土}} & \text{ 越 } \left( \frac{\rho_{\text{混凝土}}}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \beta \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \gamma \cdot (T - T_0)} \right) \\ \rho_{\text{混凝土}} & \text{ 越 } \left( \frac{\rho_{\text{混凝土}}}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \beta \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \gamma \cdot (T - T_0)} \right) \\ \rho_{\text{混凝土}} & \text{ 越 } \left( \frac{\rho_{\text{混凝土}}}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \beta \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \gamma \cdot (T - T_0)} \right) \\ \rho_{\text{混凝土}} & \text{ 越 } \left( \frac{\rho_{\text{混凝土}}}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \beta \cdot (T - T_0)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \gamma \cdot (T - T_0)} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8.1.1)$$

混凝土的这些基本热工性能不仅取决于粗细骨料和硬化水泥浆的各自热工性能,还与混凝土的组成、含水量、龄期、浇捣工艺和密实度等有关,因而热工参数值的变异性 and 离散度较大。对于一些重要的大型工程,需要有准确的热工参数进行分析时,应制作试件通过专门的试验加以测定。至于一般的结构工程,对抗火和温度场分析没有特殊的精确度要求,而且考虑到火灾温度变化具有更大的随机性和离散度,可以采用有关规程提供的、适合工程应用的简化值。

混凝土的热膨胀系数  $\beta_{\text{混凝土}}$  在常温下混凝土的热膨胀系数由水泥浆和骨料的热膨胀系数所决定。水泥石的热膨胀系数为  $\beta_{\text{水泥石}}$  或  $\beta_{\text{水泥石}}$ 。

水泥石随温度升高,发生脱水收缩,因此混凝土的热膨胀由水泥石的热膨胀、脱水收缩,骨料的热膨胀综合作用。

## 8.2 钢筋的高温性能

### 8.2.1 钢筋的高温后力学性能

在工程实际中,为了评估火灾后建筑物的损伤程度,必须对火灾后钢筋混凝土的力学性能进行分析,因此,火灾后钢筋力学性能的变化是一个不可缺少的参数。考虑到实际火灾中结构物的损坏程度及灭火过程的不同,钢筋有可能处于三种不同条件下冷却,一种是包裹在混凝土内,一种是暴露在空气中,一种是灭火时受到水的喷淋。因此,可以模拟成以下三种冷却方式:

炉内冷却——试样恒温后切断电源,随炉温冷却至室温。

空气冷却——试样恒温后切断电源,立即取出试样至空气中冷却至室温。

喷水冷却——试样恒温后切断电源,立即取出试样,喷水数分钟,令其冷却

至室温。

屈服强度 图 愿愿 图 愿愿 分别为光圆钢筋、螺纹钢筋和高强碳素钢丝的屈服强度折减系数与温度的关系图。

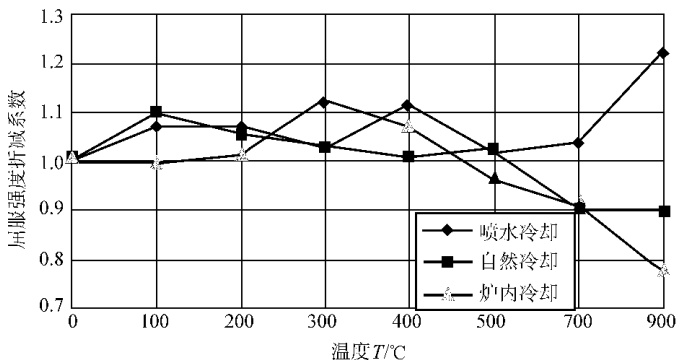


图 愿愿 光圆钢筋屈服强度折减系数与温度的关系

(5) 对光圆钢筋的试验结果表明, 钢筋在 $M_s$ 以前, 屈服强度比常温有不同程度的提高,  $M_s$ 以后, 自然冷却和炉内冷却屈服强度持续下降, 而喷水冷却屈服强度反而增大。采用线性分析, 得出光圆钢筋屈服强度的经验公式

喷水冷却：o 蚰 越 { 员 园 ≤ 栽 约 缘 园 说 (愿 员)

自然冷却：蠅越  $\left\{ \begin{array}{l} \text{員} \\ \text{園} \leq \text{栽約縁説} \end{array} \right.$  (愿園)

炉内冷却： $\circ$  越  $\left\{ \begin{array}{l} \text{员} \\ \text{园} \end{array} \right. \leq \text{栽} \text{约} \text{缘} \text{说} \quad (\text{愿} \text{员} \text{园})$   
 (员) 调 质 原 园 珍 委 栽 伊 元 缘 说  $\leq$  栽  $\leq$  怨 说

式中  $T_s$ ——光圆钢筋的温度；

$\sigma_{\text{泽}}$ ——常温下光圆钢筋的屈服强度；

$\sigma_{\text{裁温}}$ ——温度为 裁时光圆钢筋的屈服强度。

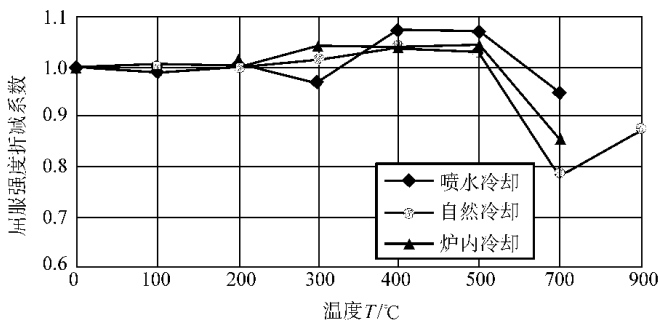


图 8-1-10 螺纹钢筋屈服强度折减系数与温度的关系

(圓) 对螺纹钢筋的试验结果表明, 缘圆℃以前, 钢筋的屈服强度较之常温变

化不大, 缘圆说以后, 屈服强度持续下降, 苑圆说以后, 自然冷却时屈服强度增大, 在 怨圆说时, 喷水冷却和炉内冷却后钢筋发生脆断。

$$\text{喷水冷却: } \sigma_{\text{泽}}^{\text{栽}} \leq \begin{cases} \text{员} & \text{园} \leq \text{栽约缘圆说} \\ \text{(员圆缘原园圆缘栽)} & \text{伊员圆} & \text{缘圆说} \leq \text{栽} \leq \text{苑圆说} \end{cases} \quad (\text{愿圆缘})$$

$$\text{自然冷却: } \sigma_{\text{泽}}^{\text{栽}} \leq \begin{cases} \text{员} & \text{园} \leq \text{栽约缘圆说} \\ \text{(员圆缘原园圆缘栽)} & \text{伊员圆} & \text{缘圆说} \leq \text{栽约苑圆说} \\ \text{(源缘缘垣园圆缘栽)} & \text{伊员圆} & \text{苑圆说} \leq \text{栽} \leq \text{怨圆说} \end{cases} \quad (\text{愿圆缘})$$

$$\text{炉内冷却: } \sigma_{\text{泽}}^{\text{栽}} \leq \begin{cases} \text{员} & \text{园} \leq \text{栽约缘圆说} \\ \text{(员圆缘原园圆缘栽)} & \text{伊员圆} & \text{缘圆说} \leq \text{栽} \leq \text{苑圆说} \end{cases} \quad (\text{愿圆缘})$$

式中 栽——螺纹钢筋的温度;

$\sigma_{\text{泽}}$ ——常温下螺纹钢筋的屈服强度;

$\sigma_{\text{泽}}^{\text{栽}}$ ——温度为 栽时螺纹钢筋的屈服强度。

(猿) 对于高强碳素钢丝, 在 圆圆说以内, 屈服强度变化很小, 圆圆说以后, 屈服强度迅速持续下降, 到达 怨圆说时, 炉内冷却后下降了 苑圆, 其余两种冷却方式下下降了 缘缘。在 缘圆说和 苑圆说时, 由于试件发生脆断, 无法测出  $\sigma_{\text{圆圆}}$ 。由于三种冷却方式下屈服强度的变化规律相近, 故均采用如下公式

$$\sigma_{\text{圆圆}}^{\text{栽}} \leq \begin{cases} \text{员} & \text{园} \leq \text{栽约圆圆说} \\ \text{(员圆圆原园圆圆栽)} & \text{伊员圆} & \text{圆圆说约栽} \leq \text{源圆说} \end{cases} \quad (\text{愿圆缘})$$

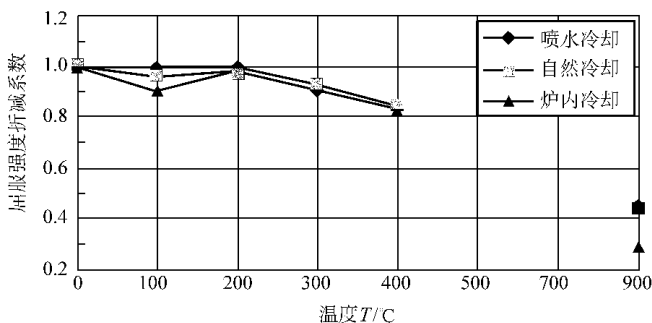


图 愿圆园 高强碳素钢丝屈服强度折减系数与温度的关系

圆圆极限强度 图 愿圆员~图 愿圆猿分别为光圆钢筋、螺纹钢筋和高强碳素钢丝的极限强度折减系数与温度的关系图。

(员) 试验表明, 缘圆说以前光圆钢筋的极限强度比常温有所提高, 缘圆说以后开始下降, 只是在 怨圆说时自然冷却略有上升, 而喷水冷却急剧上升。三种不同冷却方式下光圆钢筋极限强度的经验公式如下

$$\text{喷水冷却 } \sigma_{\text{圆圆}}^{\text{栽}} \leq \begin{cases} \text{员} & \text{园} \leq \text{栽约苑圆说} \\ \text{(员圆缘垣园圆缘栽)} & \text{伊员圆} & \text{苑圆说} \leq \text{栽} \leq \text{怨圆说} \end{cases} \quad (\text{愿圆缘})$$

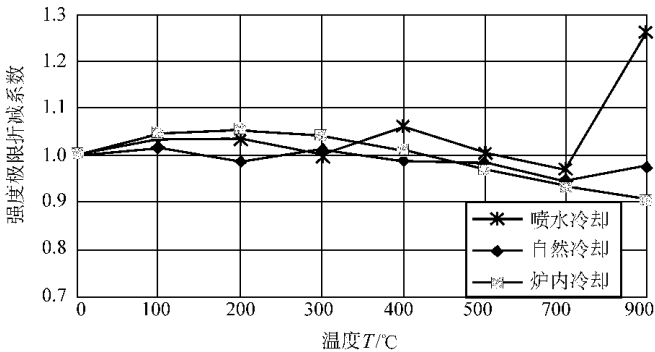


图 8-10 光圆钢筋极限强度折减系数与温度的关系

自然冷却  $\sigma_{yk} > \sigma_{yk0}$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{员} \\ \text{园} \leq \text{栽约苑园说} \end{array} \right.$  (愿园园)

炉内冷却  $\sigma_{yk} > \sigma_{yk0}$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{员} \\ \text{园} \leq \text{栽约苑园说} \end{array} \right.$  (愿园园)

式中 栽——光圆钢筋的温度；  
 $\sigma_{yk0}$ ——常温下光圆钢筋的极限强度；  
 $\sigma_{yk}$ ——温度为 栽时光圆钢筋的极限强度。

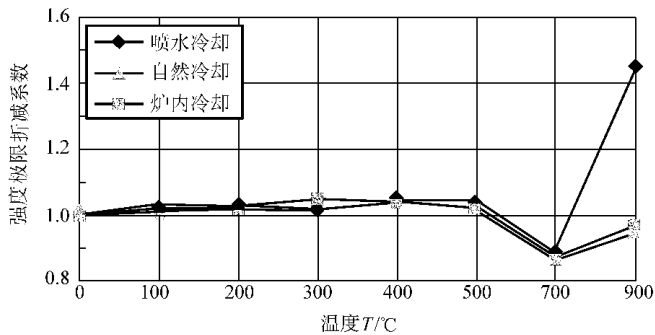


图 8-11 螺纹钢筋极限强度折减系数与温度的关系

(圆) 对螺纹钢筋的试验表明, 缘园说以前螺纹钢筋的极限强度比常温有不同程度的提高, 缘园说以后强度下降很快, 达到 苑园说以后, 有所增大, 也就是说螺纹钢筋的极限强度在 苑园说时达到最小。

喷水冷却  $\sigma_{yk} > \sigma_{yk0}$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{员} \\ \text{园} \leq \text{栽约缘园说} \end{array} \right.$  (愿园园)

自然冷却、炉内冷却  $\sigma_{yk} > \sigma_{yk0}$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{员} \\ \text{园} \leq \text{栽约缘园说} \end{array} \right.$  (愿园园)



式中  $T$ ——螺纹钢的温度；

$\sigma_{yk}$ ——常温下螺纹钢的极限强度；

$\sigma_{yk,T}$ ——温度为  $T$  时螺纹钢的极限强度。

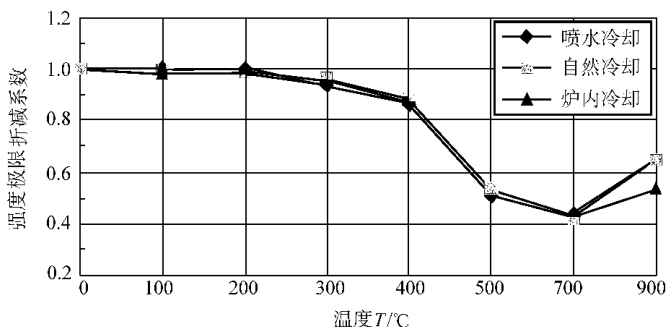


图 8-1 高强碳素钢丝极限强度折减系数与温度的关系

(1) 受火温度对于钢丝的极限强度有较大的影响。当温度在  $400^\circ\text{C}$  以内时，强度几乎没有变化，这以后强度开始下降，但幅度不大，到达  $500^\circ\text{C}$  时强度损失不到原抗拉强度的 10%；但是  $500^\circ\text{C}$  以后，抗拉强度有很大的下降，特别是受火温度为  $700^\circ\text{C}$  时，极限强度的损失最大，损失值约占原抗拉强度的 50%；当温度大于  $700^\circ\text{C}$  后，极限强度又有所回升。

三种冷却方式下极限强度的经验公式为

喷水冷却、自然冷却

$$\sigma_{yk,T} = \begin{cases} \sigma_{yk} & T \leq 400 \\ \sigma_{yk} \left( \frac{1000 - T}{600} \right)^2 & 400 < T \leq 700 \\ \sigma_{yk} \left( \frac{1000 - T}{600} \right)^2 & 700 < T \leq 900 \end{cases}$$

$$\sigma_{yk,T} = \begin{cases} \sigma_{yk} & T \leq 400 \\ \sigma_{yk} \left( \frac{1000 - T}{600} \right)^2 & 400 < T \leq 700 \\ \sigma_{yk} \left( \frac{1000 - T}{600} \right)^2 & 700 < T \leq 900 \end{cases}$$

式中  $T$ ——钢丝的温度；

$\sigma_{yk}$ ——常温下钢丝的极限强度；

$\sigma_{yk,T}$ ——温度为  $T$  时钢丝的极限强度。

(2) 弹性模量 高温冷却后，三种钢筋的弹性模量与常温下的基本相同，故一般可考虑不予折减。同时也可看出，冷却方式的不同对于弹性模量没有明显的影响。

(3) 钢筋应力-应变关系 当钢筋温度小于  $400^\circ\text{C}$  时，冷却后其应力-应变关系与常温相同；当温度大于  $400^\circ\text{C}$  时，屈服平台消失。

(4) 破坏原因分析 钢在常温下的基本组织是铁素体、渗碳体和珠光体三种。

铁素体是碳在  $\alpha$ -Fe 中的固溶体。铁素体内原子间的空隙较小，溶碳能力较低，常温下仅能溶碳 0.008%，在 727℃ 时溶碳量最大，但也只有 0.025%，由于溶碳量少，其性质极其柔软，塑性和韧性很好，但硬度和强度较低。渗碳体是碳和铁形成的化合物， $Fe_3C$ ，其含碳量达 6.69%，晶体结构复杂，外力作用下不易变形，故性质非常硬脆，抗拉强度很低，塑性及韧性几乎等于零。珠光体是铁素体和渗碳体组成的机械混合物，两成分相间片状存在于同一晶粒内，含碳量为 0.8%，其性质介于铁素体和渗碳体之间，既有一定的强度和硬度，也有一定的塑性和韧性，它只存在于 727℃ 以下，当温度高于 727℃ 以上时，就转变为奥氏体。

常温下热轧钢筋的内部微观组织是珠光体和铁素体组成的亚共析体。随着受火温度的升高，珠光体晶粒开始变小，在加温温度超过 727℃ 时，珠光体开始分解成铁素体和渗碳体；当温度为 727℃ 左右时，渗碳体开始聚结成球状，随着温度的进一步升高，球化加速，得到的球化组织越粗越软，同时，铁素体越来越清晰可见，并且开始转化为等轴晶粒，因此强度就降低。另一方面，在 727℃ 以上的高温作用下，钢表面脱碳形成脱碳层，含碳量下降，珠光体减少使强度有所降低。

在 727℃ 以上，自然冷却与喷水冷却下的强度都比炉内冷却的高，这主要是钢筋内部产生了相变的原因。727℃ 以上的自然冷却相当于一个正火过程，钢筋中出现了索氏体，故强度有所提高，但幅度不大，当温度在 727℃ 以上喷水冷却时，则相当于一个淬火过程，钢筋中出现马氏体，强度则大幅度提高。727℃ 以上的炉内冷却相当于一个退火过程，在退火过程中加热时，奥氏体的含碳量是不均匀的，在随后的慢冷或等温保持中，不均匀的奥氏体中的高碳处，会成为渗碳体的均匀形核位置，从而使一部分渗碳体直接成长为球状。但仍有一部分不可避免地以片状方式成长，这一部分片状碳化物则在随后的慢冷或等温过程中逐渐球化。球化体组织的强度要比珠光体组织的低，当然也低于索氏体和马氏体的强度。

导致高强碳素钢丝强度降低的原因，一方面是预应力钢丝在 727℃ 以上的高温作用下，产生了回复和再结晶作用，逐渐恢复到冷加工前的状态，导致强度的降低；另一方面，从其微观结构来看，未加温时钢丝的内部组成成分主要是珠光体—铁素体和渗碳体交替组成的共析体，随着受火温度的升高，珠光体晶粒开始变小，在加温温度超过 727℃ 时，珠光体开始分解成铁素体和渗碳体；当温度为 727℃ 左右时，渗碳体开始聚结成球状，随着温度的进一步升高，铁素体变得清晰可见，并且开始转变成等轴晶粒，大约在 727℃ 左右时，更为明显，故此时碳素钢丝的强度最小。当温度继续上升时，冷却后预应力钢丝表面就开始出现脱碳现象。这些使得钢丝强度更进一步地降低。

对于高强碳素钢丝来说，自然冷却与喷水冷却下的强度比炉内冷却下的虽然

也有所提高,但幅度很小,这可能是这种钢丝已经过拔制与回火处理过,又加上含碳量较高(槽过),性能过脆之故。

## 8.1 钢(筋)的热物理性能

一般的普通混凝土和预应力混凝土结构中,钢筋(丝)散布在混凝土内,且用量有限,占总体积的百分数很小(约)。在火灾(高温)情况下,钢筋的存在对混凝土结构内部的温度分布的影响很小。在分析结构的温度场时,忽略其中的钢筋,看作匀质的混凝土材料,可满足计算精度的要求。这里只简单地引述一些建筑用钢的主要热工性能和指标。

建筑结构用钢的主要成分是铁和碳,按含碳量的多少分为低碳钢、中碳钢和高碳钢。为了改善钢材的力学和加工性能,在冶炼过程中掺加了少量合金元素,如锰、硅、铌、钒、钛等后,称为低合金钢。钢材中的不同元素成分和其含量,以及钢筋的加工、热处理过程等都将影响其热工性能指标。

导热系数  $\lambda$  钢材的种类不同,导热系数也不完全一样。纯铁的导热系数数值最大,钢材随含碳和合金量的增多,导热系数渐次减小。碳钢和低合金钢的导热系数都随温度的升高而单调减小,但变化率渐慢。只有某些含合金量较多的钢材,导热系数值随温度升高而缓慢地增长。对于常用的建筑结构钢材,这种影响一般可以忽略不计。

加拿大规范给出的钢材导热系数表达式为

$$\lambda_{\text{钢}} = \begin{cases} \lambda_{\text{钢}}^{\text{原}} - \frac{(\lambda_{\text{钢}}^{\text{原}} - \lambda_{\text{钢}}^{\text{碳}}) \cdot C}{100} & C \leq 1.0 \\ \lambda_{\text{钢}}^{\text{碳}} & C > 1.0 \end{cases} \quad (8.1.1)$$

比热和质量密度  $\rho$  由于铁、碳和其他各种合金元素的比热(槽)值各不相同,由此组成的不同品种和元素含量的钢材,都有相应的比热。它们都随温度的升高逐渐有所增大,但变化幅度不大。钢材的质量密度( $\rho_{\text{钢}}$ )也因所含合金元素成分的种类和数量而有所变化。纯铁的质量密度较高,可达,碳钢和低合金钢一般取为。钢材在温度升高后体积膨胀,质量密度稍有下降,但在温度场分析时,一般都取为常值。

加拿大规范给出的钢材导热系数表达式为

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\text{钢}} &= \rho_{\text{钢}}^{\text{原}} - \frac{(\rho_{\text{钢}}^{\text{原}} - \rho_{\text{钢}}^{\text{碳}}) \cdot C}{100} & C \leq 1.0 \\ \rho_{\text{钢}} &= \rho_{\text{钢}}^{\text{碳}} & C > 1.0 \\ \rho_{\text{钢}} &= \rho_{\text{钢}}^{\text{原}} - \frac{(\rho_{\text{钢}}^{\text{原}} - \rho_{\text{钢}}^{\text{碳}}) \cdot C}{100} & C \leq 1.0 \\ \rho_{\text{钢}} &= \rho_{\text{钢}}^{\text{碳}} & C > 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (8.1.2)$$

热膨胀系数  $\beta$  加拿大规范给出的钢材热膨胀系数与温度之间的关系



## 4.1 其他常用建筑材料的高温性能

### 4.1.1 木材

木材具有质量轻、强度大、导热系数小、容易加工、装饰性好、取材广泛等优点，因此作为一种重要的建筑材料在建筑工程中得到了广泛应用。木材的明显缺点是容易燃烧，在火灾高温下的性能主要表现为燃烧性能和发烟性能。

木材是天然高分子化合物，主要化学成分是碳、氢、氧元素，还有少量的氮和其他元素，不含其他燃料中常有的硫。木材受热温度超过 250℃ 以后，发生热分解，分解的产物有可燃性气体（一氧化碳、氢气、甲烷、乙烷、有机酸、醛等）和不燃性气体（水蒸气、二氧化碳）；在温度达到 300℃ 左右，热分解进行得很剧烈，如遇明火，便会被引燃。因此，在防火方面，将 300℃ 作为木材起火的危险温度。在加热温度达到 400~500℃ 时，即使没有火源，木材也会自行着火。

木材的燃烧可分为有焰燃烧和无焰燃烧两个阶段。有焰燃烧是木材所产生的可燃性气体着火燃烧，形成可见的火焰，因而是火势蔓延的主要原因。无焰燃烧是木材热分解完后形成的木炭（木材的固体部分）的燃烧（其产物是灰），它助长火焰燃烧的持久性，会导致火势持久。试验研究表明，木材的平均燃烧速度一般为 0.1~0.2 mm/s 左右，因此在火灾条件下，截面尺寸大的木构件，在短时间内仍可保持所需的承载力，因而它往往比未保护的钢构件耐火时间长。

为克服木材容易燃烧的缺点，可以通过如下三种方法有效地对木材进行阻燃处理：

（1）加压浸注。这种方法是将木材浸在容器内的阻燃剂溶液中，对容器内加压一段时间，将阻燃剂压入木材细胞中。常用的阻燃剂有磷酸铵、硫酸铵、硼酸铵、氯化铵、硼酸、氯化镁等。

（2）常压浸注。这种方法是在常压、室温或加温约 70℃ 状态下将木材浸泡在阻燃剂溶液中。

（3）表面涂刷。在木材表面涂刷一层具有一定防火作用的防火涂料，造成保护性的阻燃膜。

### 4.1.2 塑料

塑料是以一种天然树脂或人工合成树脂为主要原料，加入填充剂、增塑剂、润滑剂和颜料等制成的一种高分子有机物。它具有可塑性好、密度小、强度大、耐油浸、耐腐蚀、耐磨、隔声、绝缘、绝热、易切削等性能，因此，被广泛用作建筑材料。大部分塑料制品容易着火燃烧，燃烧时温度高、发烟量大、毒性大，给火灾中人员逃生和消防人员扑救火灾带来很大困难。

**塑料的燃烧过程** 分以下几个步骤：

(1) **加热**。塑料遇到火灾高温作用时，热塑性塑料（如聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯等），达到一定温度时便开始软化，进而熔融变成粘稠状物质；热固性塑料（如酚醛树脂等），在分解点以下温度不熔融，热量被积蓄起来。

(2) **分解**。温度继续升高，塑料便发生分解，生成不燃性气体（如卤化氢、一氧化碳等）、可燃性气体（烃类化合物等）和碳化残渣。

(3) **着火燃烧**。当塑料受热分解产生的可燃性气体与空气混合并达到燃点时，则被引燃而发生燃烧。若无明火，把塑料加热到足够高的温度时，它也会发生燃烧。

**塑料的燃烧特点** 有以下几点：

(1) **火焰温度高**。塑料燃烧时放热量大，火焰温度高。许多塑料着火，其温度比木材在类似情况下着火的温度高。

(2) **燃烧速度快**。大多数塑料燃烧速度快。不同的塑料，由于比热容、导热系数、燃烧热不同，因而燃烧速度不同，通常燃烧热大、比热容小、导热系数大的塑料其燃烧速度较快。例如聚乙烯的燃烧速度为 0.15m/s，聚氯乙烯为 0.12m/s，聚苯乙烯为 0.18m/s。

(3) **发烟量大**。塑料燃烧时产生大量又浓又黑的烟，远远超过木材燃烧的烟，严重妨碍人员疏散和火灾扑救。

(4) **毒性大**。塑料燃烧产物的毒性比木材等传统材料大得多，其放出的有害气体，因塑料种类不同而不同。只含有碳和氢的塑料（如聚乙烯、聚丙烯）和含有氧的塑料（如有机玻璃、赛璐珞等）燃烧放出的有害气体为  $CO$ 、 $CO_2$ ，含有氮的塑料（如聚酰胺、聚氨酯泡沫塑料）燃烧放出的有害气体除此以外，还有  $HCN$ 、 $N_2O$ 、 $NO$  等，而含卤素的塑料（取聚氯乙烯、聚氟乙烯）燃烧产物中含有  $HCl$ 、 $HF$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  等有害气体。

塑料的燃烧特性见表 1-1，对塑料进行阻燃处理的手段和技术是在塑料中添加各种阻燃剂。

表 1-1 塑料的燃烧特性

塑料名称		燃烧难易程度	离开火焰后是否燃烧	火焰的状态	表面变化	燃烧时气味
热塑性塑料	聚氯乙烯	难 燃	不 燃	黄色、外边绿色	软 化	盐酸气味
	聚 乙 烯	易 燃	燃 烧	蓝色、上端黄色	熔融滴落	石蜡气味
	聚 丙 烯	易 燃	燃 烧	蓝色、上端黄色	膨胀滴落	石油气味
	聚苯乙烯	易 燃	燃 烧	橙黄色、浓黑烟、向空中喷出黑碳末	发 软	特殊气味

(续)

塑料名称		燃烧难易程度	离开火焰后是否燃烧	火焰的状态	表面变化	燃烧时气味
热塑性塑料	尼 龙	缓 燃	缓 熄	蓝色、上端黄色	膨胀滴落	烧羊毛味
	有机玻璃	易 燃	燃 烧	黄色、上端蓝色	发 软	香 味
	赛 璐 珞	剧烈燃烧	燃 烧	黄色	全 烧 完	无 味
热固性塑料	酚醛塑料 (无填料)	难 燃	不 燃	黄色火花	裂纹、变深色	甲 醛 味
	酚醛塑料 (木粉填料)	缓 燃	不 燃	黄色、黑烟	膨胀、裂缝	木材和甲醛味
	脲醛塑料	难 燃	不 燃	黄色、上端蓝色	膨胀、裂纹发白	甲 醛 味
	三聚氰胺塑料	难 燃	不 燃	淡黄色	膨胀、裂纹发白	甲 醛 味

愿愿愿 胶合板

胶合板的燃烧性能与粘合剂有关。使用酚醛树脂、三聚氰胺树脂作粘合剂的，防火性能好，不易燃烧。使用尿素树脂作粘合剂的，因其中掺有面粉，所以防火性能差，易于燃烧。难燃胶合板是用磷酸铵、硼酸和氰化亚铅等防火剂浸过薄板制造的板材，其防火性能好，能燃烧。

愿愿愿 纤维板

纤维板的燃烧性能取决于胶粘剂。使用无机胶粘剂，得到难燃的纤维板。使用各种树脂作胶粘剂，则随着树脂的不同，得到易燃或难燃的纤维板。

愿愿愿 难燃刨花板

难燃刨花板是具有一定防火性能的木质刨花人造板材，是以木质刨花或木质纤维（如木片、木屑等）为原料，掺加胶粘剂、阻燃剂、防腐剂和防水剂等组料经压制而成。该种板材由于阻燃剂的阻燃作用，属于难燃性的建筑材料，此种板材广泛用于建筑物的隔墙、墙裙和吊顶等作装修用。

愿愿愿 粘土砖

粘土砖经过高温煅烧，不含结晶水等水分，即使含极少量石英，对制品性能影响也不大，因而再次受到高温作用时性能保持平稳，耐火性良好。

粘土砖受愿愿愿的高温作用时无明显破坏。耐火试验得出，愿愿愿非承重砖墙可耐火愿愿愿，承重砖墙可耐火愿愿愿。

石材

石材是一种耐火性较好的材料。石材在温度超过 600℃ 以后，强度降低较明显，含石英质的石材还发生爆裂。出现这种情况的原因是：石材在火灾高温作用，沿厚度方向存在较大的温度梯度，由于内外膨胀大小不一致而产生内应力，使石材强度降低，甚至使石材破裂；石材中的石英晶体，在 573℃ 和 870℃ 还会发生晶形转变，体积增大，导致强度急剧下降，并出现爆裂现象；含碳酸盐的石材（大理石、石灰石），在高温下会发生分解反应，分解生成  $CO_2$ ，其强度低，且遇水会消解成  $Ca(OH)_2$ 。

砂浆

砂浆由胶结材料（水泥、石灰等）、细骨料（砂）和水拌合而成。由水泥、砂、水拌合而成的称为水泥砂浆。由石灰、砂、水拌合而成的称为石灰砂浆。由水泥、石灰、砂、水一起拌合而成的称为混合砂浆。由于砂浆骨料细，含量少，因此骨料对凝结硬化后的坚硬砂浆高温性质的影响不如混凝土那样显著。砂浆在温度 100℃ 以前，强度不降低，甚至有所增大；在超过 100℃ 以后，强度显著降低，且在冷却后强度更低。这是由于砂浆中含有较多的石灰，这些石灰加热时会分解出  $CO_2$ ，冷却过程中  $Ca(OH)_2$  吸湿消解为  $Ca(OH)_2$ ，体积急剧增大组织酥松而引起的。

从砖砌体的耐火试验观测到，当炉温达到 600℃ 左右，距砖体受火表面 100mm 深的砌筑砂浆（水泥混合砂浆）已变得酥松，实际上已丧失强度。

砂浆粉刷层作为结构的保护层，当与结构表面结合牢固，具有一定的厚度时，可以很好地改变结构构件的燃烧性能（对于可燃材料制作的构件）和提高结构构件的耐火时间。

石膏

建筑石膏凝结硬化后的主要成分是二水石膏（ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ），其在高温时发生脱水，要吸收大量的热，延缓了石膏制品的破坏，因此隔热性能良好。但是二水石膏在受热脱水时会产生收缩变形，因而石膏制品容易开裂，失去隔火作用。此外，石膏制品在遇到水时也容易发生破坏。

装饰石膏板 这种板材以建筑石膏为主要原料，掺加适量纤维增强材料和外加剂，与水一起搅拌成均匀的料浆，经浇注成型、干燥而成为不带护面纸的装修板材。它质量轻，安装方便，具有较好的防火、隔热、吸声和装饰性，属于不燃板材，大量用于宾馆、住宅、办公楼、商店、车站等建筑的室内墙面和顶棚装修。



**纸面石膏板** 纸面石膏板是以建筑石膏为主要原料，掺加纤维和外加剂构成芯材，并与护面纸牢固地结合在一起的建筑板材，属于难燃板材。按耐火特性可分为普通纸面石膏板和耐火纸面石膏板两种。耐火纸面石膏板在高温明火烧烤时，具有保持不断裂的性能。

纸面石膏板质量轻，强度高，易于加工装修，具有耐火、隔热和抗震等特点，常用于室内非承重墙和吊顶。

## 8.4 石棉水泥材料

石棉水泥材料根据用途可分为屋面材料（小块石棉瓦、大块波形石棉瓦）、墙壁材料（加压平板、大型波板）、管材（压力管、外压力管和通风管）、电气绝缘板等四种。它虽然属于非燃性材料，但在火灾高温下容易发生爆裂现象，在 300℃ 左右即破裂失去隔火作用，并且强度在 300℃~400℃ 时急剧降低，在高温时遇水冷却便立即发生破坏。

影响石棉水泥材料发生爆裂的因素有：含水量、水泥和石棉的配合比例、密实程度以及制品的厚度等。石棉在 300℃ 左右发生热分解，释放出结晶水，导致制品强度急剧下降。石棉水泥瓦、板除了具有质量轻、耐水、不燃烧的特性外，还具有一定的强度和脆性性能，因而成为建造有爆炸危险的建筑轻质泄压屋盖和墙体的理想材料。

## 8.5 玻璃

玻璃是以石英砂、纯碱、长石和石灰石等为原料，在 1500℃~1600℃ 高温下烧至熔融，再经急冷而得的一种无定形硅酸盐物质。

**普通平板玻璃** 这种玻璃大量用于建筑的门窗，其虽属于不燃材料，但耐火性能很差，在火灾高温作用下由于表面的温差会很快破碎。门、窗上的玻璃在火灾条件下大多在 300℃ 左右，由于其变形受到门、窗框的限制而自行破裂。

**夹丝玻璃** 夹丝玻璃是在玻璃成型过程中，将经过预处理的金属丝网加入已软化的玻璃中，经压延辊压制成。常用夹丝玻璃的厚度为 3~6mm，金属丝网在夹丝玻璃中主要起增大强度作用。当夹丝玻璃表面受到外力或高温作用时，同样会炸裂，但在金属网网的支撑拉结下，裂而不散。当温度升高到 400℃~500℃ 后，夹丝玻璃表面发生熔融，会填充已经出现的裂缝，直至整个玻璃软化熔融，顺着金属丝网垂落下来，形成孔洞，才失去隔火作用。

夹丝玻璃按厚度分类有 3mm 和 6mm 两种规格，其耐火极限单层夹丝玻璃为 0.5h，双层夹丝玻璃为 1h，主要用于防火门、窗和防火隔墙。

**复合防火玻璃** 复合防火玻璃又称为防火夹层玻璃，它是将两片或两片以上的普通平板玻璃用透明防火胶粘剂胶结而成的。这种玻璃在正常使用时和普

通玻璃一样具有透光性能和装饰性能；发生火灾后，随火灾区域的温度升高，防火夹层不但能将炸裂的玻璃碎片牢固地粘结在其他玻璃上，而且受热膨胀发泡，厚度增大 2~5 倍，形成致密的蜂窝状防火隔热层，阻止了火焰和热量向外穿透，从而起到隔火隔热作用。复合防火玻璃主要用于防火门、窗和防火隔墙。此外也用于楼梯间、电梯井的某些部位。按耐火性能，分为甲级、乙级和丙级，耐火时间分别为 1.5h、1h、0.5h，厚度有 12mm、15mm、19mm 三种。

复合防火玻璃起防火隔热作用的主要组成材料是胶粘剂。胶粘剂由粘料、固化剂、溶剂和其他添加剂等组成。它必须满足在火灾高温作用以前是透明的，对玻璃有一定的粘结作用；在火灾高温作用时能发泡膨胀，起隔热作用，而且发泡致密，具有一定的强度，对玻璃仍有一定的粘结作用，能防止破裂的玻璃脱落。

### 岩棉板和矿渣棉板

这两种板是新型的轻质绝热防火板材，广泛用于建筑物的屋面、墙体和防火门上。岩棉板以岩棉为基材，矿渣棉板以矿渣棉为基材。岩棉和矿渣棉都是不燃的无机纤维，板材在成型中掺加的有机物含量一般均低于 1%，故其属非燃性材料，是良好的非燃性板材，可长期使用在 1000℃ 的温度下。矿棉板经进一步深加工，可制成矿棉装饰吸音板，广泛用于影剧院、宾馆、播音室、办公室、办公楼、商店等建筑的墙面和顶棚的吸声、隔声、保温、隔热及装饰。

### 玻璃棉板

玻璃棉板是以玻璃棉无机纤维为基材，掺加适量胶粘剂和附加剂，经成型烘干而成的一种新型轻质不燃板材，可长期在 1000℃ 的温度环境中使用，在建筑中常用作围护结构的保温、隔热、吸声材料。

### 硅酸钙板

硅酸钙板是将二氧化硅粉状材料、石灰、纤维增强材料和大量的水经搅拌、凝胶化、成型、蒸压、养护、干燥等工序制作而成的一种轻质不燃板材，可长期在 1000℃ 的条件下使用。在结构耐火方面多用作钢结构耐火保护的被覆材料。

硅酸钙板具有密度轻、导热系数小、强度高、不老化、不燃和允许使用温度高等特点，广泛应用于冶金、化工、电力造船、机械、建材等行业中表面温度不大于 250℃ 的各类设备、管道及附件上，作隔热保温。

杂板是一种用于建筑装修的硅酸钙板，常用在厅室作吊顶、隔墙，或用作船舶、车辆的隔舱，还可用作现代家具的表面材料。

## 8.1 膨胀珍珠岩板

这是以膨胀珍珠岩为主要骨料，掺加不同种类的胶粘剂，经搅拌、成型、干燥、焙烧或养护而成的一种不燃板材，可长期在 200℃ 的条件下使用。

这种材料具有密度小、导热系数低、承压能力较高、施工方便、经济耐用等特点，广泛用作热管道、热设备及其他工业管道设备和工业建筑上的保温绝热材料及工业与民用建筑围护结构的保温、隔热、吸声材料。因其热稳定性好，多用作钢结构的耐火保护被覆材料。

按掺加胶粘剂种类的不同可分为水泥膨胀珍珠岩板、水玻璃膨胀珍珠岩板和磷酸盐膨胀珍珠岩板等种类。

膨胀珍珠岩装饰吸声板常用于影剧院、礼堂、播音室、会议室等公共建筑的音质处理及工厂的噪音控制，同时用于民用公共建筑的顶棚、室内墙面的装修。以表面构造不同分为不穿孔、半穿孔、穿孔吸声板，凹凸吸声板，复合吸声板等。

建筑中常用的建筑材料除了上面介绍的有机、无机材料外，还有将有机材料、无机材料结合起来的复合材料，如复合板材。复合板材是根据质轻、隔热、高强度及经济等条件，设计制造的一种新型板材，是由芯材和面材组成的。芯材一般为有机的纤维板、泡沫塑料或无机纤维等材料。面材可根据强度及硬度的要求，选用金属板、石棉水泥板、塑料板等。从防火要求来说，面材应用耐火、难燃及导热性差的板材，芯材最好选用难燃、耐高温的材料。

## 第 8 章 建筑构件的火灾性能

建筑结构的基本构件构成了建筑物的主体骨架。在火灾中，这些构件一方面继续起着正常使用功能的作用，另一方面又能阻止火势的扩大和蔓延。因此，它们的防火、耐火性能直接决定着建筑物在火灾下失稳和倒塌的时间。一般地说，承重构件均是由不可燃的材料制成的，但也有一些非承重的门、窗、隔墙等构件是用可燃材料制成的。无论构件本身是否可燃，都存在着在热应力作用下变热并由此发生化学和物理变化的问题。因此，研究各类构件在火灾中的力学特性，是建筑防火工作的一项重要内容。

### 8.1 建筑构件的耐火极限

#### 8.1.1 标准升温曲线

火灾安全立法的基本精神是：确保人员有充分的时间从火灾建筑中及时疏散出来和允许消防救护人员帮助疏散，并在他们的继续灭火中不因结构主构件的倒塌而造成人身伤害。显然，人们可以通过计算对截面已定的构件的受火稳定性进行检验。其中，一方面要注意到构件中采用的有创造性的概念和设计，另一方面则要考虑到各种火灾侵蚀的可能性，即明确一根构件、一组构件的破坏对结构整体稳定性有什么影响。一般的说，在温度升高的影响下，当构件的力学强度下降到与其承受的荷载相等时，此构件的受火稳定性就不能确保了。作为计算假设，可以认为构件此时达到了指定的温度，即达到了临界温度或破坏温度。

试验时采用的破坏极限标准是：

(1) 构件丧失了标准的力学强度。

(2) 构件自身的变形（挠度）已达到不能使其支撑的楼板等构件继续保证原有的耐火等级和不能保持相邻结构的承载功能值。

(3) 构件的热传导和密封性超过规定值。

为了统一和横向比较，构件耐火强度等级的试验应按将火灾作用具体化了的标准加温程序来估价。自 1955 年以来，美国材料试验协会采用了一条标准曲线进行楼板和墙的试验。1955 年，法国人根据实际火灾的情况，给出了标准的火灾试验曲线。而后在 1955 年，国际标准化组织决定采用法国人建议的这条曲线，称为 ISO 标准升温曲线。该曲线的数学表达式为：

裁原裁 越 裁原裁 裁原裁

(1955)

式中 贼——试验所经历的时间 (皂);

裁——试验用加热炉经 贼时间所达到的炉温 (益);

栽——加热炉内初始温度 (益), 应在 缘- 源益范围之内。

所谓的标准升温曲线是指按特定的加温方法, 在标准的试验室条件下, 所表达的火灾现场发展情况的一条理想化了的理论试验曲线。

## 9.2 耐火极限

建筑是各种建筑材料的复合体, 建筑构件的耐火性能与构件的材料有关。建筑构件的耐火性能, 通常是指构件的燃烧性能和抵抗火焰燃烧的时间 (即耐火极限)。

建筑构件的燃烧性能与建筑材料的燃烧性能一样分为三类: 第一类是非燃烧构件; 第二类是难燃烧构件; 第三类是燃烧构件。

为了确保结构在规定的时间内不会出现倒塌, 必须对构件的防火性能进行分级。目前国内外的建筑防火规范都对构件的防火度做了相应的规定。在我国的《建筑设计防火规范》中使用了耐火极限的概念, 即任一建筑构件按标准升温曲线进行耐火试验, 从构件受火作用时算起, 到构件失去支持能力或完整性被破坏或失去隔热作用时为止的这段时间, 用小时 (澡) 表示。耐火极限判定条件如下:

(员) 非承重构件。

① 失去完整性。当试件在试验中有火焰和气体从孔洞、空隙中出现, 并点燃规定的棉垫时, 则表明构件失去了完整性。

② 失去绝热性。试件背火面的平均温升超过试件表面初始温度 员益或单点最高温升超过初始温度 员益时, 则表明构件失去绝热性。

(圆) 承重构件。承重构件按是否失去承载能力和抗变形能力来判定。

① 墙。试验过程中试件发生垮塌, 则表明试件失去承载能力。

② 梁或板。试验过程中试件发生垮塌, 则表明试件失去承载能力。试件的最大挠度超过 蕴, 则表明构件失去抗变形能力。蕴为试件跨度, 单位为 皂。

③ 柱。试验过程中试件发生垮塌, 则表明试件失去承载能力。试件的轴向收缩引起的变形速度超过 猿皂皂皂, 则表明构件失去抗变形能力。匀为试件在炉内的受火高度, 单位为 皂。

当承重构件同时起分隔作用时, 还应满足非承重构件的判定条件。

耐火极限的概念在国际上也为人所用, 它的好处在于直接明了地给人们一个构件耐火能力的量度。耐火极限值的确定取决于建筑物的用途、重要程度、灾害后的可修复程度以及我国现有的混凝土构件 (包括墙体构件) 的实际耐火水平。

## §2.2 建筑构件的耐火试验

对建筑构件进行耐火试验,研究构件的耐火极限,可以为正确制定和贯彻建筑防火法规提供依据,为提高建筑结构耐火性能和建筑物的耐火等级,降低防火投资,减少火灾损失提供技术措施,也和火灾烧损后建筑结构加固直接相关。

此外,我国防火设计中,构件的耐火极限是衡量建筑物耐火等级的主要指标,而承重构件的耐火极限是结构能否在火灾中保持稳定而不倒塌的唯一保证。我国建筑构件耐火试验必须按照《建筑构件耐火试验方法》(GB 9978-2012)进行。

## §2.3 影响构件耐火极限的因素及提高耐火极限的措施

### §2.3.1 影响构件耐火极限的因素

前已述及,构件耐火极限的判定条件有三,即稳定性、完整性和绝热性。所有影响构件这三条性能的因素都影响构件的耐火极限。

**完整性** 根据试验结果,凡易发生爆裂、局部破坏穿洞,构件接缝等都可能影响构件的完整性。当构件混凝土含水量较大时,受火时易于发生爆裂,使构件局部穿透,失去完整性。当构件接缝、穿管密封处不严密,或填缝材料不耐火时,构件也易在这些地方形成穿透性裂缝而失去完整性。

**绝热性** 影响构件绝热性的因素主要有两个:材料的导温系数和构件厚度。材料导温系数越大,热量越易于传到背火面,所以绝热性差;反之则好。由于金属的导温系数比混凝土、砖大得多,所以墙体或楼板当有金属管道穿过时,热量会由管道传向背火面而导致失去绝热性。当构件厚度较大时,背火面达到某一温度的时间则长,故其绝热性好。

**稳定性** 凡影响构件高温承载力的因素都影响构件的稳定性。  
(1) 构件材料的燃烧性能。可燃材料构件由于本身发生燃烧,截面不断削弱,承载力不断降低。当构件自身承载力小于有效荷载作用下的内力时,构件破坏而失去稳定性。

(2) 有效荷载量值。所谓有效荷载是指试验时构件所承受的实际重力荷载。有效荷载大时,产生的内力大,构件失去承载力的时间短,所以耐火性差。

(3) 钢材品种。不同的钢材,在温度作用下强度降低的系数不同。普通低合金钢优于普通碳素钢,普通碳素钢优于冷加工钢,而高强钢丝最差。所以配置高强钢的构件稳定性好,而预应力构件(多配冷拉钢筋或高强钢丝)稳定性差。

(4) 实际材料强度。钢材和混凝土的强度受各种因素影响,是一个随机变量。构件材料实际测定强度高者,耐火性好;反之则差。

(缘) 截面形状与尺寸。同为矩形截面, 当截面周长与截面面积之比大者, 截面积受热量多, 内部温度高, 耐火性较差。矩形截面宽度小者, 温度易于传入内部, 耐火性较差。构件截面尺寸大, 热量不易传入内部, 其耐火性则好。

(远) 配筋方式。当截面双层配筋或将大直径钢筋配于中部, 小直径钢筋配于角部, 则里层或中部钢筋温度低, 强度高, 耐火性好; 反之则差。

(苑) 配筋率。柱子配筋率高者, 耐火性差。因钢材强度降低幅度大于混凝土。

(愿) 表面保护。当构件表面有非燃性材料保护同时, 如抹灰、喷涂防火涂料等, 构件温度低, 耐火性好。

(怨) 受力状态。轴心受压柱耐火性优于小偏心受压柱, 小偏心受压柱优于大偏心受压柱。

(员) 支承条件和计算长度。连续梁或框架梁受火后会产生塑性变形出现内力重分布现象, 所以耐火性大大优于简支梁。柱子计算长度越大, 纵向弯曲作用越明显, 耐火性越差。

## 9.2.2 提高建筑构件耐火极限和改变燃烧性能的方法

建筑构件的耐火极限和燃烧性能, 与建筑构件所采用的材料性质、构件尺寸、保护层厚度以及构件的构造做法、支承情况等有着密切的关系。在进行耐火构造设计时, 当遇到某些建筑构件的耐火极限和燃烧性能达不到规范的要求时, 应采用适当的方法加以解决。常用的方法有:

(员) 适当增加构件的截面尺寸。

建筑构件的截面尺寸越大, 其耐火极限越长。此法对提高建筑构件的耐火极限十分有效。

(圆) 对钢筋混凝土构件增加保护层厚度。

这是提高钢筋混凝土构件耐火极限的一种简单而常用的方法, 对钢筋混凝土屋架、梁、板、柱都适用。钢筋混凝土构件的耐火性能主要取决于其受力筋高温下的强度变化情况。增加保护层厚度可以延缓和减少火灾高温场所的热量向建筑构件内钢筋的传递, 使钢筋温升减慢, 强度不至降低过快, 从而提高构件的耐火能力。

(猿) 在构件表面做耐火保护层。钢结构表面耐火保护层的构造做法有:

① 用现浇混凝土做耐火保护层。所使用的材料有混凝土、轻质混凝土及加气混凝土等。这些材料既有不燃性, 又有较大的热容量, 用做耐火保护层时能使构件的升温减缓。由于混凝土的表层在火灾高温下易于剥落, 如能在钢材表面加敷钢丝网, 便可进一步提高其耐火性能。

② 用砂浆或胶泥做耐火保护层。所使用的材料一般有砂浆、轻质砂浆、

珍珠岩砂浆或灰胶泥、蛭石砂浆或石膏灰胶泥等。上述材料均有良好的耐火性能，且以人工轻质骨料、珍珠岩及蛭石尤为突出。其施工方法常为在金属网上涂抹上述材料。

③ 用矿物纤维做耐火保护层。保护层材料有石棉、岩棉及矿渣棉等等。具体施工方法是將矿物纤维与水泥混合，再用特殊喷枪与水的喷雾同时向底子喷涂，则构成海绵状的覆盖层，然后抹平或任其呈凹凸状。上述方式可直接喷在钢构件上，也可以向其上的金属网喷涂，且以后者效果较好。

④ 用防火板材做耐火保护层。构造做法是以防火板材包覆钢构件，板间连接可采用钉合及粘合。这种构造方式施工简便而工期较短，并有利于工业化。同时，承重（钢结构）与防火（预制板）的功能划分明确，火灾后修复简便且不影响主体结构的功能，因而具有良好的复原性。

（源 钢梁、钢屋架下及木结构做耐火吊顶和防火保护层。

① 在钢梁、钢屋架下做耐火吊顶，其结构表面虽无耐火保护层，但耐火能力却会大大提高。此时则不能仅按钢构件本身的耐火极限来考虑，因为在无保护的钢梁、钢屋架下做耐火吊顶后，使钢梁的升温大为延缓。这种构造方法还能增加室内的美观。

② 在木结构等可燃构件表面做防火保护层（如抹灰层），不仅可以改变其燃烧性能，而且可以显著提高其耐火能力。

（缘 在构件表面涂覆防火涂料。

在进行建筑耐火设计时，经常会遇到钢结构构件、预应力楼板达不到耐火等级所规定的耐火极限值的要求，以及有些可燃构件、可燃装修材料由于燃烧性能达不到要求的情况，这时都可以使用防火涂料加以解决。防火涂料涂敷于建筑构件可有效提高其耐火极限，涂于可燃性材料表面，可改变其燃烧性能，在建筑构件、装修材料方面的应用前景十分广阔。

（远 进行合理的耐火构造设计。

构造设计的目的是通过采用巧妙的约束去抵抗结构的过大挠曲和断裂，合理的构造设计可以延长构件的耐火极限，提高结构的安全性和经济性。

（苑 其他方法。

改变构件的支承情况，增加多余约束，做成超静定梁。做好构件接缝的构造处理，防止发生穿透性裂缝。

## 高温后钢筋混凝土梁板的耐火性

高温后钢筋和混凝土的力学性能呈现不同程度的降低，致使结构产生一定程度的损伤甚至严重破坏。系统地研究构件火灾温度场分布，以及高温后钢筋混凝土构件的力学性能对于全面正确地评价火灾后钢筋混凝土结构的损伤状况，进而



制定科学合理的修复加固策略，具有重要的理论意义和实用价值。

## 9.2.2 无荷载作用高温后钢筋混凝土梁的力学性能

试验观察梁的升温过程。当炉内温度约  $300^{\circ}\text{C}$  时开始观察到有水蒸气逸出，逸出量随温度的升高逐渐增大，在  $400^{\circ}\text{C}$  左右时达到最大，之后慢慢减少，到  $500^{\circ}\text{C}$  后基本见不到水雾。

梁的挠度也随温度的增加而不断增大，最后均超过  $5\text{mm}$ 。冷却后的梁表面混凝土颜色灰白甚至暗红，敲击声音清脆。受火面上明显分布着竖向裂缝，且比常温下的竖向裂缝要宽，梁的上表面和底面还分布有无规则的横向裂缝。另外，整个受火面上均分布有细微可见的呈树叶状的裂纹，且温度越高，裂纹越多、越清晰。此外，混凝土还有爆裂、松酥等现象，骨料用手可捻碎。横向裂缝是由于钢筋和混凝土的高温徐变的差异引起的，裂纹是由于水泥砂浆和骨料之间热效应不尽相同而导致的。

另外值得一提的是，通过对梁在降温过程中的变形的观测，发现在梁冷却后变形可基本恢复。

### (1) 梁内截面温度的变化规律

图 9-2-1 为钢筋混凝土梁受火时，跨中截面沿宽度方向的温度分布图，图 9-2-2 为梁跨中截面沿深度方向的升温曲线图，从这两个图可以得出梁跨中截面同一高度不同宽度上的升温曲线的变化规律为：

(1) 温度由宽度的中截面向两侧受火面成对称且非线性分布。

(2) 中间测点的拐点出现时间明显晚于两边测点。

(3) 温度传递速度不均匀，同一时间间隔内，温度越高，差距越大。

图 9-2-3 为钢筋混凝土梁跨中沿高度方向的温度分布图，图 9-2-4 为梁跨中不同高度升温曲线图，从这两个图可以得出梁跨中截面中截面宽度上的升温曲线的变化规律。

(1) 混凝土内部，温度曲线均具有拐点，且与受火面距离越远，拐点越滞后。

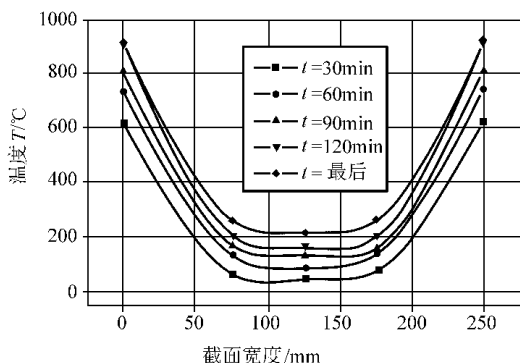


图 9-2-1 梁跨中沿宽度方向的温度分布图

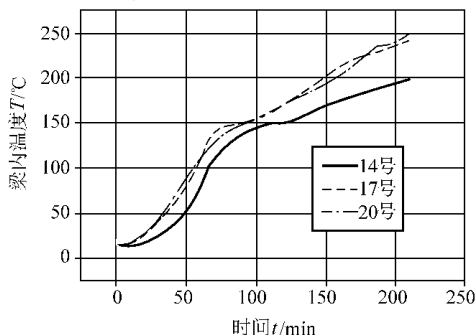


图 9-2-2 跨中截面沿深度方向的升温曲线

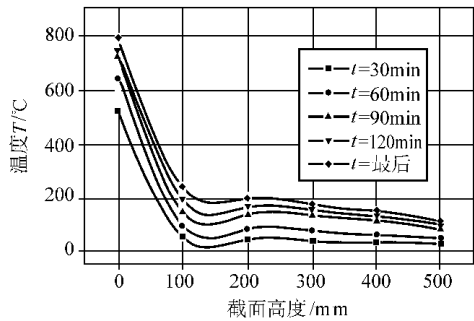


图 2-2-1 梁跨中沿高度方向的温度分布图

受火面温度与混凝土内最近测点的温度相差很大，在混凝土受火面附近形成了较大的温度梯度，这说明混凝土具有热惰性，同时也说明增加混凝土梁的保护层厚度可降低梁底钢筋温度，进而提高梁的抗火性能。

在混凝土内部，温度随时间近乎线性分布，沿高度非线性分布；但在距梁底 100mm 以上的部分又接近线性分布。

(圆) 梁内主筋温度的变化规律。  
图 2-2-2 为梁内主筋升温曲线图。

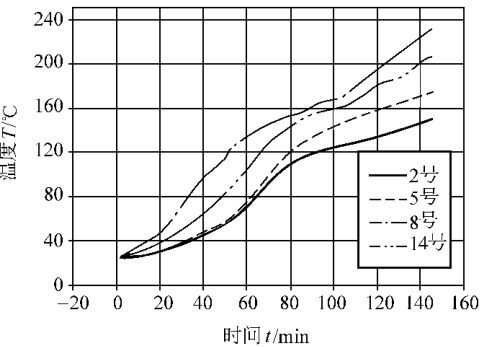


图 2-2-2 梁跨中不同高度升温曲线

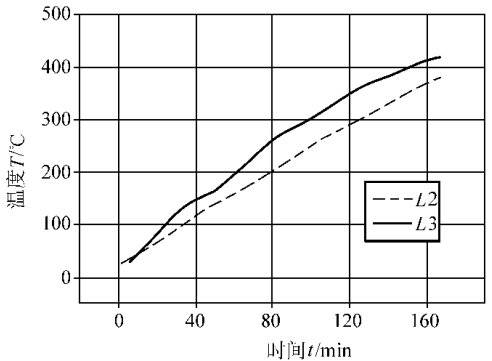


图 2-2-3 梁内主筋升温曲线

与混凝土的升温曲线相比较，可以发现钢筋的升温曲线要陡一些，这说明钢筋是热的良导体，一旦受热，温度迅速升高，近乎直线上升。

(猿) 火灾后梁的力学性能。  
图 2-2-4 为钢筋混凝土梁在受火作用后不同截面的荷载挠度曲线图，图中 猿源 猿缘 猿陆 猿柒 分别表示 猿源 跨中、猿缘 跨中、猿陆 跨中、猿柒 跨中；图 2-2-5 为受火后梁在不同荷载下的整体变形曲线图。与常温下相比，受火损伤后梁的强度及变形有以下变化规律：

猿 极限承载力下降，温度越高，下降越大。

圆 变形比同一荷载级别下常温下的梁在钢筋屈服以前阶段略有增大，但在钢筋屈服后混凝土被压碎

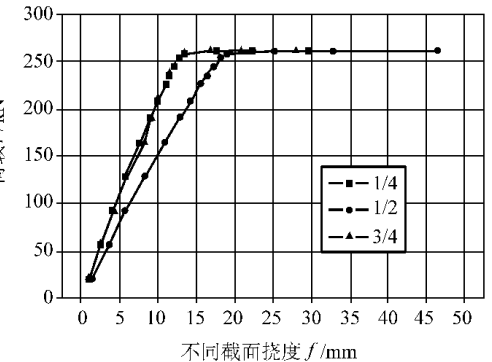


图 2-2-4 梁不同截面的荷载挠度曲线

前阶段小很多，说明梁延性减小，脆性增大。

**獐** 梁在变形很小的情况下混凝土便被压碎，破坏比较突然。

**獬** 温度越高，受火损伤后梁的最终变形量越小。

图 9-25 为受火后梁跨中上表面荷载—平均应变曲线图，图 9-26 为受火后梁跨中侧面平均应变。与常温下未受火的梁相比，混凝土的应变有以下特点：

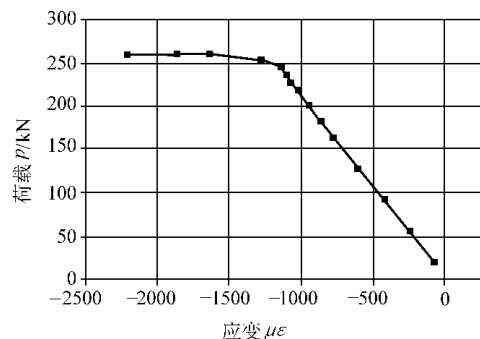


图 9-25 梁跨中上表面荷载—平均应变曲线

**獐** 混凝土极限压应变和截面应变形状与原来相似。

**圆** 混凝土极限压应变减小，温度越高，应变越小，但幅度不大。

**獐** 梁截面应变依然可以近似的认为符合平截面假定。

**獬** 梁的截面中和轴上移，且受火温度越高，上移距离越大。

大量的试验研究表明，与火灾作用前相比较，钢筋混凝土梁受火作用后存在以下几个方面的变化：

(1) 强度变化。

混凝土梁遭受火灾作用后，影响其承载能力的主要因素是混凝土抗压强度和钢筋的抗拉强度的降低而导致梁构件的承载力的降低。

混凝土是一种复合材料，由骨料和填质料所组成，这些不同成分的材料在受热之后物理力学性能发生变化，导致混凝土产生裂缝，使填质料和骨料之间的粘接强度降低，从而降低了混凝土的抗压强度。

钢筋在高温作用下其屈服强度都会下降，其中 45 号钢钢筋屈服强度下降的原因是：经高温后珠光体中的渗碳体被球化，随着温度的升高球化加速，球化组织的发展导致钢筋强度降低，另一方面钢筋在高温作用下表面脱碳而形成脱碳

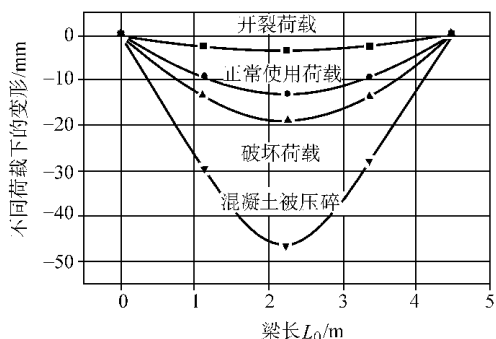


图 9-26 梁在不同荷载下整体变形曲线

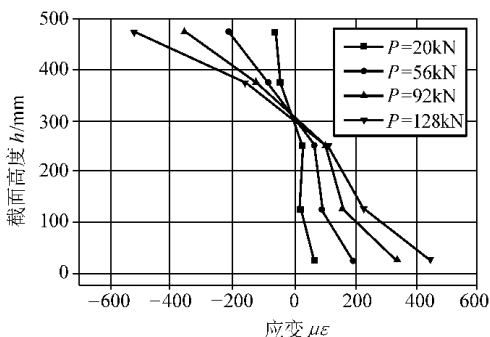


图 9-27 梁跨中侧面平均应变

层，导致含碳量下降，随着钢筋内珠光体的减少使强度降低。

在混凝土梁板构件中，由于遭火灾后其混凝土和钢筋的强度下降，导致构件受压区混凝土局部压碎、受拉钢筋拉断等破坏特征。因而，遭受火灾作用后的梁构件的强度变化主要体现在以下几个方面：经火灾作用后，混凝土梁板结构破坏特征主要呈现在裂缝宽度和挠度上；梁板构件破坏荷载的大小与受压区混凝土强度和主筋抗拉强度的降低大小有关；火灾温度和主筋保护层厚度直接影响结构的承载能力。

(圆) 刚度变化。

钢筋混凝土梁受火灾作用后，钢筋屈服前的挠度与常温相比变化不大，略有提高，但从钢筋屈服至混凝土被压碎阶段，挠度明显减小，延性明显降低，近乎脆性破坏。并且，受火温度越高，挠度越小，脆性越大。

(猿) 裂缝宽度、裂缝发展和平均间距。

在火灾高温作用下，由于钢筋和混凝土产生热膨胀和徐变的差异导致钢筋混凝土梁产生竖向和横向裂缝，应力越大，由温度产生的裂缝也越多，主裂缝也越宽。观察火灾作用后的梁与未经火灾作用的梁的荷载试验，其裂缝出现的情况为：经火灾作用后的梁的裂缝出现要早于未经火灾作用的梁，而且裂缝一旦出现后，随着荷载的增大，裂缝迅速延伸、扩大，挠度增加。此时，火灾作用时出现的裂缝，在荷载作用下有的闭合，有的延伸、扩大。至于裂缝间距，火灾作用后的梁在荷载作用下的裂缝间距比未经火灾作用的梁大。

图 2-2-10 无荷载作用、高温下梁的变形

对于简支梁的挠度测量是模拟火灾试验的一项重要指标，试验在梁的跨中、1/4 及两支座截面处分别布置数显位移传感器，测试火灾高温下燃烧时间和梁的变形、受火温度和梁的变形的关系。图 2-2-11 为梁内不同截面时间—挠度曲线变化图，图 2-2-12 为梁不同时间内的整体变形曲线图，图 2-2-13 为梁内不同截面温度—挠度曲线图，图 2-2-14 为梁不同温度下的整体变形曲线。

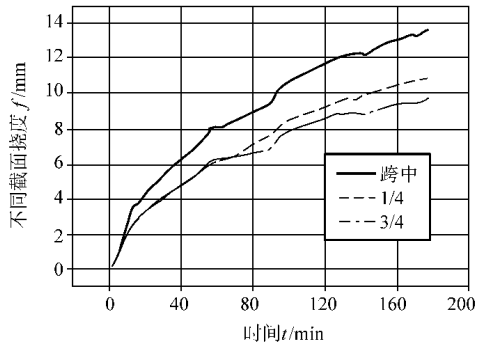


图 2-2-11 梁内不同截面时间—挠度曲线

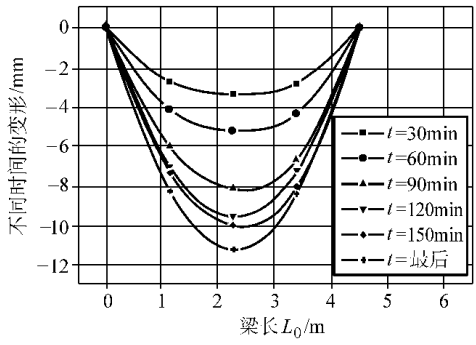


图 2-2-12 梁不同时间时的整体变形曲线

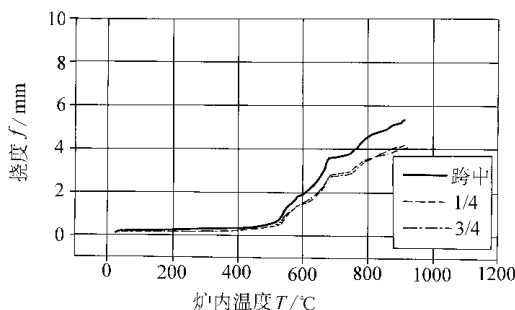


图 9-10 梁内不同截面温度—挠度曲线

由于试验过程中并未对梁施加荷载,因此梁只承受自身的重力,故而可以认为梁的变形是由温度产生的。比较跨中和 1/4 截面处的变形,可以发现相差不多,可以推断沿梁的长度方向温度分布均匀。通过对梁降温过程的变形的监测,发现梁冷却后变形可基本恢复,因此变形发生在梁的弹性范围内。

由于简支梁是静定结构,在荷载作用下,内力不随时间发生变化,简支梁对火灾的反应主要是挠度的反应。通过试验发现,在温度加热至 700°C 以前,挠度变化不大,而 700°C 以后开始变化很快。

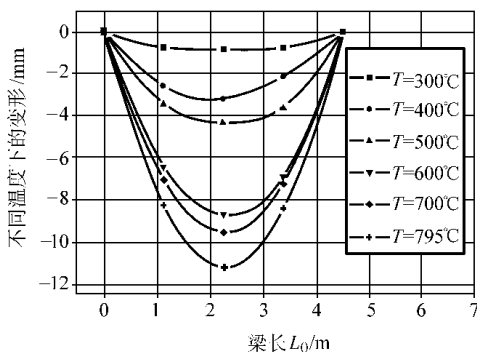


图 9-11 梁不同温度的整体变形曲线

## 9.2.2 高温和外荷载共同作用下钢筋混凝土梁板结构的力学性能

影响钢筋混凝土梁板结构火灾损伤程度的主要因素有构件初始荷载、燃烧时间、构件配筋及保护层厚度等。简支梁的挠度和变形是受初始荷载和高温共同作用下而产生的结果。

### 9.2.2.1 试验现象

在梁的升温过程中,当燃烧 10 min 后开始观察到有水蒸气逸出,逸出量随温度的升高逐渐增大,大约持续 15 min 之后慢慢减少,当超过 20 min 后,梁内部的水份基本蒸发完毕。此时整个梁的内部温度慢慢升高,梁的跨中挠度开始增大,随着炉内温度的增加,梁的挠度也不断增大。

火灾模拟试验结束后,梁自然冷却到室温,可以观察到,在梁的受火面表面出现起鼓、酥松、脱落等现象,混凝土受火面表面颜色表现为灰白甚至暗红。受火面上明显分布着龟裂裂缝,梁的上表面和底面还分布有无规则的横向裂缝。另外,整个受火面上均分布有细微可见的呈树叶状的裂纹,且温度越高,裂纹越多。

越清晰。高温下的应力越大，梁底面的裂缝越宽。

**梁内温度** 图 2-2-10 为一组梁跨中截面边缘处的升温曲线。从图中可以看出，在测点温度达到 300℃ 后，每根曲线都有一个平台，这可能是在升温时混凝土脱去自由水，吸收热量，导致此时梁内温度没有升高。过此平台后，梁内温度随着时间的增加不断升高。

**火灾作用下钢筋混凝土梁的挠度** 分为两组进行分析：

**第一组**，梁施加的初始荷载不同：L41 梁的初始荷载为 15kN，L42 梁的初始荷载为 30kN，L43 梁的初始荷载为 45kN，其他条件相同。其跨中挠度—时间曲线如图 2-2-11 所示。

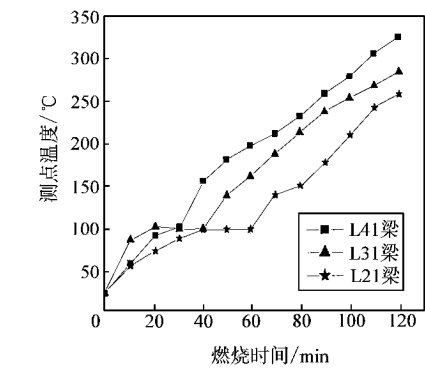


图 2-2-10 梁 L41、L31 与 L21 内跨中截面边缘处的升温曲线

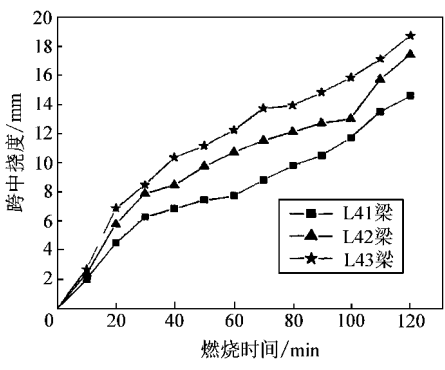


图 2-2-11 第一组梁 L41、L42 与 L43 的跨中挠度—时间曲线

**第二级**，梁的配筋不同：L41 为 3#，L42 为 4#，L43 为 5#。L41 梁施加初始荷载为 15kN，L42 梁和 L43 梁施加初始荷载为 30kN，其他条件相同。其跨中挠度—时间曲线如图 2-2-12 所示。

根据试验结果，可以得到钢筋混凝土梁板结构在高温和外荷载共同作用下力学性能的变化规律：

**受火面混凝土的温度** 比其内部混凝土的温度要高，在混凝土内部受火面附近形成较大的温度梯度，增加混凝土保护层厚度可提高梁的防火性能。

**高温作用时**，在其他条件相同的情况下，梁上的初始荷载越大，则梁的高温挠度也大，损伤越严重。

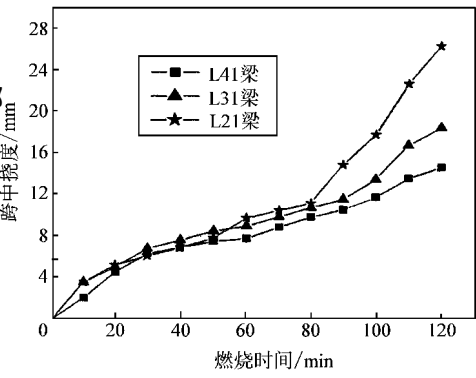


图 2-2-12 第二组梁 L41、L31 和 L21 的跨中挠度—时间曲线

钢筋配筋不同,高温作用时的挠度也不同,增加受力钢筋后,高温挠度减少,高温损伤也减少。

钢筋混凝土梁受火冷却后的力学性能 具体分为以下几方面:

(1) 挠度。图 9-2-10 和图 9-2-11 为第一组梁和第二组梁受火冷却后荷载—跨中挠度变形曲线。根据试验结果可知,在梁上施加的初始荷载越大,梁的剩余承载力越小,同时梁破坏时的挠度也越大,说明梁受火灾损伤程度越大;配筋率越高,火灾损伤程度越小,所以,适当多配置一些钢筋对抗火是有利的。

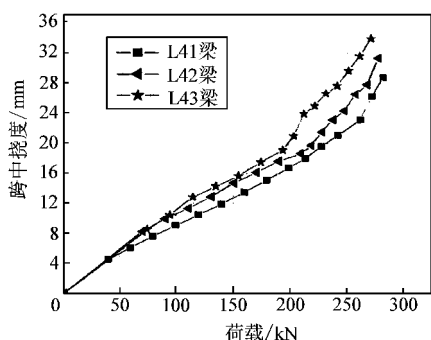


图 9-2-10 梁 L41、L42 和 L43 荷载—跨中挠度的变形曲线

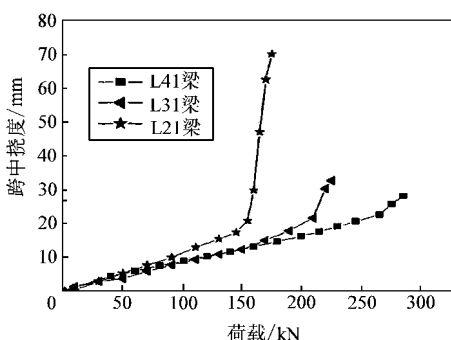


图 9-2-11 梁 L41、L31 和 L21 荷载—跨中挠度的变形曲线

(2) 应变。图 9-2-12 和图 9-2-13 为第一组梁和第二组梁跨中上表面的荷载—应变曲线,图 9-2-14 和图 9-2-15 为梁 L41 和梁 L31 跨中侧面荷载—应变曲线。

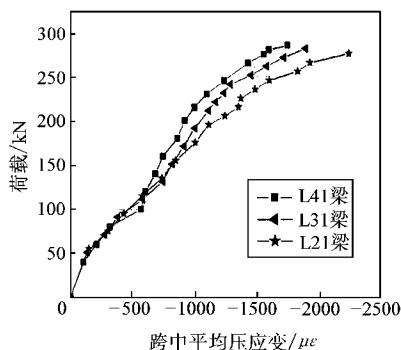


图 9-2-12 梁 L41、L31 和 L21 跨中上表面荷载—应变曲线

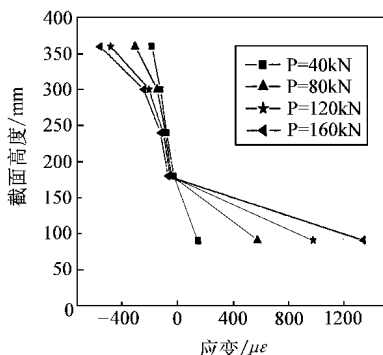


图 9-2-13 梁 L41 跨中侧面荷载—应变曲线

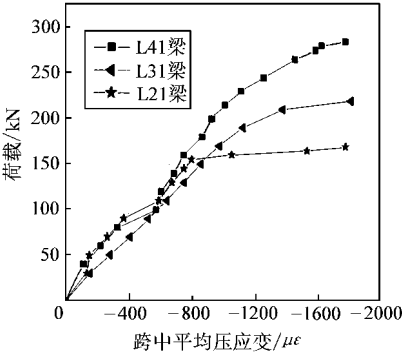


图 10-15 梁 L41、L31 和 L21 跨中上表面荷载—应变曲线

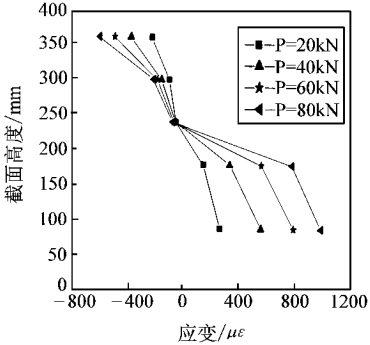


图 10-16 梁 L41 跨中侧面荷载—应变曲线

从试验结果可以看出，在梁上施加的初始荷载越大，破坏时梁的应变也越大，而承载力越小。由荷载—应变曲线可知，火灾损伤后，配筋率不同的曲线在上升段应变基本相同，到达平台后区别逐渐明显；配筋率越大，在相同的荷载下，应变越小。

(猿) 剩余承载力。结构在火灾后的力学性能中，最重要的是极限承载力，因为它直接关系到结构的安全性，也是火灾后混凝土结构安全评估及加固修复的重要依据。

图 10-15~图 10-16 是火灾后各梁的极限承载力与常温下的极限承载力的比较图，图 10-17~图 10-18 是火灾后两组梁的极限承载之间的比较图。

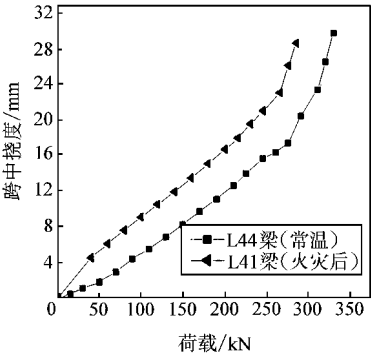


图 10-17 梁 L44 火灾后与常温下梁的极限承载力的比较

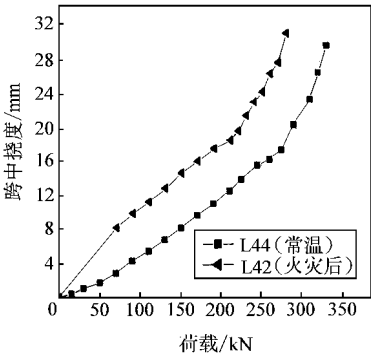


图 10-18 梁 L44 火灾后与常温下梁的极限承载力的比较

由图 10-17~图 10-18 可知，试验中不同的梁在火灾后的极限承载力比常温下梁的极限承载力都有不同程度的下降，这主要是由于高温火灾作用后钢筋和混凝土材料的物理力学性能的劣化甚至发生改变（如混凝土材料的化学成分的改变）造成的。受火后构件的极限承载力为未受火时的 80% 左右。火灾后的梁和常温



下的梁的破坏都是由于上部混凝土被压碎而造成，钢筋并未达到屈服。

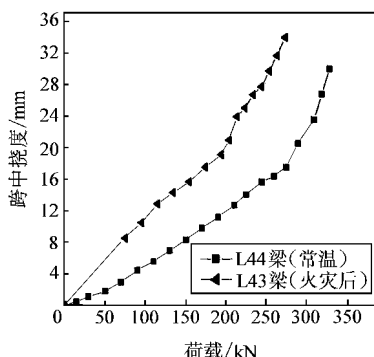


图 9-12 梁火灾后与常温下梁的极限承载力的比较

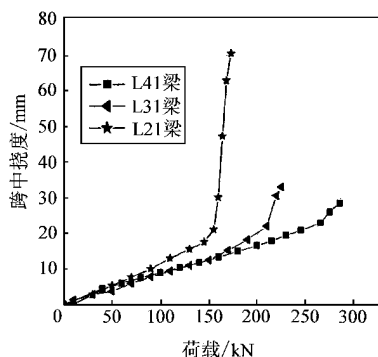


图 9-13 火灾后梁的极限承载力的比较

由图 9-12 可知，在其他条件相同、配筋不同的情况下，钢筋配置越多，火灾损伤程度越小。梁 L43 (源 1) 火灾作用冷却后的剩余承载力是 150 kN，而梁 L44 (猿 1) 和梁 L45 (圆 1) 的剩余承载力分别是 160 kN 和 170 kN。所以，适当多配置一些钢筋对抗火是有利的。

由图 9-13 可知，在燃烧时间和最高温度相同的情况下，不同的初始荷载对梁的影响不同。初始荷载越大，火灾作用下挠度也越大，冷却后梁的细裂缝也越多，表明梁的损伤程度越大。

根据试验结果，可以得到钢筋混凝土梁板结构在高温和外荷载共同作用下力学性能的变化规律：

员 高温作用使得混凝土脱去自由水，梁内典型测点的升温曲线在 150℃ 左右都有明显的一个平台，过此平台后则随着时间的增加，梁内温度不断的升高。

圆 受火面混凝土的温度比其内部混凝土的温度要高，在混凝土内部受火面附近形成较大的温度梯度，增加混凝土保护层厚度可提高梁的耐火性能。

猿 高温作用时，在其他条件相同的情况下，梁上的初始荷载越大，则梁的高温挠度也大，损伤也越严重。

源 配筋不同，高温作用时的挠度也不同，增加受力钢筋后，高温挠度减少，高温损伤也减少。

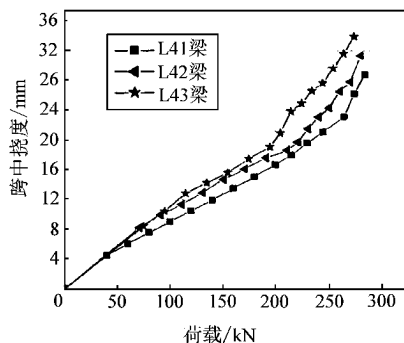


图 9-14 火灾后梁的极限承载力的比较



冲击地面引起的地震。构造地震是由于地壳构造运动使得深部岩石的应变超过容许值，岩层发生断裂、错动而引起的地面振动，一般简称为地震，目前我们常说的地震就是指的这种地震，它也是地震工程和工程抗震的主要研究对象。构造地震发生的次数多，影响范围广，占地震发生总数的 85% 以上。

地震按震源深度可以分为浅源地震、中源地震和深源地震。浅源地震的震源深度在 70km 以内，占地震总数的 70% 左右。中源地震的震源深度在 70~300km 之间，占地震总数的 10% 左右。深源地震的震源深度在 300km 以上，占地震总数的 2% 左右。世界上大多数的地震是浅源地震，震源深度在 0~70km 之间。目前记录到的最深震源为 700km。对于同样大小的地震，当震源较浅时，波及的范围较小，破坏程度较大。当震源深度较大时，波及范围较大，而破坏程度相对较小。这是由于地震时释放的能量通过长距离的传播时，其中的大部分能量将被岩层所吸收。

根据震中距的大小，地震又可分为地方震、近震和远震。震中距在 100km 以内的地震叫地方震；震中距在 100km~1000km 之间的地震称近震；震中距大于 1000km 的地震称远震。

据震级大小，地震可分为七类，见表 10-1。

表 10-1 地震按震级的分类

类型	震级	类型	震级
超微震	震级 < 1	强烈地震	远 < 震级 < 7
弱震和微震	1 ≤ 震级 < 3	大地震	震级 ≥ 7
有感地震	3 ≤ 震级 < 4.5	巨大地震	震级 ≥ 8
中强地震	4.5 ≤ 震级 < 6		

10.1 地震成因

关于地震的成因的研究已经有 100 多年的历史了。早期的地震成因倾向于断层学说，近期的观点倾向于板块构造学说。

1912 年，德国地球物理学家、气象学家阿尔弗莱德·魏格纳对位于大西洋两岸的南美大陆和非洲大陆海岸线的相似性从地质学、古生物学、气候学等角度进行了科学的推敲。1915 年他在《大陆与大洋的起源》一书中提出了大陆漂移的概念，为后来的板块构造学说的诞生和发展提供了基础。20 世纪 50 年代左右，美国地质学家在大陆漂移学说的基础上提出了板块构造学说。该学说认为，地球的岩石圈不是一块整体，而是被一些活动的构造带——海岭、岛弧、平移大断层等所割裂的若干板块。板块的概念系指全球岩石圈板块，厚约 5~10km，其下为一塑性软流圈（层），属上地幔上部，厚约 100~200km。全球岩石圈可划分为六大板块，即太平洋板块、亚欧板块、印度洋板块、非洲板块、美洲板块、南极

洲板块。除太平洋板块几乎完全是海洋外，其余板块既包括大块陆地，又包括大片海洋。六大板块又可分成若干小板块。如美洲板块分为南、北美洲两个小板块，亚欧板块可分出东南亚、阿拉伯半岛、土耳其等小板块等。板块以一定的边界（海岭、岛弧—海沟系、转换断层）来划分，其多以洋底张裂带、转换断层、消亡带、地缝合线为分界线。有的板块内部强度较大，比较稳定，主要活动与变形发生在板块边缘，即板块交界处。板块俯冲，形成海沟、岛弧与海岸山脉；板块碰撞，形成山脉；板块分裂，形成裂谷、洋中脊和海洋；板块错动，形成转换断层。板块构造学说可以较为合理地解释世界地震分布现象。据历史资料统计，全世界 85% 左右的地震发生在板块边缘，其余地震发生在板块内部。

## 2.2.2 地震波

当震源岩层发生断裂、错动时，岩层所积累的能量突然释放，以波的形式从震源向四周传播，这种波称为地震波。地震波按其在地壳中传播的位置的不同分为体波和面波。

**1. 体波** 体波为在地球内部传播的波，体波根据其介质质点振动方向和波传播方向的不同又可以分为纵波和横波。纵波的介质质点振动的方向和波传播的方向相同，是从震源向四周传播的压缩波。纵波一般周期较短，波速较快，振幅较小，在地面上引起上下颠簸运动。纵波由于波速较快，在地震发生时往往最先达到，因此纵波也称为初波、孕波、压缩波或拉压波。纵波波速一般用  $v_p$  来表示，在地壳内纵波的传播速度一般为  $5.5 \sim 7.5 \text{ km/s}$ ，根据弹性动力学可以得到  $v_p$  的计算式为

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2.2.1)$$

式中  $E$ ——介质的弹性模量；

$\mu$ ——介质的泊松比；

$\rho$ ——介质的密度。

横波的介质质点振动的方向和波传播的方向垂直，是从震源向四周传播的剪切波。横波一般周期较长，波速较慢，振幅较大，引起地面水平方向的运动。横波由于波速较慢，在地震发生时达到的时间将比纵波慢，因此横波也称为次波、杂波、剪切波、畸变波和等体积波。横波波速一般用  $v_s$  来表示，在地壳内横波的传播速度一般为  $3.5 \sim 4.5 \text{ km/s}$ ，根据弹性动力学可以得到横波波速的计算式为

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2.2)$$

式中  $G$ ——介质的剪切弹性模量；

$\mu$ ——介质的泊松比；  
 $\rho$ ——介质的密度。

令横波的波速和纵波的波速之比为  $\nu$ ，则由式 (5-2-1) 和式 (5-2-2) 可以得到

$$\nu = \frac{v_s}{v_p} = \sqrt{\frac{1-\mu}{2(1+\mu)}}$$

(5-2-3)

由于介质的泊松比  $\mu$  越 0.5，因此  $\nu$  总是小于 0.5，横波的波速总是小于纵波的波速，所以当地震发生时，地震中心区域的人们的感觉是先上下颠簸，然后左右摇晃。地基土中纵波和横波的波速参考值见表 5-2-1

表 5-2-1 地基土纵波、横波的传播速度 (单位：m/s)

地基土名称	纵波波速 $v_p$	横波波速 $v_s$
湿粘土	1500	800
天然湿度黄土	1800	900
密实砾石	2000	1000
细砂	1600	850
中砂	1700	900
粗砂	1800	950

**5.2.1 面波** 面波为在地表面传播的波。面波主要有瑞雷波和乐夫波。瑞雷波传播时，介质质点在波的前进方向与地表法向组成的平面内做椭圆运动（见图 5-2-4）。椭圆上任意一点在横轴上的投影为介质质点的水平位移，在纵轴上的投影为介质质点的竖向位移，由水平位移和竖向位移合成后的矢量为介质质点的总位移。当经过一个周期的振动，质点位移矢量就描绘了一个椭圆。总之，表面介质质点运动对于波的传播方向而言，其轨迹就是一个逆转的椭圆。椭圆的长轴与地表面垂直，而短轴则与地表面平行，长短轴之比就是竖向位移分量和水平位移分量的幅值之比。瑞雷波是形成地面晃动的主要原因。瑞雷波的波速通常用  $v_R$  来表示，其与横波波速  $v_s$  有下列近似关系

$$v_R = \frac{v_s}{\sqrt{1-\mu}}$$

(5-2-4)

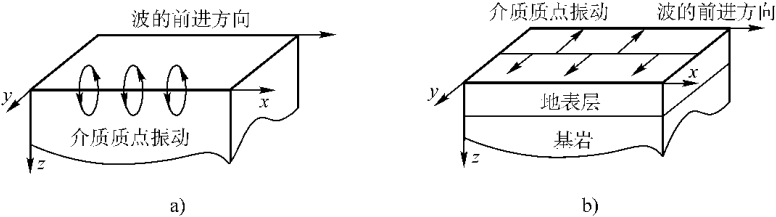


图 5-2-4 面波质点振动示意图

瑞雷波质点振动    乐夫波质点振动

乐夫波传播时，介质质点在与波的前进方向垂直的水平方向运动，在地面上表现为蛇形运动（见图 1-2-10）。面波是经过地层界面的多次反射、折射形成的次生波。面波的周期长，振幅大，衰减慢，所以在地震发生时，面波往往最后达到，而且面波传播的距离远。面波对建筑物的影响最大。利用纵波、横波和面波传播速度的不同，可以大致确定震源的距离。

1-2-11 地震震级和烈度

1-2-11-1 地震震级

地震地面运动将对建筑物在地震中的性能产生重要影响，如何定量来描述地震的大小呢？度量地震大小的主要因素就是震源所释放的能量的多少。地震震级就是这样的指标。由于人们所能观测到的只是传播到地面的振动，也就是对我们有直接影响的那部分能量所引起的地面运动，所以人们自然想到采用地震地面运动的振幅大小来度量地震震级。1935年，美国地震学家里希特（查尔斯·弗朗西斯·里希特）首先提出了震级的概念，即震级的大小是采用标准地震仪（周期 0.08s，阻尼系数为 0.02，放大倍数 1000 倍的地震仪）在距离震中 100km 处记录到的以微米（ $\mu m$ ）为单位的最大水平地面位移  $A$  的常用对数值，即

$$M_L = \lg A \quad (1-2-11)$$

式中  $M_L$ ——地震震级，通常称为里氏震级；  
 $A$ ——由记录到的地震曲线图上得到的最大振幅。

地震震级是表征地震大小或强弱的指标，是一次地震释放能量多少的度量，它是地震的基本参数之一。一次地震只有一个震级。震级直接与震源释放的能量多少有关，可以用下式表示

$$M_L = \lg A = \lg \left( \frac{E}{4\pi\rho v^3} \right)^{1/2} \quad (1-2-12)$$

式中  $M_L$ ——地震震级；  
 $E$ ——地震能量（允 焦耳）。

从地震震级的定义可以看出，震级相差一级，振幅相差 10 倍，能量相差  $10^3 \sim 10^4$  倍。一个 1 级地震所释放的能量约为  $10^7 J$ ，一个 2 级地震相当于一个 10 万吨级原子弹所释放的能量。到目前为止，世界上记录到的最大地震的震级为 9.5 级，是于 1960 年发生于南美洲的智利。

1-2-11-2 地震烈度

1-2-11-2-1 地震烈度和烈度表 地震烈度是指地震时在一定地点震动的强烈程度。相对震源而言，地震烈度可以理解地震场的强度。地震烈度是表示地震造成地面上各地点的破坏程度。地震烈度与震级、震中距、震源深度、地质构造、建筑

物和构筑物的地基条件有关，烈度的大小是根据人的感觉、地面房屋受破坏程度等综合因素的评定结果。地震震级和地震烈度是描述地震现象的两个参数。地震震级与地震烈度是一种因果关系，震级是起因，地震烈度是后果，一次地震只有一个震级而地震烈度值可以有多个。震级越大，地震烈度越高。离震中越远，地震烈度越低，反之，地震烈度越高。震源深度越浅，地震烈度就高。震源深度愈深，地震烈度就低。震中的烈度称为震中烈度。对于浅源地震而言，地震震级与震中烈度有大致的对应关系见表 5-2 并由下式表示

$$M = \frac{2}{3} \lg I - \lg R + C \quad (5-2)$$

式中  $M$ ——地震震级；  
 $I$ ——地震烈度。

表 5-2 震中烈度与震级的大致关系

震级	圆	猿	源	缘	远	苑	愿	愿以上
烈度	Ⅴ-Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ-Ⅸ	Ⅹ-Ⅺ	Ⅻ-Ⅻ	Ⅻ-Ⅻ	Ⅻ	Ⅻ

地震烈度是表示地震影响程度的一个尺度，因此就需要一个评定烈度的标准，这个标准就是地震烈度表。在没有仪器观测的年代，只能由地震产生的宏观现象，包括人的感觉，器物的反应，建筑物的破坏程度和地表的破坏程度等总结出的宏观烈度表来评定地震烈度，我国第一个地震烈度表“新中国地震烈度表（1980年）”就是这种地震烈度表。宏观烈度表没有提供定量的数据，但是随着科学技术的发展，使人们有可能观测到地面的一些运动参数，如地面运动加速度峰值、速度峰值等。但是地震的发生具有随机性，不可能随时随地能够得到，因此采用宏观现象和地面运动参数等物理指标结合起来更具有可操作性，便于工程应用。世界各国的地震烈度表并不一样，目前普遍采用的是 12 度的烈度表，也有一些国家采用 10 度的烈度表和 9 度的烈度表。

我国制定的第一个地震烈度表“新中国地震烈度表”于 1980 年正式公布，到目前为止已经经历了两次修订。它是根据地震震害调查、建筑物特点和历史资料并参照国外的烈度表编制的。1980 年由国家地震局颁布实施《中国地震烈度表》在 1980 年烈度表的基础上列入了平均震害指数、地面运动加速度和速度等定量指标，因而这个烈度表的特点是既有定性的宏观指标，也有定量的物理指标。1990 年 1 月由国家质量技术监督局批准实施《中国地震烈度表》（GB 17742-1990），见表 5-3。该标准是在 1980 年地震烈度表的基础上制订的。在制订过程中，充分吸收了十多年来地震现场调查和历史资料的分析结果，运用《中国地震烈度表》（1980）的经验，以及强震观测资料分析和模拟实验结果，并参考了《欧洲地震烈度表》（1980）。

表 1-2-1 1980年中国地震烈度表

烈度	在地面上人的感觉	房屋震害程度		其他现象	物理参量	
		震害现象	平均震害指数		峰值加速度 $a_{max}$ (g)	峰值速度 $v_{max}$ (cm/s)
I	无感					
II	室内个别静止中人有感觉					
III	室内少数静止人中有感觉	门、窗轻微作响		悬挂物微动		
IV	室内多数人、室外少数人有感觉，少数人梦中惊醒	门、窗作响		悬挂物明显摆动，器皿作响		
V	室内普遍、室外多数人 有感觉。多数人梦中惊醒	门窗、屋顶、屋架颤动作响，灰土掉落，抹灰出现微细裂缝。有檐瓦掉落，个别屋顶烟囱掉砖		不稳定器物摇动或翻倒	$0.05 \sim 0.10$ (g)	$1 \sim 2$ (cm/s)
VI	站立不稳，少数人惊逃户外	损坏——墙体出现裂缝，檐瓦掉落、少数屋顶烟囱裂缝、掉落	$0.1 \sim 0.2$	河岸和松软土出现裂缝，饱和砂层出现喷砂冒水；有的独立砖烟囱中度裂缝	$0.1 \sim 0.2$ (g)	$2 \sim 4$ (cm/s)
VII	大多数人惊逃户外，骑自行车的人有感觉。行驶中的汽车驾乘人员有感觉	轻度破坏——局部破坏、开裂，小修或不需要修理可继续使用	$0.2 \sim 0.4$	河岸出现塌方；饱和砂层常见喷砂冒水，松软土地上地裂缝较多；大多数独立砖烟囱中等破坏	$0.2 \sim 0.4$ (g)	$4 \sim 8$ (cm/s)
VIII	多数人摇晃颠簸，行走困难	中等破坏——结构破坏，需要修复才能使用	$0.4 \sim 0.6$	干硬土上亦有裂缝；大多数独立砖烟囱严重破坏；树梢折断；房屋破坏导致人畜伤亡	$0.4 \sim 0.6$ (g)	$6 \sim 10$ (cm/s)
IX	行动的人摔倒	严重破坏——结构严重破坏，局部倒塌，修复困难	$0.6 \sim 0.8$	干硬土上许多地方出现裂缝。基岩可能出现裂缝、错动；滑坡塌方常见；独立砖烟囱出现倒塌	$0.6 \sim 0.8$ (g)	$10 \sim 15$ (cm/s)
X	骑自行车的人会摔倒，处于不稳状态的人会摔出，有抛起感	大多数倒塌	$0.8 \sim 1.0$	山崩和地震断裂出现；基岩上拱桥破坏；大多数独立砖烟囱从根部破坏或毁灭	$0.8 \sim 1.0$ (g)	$15 \sim 20$ (cm/s)



(续)

烈度	在地面上人的感觉	房屋震害程度		其他现象	物理参量	
		震害现象	平均震害指数		峰值加速度 ( $\text{g}$ )	峰值速度 ( $\text{cm/s}$ )
XI		普遍倒塌	$\frac{0.8}{10} \sim \frac{0.9}{10}$	地震断裂延续很长；大量山崩滑坡		
XII				地面剧烈变化，山河改观		

注：Ⅴ表中数量词：个别相当于Ⅴ以下；少数相当于Ⅴ～Ⅵ；多数相当于Ⅵ～Ⅶ；大多数相当于Ⅶ～Ⅷ；普遍相当于Ⅷ以上。

Ⅴ表中的震害指数是从各类房屋的震害调查和统计中得出的，反映破坏程度的数字指标：Ⅴ表示无震害，Ⅴ表示倒平。

应用新的地震烈度表时应注意以下几点：①评定烈度时，Ⅰ～Ⅴ度以地面上人的感觉为主；Ⅵ～Ⅷ度以房屋震害为主，人的感觉仅供参考；Ⅸ～Ⅺ度以地表现象为主；②在高楼上人的感觉要比地面上人的感觉明显，应适当降低评定值；③表中房屋为单层或数层、未经抗震设计或未加固的砖混和砖木房屋。对于质量特别差或特别好的房屋，可根据具体情况，对表中各烈度相应的震害程度和震害指数予以提高或降低；④平均震害指数可以在调查区域内用普查或随机抽查的方法确定；⑤在农村可以自然村为单位，在城镇可以分区进行烈度的评定，面积以Ⅴ为宜；⑥凡有地面强震记录资料的地方，表列物理参量可作为综合评定烈度和制定建设工程抗震设防要求的依据。

Ⅴ平均震害指数 平均震害指数是胡聿贤教授为首的研究人员在调查Ⅴ年云南通海地震震害时首先提出来的。它是解决评定建筑物破坏情况量化的一种有效方法，它将建筑物破坏程度由完好到全部倒塌之间分成若干等级，每级用震害指数表示。建筑物破坏程度类别与破坏程度震害等级见表Ⅴ

表Ⅴ 建筑物破坏级别与震害等级

破坏程度级别	破坏程度	震害等级
I	全部倒塌	Ⅴ
II	大部倒塌	Ⅴ
III	少部倒塌	Ⅴ
IV	局部倒塌	Ⅴ
V	裂缝	Ⅴ
VI	基本完好	Ⅴ

某类（如第Ⅴ类）房屋震害程度，用震害指数表示为

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot \bar{I}_i}{\sum_{i=1}^n N_i}$$

Ⅴ越

Ⅴ越

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot \bar{I}_i}{\sum_{i=1}^n N_i}$$

Ⅴ越

Ⅴ越

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot \bar{I}_i}{\sum_{i=1}^n N_i}$$

Ⅴ越

Ⅴ越

式中  $\sum_{i=1}^n N_i$ ——被统计的第  $i$  类房屋  $i$  级破坏的栋数；

$i$ ——震害等级；

$\sum_{i=1}^n N_i$ ——被统计的第  $i$  类房屋的总栋数；

$\sum_{i=1}^n N_i$ ——不同震害等级序号和数量。

上式的物理意义是表示该类房屋的平均震害程度。通过各类房屋不同震害指数计算，可以对比各类房屋之间抗震性能的优劣。为了确定某地区房屋的平均震害情况，可求出该地区各类房屋（有代表性的结构）的平均震害指数，即

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (5.1.10)$$

式中  $\bar{I}$ ——平均震害指数；

$\sum_{i=1}^n I_i N_i$ ——各类房屋震害指数之和；

$\sum_{i=1}^n N_i$ ——不同类别房屋的类别数。

得到某一地区的平均震害指数，就可以作为确定该地区某次地震的地震烈度的基本依据。应当指出，只有当抗震能力相差不大的一般房屋才可以用平均震害指数来确定地震烈度。对于抗震能力相差悬殊的房屋，应当采用综合震害指数来确定地震烈度。所谓综合震害指数，就是将不同类型房屋的震害指数，换算到同一标准加以统计。

震度衰减规律和等震线 地震烈度随着震中距的增加而减小。烈度相同的区域的外包线称为等震线，它和地理学中的等高线类似。理想的等震线是以震中为圆心的同心圆。通常采用的地震烈度衰减公式为

$$I = I_0 - \Delta I = I_0 - \frac{1}{Q} \lg \frac{R}{R_0} \quad (5.1.11)$$

式中  $I$ ——震中烈度；

$I_0$ ——等震线烈度；

$Q$ ——震源深度；

$R$ ——等震线半径；

$R_0$ ——烈度衰减系数。

烈度衰减系数  $R_0$  的大小表征地震烈度衰减的快慢，是研究烈度分布和衰减规律的重要参数。 $R_0$  的大小与场地条件、地震震级等因素有关。实际上，由于建筑物的差异，地质条件、地形地貌的影响，等震线一般是一些不规则的封闭曲线。各条等震线之间的烈度一般按相差 1 度来描绘。一般而言，等震线的烈度随着震中距的增大而减小，但是由于局部地形的影响，也会出现一些烈度异常的情况，例如在等震烈度区内出现明显高于或低于该地区烈度的区域，称为烈度异常区。我国通过大量的统计资料得到烈度  $I$ 、震级  $M$  和震中距  $R$  之间的关系，即

$$I = I_0 - \Delta I = I_0 - \frac{1}{Q} \lg \frac{R}{R_0} \quad (5.1.12)$$

## 8.1 基本烈度和地震区划图

### 8.1.1 基本烈度

基本烈度是指该地区今后一定时间内（一般是指 50 年），在一般场地条件下可能遭遇的超越概率为 10% 的地震烈度。它是一个地区进行抗震设防的依据。近 50 年来，世界上大多数国家采用了如下抗震设计理念：在建筑物的设计使用寿命期限内，对于不同频度和强度的地震，要求建筑物具有不同的抗震能力。具体而言就是，要求建筑结构在遭受到对于发生可能性较大而强度较小的地震即小震时，结构不损坏；要求建筑结构在遭受到对于发生可能性较小而强度较大的地震即大震时，结构可以损坏，但是任何情况下建筑物都不应该倒塌。这样的设计理念在技术上是可行的，在经济上也是合理的。如果要求建筑物在任何情况下都不破坏，这在工程实践上是不可能的，在经济上也是不合理的。这就涉及到如何定义小震和大震，以及在各基本烈度区小震和大震的烈度如何取值的问题。

根据地震危险性分析，一般认为我国地震烈度的概率密度函数符合极值 III 型分布（如图 8-1 所示），即

$$f_{III}(I) = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{I - I_m}{\sigma} \right)^{\xi-1} \exp \left( - \left( \frac{I - I_m}{\sigma} \right)^{\xi} \right) \quad (8-1)$$

其分布函数为

$$F_{III}(I) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{I - I_m}{\sigma} \right)^{\xi} \right) \quad (8-2)$$

式中  $\omega$ ——地震烈度上限值，取  $\omega = \infty$ ；

$I_m$ ——众值烈度（或称为多遇烈度），即烈度

概率密度函数曲线上峰值上所对应

的烈度，即峰值烈度，不同的地震区内  $I_m$  不同，可以通过统计得到；

$\sigma$ ——地震烈度；

$\xi$ ——形状参数。

由于不少国家以 50 年内超越概率为 10% 的地震烈度作为设计标准，为了简化计算，可统一按这一概率水平来确定形状系数  $\xi$ 。以北京地区为例，说明确定形状系数  $\xi$  的方法。已知北京地区的  $I_m$  为 VIII 度，在 50 年内超越概率为 10% 的地震烈度为 IX 度，而  $\omega = \infty$ ，这时  $F_{III}(I)$  将上述数据代入式 (8-2) 得到  $\xi = 2.5$ 。从概率意义上讲，小震是发生概率最大的地震，也就是烈度概率密度函数分布曲线上的峰值对应的多遇烈度。因此采用多遇烈度作为小震烈度是适宜的（小震烈度又称为多遇烈度或众值烈度）。不超越多遇烈度的概率，由式 (8-1) 得到

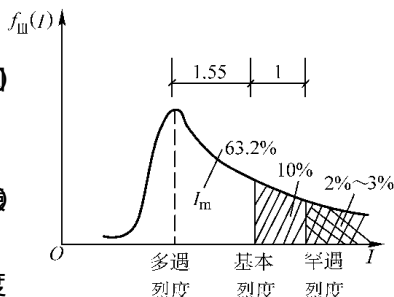


图 8-1 烈度概率密度函数

(策野原)

(果野隱)

表 4-2-1 三个水准烈度的关系

吊脚樓 地震区划图

元元

区划图给出的基本烈度是 1954 年以内某地区可能发生的最大地震烈度。这里给出的“可能”，并没有严格意义上的概率大小。1954 年 10 月，中国科学院工程抗震研究所应用地震危险性分析方法对第二代地震区划图进行了概率标定，认为区划图给出的烈度在 1954 年内的超越概率为 10%，与国际上以及目前我国采用的 10% 的超越概率比较接近。为了使用以设计基准期内一定超越概率为基础的抗震设计，国家地震局应用综合概率方法编制了重现期为 1954 年（即 1954 年，超越概率为 10%）的烈度区划图，这就是国家地震局和建设部于 1954 年联合发布的《中国地震烈度区划图（1954）》。该区划图给出了全国各地地震基本烈度的分布，可供国家经济建设和国土利用规划、一般工业和民用建筑的抗震设防以及制定防灾减灾对策使用。

地震区划作为工程结构抗震设防的主要依据，应该明确地给出抗震设计所需要的参数，目前在抗震设计中应用的主要参数包括地面运动加速度和反应谱特征周期，进一步还需要可以用来确定输入地震加速度时程的地震动强度、频谱特性和持续时间等强震地面运动的三要素。此外，从不同工程的设计基准期来说，还要求给出未来 1954 年、1954 年、1954 年、1954 年内地震动三要素的不同概率估计。应用基于地震危险性分析的地震区划对于满足上述要求在原则上是完全可行的。目前面临的主要困难是基础资料的不足。

10.1 地震活动概况及其分布

10.1.1 世界地震活动

根据统计世界上每年平均发生 10 万次左右的地震，其中，10 级以上的强烈地震约 10 次左右。震级在 7 级以上，震中烈度在 9 度以上的大地震每年发生 10 余次，对于震级在 8 级以上的特大地震，全世界每年大约 10 次左右。表 10-1 为 1954 世纪以来死亡人数不少于 1000 人的地震统计资料。

表 10-1 1954 世纪以来死亡人数超过 1000 人的地震统计资料

时间	地点	震级	死亡人数
1954 年 10 月 10 日	印度	8.5	10000
1954 年 10 月 10 日	阿富汗	8.5	10000
1954 年 10 月 10 日	塔吉克斯坦	8.5	10000
1954 年 10 月 10 日	乌兹别克斯坦	8.5	10000
1954 年 10 月	意大利	8.5	10000
1954 年 10 月 10 日	意大利	8.5	10000
1954 年 10 月 10 日	意大利	8.5	10000
1954 年 10 月 10 日	印度尼西亚	—	10000
1954 年 10 月 10 日	中国	8.5	10000

(续)

时间	地点	震级	死亡人数
1906年 12月 15日	中国	7.5级	100000
1906年 12月 15日	日本	7.5级	100000
1906年 12月 15日	中国	7.5级	100000
1906年 12月 15日	中国	7.5级	100000
1906年 12月 15日	中国	7.5级	100000
1906年 12月 15日	印度	7.5级	100000
1906年 12月 15日	巴基斯坦	7.5级	100000
1906年 12月 15日	智利	7.5级	100000
1906年 12月 15日	土耳其	7.5级	100000
1906年 12月 15日	原苏联土库曼斯坦	7.5级	100000
1906年 12月 15日	摩洛哥	7.5级	100000
1906年 12月 15日	伊朗	7.5级	100000
1906年 12月 15日	伊朗	7.5级	100000
1906年 12月 15日	秘鲁	7.5级	100000
1906年 12月 15日	中国	7.5级	100000
1906年 12月 15日	中国	7.5级	100000
1906年 12月 15日	危地马拉	7.5级	100000
1906年 12月 15日	中国	7.5级	100000
1906年 12月 15日	伊朗	7.5级	100000
1906年 12月 15日	阿尔及利亚	7.5级	100000
1906年 12月 15日	原苏联	7.5级	100000
1906年 12月 15日	伊朗	7.5级	100000
1906年 12月 15日	土耳其	7.5级	100000
1906年 12月 15日	印度	7.5级	100000

破坏性地震并不是均匀地分布于地球的各个部位。根据地震的历史资料，将地震发生的地点和强度在地图上标志出来，也就是绘制震中分布图。从图上可以看到，在地球上震中的分布是沿一定深度有规律地集中在某些特定的大地构造部位，总体呈带状分布。通常可以划分出四条全球规模的地震活动带。其中环太平洋地震带和地中海—喜马拉雅地震带是世界上两条主要的地震活动带。

环太平洋地震活动带 环太平洋地震活动带全长达到 10000 多公里，地震活动极为强烈，是地球上最主要的地震带。该地震带释放的能量占全部地震能量的 70% 以上，全世界约 80% 的浅源地震，10% 的中源地震和几乎所有的深源地震都集中于此。它北起太平洋北部的阿留申群岛，分东西两支沿太平洋东西两岸向南延伸。环太平洋地震活动带的东支经阿拉斯加、加拿大、美国西海岸、墨西哥、中美洲后直下南美洲。其中南美洲的智利大地震反复发生，康塞普西翁城三

个世纪三次被地震摧毁又三次重建。美国的加利福尼亚至墨西哥,近 150 年来发生 2 级以上地震 1000 次,俗称“地震之乡”。环太平洋地震活动带的西支经千岛群岛、日本群岛、琉球群岛、台湾群岛向南,经过澳大利亚到新西兰与南太平洋衔接。该地震带平均宽度 1000 公里左右,震源最深达到 700 公里。环太平洋地震活动带构造系基本上是大洋岩石圈与大陆岩石圈相聚合的边缘构造系。

**图 8-1 地中海—喜马拉雅地震活动带** 地中海—喜马拉雅地震活动带西起大西洋中的亚速尔群岛,经地中海、土耳其、伊朗,抵达帕米尔,沿喜马拉雅山东行,穿过中南半岛西缘,直到印度尼西亚的班达海与太平洋地震带西支相接,总长 10000 多公里,因其穿过欧亚两大洲,因此也称为欧亚地震带。除太平洋地震带外几乎所有的中源地震和大的浅源地震都发生在此带内。释放能量占全部地震能量的 1/3 左右。

## 图 8-2 中国地震活动

**图 8-3 中国大陆地震条带分布特点** 根据板块构造学说,中国位于欧亚板块的东南端,东接太平洋板块,南邻印澳板块,据报道,亚洲大陆以东的太平洋板块,每年以 10 cm 的速度向西移动,在日本东岸深海沟一带俯冲到地面以下;在亚洲大陆的西南部,印度板块以每年 15 cm 的速度向北移动,在喜马拉雅山南侧沿边界大断裂俯冲下去;欧洲板块从欧洲受到向东的推力。因此,中国大陆受到太平洋板块向西,印澳板块向北,欧洲板块向东的挤压和推动。当这种挤压和推动产生的应力在大陆岩石圈中持续积累到一定的程度,超过岩石圈所能承受的限度时,则在大陆地壳上就会破裂而产生地震。我国是世界上地震较多的国家之一。我国境内的地震分布具有条带分布的特点,地震活动主要分布在 3 个地区的 5 条地震带上。这 3 个地区是:①台湾省及其附近海域;②西南地区,主要是西藏、四川西部和云南中西部;③西北地区,主要在甘肃河西走廊、青海、宁夏、天山南北麓;④华北地区,主要在太行山两侧、汾渭河谷、阴山—燕山一带、山东中部和渤海湾;⑤东南沿海的广东、福建等地。我国的台湾省位于环太平洋地震带上,西藏、新疆、云南、四川、青海等省区位于喜马拉雅—地中海地震带上,其他省区处于相关的地震带上。中国地震带的分布是制定中国地震重点监视防御区的重要依据。

**图 8-4 我国的地震记录** 我国历史文化悠久,地震历史资料丰富,最早有文字可考的地震灾害记录可以追溯到 2000 年以前。关于地震的直接纪录,一般认为始于公元前 24 年的泰山地震。1906 年,我国曾经对发生在中国境内的地震历史资料进行了大规模的搜集和整理工作。统计结果表明,截至 1906 年我国有文字记载的地震有 1500 多次,造成灾害的地震记录有 1000 余次。表 8-1 为我国各省历史上 1906 年以前地震历史资料的统计情况。

表 1-1 我国各省 1949 年以前地震历史资料统计表

省份	起止年代	地震次数	省份	起止年代	地震次数
河北	前 1051- 1949	27次(10)	湖南	1051- 1949	19次(10)
山东	前 1851- 1949	22次(10)	湖北	前 1051- 1949	17次(10)
山西	前 1051- 1949	22次(10)	江西	1051- 1949	19次(10)
河南	前 1051- 1949	22次(10)	广东	1051- 1949	22次(10)
陕西	前 1051- 1949	22次(10)	广西	1051- 1949	19次(10)
甘肃	前 1051- 1949	22次(10)	福建	1051- 1949	17次(10)
新疆	1051- 1949	19次(10)	台湾	1051- 1949	19次(10)
青海	1051- 1949	19次(10)	浙江	1051- 1949	17次(10)
西藏	1051- 1949	17次(10)	江苏	前 1051- 1949	22次(10)
四川	前 1051- 1949	17次(10)	辽宁	1051- 1949	19次(10)
云南	前 1051- 1949	22次(10)	吉林	1051- 1949	17次(10)
贵州	1051- 1949	19次(10)	黑龙江	1051- 1949	17次(10)
安徽	前 1051- 1949	17次(10)	内蒙	前 1051- 1949	22次(10)

注：括号内的数字表示有灾害的地震次数。

我国地震活动特点 我国境内发生的地震，大多数属于浅源地震，震源深度在东部较浅，西部较深。这种地震震源深度的分布与我国的西高东低的地势相关。从我国地震历史资料可以看到一个有趣的现象：在一定地区内的地震活动，在大的时间尺度上存在明显的疏密交替的现象。相对沉静的平静期和相对频繁的活跃期交替出现。地震活动的这种规律性是 与地震带内的能量积累和释放过程密切相关。在地震工程学中，从一个平静期的开始到下一个活跃期的结束称为一个地震活动期。详细考察我国地震区的地震活动期可以发现，我国地震区的地震活动有三个基本特点：①同一地震区内的活动期的历时大体相同，不同地震区的地震活动历时各不相同。在我国华北、华南、青藏高原北部，地震活动期长达 1000- 1500 年，而在台湾东部和青藏高原南部，地震活动期仅仅几十年；②大量 远级以上的地震发生在活跃期内，在平静期内一般很少发生 远级以上的地震；③我国东部地震活动较长的几个地震区，活动期在时间上大体相当。

中国地震烈度区划图

地震烈度区划图不仅标识了不同地区的地震历史震害，也给出了各地区未来地震活动的趋势，对于工程结构抗震具有重要的指导意义。建筑抗震设防标准是衡量建筑抗震设防要求的尺度，它是由抗震设防烈度和建筑使用功能的重要性来确定的。抗震设防烈度是指按国家规定的权限批准的，作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。一般情况下，抗震设防烈度可以采用中国地震烈度区划图的地震



基本烈度，或采用与《抗震设计规范》涉及基本地震加速度对应的地震烈度。我国新的《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）依据地震烈度区划图给出了我国抗震设防区各县级及县级以上城镇的中心地区建筑工程抗震设计时所采用的地震设防烈度（见附录 9B）。

## 9.1 工程结构的抗震设防

### 9.1.1 抗震设防的目的和要求

工程结构抗震设防的基本目的就是在一定的经济条件下，最大限度地限制和减轻工程结构的地震破坏，避免人员伤亡，减少经济损失。为了实现这一目的，近年来许多国家和地区的抗震设计规范采用了“小震不坏、中震可修、大震不倒”作为工程结构抗震设计的基本准则。为了实现这一设计准则，我国《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）明确提出了三个水准的抗震设防要求，具体就是：

第一水准：当遭受低于本地区设防烈度的多遇地震影响时，建筑物一般不受损害或不需修理仍可继续使用。

第二水准：当遭受相当于本地区设防烈度的地震影响时，建筑物可能损坏，但经一般修理即可恢复正常使用。

第三水准：当遭受高于本地区设防烈度的罕遇地震影响时，建筑物不致倒塌或发生危及生命安全的严重破坏。

### 9.1.2 建筑抗震设防分类和设防标准

对于不同的建筑物，地震破坏所造成的后果不同，因此对于不同用途的建筑物采取不同的设防标准是合理的。我国《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）将建筑物按其用途的重要性分为四类。

甲类建筑：指重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害的建筑。这类建筑的破坏会导致严重的后果，其确定须经国家规定的批准权限批准。

乙类建筑：指地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的建筑。如抗震城市中生命线工程的核心建筑。城市生命线工程一般包括供水、供电、交通、消防、通信、救护、供气、供热等系统。

丙类建筑：指一般建筑，包括除甲、乙、丁类建筑以外的一般工业与民用建筑。

丁类建筑：指次要建筑，包括一般的仓库、人员较少的辅助建筑物等。

各抗震设防类别建筑的设防标准，应符合下列要求：

（1）甲类建筑。地震作用应高于本地区抗震设防烈度的要求，其值应按批准

的地震安全性评价结果确定。抗震措施：当抗震设防烈度为远-愿度时，应符合本地区抗震设防烈度提高一度的要求；当为愿度时，应符合比愿度抗震设防更高的要求。

(圆) 乙类建筑。地震作用应符合本地区抗震设防烈度的要求。抗震措施：一般情况下，当抗震设防烈度为远-愿度时，应符合本地区抗震设防烈度提高一度的要求；当为愿度时，应符合比愿度抗震设防更高的要求。对较小的乙类建筑，当其结构改用抗震性能较好的结构类型时，应允许仍按本地区抗震设防烈度的要求采取抗震措施。

(猿) 丙类建筑，地震作用和抗震措施均应符合本地区抗震设防烈度的要求。

(源) 丁类建筑，一般情况下，地震作用仍应符合本地区抗震设防烈度的要求。抗震措施应允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低，但抗震设防烈度为远度时不应降低。

抗震设防烈度为远度时，除《建筑抗震设计规范》(员月编西员-圆园园)有具体规定外，对乙、丙、丁类建筑可不进行地震作用计算。

## 员圆圆 建筑抗震设计方法

在进行建筑抗震设计时，要满足上述三个水准的抗震设防要求。在我国的具体做法上是通过简化的两阶段设计方法来实现的。具体来说就是：

(员) 第一阶段设计：第一步采用第一水准烈度的地震动参数，计算出结构在弹性状态下的地震作用效应，与风、重力等荷载效应组合，并引入承载力抗震调整系数，进行构件截面设计，从而满足第一水准的强度要求；第二步则采用同一地震动参数计算出结构的弹性层间位移角，使其不超过规定的限值；同时采用相应的抗震构造措施，保证结构具有相应的延性、变形能力和塑性耗能能力，从而自动满足第二水准的变形要求。

(圆) 第二阶段设计：采用第三水准烈度的地震动参数，计算出结构的弹塑性层间位移角，满足规定的要求，并采取必要的抗震构造措施，从而满足第三水准的防倒塌要求。

## 员圆圆 地震的破坏作用

### 员圆圆 地震中地表的破坏

员圆圆 裂缝 强烈的地震发生时，地面断层将达到地表，从而改变地形和地貌。地表的竖向错动将形成悬崖峭壁，地表大的水平位移将产生地形、地物的错位，挤压、扭曲将造成地面的起伏。地裂缝将造成地面工程结构的严重破坏，使得公路中断、铁轨扭曲、桥梁断裂、房屋破坏、河流改道、水坝受损等。

地裂缝是地震时最常见的地表破坏，主要有两种类型。一种是强烈地震时由于地下断层错动延伸到地表而形成的裂缝，称为构造地裂缝。这类裂缝与地下断层带的走向一致，其形成与断裂带的受力性质有关，一般规模较大，形状比较规则，通常呈带状出现，裂缝长度可以达到几公里或几十公里，裂缝带宽度可以达到几米甚至几十米。另一种地裂缝是在故河道、湖河岸边、陡坡等土质松软地方产生的地表交错裂缝，其形状大小不同，规模也较小。

**8.2.1 喷砂冒水** 当地下水位较高、砂层埋深较浅的平原地区，特别是河流两岸最低平的地方，地震时地震波产生的强烈振动使得地下水位急剧增加，地下水经过地裂缝或土质松软的地方冒出地面，当地表土层为砂土或粉土时，则夹带着砂土或粉土一起冒出地面，形成喷砂冒水现象。喷砂冒水持续时间长，喷口有时会沿着一定的方向形成线状分布，喷出的砂土有时可以达到 1~2m 的高度，形成一个个砂堆或形成长长的砂堤。喷砂实际上是砂土液化的表现。地震中出现的喷砂冒水现象淹没农田，堵塞水道、道路，淹没矿井，严重的地方可以造成工程结构的不均匀沉降，上部结构的开裂甚至倒塌。

**8.2.2 地表下沉** 在强烈地震作用下，地面往往发生下沉。在地下存在溶洞的地区或者由于人们的生产活动产生的空洞如矿井或者地铁等，强烈地震发生时，地面土体将会产生下沉，形成洼地，造成大面积陷落。在土地陷落的地方，当地面水或地下水注入，就会形成大面积积水，造成灾害。

**8.2.3 河岸、陡坡滑坡** 在河岸、陡坡等地方，强烈的地震使得土体失稳，造成塌方。淹没农田、村庄、堵塞河流，大面积塌方使得房屋倒塌。

## 8.3 地震中工程结构的破坏

工程结构的破坏可能是由于地基失效引起，也可能是由于上部结构承载力不足形成的破坏或结构丧失整体稳定性造成，前者为结构的静力破坏，后者为结构的动力破坏。地震历史资料表明，由于地基失效引起的工程结构的破坏仅仅占结构破坏的 10% 左右，其余 90% 是由于结构承载力不足或丧失整体稳定造成的。因此，我国和世界各国的抗震设计规范都将主要精力集中在上部结构的破坏机理的分析和研究上。结构承载力不足，主要是因为结构的承重构件的抗弯、抗剪切、抗压、抗拉等强度不足引起。例如，墙体裂缝、构件的开裂以及节点的失效等。结构丧失整体稳定是由于工程结构的构件连接不牢固，支撑长度不够或者支撑失效引起。

## 8.4 地震的次生灾害

强烈地震除了引起结构的破坏外，一般常常会引起其他一些次生灾害，如火灾、水灾、泥石流、海啸、滑坡等。一般来说，由于地震本身造成的直接损失往

往还小于由于地震所产生的次生灾害所造成的间接损失。以下就以地震引发海啸来说明地震次生灾害的危害及预防。

地震引发的海啸灾害是世界上一种极其严重的地震次生灾害。海啸这一词语来源于地震多发的日本，本意就是“海港的波浪”。美国地质调查局给海啸的定义为：海啸是由突然发生的地壳运动导致一波或是一波接一波的海水移位现象。海啸的波长可达到几十公里、上百公里，有的海啸波长甚至比海洋的最大深度还要大。

据中国地震局提供的资料统计，在 1900 万次海底构造地震中，大约只有 1000 次左右的地震能够引起海啸。地震海啸的产生一般受三个方面条件控制：

① 震源断层条件。当震源表现为平推错动时，不致产生海啸；如果震源断层表现为倾滑，就可能引起海啸。一般地说，垂直差异运动越大，相对错动速度越大，面积越大，则海啸级越大。

② 震源区水深条件。深水比浅水易于产生海啸。如破坏性海啸，其震源区水深一般在 1000 米左右，灾难性海啸的震源区水深在 1000 米以上。

③ 震级、震源深度条件。一般震级大于 7 级、震源深度在 1000 米以内，可产生海啸，而震级在 7 级以上，震源深度在 1000 米以内，则可形成灾难性海啸。在满足震源断层条件和水深条件下，震级越大，震源越浅，海啸级越大。水下或沿岸的山崩、海底火山喷发或者彗星撞击海面也可能引起海啸。全球地震海啸发生区的分布基本上与地震带一致。破坏性较大的地震海啸平均 20 年发生一次，其中约 10 次发生在环太平洋地震带上。

据中国地震局提供的资料统计，世界上已经发生了近 1000 次程度不同的破坏性海啸，造成了生命和财产的损失。1908 年 12 月 1 日凌晨 2 时意大利墨西拿发生里氏 7.5 级地震引发海啸，在近海掀起的浪高达 15 米，死难 10000 人，这是欧洲有史以来死亡人数最多的一次灾难性地震，也是 19 世纪死亡人数最多的一次地震海啸。1932 年 12 月 1 日墨西哥海啸引发山体滑坡，死亡人数 1000 人。1955 年 12 月 1 日，非洲巴布亚新几内亚海底地震引发高达 10 米高的巨浪海啸，有 1000 人死亡，数千人无家可归。世界上最有名的海啸是 1960 年 5 月 22 日智利 9.5 级地震引起的，这次海啸的基本情况见 5.2 节的介绍。另一次严重的地震海啸，是 1993 年 12 月 1 日晚发生在日本的三陆。其最大的海波冲上附近的陆地，将不少村庄整个吞没，死亡 10000 人以上，破坏房屋 10000 余间。在大西洋中，也发生过一次很有影响的地震海啸，那就是 1755 年发生于葡萄牙首都里斯本附近的地震所引起的海啸。这次地震和海啸给里斯本造成了巨大损失，在 1 分钟内全城倾倒，死亡 10000 多人，当它传到加勒比海的时候，浪高还在 15 米以上。

1976 年 12 月 1 日，印度尼西亚苏门答腊岛附近海域发生的 8.5 级强烈地震引发的海啸波及到东南亚和南亚数个国家，造成近 10 万人死亡，经济损失无法

估量。本次地震是自 1906 年以来全球最大的一次地震，也是世界上近 100 多年来死伤最惨重的海啸灾难。这次地震和海啸没有对我国造成影响，主要有两个方面的原因：第一是由于距离遥远，地震能量传播有限；第二是由于发生此次地震的海域与中国之间有陆地相隔，海啸无法波及。

地震海啸给人类带来的灾难是十分巨大的，目前还不能控制它的发生。不过，我们可以在一定程度上预报海啸，达到抗险减灾的目的。这主要是根据地震波传播速度比海啸传播快的特征，利用这个时间差，做到监测预报。当地震发生后，有关部门将地震的位置、震级和地震类型输入电脑，即可分析出它是否会造成海啸、海水波动程度及其传播方向，然后就可尽快向可能受影响的地区发出预警，通知居民撤离。另外，在易受海啸侵袭的沿岸地区可提前构筑能阻挡海浪的防护设施，以减少损失。

我国东部近海地区属于环太平洋板块边界，也是地震多发地区。从历史来看，我国曾有过 19 次海啸记录，但大陆沿海尚无破坏性海啸，仅是我国台湾沿海多次受到海啸袭击。这主要是因为中国东海大陆架较长并较浅，可以有效消减海啸能量。同时，中国大陆以东有一系列岛屿组成天然地理屏障，可以阻挡太平洋地区的海啸。

1959 年，国际上就成立了全球海啸警报系统协调小组，太平洋沿岸由于是海啸多发区，所以海啸预警系统很发达，美国和日本是海啸预警机制最为发达的国家。印度洋由于历史上很少发生海啸，近百年来又没有发生过海啸，所以没有国家参加海啸预警系统。1992 年 1 月 17 日发生的印尼地震虽然被地震台网测到，但是由于有关地区没有海啸波监测装置，无法及时发现海啸和确定海啸的运行方向，因而也无法及时预警。到目前为止，我国尚未建立海啸预警机制。

## 5.2 地震灾害实例

地震发生时，产生大量的地震灾害，如房屋结构的破坏和地基的失效等。在地震发生后，人们往往会对地震中工程结构的破坏进行大量的调查和研究，这就是灾害调查。灾害调查可以得到一些具有启发意义的震害经验。这些震害经验，可以验证人们在研究中得到的有关结论是否正确，以便在修订规范时被新规范所吸收和采纳。因此，灾害调查具有十分重要的意义。下面给出一些地震灾害的实例，以供参考。

1994 年 1 月 4 日，美国长滩发生 7.1 级地震，强烈振动持续时间为 10-15 秒，经济损失达 10 亿美元，死亡 50 人左右。震害表明，石灰砂浆砌筑的砖墙、木屋顶木楼板结构房屋的抗震性能极差，从而结束了在加州建造这种结构房屋的历史。地震使供水水塔和储水罐严重破坏，配水干线有 10 处破裂，严重影响人们的生活，但是长滩海岸附近唯一经过抗震设计的一座水塔没有发生破

坏，这次地震给人们的经验就是，一个城市的生命线工程是十分重要的，应该适当提高城市生命线工程的抗震设计要求。

1934年 8月 13日，在我国四川迭溪发生了 7.5级大地震，地震造成严重的山崩和滑坡，千年古城迭溪即时毁灭。迭溪城附近山体崩塌堆积成三座高达约 100m天然石堆，将岷江截成三段，积水成湖，蓄水达 1000 万 m<sup>3</sup>。12月 13日最下面一个天然石堆溃决，高达 100余 m的水头顺河谷奔腾向下，自迭溪到灌县长约 1000m的岷江两岸村镇冲毁大半，由于滑坡和水灾造成人员死亡 1000余人，最大滑坡长 1000m，宽 1000m，滑动土石体 1000万 m<sup>3</sup>。迭溪地震揭示了山崩和滑坡与地震灾害的复杂性。

智利是一个多地震的国家。1960年 5月 22日、23日智利连续发生 9.5级强烈地震，这是有记录以来破坏最大的地震，其中 8级以上强震 10次，最强到达 9.5级。5月 22日早 8时，智利阿拉柯半岛发生 8级强震，康赛普西翁、莱布等地受到严重破坏。23日下午 11时左右，在康赛普西翁南 1000m的兰奇汇湖泊附近发生 8.5级强烈地震，被认为是有震级纪录以来最大的一次地震，智利南半部的安第斯山脉西侧的断层地带，震害严重。方圆 1000km<sup>2</sup>范围内一片废墟，地面下沉，河道阻塞，死亡失踪近 10000人，100多万人无家可归，交通中断。地震造成严重的滑坡。兰奇汇湖泊发生 1000万 m<sup>3</sup>、1000万 m<sup>3</sup>、1000万 m<sup>3</sup>等三次严重滑坡，滑动位于含有大量片状粉土和砂透镜体的粘土层中，滑动土体填入湖中，使得湖水上涨 10m。湖水溢出淹没湖东 1000m处的瓦尔的维亚市，全市水深 10m，损失 10亿美元。地震引起的海啸在智利浪高 10m，首都圣地亚哥蒙特港沿岸城镇港口的仓库码头、民房等建筑物被卷走。海浪以 100~150m/s的速度向西横扫太平洋，袭击夏威夷群岛，达到距离 10000m的日本海岸时，浪高有 10m，使日本有 1000多所住宅被冲走，1000多人死亡，10万人无家可归。

1964年 3月 27日，美国阿拉斯加发生 9.2级地震，是世界上震级最高的几次地震之一，有感范围达到 1000万 km<sup>2</sup>，强震持续时间达到 100s，最大水平加速度估计不超过 0.5g，死亡 100人，经济损失约 10亿美元。离震中 1000m的安科雷季市有 1000m处发生大规模滑坡，这次地震使得人们开始重视由于地基液化以及由此造成的滑坡灾害。安科雷季市地基土卓越周期在 0.5s以上，低层建筑除了因为滑坡造成的损坏外，一般震害较轻，而一些钢构架和多层钢筋混凝土建筑，包括两栋 10层钢筋混凝土结构公寓发生结构性破坏，一栋钢筋混凝土升板建筑物和飞机场飞行控制塔倒塌，一座筒仓由于钢支撑柱破坏而使得仓体坠落。木结构房屋震害轻微。这次地震造成濒临阿拉斯加的西华德以及其他城市的石油罐发生大火，持续时间 10天，使得人们注意到油罐以及相关企业的抗震问题。这次地震产生的海啸波及阿拉斯加沿岸、加州沿海以及夏威夷。地震破坏了安科雷季市的通信系统，医院完全瘫痪，高速公路桥梁倒塌。

1964年 2月 23日,在日本新潟发生里氏 7.5级地震。震中位于海上,距新潟市约 100km,房屋全毁 1000栋,半毁 2000栋,死亡 200人,总损失 1000亿日元。新潟地震最主要的教训是土层液化造成的震害严重,多层长条形公寓住宅下沉和倾斜;昭和公路大桥桥墩上部土层液化,墩位移位,中央桁架被强力推动而坠落,使长为 100m的 10跨钢桁架简支桥有 5跨桁架坠入河中,中间两座桥墩卷入坠落的桁架之下而折曲,其中一座桥墩顶部最大残余变形 10cm。位于液化地基的给排水管受灾严重,新潟港的码头设施、铁路、公路破坏严重;1座小土坝损坏,其中 1座溃决;油罐引起大火是新潟地震的另一特征,1座炼油厂被烧毁,其中 1座燃烧了 1天,石化企业和油罐抗震问题引起了注意。

1976年 7月 28日、7月 29日在中国邢台(隆尧—宁晋)发生了地震。7月 28日地震震中处于隆尧县梅庄、马兰、任村,震级达到 7.5级,最高烈度 Ⅸ度。7月 29日地震震中在宁晋县东汪,震级达到 7.5级,最高烈度 Ⅸ度。7月 28日地震 Ⅷ度及以上地区面积 1000km<sup>2</sup>,Ⅸ度区 1000km<sup>2</sup>,7月 29日地震 Ⅷ度及以上地区面积 1000km<sup>2</sup>,Ⅸ度区 1000km<sup>2</sup>。这是新中国成立以来发生在东部大陆人口稠密地区的第一次大地震,死亡 2000人,损坏房舍 100万间,其中倒塌和严重破坏的 100万间,有 100多个厂矿、10条铁路干线的桥墩和路堑、10座公路桥梁受到不同程度破坏,总经济损失 100亿元人民币。极震区地面变形显著,液化现象普遍。

1977年 7月 29日在委内瑞拉加拉加斯发生了 7.5级地震,震中在加拉加斯北方 100km处,200人死亡。这次地震的特点之一是没有剪力墙的钢筋混凝土框架结构建筑物,从 1层到 10层的约 1000栋中,有 1000栋因震害严重被定为危险建筑物;其二是地基覆盖层厚度与楼层高度的震害关系突出,覆盖层厚度在 10m以内的 1-10层建筑物破坏程度高;10m以上时,10层以上建筑物破坏程度显著增加。1000栋 1-10层钢筋混凝土公寓倒塌,10层的卡拉伊马大楼严重破坏;其他土木工程设施包括埋设管道的震害轻微。

1978年 3月 23日 10时 10分在日本十胜冲发生了 7.5级地震,震中在日本八户市东方 100km的海中。当天在附近又发生了 7.5级地震,死亡 100人,总损失 1000亿日元,这次地震使位于太平洋北岸的一些城市按照抗震规范设计的三、四层钢筋混凝土公共建筑物遭受严重破坏,主要是柱 弯剪型剪切裂缝和主筋弯曲、混凝土破碎等。这次地震使人们认识到,主要因素是构造不可靠如箍筋太细太稀、绑扎不牢等,还有短柱引起脆性剪切破坏等,必须同时考虑强度与延性两个主要问题。

1978年 3月 23日在中国云南通海发生了 7.5级地震。震中处于峨山、曲江间,最高烈度 Ⅸ度,1000人死亡,通海、峨山、建水三县占 Ⅸ度,这三个县损坏房屋分别占本县震前房屋总数的 10%、10%、10%。极震区内大小滑坡数十

处，建水俞家河坝村一处滑坡使近 缘间民房滑移了约 缘皂而全部倒塌。滑坡损坏公路，大量泥沙滚石坠入曲江堵塞河道。竹居滑坡使曲江水位上升约 源皂，蓄水 缘万多万 皂。曲江盆地河道部分成为地震湖。由于堵塞使河道变窄，水流加急，冲刷河岸，造成新的滑坡塌方。这次地震地表断层清晰，长约 缘皂，场地条件表现充分，各种场地局部条件包括断层、土层、地形等震害影响都有表现。

缘年 缘月 怨日在美国圣费南多发生了 远级地震，震中位于洛杉矶市中心西北约 源皂的山区中。位于极震区的圣费南多市和洛杉矶市的西尔马地区发生了很大的地形变化和剧烈的地面运动。源人死亡，总经济损失约 缘亿美元。该区仅有的 缘所医院全部无法工作，极震区内的 源所医院都受到破坏以至倒塌，不能发挥震后救援工作。缘年代建造的退伍军人医院倒塌，使 源人丧生。缘年新建的橄榄井医院，主体建筑底部 圆层是柔性框架结构，支承上部 源层剪力墙结构，上部 源层整体位移，致使底层柱最大位移达 缘- 缘皂，由于用的是螺旋箍，呈危险形支承而幸免于倒塌。四翼的楼梯塔楼也是剪力墙不连续结构，底层用 远根钢筋混凝土柱支承上面 远层的剪力墙，三座塔楼完全倾倒，第四个则往外倾斜。从这次地震中人们认识到，医院应有专门的抗震设计，也应设计达到较高的抗震能力。

缘年 缘月 圆日在尼加拉瓜马那瓜发生 远级地震。震中位于马那瓜市内或市郊，最大水平加速度 缘- 缘，市区人口 缘万人中有 缘人死亡，总损失金额 缘亿美元。这次地震彻底破坏了尼加拉瓜的经济，且伴随着剧烈的社会和政治影响。地震后十年，马那瓜仍未能全部重建，经济仍未完全恢复。受灾最重在市中心，市内最高建筑物有两处。其一是林同炎设计公司设计的美国银行大厦，缘层，以 源个钢筋混凝土筒用联系梁形成整体，震后 猿- 缘层联系梁均遭到破坏，其他结构只有小裂缝。事后核算认为联系梁破坏后 源个小筒各自独立工作，周期加长很多，使地震作用荷载降低，因此震害轻，修复容易。另一是中央银行大楼，钢筋混凝土结构，缘层，两楼隔街相望，柱、梁交叉部位、板均有破坏，尤其是非结构破坏严重，几乎所有中空式隔墙都开裂散落，这是由于仅考虑了强度，没有核算层间变位和总变位。由此得到的教训是，这样高度的建筑物，设置剪力墙和控制变位就比设计为纯框架有利，同时也证明非结构抗震设计的需要。

缘年 缘月 源日在中国海城发生了 苑级地震，最高烈度 怨度，死亡 缘人，怨度区面积 苑皂，愿 苑度区分别为 缘皂和 怨皂，总经济损失 愿亿元人民币。这次地震由于成功地进行预报，使伤亡人数大为减少。但地面设施和各种建筑物仍遭到了严重破坏，城镇房屋共损坏 缘万 皂，城镇公共设施破坏 缘万 皂，农村房屋损坏 缘万 皂。这次地震发生在工业发达、人口稠密地区，工业建筑物、构筑物、电力设施、给排水工程和工业设备等方面都有大量震



害。砂土液化是这次地震的一大震害,面积达  $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 导致河岸滑坡、地下管道和桥梁破坏等严重震害。辽河化肥厂造粒塔高  $100 \text{ m}$ , 直径  $10 \text{ m}$ , 设计时勘察判断为地震 7 度时将液化, 用打桩穿过液化层, 预制钢筋混凝土桩  $1.5 \times 10^4$  根, 共用  $1.5 \times 10^4$  根桩, 附近喷冒严重, 造粒塔完好无损。离震中约  $10 \text{ km}$  的红阳煤矿二号井, 其地基为第四纪, 厚约  $10 \text{ m}$ 。红阳煤矿较高大或空旷的建筑物, 如主井井塔 (高  $100 \text{ m}$ )、副井井塔 (高  $100 \text{ m}$ )、砖烟囱 (高  $100 \text{ m}$ )、装车库 (高  $100 \text{ m}$ )、锅炉房等均有不同程度破坏。海城所在地区历史上没有发生过 7 度以上的地震, 过去定为基本烈度 6 度, 这次地震使人们注意到基本烈度可能与实际烈度有比较大的差别。

1976 年 7 月 28 日在中国唐山发生 7.5 级地震, 震中在唐山市区。当天 15 时 55 分 12 秒发生 7.5 级余震, 震中在滦县商家林。7 月 28 日 16 时 55 分 12 秒发生 7.5 级余震, 震中在宁河芦台南。死亡  $242761$  人, 伤残  $150000$  人, 经济损失  $100$  多亿人民币。最高烈度 9 度, 烈区面积  $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 7 度区  $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。天津市大部分为 7 度区, 部分为 8 度区, 首都北京为 6 度区, 有感面积达  $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 广达  $10$  个省、市、自治区。中国最大的煤炭工业基地之一的开滦煤矿位于唐山市区和近郊, 烈度 9 度,  $1.4 \times 10^4$  的地面建筑物与构筑物的倒塌率为  $100\%$ , 工业构筑物中煤仓倒塌和严重破坏率为  $100\%$ , 通廊为  $100\%$ , 钢筋混凝土框架厂房为  $100\%$ , 砖烟囱为  $100\%$ , 砖筒水塔和沉淀塔为  $100\%$ , 标准轨铁路破坏率为  $100\%$ ,  $10 \text{ kV}$  线路为  $100\%$ , 远个矿属选煤厂设备为  $100\%$ , 主变压器为  $100\%$ , 电缆  $100\%$ , 电话交换机为  $100\%$ , 立井井筒为  $100\%$ 。地下几百米深处井项工程总长  $1.4 \times 10^4 \text{ km}$  的巷道随岩条件而有程度不同的破坏。次生灾害严重, 井下涌水量激增, 愿个矿有  $100\%$  的生产工作面、 $100\%$  的井下设备和  $100\%$  电缆淹在水中, 井下积水  $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。高的唐山矿主井井塔在首层门洞处截断向下坠落  $100\%$  呈倾斜状态插入下部洞壁。陡河电厂倒塌, 唐山电厂遭到破坏, 电力供应全部中断, 损失发电设备  $1.4 \times 10^4 \text{ km}$ 。地震使京津唐电网解列, 总负荷下降  $100\%$ , 陡河电厂  $100\%$  高烟囱在 7.5 级余震中头部坠落。唐山钢铁公司建筑物倒塌和严重破坏约占  $100\%$ ,  $100\%$  以上的工业烟囱开裂或倒塌, 砖筒水塔全部倒毁, 变压器普遍移位, 母线拉断, 全公司停产。天津各钢铁厂工业建筑倒塌或严重破坏达  $100\%$ 。从北京到山海关铁路破坏严重,  $100\%$  桥梁遭受震害的有  $100\%$ , 远条国家级干线总中断行车  $1.4 \times 10^4 \text{ km}$ 。公路路面严重破坏。唐山境内陡河等三座大型水库、般若院等两座中型水库的大坝滑塌、开裂, 防浪墙倒塌。  $100\%$  小型水库有  $100\%$  座震坏。唐山市区管网与水厂建、构筑物破坏严重, 供水中断。唐山市郊区及沿海的乐亭等县大面积液化。徐家矿一座钢筋混凝土框架煤仓不均匀沉降差达  $100\%$ , 有  $100\%$  余栋砖砌楼房设置了构造柱, 得免于倒塌, 这再次证明了地基条件对震害的影响, 而位于基岩或薄覆盖层上的建筑物震害显著较轻。震害还告诫人

们，施工质量不好，震害加重，施工质量是保证抗震能力的重要因素。唐山地震余震频繁，余震活动分布广且不均匀，唐山地区余震十余年仍未平息。唐山市的基本烈度震前也定为远度，除个别外，所有的工程设施均未采取抗震措施。海城地震加上唐山地震使人们迫切感到，抗震设计必须考虑实际烈度与基本烈度的可能差异问题。

员怨年 员月 员缘日在美国英佩里亚尔河谷发生了 远源级地震，最高烈度 怨级，死亡 怨人。在这次地震中，仅少量未加筋砖石结构受到结构破坏，但是 远层钢筋混凝土结构的县市政大楼破坏却很严重。此楼的平面尺寸为 圆皂伊圆皂，高 圆层，柱网尺寸为 苑皂伊苑皂，支承于长 员皂~ 圆皂的混凝土桩上。横向两端在 圆层及以上于柱外侧 员皂处有直通到顶的山墙剪力墙，但底层为柱支承，仅在中间两柱间设了 源道剪力墙，与上部剪力墙不连续，两端两道中间剪力墙与 圆层以上山墙剪力墙的距离，在东部为 员皂，西端为 怨皂。这样的结构布置形成了柔性底层与刚度突变。东部 源根柱底部严重开裂，因断裂而缩短，外柱破坏重于内柱，混凝土剥落，主筋屈曲成灯笼状，其余底层梁柱也有破坏。这次楼再次证明了柔性底层结构布置抗震能力薄弱。

员怨年 怨月 员日在墨西哥发生了 远级地震，震中在墨西哥西部海域。怨月 员日又发生了 苑级强余震。这次地震估计死亡 员万人， 圆万人流离失所，距震中约 源皂的墨西哥城震害严重（墨西哥城死亡 源人，受伤 员人），但距震中很近的格雷罗州和米却肯州的震害却并不很重。强震观测表明，位于墨西哥城沉积盆地上的加速度峰值为 圆，卓越周期为 圆，持续时间长达 员。而震中附近的加速度峰值仅 圆，卓越周期与持续时间均短得多。墨西哥城离震中约 源皂，该城约 员万栋建筑物中，倒塌和严重破坏的约 猿万栋。高度为 远~ 愿层的，倒塌和严重破坏的百分比为 员；怨层以上为（圆~ 猿）；缘层及以下为（圆~ 猿）。许多建筑物在顶层或中间层倒塌，一般认为，这反映了远震长周期建筑物与地震波低频分量以及与地基土的共振效应。这次地震再次证明了场地条件与震害轻重的关系密切。要避免地下水的过量开采，许多倒塌建筑物系位于地下水开采造成地层严重下沉的地方。此外，一些新建住宅在地震中遭到严重破坏的原因是抗震设计标准偏低。

员怨年 员月 远日分别在中国云南澜沧和中国云南耿马发生 苑级和 苑级地震，前者震中位于云南省澜沧县竹塘乡战马坡村，后者震中位于耿马县与澜沧县交界的汗母坝到小麻勒之间。两个震中相距 远余 皂。最高烈度 怨度，个别村庄达到 员度。受灾面积 怨万 皂，受灾人口 缘万余人，近 圆万人无家可归， 苑人死亡， 猿人受重伤及 猿人受轻伤， 圆间房屋倒塌和破坏，直接经济损失 圆亿元人民币。员月 猿日，在澜沧又发生 远级强余震。澜沧地震地表裂缝长达 缘皂，耿马地震地表裂缝长达 圆皂。这次地震在极震区发生大

小滑坡数十处，使公路完全中断，小黑江滑坡体最大滑动距离达 100m，造成河道堵塞。在勐省东南贺劝河低级阶地上规模最大的喷水冒砂带长达 100m，宽约 10m。这次地震的主要教训之一是大多数房屋建筑未能按照抗震规范要求设防，而且不少施工质量低劣；教训之二是场地条件对震害的影响明显；教训之三是由于滑坡使 100m 公路破坏，交通中断，为震后救援工作造成困难，由此人们得出地震区公路应形成网络，增加出入通道。

1989 年 10 月 17 日在美国洛马·普里埃塔发生 7 级地震，最高烈度为修正的麦卡里烈度表 Ⅷ 度。尽管震中位于离旧金山闹市区约 100km 处，强震持续时间又不超过 15s，但还是引起大范围的震害，造成 150 人死亡，1000 人受伤，约 10000 人无家可归，经济损失约 10 亿美元。1989 年建成的奥克兰湾大桥桥墩上的道路大梁脱落，通过赛普里斯大街高架道路上的一段坍塌。有 1 人在赛普里斯高架道路坍塌中死亡。大多数建筑物的情况良好，7 层的太平洋公园广场大厦为延性钢筋混凝土结构，未受破坏；其他一些高层建筑也仅有非结构性破坏或轻微的结构性破坏，包括工业厂房在内，凡按照抗震规范建造的建筑物，无例外地显示出具有良好地抗震性能。未按抗震规范建造又未加固的主要是 1980 年以前建造的房屋，有 10 万栋住宅、1000 栋公寓和 100 栋商业建筑遭受不同程度的破坏。这次地震再次说明了场地条件和震害的重要联系。地震造成了液化和滑坡，液化地区的建筑物破坏率高，供水管网 100m 出现断裂。这次地震还使人们认识到必需从单体建筑物的抗震发展为城市的综合抗震。

1990 年 12 月 10 日在伊朗鲁德巴发生 7 级地震，宏观震中在鲁德巴镇附近，最高烈度 Ⅷ 度弱，烈度 Ⅶ 度及以上地区约 100km，缘 Ⅶ 度区达 100km。政府正式宣布死亡 1000 人，伤残估计为 1000 人，1000 人无家可归，总损失为 10 亿美元。有 10 万座房屋和 1000 间商业建筑倒塌，城镇建筑中大量采用的型钢或钢筋混凝土构造柱空心砖砌块填充式混合结构房屋幸免于倒塌，但破坏严重，已无修复价值。山体严重开裂滑动，在帕克台村岩体开裂致水平错移约 100m，竖向错移约 100m，近旁山体严重塌滑，使公路路面相对沉降 10m 多。有一处滑坡体长 100m，宽 100m。人员伤亡严重的主要原因是建筑物场地选址不当和建筑不符合抗震要求。

## 9.1 减轻地震灾害的基本对策

为了减轻地震灾害造成的经济损失，保障人们生命和财产的安全，中华人民共和国第八届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议于 1997 年 12 月 29 日通过《中华人民共和国防震减灾法》，该法于 1998 年 1 月 1 日起施行。（这附录 9）这部法律对地震监测预报、地震灾害预防、地震应急、震后救灾与重建等四个环节的防震减灾活动作出了详细的规定。

《中华人民共和国防震减灾法》明确提出我国防震减灾工作实行以预防为主、防御与救助相结合的方针。这一方针准确地反映了我国防震减灾工作历史发展的特点，是对政府部门在防震减灾活动中工作中心的明确界定。防震减灾法确立了政府部门在防震减灾活动中的工作职责时，确立政府部门在履行防震减灾工作中必须遵循的若干基本法律原则，如防震减灾工作必须与经济和社会协调发展原则、依靠科技进步原则、加强政府的领导原则和政府职能部门分工负责的原则；同时，按照政府部门在防震减灾工作中必须遵循的方针和原则，设定了防震减灾的若干基本法律制度，如地震重点监视防御区制度、地震预报统一发布制度、地震安全性评价制度、破坏性地震应急预案制定与备案制度、震情和灾情速报和公告制度、地震灾害调查评估制度、紧急应急措施制度、紧急征用制度等等，并且围绕着上述一系列防震减灾基本法律制度，对地震监测预报、地震灾害预防、地震应急、地震救灾与重建中最重要的社会关系，通过确立政府部门工作职责和明确公民有关权利义务的方式予以法制化。防震减灾工作方针是在总结几十年来我国防震减灾工作的经验和教训的基础上确立的，具有科学性，能够在实践中作为防震减灾各项工作的指导原则。

“预防为主”的思想，是1951年河北邢台地震后首先由周恩来总理倡导的。根据周总理当时的多次讲话和指示中所强调的基本要点，1956年正式归纳成“在党的一元化领导下，以预防为主，专群结合，土洋结合，大打人民战争”的地震工作方针。1975年辽宁海城地震后，又作了一些修改，强调要“依靠广大群众做好预测预防工作”。实践表明，这个方针的基本精神是正确的，它的“以预防为主”的核心思想，一直指引着我国地震工作健康地发展。

我国政府一贯重视减轻自然灾害，特别是对地震这类突发性灾害尤为关注。唐山大地震的教训表明，要减少一次大地震的发生造成的巨大人员伤亡和财产损失，必须坚决贯彻以预防为主的指导思想，认真做好震前的防御工作。但是地震是一种自然现象，地震的发生和造成灾害是不可能完全避免的，所以在做好震前防御工作的同时，还必须有效地实施灾后救助，这种救助可以帮助减少人员的伤亡和财产损失，又可以使灾后的人民生活得以尽快恢复。防震减灾工作方针的制定，首先必须着眼于灾害；其次，这个工作方针必须覆盖灾害的全过程。所以，进入20世纪80年代，防震减灾工作方针调整为“实行预防为主，防御与救助相结合”。防震减灾法肯定了为实践证明是行之有效的防震减灾工作方针，作为政府部门履行防震减灾工作职责的基本指导思想。

目前，减轻地震灾害的对策从宏观上可分为工程性措施和非工程性措施，二者相辅相成，缺一不可。工程性防御措施主要是通过加强各类工程的抗震能力来减少地震给人民生命和财产造成的损失；非工程性防御措施是通过增强全社会的防震减灾意识、提高公民在地震灾害中自救、互救能力，以减轻地震灾害。工程

性防御措施和非工程性防御措施都必须予以规范化和制度化，否则，地震灾害预防活动的效果就会很差，或者是由于地震灾害预防活动费时、费力而被人们怀疑或忽视，或者是地震灾害预防活动缺乏必要的强制力，很难有效地开展起来。

## 8.2 工程性措施

工程性措施主要包括地震预测预报、地震转移分散、工程抗震三个方面。

地震预测预报，主要是根据对地震地质、地震活动性、地震前兆异常和环境因素等多种情况，通过多种科学手段进行预测研究，对可能造成灾害的破坏性地震的发生时间、地点、强度的分析、预测和发布。预报按可能发生地震的时间可分为四类：①长期预报：预报几年内至几十年内将发生的地震；②中期预报：预报几个月至几年内将发生地震；③短期预报：预报几天至几个月内将发生地震；④临时预报：预报几天之内将发生地震。

国家对地震预报实行统一的发布制度。其发布方式可以政府文件或者通过广播、电视、报刊等宣传媒介向社会公告。准确的地震预报可以提高政府和全社会防震减灾工作和活动的效率，减少地震灾害给人民生命和财产造成的巨大损失，保障社会主义现代化建设的顺利进行。地震的短期预报和临时预报，由省、自治区、直辖市人民政府按照国务院规定的程序发布。任何单位或者从事地震工作的专业人员关于短期地震预测或者临震预测的意见，应当报国务院地震行政主管部门或者县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构，不得擅自向社会扩散，以免造成人们不必要的恐慌，影响社会的安定。目前地震预报还存在着许多难以解决的问题，预报的水平仅是“偶有成功，错漏甚多”，致使未能及时防范，未能将损失减至最低。中外大多数破坏性的地震，或是错报（报而未震），或是漏报（震前未预报），对人民生活、社会秩序造成严重的影响。

我国早在 1952 年就开始在邢台地震现场进行地震预测研究的科学实践，20 年代初开始了对地震大形势的研究。从 1952 年开始将全国地震活动的趋势分析预报和一二年内可能发生强震的重点危险地区及需要加强监视的地区列为每年一度的全国研讨会主要研究的议题。多年来，我国在地震预报工作方面取得了一定的成绩，如 1975 年辽宁海城地震就是我国地震工作者短临预报地震的成功范例。

在总结地震预报工作的经验基础上，1985 年 2 月 25 日由国务院批准、国家地震局发布《发布地震预报的规定》，这是我国防震减灾领域中的第一个行政法规。《发布地震预报的规定》将地震预报分为长期预报、中期预报、短期预报、临震预报，并规定了地震预报的发布权限，同时，还对地震预报意见的宣传和报道的管理作了规定。实践证明，《发布地震预报的规定》对于加强我国的地震预报管理工作起到了积极的保障作用。但是，由于在实践中经常出现多渠道发布地震预报、给社会生活造成混乱和不良后果的消极现象，因此，《中华人民共和国防

震减灾法》对地震预报工作进一步作了原则性规定。主要是确立地震预报统一发布制度，并对地震预报的发布程序进一步予以明确，对不符合地震预报发布程序要求的地震预测意见严格按照法律的规定进行处理。

为了进一步搞好我国的地震预报工作，在加强我国防震减灾工作的管理过程中，除了依据《中华人民共和国防震减灾法》和《发布地震预报的规定》认真做好各项地震预报工作之外，还应当不断总结地震预报工作的经验，争取尽早制定一部全面调整地震预报工作各个方面关系的《地震预报工作条例》。同时，在相关的刑事立法中还应该对恶意传播地震谣言制造社会混乱的行为设定必要的法律制裁措施。

地震转移、分散，是把可能在人口密集的大城市发生的大地震，通过能量转移，诱发至荒无人烟的山区或远离大陆的深海，或通过能量释放把一次破坏性的大地震化为无数次非破坏性的小震。这种方法目前尚在探索，未有应用。但即使成功，其实用价值也不大。如一个 7 级地震，需要诱发多个不致造成破坏的四级地震才能释放其能量，其经济投入不可想象。

鉴于地震预报和地震转移分散均不能很好地实现，因此工程抗震成为目前最有效的、最根本的措施。工程抗震是通过工程技术提高城市综合抗御地震的能力和各类建筑的耐震性能，当突发性地震发生时，把地震灾害减少至较轻的程度。工程抗震的内容非常丰富，包括地震危险性分析和地震区划、工程结构抗震、工程结构减震控制等。《中华人民共和国防震减灾法》对工程性防御措施提出了规范化的法律要求。

新建工程必须遵守有关法律规定 主要为以下两方面：

(一) 新建工程必须符合抗震设防要求。根据防震减灾法的规定，凡是新建、扩建、改建建设工程，必须达到抗震设防要求。具体分为三种情况：一是重大建设工程和可能发生严重次生灾害的建设工程，必须进行地震安全性评价；并根据地震安全性评价的结果，确定抗震设防要求，进行抗震设防。二是重大建设工程和可能发生严重次生灾害的建设工程之外的建设工程，必须按照国家颁布的地震烈度区划图或者地震动参数区划图规定的抗震设防要求，进行抗震设防。三是核电站和核设施建设工程，受地震破坏后可能引发放射性污染的严重次生灾害，必须认真进行地震安全性评价，并依法进行严格的抗震设防。

防震减灾法还对重大建设工程和可能发生严重次生灾害的建设工程明确划定了范围。即所谓重大建设工程是指对社会有重大价值或者有重大影响的工程；所谓可能发生严重次生灾害的建设工程是指受地震破坏后可能引发水灾、火灾、爆炸、剧毒或者强腐蚀性物质大量泄漏和其他严重次生灾害的建设工程，包括水库大坝、堤防，储油，储气，储存易燃易爆、剧毒或者强腐蚀性物质以及其他可能发生严重次生灾害的建设工程。

为了加强对抗震设防要求认定的权威性,《防震减灾法》第 5 条第 1 款规定,“国务院地震行政主管部门负责制定地震烈度区划图或者地震动参数区划图,并负责对地震安全性评价结果的审定工作。”

(圆) 新建工程必须遵循抗震设计规范。抗震设计规范与抗震设防要求一样,都是建设工程必须遵循的基本法律规定。《防震减灾法》第 8 条明确规定,“建设工程必须按照抗震设防要求和抗震设计规范进行抗震设计,并按照抗震设计进行施工”。为了保证抗震设计规范的权威性,防震减灾法规定抗震设计规范,由专门的国家机关负责制定,主要包括两种情况:第一,国务院建设行政主管部门负责制定各类房屋建筑及其附属设施和城市市政设施的建设工程的抗震设计规范;第二,国务院铁路、交通、民用航空、水利和其他有关专业主管部门负责制定铁路、公路、港口、码头、机场、水工程和其他专业建设工程的抗震设计规范。

圆已建工程必须遵守有关法律规定 防震减灾法不仅对新建工程提出了最基本的法律要求,对已建工程也提出了相应的法律要求,这一要求的主要内容是只要符合防震减灾法所规定的条件的已建工程,必须依法进行抗震加固。抗震加固是增强已建工程抗御地震灾害能力的重要手段。《防震减灾法》对于需要进行抗震加固的已建工程的范围和性质作了具体的要求。根据该法第 10 条的规定,需要进行抗震加固的已建工程包括:已经建成的下列建筑物、构筑物,即属于重大建设工程的建筑物、构筑物;可能发生严重次生灾害的建筑物、构筑物;有重大文物价值和纪念意义的建筑物、构筑物;地震重点监视防御区的建筑物、构筑物等。属于上述种类的已建工程,只要是未采取抗震设防措施的,就应当按照国家有关规定进行抗震性能鉴定,并采取必要的抗震加固措施。

圆次生灾害防御必须遵守有关法律规定 防震减灾法对地震可能引起的次生灾害源的防范提出了法律要求,主要是在第 10 条设定了有关地方人民政府有责任采取相应的措施有效地防范地震可能引起的火灾、水灾、山体滑坡、放射性污染、疫情等次生灾害源。工程抗震是地震灾害预防的工程性防御主要措施。《中华人民共和国防震减灾法》规定,对于新建、扩建和改建建设工程,必须按照国家颁布的地震烈度区划图或地震动参数区划图规定的抗震设防要求,进行抗震设防。

## 圆非工程性措施

非工程性防御措施主要是指各级人民政府以及有关社会组织采取的工程性防御措施之外的依法减灾活动,包括建立健全减灾工作体系,制定防震减灾规划,开展防震减灾宣传、教育、培训、演习、科研以及推进地震灾害保险,救灾资金和物资储备等工作。《中华人民共和国防震减灾法》除了详细规定了工程性防御

措施以外，还对非工程性防御措施也作了基本要求，主要的内容涉及到以下几个方面：

(员) 编制防震减灾规划。防震减灾法第 圆条规定，根据震情和震害预测结果，国务院地震行政主管部门和县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构，应当会同同级有关部门编制防震减灾规划，报本级人民政府批准后实施。修改防震减灾规划，应当报经原批准机关批准。

(圆) 加强防震减灾宣传教育。《防震减灾法》第 圆条规定，各级人民政府应当组织有关部门开展防震减灾知识的宣传教育，增强公民的防震减灾意识，提高公民在地震灾害中自救、互救的能力；加强对有关专业人员的培训，提高抢险救灾能力。

(猿) 做好抗震救灾资金和物资储备。《防震减灾法》第 圆条规定，地震重点监视防御区的县级以上地方人民政府应当根据实际需要与可能，在本级财政预算和物资储备中安排适当的抗震救灾资金和物资。

(源) 建立地震灾害保险制度。《防震减灾法》第 圆条规定，国家鼓励单位和个人参加地震灾害保险。

## 员圆 地震应急活动

地震应急活动是防震减灾的四个主要环节之一。破坏性地震发生后，尤其是严重破坏性地震发生后，能否采取有效的应急措施直接关系到人民生命和财产的安全。国内外地震应急活动的实践表明，有组织、高效率地开展地震应急活动，可以最大限度地减少地震灾害给人民生命和财产造成的损失。地震应急的根本目的在于：①在临震前采取尽可能有效的措施，保护人民的生命安全，保护重要设施（如生命线系统）不受或少受损失；②在灾害发生后尽可能迅速、有效地开展救援活动并采取措施减少和防止灾害的扩大，迅速地恢复社会秩序。

为了达到上述目的，就必须做好下列工作：有强有力的组织和领导机构；有这些组织和领导机构在事先制定好的应急预案；有在地震灾害突发时能够按照明确的职责分工，及时、有效地组织实施应急预案的队伍；有灾区全体人民的积极参与和努力。为了搞好我国的地震应急工作，员缘年 源月 员日国务院第 员圆号令发布了《破坏性地震应急条例》（见附录 悦），这是关于我国地震应急的第一个行政法规，该行政法规的出台改变了我国地震应急长期无法可依的现象，为地震应急活动的法制化提供了法律依据。《破坏性地震应急条例》对应急机构、应急预案、临震应急、震后应急等地震应急活动的法制化作了规定。自《破坏性地震应急条例》发布以来，在发生的地震应急活动中，地震灾区的人民政府很好地实施了该条例的规定，对于保护人民生命和财产的安全发挥了重要的作用。《中华人民共和国防震减灾法》对地震应急作为防震减灾的一个重要环节作了明确的肯



定,对地震应急工作和活动应当遵循的法律原则作了具体性规定,重申了最基本的法律要求。

## 10.1.1 制定地震应急预案的组织工作

地震应急预案是在“以防为主”的防震减灾工作方针指导下,事先制定的在破坏性地震突然发生后政府和社会采取紧急防灾和抢险救灾的行动计划。正因为地震应急预案是地震应急工作的基础,所以,制定地震应急预案就是一项非常重要的工作,必须在地震行政主管部门的指导下,在充分考虑各种防灾条件的基础上制定。防震减灾法规定了地震应急预案制定工作的组织程序,主要包括:国务院地震行政主管部门会同国务院有关部门制定国家破坏性地震应急预案,报国务院批准;国务院有关部门应当根据国家破坏性地震应急预案,制定本部门的破坏性地震应急预案,并报国务院地震行政主管部门备案;可能发生破坏性地震地区的县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构,应当会同有关部门参照国家破坏性地震应急预案,制定本行政区域内的破坏性地震应急预案,报本级人民政府批准;省、自治区和人口在 500 万以上的城市的破坏性地震应急预案,还应当报国务院地震行政主管部门备案。

## 10.1.2 地震应急预案的内容和要求

为了保证地震应急预案的科学性和规范性,防震减灾法对各种类型的地震应急预案的内容作了统一性的要求,以此来保证地震应急预案能够得到很好的实施。防震减灾法要求地震应急预案具有下列规范性的内容:①应急机构的组成和职责;②应急通信保障;③抢险救援人员的组织和资金、物资的准备;④应急、救助装备的准备;⑤灾害评估准备;⑥应急行动方案等。

为保证地震应急工作高效、有序进行,最大限度地减轻地震灾害,在《防震减灾法》出台以前,根据《破坏性地震应急条例》制定了《国家破坏性地震应急预案》(见附录 10)。《国家破坏性地震应急预案》规定:一般破坏性地震发生后,由省、自治区、直辖市人民政府领导本行政区域内的地震应急工作;严重破坏性地震发生后,由省、自治区、直辖市人民政府领导本行政区域内的地震应急工作,国务院根据灾情组织、协调有关部门和单位对灾区进行紧急支援;造成特大损失的严重破坏性地震发生后,省、自治区、直辖市人民政府抗震救灾指挥部组织、指挥灾区地震应急工作,国务院抗震救灾指挥部领导、指挥和协调地震应急工作。一般破坏性地震是指造成一定数量的人员伤亡和经济损失(指标低于严重破坏性地震)的地震。严重破坏性地震是指造成人员死亡 5000~10000 人,直接经济损失达到该省、自治区、直辖市上年国内生产总值 1%~5% 的地震。在 500 万人口以上的大城市或地区发生大于 7 级、小于 8 级的地震,或在 50 万人口

人口的城市或地区发生 7 级以上级的地震，也可视为严重破坏性地震。造成特大损失的严重破坏性地震是指造成人员死亡数超过 10 万人，直接经济损失超过该省、自治区、直辖市上年国内生产总值 10% 以上的地震；在 1 亿以上人口以上的大城市或地区发生 7 级以上级的地震，也可视为造成特大损失的严重破坏性地震。

1.3.2 地震应急预案的组织实施

及时和准确地组织实施地震应急预案是保证地震应急活动效率的重要条件，《防震减灾法》突出强调，要根据地震应急活动的需要适时地、准确地组织实施地震应急预案。第 18 条规定，破坏性地震临震预报发布后，有关的省、自治区、直辖市人民政府可以宣布所预报的区域进入临震应急期；有关的地方人民政府应当按照破坏性地震应急预案，组织有关部门动员社会力量，做好抢险救灾的准备工作。第 19 条规定，造成特大损失的严重破坏性地震发生后，国务院应当成立抗震救灾指挥机构，组织有关部门实施破坏性地震应急预案。破坏性地震发生后，有关的县级以上地方人民政府应当设立抗震救灾指挥机构，组织有关部门实施破坏性地震应急预案。

1.3.3 抗震救灾指挥机构的设立和地震应急活动的指挥

地震是突发性自然灾害，因此，一旦地震灾害发生，就必须调动社会各方面的力量投入抢险救灾活动，为了保证地震应急工作的秩序和高效率，就必须建立地震应急活动有效的指挥机构。从我国的地震应急活动的实践来看，成立在人民政府领导下的抗震救灾指挥机构，在组织震后抢险救灾等地震应急活动中发挥了非常重要的作用。

《防震减灾法》对破坏性地震发生后在人民政府领导下成立抗震救灾指挥机构的组织方式予以充分肯定。根据该法第 19 条的规定，破坏性地震发生后，有关的县级以上地方人民政府应当设立抗震救灾指挥机构。造成特大损失的严重破坏性地震发生后，国务院应当成立抗震救灾指挥机构。国务院抗震救灾指挥机构的办事机构，设在国务院地震行政主管部门。上述规定，对于有效地组织地震应急活动具有重要的保障作用。

1.3.4 震情、灾情通报和灾情评估工作

破坏性地震发生后，如何向地震灾区派遣救援力量，给予地震灾区以何种程度的经济援助等都需要准确的震情、灾情报告作为决策的基础。《防震减灾法》对地震应急活动中的震情、灾情通报和灾情评估活动作了基本的法律要求。第 20 条规定，地震灾区的各级地方人民政府应当及时将震情、灾情及其发展趋势

等信息报告上一级人民政府；地震灾区的省、自治区、直辖市人民政府按照国务院有关规定向社会公告震情和灾情。

国务院地震行政主管部门或者地震灾区的省、自治区、直辖市人民政府负责管理地震工作的部门，应当及时会同有关部门对地震灾害损失进行调查、评估；灾情调查结果，应当及时报告本级人民政府。

## 4.1.2 地震应急技术的研究开发工作

地震应急工作是一项专门性的工作，能否运用科学的手段来进行地震应急活动，不仅涉及到地震应急活动的效果，还涉及到人民生命财产的安全是否能够通过地震应急活动得到切实有效的保障。《防震减灾法》第 40 条规定，国家鼓励、扶持地震应急、救助技术和装备的研究开发工作。可能发生破坏性地震地区的县级以上地方人民政府应当责成有关部门进行必要的地震应急、救助装备的储备和使用训练。

## 第 8 章 抗震概念设计的总体原则

建筑抗震设计应包括三个层次的内容和要求：抗震概念设计、抗震计算和抗震构造措施。在强烈地震的作用下，工程结构的破坏是十分复杂的，到目前为止对结构进行精确的抗震计算具有一定的困难。结构抗震概念设计就是根据地震震害的经验和教训所形成的关于结构抗震设计的基本原则和设计思想，在建筑结构的总体布局并在确定结构构件细部构造上得到的一些基本措施，它是在结构总体上把握抗震设计的基本原则。抗震计算就是运用已经形成的抗震计算理论对结构进行抗震计算得到结构构件的地震作用，进行荷载组合后对结构构件进行截面设计和节点的设计。抗震构造措施就是在利用已经被震害经验证明行之有效的一些构造措施来保证结构的整体性、加强结构局部薄弱环节等，以保证结构抗震计算的有效性。抗震设计的上述三个层次的内容相互联系又缺一不可，忽略任何一部分都可能造成抗震设计的失败。

建筑抗震概念设计的总体原则，一般包括为以下几个部分：注意结构场地选择，把握建筑体型，选取有利的结构抗震体系，利用结构延性，设置多道抗震防线，妥善处理非结构构件，注重建筑材料的选择和施工质量等。

### 8.1 建筑物场地的选择

大量的震害经验表明，建筑物所在场地的地质条件和地形地貌对建筑物的震害存在显著的影响。因此，建筑物的场地选择对于建筑物的抗震具有十分重要的影响，场地和地基的破坏作用一般通过场地选择和地基处理来减轻地震灾害和建筑物的破坏。概括而言，对于场地选择的基本原则可以概括为：选择有利地段，避开不利地段，不在危险地段建造甲、乙和丙类建筑。一般认为，对于抗震有利的地段系指地震时地面没有残余变形的坚硬或开阔平坦密实均匀的中硬土范围或者地区；而对于抗震不利的地段系指可能产生明显的残余变形或者地基失效的某一范围或者地区；危险地段系指可能发生严重的地面残余变形的某一范围或地区。如果必须在不利地段和危险地段进行工程建设，应该采取必要的措施，例如进行详细的场地勘察和场地评价，并采取必要的抗震设计措施加以保证。《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）对于建筑有利地段、不利地段和危险地段给出了明显的规定（见表 8.1.1），对于建筑场地的选择具有重要的指导意义。

为了考虑建筑物场地对于结构抗震的影响，仅仅对建筑物场地进行上述简单的类型划分并不能反应场地的实际情况。通常必须将场地按照某些指标或者描述

进行划分，以便在建筑抗震设计中采取合理的设计参数和有关的抗震构造措施。《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）采用以场地土层的等效剪切波速和场地覆盖层厚度两个指标作为场地类别的分类标准。所谓场地的覆盖层厚度，一般情况下是按地面到剪切波速大于  $v_{s0}$  的土层的顶面的距离来确定的。但是，当地面  $z_0$  以下存在剪切波速大于相邻上层土层剪切波速  $1.5$  倍的土层，且其下卧岩石的剪切波速均不小于  $v_{s0}$  时，可以按地面到该土层的顶面的距离确定。对于剪切波速大于  $v_{s0}$  的孤石、透镜体，应视同周围土体，土层中的火山岩硬夹层，应视为刚体，其厚度计算应从覆盖层厚度中扣除。土层的剪切波速可以通过场地的地质勘查测量确定，也可以根据经验按照土的类型由表 5.1.4 确定。

表 5.1.4 有利、不利和危险地段的划分

地段类别	地质、地形和地貌
有利地段	稳定基岩、坚硬土，开阔、平坦、密实、均匀的中硬土等
不利地段	软弱土，液化土，条件突出的山嘴，高耸孤立的山丘，非岩质的陡坡，河岸和边坡边缘，平面分布上成因、岩性、状态明显不均匀的土层（如故河道、疏松的断层破碎带、暗埋的塘浜沟谷及半填半挖地基）等
危险地段	地震时可能发生滑坡、崩塌、地陷、地裂、泥石流等及发震断裂带上可能发生地表位错的部位

表 5.1.5 土的类型划分和剪切波速的范围

土的类型	岩土名称和性状	土层剪切波速范围 $v_s$ (m/s)
坚硬土或岩石	稳定岩石，密实的碎石土	$v_s \geq 400$
中硬土	中密、稍密的碎石土，密实、中密的砾、粗、中砂， $v_{s0} < v_s < 400$ 的粘性土和粉土，坚硬黄土	$250 \leq v_s < 400$
中软土	稍密的砾、粗、中砂，除松散外的细、粉砂， $v_{s0} < v_s < 250$ 的粘性土和粉土， $v_{s0} < v_s < 250$ 的填土，可塑黄土	$150 \leq v_s < 250$
软弱土	淤泥和淤泥质土，松散的砂，新近沉积的粘性土和粉土， $v_{s0} < v_s < 150$ 的填土，流塑黄土	$v_s < 150$

注： $v_{s0}$  为由载荷试验等方法得到的地基承载力特征值（kPa）； $v_s$  为岩土剪切波速。

由于土层一般是分层的，因此对于多层土层，一般根据地震波通过计算深度范围内的多层土层的时间与该地震波通过计算深度范围内单一土层所需要的时间相同的条件计算等效剪切波速  $v_{se}$ ，即

$$v_{se} = \frac{d}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

式中  $v_{se}$ ——土层等效剪切波速（m/s）；  
 $d$ ——计算深度（m），取覆盖层厚度和厚度  $5d_0$  二者的较小值；

——计算深度范围内第 层土层的厚度（m）；

——计算深度范围内第 层土层剪切波速（m/s）；

——计算深度范围内土层的分层数。

建筑物的场地类别，应根据土层的等效剪切波速和场地覆盖层厚度划分为四类，见表 。

表 各类建筑物场地土类别划分

等效剪切波速	场地类别			
	I	II	III	IV
	园			
	约缘	≥ 缘		
	约猿	猿- 缘	跃	
	约猿	猿- 缘	跃- 缘	跃

其次，对于场地内存在发震断裂时，应对断裂的工程影响进行评价。经过近年来地震区考察，大量研究者认为需要考虑断裂影响的主要是指发震断裂地震时与地下断裂构造直接相关的地表地裂位错带。建立在这类位错带上的建筑破坏是不容易采用工程措施来解决的。因此规范中应划分为危险地段予以避开。至于与发震断裂间接相关的受应力场控制所产生的地裂，如分支或次生地裂。根据唐山地震时震中区地裂的实际探查以及地面建筑物的破坏调查结果发现，这类地裂带对经过正规设计的工业与民用建筑影响很小，仅对埋藏很浅的排污管道和农村民房具有一定影响，而且可以通过工程措施加以解决。通过研究发现，对于下列三种情况：抗震烈度小于 度；非全新世活动断裂；抗震烈度为 度或 度时，前第四纪基岩隐伏断裂的土层覆盖层厚度分别大于 和 ，可以忽略发震断裂错动对地面建筑物的影响。对于不符合上述三种情况的断裂带应该避开，其避让的距离应符合表 的规定。

表 发震断裂的最小避让距离

烈度	建筑抗震设防类别			
	甲	乙	丙	丁
愿	专门研究	猿	圆	—
怨	专门研究	缘	猿	—

关于局部地形条件的影响，从国内几次大地震的宏观调查资料来看，岩质地形与非岩质地形有所不同。在云南通海地震的大量宏观调查中表明，非岩质地形对烈度的影响比岩质地形的影响更为显著。如通海和东川的许多岩石地基上很陡的山坡，震害也未见有明显的加重。因此对于岩石地基的陡坡、陡坎等，规范中未列为不利的地段。但对于岩石地基的高度达数十米的条状突出的山脊和高耸孤

立的山丘，由于鞭梢效应明显，震动有所加大，烈度仍有增高的趋势。所谓局部突出地形主要是指山包、山梁和悬崖、陡坎等，情况复杂，对各种可能出现情况的地震动参数的放大作用都作出具体的规定是很困难的。从宏观震害经验和地震反应分析结果所反映的总趋势，大致可以归纳为以下几点：①高突地形距离基准面的高度愈大，高处的反应愈强烈；②离陡坎和边坡顶部边缘的距离愈大，反应相对减小；③从岩土构成方面看，在同样地形条件下，土质结构的反应比岩质结构大；④高突地形顶面愈开阔，远离边缘的中心部位的反应是明显减小的；⑤边坡愈陡，其顶部的放大效应相应加大。

7.2 建筑物体型的确定

震害表明，简单、对称的建筑体型不易损坏，这是因为这类结构其地震反应与计算结果比较吻合，容易采取构造措施和细部处理。建筑设计不应采用严重不规则的设计方案。但是从建筑艺术的角度来看，如每幢建筑都采用规则对称的建筑体型，则未免太显单调，缺乏变化。近年来提出“规则”的概念，它包含了对平面立面外形尺寸、抗侧力构件、质量、刚度以及强度分布诸因素的综合要求，沿高度和沿水平方向均应予考虑。

7.3 建筑物平面布局

建筑及其抗侧力结构的平面布置宜规则、对称，并应具有良好的整体性，这样有利于抵抗水平和竖向荷载，受力明确，传力直接，减少扭转的影响。建筑物的平面以方形、矩形、圆形、正六边形、正八边形、椭圆形、扇形为宜。三角形平面也属于简单形状，但是由于其沿主轴方向不是都对称的，地震中容易产生较强的扭转震动，不是地震区的理想建筑平面形状。《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）对于平面不规则类型给出了详细的规定，见表 7.3.1。

表 7.3.1 平面不规则的类型

不规则类型	定 义
扭转不规则	楼层的最大弹性水平位移（或层间位移），大于该楼层两端弹性水平位移（或层间位移）平均值的 1.2 倍
凹凸不规则	结构平面凹进的一侧尺寸，大于相应投影方向总尺寸的 1/3
楼板局部不连续	楼板的尺寸和平面刚度急剧变化。例如，有效楼板宽度小于该层楼板典型宽度的 30%，或开洞面积大于该楼面面积的 25%，或较大的楼层错层

我国《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3-2010）对地震区高层建筑的平面形状也作出了明确的规定：在高层建筑的一个独立的结构单元内，宜使结构平面形状简单、规则，刚度和承载力分布均匀。不应采用严重不规则的平面布置，宜选用风作用较小的平面形状。对于抗风有利的平面形状是简单规则的凸平

面，例如圆形、正多边形、椭圆形、鼓形等平面，对于抗风不利的平面形状是具有较多凹凸的复杂平面形状，例如 灾形、再形、匀形、弧形等平面，如图 所示。对于抗震的 粤级高度钢筋混凝土高层建筑，其平面布置宜符合下列要求：①平面宜简单、规则、对称，减小偏心；②平面长度不宜过长，突出部分长度 造不宜过大；蕴，造等值宜满足表 的要求；③不宜采用角部重叠的平面图形或细腰形平面图形。对于平面过于狭长的建筑物在地震中由于两端地震波输入有相位差而容易产生不规则的振动，从而产生较大的震害。在实际工程中， 在远 苑度抗震设计时，最好不要超过 源 在 愿 怨度抗震设计时，最好不要超过 猿 平面有较长的外伸时，外伸段容易产生局部震动而引发凹角处破坏，外伸部分 遭的限值在表 中已经作出规定，但是在实际工程设计中最好控制在不超过 员 角部重叠和细腰形的平面图形，在中央部位形成狭长部分，在地震中容易产生应力集中使得楼板开裂和破坏。

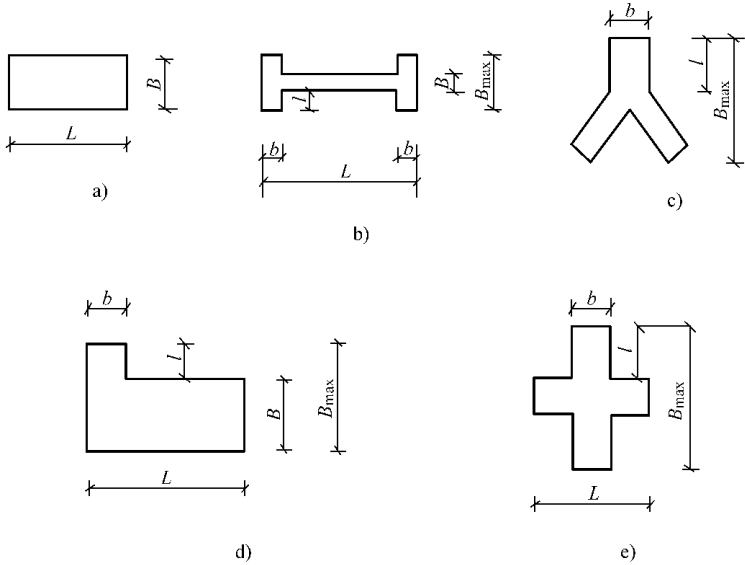


图 建筑平面  
表 蕴，造的限值

设防烈度	蕴	造	遭
远 苑度	≤ 远 苑	≤ 远 苑	≤ 远 苑
愿 怨度	≤ 远 苑	≤ 远 苑	≤ 远 苑

对体型复杂的建筑，一般可考虑设置防震缝，将建筑物分隔成规则的抗震结构单元。这种做法可以将复杂的建筑简单化，使得分析和设计的计算模型与实际结构比较接近，也避免了复杂结构的扭转振动所产生的震害。但是，在国内外地



震灾害调查中，曾多次发生相邻建筑物相互碰撞而发生严重破坏的震害实例。设置防震缝需要注意两点：一是改变了结构的自振周期，有可能会使结构自振周期与场地卓越周期接近而加重震害；二是要保证抗震缝上下都有一定的宽度，否则会在地震时因两抗震单元之间碰撞而加重震害。防震缝的加宽会给建筑、结构和设备设计带来一定的困难。近年来在国内的建筑设计中，通过调整平面形状和尺寸，并在构造和施工上采取一些措施，尽量不设置防震缝。此时要考虑应力和变形的可能集中，结构地震扭转效应等因素的影响，并采用专门的分析计算方法。防震缝应根据抗震设防烈度、结构材料种类、结构类型、结构单元的高度和高差等情况，留有足够的宽度，其两侧的上部结构应完全分开。防震缝两侧的结构体系不同时，防震缝宽度应按照不利的结构类型确定；防震缝两侧的房屋高度不同时，防震缝宽度应按较低的房屋高度确定；当相邻结构的基础存在较大的差异沉降差时，宜增大防震缝的宽度；防震缝宜沿房屋的全高设置，地下室和基础可以不必断开，但是在与上部防震缝对应处应加强构造和连接；结构单元之间或主楼与裙楼之间如果没有可靠连接，不应采用牛腿托梁的做法设置防震缝。防震缝的最小宽度应该符合下列要求：① 框架结构的房屋，高度不超过 15m 的部分，可取 70mm；超过 15m 的部分，远 苑 愿和 怨度相应每增加高度 缘 源 猿 和 圆 m，宜加宽 圆 苑 苑 mm；② 框架—剪力墙可按框架结构房屋规定的数值的 苑 苑 苑 采用，剪力墙结构房屋可以按框架结构房屋规定的数值的 缘 苑 苑 采用，但是二者不宜小于 苑 苑 苑 mm。需要说明的是，对于抗震设防烈度为 远 度 以上的房屋，所有伸缩缝和沉降缝，均应符合防震缝的要求。

7.3.2 建筑物的立面布局

地震区的建筑立面要求采用矩形、梯形和三角形等变化均匀的几何形状，尽量不要采用带有突然变化的阶梯型立面、大底盘建筑甚至倒梯形立面。立面形状的突然变化将产生质量和刚度的剧烈变化，从而在地震中在该部位产生严重的塑性变形和应力集中，加重结构的地震灾害。《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）对于竖向不规则类型给出了详细的规定，见表 7.3.2。

表 7.3.2 竖向不规则的类型

不规则类型	定 义
侧向刚度不规则	该层的侧向刚度小于相邻上一层的 苑 苑 苑 ，或小于其上相邻三个楼层侧向刚度平均值的 苑 苑 苑 ；除顶层外，局部收进的水平向尺寸大于相邻下一层的 苑 苑 苑
竖向抗侧力构件不连续	竖向抗侧力构件（柱，抗震墙，抗震支撑）的内力由水平转换构件（梁，框架构等）向下传递
楼层承载力突变	抗侧力结构的层间受剪承载力小于相邻上一楼层的 苑 苑 苑

我国《高层建筑混凝土结构技术规程》（GB 50413-2007）对地震区高层建筑的

员 怨 怨

立面布置也作出了明确的规定：高层建筑的竖向体型宜规则、均匀，避免有过大的外挑和内收。结构的侧向刚度宜下大上小，逐渐均匀变化，不应采用竖向布置严重不规则的结构。抗震设计的高层建筑结构，其楼层侧向刚度不宜小于相邻上部楼层侧向刚度的  $70\%$  或其上相邻三层侧向刚度平均值的  $80\%$ 。粤级高度高层建筑的楼层层间抗侧力结构的受剪承载力不宜小于其上一层受剪承载力的  $80\%$ ，不应小于其上一层受剪承载力的  $75\%$ ；月级高度高层建筑的楼层层间抗侧力结构的受剪承载力不应小于其上一层受剪承载力的  $80\%$ 。在抗震设计时，当结构上部楼层收进部位到室外地面的高度  $H_1$  与房屋高度  $H$  之比大于  $0.25$  时，上部楼层收进后的水平尺寸  $B_1$  不宜小于下部楼层水平尺寸  $B$  的  $0.9$  倍；当上部结构楼层相对于下部楼层外挑时，下部楼层的水平尺寸  $B$  不宜小于上部楼层水平尺寸  $B_1$  的  $0.9$  倍，且水平外挑尺寸  $a$  不宜大于  $2m$ 。如图  $5-10$  所示。

在实际的工程设计中，往往沿竖向分段改变构件截面尺寸或者混凝土强度等级。这种改变使得竖向刚度发生变化。从施工的角度而言，构件截面尺寸改变或者混凝土强度等级的变化不宜过多，但是从抗震设计的角度而言，改变的次数太小，每次变化将较大，从而容易产生较大的刚度突变。在实际工程中，沿竖向的刚度变化不超过  $3$  次。每次改变，梁柱尺寸减少  $10\% \sim 15\%$ ；剪力墙厚度减少  $10\%$ ，混凝土强度等级降低一个等级为宜。构件尺寸的改变和混凝土强度的降低最好错层进行，尽量避免同层同时改变混凝土的强度和构件的截面尺寸。

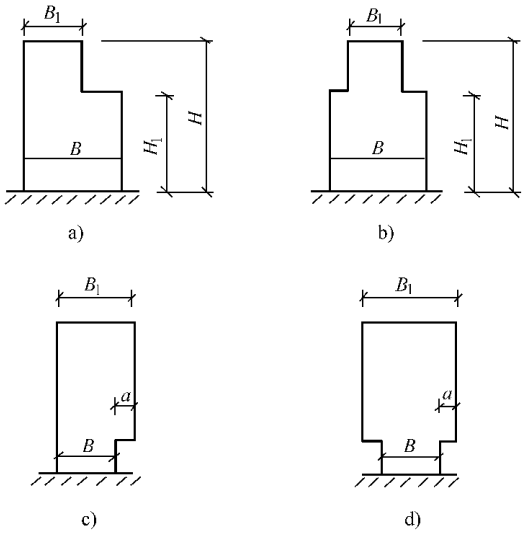


图 5-10 建筑竖向外挑和内收示意

5.1.2 建筑物的高度和高宽比

建筑物越高，所受到的地震作用也就越大，因而产生破坏的可能性也就越大。日本  $1961$  年以前规定房屋高度不得超过  $100m$ ，美国旧金山和洛杉矶  $1971$  年以前的房屋高度不能超过  $100m$  和  $150m$ 。但是随着地震工程和工程抗震技术的发展，这些限制已经得到突破，人们已经逐渐认识到“房屋越高越危险”的概念也不是绝对的，也是有条件的。尽管如此，减小建筑物的高度仍然是控制地震灾害的有效手段之一。当然对于不同的结构体系，将有不同的最佳适宜高度。我国  $1989$

《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)对于现浇钢筋混凝土的结构类型和最大高度作出了明确的规定,见表 7.1.2;对于砌体结构房屋的层数和总高度以及钢结构也作出了相应的规定,分别见表 7.1.3 和表 7.1.4。对于平面和竖向均不规则的结构或者建造于Ⅳ类场地的结构,一般应在上述基础上降低 10%左右。

表 7.1.2 现浇钢筋混凝土适用的最大高度 (单位: m)

结构类型	烈 度			
	远	苑	愿	怨
框架	24	28	30	32
框架—剪力墙	30	35	40	45
剪力墙	30	35	40	24
部分框支剪力墙	30	35	30	不应采用
框架—核心筒	30	35	40	28
筒中筒	30	35	40	30
板柱—剪力墙	24	28	28	不应采用

注: 房屋高度指室外地面到主要屋面板板顶的高度(不包括局部突出屋顶部份)。

框架—核心筒结构指周边稀柱框架与核心筒组成的结构。

部分框支剪力墙结构指首层或底部两层框支抗震墙结构。

乙类建筑可按本地区抗震设防烈度确定适用的最大高度。

超过表内高度的房屋,应进行专门研究和论证,采取有效的加强措施。

表 7.1.3 砌体结构房屋的层数和总高度限值 (单位: m)

房屋类别		最小 墙厚 (mm)	烈 度							
			远		苑		愿		怨	
			高度	层数	高度	层数	高度	层数	高度	层数
多层砌体	普通砖	240	24	愿	24	苑	28	远	24	源
	多孔砖	240	24	苑	24	苑	28	远	24	源
	多孔砖	240	24	苑	28	远	28	缘	—	—
	小砌体	240	24	苑	24	苑	28	远	—	—
底部框架 原剪力墙		240	24	苑	24	苑	28	远	—	—
多排柱内框架		240	24	缘	24	缘	28	源	—	—

注: 房屋的总高度指室外地面到主要屋面板板顶或檐口的高度,半地下室从地下室室内地面算起,全地下室和嵌固条件好的半地下室应允许从室外地面算起,对带阁楼的坡屋面应算到山尖墙的檐口高度处。

室内外高差大于 0.3m 时,房屋总高度应允许比表中数据适当增加,但不应多于 5m

表中中小砌块砌体房屋不包括配筋混凝土小型空心砌块砌体房屋。

表 5.2.10 钢结构房屋适用的最大高度 (单位：皂)

结构类型	远 苑度	愿度	怨度
框架	苑园	怨园	缘园
框架—支撑 (抗震墙板)	园园	园园	苑园
筒体 (框架, 筒中筒, 桁架筒, 筒) 和巨型框架	猿园	园园	苑园

注：房屋高度指室外地面到主要屋面板板顶的高度 (不包括局部突出屋顶部分)；  
超过表内高度的房屋，应进行专门研究和论证，采取有效的加强措施。

在建筑抗震设计中，限制房屋建筑的高宽比比限制其高度更为重要。建筑的高宽比越大，地震作用下的侧移越大，则由于地震引起的倾覆力矩也越大。因此世界各国在各自国家的抗震设计中对于建筑的高宽比都进行了相应的限制。新西兰建议，地震区高层建筑的高宽比不宜超过 源 日本也有基本类似的规定。由于高宽比过大造成倾覆力矩过大，从而产生震害的实例也不少。例如，苑苑年的委内瑞拉的加拉加斯地震，一栋 苑层的旅馆，底部 猿层为框架结构，以上各层为剪力墙结构，框架柱由于地震倾覆力矩产生巨大的轴向力使得柱子轴压比达到很大数值，延性降低，柱头发生剪切破坏。苑缘年的墨西哥地震，墨西哥市的一栋 怨层钢筋混凝土结构因为巨大的倾覆力矩使得整栋房屋倾斜，埋深 园米的箱形基础翻转 源度 并将下面的摩擦桩拔出。

我国《建筑抗震设计规范》(苑苑苑苑-苑苑苑) 对于砌体结构和钢结构民用房屋的最大高宽比作出了规定，分别见表 5.2.11 和表 5.2.12 我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(苑苑苑-苑苑苑) 根据结构体系和抗震设防烈度，对于建筑的高宽比作出了规定：粤级高度钢筋混凝土高层建筑结构的高宽比不宜超过表 5.2.13 中的有关规定；月级高度钢筋混凝土高层建筑结构的高宽比不宜超过表 5.2.14 中的有关规定。

表 5.2.11 砌体结构房屋的最大高宽比

烈度	远	苑	愿	怨
最大高宽比	园缘	园缘	园园	苑缘

注：单面走廊房屋的总宽度不包括走廊宽度。  
建筑平面接近正方形时，其高宽比宜适当减小。

表 5.2.12 钢结构民用房屋适用的最大高宽比

烈度	远 苑	愿	怨
最大高宽比	远缘	远园	缘缘

注：计算高宽比的高度从室外算起。

表 7-1-1 一级高度钢筋混凝土高层建筑结构适用的最大高宽比

结构体系	非抗震设计	抗震设防烈度		
		Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度
框架—板柱—剪力墙	缘	源	猿	圆
框架—剪力墙	缘	缘	源	猿
剪力墙	远	远	缘	源
筒中筒，框架—核心筒	远	远	缘	源

表 7-1-2 二级高度钢筋混凝土高层建筑结构适用的最大高宽比

非抗震设计	抗震设防烈度	
	Ⅵ度	Ⅶ度
Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ

7.1 结构抗震体系的选取

结构抗震体系是抗震设计中应考虑的最关键问题，结构方案选取是否合理对安全 and 经济起主要作用。抗震结构体系的确定涉及到经济和技术条件以及地震评价、场地情况等多方面因素。对于低层建筑而言，水平荷载相对于竖向荷载处于次要地位，一般不会成为结构内力和变形的控制因素，在结构类型的选择上比较灵活。对于高层建筑而言，水平力包括地震作用或风荷载作用成为高层建筑结构内力和变形的主要因素，因此结构的抗侧力体系成为结构体系选型的重要组成部分，结构的抗侧能力的强弱是衡量结构体系是否经济合理的有效尺度。

结构体系的选取应根据建筑的抗震设防类别、抗震设防烈度、建筑物的高度、场地条件、地基、结构材料和施工等因素，经技术、经济和使用条件综合比较确定。选择结构体系应符合下列基本准则：①结构体系应该具有明确的计算简图和合理的地震作用传递路线；②应该具备多道抗震防线，应避免因为部分结构或构件破坏而导致整个结构丧失抗震能力或对重力荷载的承载能力；③应该具备必要的抗震承载能力、良好的变形能力和消耗地震能量的能力，使得结构在遭遇罕遇地震时具有足够的防倒塌能力；④对于可能出现的薄弱部位，如结构的局部削弱、竖向刚度突变等，应采取必要的措施提高其抗震能力，从而防止地震中出现过大的应力集中和变形集中；⑤结构在两个主轴方向的动力特性宜接近，如结构在两个主轴方向的自振周期等。此外，选择结构体系的自振周期应尽可能与场地卓越周期错开，否则地震时，结构将发生类共振现象而加重震害。1985年墨西哥城大地震，强震记录谱分析发现场地卓越周期约为 0.6s，故使自振周期接近 0.6s 的建筑物大批倒塌或严重破坏。

对于钢筋混凝土结构而言，目前的结构体系主要有：框架体系、板柱体系、剪力墙体系、装配式墙板体系、框支剪力墙体系、框架—剪力墙体系、芯筒—框

架体系、多筒—框架体系、筒中筒体系、多束筒体系以及巨型框架体系等。组成这些结构体系的基本构件不外乎以下三种基本形式：线形构件、平面构件和立体构件。

(员) 线形构件主要包括梁和柱，主要承担结构产生的弯矩、剪力和压力等内力，以及由线形构件组成的桁架和支撑体系，承担拉力和压力等。线形构件是组成框架体系、框架—剪力墙体系以及板柱体系的基本构件。

(圆) 平面构件主要包括板和剪力墙，板承担垂直于板面的荷载，产生垂直于板面的挠度和变形。剪力墙承受平面内的水平荷载和面内弯矩，也可以承担部分竖向荷载，产生弯曲变形和剪切变形，平面构件是组成剪力墙体系、框架—剪力墙体系、装配式墙板体系、框支剪力墙体系等的基本构件。

(猿) 由线形构件或者平面构件组成的具有较大横截面尺寸和较小壁厚的整体管状构件，称为立体构件。如由密排框架组成的简体或者由剪力墙组成的简体等，在高层建筑中立体构件主要承担倾覆力矩、水平荷载、扭转力矩以及部分承担竖向荷载。立体构件的特点就是其侧移刚度、扭转刚度很大，从而在水平荷载作用下产生的侧移较小。立体构件是组成框架—简体体系、筒中筒体系、多束筒体系等的基本构件。

## 员源 结构延性的实现

### 员源员 提高结构延性的总体原则

在进行结构设计时，不仅要求结构具有足够的强度和刚度，还要求结构具有足够的延性。为了防止结构在遭受高于本地区设防烈度的罕遇地震影响时，结构应该具有足够的变形能力，避免结构倒塌，发生危及人们生命的严重破坏。延性可以从材料延性、截面延性、杆件延性、构件延性、楼层延性和结构延性等六个由低到高的层面上来理解。结构延性一般可以通过结构的顶点延性系数来表达。结构顶点延性系数等于结构顶点弹塑性位移限值和结构顶点屈服位移的比值，一般认为在抗震结构中结构的顶点延性系数应该大于猿源比较合适。要结构具有一定的延性，则要求组成结构的材料、截面、杆件、构件等具有一定的延性。一般而言，对于结构中重要构件的延性要求高于对于结构整体的延性要求，对于构件中关键杆件的延性要求，又要高于整个构件的延性要求。

结构构件的延性可以通过以下措施来实现：

(员) 砌体结构构件应按规定设置钢筋混凝土圈梁和构造柱、芯柱或采用配筋砌体等。

(圆) 混凝土结构构件应该合理地选择截面尺寸、配置纵向受力钢筋和箍筋，避免剪切破坏先于弯曲破坏、混凝土的压溃先于钢筋的屈服、钢筋的锚固粘结失

效先于构件破坏。

(7) 预应力混凝土的抗侧力构件，应该配置足够的非预应力钢筋。

(8) 钢结构构件应该合理控制截面尺寸，避免局部失稳或整个构件的失稳。

为了保证结构的延性要求，各结构构件之间的连接不能过早破坏。因而结构构件之间的连接应符合下列要求：① 构件节点的破坏，不应先于其连接的构件；② 预埋件的锚固破坏，不应先于其连接件；③ 装配式结构构件的连接，应保证结构的整体稳定性；④ 预应力混凝土构件的预应力钢筋，宜在节点核心区以外锚固。

### 7.3.2 提高延性的重点部位

要使结构在遇到罕遇地震时具有很强的抗倒塌能力，则要求组成结构的构件以及组成构件的材料都具有很高的延性。但是，事实上在设计中这是无法做到的。比较经济可行的办法就是提高结构中的重要构件以及构件中的重点部位的延性。其原则是：

(1) 在结构的竖向，应该重点提高楼房中可能出现塑性变形集中的相对柔弱楼层的构件延性。例如，对于刚度沿高度均匀分布的简单体型高层建筑，应着重提高底层构件的延性；对于带大底盘的高层建筑，应该着重提高主楼与裙房顶面相衔接的楼层中构件的延性；对于其他不规则立面高层建筑，应着重加强体型突变处楼层的构件延性；对于框托墙体系，应着重提高底层或底部几层的框架的延性。

(2) 在平面位置上，应该着重提高房屋周边转角处，平面突变处以及复杂平面各翼相接处的构件延性。对于偏心结构，应加大房屋周边特别是刚度较弱一端构件的延性。

(3) 对于具有多道抗震防线的抗侧力体系，应着重提高第一道防线中构件的延性。例如，在框—墙体系中，重点提高抗震墙的延性；在筒中筒体系中，重点提高实墙内的延性。

(4) 在同一构件中，应着重提高关键杆件的延性。例如，对于框架和框架筒体，应优先提高柱的延性；对于多肢墙，应特别注意加大各层窗裙梁的延性；对于剪力墙体系中满布窗洞的外墙，应着重提高窗间墙的延性。

(5) 在同一构件中，重点提高延性的部位应该是预期该构件地震时首先屈服的部位。如梁的两端，柱的上下端，剪力墙墙肢的根部。

### 7.3.3 改善构件延性的途径

控制构件的破坏形态 低周往复水平荷载下的构件破坏试验结果表明，结构延性和耗能的大小，决定于构件的破坏形态及其塑化过程。弯曲构件的延性

远远大于剪切构件的延性；构件弯曲屈服直至破坏所消耗的地震输入能量，也远远高于构件剪切破坏所消耗的能量。所以，进行工程抗震设计时，应在计算和构造方面采取措施，力争避免构件的剪切破坏，争取更多的构件发生弯曲破坏。

为实现所期望的构件破坏形态，可以采取对不同的构件的各种破坏形态，赋予不同安全系数的办法来达到；或者对作用于构件的设计内力采用不同的调整系数，来实现所期望的塑化过程。例如，对于剪力墙，可以将其墙肢和连梁某些控制截面的设计地震剪应力，乘以一个大于 1 的增大系数，以及在构造上加密腹板网状钢筋或设置斜向钢筋等措施，提高剪力墙的抗剪“屈服强度系数”，迫使剪力墙在发生剪切破坏之前出现弯曲破坏。

**减小构件轴压比** 就框架结构体系而论，柱的延性对于耗散输入的地震能量，防止框架的倒塌，起着十分重要的作用，而轴压比又是影响钢筋混凝土柱延性的一个关键性因素。试验研究结果表明，柱的侧移延性比随着轴压比的增大而急剧下降；而且在高轴压比的情况下，增加箍筋用量对提高柱的延性比基本不起作用，所以，在结构设计中，确定柱、墙肢等轴压和压弯构件的截面尺寸时，应该控制其轴压比值。

**提高强混凝土的应用** 高层建筑超过 10 层，框架柱的轴向压力将达到很大的数值，若仍采用普通混凝土，由于使用要求的制约，柱的截面尺寸又不能随意放大，因而柱的轴压比将达到很大的数值。为了保证框架柱具有良好的延性，降低轴压比，宜采用高强混凝土。不过设计中应该注意，采用高强混凝土时，还应该适当降低剪压比。试验数据表明，与强度等级为 C30 的混凝土相比较，强度等级为 C40 的混凝土，要获得同等的延性，其剪压比控制值应降低 10%。

**钢纤维混凝土的应用** 钢纤维混凝土是 20 世纪 60 年代开发出来的一种新型建筑材料，它是在普通混凝土中掺入少量（体掺率为 1%~3%）乱向短钢纤维形成的一种复合材料。钢纤维混凝土具有较高的抗拉、抗裂和抗剪强度，良好的抗冲击韧性和抗地震延性。所使用的钢纤维有圆直钢纤维、剪切钢纤维、熔抽钢纤维和末端带弯钩的钢纤维，横截面有圆形、矩形和月牙形，规格有：300mm 长 3mm 直径和 400mm 长 3mm 直径等多种，当量长径比为 100~200。影响钢纤维增强混凝土性能的主要因素是钢纤维的直径、长径比和外形。

构件的对比试验表明，在框架梁端和节点内，采用不配箍筋的体掺率为 1% 的钢纤维混凝土，与体积配箍率为 1% 的普通钢筋混凝土构件相比较，具有如下的优点：①梁的抗剪强度提高（1.1~1.2），同时梁的破坏形态转变为弯曲破坏，实现了“强剪弱弯”，延性增加 10% 以上，耗能系数约增大 1.5 倍；②节点的初裂受剪承载力，通裂受剪承载力和耗能指标提高 10% 左右，而且较好地解决了节点箍筋过密和绑扎困难等施工中的老大难问题；③由于钢纤维的阻裂作用，钢纤维接点域的裂缝分布均匀，裂缝宽度较小，同时节点域剪切变形明显减



小,从而保持节点域的较大刚度;④钢筋与混凝土的粘结力提高,梁筋在节点处的滑移量减小,大大加强了梁筋在节点内的锚固效果。

## 7.2 多道抗震防线的设置

地震灾害调查分析表明,采用纯框架的单一抗侧力体系的建筑结构,其破坏率远远高于框架—剪力墙等双重或多重结构体系的建筑物。这是由于后者具有多道抗震防线的缘故。对于仅仅具有一道抗震防线的建筑结构,该防线在地震中一旦遭受破坏,则在后续的地震中建筑物就会倒塌。对于采用多道抗震防线的建筑结构,第一道抗震防线的抗侧力构件在强烈地震中遭受破坏后,第二道抗震防线的抗侧力构件将接替第一道抗震防线发挥作用,抵挡后续地震的作用,从而防止结构的倒塌。当建筑物的基本自振周期与场地的卓越周期相同或接近时,第一道抗震防线因共振而破坏后,结构的自振周期将会发生较大的变化,从而避开场地的卓越周期,使得结构在后续的地震动中,受到较小的地震作用,从而减轻结构的破坏,防止结构的倒塌。具有多道抗震防线的结构体系有框架填充墙体系、框架—剪力墙体系、框架—筒体体系、筒中筒体系等。因此在结构设计中,宜优先选用上述具有多道抗震防线的结构体系。

经过合理设计的框架填充墙体系的填充墙可以充当第一道抗震防线的作用。在地震的反复作用下填充墙将产生裂缝,一方面可以大量吸收和耗散地震能量,起到耗能元件作用,另一方面,填充墙产生裂缝后,其刚度下降,从而整个框架填充墙体系的基本自振周期将发生变化,相应的地震作用也随着减小。框架填充墙中的框架在后续的地震动过程中,将充当第二道防线的作用。对于框架—剪力墙结构体系,其中的框架主要承受重力荷载,而剪力墙主要承受水平地震作用,在地震作用下,剪力墙将作为第一道抗震防线抵御强大的水平地震作用,当其发生破坏后,整个结构的刚度将发生比较大的变化,从而整个框架—剪力墙结构体系的基本自振周期将发生变化,相应的地震作用也随着减小。在后续的地震动过程中,将主要由承受重力荷载的框架作为第二道抗震防线来承担水平地震作用,为了防止框架倒塌,规范规定了框架所承担的水平地震作用不能小于总水平地震作用的 10%。

需要说明的是,在选择第一道抗震防线时,应优先选择不负担或者少负担重力荷载的构件作为第一道抗震防线。例如,在框架填充墙体系中,选择填充墙作为第一道抗震防线,填充墙是没有承受重力荷载的。地震引起的建筑物的倒塌,重力荷载在其中起到了关键作用。地震引起建筑物的严重破坏,而实际上,建筑物最后的倒塌则是由于结构体系丧失承受重力荷载的能力而导致的。所以在框架—剪力墙体系中,应该选用剪力墙作为第一道抗震防线,在框架筒体结构体系中,选用实壁筒体作为第一道抗震防线。

但是对于有些结构体系就只有一道抗震防线。如框架结构体系，框架就成为体系中唯一的一道抗震防线，此时在进行结构设计时，就应该采用“强柱弱梁”的延性框架。因为对于框架体系而言，其中的框架梁只承担其自身所在层的重力荷载，而框架柱则承担其自身以上各层的重力荷载。框架梁的破坏只影响到该层，而且地震震害经验表明，只要梁端部钢筋没有发生锚固失效，梁的悬索作用也能保持该楼层不致于立即坍塌。而一旦框架柱发生破坏情况将严重得多，那样将危及整个建筑的安全。对于强柱弱梁延性框架结构体系而言，框架梁先于框架柱屈服和破坏，用梁的屈服和破坏来吸收和消耗强烈地震输入的能量，使得框架柱退居到第二道防线的位置。

利用赘余杆件可以增加结构的抗震防线。如果结构体系没有适当的赘余度，在出现塑性铰时就会形成几何可变的“机构”，失去承载能力而倒塌。一般说来，超静定次数越高，对抗震越有利，但这不是充分条件，主要与形成屈服区塑性铰的部位直接相关。如在框架或框架—剪力墙体系中，当框架梁端或连梁端部出塑性铰时，均不致于导致整个结构体系的破坏。按以上设计思想，要求在结构遭遇罕遇地震时，仅在预计部位出现塑性铰而不致使得结构整体倒塌。例如，在框架—剪力墙结构体系中，框架和剪力墙之间用连梁连接，通过适当的设计计算和配筋，可以使得连梁具有较好的延性，并且在地震过程中，这些处于次要地位的连梁可以先于主体结构进入屈服和破坏，利用连梁的屈服和破坏吸收和消耗地震输入的能量，以达到保护主体结构的目的。此外，连梁的设计相当于增加了一道抗震防线，从而使得主体结构构件退居第二道抗震防线。应该指出，在没有采用连梁之前，由于主体结构已经是静定或者超静定结构，连梁的屈服和破坏并不会影响整体结构的稳定，只是减少了主体结构的赘余度。利用这种设计思想，可以在一定程度上达到减轻建筑物的破坏，防止建筑物倒塌的目的，也是对付罕遇地震的一种经济和有效的手段。这种抗震设计思想已经成功运用到实际工程的结构设计中，并取得了良好的经济效果。

## 5.2 非结构构件的处理

所谓非结构构件，一般是指在结构分析中不考虑重力荷载以及风、地震等水平荷载的部件，例如建筑幕墙、围护墙、内隔墙、楼梯踏板、框架中的填充墙、女儿墙、雨篷、商标、广告牌、顶篷支架、大型储物架等。在地震发生时，这些非结构构件或多或少地参与工作，从而在结构的某些局部部位产生震害。根据地震震害经验，妥善处理这些非结构构件，减轻地震震害将产生良好的抗震效果。

对于有些非结构构件，必须考虑其对结构抗震性能的影响，这些影响有有利的一面，也有不利的一面，在设计中必须予以充分考虑。例如，框架结构体系中的填充墙，将使得结构的抗侧移刚度增加，自振周期减小，水平地震作用增加，

增加幅度可以达到 10%~20%，这是填充墙在地震中发挥不利作用的方面。另一方面，填充墙在没有破坏之前也可以承担部分水平地震作用，从而减小框架所承担的地震作用，由于填充墙增加了结构体系抗侧移刚度，将减小整体结构的水平位移，这是填充墙在地震中发挥有利作用的方面。此外，通过前面的分析可以看到，填充墙在框架填充墙体系中充当了第一道抗震防线的作用，并在地震中发生开裂和破坏，吸收了大量的地震能量，起到了保护主体结构的作用。由于填充墙在没有发生开裂和破坏之前具有较大的抗侧移刚度，其布置将改变框架的剪力分布。因此，填充墙在结构的平面布置上应力求均匀对称，减小偏心，在结构的竖向布置上应力求连续贯通，避免发生刚度突变。填充墙的布置还要注意可能使得部分框架柱形成短柱。短柱在地震中将承担比较大的剪力，并且往往发生剪切破坏。因此在框架填充墙结构体系中，应该采用有效措施防止框架柱发生短柱破坏，采用贴砌围护墙方案或者采用填充墙和框架柱柔性连接方案等。

建筑幕墙在设计中尽管考虑了风荷载的作用，但是往往没有考虑其地震作用。在强烈地震中往往发生幕墙挤碎和掉落现象。因此在设计中应该尽量考虑结构在地震中的变形，并采取可靠的连接措施，防止幕墙在地震的破坏和跌落。

建筑非结构构件的预埋件、锚固件的部位，应采取加强措施，以承受建筑非结构构件传给主体结构的地震作用。非承重墙体的材料、选型和布置，应根据设防烈度、房屋高度、建筑体型、结构层间变形、墙体自身抗侧力性能的利用等因素，经综合分析确定。

建筑墙体材料的选用应符合下列要求：

(1) 混凝土结构和钢结构的非承重墙体应优先采用轻质墙体材料，以减轻建筑结构的自重，从而降低水平地震作用。

(2) 单层钢筋混凝土柱厂房的围护墙宜采用轻质墙板或钢筋混凝土大型墙板，外侧柱距为 6m 时应采用轻质墙板或钢筋混凝土大型墙板；不等高厂房的高跨封墙和纵横向厂房交接处的悬墙宜采用轻质墙板，8 度时应采用轻质墙板。

(3) 钢结构厂房的围护墙，8 度时应宜采用轻质墙板或与柱柔性连接的钢筋混凝土墙板，应采用嵌砌砌体墙；9 度时应宜采用轻质墙板。

刚性非承重墙体的布置，应避免使结构形成刚度和强度分布上的突变。

(4) 单层钢筋混凝土柱厂房的刚性围护墙沿纵向宜均匀对称布置。墙体与主体结构应有可靠的拉结，应能适应主体结构不同方向的层间位移；8 度时，应具有满足层间变位的变形能力，与悬挑构件相连接时，尚应具有满足节点转动引起的竖向变形的能力。外墙板的连接件应具有足够的延性和适当的转动能力，宜满足在设防烈度下主体结构层间变形的要求。

(5) 砌体墙壁应采取减少减少对主体结构不利的影响，并应设置拉结筋、水

平系梁、圈梁、构造柱等与主体结构可靠拉结。

(獾 各类顶棚的构件与楼板的连接件，应能承受顶棚、悬挂重物和有关机电设施的自重和地震附加作用；其锚固的承载力应大于连接件的承载力。

(源 悬挑雨篷或一端由柱支承的雨篷，应与主体结构可靠连接。

(缘 预制墙板、附属于楼屋面的悬臂构件和大型储物架的抗震构造，应符合相关专门标准的规定。

## 规范 建筑材料的选择和施工质量

抗震结构在材料选用、施工质量，特别是材料的使用上有其特殊要求。仅仅从抗震的角度来考虑，作为一种良好的建筑材料，应该具备如下性能要求：①材料本身的延性好，延性系数高；②材料强度和质量的比值要大；③材料质量均匀；④材料性质为各向同性；⑤构件的连接具有整体性和较好的延性，能够充分发挥材料的强度和变形。

按照上述标准要求来衡量目前常用的结构材料，依照其抗震性能的优劣，钢结构最好，现浇钢筋混凝土、装配式钢筋混凝土和预应力混凝土结构次之，配筋砌体结构和砌体结构较差。钢结构具有良好的延性，连接可靠，材料的匀质性好，为各向同性材料，在历次地震中的表现也较好。现浇钢筋混凝土结构整体性好，造价低廉，材料容易得到，具有较大的抗侧移刚度，产生较小的变形，如果设计得当，也能够形成较好的延性，因此现浇钢筋混凝土结构在地震区得到了广泛的应用。但是，混凝土结构也具有其自身的缺点，刚度随着结构构件的开裂和破坏将降低较多，自重较大，难于修复等。随着科学和技术的发展，钢筋混凝土材料的某些缺点在一定程度上得到了解决。例如，自重较大则采用轻骨料混凝土，延性较差则在混凝土搅拌时加入钢纤维改善其延性等。装配式混凝土结构的最大缺点就是其整体性能和连续性较差，节点的强度和变形能力低于构件本身的强度和变形能力，难于满足“强节点弱杆件”的抗震概念设计要求，在地震中往往成为薄弱环节而发生破坏。因此在地震区采用装配式混凝土结构应该慎重。现在，一般通过采用现浇柱和预制梁的半装配式框架结构，其整体性和连续性都明显好于全装配式钢筋混凝土结构。预应力混凝土结构在没有开裂时能够承受较大的变形，能够存储较多的弹性能，但是其一旦破坏，多呈现明显的脆性。

抗震结构对材料、施工质量的要求应在设计文件上详细注明，并应保证切实执行。对钢筋接头及焊接质量应满足规范要求。对构造柱、芯柱及框架的施工、对砌体房屋纵墙及横墙的交接部位等应保证施工质量。结构材料性能指标应符合下列最低要求：①烧结普通粘土砖和烧结多孔粘土砖的强度等级不应低于 砌块 其砌筑砂浆强度等级不应低于 砌块 ②混凝土小型空心砌块的强度等级不应低于 砌块 其砌筑砂浆强度等级不应低于 砌块 ③混凝土的强度等级，框支梁、

框支柱及抗震等级为一级的框架梁、柱、节点核芯区，不应低于 二级 构造柱、芯柱、圈梁及其他各类构件不应低于 二级 ④抗震等级为一、二级的框架结构，其纵向受力钢筋采用普通钢筋时，钢筋的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值不应小于 1.25 且钢筋的屈服强度实测值与强度标准值的比值不应大于 1.30 ⑤钢材的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值不应小于 1.25 ⑥钢材应有明显的屈服台阶，且伸长率应大于 25%；⑦钢材应有良好的可焊性和合格的冲击韧性。

# 第 8 章 结构地震反应分析和结构抗震验算

地震释放能量，以地震波的形式从震源向四周扩散，引起地面上原来静止的建筑物发生振动。地震引起的建筑物振动，称为地震反应，地震反应包括建筑物在地震中所产生的位移、速度、加速度以及在结构构件中所产生的内力，包括弯矩、剪力、扭矩和拉力、压力等。由于地震所产生的地面位移、速度和加速度等随着时间的变化而变化，因此，结构的地震反应实际上是一种动力反应，与结构的静力反应相比要复杂得多。结构的动力反应和静力反应的根本区别在于，动力反应不仅与外荷载的大小以及结构本身的强度和刚度有关，而且和外荷载的频谱特性、持续时间以及结构本身的动力特性包括阻尼和自振频率等相关。地震作用的实质是地震在结构中产生加速度和结构质量的乘积所形成的惯性力。研究这种惯性力的大小，必须借助于结构体系的微分方程。

## 8.1 结构抗震设计理论的历史发展和回顾

我国在汉朝时期，就有张衡（公元 78—139 年）利用精铜铸成的地动仪来预测预报地震，但是结构抗震设计理论作为一门学科的研究至今尚不到 150 年的历史。随着数学、力学和计算机技术的发展，人们认识地震对于建筑物破坏作用的不断深化以及地震检测，人工模拟地震试验装置的广泛应用，结构抗震设计的理论也相应得到了迅速的发展，回顾并总结结构抗震理论的发展历史，有助于我们对于地震工程学以及工程抗震有一个全面的了解。近 150 年的结构抗震理论的发展，大体上可以划分为静力理论阶段、反应谱理论阶段和动力理论阶段。

### 8.1.1 静力理论阶段

水平静力理论开始于意大利，发展于日本。1926 年，日本学者大森房吉提出了震度法的概念，并在此基础上于 1931 年提出结构抗震的静力理论。该理论认为：假设建筑物为绝对刚体，建筑物和地面一起运动而没有相对位移，建筑物每一个部分和地面具有相同的加速度，并取地面的最大加速度用于结构的抗震计算。因此，作用于建筑物每一个楼层的水平地震作用就等于结构该层的质量  $m_i$  和地面的最大加速度  $a_g$  的乘积，即

$$F_i = \alpha_1 m_i a_g \quad (8.1.1)$$

式中  $\alpha_1$ ——地震系数，是地震地面最大加速度  $a_g$  和重力加速度  $g$  的比值，它

反映该地区地震的强烈程度,通常取  $0.1 \sim 0.4$

$\gamma$ ——第  $n$  楼层的集中重量。

从今天的观点来看,该种地震作用的计算理论具有很大的局限性,它忽略了结构本身动力特性的影响,将建筑物当成为完全刚性的,只对刚性建筑物地震作用的计算比较合理,对于柔性建筑物,如高层建筑和烟囱等的地震作用计算差距较大。地震系数的取值没有科学的依据,只是根据经验取值  $0.1 \sim 0.4$ 。但是,在当时却具有划时代的意义,也对今后抗震理论的发展具有重要的影响,是反应谱理论的萌芽。它把地震作用当作一种静力荷载作用在建筑物上进行结构设计,并且地震作用系数在一定程度上反映了地震的强烈程度,得到地震作用与结构的质量成正比等,在今天广泛采用的反应谱理论中仍然是正确的。

## 5.2 反应谱理论阶段

20 世纪 30 年代美国受到日本地震工程研究工作的启发,开展了强地震动加速度的观测和记录,1934 年取得了加利福尼亚地震波记录和其他一些具有重要意义的地震记录,地震工程学取得了巨大的进展。1935 年,美国 威尔逊教授提出了利用地震记录计算弹性反应谱的概念,使得结构抗震设计理论进入了反应谱理论阶段。20 世纪 50 年代,日本伊藤清将这一设想变为现实。由于反应谱理论正确地简单地反映了地震动的特性,并根据地震观测资料提出了实用数据,从而得到了国际上广泛的承认。在 20 世纪 50 年代中后期,这一理论取代震度法,被各国规范所广泛采用。到目前为止,反应谱理论仍然是我国和世界上许多国家结构抗震设计中地震作用计算的理论基础。反应谱理论考虑了结构的动力特性以及地震动的部分特性之间的动力关系,计算公式中仍然采用静力理论的形式。按照反应谱理论,作为一个单自由度弹性体系结构的地震作用为

云越噪(栽)郎

(5.2.1)

式中 噪——地震系数,意义和静力理论相同;

$\beta$  (栽)——是加速度反应谱 栽(栽) 和地震动最大加速度 栽的比值,它表示了地震时结构振动加速度的放大倍数。

反应谱理论计算结构的地震作用,形式简单,计算方便,考虑了结构的动力特性和地震动的动力特性,但是这种方法仍然将地震作用当作静力荷载来对待,只能是一种准动力理论。地震动的动力特性应该包括振幅、频谱特性和持续时间。在反应谱理论中,仅仅考虑了振幅和频谱特性对于结构地震作用的影响,而没有考虑到地震动持续时间对结构破坏累积的重要影响。反应谱理论是根据弹性结构的地震反应得到的,因此一般也只能计算结构的弹性地震反应,而当结构遇到强烈地震时往往进入弹塑性阶段。反应谱理论只能得到结构在弹性状态下最大地震反应,而不能给出结构反应的全过程,更不能给出地震过程中各构件进入弹

塑性状态的内力、变形，无法找出结构的薄弱环节。利用反应谱理论以及振型分解的原理，可以将单自由度体系的反应谱理论推广用于计算多自由度体系地震作用的计算，这就是振型分解反应谱法。它能够比较详细地考虑结构的动力特性，并根据结构的振型曲线来确定地震作用的分布，成为当前地震作用计算应用最为广泛的方法。

1.2.2 动力理论阶段

20世纪50年代中期以后，随着强烈地震的不断发生，地面和建筑物震动记录的不断积累，以及高层建筑、海洋石油平台、核电站等大量兴建，需要计算其在弹塑性状态下的变形以防止结构的倒塌。计算机技术的大发展，为动力理论阶段的到来提供了强大的技术支撑和物质基础。动力理论就是在结构中输入符合该结构所在场地条件的地震加速度记录，得到结构在各个时刻的地震反应。它克服了反应谱理论的不足，例如，它可以考虑地震动振幅、频谱特性和持续时间三要素，如果给出结构和构件的模型合理，动力理论可以较为准确地反应结构振动的全过程，包括变形和能量的积累和损耗；如果准确给出结构和构件的恢复力特性曲线，则可以比较准确、具体和细致地给出结构在地震动过程中的弹塑性地震反应，能够给出结构构件出现塑性铰的时间和顺序，从而可以判明结构的屈服机制，可以找出结构的薄弱环节，并能计算出柔弱楼层的塑性变形集中效应。动力分析方法也称为时程分析方法，它尽管具有比反应谱理论明显的优点，但是在分析中也需要注意：不同的地震波时程记录曲线输入到结构中，即使其最大振幅相同，将得到不同的计算结果，这是自然的，因为不同的地震波时程曲线将具有不同频谱特性和持续时间。因此，选择符合建筑物所在场地条件的地震波并对时程分析计算结果进行分析和判断就十分重要。此外，对于不同的结构和构件计算模型，将得到不同的计算结果，这就需要尽量做到结构和构件计算模型能够与实际吻合。再次，时程分析特别是弹塑性时程分析将耗费大量的机时，一般需要较大容量的计算机才能完成。这些缺点和局限在一定程度上制约了动力分析方法的应用。

1.2.3 结构地震作用计算的基本原则

《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）对于结构地震作用计算和抗震计算作出了原则的规定，也就是所谓的抗震设防三水准——“小震不坏，中震可修，大震不倒”和实现三水准设防目标的“两阶段设计”。“两阶段设计”具体来说就是采用小震的地震作用进行截面抗震承载力验算和弹性变形验算，地震作用的计算以弹性反应谱理论为基础，结构内力计算以线弹性理论为基础，结构构件的设计计算仍然采用各种静力设计规范的方法和指标；采用大震的地震作用进行结构



变形验算以防止结构的倒塌，对于脆性结构采用构造措施，对于延性结构，主要进行弹塑性变形验算，使得结构的弹塑性变形不超过允许的限值。

各类建筑结构地震作用应符合下列规定：① 一般情况下，应允许在建筑结构的两个主轴方向分别计算水平地震作用，并进行抗震验算。各方向的水平地震作用应由该方向抗侧力构件承担；② 有斜交抗侧力构件的结构，当相交角度大于 45° 时，应分别计算各抗侧力构件方向的水平地震作用；③ 质量和刚度分布明显不对称的结构，应计入双向水平地震作用下的扭转影响，其他情况，应允许采用调整地震作用效应的方法计入扭转影响；④ 高度大于 24m 的大跨度和长悬臂结构及 60m 以上的高层建筑，应计算竖向地震作用。其中 60m 以上采用隔震设计的建筑结构应按有关规定计算竖向地震作用。

各类建筑结构地震作用的计算，《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）规定可以采用以下三种方法进行计算：① 高度不超过 24m，以剪切变形为主且质量和刚度沿高度分布比较均匀的结构，以及近似于单质点体系的结构，可采用底部剪力法等简化方法；② 除①外的建筑结构，宜采用振型分解反应谱法；③ 特别不规则的建筑、甲类建筑和表 5.1.2 所列高度范围的高层建筑，应采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算，可取多条时程曲线计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值；④ 计算罕遇地震下结构的变形，应按有关规定，采用简化的弹塑性分析方法或弹塑性时程分析法。采用时程分析法时，应按建筑场地类别和设计地震分组选用不少于二组的实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲线，其平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符，其加速度时程的最大值可按表 5.1.2 采用。弹性时程分析时，每条时程曲线计算所得结构底部剪力不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%，多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%。

表 5.1.2 采用时程分析的房屋高度范围

烈度、场地类别	房屋高度范围 m
烈度Ⅰ、Ⅱ类场地和 6 度	跃 24m
烈度Ⅲ、Ⅳ类场地	跃 24m
7 度	跃 24m

表 5.1.2 时程分析所用地震加速度时程曲线的最大值（单位：m/s<sup>2</sup>）

地震影响	远震	中震	近震	烈度
多遇地震	0.8	1.0 (1.2)	1.2 (1.6)	1.6
罕遇地震	—	1.6 (2.0)	2.0 (2.5)	2.5

注：括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.20g 的地区。

图 1-1 单自由度体系的地震位移反应分析

图 1-2 地震作用下单自由度线弹性体系的振动微分方程

某些简单的建筑结构，例如单层单跨或多跨等高厂房、水塔等，结构的质量绝大部分集中在屋盖或储水柜处。对于这种结构进行动力分析时，可以将其视为单质点体系，其主要的物理力学特性是体系的质量、刚度或柔度、阻尼以及外部动力荷载。单自由度线弹性体系是最简单的动力学模型。体系的动力荷载可能是外荷载所引起，也可能是由于结构的基础运动所产生的等效荷载如地震作用。地震作用下单自由度线弹性体系的

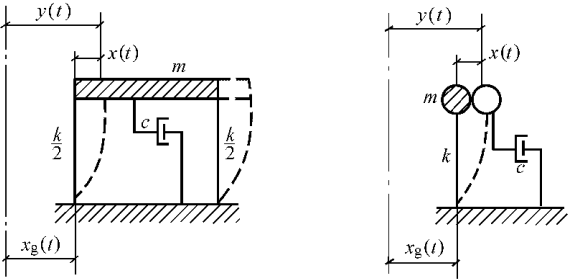


图 1-1 单自由度体系的地震分析模型

的振动问题可以取图 1-2 所示的简化模型。由于地震引起的地面运动相对于固定参考轴的基底位移用  $x_g(t)$  表示。设横梁的刚度为无穷大，整个结构的质量集中在横梁上，不考虑各杆件的轴向变形。结构上作用的力有：惯性力  $-m\ddot{x}_g(t)$ ，阻尼力（与速度成正比） $c\dot{x}(t)$ ，弹性恢复力  $kx(t)$ 。在这些力作用下处于动平衡状态，于是得到

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \tag{1-1}$$

而结构的总位移为基础的位移和结构的变形之和，即

$$x(t) = x_g(t) + u(t) \tag{1-2}$$

代入 (1-1) 式并整理得到

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{x}_g(t) \tag{1-3}$$

式中， $-m\ddot{x}_g(t)$  表示由于基底的扰动产生的等效荷载。结构的反应与在外荷载作用下产生的反应是一样的，不同之处在于此处的等效荷载等于质量和基础运动加速度的乘积。式 (1-3) 就是地震作用下单自由度线弹性体系的振动微分方程。当式 (1-3) 的右端为零时，就成为齐次微分方程

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \tag{1-4}$$

它描述了一个单自由度线弹性体系的自由振动。进一步，如果结构没有阻尼，则得到

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \tag{1-5}$$

即单自由度线弹性体系无阻尼的自由振动微分方程。

## 5.1.1 单自由度无阻尼线弹性体系的自由振动分析

在式 (5-1) 中, 令

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (5-2)$$

则有

$$x(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad (5-3)$$

其位移解答为

$$x(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad (5-4)$$

对上式求一次导数, 得到结构的速度解答为

$$\dot{x}(t) = -A \omega \sin \omega t + B \omega \cos \omega t \quad (5-5)$$

式中的积分常数  $A$ ,  $B$  可以由运动的初始条件确定。假设结构的初始位移和初始速度为

$$x(0) = x_0 \quad (5-6)$$

$$\dot{x}(0) = \dot{x}_0 \quad (5-7)$$

则可以确定积分常数  $A$ ,  $B$ , 再回代到 (5-4) 中得到

$$x(t) = x_0 \cos \omega t + \frac{\dot{x}_0}{\omega} \sin \omega t \quad (5-8)$$

如果设

$$x(t) = x_0 \cos \left( \omega t - \varphi \right), \quad \omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (5-9)$$

则 (5-8) 可写成

$$x(t) = x_0 \cos \left( \omega t - \varphi \right) \quad (5-10)$$

从上式可以看出, 结构按正弦 (或余弦) 曲线在平衡位置做来回往复的振动, 我们称之为简谐振动。描述简谐振动的有关基本参数包括:

(1) 周期、圆频率 (角频率)、频率。圆频率是结构在 1 秒内振动的次数, 用  $\omega$  表示, 单位是弧度/秒或 1/秒 (1/rad 或 1/s), 由式 (5-9) 得到

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (5-11)$$

周期是结构重复出现同一运动状态的最小时间间隔, 用  $T$  表示, 单位是秒 (泽

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (5-12)$$

频率是单位时间内 (一般是 1 秒) 振动的次数, 用  $f$  表示, 单位是赫兹 (1/s)

$$f = \frac{1}{T} \quad (5-13)$$

从式 (5-10) 可以看出, 结构的振动频率与结构的质量和刚度有如下关系: 结构的刚度越大 (或柔度越小), 频率就越高, 结构振动越快; 结构的质量越大, 频率就越低, 结构振动越慢。结构的自由振动频率是结构的一个重要的特性, 它

仅仅与结构自身内部固有的质量和刚度特性有关，而与结构的外部条件无关，包括激振的大小和频率、结构是否存在阻尼等因素无关，通常称之为无阻尼自振频率或固有频率。

(圆) 振幅、位相、初位相。振幅是结构振动时离开平衡位置的最大位移，一般用  $\omega$  表示。振幅的大小不仅与结构的固有特性有关，也与结构振动的初始条件有关，它反映了外界给予结构能量的大小。位相就是角度  $\omega$  贼垣  $\varphi$ ，单位为弧度或度，一个确定的位相对应于结构一个确定的运动状态。初位相是角度  $\varphi$ ，单位为弧度或度，它表示结构在开始振动时的运动状态。

圆圆圆 单自由度线弹性体系的地震位移分析

对式 (圆圆圆) 两边同时除以质量  $\omega$ ，并令

$$\xi = \frac{\omega}{\omega_0} \tag{圆圆圆}$$

得到

$$\ddot{u} + \omega_0^2 u = \ddot{u}_g \tag{圆圆圆}$$

式中  $\xi$ ——为结构体系的阻尼比，一般工程结构阻尼比为 圆圆圆~ 圆圆圆之间，通常取 圆圆圆

单自由度线弹性体系的地震反应分析就是对微分方程 (圆圆圆) 进行求解。微分方程 (圆圆圆) 为常系数二阶非齐次线性方程，根据微分方程的理论，其解答包括两个部分：一部分为对应于 (圆圆圆) 相应齐次方程的通解，另一部分为方程的特解。前者为结构体系的自由振动，由于阻尼的存在，它将随着时间而很快衰减；后者为结构体系的强迫振动，它是使得结构破坏的根本原因。微分方程 (圆圆圆) 相应的齐次方程为

$$\ddot{u} + \omega_0^2 u = 0 \tag{圆圆圆}$$

其通解可以通过结构动力学进行求解，得到

$$u = A e^{\omega_0 t} + B e^{-\omega_0 t} \tag{圆圆圆}$$

式中  $\omega_0$ ——为单自由度有阻尼线弹性体系的圆频率，与无阻尼的自振频率的关系为

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_0^2 - \xi^2} \tag{圆圆圆}$$

由于工程结构的  $\xi$  一般很小，因此体系有阻尼的自振频率和无阻尼的自振频率十分接近，所以往往在计算中不考虑阻尼对自振频率的影响。

由于地震地面运动的加速度时程曲线  $\ddot{u}_g$  (贼) 是不规则的，一般要通过数值积分才能得到其解答。从式 (圆圆圆) 可以看出，只有当体系的初始位移或者初始速度不为零时，体系才会产生自由振动，而且振动幅值随着时间而衰减。由式

(5.4.4) 可以绘制出有阻尼体系自由振动的位移时程反应,如图 5.4.4 所示。可以看出它是一条逐渐衰减的振动曲线。此外,阻尼比  $\xi$  越大,振动将衰减越快,将不同的阻尼比代入 (5.4.3),体系将产生如下三种振动:

(1) 当  $\xi < 1$ ,  $\omega' > 0$ , 则体系将产生振动。

(2) 当  $\xi = 1$ ,  $\omega' = 0$ , 则体系将不振动,这种形式的阻尼称为过阻尼。

(3) 当  $\xi > 1$ ,  $\omega' < 0$ , 则体系也不产生振动,这时  $\xi$  越糟越糟越糟,糟越糟,称为临界阻尼,  $\xi = 1$  时称为临界阻尼比。

为了求得方程 (5.4.1) 的特解,先分析通解表达式 (5.4.2) 的组成。自由振动反应是由于体系具有初始位移和初始速度才产生的。如果体系只有初始速度而没有初始位移,则由于初始速度而产生的自由振动反应就是

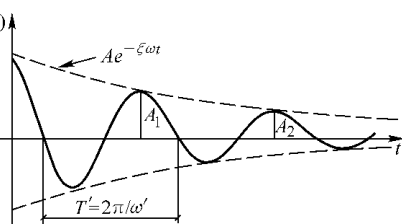


图 5.4.4 有阻尼体系的自由振动位移时程反应

$$\text{增越} \frac{\text{原} \sin(\omega' \tau)}{\omega'} \quad (5.4.5)$$

我们可以将地震动加速度时程曲线看成是无数多个连续作用的微分脉冲组成,如图 5.4.5 所示。图中的阴影部分就是一个微分脉冲,它在  $\tau$  时刻作用在体系上,作用时间为  $d\tau$ ,大小为  $\ddot{x}_g(\tau) d\tau$ 。到  $\tau + d\tau$  时刻微分脉冲作用结束,体系将在此基础上产生自由振动。如果能够将这些微分脉冲的自由振动叠加在一起就可以得到方程 (5.4.1) 的特解。单一微分脉冲作用后体系的自由振动可以通过式 (5.4.5) 得到。体系在微分脉冲作用后的初始速度可以由冲量定理得到,即

$$\text{增越} \frac{\text{原} \sin(\omega' \tau)}{\omega'} \quad (5.4.6)$$

将式 (5.4.6) 代入式 (5.4.5),并注意微分脉冲作用的时间,可以得到一个微分脉冲作用后体系的自由振动为

$$\text{增越} \frac{\text{原} \sin(\omega' \tau)}{\omega'} \quad (5.4.7)$$

(5.4.7)

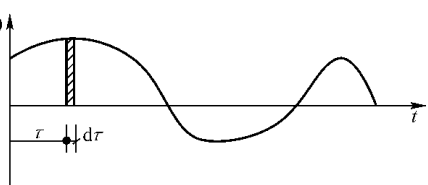


图 5.4.5 地震加速度时程曲线

将所有微分脉冲的作用叠加,实际上就是

对上式进行积分,可以得到单自由度体系的地震位移反应为

$$\text{增越} \frac{\text{原} \int_0^t \sin(\omega' \tau) \ddot{x}_g(\tau) d\tau}{\omega'} \quad (5.4.8)$$

这就是著名的杜哈美 (Duhamel) 积分。它与齐次方程的通解 (5.4.2) 一起构成

了微分方程 (式 10-10) 的解答，为

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} &= \frac{1}{m} \left( \frac{m \ddot{x}_g}{\omega^2} + \frac{m \ddot{x}_g}{\omega^2} \right) \\
 &= \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) + \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) \quad (式 10-11)
 \end{aligned}$$

10.1 单自由度体系的水平地震作用和反应谱

10.1.1 单自由度线弹性体系水平地震反应

式 (式 10-11) 为单自由度线弹性体系地震作用下的位移反应，将式 (式 10-11) 对时间求导数，可以得到单自由度线弹性体系地震作用下的速度反应，为

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \frac{1}{\omega} \ddot{x}_g(\tau) + \frac{1}{\omega} \ddot{x}_g(\tau) \\
 &= \frac{\xi \omega}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) + \frac{\xi \omega}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) \quad (式 10-12)
 \end{aligned}$$

将式 (式 10-12) 和式 (式 10-11) 代入体系的微分方程 (式 10-10)，可以得到单自由度线弹性体系的绝对加速度反应，为

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} &= \ddot{x}_g + \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) + \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) \\
 &= \ddot{x}_g + \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) + \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) \quad (式 10-13)
 \end{aligned}$$

要得到单自由度体系的地震反应就必须计算出式 (式 10-12)、式 (式 10-12) 和式 (式 10-13)。由于地震加速度时程曲线是数值的（通过地震观测得到，其时间间隔一般为 0.02s），必须采用数值积分才能得到。目前，一般是将加速度时程曲线  $\ddot{x}_g(\tau)$  划分为  $\Delta\tau$  的时段而对微分方程直接积分得到地震反应。

为了简化计算，将式 (式 10-12) 和式 (式 10-13) 做如下简化处理：由于阻尼比  $\xi$  一般比较小，可以忽略上述两式中带有的  $\xi$  和  $\xi\omega$  两项；由于  $\omega_1$  和  $\omega$  十分接近，所以认为二者相等，用  $\omega_1$  代替  $\omega$ ，这样做并不会影响积分的最大值。因为对于结构设计来说，工程技术人员最为关心的是结构在整个地震过程中的最大反应。取式 (式 10-12)、式 (式 10-12) 和式 (式 10-13) 的最大值，得到单自由度线弹性体系在地震作用下的最大位移反应  $x_m$ 、最大速度反应  $\dot{x}_m$  和最大绝对加速度反应  $\ddot{x}_m$  为

$$\begin{aligned}
 x_m &= \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) + \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) \\
 &= \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) + \frac{1}{\omega^2} \ddot{x}_g(\tau) \quad (式 10-14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_{\text{max}} &= \frac{1}{\omega} \sqrt{\int_0^{\infty} \ddot{z}(\tau) \ddot{z}(\tau + \frac{\pi}{\omega}) d\tau} \quad (5.2.10) \\ \ddot{z}_{\text{max}} &= \omega \sqrt{\int_0^{\infty} \dot{z}(\tau) \dot{z}(\tau + \frac{\pi}{\omega}) d\tau} \quad (5.2.11) \end{aligned}$$

由上述三式可以得到

$$\dot{z}_{\text{max}} = \omega z_{\text{max}} \quad (5.2.12)$$

可以看出,当地面加速度时程曲线  $\ddot{z}(\tau)$  已经选定,阻尼比  $\xi$  给定,如为 0.05 时,则最大位移反应  $z_{\text{max}}$ 、最大速度反应  $\dot{z}_{\text{max}}$  和最大绝对加速度反应  $\ddot{z}_{\text{max}}$  就仅仅是体系自振频率  $\omega$  或自振周期  $T$  的函数。以最大绝对加速度反应  $\ddot{z}_{\text{max}}$  为例,对应每一个单自由度线弹性体系的自振周期  $T$  都可以利用式 (5.2.12) 求得对应于某一地震加速度时程曲线的最大绝对加速度反应  $\ddot{z}_{\text{max}}(T)$ 。以体系的自振周期  $T$  为横坐标,最大绝对加速度反应  $\ddot{z}_{\text{max}}(T)$  为纵坐标,可以绘制一条曲线,称为对应于某一地震加速度时程曲线的拟加速度反应谱。所谓“反应谱”就是单自由度线弹性体系在给定的地震作用下某个最大反应量与体系自振周期的关系曲线。用同样的方法也可以得到位移反应谱和拟速度反应谱。在速度反应谱和加速度反应谱前加“拟”字,是表示这两种反应谱都是经过近似处理后得到的。习惯上,将地震加速度反应谱简称为地震反应谱。

将体系受到的最大惯性力定义为单自由度体系的地震作用,也就是说

$$F_{\text{max}} = \ddot{z}_{\text{max}} \quad (5.2.13)$$

将单自由度体系在地震作用下的运动方程式 (5.2.1) 改写为

$$\ddot{z} + 2\xi\omega\dot{z} + \omega^2 z = \ddot{z}_{\text{max}} \quad (5.2.14)$$

注意到体系振动的一般规律为加速度最大时,其速度最小,于是上式又可以近似写成

$$\ddot{z} + \omega^2 z = \ddot{z}_{\text{max}} \quad (5.2.15)$$

所以得到

$$z = \frac{\ddot{z}_{\text{max}}}{\omega^2} \quad (5.2.16)$$

上式说明,当得到结构的地震作用后,可以按静力的计算方法得到结构的最大位移反应,于是问题得到了解决。通过前述方法得到体系的加速度反应谱  $\ddot{z}_{\text{max}}(T)$ ,然后将其当作静力作用在体系上,按照常规的方法计算体系的位移和内力等。

地震反应谱可以理解为一个确定的地震动加速度记录  $\ddot{z}(\tau)$ ,通过一个阻尼比相同但自振周期  $T$  不同的各个单自由度体系所引起的最大加速度反应与相应体系自振周期之间的关系曲线。从式 (5.2.12) 可以看出,影响地震反应谱的因素包括两个方面,分别为体系的阻尼比  $\xi$  和地震动的加速度记录  $\ddot{z}(\tau)$ 。从单

自由度体系振动分析可知，一般体系的阻尼比越小，体系的加速度反应越大，地震反应谱也越大。其次，地震动的加速度记录  $\ddot{x}_g$ （ $\ddot{x}_g$  不同，地震反应谱也不同，也就是说，地震反应谱总是与一定的地震动相联系。影响地震动的因素也将影响地震反应谱。影响地震动的因素主要有振幅、频谱特性和持续时间。

研究表明，地震动的振幅对地震反应谱的影响是线性的，也就是说，地震动振幅越大，地震反应谱也越大，它们之间为线性关系。地震动振幅仅仅对地震反应谱的大小有影响而不影响它的形状。

地震动实际上是由许多频率不同的简谐振动合成的，通过频谱分析可以得到某一个地震动的频谱特性，即其主要的频率成分及其分布。由共振原理可以知道，地震反应谱的峰值将分布在地震动的主要频率成分段上。地震动不同，其主要的频率成分及其分布不同，从而地震反应谱的峰值的位置也不同。也就是说，地震动的频谱特性影响地震反应谱的形状。

地表土对于基岩入射的地震波具有放大和滤波的作用。由于表层土的滤波作用，使坚硬场地土地震动以短周期运动为主，而较弱场地土则以长周期为主。又由于表层土的放大作用，使坚硬场地土震动加速度幅值在短周期内局部增大，从而坚硬场地的地震反应谱曲线的特征是短周期范围呈锐峰型，长周期范围内幅值急剧降低。同理，由于较弱场地土地震动加速度幅值在长周期范围内局部增大，使软弱场地的加速度反应谱曲线特性是长周期范围内呈微凸的缓丘型。当地震波中占优势的波动分量与建筑物的自振周期相接近时，建筑物将由于共振效应而受到非常大的地震作用，导致建筑物出现震害。由此可以较好地说明，坚硬场地土自振周期短的刚性建筑物一般震害较重，而较弱场地土长周期的延性建筑物震害也较重。另外，在地震作用下建筑物开裂或损坏而使其刚度下降，自振周期增大。如果在地震过程中，建筑物自振周期由  $T_1$  增至  $T_2$ ，由地震反应谱曲线可知，坚硬场地上的建筑物所受到的地震作用将大大减小，结构原有损伤不再加重，建筑物只受到一次性破坏。与此相反，在上述过程中，软弱场地上的建筑物所受到的地震作用有所增加，使建筑物损伤进一步加重。所以，一般而言，软土地基上的建筑物震害大于硬土地基上的建筑物震害。

地震动的持续时间影响单自由度体系地震反应的循环次数，一般对线弹性单自由度线体系的最大反应影响不大，因而地震动的持续时间对地震反应谱的影响较小。

图 10-1-1 设计反应谱

从理论上来看，有了地震反应谱就可以计算单自由度体系的地震作用了，即 
$$F_E = \alpha \cdot G$$
（ $\alpha$  为地震影响系数， $G$  为重力荷载代表值）

但是，通过前面的分析可知，地震反应谱受体系的阻尼比、地震动的振幅、频谱



特性等因素的影响。进一步研究表明,地震动的频谱特性又取决于震源机制、传播途径以及地震波的反射、散射和局部地质条件等很多因素。不同的地震加速度记录,将得到不同的地震反应谱。在进行抗震分析和设计时,不可能知道将发生的地震加速度记录如何,因此无法确定采用相应的地震反应谱。直接利用地震反应谱来进行结构的抗震设计是不现实的,而需要研究专门的可供抗震设计采用的反应谱,称为设计反应谱。为此将式(5.1.1)改写为

$$S_a = \frac{S_{a0}}{S_{a1}} \cdot \frac{S_{a2}}{S_{a3}} \cdot S_{a4} \quad (5.1.2)$$

式中  $S_{a0}$ ——水平地震作用标准值(晕);

$S_{a1}$ ——集中于质点处的重力荷载代表值(晕);

$S_{a2}$ ——重力加速度,  $S_{a3}$ ——地震系数;

$S_{a4}$ ——地震系数,为地震动加速度记录的最大值与重力加速度的比值,没有量纲,即

$$S_{a4} = \frac{S_{a5}}{g} \quad (5.1.3)$$

$\beta$ ——动力系数,为单自由度线弹性体系的最大绝对加速度反应与地面运动最大加速度的比值,没有量纲,即

$$\beta = \frac{S_{a6}}{S_{a4}} \quad (5.1.4)$$

通过地震系数  $S_{a4}$  可以将地震动振幅的影响从地震反应谱中剥离出来。一般而言,地震烈度越高,地震动振幅就越大。根据统计分析,烈度每增加一度,地震系数就大致增加一倍。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)采用的地震基本烈度和地震系数的对应关系见表 5.1.5

表 5.1.5 基本烈度与地震系数的关系

基本烈度	远	苑	愿	怨
地震系数 $S_{a4}$	0.09	0.16(0.25)	0.25(0.40)	0.40

动力系数  $\beta$  (栽) 的实质就是加速度动力放大系数。动力系数  $\beta$  (栽) 中不包括地震动振幅的影响。为了使得动力系数能够用于结构的抗震设计,进行如下处理:

(员) 取同样场地条件下的许多加速度记录,并取结构的阻尼比为 0.05,得到该阻尼比的地震反应谱  $S_{a7}(\xi)$  |  $\xi=0.05$

(圆) 将地震反应谱  $S_{a7}(\xi)$  |  $\xi=0.05$  除以相应加速度记录的最大加速度  $|S_{a8}|$  |  $\xi=0.05$ ,得到该条加速度记录的动力系数  $\beta_{a8}(\xi)$  |  $\xi=0.05$

(猿) 进行统计分析取综合平均得到  $\tilde{\beta}(\xi)$ , 即

$$\tilde{\beta}(\text{裁}) \text{越} \frac{\sum_{\text{量级}}^{\text{灶}} \beta_{\text{量}}(\text{裁})}{\text{灶}}$$

(量级源)

(源 结合经验判断给予“平滑化”得到“标准反应谱” $\overline{\beta}(\text{裁})$ ，就可以供抗震设计应用了。为了便于应用，引入地震影响系数，其为地震系数和动力系数的乘积，即

$$\alpha(\text{裁}) \text{越} \overline{\beta}(\text{裁})$$

(量级源)

称为设计反应谱。通过上述过程就可以得到地震影响系数曲线（设计反应谱曲线）。《建筑抗震设计规范》（即月知录一四四）采用的地震影响系数曲线如图 源源所示。地震影响系数应该根据烈度、场地类别、设计地震分组、结构自振周期和阻尼比确定。其水平地震影响系数最大值  $\alpha_{\text{量级}}$  按表 源四中数值采用。我国建筑抗震采用的是两阶段设计，第一阶段进行结构强度和弹性变形验算时采用多遇地震烈度，其 量级相当于基本烈度对应 量级的 量级；第二阶段进行结构弹塑性变形验算时，采用罕遇地震烈度，其 量级相当于基本烈度对应 量级的 量级。表 源四中水平地震影响系数最大值就是通过动力系数的最大值和相应 量级相乘得到的。

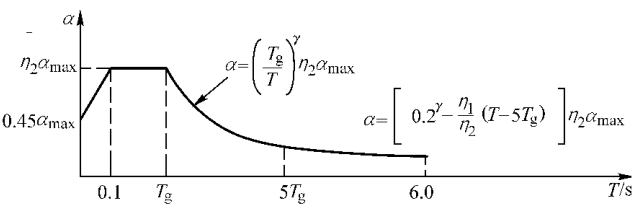


图 源源 地震影响系数曲线

表 源四 水平地震影响系数最大值  $\alpha_{\text{量级}}$

地震影响	远度	中度	轻度	极度
多遇地震	源源	源源(源源)	源源(源源)	源源
罕遇地震	—	源源(源源)	源源(源源)	源源

注：括号中的数值分别用于设计基本地震加速度为 源源和 源源的地区。

特征周期 裁应该根据场地类别和设计地震分组按表 源四确定，计算 源度和 源度罕遇地震作用时，特征周期应增加 源源。特征周期不仅与场地类别有关，而且与设计地震分组有关，可以更好反映震级大小、震中距和场地条件的影响。

前面已经提到，不同阻尼比的地震反应谱是不同的，因此地震影响系数也是有差别的，随着阻尼比的减小，地震影响系数将增大，而其增大的幅度则随着周期的增大而减小。当建筑结构的阻尼比不是 源源时，地震影响系数曲线的阻尼调整系数和形状参数进行如下调整：

表 5.1.4 特征周期 (单位：秒)

设计地震分组	场地类别			
	I	II	III	IV
第一组	0.25	0.30	0.35	0.40
第二组	0.30	0.35	0.40	0.45
第三组	0.35	0.40	0.45	0.50

(1) 曲线下降段的衰减指数取

$$\gamma \text{ 越 } 0.01 \text{ 越 } \frac{0.9 \xi}{\xi - 0.01} \quad (\text{见条文说明})$$

(2) 直线下降段的下降斜率调整系数为

$$\eta_{\text{质}} \text{ 越 } 0.9 \text{ 越 } \frac{0.9 \xi}{\xi - 0.01} \quad (\text{见条文说明})$$

当  $\eta_{\text{质}} \leq 0$  时，取 0

(3) 阻尼调整系数为

$$\eta_{\text{圆}} \text{ 越 } 0.01 \text{ 越 } \frac{0.9 \xi}{\xi - 0.01} \quad (\text{见条文说明})$$

当  $\eta_{\text{圆}} \leq 0$  时，取 0

此外对于周期大于 1.0s 的建筑物所采用的地震影响系数应进行专门的研究。

5.1.5 重力荷载代表值的确定

无论是计算水平地震作用标准值还是竖向地震作用标准值，都要将质量集中到质点处，这就是重力荷载代表值。规范规定，结构的重力荷载代表值应取结构和构配件自重标准值和各可变荷载组合值之和，即

$$G_{\text{质}} \text{ 越 } G_{\text{自}} + \sum_{i=1}^n \psi_{\text{自}} F_{\text{自}} \quad (\text{见条文说明})$$

式中  $G_{\text{自}}$ ——结构和构配件自重标准值；

$\psi_{\text{自}}$ ——第  $i$  个可变荷载  $F_{\text{自}}$  的组合值系数，见表 5.1.5

表 5.1.5 可变荷载组合值系数

可变荷载种类	组合值系数
雪荷载	0.5
屋面积灰荷载	0.5
屋面活荷载	不计入

可变荷载种类		组合值系数
按实际情况计算的楼面活荷载		0.9
按等效均布荷载计算的楼面活荷载	藏书库、档案库	0.85
	其他民用建筑	0.8
起重机悬吊物重力	硬钩起重机	0.95
	软钩起重机	不计入

注：硬钩起重机的吊重较大时，组合值系数应按实际情况采用。

多自由度线弹性体系运动方程的建立

对于质量比较集中的结构可看作单质点体系，单自由度模型可以给出比较准确的动力响应。对于质量比较分散的结构，如果还采用单自由度模型，则得到的动力响应将是近似的。很多结构必须用多自由度模型来描述，才能更好地反应结构的实际动力性能。下面以三个质点的多自由度体系，也就是房屋结构中比较常用的剪切型层模型为例，说明多自由度体系运动方程的建立过程。

图 10-10 为三层剪切型房屋的动力计算模型，质量集中在楼盖处。楼板的刚度无穷大，可以保证柱和楼板的节点不能转动。不考虑柱子的轴向变形，这样可以保证楼板在运动时保持水平。通过上述简化，可以得到三层剪切型层模型的动力计算简图，如图 10-11 所示，俗称为“糖葫芦模型”，其任意两个集中质量之间的刚度系数  $k$  为相邻楼层之间产生单位相对位移所需要施加的水平力。对于两端固定而不能转动的等截面直杆，刚度系数为

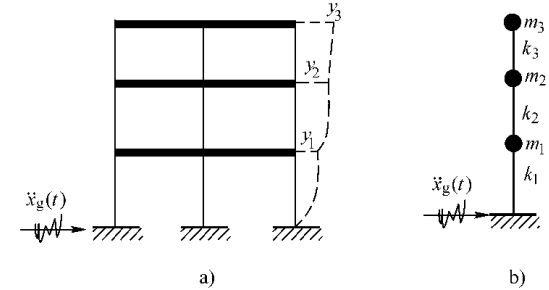


图 10-10 剪切型层模型  
a) 实际结构 b) 动力计算简图

对于一端固定一端铰支的等截面直杆，刚度系数为  $\frac{3EI}{l^3}$  (10-10)

对于一端固定一端铰支的等截面直杆，刚度系数为

对于一端固定一端铰支的等截面直杆，刚度系数为  $\frac{3EI}{l^3}$  (10-11)

式中  $EI$ ——直杆的抗弯刚度；  
 $l$ ——直杆的长度。

上述系数也称为抗侧移刚度。各层的刚度系数为该层所有各柱的抗侧移刚度

系数之和，称为层抗侧移刚度。根据每层楼板的隔离体动平衡条件得到

$$\begin{cases} \text{皂}_{\text{层}}[\text{噪}_{\text{层}}\text{垣}\text{噪}_{\text{层}}(\text{贼})\text{垣}\text{噪}_{\text{层}}\text{原}\text{噪}_{\text{层}}(\text{赠}_{\text{原}}\text{赠})]\text{越园} \\ \text{皂}_{\text{层}}[\text{噪}_{\text{层}}\text{垣}\text{噪}_{\text{层}}(\text{贼})\text{垣}\text{噪}_{\text{层}}(\text{赠}_{\text{原}}\text{赠})\text{原}\text{噪}_{\text{层}}(\text{赠}_{\text{原}}\text{赠})]\text{越园} \\ \text{皂}_{\text{层}}[\text{噪}_{\text{层}}\text{垣}\text{噪}_{\text{层}}(\text{贼})\text{垣}\text{噪}_{\text{层}}(\text{赠}_{\text{原}}\text{赠})]\text{越园} \end{cases} \quad (\text{式 } 5-10)$$

上式中 赠(贼) 为质点 蚤对于地面的位移。写成矩阵的表达式为

$$\text{配}_{\text{赠}}\text{贼}\text{垣}\text{运}_{\text{赠}}\text{贼}\text{越原}\text{配}_{\text{噪}}\text{贼} \quad (\text{式 } 5-11)$$

式中

$$\text{配}_{\text{赠}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{皂}_{\text{层}} & \text{园} & \text{园} \\ \text{园} & \text{皂}_{\text{层}} & \text{园} \\ \text{园} & \text{园} & \text{皂}_{\text{层}} \end{pmatrix}, \text{运}_{\text{赠}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} \\ \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} \\ \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} \end{pmatrix} \text{越} \begin{pmatrix} \text{噪}_{\text{层}}\text{垣}\text{噪}_{\text{层}} & \text{原}\text{噪}_{\text{层}} & \text{园} \\ \text{原}\text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}}\text{垣}\text{噪}_{\text{层}} & \text{原}\text{噪}_{\text{层}} \\ \text{园} & \text{原}\text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 5-12)$$

$$\text{赠}_{\text{贼}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{赠}(\text{贼}) \\ \text{赠}(\text{贼}) \\ \text{赠}(\text{贼}) \end{pmatrix}, \text{赠}_{\text{贼}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{赠}(\text{贼}) \\ \text{赠}(\text{贼}) \\ \text{赠}(\text{贼}) \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 5-13)$$

式中 配和 运——分别为质量矩阵和刚度矩阵；

赠(贼)和 赠(贼)——分别为位移列向量和加速度列向量；

噪——刚度系数，其含义为当质点 躁发生单位位移而其他质点保持不动时，在质点上 蚤所施加的水平力。

对于一般的多自由度系统，如果要考虑阻尼，则运动微分方程可以写为

$$\text{配}_{\text{赠}}\text{贼}\text{垣}\text{悦}_{\text{赠}}\text{贼}\text{垣}\text{运}_{\text{赠}}\text{贼}\text{越原}\text{配}_{\text{噪}}\text{贼} \quad (\text{式 } 5-14)$$

式中

$$\begin{aligned} \text{配}_{\text{赠}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{皂}_{\text{层}} & & & \text{园} \\ & \text{皂}_{\text{层}} & & \\ & & \ddots & \\ \text{园} & & & \text{皂}_{\text{层}} \end{pmatrix}, \text{悦}_{\text{赠}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{糟}_{\text{层}} & \text{糟}_{\text{层}} & \dots & \text{糟}_{\text{层}} \\ \text{糟}_{\text{层}} & \text{糟}_{\text{层}} & \dots & \text{糟}_{\text{层}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{糟}_{\text{层}} & \text{糟}_{\text{层}} & \dots & \text{糟}_{\text{层}} \end{pmatrix}, \\ \text{运}_{\text{赠}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} & \dots & \text{噪}_{\text{层}} \\ \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} & \dots & \text{噪}_{\text{层}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{噪}_{\text{层}} & \text{噪}_{\text{层}} & \dots & \text{噪}_{\text{层}} \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 5-15) \\ \text{赠}_{\text{贼}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{赠}(\text{贼}) \\ \dots \\ \text{赠}(\text{贼}) \end{pmatrix}, \text{赠}_{\text{贼}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{赠}(\text{贼}) \\ \dots \\ \text{赠}(\text{贼}) \end{pmatrix}, \text{赠}_{\text{贼}}\text{越} \begin{pmatrix} \text{赠}(\text{贼}) \\ \dots \\ \text{赠}(\text{贼}) \end{pmatrix} \quad (\text{式 } 5-16) \end{aligned}$$

式中 悦——阻尼矩阵；

质量矩阵——速度列向量。显然，很容易将（图 10-10）所示的刚度矩阵和质量矩阵推广到任意层数的剪切型层模型，即

$$\begin{aligned}
 & \text{质量矩阵} \begin{pmatrix} m_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_n \end{pmatrix}, \\
 & \text{刚度矩阵} \begin{pmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & k_n \end{pmatrix} \quad (\text{图 10-11})
 \end{aligned}$$

剪切型层模型的刚度矩阵比较特殊，为三对角矩阵。

建立剪切型层模型的运动微分方程也可以采用柔度矩阵的形式。其中结构的弹性特性采用柔度矩阵来描述。柔度矩阵中的每一系数称为柔度系数。柔度系数  $\delta_{ij}$  的力学含义为在节点  $i$  处施加一单位静荷载在节点  $j$  处所产生的位移。图 10-12 表示了相应单位荷载施加在结构每一个楼层的柔度系数。

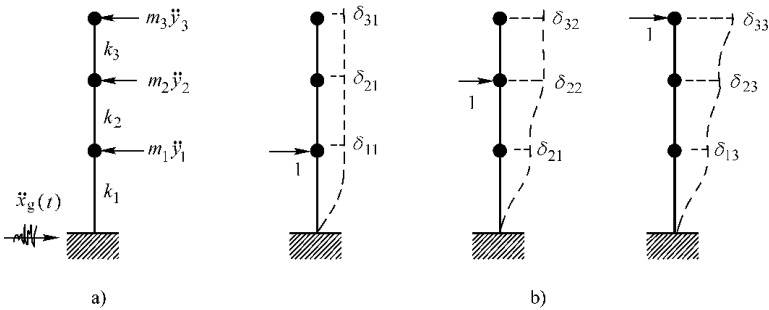


图 10-12 剪切型层模型柔度矩阵  
 静动力计算简图 柔度系数计算

运用叠加法，任意楼层的位移等于该层柔度系数与相应力的乘积之和，于是得到

$$\begin{cases} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{cases} \quad (\text{图 10-13})$$

写成矩阵的形式得到

$$\text{质量矩阵} \begin{pmatrix} m_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_n \end{pmatrix} \quad (\text{图 10-14})$$

$$\delta = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{pmatrix} \quad (5-10)$$

将 (5-10) 两边左乘  $\delta^{-1}$  得到

$$\delta^{-1} \delta = \delta^{-1} \delta^{-1} \delta = I \quad (5-11)$$

对照式 (5-11) 和式 (5-12), 得到

$$\delta^{-1} = \delta^{-1} \quad (5-13)$$

也就是说, 柔度矩阵和刚度矩阵互为逆矩阵, 因此柔度矩阵可以通过刚度矩阵求逆得到, 也可以从柔度系数的力学含义直接得到为

$$\delta = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{pmatrix} \quad (5-14)$$

可以看到无论是柔度矩阵还是刚度矩阵都是对称矩阵。但是, 对于剪切型层模型的刚度矩阵为三对角矩阵, 而柔度矩阵不再具有三对角的特性。显然也可以将三层剪切型层模型推广到任意多层的结构。对于任意多层的剪切型层模型的柔度矩阵请读者自行写出。

## 5.2 多自由度无阻尼线弹性体系自由振动

### 5.2.1 多自由度无阻尼线弹性体系自由振动运动微分方程的求解

上面我们推导了多自由度有阻尼体系的运动微分方程。对于多自由度无阻尼线弹性自由振动的方程, 从微分方程 (5-15) 中, 令阻尼矩阵和右端项为零, 并写成矩阵形式, 就可以得到

$$M \ddot{u} + K u = 0 \quad (5-16)$$

上式为齐次线性微分方程, 其通解可由  $n$  个特解的线性组合得到, 设其特解为

$$u = \phi \sin(\omega t + \varphi) \quad (5-17)$$

式中,  $\phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n]^T$  为振幅列向量。将式 (5-17) 代入式 (5-16), 可以得到

$$(-\omega^2 M + K) \phi = 0 \quad (5-18)$$

其频率方程为

$$\Delta(\omega) = \det(-\omega^2 M + K) = 0 \quad (5-19)$$

展开上述频率方程可得到一个  $\omega^2$  的  $n$  次代数方程，求解后得到  $n$  个频率，按从小到大的顺序排列为  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ，称之为第一频率、第二频率…。由  $n$  个频率可以求得  $n$  个自振周期  $T_i$ ，为

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \tag{5-10}$$

按从大到小的顺序排列为  $T_1, T_2, \dots, T_n$ ，称之为第一自振周期（或者称为基本自振周期）、第二自振周期…。对应于每一个频率  $\omega_i$  都有一个特解

$$X_i = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \tag{5-11}$$

根据线性微分方程的理论可得到式 (5-11) 的通解为

$$X = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \tag{5-12}$$

### 5.3.1 主振型

每一个频率  $\omega_i$  代入式 (5-10)，可以得到各质点对应的振幅向量  $A_i$ ，由于式 (5-10) 的系数行列式为零，方程组 (5-10) 没有唯一解，只能得到  $A_i$  的相对值，它与时间无关，且为常数。也就是说，在振动的过程中，各质点的位移相对值始终保持不变，称之为主振型，简称为振型。当体系按  $\omega_1$  振动时得到的  $A_1$  称为第一振型，也称为基本振型，当体系按  $\omega_2$  振动时得到的  $A_2$  称为第二振型，依次类推。一般而言，体系有多少个自由度就有多少个频率，对应就有多少个振型。频率和振型是体系的固有特性，与体系上是否作用外荷载及是否存在阻尼无关。由于在振动过程中某一振型各质点的位移相对值始终保持不变，且各质点速度也保持同一比例，因此只有质点的初位移和初速度的比值与振型的比值相同时，体系才会以该振型振动。在一般的初位移和初速度情况下，体系的振动将会包含所有振型。

### 5.3.2 主振型的正交性

设  $\omega_i$  对应的振型为  $A_i$ ， $\omega_j$  对应的振型为  $A_j$ ，并设  $\omega_i \neq \omega_j$ ，根据式 (5-10) 有

$$(-\omega_i^2 M) A_i = 0 \tag{5-13}$$

$$(-\omega_j^2 M) A_j = 0 \tag{5-14}$$

分别将式 (5-13) 两边左乘  $A_j^T$ ，式 (5-14) 两边左乘  $A_i^T$  得到

$$A_j^T (-\omega_i^2 M) A_i = 0 \tag{5-15}$$

$$A_i^T (-\omega_j^2 M) A_j = 0 \tag{5-16}$$

由于质量矩阵和刚度矩阵为对称矩阵，即  $M = M^T$ ， $K = K^T$ ，对式 (5-15) 转置，



得到

$$(\omega_{\alpha}^2 - \omega_{\beta}^2) \phi_{\alpha} = \omega_{\beta}^2 \phi_{\beta} \quad (5-10)$$

将式 (5-10) 与式 (5-11) 相减, 得到

$$(\omega_{\alpha}^2 - \omega_{\beta}^2) \phi_{\alpha} = \omega_{\beta}^2 \phi_{\beta} \quad (5-11)$$

注意到  $\omega_{\alpha} \neq \omega_{\beta}$ , 于是

$$\phi_{\alpha} = \phi_{\beta} \quad (5-12)$$

将式 (5-12) 代入式 (5-10) 得到

$$\omega_{\alpha}^2 \phi_{\alpha} = \omega_{\beta}^2 \phi_{\alpha} \quad (5-13)$$

由式 (5-12) 和式 (5-13) 可知, 对于多自由度体系的任意两个振型关于质量和刚度是正交的。振型的正交性为振型分解法提供了理论基础。对于振型正交的力学意义的理解, 将式 (5-13) 变为

$$\omega_{\alpha}^2 \phi_{\alpha} = \omega_{\beta}^2 \phi_{\alpha} \quad (5-14)$$

将  $\omega_{\alpha}^2 \phi_{\alpha}$ ,  $\omega_{\beta}^2 \phi_{\alpha}$  分别看作同一个结构上受到的两个荷载体系, 而将振型  $\phi_{\alpha}$ ,  $\phi_{\beta}$  分别看作两个荷载体系作用下产生的位移, 因而得到: 第  $\alpha$  振型的惯性力在第  $\beta$  振型的位移上所做的功等于第  $\beta$  振型的惯性力在第  $\alpha$  振型的位移上所做的功, 这就是功互等定理。

## 5.2 多自由度线弹性体系地震反应计算的振型分解反应谱法

多自由度体系的自由振动同单自由度体系自由振动一样将随着时间很快衰减, 我们并不感兴趣于此, 我们更关心多自由度体系的强迫振动。多自由度体系地震作用下的运动微分方程为

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = -M \ddot{u}_g \quad (5-15)$$

式中,  $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T$ , 为每一个元素均为  $n$  的列向量。运动微分方程 (5-15) 是以质点的位移  $u$  (取为坐标), 因此每一个方程中包含了所有的质点位移并耦联在一起, 必须联立求解, 这给计算带来不便。利用振型的正交特性并采用广义坐标我们将可以将联立方程组解耦, 从而使多自由度问题变为一系列单自由度体系来计算, 使计算简化, 这就是振型分解法的基本思路。

由线性代数的理论可知, 一个多自由度系统的各个振型是线性无关的, 因此各质点在任意时刻的位移  $u(t)$  可以通过其振型的线性组合来表示, 即

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i \eta_i(t) = \Phi \cdot \eta(t) \quad (5-16)$$

式中

$$\Phi = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n) \quad (10-10)$$

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (10-11)$$

矩阵  $\Phi$  是以振型为列，按从左到右的顺序排列而成的，称为振型矩阵。由于振型的正交性，很容易证明，这样形成的振型矩阵可以将质量矩阵和刚度矩阵通过下述变换变为对角矩阵，令

$$M \Phi^{-1} \Phi = \bar{M}, \quad K \Phi^{-1} \Phi = \bar{K} \quad (10-12)$$

称为广义刚度， $\bar{M}$  称为广义质量。可以证明  $\omega^2 = \bar{K} / \bar{M}$ 。证明如下：

将 (10-10) 两边左乘  $\Phi^{-1}$  展开得到

$$\Phi^{-1} (M \ddot{u} + K u) = \Phi^{-1} F \quad (10-13)$$

于是

$$\ddot{u} + \omega^2 u = \Phi^{-1} F \quad (10-14)$$

将式 (10-14) 写成矩阵的形式，则得到

$$\ddot{u} + \omega^2 u = \Phi^{-1} F \quad (10-15)$$

$$\ddot{u} + \omega^2 u = \Phi^{-1} F \quad (10-16)$$

为了使运动微分方程 (10-15) 可以解耦，我们假定阻尼矩阵为质量矩阵和刚度矩阵的线性组合，这样的阻尼矩阵能满足正交条件，即

$$C = \alpha M + \beta K \quad (10-17)$$

式中， $\alpha$  和  $\beta$  为比例常数。上述确定阻尼的方法称为 **瑞利阻尼**。由于用试验的方法确定阻尼矩阵中的各个系数是很困难的，与质量和刚度相比，阻尼对于结构动力反应的影响相对较小，而上述确定阻尼的方法既能使运动方程解耦，同时其中的系数又容易确定，因此得到了广泛的应用。将式 (10-15) 和式 (10-17) 代入微分方程式 (10-15)，得到

$$\ddot{u} + \alpha \ddot{u} + \beta \ddot{u} = \Phi^{-1} F \quad (10-18)$$

上式左右两端左乘  $\Phi$  得到

$$\ddot{u} + \alpha \ddot{u} + \beta \ddot{u} = \Phi^{-1} F \quad (10-19)$$

注意到式 (5-2-19) 和式 (5-2-20), 得到

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_3 & \alpha_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 \\ \gamma_3 & \gamma_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} \quad (5-2-21)$$

由于  $\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_3 & \alpha_4 \end{bmatrix}$  是对角矩阵, 实际上式 (5-2-21) 已经解耦, 得到

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} \quad (5-2-22)$$

根据式 (5-2-22), 上式可以进一步写成

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} \quad (5-2-23)$$

令

$$\alpha_1 = \alpha_1 \omega_1^2, \quad \alpha_2 = \alpha_2 \omega_2^2 \quad (5-2-24)$$

$$\gamma_1 = \gamma_1 \omega_1^2, \quad \gamma_2 = \gamma_2 \omega_2^2 \quad (5-2-25)$$

式中,  $\gamma_1$  称为第一振型的振型参与系数。式 (5-2-23) 可进一步写成

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix} \quad (5-2-26)$$

系数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  通常由第一和第二振型频率和阻尼比确定, 即

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_1 \omega_1^2 \\ \alpha_2 = \alpha_2 \omega_2^2 \end{cases} \quad (5-2-27)$$

由上述方程组可以解得

$$\alpha_1 = \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \gamma_1}, \quad \alpha_2 = \frac{\omega_2^2}{\omega_2^2 + \gamma_2} \quad (5-2-28)$$

由单自由度有阻尼体系的位移积分得到式 (5-2-29) 的解答为

$$\ddot{x} = \frac{\gamma_1}{\omega_1} \sin(\tau) \sin(\omega_1 \tau) + \frac{\gamma_2}{\omega_2} \sin(\tau) \sin(\omega_2 \tau) \quad (5-2-29)$$

$$\Delta(\tau) = \frac{\gamma_1}{\omega_1} \sin(\tau) \sin(\omega_1 \tau) + \frac{\gamma_2}{\omega_2} \sin(\tau) \sin(\omega_2 \tau) \quad (5-2-30)$$

式中  $\Delta(\tau)$  ——阻尼比为  $\xi$  的自振频率为  $\omega$  的单自由度体系的地震位移反应。

原多自由度体系的地震位移反应为

$$\ddot{x} = \sum_{i=1}^n \ddot{x}_i \gamma_i \Delta(\tau) \quad (5-2-31)$$

式中

$$\ddot{x}_i = \gamma_i \Delta(\tau) \quad (5-2-32)$$

仅仅与体系的第  $i$  阶自振频率有关, 称为体系第  $i$  阶振型的地震反应。从式

(式4-15)可以看出，多自由度体系的地震反应可以通过分解为各个振型的地震反应求解。也就是说，多质点线弹性体系质点  $\boldsymbol{\delta}$  的地震反应等于各振型参与系数与该振型相应的振子的地震反应的乘积，再乘以该振型质点  $\boldsymbol{\delta}$  的相对位移，然后相加。上述方法称为振型分解法。这种振型分解法不仅计算多质点体系的地震位移反应十分简便，而且为按反应谱理论计算多质点体系地震作用提供了便利条件。

由于各阶振型  $\boldsymbol{\phi}_i$  是相互独立的列向量，则单位列向量  $\boldsymbol{e}$  可以表示为各阶振型  $\boldsymbol{\phi}_i$  的线性组合，即

$$\boldsymbol{e}=\sum_{i=1}^n\boldsymbol{\phi}_i\boldsymbol{\gamma}_i\tag{4-16}$$

为了确定式中的待定常数  $\boldsymbol{\gamma}_i$ ，将上式左右乘  $\boldsymbol{\phi}_j^T$ ，得到

$$\boldsymbol{\phi}_j^T\boldsymbol{e}=\sum_{i=1}^n\boldsymbol{\phi}_j^T\boldsymbol{\phi}_i\boldsymbol{\gamma}_i=\boldsymbol{\phi}_j^T\boldsymbol{\phi}_j\boldsymbol{\gamma}_j\tag{4-17}$$

即得到

$$\boldsymbol{\gamma}_j=\frac{\boldsymbol{\phi}_j^T\boldsymbol{e}}{\boldsymbol{\phi}_j^T\boldsymbol{\phi}_j}=\boldsymbol{\gamma}_j\tag{4-18}$$

也就是说，式中的待定常数就是振型参与系数。将表达式 (式4-16) 展开，得到质点  $\boldsymbol{\delta}$  任意时刻的地震位移反应，为

$$\boldsymbol{\delta}=\sum_{i=1}^n\boldsymbol{\gamma}_i\boldsymbol{\phi}_i\ddot{\boldsymbol{u}}_g\tag{4-19}$$

式中， $\ddot{\boldsymbol{u}}_g$  为振型  $\boldsymbol{\phi}_i$  质点  $\boldsymbol{\delta}$  的振型位移。质点  $\boldsymbol{\delta}$  任意时刻的相对加速度反应为

$$\ddot{\boldsymbol{\delta}}=\sum_{i=1}^n\boldsymbol{\gamma}_i\boldsymbol{\phi}_i\ddot{\boldsymbol{u}}_g\tag{4-20}$$

由表达式 (式4-20) 可以将地震地面加速度记录写成

$$\ddot{\boldsymbol{u}}_g=\sum_{i=1}^n\boldsymbol{\gamma}_i\ddot{\boldsymbol{u}}_g\tag{4-21}$$

质点  $\boldsymbol{\delta}$  任意时刻的地震惯性力等于该质点的质量和相应的绝对最大加速度的乘积，所以

$$\begin{aligned} \boldsymbol{F}_i &= m_i[\ddot{\boldsymbol{u}}_g+\ddot{\boldsymbol{\delta}}]=m_i[\ddot{\boldsymbol{u}}_g+\sum_{j=1}^n\boldsymbol{\gamma}_j\boldsymbol{\phi}_j\ddot{\boldsymbol{u}}_g] \\ &= m_i\sum_{j=1}^n\boldsymbol{\gamma}_j[\boldsymbol{\phi}_j\ddot{\boldsymbol{u}}_g+\ddot{\boldsymbol{u}}_g] = \sum_{j=1}^n\boldsymbol{F}_{ij} \end{aligned}\tag{4-22}$$

式中， $\boldsymbol{F}_{ij}$  为第  $j$  振型质点  $\boldsymbol{\delta}$  任意时刻的地震惯性力，即

$$\boldsymbol{F}_{ij}=m_i\boldsymbol{\gamma}_j(\boldsymbol{\phi}_j\ddot{\boldsymbol{u}}_g+\ddot{\boldsymbol{u}}_g)\tag{4-23}$$

根据地震作用的定义，质点  $\boldsymbol{\delta}$  第  $j$  振型的地震作用是该振型的最大地震惯性力。

于是得到质点  $j$  第  $n$  振型的地震作用为

$$F_{jn} = \alpha_n \gamma_n \xi_n \frac{F_{Tn}}{G_j} \quad (5-5-1)$$

注意到  $\xi_n$  (阻尼比) 为  $\xi_n$ , 自振频率为  $\omega_n$  的单自由度体系的地震反应最大绝对加速度。由地震反应谱的定义得到

$$\xi_n = \frac{1}{2\zeta_n} \quad (5-5-2)$$

又根据设计反应谱和地震反应谱的关系可以得到

$$\xi_n = \frac{1}{2\zeta_n} = \frac{1}{2\zeta_n} \left( \frac{S_n}{S_{Tn}} \right)^{2\zeta_n} \quad (5-5-3)$$

式中  $S_n$ ——第  $n$  振型质点的水平地震作用标准值;

$\alpha_n$ ——相应于第  $n$  振型自振周期的地震影响系数;

$\xi_n$ ——第  $n$  振型质点的水平相对位移;

$\gamma_n$ ——第  $n$  振型的参与系数;

$F_{Tn}$ ——质点  $j$  的重力荷载代表值。

这就是《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010) 中振型分解反应谱法计算多自由度体系第  $n$  振型质点  $j$  地震作用的计算公式。式中  $\alpha_n$  可以根据单自由度体系的地震影响系数曲线确定,  $\gamma_n$  可以根据式 (5-5-4) 写出

$$\gamma_n = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{F_{Tn}}{G_j}}{\sum_{j=1}^m \frac{F_{Tn}}{G_j}} \quad (5-5-4)$$

求出第  $n$  振型第  $j$  质点上的地震作用后, 可以按照一般结构力学方法计算结构的地震作用效应  $S_{jn}$ 。规范根据随机振动理论, 得到估计多自由度体系最大地震作用效应的计算方法, 即“平方和的平方根”法 (SRSS 法), 其计算公式为

$$S_j = \sqrt{\sum_{n=1}^m S_{jn}^2} \quad (5-5-5)$$

式中  $S_j$ ——水平地震作用标准值的效应;

$S_{jn}$ ——第  $n$  振型水平地震作用标准值的效应。

要注意的是, 在计算过程中, 一定要先由各个振型的地震作用计算各个振型的地震反应, 再由地震反应组合为总的地震反应。一般来说, 结构的低阶地震反应大于高阶地震反应, 振型阶数越高, 振型地震反应越小。因此结构总地震反应以低阶振型地震反应为主, 在计算中可以只取前面  $m$  个振型地震反应进行组合, 但是当基本频率大于  $\omega_g$  或房屋高宽比大于  $\eta$  时, 振型个数应该适当增加。

例 5-1 用振型分解反应谱法计算如图 5-1 所示的三层剪切型结构在多遇地震作用下的最大底部切应力。其中,  $\alpha_1 = 0.16$ ,  $\alpha_2 = 0.065$ ,  $\alpha_3 = 0.035$ ,  $\alpha_4 = 0.02$ ,  $\alpha_5 = 0.01$ , 设防烈度为 8 度 (地震加速

度 0.05，Ⅰ类场地第一组，结构阻尼比为 0.05

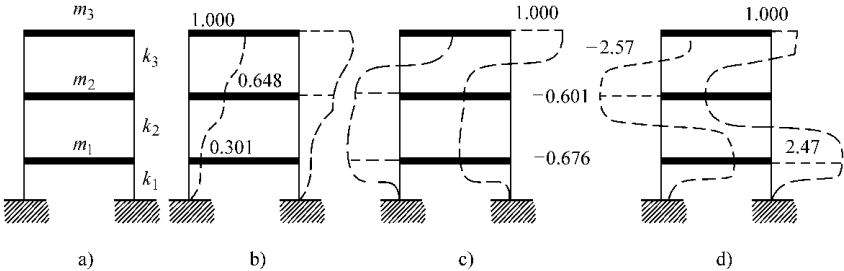


图 10-10 三层剪切层模型

算 计算简图 遭 第一振型 糟 第二振型 邕 第三振型

解：(员 写出体系的质量矩阵和刚度矩阵。

$$\text{酝越} \begin{pmatrix} 皂 & 园 & 园 \\ 园 & 皂 & 园 \\ 园 & 园 & 皂 \end{pmatrix} \text{越} \text{员伊} \begin{pmatrix} 圆 & 园 & 园 \\ 园 & 员 & 园 \\ 园 & 园 & 员 \end{pmatrix} \quad \text{(葬)}$$

$$\text{运越} \begin{pmatrix} 噪垣噪 & 原噪 & 园 \\ 原噪 & 噪垣噪 & 原噪 \\ 园 & 原噪 & 噪 \end{pmatrix} \text{越} \text{员伊} \begin{pmatrix} 猿 & 原员 & 园 \\ 原员 & 员 & 愿 \\ 园 & 原员 & 愿 \end{pmatrix} \quad \text{(遭)}$$

(圆 计算体系的自振频率(自振周期)和相应的振型。

由特征方程 渣原园 酝渣园, 令 λ 越园 得到

$$\begin{vmatrix} 缘原园 & 原园 & 园 \\ 原园 & 猿原员 & 原员 \\ 园 & 原员 & 员原λ \end{vmatrix} \text{越园} \quad \text{(糟)}$$

即

$$λ \text{猿原缘园垣苑缘园原园越园} \quad \text{(邕)}$$

得到

$$λ \text{员越园缘园}, λ \text{圆越员愿}, λ \text{猿越猿愿} \quad \text{(藻)}$$

由 ω 越√λ 得到

$$ω \text{员越员愿}, ω \text{圆越猿愿}, ω \text{猿越源愿} \quad \text{(枣)}$$

相应的自振周期为

$$栽 \text{越园缘}, 栽 \text{越园愿}, 栽 \text{越园苑} \quad \text{(号)}$$

对应的振型分别为

$$\text{粤} \text{越} \begin{pmatrix} 园 \\ 园 \\ 员 \end{pmatrix}, \text{粤} \text{越} \begin{pmatrix} 原园 \\ 原园 \\ 员 \end{pmatrix}, \text{粤} \text{越} \begin{pmatrix} 园 \\ 原园 \\ 员 \end{pmatrix} \quad \text{(澡)}$$

将各阶振型用图形表示，如图 10-9 所示。图中反应振型具有如下特点：对于剪切型层模型，其第  $j$  阶振型，在振型图上就有几个节点（振型曲线与体系平衡位置的交点）。利用振型图的这一特点可以定性判断所得振型正确与否。

(猿) 验证振型关于质量矩阵和刚度矩阵的正交性。

粤<sub>越</sub> 越<sub>越</sub> 伊<sub>伊</sub> ( 园<sub>园</sub> 园<sub>园</sub> 园<sub>园</sub> )  
 ( 猿<sub>猿</sub> 原<sub>原</sub> 园<sub>园</sub> ) ( 原<sub>原</sub> 园<sub>园</sub> )  
 原<sub>原</sub> 园<sub>园</sub> 园<sub>园</sub> 原<sub>原</sub> 园<sub>园</sub> 园<sub>园</sub> 越<sub>越</sub> ( 蚤<sub>蚤</sub> )  
 园<sub>园</sub> 原<sub>原</sub> 园<sub>园</sub> 园<sub>园</sub> 园<sub>园</sub>

粤 越 伊 园 愿 员 因 因

( 园 园 园 ( 原 愿 园 ) 越 园 ( 躁

园 员 缘 园 原 愿 员 越 园

园 园 员 员 愿 园

其余的振型正交性这里不再一一介绍。

(源 计算振型参与系数。

由 (1) 得到

[illegible]

$\gamma_{\text{越}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{越}_{i, \text{越}}}{\sum_{i=1}^n \text{越}_{i, \text{越}}}$

$\gamma$  越  $\sum_{\text{越}}^{\text{灶}}$  载 郎  $\sum_{\text{越}}^{\text{灶}}$  越 员伊员垣员缘伊(原圆缘苑) 垣圆伊圆原苑 越圆缘苑 (皂)

(缘) 计算各振型的地震作用。

根据场地条件和地震分组,查得裁越元整条  $\alpha_{\text{自整}}$  裁越元,则

$$\alpha_{\text{员}} \text{越} \left( \begin{smallmatrix} \text{栽} \\ \text{栽} \end{smallmatrix} \right)^{\text{园圆}} \alpha_{\text{警}} \text{越} \left( \begin{smallmatrix} \text{园缘} \\ \text{园原} \end{smallmatrix} \right)^{\text{园圆}} \text{伊} \text{园远} \text{越} \text{园圆} \text{伊} \text{园远}$$

$$\alpha_{\text{圆}} \text{越} \alpha_{\text{猜}} \text{越} \alpha_{\text{警}} \text{越} \text{园远}$$

(炒)

得到第一振型各质点的水平地震作用为

云越員載員越員(園因阮尹元原伊園員伊園尹元) 噪  
越員勝員薄員星員

[illegible]

(燥



种近似计算方法,即底部剪力法。如图 5-15 所示。

理论分析表明,对于质量和刚度分布比较均匀,高度不超过 40m,并以剪切变形为主的结构,其振型具有如下特征:① 位移反应以基本振型为主,可以近似采用基本振型来表示;② 基本振型接近于直线,因而基本振型为线性倒三角形。这样基本振型质点的相对位移  $\Delta u_j$  将与质点的计算高度  $H_j$  成正比,即  $\Delta u_j \propto H_j$ ,其中, $H_j$  为质点  $j$  离地面的高度。根据振型分解反应谱法得到

$$F_{Ej} = \alpha_j \gamma_j G_j \quad (5-15)$$

$F_{Ej}$  为质点  $j$  的水平地震作用。结构总水平地震作用即底部总剪力为各层水平地震作用之和,也就是

$$F_{Ek} = \sum_{j=1}^n F_{Ej} = \sum_{j=1}^n \alpha_j \gamma_j G_j \quad (5-16)$$

其中

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i \Delta u_{ji}}{\sum_{i=1}^n (\eta_i \Delta u_{ji})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta u_{ji}}{\eta \sum_{i=1}^n \Delta u_{ji}^2} \quad (5-17)$$

将其代入式 (5-16) 得到

$$F_{Ek} = \alpha_1 \frac{(\sum_{j=1}^n \Delta u_{j1})^2}{\sum_{j=1}^n \Delta u_{j1}^2} = \alpha_1 \frac{(\sum_{j=1}^n \Delta u_{j1})^2}{\sum_{j=1}^n \Delta u_{j1}^2} = \alpha_1 \xi G \quad (5-18)$$

其中, $G = \sum_{j=1}^n G_j$  为结构总重力荷载代表值。令  $\xi = \frac{(\sum_{j=1}^n \Delta u_{j1})^2}{\sum_{j=1}^n \Delta u_{j1}^2}$ , 为结构等效总重力荷载,其中

$$\xi = \frac{(\sum_{j=1}^n \Delta u_{j1})^2}{\sum_{j=1}^n \Delta u_{j1}^2} \quad (5-19)$$

称为结构总重力荷载等效系数,对于各层重量相同、层高相同的建筑物有

$$\xi = \frac{(1 + 2 + \dots + n)^2}{(1^2 + 2^2 + \dots + n^2)} = \frac{n+1}{3} \quad (5-20)$$

对于单自由度体系  $n=1$ , 则  $\xi=1$ ; 对于多自由度体系,  $\xi$  按式 (5-20) 计算。我国抗震规范统一取  $\xi=0.8$ 。于是底部总剪力标准值为

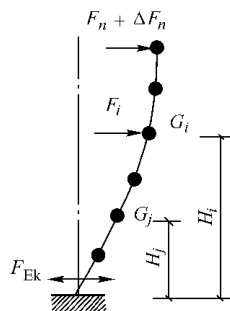


图 5-15 结构水平地震作用计算简图

$$\alpha_{\text{层}} \gamma_{\text{层}} \gamma_{\text{越}} \frac{\Delta \text{层}}{\sum_{\text{层}} \Delta \text{层}} \quad (\text{式 } 7.2.10)$$

由式 (式 7.2.10) 得到

$$\alpha_{\text{层}} \gamma_{\text{层}} \gamma_{\text{越}} \frac{\Delta \text{层}}{\sum_{\text{层}} \Delta \text{层}} \quad (\text{式 } 7.2.11)$$

代入表达式 (式 7.2.9)，得到各层的地震作用为

$$\Delta \text{层} \gamma_{\text{层}} \gamma_{\text{越}} \frac{\Delta \text{层}}{\sum_{\text{层}} \Delta \text{层}} \quad (\text{式 } 7.2.12)$$

可以看出，底部总剪力按照各层  $\Delta \text{层}$  的大小比例分配给各个质点，所以上述方法称为底部剪力法。对于自振周期比较长的多层钢筋混凝土房屋等，计算表明，在房屋顶部的地震剪力按底部剪力法计算偏小。这说明高阶振型地震作用的影响较大，仅仅考虑基本振型的地震作用已经不能满足精度要求。为了减少误差，规范采取在结构顶部附加集中地震作用  $\Delta \text{层}$ ，采用下述方法计算质点  $\text{层}$  的水平地震作用标准值。

$$\Delta \text{层} \gamma_{\text{层}} \gamma_{\text{越}} \delta \text{层} \Delta \text{层} \quad (\text{式 } 7.2.13)$$

然后从底部总剪力中扣除  $\Delta \text{层}$  后，再在各个质点上按照各层  $\Delta \text{层}$  的大小比例分配，即

$$\Delta \text{层} \gamma_{\text{层}} \gamma_{\text{越}} \frac{\Delta \text{层}}{\sum_{\text{层}} \Delta \text{层}} \quad (\text{式 } 7.2.14)$$

式中  $\delta \text{层}$ ——称为顶部附加水平地震作用系数，对于多层钢筋混凝土房屋和钢结构房屋，按表 7.2.1 中数值采用，多层内框架砖房采用 7.2.1，其他房屋不考虑，可取 7.2.1

表 7.2.1 顶部附加水平地震作用系数

层 (层)	层 跃层	层 ≤ 层
≤ 7.2.1	7.2.1 跃层	不考虑
7.2.1 - 7.2.1	7.2.1 跃层	
≥ 7.2.1	7.2.1 跃层	

震害表明，突出屋面的女儿墙、烟囱等震害比下部结构严重，称为“鞭梢效应”。规范规定对于这些结构的地震作用，宜乘以放大系数  $\gamma$  但是增大部分不往下传递。

例 7.2.1 用底部剪力法计算例 7.2.1 所示三层剪切型结构的底部总剪力。

解：由例 7.2.1 已经得到  $\alpha_{\text{层}} \gamma_{\text{层}} \gamma_{\text{越}} \frac{\Delta \text{层}}{\sum_{\text{层}} \Delta \text{层}}$  结构的等效重力荷载为



Δ<sub>重</sub> 如图 10-10 所示。以此弹性曲线为基本振型，则体系的最大势能和最大动能分别为

$$U_{max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{G_i \Delta_i^2}{\Delta_{ni}^2} \quad (10-10)$$

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{G_i \omega_i^2 \Delta_{ni}^2}{\Delta_{ni}^2} \quad (10-11)$$

由 10-10 和 10-11 得到

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{G_i \Delta_{ni}^2}{\Delta_{ni}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{G_i \Delta_{ni}^2}{\Delta_{ni}^2}}} \quad (10-12)$$

$$T_n = \frac{1}{\omega_n} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{G_i \Delta_{ni}^2}{\Delta_{ni}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{G_i \Delta_{ni}^2}{\Delta_{ni}^2}}}} \quad (10-13)$$

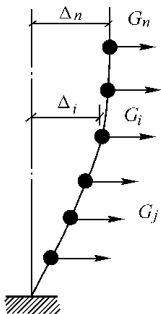


图 10-10 能量法计算结构基本周期

例 10-1 采用能量法计算例 10-1 所示三层剪切型结构的基本周期。

解：将各层重力荷载作为水平荷载，则各楼层的水平剪力为

$$V_1 = G_1 \Delta_1 \quad (10-14)$$

$$V_2 = G_2 \Delta_2 \quad (10-15)$$

$$V_3 = G_3 \Delta_3 \quad (10-16)$$

各层产生的水平位移为

$$\Delta_1 = \frac{V_1}{K_1} = \frac{G_1 \Delta_1}{K_1} \quad (10-17)$$

$$\Delta_2 = \frac{V_2}{K_2} = \frac{G_2 \Delta_2}{K_2} \quad (10-18)$$

$$\Delta_3 = \frac{V_3}{K_3} = \frac{G_3 \Delta_3}{K_3} \quad (10-19)$$

基本周期为

$$T_n = \frac{1}{\omega_n} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{G_i \Delta_{ni}^2}{\Delta_{ni}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{G_i \Delta_{ni}^2}{\Delta_{ni}^2}}}} \quad (10-20)$$

越 10-20 解

与精确解答相差为 10-20。

## 5.2.2 折算质量法（或等效质量法）

折算质量法的基本原理就是用一个单质点体系来代替多质点体系，使得其基

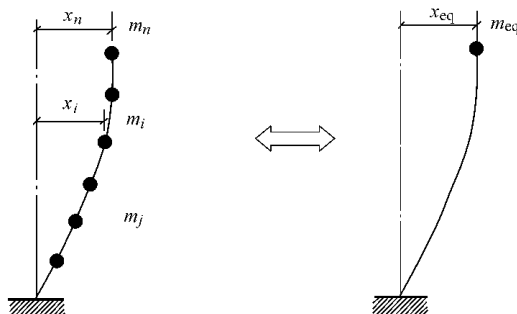


图 5.2.2 折算质量法计算结构基本周期

本频率相等或接近，单质点体系的质量称为折算质量（等效质量）。折算质量的大小与它在体系中的位置有关，为了计算方便和简单，一般将折算质量放在最大位移处，如图 5.2.2 所示根据代替原体系单质点体系的最大动能等于原体系的第一振型的最大动能这一条件，折算质量确定为

$$m_{eq}(\omega_1 u_1) = \sum_{i=1}^n m_i (\omega_1 u_i)^2 \quad (5.2.2)$$

于是

$$m_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i u_i^2}{u_1^2} \quad (5.2.3)$$

其中  $m_{eq}$ ——折算质量；

$u_1$ ——体系按第一振型振动时，质点  $m_i$  处的最大位移；

$u_i$ ——体系按第一振型振动时，相应于折算质量处的最大位移。

对于质量连续分布的体系，则有

$$m_{eq} = \frac{\int_0^H \rho(x) u_1^2(x) dx}{u_1^2(0)} \quad (5.2.4)$$

其中  $\rho(x)$ ——单位长度质量沿结构高度的分布函数；

$u_1(x)$ ——结构的第一振型曲线。

于是计算原体系的基本频率为

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{m}{m_{eq}}} \quad (5.2.5)$$

或者

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{m_{eq}}{k}} \quad (5-1-10)$$

其中， $\delta$  为体系在等效质点处作用单位力所产生的位移。按上述方法计算基本频率，需要假设第一振型曲线。可以按材料力学或结构力学的方法假设。例如，对于连续匀质的悬臂梁，将其等效为位于悬臂梁顶部的单质点体系时，可以近似采用水平均布荷载作用下产生的水平侧移曲线作为第一振型曲线，如图 5-1-10 所示。如果为弯曲型结构，则第一振型曲线为

$$y = \frac{\delta}{4} \left( 3 - 2 \frac{y}{H} \right)^2 \quad (5-1-11)$$

$$m_{eq} = \frac{m}{2} \quad (5-1-12)$$

将式 (5-1-11) 和式 (5-1-12) 代入式 (5-1-10) 得到

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5-1-13)$$

如果为剪切型结构，则第一振型曲线为

$$y = \frac{\delta}{H} y \quad (5-1-14)$$

$$m_{eq} = m \quad (5-1-15)$$

将上述两式代入式 (5-1-10) 得到

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5-1-16)$$

而对于弯剪型悬臂结构，则单质点体系的等效质量在  $\frac{m}{2}$  与  $m$  之间。

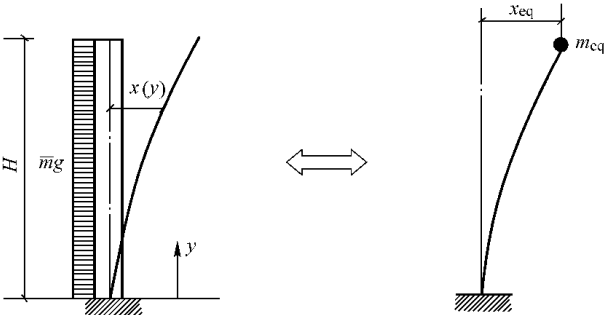


图 5-1-10 连续质量悬臂体系结构基本周期

顶点位移法

顶点位移法的基本原理就是将结构按其质量分布简化为有限多或无限多质点的悬臂杆，然后以结构顶点位移来表示的基本计算公式，将多层框架简化为均匀无限多质点的悬臂杆。

(员) 体系按弯曲振动考虑。

$$\Delta \leq \frac{1}{\omega} \int_0^H \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) dz \leq \frac{1}{\omega} \omega \Delta \quad (5-10)$$

由式(5-10)得到

$$\omega \leq \int_0^H \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) dz \leq \omega \Delta \quad (5-11)$$

假设一个振型曲线, 就可以得到相应的频率。一般第一振型假设较简单, 因此用上述方法一般能够得到结构的基频。如果假设均布荷载作用下的曲线(5-12)为基本振型, 将其代入上式得到

$$\Delta \leq \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (5-12)$$

而弯曲型悬臂杆在水平荷载的作用下的顶点水平位移即式(5-13), 将其代入上式得到

$$\Delta \leq \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (5-13)$$

(圆) 体系按剪切振动考虑

$$\Delta \leq \frac{1}{\omega} \int_0^H \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) dz \leq \frac{1}{\omega} \omega \Delta \quad (5-14)$$

由式(5-14)得到

$$\omega \leq \int_0^H \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) dz \leq \omega \Delta \quad (5-15)$$

设均布荷载作用下的剪切曲线即式(5-16)为基本振型, 将其代入上式得到

$$\Delta \leq \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (5-16)$$

而剪切型悬臂杆在水平荷载的作用下的顶点水平位移为式(5-17), 将其代入上式又可以得到

$$\Delta \leq \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (5-17)$$

将式(5-16)和式(5-17)推广用于质量和刚度沿高度非均匀分布的弯曲型、剪切型结构基本周期的近似计算。对于弯剪型结构, 可以取

$$\Delta \leq \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (5-18)$$

注意式(5-16)、式(5-17)和式(5-18)中的顶点位移  $\Delta$  的单位为  $\text{cm}$

例 5-1 采用顶点位移法计算例 5-1 所示三层剪切型结构的基本周期。

解: 在例 5-1 中, 已经得到在把重力荷载作为水平荷载作用下的顶点位移为

$$\Delta = 1.5 \text{ cm} \quad (5-19)$$

结构为剪切型结构, 由式(5-18)计算结构的基本周期为

$$T_{eq} = T_1 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{n-1} \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right)}}$$

(3)

与精确解答的误差为 10%。

用计算机采用矩阵位移法计算结构自振周期的方法，以及上面介绍的简化计算方法，其计算结果与所取的结构计算简图有关，而且往往乘以周期的经验修正系数。此外，还有经验公式法。在实测基础上加以统计分析得到经验公式系在一般场地上进行的，而同样的房屋建在不同的地点，实测的周期可能有差异，而且地震时房屋的振动周期与脉动测量的周期也会有较大的差异。这样，经验公式往往有较大的局限性，与实测的对象有关，选用时要注意其适用条件和适用范围。经验公式又可以分为两类。

(1) 一类是基于脉动实测的统计公式，在初步设计中，可按下列公式估算：

1) 高度低于 10m 且有较多填充墙框架办公楼、旅馆的基本周期

$$T_{eq} = 0.10 + 0.0115 H$$

(1)

2) 高度低于 10m 的钢筋混凝土框架—抗震墙结构的基本周期

$$T_{eq} = 0.10 + 0.0115 H$$

(2)

3) 高度低于 10m 的规则钢筋混凝土框架—抗震墙结构的基本周期

$$T_{eq} = 0.10 + 0.0115 H$$

(3)

上述公式中  $H$  为房屋的总高度，当房屋不等高时取平均高度； $n$  为所考虑方向房屋的总宽度。这些公式比脉动实测值增大 1.15 倍，以反映地震时与脉动测量的差异。

(2) 另一类就是在脉动实测的基础上，再忽略房屋宽度和层高的影响，给出下列更粗略的估算公式：

1) 钢筋混凝土框架结构为

$$T_{eq} = 0.10 + 0.0115 H$$

灶

2) 钢筋混凝土框架—抗震墙或钢筋混凝土框架—筒体结构为

$$T_{eq} = 0.10 + 0.0115 H$$

灶

3) 钢筋混凝土抗震墙或钢筋混凝土筒中筒结构为

$$T_{eq} = 0.10 + 0.0115 H$$

灶

4) 钢—钢筋混凝土混合结构为

$$T_{eq} = 0.10 + 0.0115 H$$

灶

5) 高层钢结构为

$$T_{eq} = 0.10 + 0.0115 H$$

灶

其中， $n$  为结构的总层数。

## 1.2.2 水平地震作用下地震内力的调整

### 1.2.2.1 长周期结构内力的调整

由于地震影响系数在长周期区段下降较快，对于基本周期大于 1.5s 的结构



按公式计算得到的水平地震作用可能太小。而对于长周期结构，地震地面运动速度和位移可能对结构的影响更大，但目前规范的振型分解反应谱法尚无法对此进行估计。为了保证长周期结构的安全性，增加了对各楼层水平地震力最小值的控制。规范规定，按振型分解反应谱法和底部剪力法所得到的结构的层间剪力应符合下式要求

$$F_{vi} \geq \lambda \sum_{j=1}^n F_{vj} \quad (5.5.10)$$

式中  $F_{vi}$ ——第  $i$  层对应于水平地震作用标准值的楼层剪力；  
 $\lambda$ ——剪力系数，不应小于表 5.5.10 规定的楼层最小地震剪力系数值，对于竖向不规则结构的薄弱层，还应乘以 1.15 的增大系数；  
 $F_{vj}$ ——第  $j$  层的重力荷载代表值。

表 5.5.10 楼层最小地震剪力系数值

类别	高度	长度	宽度
扭转效应明显或基本周期小于 1.0s 的结构	1.0~1.5 (1.0~1.5)	1.0~1.5 (1.0~1.5)	1.0~1.5 (1.0~1.5)
基本周期小于 1.0s 的结构	1.0~1.5 (1.0~1.5)	1.0~1.5 (1.0~1.5)	1.0~1.5 (1.0~1.5)

注：1. 基本周期介于 1.0~1.5s 的结构，可以插入取值。  
2. 表中括号内的数字分别用于设计地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

对于结构扭转效应是否明显，可以从考虑耦联的振型分解反应谱法的结果分析判断，如果在结构分析的前三阶振型中，两个水平方向的振型参与系数为同一数量级，即存在明显的扭转效应。

5.5.11 考虑地基与结构相互作用影响的地震内力的调整

由于地基与结构相互作用的影响，按刚性地基分析得到的水平地震作用在一定范围明显减小，但是考虑到我国地震作用取值与国外相比较小，故只在必要时才考虑折减。规范规定，结构的抗震计算一般情况下不考虑地基与结构相互作用的影响；长度和宽度建造于 III，IV 类场地土，采用箱基、刚性较好的筏基和桩箱联合基础的钢筋混凝土高层建筑，当结构的基本自振周期处于地震周期的 0.5~1.5 倍范围时，若考虑地基与结构动力相互作用的影响，对于刚性地基假定计算的水平地震剪力可按下列规定折减，其层间变形可按折减后的楼层剪力计算。

(1) 高宽比小于 4 的结构，各楼层水平地震剪力折减系数  $\phi$  按下式计算

$$\phi = \left( \frac{T_1}{T_1 + \Delta T_1} \right)^{0.9} \quad (5.5.11)$$

式中  $\phi$ ——计入地基与结构动力相互作用后的地震剪力折减系数；  
 $T_1$ ——按刚性地基计算的结构基本自振周期（s）；  
 $\Delta T_1$ ——考虑地基与结构相互作用的附加周期（s，参考值见表 5.5.11）

表 5.2.2 附加周期 (单位：泽)

烈度	场地类别	
	Ⅲ类场地	Ⅳ类场地
愿	$\tau_{d3}$	$\tau_{d4}$
怨	$\tau_{d3}$	$\tau_{d4}$

(圆) 高宽比不小于 猿的结构，对于高宽比较大的高层建筑，考虑相互作用后楼层的水平地震作用折减系数各楼层不同，由于高振型的影响，结构上部楼层不宜折减，底部楼层地震剪力按上述方法折减，中间各层按线性插值折减。

(猿) 折减后各楼层的水平地震剪力尚应符合式 (5.2.10) 的规定。

5.2.3 考虑水平地震作用扭转影响的计算

规范规定，对于质量和刚度分布明显不均匀的结构，应考虑扭转的影响。有两种方法：① 规则结构不进行扭转耦联计算时，平行于地震作用方向的两个边榀，其地震作用效应应乘以增大系数。一般情况下，短边按 5.2.2 采用，长边按 5.2.2 采用；当扭转刚度较小时，宜按不小于 5.2.2 采用；② 考虑扭转的影响时，各楼层有三个自由度，并按振型分解反应谱法计算地震作用。

5.2.3.1 第 蚤层的水平地震作用标准值 按下式计算

$$F_{xi} = \alpha_1 \gamma_{xi} F_{xi}^0, \quad F_{yi} = \alpha_1 \gamma_{yi} F_{yi}^0, \quad F_{\theta i} = \alpha_1 \gamma_{\theta i} F_{\theta i}^0 \quad (5.2.11)$$

式中  $F_{xi}$ 、 $F_{yi}$ 、 $F_{\theta i}$ ——第 蚤层曾方向、赠方向和转角方向的地震作用标准值；

$F_{xi}^0$ 、 $F_{yi}^0$ ——第 蚤层质心在 曾、赠方向的水平相对位移；

$\theta_i$ ——第 蚤层的相对扭转角；

$r_i$ ——第 蚤层的转动半径， $r_i = \sqrt{I_{pi}/m_i}$ ， $I_{pi}$  为第 蚤层的转动惯量；

$\gamma_{xi}$ ——计入扭转的第 蚤层的参与系数，计算如下：

(员) 当仅考虑 曾方向的地震时

$$\gamma_{xi} = \frac{\sum_{j=1}^n \xi_j F_{xi}^0}{\sum_{j=1}^n \xi_j F_{xi}^0} \quad (5.2.12)$$

(圆) 当仅考虑 赠方向的地震时

$$\gamma_{yi} = \frac{\sum_{j=1}^n \xi_j F_{yi}^0}{\sum_{j=1}^n \xi_j F_{yi}^0} \quad (5.2.13)$$

(猿) 当取与 曾方向斜交的地震作用时

$$\gamma_{\theta i} = \frac{\sum_{j=1}^n \xi_j F_{\theta i}^0}{\sum_{j=1}^n \xi_j F_{\theta i}^0} \quad (5.2.14)$$

$\gamma_{\text{震}}, \gamma_{\text{震}}$  分别由式 (5.2.10) 和式 (5.2.11) 求得的振型参与系数;  $\theta$  为地震作用方向与  $\varphi$  方向的夹角。

5.2.2 单向水平地震作用的扭转效应 按下式确定

$$\Delta_{\text{震}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{\text{震}} \Delta_{\text{震}} \Delta_{\text{震}}} = \frac{\Delta_{\text{震}} (\gamma_{\text{震}} \lambda_{\text{震}}) \lambda_{\text{震}}}{(\gamma_{\text{震}} \lambda_{\text{震}}) \Delta_{\text{震}} (\gamma_{\text{震}} \lambda_{\text{震}}) \lambda_{\text{震}}} \quad (5.2.12)$$

式中  $\Delta_{\text{震}}, \Delta_{\text{震}}$ —— $\varphi$  和  $\theta$  振型地震作用标准值的效应, 一般取  $\gamma_{\text{震}}$  个振型计算;

$\xi_{\text{震}}, \xi_{\text{震}}$ —— $\varphi$  和  $\theta$  振型的阻尼比;

$\rho_{\text{震}}$ —— $\varphi$  和  $\theta$  振型耦联系数;

$\lambda_{\text{震}}$ —— $\theta$  振型和  $\varphi$  振型的自振周期比值。

5.2.3 双向水平地震作用的扭转效应 按下式中的较大值确定

$$\Delta_{\text{震}} = \sqrt{\Delta_{\text{震}}^2 + \Delta_{\text{震}}^2}, \Delta_{\text{震}} = \Delta_{\text{震}} \quad (5.2.13)$$

式中  $\Delta_{\text{震}}, \Delta_{\text{震}}$  分别为  $\varphi$  向、 $\theta$  向单向水平地震作用按式 (5.2.12) 计算的扭转效应。

## 5.3 竖向地震作用的计算

### 5.3.1 需要进行竖向地震作用计算的结构

震害和理论分析表明, 在高烈度区竖向地震作用对于高层建筑、高耸结构和 大跨度结构的影响很大。竖向地震应力和重力荷载应力的比值随着建筑高度向上逐渐增大, 有时在房屋顶部甚至超过 1, 从而产生拉应力。规范规定, 8 度、9 度的大跨度和长悬臂结构及 9 度时的高层建筑, 应该计算竖向地震作用。

### 5.3.2 竖向反应谱法

5.3.2.1 竖向反应谱 由大量的统计说明, 各类场地的竖向反应谱与水平反应谱的动力放大系数基本相等, 而竖向地震系数为水平地震系数的 0.65 倍。因此竖向地震影响系数约为水平地震影响系数 0.65 倍, 即

$$\alpha_{\text{震}} = 0.65 \alpha_{\text{震}} \quad (5.3.1)$$

5.3.2.2 竖向地震作用计算 烟囱和类似的高层建筑, 其竖向地震作用标准值可以按反应谱法计算。如图 5.3.1 所示。分析表明按第一振型计算竖向地震作用标准值误差不大, 并且第一振型近似为直线, 于是

$$\Delta_{\text{震}} = \alpha_{\text{震}} \gamma_{\text{震}} \gamma_{\text{震}} \quad (5.3.2)$$

震

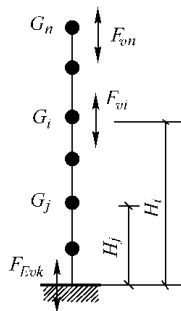


图 5.3.1 结构竖向地震作用计算简图

元豐元年

(果樹園地)

故结构总竖向地震作用标准值为

(来源)

于是

( 飛龍 )

郢越 $\xi_1$ 郢为等效重力荷载代表值,规范取 $\xi_1$ 越元郢

(吴建园)

规范采用的  $\varphi_2$  越准确, 实际上相当于将高层建筑, 高耸结构看作为等截面质量分布均匀的直杆。设杆的重力荷载代表值为  $\gamma$ , 则

( 关键成员 )

吊钩静力法

规范规定对于平板型网架屋盖、跨度大于 30m 的屋架、长悬臂结构和其他大跨度结构的竖向地震作用标准值，可以用静力法计算

(元豐景園)

$\lambda$  为竖向地震作用系数, 对于平板型网架, 钢屋架, 钢筋混凝土屋架, 按表 5.2.1 取值; 长悬臂结构和其他大跨度结构的竖向地震作用系数对应屋度和檐度分别取 0.08 和 0.09。设计基本地震加速度为 0.15g 时, 可取该结构构件重力荷载代表值的 0.5 倍。

表 5.1.4 竖向地震作用系数

结构类别	烈度	场地类别		
		I	II	III 和 IV
平板型网架、钢屋架	Ⅵ	可不计算 (Ⅴ)	Ⅴ (Ⅴ)	Ⅴ (Ⅴ)
	Ⅶ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ
钢筋混凝土屋架	Ⅵ	Ⅴ (Ⅴ)	Ⅴ (Ⅴ)	Ⅴ (Ⅴ)
	Ⅶ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ

## 5.2 多自由度体系弹塑性地震反应的时程分析法

底部剪力法和振型分解反应谱法只能适用于线弹性系统。对于多自由度非线性系统,由于体系的阻尼矩阵、刚度矩阵时刻在发生变化,底部剪力法和振型分解反应谱法将不再适用,必须寻找其他途径进行计算。时程分析方法是数值积分求解运动方程的一种方法,在数学上也称为逐步积分法。这种方法是由初始状态开始逐步积分直到地震终止,求出体系在地震作用下从静止到振动,直到振动结束的整个过程中的地震反应。下面将介绍几种常见的逐步积分方法。

### 5.2.1 运动方程的增量表达式和全量表达式

多自由度体系的动力响应问题可以归结为求解二阶常微分方程组的初值问题,即

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = F(t) \quad (5.2.1)$$

上述运动方程的特点就是其阻尼矩阵和刚度矩阵是时间的函数,它们随着结构处于不同的受力状态而取不同的数值。对于结构其非线性阻尼矩阵和刚度矩阵如何形成,将可以在有关具体的专业书籍找到。逐步积分法求解运动方程的基本思路是:

(1) 把连续的时间过程离散,对于上述运动方程只要求其在离散的各个时刻得到满足;

(2) 在每个时间间隔  $\Delta t$  内,假定位移、速度或加速度符合某一关系。对于  $\Delta t$  的选择则要求保证计算的稳定性和精度要求。

根据假设的不同,得到了各种逐步积分法,常见的有中心差分法、平均加速度法、线性加速度法、辛普森法、龙格库塔法和纽马克法等。在介绍各种逐步积分方法之前,先推导运动方程的增量表达形式。在  $t$  时刻的平衡方程为 (5.2.1),在  $t+\Delta t$  时刻的运动方程则为

$$M \ddot{u}(t+\Delta t) + C \dot{u}(t+\Delta t) + K u(t+\Delta t) = F(t+\Delta t) \quad (5.2.2)$$

质量矩阵为常数矩阵，刚度矩阵和阻尼矩阵在  $[t, t+\Delta t]$  时间区间按始点时刻  $t$  的值计算。当时间间隔  $\Delta t$  取得比较小时，这样计算不会带来大的误差。于是式 (5-15) 可以写成

$$[M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} + [K]\{u\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (5-16)$$

令

$$\begin{aligned} \Delta \{u\}_{t+\Delta t} &= \{u\}_{t+\Delta t} - \{u\}_t \\ \Delta \{\dot{u}\}_{t+\Delta t} &= \{\dot{u}\}_{t+\Delta t} - \{\dot{u}\}_t \\ \Delta \{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} &= \{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} - \{\ddot{u}\}_t \end{aligned} \quad (5-17)$$

将式 (5-16) 与式 (5-17) 两式相减，得到

$$[M]\Delta \{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} + [C]\Delta \{\dot{u}\}_{t+\Delta t} + [K]\Delta \{u\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{F\}_t \quad (5-18)$$

上式就是多自由度体系运动方程的增量表达形式，而对应的式 (5-16) 就是多自由度体系运动方程的全量表达形式。

### 5.2.2 平均加速度法

平均加速度法引入的基本假定是：在  $[t, t+\Delta t]$  时间区间上，体系的加速度为常数，它是该时间间隔内起始和终了时刻的加速度的平均值，即

$$\ddot{u}_{\text{平均}} = \frac{\ddot{u}_t + \ddot{u}_{t+\Delta t}}{2} \quad (5-19)$$

对上式积分两次得到

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \ddot{u}_{\text{平均}} \Delta t \quad (5-20)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \dot{u}_t \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{u}_{\text{平均}} \Delta t^2 \quad (5-21)$$

将  $\tau = \Delta t$  代入上述两式，可以得到

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \ddot{u}_{\text{平均}} \Delta t \quad (5-22)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \dot{u}_t \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{u}_{\text{平均}} \Delta t^2 \quad (5-23)$$

从上式解得

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = \frac{2}{\Delta t^2} [u_{t+\Delta t} - u_t - \dot{u}_t \Delta t] + \ddot{u}_t \quad (5-24)$$

将上式得到的加速度代入式 (5-18) 得到

$$[M]\ddot{u}_{t+\Delta t} + [C]\dot{u}_{t+\Delta t} + [K]u_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (5-25)$$

将上式代入运动方程的全量表达式 (5-5-10) 中, 得到

$$\hat{Y}(\zeta) \left[ \hat{Z}(\zeta) \Delta \zeta + \hat{Z}(\zeta) \Delta \zeta \right] = \hat{Y}(\zeta) \quad (5-5-11)$$

式中

$$\hat{Y}(\zeta) = \hat{Y}(\zeta) \Delta \zeta + \hat{Y}(\zeta) \Delta \zeta \quad (5-5-12)$$

$$\hat{Y}(\zeta) = \hat{Y}(\zeta) \Delta \zeta + \hat{Y}(\zeta) \Delta \zeta \quad (5-5-13)$$

$$\hat{Y}(\zeta) = \hat{Y}(\zeta) \Delta \zeta + \hat{Y}(\zeta) \Delta \zeta \quad (5-5-14)$$

$\hat{Y}(\zeta)$  称为等效刚度矩阵,  $\hat{Y}(\zeta)$  称为等效荷载矩阵。求解方程组 (5-5-11) 可以得到  $\hat{Z}(\zeta)$  时刻体系的位移, 再代入 (5-5-12) 和 (5-5-13) 就可以得到  $\hat{Z}(\zeta)$  时刻体系的速度和加速度。得到  $\hat{Z}(\zeta)$  时刻的位移、速度和加速度后, 可以作为下一个区间的初始值进行该区间的计算。也就是说,  $\hat{Z}(\zeta)$  时刻的位移、速度和加速度可以通过  $\hat{Z}(\zeta)$  时刻的位移、速度和加速度计算得到。这样, 通过反复求解方程组 (5-5-11), 就可以计算得到各个时刻的动力响应了。对于线性系统, 如果取的时间步长相等, 则等效刚度矩阵就保持不变, 只需要一次形成就可以了。在求解方程组 (5-5-11) 时采用  $\hat{Z}(\zeta)$  分解只需要分解一次就可以了, 因为每步计算中只是等效荷载矩阵随时间发生变化, 这样可以节约大量计算时间。当然对于非线性问题, 每步都要根据体系的不同受力状态, 形成该时刻的刚度矩阵  $\hat{Y}(\zeta)$  和阻尼矩阵  $\hat{Y}(\zeta)$ , 因而等效刚度矩阵时刻发生变化。因此, 所需要花费的计算时间很多, 这也是非线性不能在工程中广泛应用的原因之一。

还需要说明的是, 平均加速度法是无条件稳定的, 它是一种隐式积分格式, 适用于自由度数目较多的系统。

## 5.5.2 线性加速度法

线性加速度法与平均加速度法不同之处就在于, 它假设在  $[\hat{Z}(\zeta), \hat{Z}(\zeta)]$  时间区间加速度随时间线性变化, 即

$$\hat{Z}(\zeta) = \hat{Z}(\zeta) \Delta \zeta + \hat{Z}(\zeta) \Delta \zeta \quad (5-5-15)$$

对上式积分两次得到

$$\hat{Z}(\zeta) = \hat{Z}(\zeta) \Delta \zeta + \hat{Z}(\zeta) \Delta \zeta \quad (5-5-16)$$

$$\hat{Z}(\zeta) = \hat{Z}(\zeta) \Delta \zeta + \hat{Z}(\zeta) \Delta \zeta \quad (5-5-17)$$

当  $\tau \rightarrow \hat{Z}(\zeta)$  时, 代入上述两式, 得到

$$\ddot{u}_{j+1} = \ddot{u}_j + \frac{\Delta t}{\tau} [\ddot{u}_j + \ddot{u}_{j+1}] \quad (5-10)$$

$$\ddot{u}_{j+1} = \ddot{u}_j + \frac{\Delta t}{\tau} [\ddot{u}_j + \ddot{u}_{j+1}] \quad (5-11)$$

由式 (5-11) 可以得到

$$\ddot{u}_{j+1} = \ddot{u}_j + \frac{\Delta t}{\tau} [\ddot{u}_j + \ddot{u}_{j+1}] \quad (5-12)$$

将式 (5-12) 代入式 (5-10) 可以得到

$$\ddot{u}_{j+1} = \ddot{u}_j + \frac{\Delta t}{\tau} [\ddot{u}_j + \ddot{u}_{j+1}] \quad (5-13)$$

将式 (5-12) 和式 (5-13) 代入运动方程的全量表达式 (5-9) 中, 得到

$$\ddot{u}_{j+1} = \ddot{u}_j + \frac{\Delta t}{\tau} [\ddot{u}_j + \ddot{u}_{j+1}] \quad (5-14)$$

其中

$$\ddot{u}_{j+1} = \ddot{u}_j + \frac{\Delta t}{\tau} [\ddot{u}_j + \ddot{u}_{j+1}] \quad (5-15)$$

$$\ddot{u}_{j+1} = \ddot{u}_j + \frac{\Delta t}{\tau} [\ddot{u}_j + \ddot{u}_{j+1}] \quad (5-16)$$

$$\ddot{u}_{j+1} = \ddot{u}_j + \frac{\Delta t}{\tau} [\ddot{u}_j + \ddot{u}_{j+1}] \quad (5-17)$$

求解方程组 (5-14), 得到  $\ddot{u}_{j+1}$  后, 再代入式 (5-12) 和式 (5-13) 可以计算  $t_{j+1}$  时刻的加速度和速度, 其余计算与平均加速度法是一样的。线性加速度法也是一种隐式积分格式, 但它是条件稳定的, 只有在时间步长  $\Delta t$  小于最高振型对应的频率的  $1/\omega$  才是稳定的。

线性加速度法

研究表明, 在单自由度体系中, 线性加速度法计算结果保持稳定的条件是取的时间间隔  $\Delta t \leq \tau/2$ , 其中,  $\tau$  为结构的周期; 对于多自由度体系, 由于结构的动力反应以长周期分量为, 短周期分量占的比重较小, 这一点在振型分解反应谱法可以明显看到, 因此从理论上讲, 时间步长  $\Delta t$  可以取较大的值, 但是从稳定性的角度来考虑, 时间步长  $\Delta t$  则越小越好, 当然同时计算工作量也大大增加。对于质量和刚度分布比较均匀采用集中质量的框架结构, 采用线性加速度法是比较好的。但是对于形状比较复

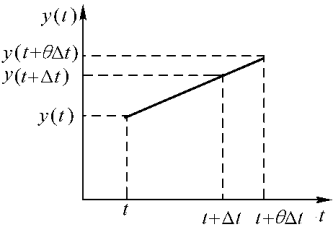


图 5-1 线性加速度法假定



杂的结构,采用有限元法计算时,由于自由度数目特别多,结构的各个周期将相差几个数量级。此时,如果为满足稳定性的要求而将时间步长取得很小,这一方面将大大地增加计算的工作量,另一方面由于模型的近似性,其高振型分量并不能反应结构的真实工作机理,因而也没有必要精确地考虑高振型的影响。因此,有必要对线性加速度法加以改进,使得其成为无条件稳定的计算方法。辛普森法就是这样一种方法,它能排除高振型的影响而又无条件稳定。

辛普森法是对线性加速度法的推广。辛普森法假定加速度在一个扩大的时间区间  $[\tau, \tau + \theta \Delta t]$  ( $\theta \geq 1$ ) 的加速度线性变化。如图 5-10 所示。当  $\theta = 1$  时,辛普森法就变成线性加速度法。当  $\theta \rightarrow \infty$  时辛普森法的积分格式是无条件稳定的。由于加速度线性变化,于是在上述区间的某一时刻  $\tau$  有

$$\ddot{u}(\tau) = \ddot{u} + \frac{\ddot{u}(\theta \Delta t) - \ddot{u}}{\theta \Delta t} \tau \quad (5-10)$$

对上式积分两次得到

$$\dot{u}(\tau) = \dot{u} + \ddot{u} \tau + \ddot{u} \frac{\theta \Delta t}{2} \frac{\tau^2}{\Delta t} \quad (5-11)$$

$$u(\tau) = u + \dot{u} \tau + \ddot{u} \frac{\tau^2}{2} + \ddot{u} \frac{\theta \Delta t}{6} \frac{\tau^3}{\Delta t} \quad (5-12)$$

在上述两式中,当  $\tau = \theta \Delta t$  时可以得到

$$\ddot{u}(\theta \Delta t) = \ddot{u} + \frac{\theta \Delta t}{2} [\ddot{u}(\theta \Delta t) - \ddot{u}] \quad (5-13)$$

$$\ddot{u}(\theta \Delta t) = \ddot{u} + \frac{(\theta \Delta t)^2}{6} [\ddot{u}(\theta \Delta t) - \ddot{u}] \quad (5-14)$$

从式 (5-14) 可以得到

$$\ddot{u}(\theta \Delta t) = \frac{6}{(\theta \Delta t)^2} \left[ \ddot{u}(\theta \Delta t) - \ddot{u} \right] \quad (5-15)$$

将上式代入式 (5-12) 得到

$$\ddot{u}(\theta \Delta t) = \frac{6}{\theta \Delta t} \left[ \ddot{u}(\theta \Delta t) - \ddot{u} \right] \quad (5-16)$$

$\theta \Delta t$  时刻运动方程的全量表达式为

$$M \ddot{u}(\theta \Delta t) + C \dot{u}(\theta \Delta t) + K u(\theta \Delta t) = F(\theta \Delta t) \quad (5-17)$$

假设荷载向量也是线性变化,通过线性外插可确定

$$F(\theta \Delta t) = F + \theta \Delta t \left[ \dot{F}(\theta \Delta t) - \dot{F} \right] \quad (5-18)$$

将式 (5-16) 和式 (5-18) 代入式 (5-17) 中,得到

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-12)$$

其中

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \\ & \frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \end{aligned} \quad (5-4-14)$$

通过求解方程组 (5-4-12) 可以得到  $\frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2}$  时刻的位移。实际上我们要计算的是  $\frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2}$  时刻的位移、速度和加速度。在式 (5-4-13) 中令  $\tau = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2}$  得到

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-15)$$

将式 (5-4-15) 代入上式得到

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-16)$$

在式 (5-4-16) 中令  $\tau = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2}$  得到

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-17)$$

将式 (5-4-17) 代入上式得到  $\frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2}$  时刻的速度，为

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-18)$$

在式 (5-4-18) 中令  $\tau = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2}$  得到

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-19)$$

将式 (5-4-19) 代入上式得到  $\frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2}$  时刻的位移，为

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-20)$$

5.4.4 修正的加速度法

修正的加速度法也可以认为是线性加速度法的推广。它利用两个参数  $\beta$  和  $\gamma$  分别对线性加速度法的位移增量和速度增量进行修正，以提高计算的精度。修正的加速度法假设  $\frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2}$  时刻的速度和位移分别为

$$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \right) = \frac{1}{\theta} \frac{d^2 \dot{x}}{dt^2} \quad (5-4-21)$$



上述平均加速度法、线性加速度法、辛普森法和龙格库塔法都是自起步的，即只需要初始条件就可以逐步积分得到各个时刻的动力响应。同时这些算法都是隐式的，也就是说，每一计算步长中都要求解一个线性方程组。

龙格库塔法

在龙格库塔法中，位移函数利用相邻的四个时间步的位移的三次插值多项式来近似表示。这样得到的动力响应曲线光滑连续，精度较高。设

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{6} \left[ \ddot{u}_i + 4\ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} + \ddot{u}_{i+1} \right] \Delta t = \dot{u}_{i+\frac{1}{2}} - \dot{u}_i \\
 & \frac{1}{6} \left[ \ddot{u}_i + 4\ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} + \ddot{u}_{i+1} \right] \Delta t = u_{i+1} - u_i \\
 & \text{令 } \tau = \Delta t \end{aligned}
 \tag{5-4-10}$$

$$\begin{aligned}
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \text{于是}
 \end{aligned}
 \tag{5-4-11}$$

$$\begin{aligned}
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \text{在上两式中令 } \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} \text{ 也就是 } \tau = \Delta t \text{ 可以得到}
 \end{aligned}
 \tag{5-4-12}$$

$$\begin{aligned}
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \text{将式 (5-4-12) 和式 (5-4-13) 代入运动方程的全量表达式 (5-4-9) 中，并整理得到}
 \end{aligned}
 \tag{5-4-14}$$

$$\begin{aligned}
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \ddot{u}_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \\
 & \text{因此}
 \end{aligned}
 \tag{5-4-15}$$

其中

$$\begin{aligned} & \ddot{u}_{\text{贼}} \text{ 越 } \frac{\ddot{u}_{\text{圆}}}{(\Delta \text{贼})} \text{ 垣 } \frac{\ddot{u}_{\text{员兑贼}}}{\ddot{u}_{\text{远贼}}} \text{ 垣 } \ddot{u}_{\text{远贼}} \quad (\text{式 } 5.4.10) \\ & \ddot{u}_{\text{兑贼}} \text{ 越 } \ddot{u}_{\text{兑贼}} \text{ 垣 } \Delta \text{贼} \ddot{u}_{\text{远贼}} \text{ 垣 } \frac{\ddot{u}_{\text{兑贼}} \Delta \text{贼} \text{ 垣 } \ddot{u}_{\text{远贼}}}{\ddot{u}_{\text{猿}} \Delta \text{贼}} \text{ 赠 } \text{贼} \text{ 原 } \ddot{u}_{\text{圆贼}} \\ & \text{原 } \frac{\ddot{u}_{\text{猿兑贼}} \Delta \text{贼} \text{ 垣 } \ddot{u}_{\text{远贼}}}{\ddot{u}_{\text{圆}} \Delta \text{贼}} \text{ 赠 } \text{贼} \text{ 原 } \ddot{u}_{\text{圆贼}} \text{ 贼 } \text{ 垣 } \frac{\ddot{u}_{\text{猿兑贼}} \Delta \text{贼} \text{ 垣 } \ddot{u}_{\text{远贼}}}{(\Delta \text{贼})} \text{ 赠 } \text{贼} \quad (\text{式 } 5.4.11) \end{aligned}$$

求解方程组 (式 5.4.10), 得到  $\ddot{u}_{\text{兑}}(\Delta \text{贼})$  后, 再代入式 (式 5.4.11) 和式 (式 5.4.12) 可以计算  $\Delta \text{贼}$  时刻的速度和加速度。需要说明的是, 这种积分方法不是自起步的, 除了利用初始条件  $\ddot{u}_{\text{兑}}$  和  $\ddot{u}_{\text{圆}}$  以及初始时刻运动方程得到的  $\ddot{u}_{\text{远}}$  外, 还需要利用前述任意一种自起步方法计算得到  $\ddot{u}_{\text{猿}}$ 、 $\ddot{u}_{\text{兑}}$  和  $\ddot{u}_{\text{远}}$ 。于是从式 (式 5.4.10) 和式 (式 5.4.12) 可以得到

$$\begin{cases} \ddot{u}_{\text{兑}} \Delta \text{贼} \text{ 越 } \left[ \text{原 } \frac{\ddot{u}_{\text{兑}}}{\ddot{u}_{\text{猿}}} \text{ 赠 } \text{原 } \ddot{u}_{\text{圆}} \text{ 贼 } \text{ 垣 } \frac{\ddot{u}_{\text{猿兑}}}{\ddot{u}_{\text{圆}}} \text{ 赠 } \text{原 } \Delta \text{贼} \text{ 原 } \ddot{u}_{\text{猿}} \text{ 赠 } \text{垣 } \frac{\ddot{u}_{\text{远}}}{\ddot{u}_{\text{远}}} \text{ 赠 } \Delta \text{贼} \right] \frac{\ddot{u}_{\text{兑}}}{\Delta \text{贼}} \\ \ddot{u}_{\text{兑}} \Delta \text{贼} \text{ 越 } \frac{\text{原 } \ddot{u}_{\text{兑}} \text{ 原 } \ddot{u}_{\text{圆}} \text{ 贼 } \text{ 垣 } \text{源 } \ddot{u}_{\text{兑}} \text{ 原 } \Delta \text{贼} \text{ 原 } \text{缘 } \ddot{u}_{\text{兑}} \text{ 垣 } \ddot{u}_{\text{圆}} \text{ 赠 } \Delta \text{贼}}{(\Delta \text{贼})} \end{cases} \quad (\text{式 } 5.4.13)$$

通过求解方程组 (式 5.4.13) 可以得到  $\ddot{u}_{\text{兑}}(\text{原 } \ddot{u}_{\text{圆}} \text{ 贼})$  和  $\ddot{u}_{\text{兑}}(\text{原 } \Delta \text{贼})$ 。这样利用  $\ddot{u}_{\text{兑}}(\text{原 } \Delta \text{贼})$ 、 $\ddot{u}_{\text{兑}}$  和  $\ddot{u}_{\text{兑}}(\Delta \text{贼})$ , 从  $\Delta \text{贼}$  时刻开始计算, 代入式 (式 5.4.10) 求得  $\ddot{u}_{\text{兑}}(\ddot{u}_{\text{圆}} \text{ 贼})$ , 再代入式 (式 5.4.11) 和式 (式 5.4.12) 得到  $\ddot{u}_{\text{兑}}(\ddot{u}_{\text{圆}} \text{ 贼})$  和  $\ddot{u}_{\text{兑}}(\ddot{u}_{\text{圆}} \text{ 贼})$ 。这样就可以逐步计算下去了。匀加速法是一种隐式积分法, 它是无条件稳定的。因此在选择时间步长时, 可以仅考虑精度要求而不考虑稳定性要求。

## 5.4.3 二级近似加速度法

二级近似加速度法的实质是将加速度向量在时刻  $\text{贼}$  附近展开为二阶泰勒展开式, 即

$$\ddot{u}_{\text{兑}}(\text{贼 } \text{垣 } \tau) \text{ 越 } \ddot{u}_{\text{兑}}(\text{贼 } \text{垣 } \tau \text{ 粤 } \text{垣 } \frac{\tau^2}{2} \ddot{u}_{\text{远}}) \quad (\text{式 } 5.4.14)$$

对上式积分两次得到

$$\ddot{u}_{\text{兑}}(\text{贼 } \text{垣 } \tau) \text{ 越 } \ddot{u}_{\text{兑}}(\text{贼 } \text{垣 } \tau \text{ 粤 } \text{垣 } \frac{\tau^2}{2} \ddot{u}_{\text{远}}) \quad (\text{式 } 5.4.15)$$

$$\ddot{u}_{\text{兑}}(\text{贼 } \text{垣 } \tau) \text{ 越 } \ddot{u}_{\text{兑}}(\text{贼 } \text{垣 } \tau \text{ 粤 } \text{垣 } \frac{\tau^2}{2} \ddot{u}_{\text{远}}) \quad (\text{式 } 5.4.16)$$

为了确定式 (式 5.4.14) 中的待定未知列向量  $\text{粤}$  和  $\text{月}$ , 在上述三式中令  $\tau \text{ 越 } \Delta \text{贼}$  即



推导的,但是对于单自由度体系也适用,仅需要将其中的有关矩阵或向量看作一维的就可以了。此外,对于线弹性体系,仅需要将阻尼矩阵和刚度矩阵看作常量就可以了。

## 5.2 结构静力弹塑性地震反应分析法

采用弹塑性时程分析法分析结构的弹塑性地震反应,计算工作量大,需要设计专门的程序,且对设计人员的水平要求较高。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)对于不规则且具有明显薄弱部位可能导致地震时严重破坏的建筑物,除了规定可以采用弹塑性时程分析法外,尚可以根据结构特点采用静力弹塑性分析方法。但是目前规范尚没有对该方法作出具体的规定。

### 5.2.1 基本原理

结构静力弹塑性分析方法,也称为非线性静力分析方法或者推覆分析法等。它是将沿结构高度为某种规定分布形式的侧向力,静态、单调作用在结构的计算模型上,逐步增加这个侧向力,直到结构产生的位移超过容许值(目标位移)或者认为结构破坏接近倒塌为止。在结构产生侧向位移的过程中,结构构件的内力和变形可以计算出来,观察全过程的变化,判别结构和构件的破坏状态。静力弹塑性分析与弹塑性时程分析比较,可以获得比较稳定的计算结果,减少分析结构的偶然性,花费较少的时间和精力。静力弹塑性分析法的优点还在于:侧向力的大小可以根据结构在不同工作阶段的周期由设计反应谱得到,侧向力的分布则可以根据结构振型的变化求得。

### 5.2.2 实施的步骤

(1) 准备工作。如同一般的有限元分析,建立结构的模型,包括几何尺寸、物理参数以及节点和构件的编号。另外,结构上的荷载也要求出,包括竖向荷载、水平荷载等。为了进行弹塑性分析,还应求出各个构件的塑性承载力,对于梁,应求出其两端上下两个方向的塑性弯矩和两端的极限抗剪承载力;对于柱,应求出其弯矩—轴力曲线的三个控制点(轴压、平衡和纯弯)。

(2) 求出结构在竖向荷载作用下的内力。因为这个内力将来要和水平力作用下的内力叠加,相当于荷载作用效应组合。因此,竖向荷载标准值的组合系数要按照规范的规定取用。另外还要求出结构的基本自振周期。

(3) 施加一定量的水平荷载。水平力施加于各层的质量中心处,对于规则框架,各层水平力之间的比例关系,或沿结构高度的分布规律,可以按照底部剪力法确定。在这一步中,水平力大小的确定原则是:水平力产生的内力与第(2)步的竖向荷载产生的内力叠加后恰好能使一个或一批构件进入屈服。

(源 对在第(猿 步进入屈服构件，改变其状态。最简单的办法，是用塑性铰来考虑构件进入塑性，将屈服的构件的一端甚至两端设成铰接点。这样，相当于形成了一个新的结构。求出这个“新”结构的自振周期，在其上再施加一定量的水平荷载，又使一个或一批构件恰好进入屈服。

(缘 不断地重复第(源 步，直到结构的侧向位移达到预定的破坏极限，或由于塑性铰过多而成为机构(这种情况一般很难出现)。记录每一次有新的塑性铰出现后结构的周期，累计每一次施加的荷载。

(远 成果整理。将每一个不同的结构自振周期及其对应的水平力总量与结构重力荷载代表值的比值(地震影响系数)绘成曲线，也把相应场地的各条反应谱曲线绘在一起。这样，如果结构反应曲线能够穿过某条反应谱曲线，就说明结构能够抵抗那条反应谱曲线所对应的地震烈度。还可以在图中绘出相应的变形，以便于评价结构的抗震能力。我国抗震设计规范中的设计反应谱虽然是弹性反应谱，但它的形式(横轴为周期，纵轴为地震影响系数)非常便于静力弹塑性分析的结果表达。

大量的分析比较表明，静力弹塑性分析方法与弹塑性时程分析方法得到的结果接近。而且从上述实施步骤可以看出，静力弹塑性分析方法比弹塑性时程分析方法要简单，所以该方法值得大力推广。静力弹塑性分析方法的成功与否关键在于：①确定结构各单元的恢复力模型；②确定结构的目标位移；③选取合理的水平荷载模式。

## 5.4.2 结构截面抗震验算

作为抗震设防两阶段设计中的第一阶段，要做到“小震不坏”，就是采用多遇地震的水平地震作用标准值，用线弹性理论计算出结构构件的地震作用效应，与其他荷载效应组合，计算出结构内力组合的设计值进行构件设计和配筋计算。前面采用底部剪力法、振型分解反应谱法和时程分析法等方法得到的结构楼层水平地震剪力，应按不同的原则分配到各个抗侧力构件上，才能计算各个构件的地震作用效应。分配的原则为：①现浇和装配整体式混凝土楼盖、屋盖等刚性楼盖建筑，宜按抗侧力构件等效刚度的比例分配；②木楼盖、木屋盖等柔性楼盖建筑，宜按抗侧力构件从属面积上重力荷载代表值的比例分配；③普通预制装配式混凝土楼盖、屋盖等半刚性楼盖、屋盖的建筑，可取上述两种分配结果的平均值；④计入空间作用、楼盖变形、墙体弹塑性变形和扭转影响时，可按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)的有关规定对上述分配结果进行调整。

## 5.4.3 地震作用效应和其他荷载作用效应的基本组合

结构构件的地震作用效应和其他荷载效应的基本组合，应按下列式计算



$$S_{\text{总}} = \gamma_{\text{恒}} S_{\text{恒}} + \gamma_{\text{活}} S_{\text{活}} + \gamma_{\text{风}} S_{\text{风}} + \gamma_{\text{雪}} S_{\text{雪}} + \gamma_{\text{土}} S_{\text{土}} + \gamma_{\text{水}} S_{\text{水}} + \gamma_{\text{杂}} S_{\text{杂}} \quad (5.2.1)$$

- 式中  $S_{\text{总}}$ ——结构构件内力组合的设计值，包括组合的弯矩、轴向力和剪力设计值；
- $\gamma_{\text{恒}}$ ——重力荷载分项系数，一般情况应采用 1.2，当重力荷载效应对构件承载力有利时，不应大于 1.0；
- $\gamma_{\text{活}}$ ——分别为水平、竖向地震作用分项系数，应按表 5.2.1 采用；
- $\gamma_{\text{风}}$ ——风荷载分项系数，应采用 1.4；
- $S_{\text{恒}}$ ——重力荷载代表值的效应，有起重机时，尚应包括悬吊物重力标准值的效应；
- $S_{\text{活}}$ ——水平地震作用标准值的效应，还应乘以相应的增大系数或调整系数；
- $S_{\text{风}}$ ——竖向地震作用标准值的效应，还应乘以相应的增大系数或调整系数；
- $S_{\text{土}}$ ——风荷载标准值的效应；
- $\psi_{\text{风}}$ ——风荷载组合值系数，一般结构取 0.9，风荷载起控制作用的高层建筑应采用 0.95。

表 5.2.1 地震作用分项系数

地震作用	$\gamma_{\text{活}}$	$\gamma_{\text{风}}$
仅计算水平地震作用	1.2	0.9
仅计算竖向地震作用	0.9	1.2
同时计算水平和竖向地震作用	1.2	0.9

在大震烈度下的地震作用，应视为可变作用而不是偶然作用。这样，根据《建筑结构可靠度设计统一标准》中确定直接作用分项系数的方法，通过综合比较，规范对水平地震作用，确定  $\gamma_{\text{活}}$  取 1.2，竖向地震作用参照水平地震作用，也取  $\gamma_{\text{活}}$  取 1.2。当竖向地震作用和水平地震作用同时考虑，由加速度峰值记录 and 反应谱分析，两者组合比 1.0 略大，故  $\gamma_{\text{活}}$  取 1.2， $\gamma_{\text{风}}$  取 0.9。规范在计算地震作用时，已经考虑了地震作用与各种重力荷载的组合问题，其中， $S_{\text{总}}$  中就包括了恒荷载、活荷载和雪荷载等的组合问题，并在表 5.2.1 中规定了各种荷载的组合值系数，形成了抗震设计重力荷载代表值。抗震设计规范规定在验算和计算地震作用时对重力荷载均采用相同的组合值系数，可以简化计算，并避免有两种不同的组合值系数。因此，式 (5.2.1) 中仅出现风荷载的组合值系数，并按《建筑结构可靠度设计统一标准》的方法，对于一般结构取 0.9，风荷载起控制作用的高层建筑取 0.95。风荷载起控制作用是指风荷载和地震作用产生的总剪力和倾覆力矩相当的情况。

截面抗震验算

经过分析，下列情况可以不进行结构构件承载力的抗震验算，但是仍然应该符合有关的构造要求：①远度时的建筑（建造于Ⅳ类场地上较高的高层建筑与高耸结构除外）；②远度时Ⅰ、Ⅱ类场地、柱高不超过远度且两端有山墙的单跨及多跨等高的钢筋混凝土厂房（锯齿形厂房除外），或柱顶标高不超过远度且两端均有山墙的单跨及多跨等高的砖柱厂房。除上述情况外在地震区的所有结构，都要进行结构构件承载力的抗震验算。结构构件的截面抗震验算，应采用下列设计表达式

$$S \leq \frac{R}{\gamma_{RE}}$$

式中  $\gamma_{RE}$ ——承载力抗震调整系数，除另有规定外，应按表远度采用；  
R——结构构件承载力设计值。

在截面抗震验算表达式（远度）中，没有出现结构重要性系数  $\gamma_{0}$ ，这是因为根据地震作用的特点、抗震设计的现状以及抗震重要性分类与《建筑结构可靠度设计统一标准》中安全等级的差异，重要性系数对抗震设计的实际意义不大，《建筑抗震设计规范》（远度）对于建筑重要性的处理仍采用抗震措施的改变来实现。因此，截面抗震验算中不考虑此项系数。

现阶段大部分结构构件进行截面抗震验算时，采用了各有关规范的承载力设计值 R，因此抗震设计的抗力分项系数就相应地变为承载力设计值的抗震调整系数  $\gamma_{RE}$ ，即  $\gamma_{RE}$  越远度越好。《建筑抗震设计规范》（远度）中有经计算分析得到的有关结构构件承载力调整系数。抗震承载力调整系数  $\gamma_{RE}$  的取值范围为远度-远度之间，一般小于远度，其实质含义就是提高构件的承载力设计值 R，以使得现行与过去的抗震规范在截面验算的结果大体上保持一致。当仅计算竖向地震作用时，各类结构构件承载力抗震调整系数均宜采用远度

表远度 承载力调整系数

材料	结构构件	受力状态	$\gamma_{RE}$
钢	柱，梁 支撑 节点板件，连接螺栓 连接焊缝		远度
			远度
			远度
			远度
砌体	两端均有构造柱、芯柱的抗震墙 其他抗震墙	受剪	远度
		受剪	远度
混凝土	梁 轴压比小于远度的柱 轴压比不小于远度的柱 抗震墙 各类构件	受弯	远度
		偏压	远度
		偏压	远度
		偏压	远度
		偏压	远度
		受剪、偏压	远度

需要说明的是,由于各类结构所受的地震作用和其他荷载作用的反应不同,并不是各类结构构件的荷载效应组合都要取式(5.2.1)中的所有项,基本上可以分为以下几种情况:

(1) 高层建筑的各类构件,除考虑水平地震内力和重力荷载内力的组合外,要考虑风荷载的内力的组合;在Ⅲ类区还要考虑竖向地震内力的组合,即

在Ⅲ类区和Ⅳ类场地土的高层建筑截面抗震验算公式为

$$\gamma_{RE} S_{E1} + S_{E2} + S_{E3} + S_{E4} \leq f_{RE} \quad (5.2.2)$$

在Ⅲ类区为

$$\gamma_{RE} S_{E1} + S_{E2} + S_{E3} + S_{E4} \leq f_{RE} \quad (5.2.3)$$

(2) 单层、多层钢筋混凝土结构和单层、多层钢结构的各类构件,只考虑水平地震内力和重力荷载内力的组合,即

$$\gamma_{RE} S_{E1} + S_{E2} \leq f_{RE} \quad (5.2.4)$$

(3) 大跨度屋盖系统和长悬臂结构,如网架屋盖,跨度大于 30m 的屋架及大的挑台雨篷等,只考虑竖向地震内力和重力荷载内力的组合,即

$$\gamma_{RE} S_{E1} + S_{E2} \leq f_{RE} \quad (5.2.5)$$

(4) 砌体结构的墙段,在进行受剪承载力验算时,只考虑水平地震剪力,不考虑水平地震剪力与重力荷载内力的组合,即

$$V_{RE} \leq f_{RE} \quad (5.2.6)$$

## 5.3 结构抗震变形验算

结构抗震变形验算包括两方面的内容:①多遇地震作用下结构允许的弹性变形验算,以防止非结构构件,包括隔墙、幕墙、建筑装饰等的破坏导致人员伤亡。它仍然是抗震设防两阶段设计中的第一阶段的设计,目的和结构构件的截面抗震验算一样,也是为了实现“小震不坏”,保证建筑物的正常使用功能,减小震后的修复费用。它是采用多遇地震的水平地震作用标准值,用线弹性理论计算出结构构件的弹性层间位移,使其不超过规定的允许值;②罕遇地震作用下结构的弹塑性变形验算,是为了防止结构在罕遇地震作用下弹塑性变形过大而导致结构倒塌,它是抗震设防两阶段设计中的第二阶段的设计,目的是为了实现“大震不倒”。

### 5.3.1 多遇地震作用下结构的弹性变形验算

表 5.3.1 所列各类结构应进行多遇地震作用下结构抗震变形验算,其楼层内最大的弹性层间位移应符合下式要求

$$\Delta_{E1} \leq [\theta_{E1}] H \quad (5.3.1)$$

式中  $\Delta_{\text{弹}}$ ——多遇地震作用标准值产生的楼层内最大的弹性层间位移；计算时除以弯曲变形为主的高层建筑外，可不扣除结构整体弯曲变形；应计入扭转变形，各作用分项系数均采用 1.0；钢筋混凝土结构构件的截面刚度可采用弹性刚度；

$[\theta_{\text{弹}}]$ ——弹性层间位移角限值宜按表 5.4.4 采用；

$H$ ——计算楼层层高。

表 5.4.4 弹性层间位移角限值

结构类型	$[\theta_{\text{弹}}]$
钢筋混凝土框架	1/500
钢筋混凝土框架—抗震墙、板柱—抗震墙、框架—核心筒	1/500
钢筋混凝土抗震墙，筒中筒	1/500
钢筋混凝土框支层	1/500
多、高层钢结构	1/500

钢筋混凝土结构房屋中采用的非结构构件种类繁多，材料的性质和结构的连接性能都会在一定程度上影响其容许变形能力，经济合理确定层间位移角限值是一个十分复杂的问题。对于框架填充墙结构，根据试验资料分析，填充墙与框架间出现周边裂缝到墙面初裂时，变形值很小，层间位移角约为 1/500。当墙面开裂较普遍，沿对角线裂缝基本贯通时，变形值为 1/300~1/200，但此时裂缝不宽且较易修复正常使用。当变形达到 1/200~1/150 时，砌体破裂而严重破坏。所以工程上以砌体填充墙墙面裂缝不超过对角线贯通作为“不坏”的标志。其他材料的非结构墙体，如外挂墙板以及各种轻质隔墙，一般来说，其“不坏”的容许变形能力要比砌体填充墙大，但是目前尚缺乏试验资料。试验表明，钢筋混凝土抗震墙初裂时变形值为 1/500~1/200，墙板出现对角线裂缝的变形值为 1/200~1/150。上表给出了不同结构类型弹性层间位移角限值的范围，主要是依据国内外大量的试验资料研究和有限元分析的结果得出的。

$\Delta_{\text{弹}}$ 为多遇地震作用标准值产生的楼层内最大的弹性层间位移，其计算可以根据地震作用的不同分析方法而采用相应的方法。

(1) 对于按底部剪力法分析结构的地震作用时，其弹性位移的计算可以不考虑弯曲变形而只考虑剪切变形，按下述公式计算

$$\Delta_{\text{弹}}(\text{层}) \leq \frac{\text{层}}{\text{层}} \frac{\text{层}}{\text{层}} \frac{\text{层}}{\text{层}} \quad (5.4.5)$$

式中  $\Delta_{\text{弹}}(\text{层})$ ——第 层的层间位移；

$\text{层}$ ——第 层的水平地震剪力标准值；

$\text{层}$ ——第 层的抗侧移刚度。

(圆) 对于平面结构采用振型分解反应谱法计算水平地震作用时, 其弹性位移可以采用下述公式计算:

第 䄑 振型的位移  $\Delta_{\text{䄑}}$  (蚤 为

$$\Delta_{\text{䄑}}(\text{蚤}) = \alpha_{\text{䄑}} \gamma_{\text{䄑}} \Delta_{\text{䄑}}(\text{蚤}) \quad (\text{员䄑圆})$$

其中  $\alpha_{\text{䄑}}$ ——第 䄑 振型周期对应的地震影响系数;

$\gamma_{\text{䄑}}$ ——第 䄑 振型的振型参与系数;

$\Delta_{\text{䄑}}(\text{蚤})$ ——第 䄑 振型 蚤 质点的水平相对位移;

$T_{\text{䄑}}$ ——第 䄑 振型周期;

$g$ ——重力加速度。

相应于 䄑 振型的层间位移  $\Delta_{\text{䄑}}^{\text{层}}$  (蚤 为

$$\Delta_{\text{䄑}}^{\text{层}}(\text{蚤}) = \Delta_{\text{䄑}}(\text{蚤}) \theta_{\text{䄑}} \quad (\text{员䄑圆})$$

$$\Delta_{\text{䄑}}^{\text{层}}(\text{蚤}) = \Delta_{\text{䄑}}(\text{蚤}) \theta_{\text{䄑}} \quad (\text{员䄑圆})$$

式中  $\theta_{\text{䄑}}$ ——第 䄑 振型 蚤 层的转角;

$H_{\text{䄑}}$ ——第 䄑 层的层高。

各振型的层间位移可以按照平方和开平方的原则组合得到该结构的层间位移  $\Delta_{\text{䄑}}^{\text{层}}$

$$\Delta_{\text{䄑}}^{\text{层}}(\text{蚤}) = \sqrt{\sum_{\text{䄑}} [\Delta_{\text{䄑}}^{\text{层}}(\text{蚤})]^2} \quad (\text{员䄑圆})$$

## 员䄑圆 罕遇地震作用下结构的弹塑性变形验算

员䄑圆 结构弹塑性变形验算的范围 在罕遇地震作用下, 结构一般进入弹塑性状态, 并通过发展塑性变形和耗能来消耗地震输入的能量。大量的分析研究和震害都表明, 具有薄弱楼层的结构, 其弹塑性变形集中的现象十分明显。因此, 要进行罕遇地震作用下结构的弹塑性变形验算, 对于做到“大震不倒”具有重要的意义。《建筑抗震设计规范》(员䄑圆) 为了减少计算工作量, 规定对于砌体结构一般不需要进行弹塑性变形验算, 仅仅对于特别重要的结构和过去在地震中倒塌较多的部分延性结构进行罕遇地震作用下的弹塑性变形验算。

规范规定对下列结构应进行薄弱层弹塑性变形验算: ① 愿度 III、IV 类场地和 愿度时, 高大的单层钢筋混凝土柱厂房的横向排架; ② 苑- 愿度时楼层屈服强度系数小于 愿度的钢筋混凝土框架结构; ③ 高度大于 愿度的钢结构; ④ 甲类建筑和 愿度时乙类建筑中的钢筋混凝土结构和钢结构; ⑤ 采用隔震和消能减震设计的结构。

此外, 规范尚规定对下列结构宜进行薄弱层弹塑性变形验算: ① 表 愿圆 所

列高度范围且属于表 5.1.2 所列竖向不规则类型的高层建筑结构：② 7 度时 III、IV 类场地和 6 度时乙类建筑中的钢筋混凝土结构和钢结构；③ 板柱 原抗震墙结构和底部框架砖房；④ 高度不大于 24m 的高层钢结构。

1. 结构弹塑性变形简化计算方法 具体如下：

(1) 楼层屈服强度系数  $\xi_{yi}$  的定义。为了简化计算和方便工程应用，《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010) 通过大量的算例和统计分析，提出了结构弹塑性变形的简化计算方法，适用于不超过 15 层且层刚度无突变的钢筋混凝土框架结构、单层钢筋混凝土柱厂房。按简化方法计算时，需要确定结构薄弱层部位位置。所谓薄弱层是指在强烈地震作用下，结构首先发生屈服并产生较大弹塑性位移的部位。对于多层和高层房屋，规范是用楼层屈服强度系数大小及其沿房屋高度分布的情况来判断结构薄弱层位置的。楼层屈服强度系数为按构件实际配筋和材料强度标准值计算的楼层受剪承载力和按罕遇地震作用标准值计算的楼层弹性地震剪力的比值；对排架柱，指按实际配筋面积、材料强度标准值和轴向力计算的正截面受弯承载力与按罕遇地震作用标准值计算的弹性地震弯矩的比值。楼层屈服强度系数按下式计算

$$\xi_{yi} = \frac{V_{yi}}{V_{Ei}} \quad (5.1.2-1)$$

式中  $V_{yi}$ ——按框架或排架的梁柱实际截面、实际配筋和材料强度标准值计算的  $i$  楼层受剪承载力；  
 $V_{Ei}$ ——罕遇地震作用下第  $i$  楼层弹性地震剪力。

(2) 楼层受剪承载力  $V_{yi}$  的计算方法。由于地震作用的随机性带来结构破坏形式的不确定性，精确计算楼层受剪承载力是很困难的。对于框架结构而言，较为简单实用的计算方法有三种：拟弱柱化法、节点失效法和接节点平衡法。分别介绍如下：

1) 拟弱柱化法。无论是“强梁弱柱型”还是“强柱弱梁型”框架，该方法都是假定框架各楼层的柱端达到截面受弯承载力，即假定柱端形成塑性铰。首先按下式计算柱端正截面受弯承载力（当柱轴压比小于 0.15 时，即  $N_{yi} \leq 0.15 N_{yi0}$ ）

$$M_{yi} = \xi_{ci} N_{yi} \quad (5.1.2-2)$$

式中  $M_{yi}$ ——柱端按实际配筋和材料强度标准值计算的正截面受弯承载力；  
 $\xi_{ci}$ ——钢筋抗拉强度标准值；  
 $A_{si}$ ——纵向受拉钢筋实际配筋截面面积；  
 $N_{yi}$ ——对应于重力荷载代表值的柱轴向压力（分项系数取 1.0）；  
 $f_{ck}$ ——混凝土抗压强度标准值；

遭, 澡, 澡——柱截面的宽度、高度和有效高度；

葬——混凝土保护层厚度。

然后按下式计算各柱的受剪承载力

灾(蚤越) 酝(蚤垣配(蚤  
匀(蚤) (元咽愿)

式中  $M_{1i}$ 、 $M_{2i}$ ——分别为第  $i$  层第 1 根柱上下端正截面受弯承载力；

灾 (蚤——第 蚤层第 躁根柱受剪承载力；

匀(蚤——第蚤层第躁跟的净高。

将第  $j$  层所有各柱的受剪承载力相加, 就可以得到第  $j$  楼层的受剪承载力  $V_j$ 。

(蚤)

灾(蚤)越 $\sum_{\text{豫防}}$ 灾(蚤) (元四四四)

式中 皂——第  $n$  层柱的总根数。

圆 节点失效法。假定交于框架节点的若干梁柱端正截面受弯屈服，致使节点基本失去抗转动能力，其计算可以分为以下步骤：

① 计算梁、柱端正截面受弯承载力。柱端受弯承载力采用式(5.4.1-1), 梁端采用

醢醢越越粵粵夷夷(澡原葬)(吳國園)

式中  $M_{\text{端}}$ ——梁端按实际配筋和材料强度标准值计算的正截面受弯承载力。

② 判断节点处梁柱的破坏状态。节点处梁柱的破坏状态有如图 5.2.10 所示的三种情况。图 5.2.10a 为弱柱型，即柱端出现塑性铰；图 5.2.10b 和 5.2.10c 为弱梁型，即梁端首先出现塑性铰，在地震作用下，节点上下两柱端有一端截面弯矩达到屈服弯矩而出现塑性铰。

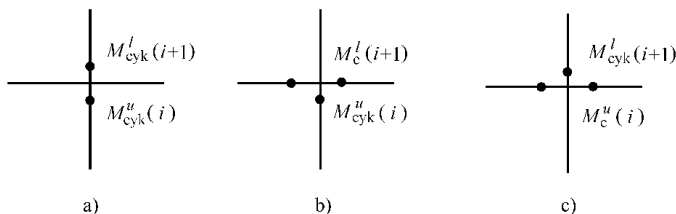


图 8-1-10 节点丧失转动能力三种情况

对于图 8.2.10 所示的情况，由于梁端先屈服，所以有

Σ 酝 约 Σ 酝 (元 圆 圆 员)

式中  $\sum M_{\text{配筋}}$ ——同一节点处梁端按实际配筋和材料强度标准值计算的正截面受弯承载力之和；

②  $M_{yk}^{max}$ ——同一节点处柱端按实际配筋和材料强度标准值计算的正截面受弯承载力之和。

其次，在节点失效时，由于节点下柱上端屈服，其弯矩值达到  $M_{yk}^{max}$ （Ⅱ；由于节点上柱下端没有屈服，其弯矩值将达不到  $M_{yk}^{max}$ （Ⅱ），而应该为

$$M_{yk}^{max} > M_{yk}^{max} \frac{K_{yk}^{max}}{K_{yk}^{max} + K_{yk}^{max}} \quad (式 4-10)$$

式中  $K_{yk}^{max}$ ， $K_{yk}^{max}$ ——分别为节点下柱（第  $k$  层）和上柱（第  $k+1$  层）的线刚度。

对于图 4-10 所示的情况，由于梁端先屈服，同样有式（4-10）成立。同样在节点失效时，由于节点上柱下端屈服，其弯矩值达到  $M_{yk}^{max}$ （Ⅱ）；由于节点下柱上端没有屈服，其弯矩值将达不到  $M_{yk}^{max}$ （Ⅱ），而应该为

$$M_{yk}^{max} > M_{yk}^{max} \frac{K_{yk}^{max}}{K_{yk}^{max} + K_{yk}^{max}} \quad (式 4-11)$$

③ 计算楼层受剪承载力。根据节点处梁柱塑性铰判别，层间柱将出现图 4-11 所示的五种情况，可以求得柱和楼层的受剪承载力

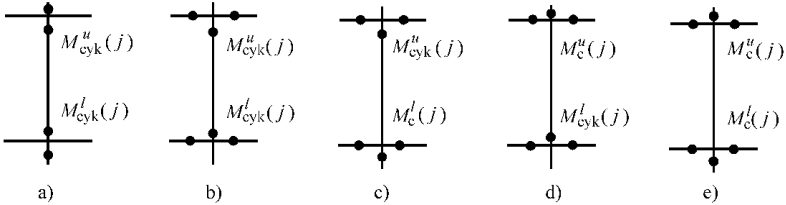


图 4-11 层间柱五种破坏状态

剪和遭为

$$V_{yk}^{max} > \frac{M_{yk}^{max}}{H_{yk}} \quad (式 4-12)$$

糟为

$$V_{yk}^{max} > \frac{M_{yk}^{max}}{H_{yk}} \quad (式 4-13)$$

凿为

$$V_{yk}^{max} > \frac{M_{yk}^{max}}{H_{yk}} \quad (式 4-14)$$

藻为

$$V_{yk}^{max} > \frac{M_{yk}^{max}}{H_{yk}} \quad (式 4-15)$$

④ 将第  $k$  层所有各柱的受剪承载力相加，就可以得到第  $k$  楼层的受剪承载力  $V_{yk}$ （Ⅱ），计算式仍然为式（4-16）。



节点平衡法。对于“强柱弱梁型”框架，假定全部梁端均达到正截面受弯承载力后柱才屈服，此时整个框架也就达到整体破坏机制。此时层间柱端受弯承载力按柱的线刚度分配确定。

$$\xi_{\text{柱}}(\text{蚤}) \geq \xi_{\text{梁}} \frac{\sum \text{运蚤}}{\sum \text{运蚤垣运蚤垣运蚤}} \quad (\text{员圆圆})$$

$$\xi_{\text{梁}}(\text{蚤垣运蚤}) \geq \xi_{\text{梁}} \frac{\sum \text{运蚤}}{\sum \text{运蚤垣运蚤垣运蚤}} \quad (\text{员圆圆})$$

$$\text{穴}(\text{蚤}) \geq \frac{\xi_{\text{梁}}(\text{躁垣运蚤})}{\xi_{\text{梁}}(\text{躁})} \quad (\text{员圆圆})$$

震害表明，框架结构屈服强度系数沿楼层的分布往往是不均匀的，结构往往是在相对薄弱的楼层率先屈服而导致变形集中，所以罕遇地震作用下的弹塑性变形验算，实质是控制薄弱层的弹塑性变形不超过允许值。在上述计算楼层屈服剪力的方法中，节点失效法比较接近于实际，拟弱柱化法对于楼层屈服剪力估计偏大，而节点平衡法则估计偏小，在计算中应注意其影响。

(猿) 结构薄弱层位置的判别。规范规定，当薄弱层的屈服强度系数不小于相邻层该系数平均值的 园愿时，可以认为该楼层屈服强度系数沿高度分布均匀，即

$$\text{标准层} \quad \xi_{\text{赠}}(\text{蚤}) \geq \frac{\text{园愿}}{\text{圆}} [\xi_{\text{赠}}(\text{蚤原员}) \text{垣} \xi_{\text{赠}}(\text{蚤垣员})] \quad (\text{员圆猿})$$

$$\text{顶层} \quad \xi_{\text{赠}}(\text{灶}) \geq \frac{\text{园愿}}{\text{圆}} \xi_{\text{赠}}(\text{灶原员}) \quad (\text{员圆猿})$$

$$\text{底层} \quad \xi_{\text{赠}}(\text{员}) \geq \frac{\text{园愿}}{\text{圆}} \xi_{\text{赠}}(\text{圆}) \quad (\text{员圆猿})$$

楼层屈服强度系数沿高度分布均匀的结构，可以取首层；楼层屈服强度系数沿高度分布不均匀的结构可以取该系数最小的楼层和相对较小的楼层，一般不超过 圆-猿处；单层厂房可以取上柱。

(源) 弹塑性层间位移的计算。大量的分析和研究表明，地震作用下结构薄弱层的层间弹塑性位移和相应弹性位移之间具有相对稳定的关系，因此薄弱层层间弹塑性位移可以由相应层间弹性位移乘以修正系数得到，按下式计算

$$\Delta \text{怎} \geq \eta_{\text{责}} \Delta \text{怎}_{\text{梁}} \quad (\text{员圆源})$$

或

$$\Delta \text{怎} \geq \mu \Delta \text{怎}_{\text{梁}} \geq \frac{\eta_{\text{责}}}{\xi_{\text{赠}}} \Delta \text{怎}_{\text{梁}} \quad (\text{员圆源})$$

其中

$$\Delta \text{怎}(\text{蚤}) \geq \frac{\text{穴}(\text{蚤})}{\text{噪蚤}} \quad (\text{员圆源})$$

式中  $\Delta \text{怎}$ ——层间弹塑性位移；

$\Delta \text{怎}_{\text{梁}}$ ——罕遇地震作用下按弹性分析的层间位移；

$\Delta \text{怎}_{\text{梁}}$ ——层间屈服位移；

$\mu$ ——楼层延性系数；

$\eta_{\text{弹}}$ ——第  $\text{弹}$  层的弹性层间刚度；

$\eta_{\text{弹}}$ ——弹塑性层间位移增大系数，当薄弱层（部位）的屈服强度系数不大于相邻层（部位）该系数平均值的  $0.8$  倍时，可按表  $10.2.1$  采用，当不大于该平均值的  $0.5$  倍时，可按表内相应数值的  $1.5$  倍采用；其他情况可采用内插法取值。

$\xi_{\text{弹}}$ ——楼层屈服强度系数。

(缘) 结构薄弱层层间弹塑性位移的验算。结构薄弱层层间弹塑性位移应符合下式要求

$$\Delta u_{\text{弹}} \leq [\theta_{\text{弹}}] \text{澡}$$
(员缘缘缘)

式中  $[\theta_{\text{弹}}]$ ——弹塑性层间位移角限值，可按表  $10.2.2$  采用；对钢筋混凝土框架结构，当轴压比小于  $0.4$  时，可提高  $1.5$  倍；当柱子全高的箍筋构造比规范规定的最小配箍特征值大  $1.5$  倍时，可提高  $1.5$  倍，但累计不超过  $1.5$  倍。

澡——薄弱层楼层高度或单层厂房上柱高度。

表  $10.2.1$  弹塑性层间位移增大系数

结构类型	总层数 灶或部位	$\xi_{\text{弹}}$		
		缘缘	缘原	缘猿
多层均匀框架结构	缘- 源	员缘缘	员缘缘	员缘缘
	缘- 苑	员缘缘	员缘缘	员缘缘
	愿- 员圆	员缘缘	圆缘缘	圆缘缘
单层厂房	上柱	员缘缘	员缘缘	圆缘缘

表  $10.2.2$  弹塑性层间位移角限值

结构类型	$[\theta_{\text{弹}}]$
单层钢筋混凝土柱排架	员缘缘
钢筋混凝土框架	员缘缘
底部框架砖房中的框架—抗震墙	员缘缘
钢筋混凝土框架—抗震墙，板柱—抗震墙，框架核心筒	员缘缘
钢筋混凝土抗震墙，筒中筒	员缘缘
多、高层钢结构	员缘缘

猿结构弹塑性变形计算的其他方法 除了可以采用简化方法计算的建筑结构外，可以采用静力弹塑性分析方法和弹塑性时程分析法等。规则结构采用弯剪层模型或平面杆系模型，不规则结构应采用空间结构模型。

# 第 源篇 风 灾 害

## 第 员章 风的类型与分类

### 员.1 风的类型

俗话说,空气流动就成风。风是空气从气压高的地方流向气压低的地方流动而形成的。自然界中常见的风的类型有热带气旋,季风和龙卷风。

**员.1.1 热带气旋** 热带气旋是发生热带或副热带海洋上的气旋性涡旋,在北半球做逆时针方向旋转,在南半球做顺时针方向旋转。

热带气旋的形成随地区不同而异,它主要是由太阳辐射在洋面所产生的大量热能转变为动能(风能和海浪能)而产生。海洋水面受日照影响,往往在赤道及低纬度地区生成热而湿的水汽,水汽向上升起形成庞大的水汽柱和低气压。热低压区和稳定的高压区气压之差产生空气流动,由于平衡产生相互补充的力使之成螺旋状流动,气压高低相差越大,旋转流动的速度越快。旋转流动的中心即热带旋风中心,习惯上称为“眼”,在“眼”的范围内相对平衡,无风也无云层。“眼”的直径一般小于 员00 公里,有时可以大于 缘00 公里。台风的气旋直径可达 源00~员000 公里,紧紧环绕在其周围的圆环形风带为强烈的暴风,并在旋转中向前水平移动。

热带气旋的强度以其中心附近的平均风力来确定,世界气象组织对此规定了四个强度等级,即国际热带气旋的名称与等级标准。

(员) 热带低压。中心附近最大平均风力 远~ 苑级,即风速为 员2~员5 米/秒。

(圆) 热带风暴。中心附近最大风力达 愿~ 怨级,即风速为 员6~员8 米/秒。

(猿) 强热带风暴。中心附近最大风力在 员0~ 员1级,即风速为 圆2~圆4 米/秒。

(源) 台风。中心附近最大平均风力达 员2级以上,即风速在 圆4 米/秒以上。

为了便于分别和预防,我国每年对在经度 员00°以西、赤道以北的西北太平洋和南海海面上出现的中心附近最大风力达 愿级及 愿级以上的热带气旋,按其先后出现的次序进行编号。编号采用四位数,前两位数码表示年份,后两位数码表示先后次序。例如, 员999 年出现的第一次热带气旋,编号为 怨999,第二次热带气旋为 怨000,以此类推。有的国家(主要是美、英)以名称确认发生的热带气旋,

例如，1959年的“迈阿密”台风，美国关岛气象台命名为“悦利”（卡拉）。我国于1959年开始，也在气象预报中采用台风的国际名字。

**季风** 季风是大气流中出现的最为频繁的风，它是由内陆和海洋空气温差引起的风。这种风冬季由内陆吹向海洋，夏季由海洋吹向内陆，这是由于陆地上四季气温的变化要比海洋大所引起的。由于地表性质不同，对热的反应也不同。冬季大陆上辐射冷却强烈，温度低就形成高压，而与它相邻的海洋，由于水的比容量大，其辐射冷却比大陆缓慢，温度比大陆高，因而气压低。因此，气压梯度的方向是由大陆指向海洋，即风从陆地吹向海洋。到了夏天，风向则相反。这种风由于与一年的四季有关，故称为季风。

**龙卷风** 龙卷风是一个猛烈旋转着的圆形空气柱，它的上端与雷雨云相接，下端有的悬在半空中，有的直接延伸到地面或水面，一边旋转，一边向前移动。发生在海上，犹如“龙吸水”的现象，称为“水龙卷”；出现在陆上，卷扬尘土，卷走房屋、树木等的龙卷，称为“陆龙卷”。据统计，每个陆地国家都出现过龙卷风，其中美国是发生龙卷风最多的国家。加拿大、墨西哥、英国、意大利、澳大利亚、新西兰、日本和印度等国，发生龙卷风的机会也很多。

我国龙卷风主要发生在华南和华东地区，它还经常出现在南海的西沙群岛上。

龙卷风的范围小，直径平均为100~1000m；直径最小的不过几十米，只有极少数直径大的才达到1000m以上。它的寿命很短促，往往只有几分钟到几十分钟，最多不超过几小时。其整体移动速度平均为15~25m/s，最快的可达35m/s。移动路径的长度大多在1000m左右，短的只有几十米，长的可达几百或千米以上。它造成破坏的地面宽度一般只有15~100m。

一般情况，龙卷风（就地旋转）的风速在15~25m/s，极端情况下，可达到35m/s或超过声速。超声速的风能，可产生极大的威力。尤其可怕的是龙卷风内部存在低气压，所以，在龙卷风扫过的地方，它犹如一个特殊的吸泵一样，往往把所触及的水和沙尘、树木等吸卷而起，形成高大的柱体。当龙卷风把陆地上某种有颜色的物质或其他物质及海里的鱼类卷到高空，移到某地再随暴雨降到地面，就形成“鱼雨”、“血雨”、“谷雨”、“钱雨”了。

当龙卷风扫过建筑物顶部或车辆时，由于它的内部气压极低，使建筑物或车辆内外形成强烈的气压差，顷刻间就会使建筑物或交通车辆发生“爆炸”。如果龙卷风的爆炸作用和巨大风力共同施展威力，那么它们所产生的破坏和损失将是极端严重的。

**其他风灾** 其他能形成灾害的风有雷暴大风、“黑风”等。

雷暴大风天气是强雷暴云的产物。强雷暴云，又称“强风暴云”，主要是指那些伴有大风、冰雹、龙卷等灾害天气的雷暴。强风暴云体的前部是上升气流，

后部是下沉气流。由于后部下降的雨、雹等的降水物强烈蒸发，使下沉的气流变得比周围空气冷。这种急速下沉的冷空气在云底就形成一个冷空气堆，气象上称“雷暴高压”，使气流迅速向四周散开。因此当强雷暴云来临的瞬间，风向突变，风力猛增，往往由静风突然变为狂风大作，暴雨、冰雹俱下。这种雷暴大风，突发性强，持续时间甚短，一般风力达 8 级，所以有很大的破坏力。当强风暴云中伴有冰雹和龙卷风时其破坏性就更大。

所谓“黑风”是一种强烈的沙尘暴或沙暴，现在已常用沙尘暴这个词了。它是由强风将地面大量的浮尘细沙吹起，卷入空中，使空气混浊，能见度很低的一种恶劣天气现象。内蒙古一带又称之为“黄毛风”。发生黑风的条件，一是要有足够强大而持续的风力；二是大风经过地区植被稀疏，土质干燥松软。因此，我国阿拉善高原、内蒙古北部、河西走廊和塔里木盆地、柴达木盆地及黄土高原北部等是最易出现黑风的地区。春季，这些地区气温回升很快，低层空气很不稳定，空气极易扰动，能把沙土卷向空中。据研究，当风速达 10 m/s 左右时，即可明显起沙。尤其当冷峰过境时，峰后大风更使大量沙粒、尘土扬向天空，有时沙尘气层厚度可高达 1000 m，然后随高空气流向西南飘移，其浮尘部分常常可以扩散到几千公里远的地方。黑风所到之处，飞沙走石，日光昏暗，能见度很差。这种天气对航空和交通运输及农牧业生产等均有严重影响。1958 年 5 月 1 日，内蒙古西中部出现一次强黑风天气，呼和浩特市下午 3 时天空即一片橙黄，百米之外视物不清，室内需点灯。风过之处，吹断电杆，通信中断，火车停驶。尤其是在毛乌素沙漠的鄂托克前旗，午后起风，瞬间飞沙走石，最大风速达 15 m/s，对面不见人，造成 1 人死亡，1 万多头（只）牧畜被风沙掩埋，跑散丢失牲畜 1 万余头（只），沙埋或吹坏水井 1 千余眼。

北京地区受沙尘暴侵袭已有多多年，目前正在联合西北各省共同建造防风固沙林及改善植被。

八 风的等级

为了区分风的大小，根据风速的大小，将风划分为 16 个等级，见表 8-1

表 8-1 风力等级表

风力等级	名称	海面状况		海岸渔船征象	陆地地面物征象	距地 10 m 高处相当风速 (m/s)
		浪高 (m)				
		一般	最高			
0	无风	—	—	静	静、烟直上	0.0—0.2
1	软风	0.1—0.2	0.3—0.4	寻常渔船略觉摇动	烟能表示风向，但风向标不能转动	0.3—0.5

(续)

风力等级	名称	海面状况		海岸渔船征象	陆地地面物征象	距地 15m 高处相当风速 (m/s)
		浪高 (m)				
		一般	最高			
圆	轻风	圆圆	圆猿	渔船张帆时, 可随风移行每小时 圆- 猿	人面感觉有风, 树叶有微响, 风向标能转动	猿- 猿猿
猿	微风	圆猿	猿圆	渔船渐觉簸动, 随风移行每小时 猿- 猿猿	树叶及微枝摇动不息, 旌旗展开	猿猿- 猿猿
源	和风	猿圆	猿猿	渔船满帆时倾于一方	能吹起地面灰尘和纸张, 树的小枝摇动	猿猿- 猿猿
缘	清风	圆圆	圆猿	渔船缩帆 (即收去帆之一部分)	有叶的小树摇摆, 内陆的水面有小波	猿圆- 猿圆
远	强风	猿圆	猿圆	渔船加倍缩帆, 捕鱼须注意风险	大树枝摇动, 电线呼呼有声, 举伞困难	猿圆- 猿圆
苑	疾风	猿圆	猿猿	渔船停息港中, 在海上下锚	全树摇动, 迎风步行感觉不便	猿圆- 猿圆
愿	大风	猿猿	猿猿	近港渔船皆停留不出	微枝折毁, 人向前行, 感觉阻力甚大	猿圆- 猿圆
怨	烈风	猿圆	猿圆	汽船航行困难	烟囱顶部及平瓦移动, 小屋有损	猿圆- 猿圆
圆	狂风	猿圆	猿圆	汽船航行颇危险	陆上少见, 见时可使树木拨起或将建筑物吹毁	猿圆- 猿圆
猿	暴风	猿圆	猿圆	汽船遇之极危险	陆上很少, 发生时必有重大损毁	猿圆- 猿圆
圆	飓风	猿圆	—	海浪滔天	陆上绝少, 其捣毁力极大	猿圆- 猿圆

# 第 10 章 风灾害及对建筑物的影响

## 10.1 风灾害实例

大风，尤其是强热带风暴（在西北太平洋和我国东南沿海称为台风，在大西洋、加勒比海、墨西哥湾及东太平洋地区称为飓风）对人类造成的灾害在各种自然灾害中排在前三位之内，是发生很频繁的自然灾害。表 10-1 列出了 20 世纪部分特大风灾的情况。

表 10-1 20 世纪特大风灾情况

年份	地 点	风类型	受灾情况
1900	美国加尔维斯顿岛	飓风	25000 多人遇难
1906	中国香港地区	台风	1 万多人丧生，被毁房屋和船只价值 1000 万美元
1923	日本东京	强烈台风	死亡 1 万多人，10 万间房屋倒塌
1931	中国汕头	台风	2 万人死亡，赤地千里
1935	美国佛罗里达	飓风	1000 人死亡
1962	中国香港地区	台风	死亡 1 万多人、数十万人受伤
1962	美国得克萨斯	飓风	数座城市被毁，数千人死亡
1963	日本名古屋	超级台风	1000 多人失踪，经济损失达 100 亿美元
1968	加勒比海	飓风	1000 多人死亡，1 万人无家可归
1970	孟加拉国	风暴潮	1 万人死亡，100 多万人受灾
1979	美国 德州	龙卷风	100 多人丧生，财产损失超过 10 亿美元
1982	中国河南	暴雨	2000 号台风登陆引起暴雨，1 万人死亡，20 个县受灾
1985	加拿大、美国	龙卷风	死亡 1000 余人，直接经济损失 100 亿美元
1988	美洲大陆加勒比	飓风	100 万公顷农田被毁，数百人死亡
1989	中国海南岛	台风	1000 人死亡，1 万人受伤。100 多万间房屋倒塌，直接经济损失高达 1000 亿元
1991	孟加拉湾	风暴潮	1 万多人丧生，数百万人无家可归
1991	中国海南岛	台风	受灾人口达 100 多万，100 人死亡，直接经济损失 100 亿元
1992	美国佛罗里达	飓风	经济损失 100 多亿美元
1993	中国浙江	台风	100 多个县市受灾，受灾人口 1000 多万，直接经济损失高达 1000 亿元
1998	印度内陆地区	热带风暴	死亡 1000 多人，直接经济损失 10 亿美元

大风尤其是强热带风暴引发的灾害除强大的风力可以破坏建筑物外，还因引起大浪、风暴潮及暴雨而造成灾害。热带气旋是世界上最严重的自然灾害之一，在世界历史上一次灾害死亡人数达  $10^4$  以上的，热带风暴占  $1/3$  之多，一次死亡人数在  $10^4$  万人以上的也有三次。全球平均每年发生热带气旋  $10^2$  个左右，平均年死亡  $10^4$  万人左右，造成经济损失  $10^4 \sim 10^5$  亿美元。以下是大风灾害的几个实例。

**1954 年强热带气旋袭击孟加拉湾** 1954 年 6 月 10 日一个特强热带气旋（中心实测最大风速  $30 \text{ m/s}$ ）席卷了孟加拉湾沿岸，产生了特大的风暴潮，估计高度超过  $10 \text{ m}$ ，使  $10^4$  万人丧失了生命，溺死牲畜  $10^4$  万头， $10^4$  万所房屋被冲毁，大片农田被淹，仅农作物一项的损失就达  $10^4$  万美元，有  $10^4$  万人受灾， $10^4$  万人无家可归。这是近  $10^4$  年中灾害最为严重的一次风暴潮。

**1959 年强台风袭击广东汕头** 1959 年 8 月 10 日夜，一次强台风袭击了广东省汕头地区，造成特大风暴潮灾害。据史料记载和我国著名气象学家竺可桢先生考证，有  $10^4$  万余人丧生，更多的人流离失所，无家可归。这是  $10^4$  世纪我国死亡人数最多的一次风暴潮灾害。

当时的许多报纸及地方志都记载了这次潮灾。据《潮州志》记载，台风“震山撼岳，拔木发屋，加以潮汐骤至，暴雨倾盆，平地水深丈余，沿海低下者且数丈，乡村多被卷入海涛中”，“受灾尤烈者，如澄海之外沙，竟有全村人命财产化为乌有”。汹涌的潮水伴随着狂风巨浪沿约  $10^4$  公里的海岸线冲毁堤围，侵入内陆达  $10^4$  公里。

**1959 年台风袭击浙江温州** 1959 年 8 月 10 日晚， $10^4$  号台风在浙江省温州市登陆，于 10 日上午离开浙江进入江西境内，转为热带低气压。 $10^4$  号台风登陆时中心最大风力在  $10^4$  级以上，温州沿海受  $10^4$  级以上风力袭击的时间长达  $10^4$  小时，伴有暴雨和大潮，给浙江东南沿海地区造成了极大的灾害，经济损失严重。 $10^4$  号台风受灾人口超过  $10^4$  万人，死亡  $10^4$  多人，大批民房倒塌或受损，（据统计，共损坏房屋  $10^4$  间，其中倒塌  $10^4$  间。）许多农田被海水淹没，直接经济损失超过  $10^4$  亿元。温州电厂被迫停止发电，厂内煤码头两台卸煤机被台风吹倒， $10^4$  座输电铁塔倒塌，输电线路和杆架损坏严重，造成温州地区很长时间停电、停水。洞头百米高的电视塔被风吹倒，温州市中心公安大楼的  $10^4$  米高的通信铁塔也被风刮倒。此外，台风使温州地区附近的  $10^4$  条干线公路被洪水淹没， $10^4$  座桥梁被冲垮，温州机场飞机跑道被淹，机场被迫关闭  $10^4$  多天。

**1962 年飓风洗劫加勒比海** 1962 年 9 月 10 日到 12 日，生成于大西洋西部的“弗洛拉”飓风，以每小时将近  $10^4$  米的速度席卷了加勒比海海域，飓风在加勒比海海角及岛屿上空怒吼，雨水、洪水、暴风以历史上罕见的威力蹂躏着海地、古巴、多巴哥等这些加勒比海海域的国家。咖啡、水稻和香蕉等作物被全部毁掉。短短的  $10^4$  天，海地的  $10^4$  领土变成废墟，瓦砾堆随处可见，约有  $10^4$  万人的房屋被



毁,死亡 1 万余人,近 5 万人被迫流浪街头,无家可归。此次劫难中,美国在古巴的关塔那摩海湾的舰队基地,也惨遭破坏,所有的营房全部被摧毁,风暴所引起的洪水冲垮了军事基地的一切设施,淹没了整个关塔那摩海湾。

继“玛丽”台风登陆日本函馆 1862 年 9 月,“玛丽”台风将停泊在日本函馆港的一艘渡轮吹到港外触礁沉没,港内另有 1 艘货轮相继吹翻沉没,死亡 1500 人,是世界航海史上的三大海难之一。

1975 年河南省发生特大暴雨 1975 年 8 月 18 日,河南省的汝河、沙河、颍河、唐河和白河流域上游的浅山丘陵地区发生了我国历史上罕见的特大暴雨。位于暴雨中心的板桥、石漫滩两座大型水库漫坝失事。全省因这次特大暴雨引发严重洪水,共有 10 个县市的 150 万亩农田被淹,其中 100 万亩农田受到毁灭性的灾害。受灾人口上千万,死亡近 1 万人,京广铁路中断行车达 1 周。这一暴雨是由 1975 年 8 月 18 日台风经过河南而引发的。

1961 年“卡米尔”飓风袭击墨西哥湾 1961 年 9 月 13 日夜“卡米尔”(Hurricane Camille)飓风袭击了美国墨西哥湾沿岸,在密西西比州帕斯克里提安附近产生的风暴潮有 10 米高。这是美国记录到的最大台风风暴潮高度。

“卡米尔”台风风暴潮给美国的墨西哥湾沿岸造成了巨大的损失,死亡 1500 人,经济损失达 10 亿美元。

1962 年 10 月龙卷风袭击加拿大和美国部分地区 1962 年 10 月底,强烈的 10 级龙卷风袭击了加拿大南部的安大略省以及美国北部的俄亥俄州、宾夕法尼亚州和纽约州。据不完全统计,加拿大的安大略省有 100 人死亡,伤残 1000 多人;美国仅俄亥俄州的奈尔斯,一个 10 万人的小城市,遭受的经济损失就达到了 100 万美元;被龙卷风扫荡的重灾区宾夕法尼亚州死亡人数高达 100 人,伤残 1000 多人,直接经济损失高达 10 亿美元。

1970 年我国苏北地区遭遇特大龙卷风 1970 年 7 月 16 日,苏北盐城、射阳、大丰县出现特大龙卷风,影响范围宽约 100 公里,长约 100 公里,各地受影响时间仅 10 分钟,但风力极猛,摧毁力极大。造成 100 人死亡,毁坏房屋 10 万多间,其中倒塌 10 万余间。盐城磷肥厂有一个直径 10 米、长 10 米、重 10 吨的大容器被大风从新洋河北岸吹到南岸。

## 10.1 大风造成的危害分类

10.1.1 直接危害 直接危害主要是大风对农、林业生产可造成直接损失及对土地造成土壤风蚀沙化。

在我国北部和西北内陆地区,风蚀比较强烈。近半个多世纪以来形成的沙漠化土地约 100 万公顷,如内蒙古乌兰察布盟后山地区开垦的农田已有 100 公顷被风蚀沙漠化。近 10 多年来,海拉尔周围开垦的土地,黑土层平均已被吹蚀 10 厘米~100 厘米。

此外，在嫩江下游、吉林西部和黄河故道等地区也出现沙漠化土地。

强风可造成农作物和林木折枝损叶、拔根、倒伏、落粒、落花、落果和受粉不良等。受害程度因风力、株高、株型、密度、行向和生育期等而异。

风还能加速植物的蒸腾作用，特别在干热条件下，使其耗水过多，根系吸水不足，可导致农作物灌浆不足，瘪粒严重甚至枯死；林木也出现成枯顶或枯萎等现象。

**间接危害** 间接危害指传播病虫害和扩散污染物，由农作物无收而引起的饥荒、疾病等。

## 风对建筑物的破坏作用

土木工程防灾、减灾工程更加侧重于风对建筑物破坏的研究，从中找出规律并制订完善的抗风设计方法以减轻风的灾害。风对建筑物的破坏主要有以下几个方面：

**房屋建筑** 对房屋建筑结构的破坏主要表现在以下几个方面：

(1) 对高层结构的破坏作用。例如，1959年的一次大风使得美国一座叫 的十多层大楼的钢框架发生塑性变形，造成围护结构严重破坏，大楼在风暴中严重摇晃。

(2) 对简易房屋，尤其是轻屋盖房屋造成的破坏。例如，1962年一次台风袭击深圳，一民工工棚倒塌，造成 人死亡， 余人受伤。又如，1959号台风在厦门登陆，有 左右的轻型屋盖被吹落。

(3) 对外墙饰面、门窗玻璃及玻璃幕墙的破坏。

例如，1959年 月完成的美国波士顿约翰汉考克大楼（ 层，高 ），自 年夏天至 年的 月，由于大风的作用，大约有 块窗玻璃破碎， 块严重损坏， 块开裂，后来不得不调换了所有的 块玻璃，价值 万美元以上，不但超过了原玻璃的价值，同时，还因采取了其他防护措施增加了造价。该建筑的使用不仅被延误了三年半，而且造价从预算的 万美元上升到了 万美元。

**高耸结构的破坏** 高耸结构主要涉及一些桅杆和电视塔，其中桅杆结构更容易遭受风灾害。桅杆结构的刚度小，在风载下易产生较大幅度的振动，从而容易导致桅杆的疲劳或破坏。世界范围内曾发生了数十起桅杆倒塌事故。例如，1959年 月，捷克一桅杆在风速达 时因失稳而破坏；1959年，英国约克郡（ 高 的钢管电视桅杆被风吹倒；1959年，前联邦德国 一座高 的无线电视桅杆受风倒塌；1959年，美国 一座高 的电视桅杆受阵风倒塌，造成 人死亡。

**生命线工程的破坏** 供电线路的电杆埋深浅，在大风中容易被刮倒，造

成停电事故，严重影响生产和生活。公交线路上的停车路牌受风面大而埋深浅也易在大风中刮翻。例如，1991年 10月 10号台风于 10月 20日在浙江近海生成，于 10月 28日袭击杭州，一夜之间美丽的杭州面目全非，数以万计的树木被刮倒，水泥电线杆被折断、电线被吹断，电信和输电线路中断，造成全市严重停电、停水。铁路和市内交通一度中断。又如，1993年 10月 10号台风登陆厦门，市区路灯电杆倒塌 1500根，灯具脱落 1500多套，公交路牌损坏 1500块，人行道损坏 1500m<sup>2</sup>，10台公交车玻璃破损，公交候车廊倒塌 150座，严重影响市内交通，造成巨大经济损失。

2. 2. 1 大跨度柔性桥梁的破坏 桥梁的风毁事故最早可以追溯到 1859年，苏格兰的 1859年 10月 10号台风首先因风的作用而遭到毁坏。随后，到 1860年，相继有 15座桥因风的作用而受到不同程度的破坏，见表 1-1-1 其中英国苏格兰的 1860年 10月 10号台风的倒塌造成了 15人死亡的惨剧。此外，1860年到 1865年间，日本的一座简易人行吊桥和一座架设中的桁架桥相继遭到风毁。近几年来，我国随着大跨度桥梁的建设，桥梁的风害也时有发生。例如，广东南海公路斜拉桥施工中吊机被大风吹倒，砸坏主梁；江西九江长江公路铁路两用钢拱桥吊杆的涡激共振，上海杨浦斜拉桥缆索的涡振和风雨振使索套损坏等。这些桥梁风害事故的出现使人们越来越意识到桥梁风害问题的重要性。

表 1-1-1 风毁桥梁一览表

桥名	位置（所在地）	路径	毁坏年份
1859年 10月 10号台风	苏格兰	1859	1859
1860年 10月 10号台风	英格兰	1860	1860
1860年 10月 10号台风	德国	1860	1860
1860年 10月 10号台风	英格兰	1860	1860
1860年 10月 10号台风	苏格兰	1860	1860
1860年 10月 10号台风	威尔士	1860	1860
1860年 10月 10号台风	法国	1860	1860
1860年 10月 10号台风	美国	1860	1860
1860年 10月 10号台风	美国	1860	1860
1860年 10月 10号台风	苏格兰	1860	1860
1860年 10月 10号台风	美国	1860	1860
1860年 10月 10号台风	美国	1860	1860

2. 2. 2 对广告牌、标语牌等附属建筑的破坏 广告牌、标语牌常建在主建筑物的顶部，常为竖向悬臂结构，受风面积相对较大，而根部抗弯能力往往不足，遇大风即倒翻。在大风中广告牌吹翻砸伤行人的事是屡见不鲜的。

## 第 11 章 工程结构的抗风设计

### 11.1 风对结构的作用

当风以一定的速度向前运动遇到阻塞时，将对阻塞物产生压力，即风压。将阻塞物体上的风压沿表面积分，就可得到风作用力，称为风荷载。这种风的作用力有三个分力成分，即顺向风力、横向风力和扭力矩。由风荷载产生的结构内力、位移、速度和加速度的响应，称为风效应。与一般结构设计要求一样，风效应应满足结构对于安全性、适用性和耐久性的要求。在风荷载的三个分量中，顺风作用是最主要的，一般工程结构均应考虑；横风向力则对于细长结构，尤其是柔性圆截面结构，如烟囱、缆索等才须计算，对于柔性细长或不对称结构则应计及风扭力矩。

风荷载是一种动力作用或动荷载。

大量风的实测资料表明，在风的顺风向风速时程曲线中，包括两种成分（如图 11-1 所示）：一种是长周期成分，其值一般在 10s 以上；另一种是短周期成分，一般只有几秒钟左右。根据风的这一特点，实用上常把顺风向的风效应分解为平均风（即稳定风）和脉动风（也称阵风脉动）来加以分析。

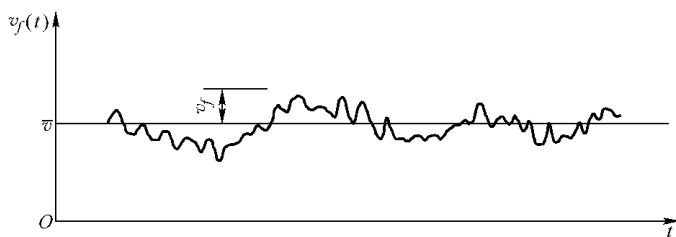


图 11-1 平均风速  $\bar{v}$  和脉动风速  $v'_f$

平均风相对稳定，主要受风的长周期成分影响。由于风的长周期远大于一般结构的自振周期，因此这部分风对结构的动力影响很小，可以忽略，可将其等效为静力作用。

脉动风是由于风的不规则性引起的，其强度随时间随机变化。由于脉动风周期较短，与一些工程结构的自振周期较接近，将使结构产生动力响应。实际上，脉动风是引起结构顺风向振动的主要原因。

根据观察资料，可以了解到在不同粗糙度的地面上空同一高度处，脉动风的性质有所不同。在地面粗糙度大的上空，平均风速小，而脉动风的幅值大且频率

高；反之在地面粗糙度小的上空，平均风速大，而脉动风的幅值小且频率低。

## 4.1 结构上的静力风荷载（基本风压的标准值）

**4.1.1 风速与风压的关系** 设速度为  $v$  的一定截面的气流冲击面积较大的结构物时，由于受到阻碍，气流改向向四周外围扩散，形成压力气幕，如图 4-1 所示。如果气流原先的压力强度为  $p_0$ ，气流冲击结构物后速度逐渐减小，其截面中心一点的速度减小至零时，在该点处产生的最大气流压强，设为  $p_s$ 。则结构物受气流冲击的最大压力强度为  $p_s - p_0$ ，此即工程上所定义的风压，记为  $w_0$ 。

为求得风压  $w_0$  与风速  $v$  的关系，设气流每点的物理量不变，略去微小的位势差影响，取流线中任一小段  $dl$  如图 4-2 所示，设  $p_1$  为作用于小段左端的压力，则作用于小段右端近压力气幕的压力为  $p_2$ 。以顺流向的压力为正，作用于小段上的合力为  $p_1 - p_2$ 。该合力应等于小段的气流质量  $\rho v dl$  与顺流向加速度  $\frac{dv}{dt}$  的乘积，即

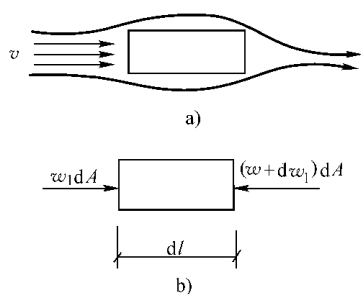


图 4-1 风压的产生

$$p_1 - p_2 = \rho v dl \frac{dv}{dt} \quad (4-1)$$

式中  $A$ ——气流截面面积；

$\rho$ ——空气质量密度。

由式 (4-1) 可得

$$p_1 - p_2 = \rho A dl \frac{dv}{dt} \quad (4-2)$$

注意到

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dx} \quad (4-3)$$

可得

$$p_1 - p_2 = \rho A dl v \frac{dv}{dx} \quad (4-4)$$

此方程的解为

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4-5)$$

上式称为伯努利方程，其中  $C$  为常数。从该方程可以看出，气流在运动过程中，其本身压力随流速变化而变化，流速快，则压力小，而流速慢，则压力大。当  $v \rightarrow 0$  时， $p_1 = p_2$ ，代入式 (4-5) 得

糟越 憎 (员缘园)

而当风速为 增时, 憎越憎, 则

憎越憎 原员 增 (员缘园)

因此

憎越憎 原憎越 员 增越 员 增 (员缘园)

上式即为风速与风压的关系公式, 其中,  $\gamma$  为空气单位体积的重力, 早为重力加速度。

在气压为 员 常温 员 和绝对干燥的情况下,  $\gamma$  越 员, 在纬度 员 处, 海平面上的重力加速度为 早, 代入式 (员缘园) 得此条件的风压公式为

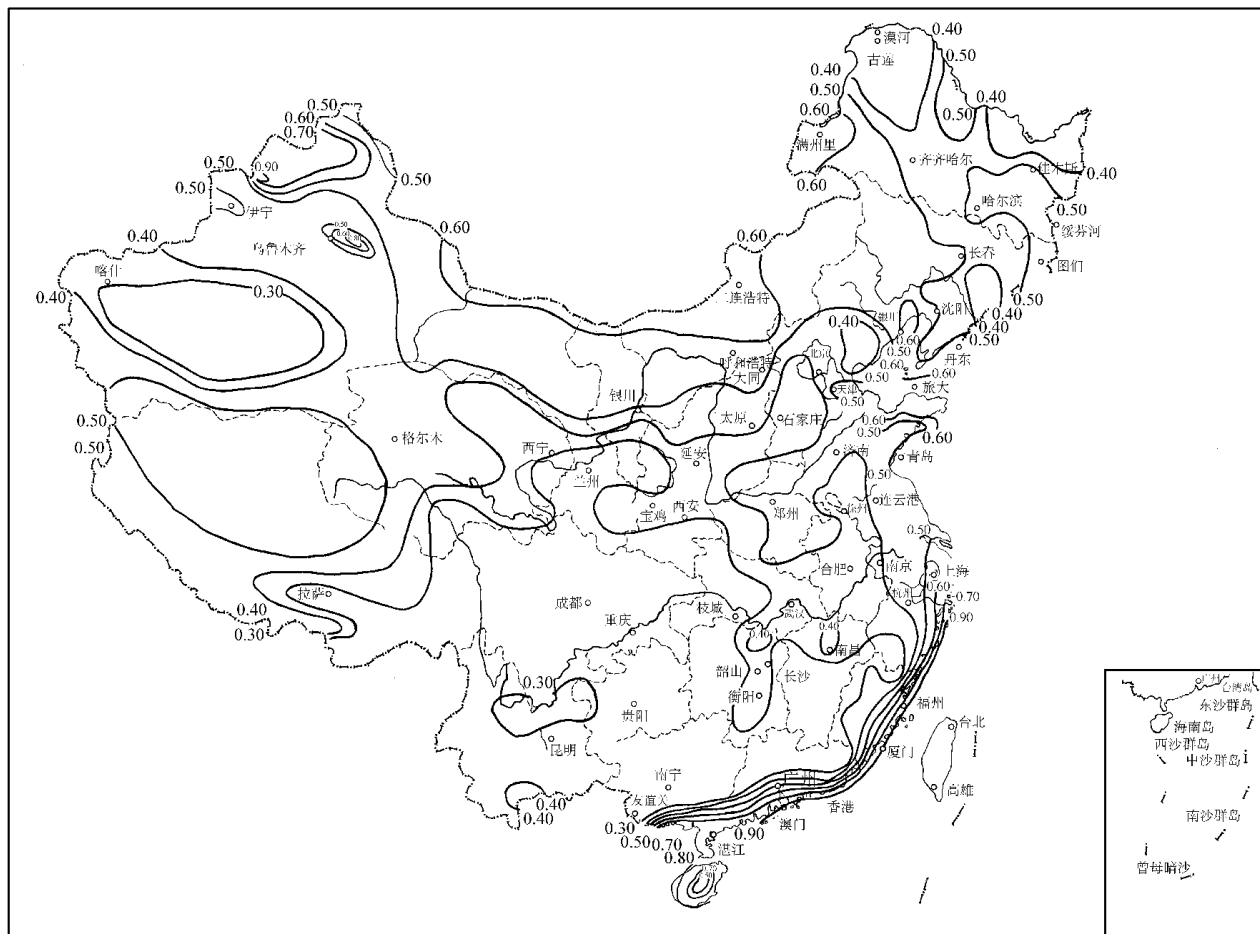
憎越 增越 增 (员缘园)

由于各地地理位置不同, 因而  $\gamma$  和 早值不同。在地球上, 重力加速度 早不仅随高度变化, 还随纬度变化。而空气重度  $\gamma$  与当地气压、气温和湿度有关。因此, 各地的  $\gamma$  值均不相同, 为方便计算, 我国的有关规范建议, 在一般情况下可取为 员

基本风压的确定 根据风速, 可以求出风压。由于风压在地面附近受到地面物体的阻碍 (或称摩擦), 造成风速随离地面高度不同而变化, 离地面越近, 风速越小。而且地貌环境 (如建筑物的密集程度和高低情况不同), 对风的阻碍或摩擦大小不同, 造成同样高度不同环境的风速并不同。为了比较不同地区风速或风压大小, 必须对不同地区的地貌、测量风速的高度等有所规定。按规定的地貌、高度、时距等量测的风速所确定的风压称为基本风压。我国荷载规范规定: 基本风压是根据当地比较空旷平坦的地面, 在离地 员 高处, 统计 缘 年一遇的 员 时距平均年最大平均风速。

工程设计所关心的最大风速值与时距的大小有关。如果时距取得很短, 如 缘 则最大风速只反映了风速记录中最大值附近的较大数值的影响, 较低风速在最大风速中的作用难以体现, 因此最大风速值很高。相反, 如果时距取得很大, 如 缘 则将 员 中大量的出现的小风值平均计算进去, 致使最大风速值较低。一般时距越大, 最大风速越小; 时距越小, 最大风速越大。因此确定不同地点的基本风速时, 应规定统一的时距。

风速记录表明, 员 至 员的平均风速基本上是一个稳定值, 若时距太短, 则易突出风的脉动峰值作用, 使风速值不稳定。另外, 风对结构产生破坏作用需一定长度的时间或一定次数的往复作用, 因此我国《建筑结构荷载规范》所规定

图 15.1.1 全国基本风压分布图(单位: kN/m<sup>2</sup>)

的基本风速的时距为 10min

综上所述，基本风压是根据规定的高度、规定的地貌、规定的时距和规定的样本时间所确定的最大风速的概率分布，按规定的重现期（或年保证率）确定的基本风速，然后依据风速与风压的关系所定义的。图 5-2-1 是以当地比较空旷平坦地面上离地 10m 高处统计所得的 50 年一遇 10min 时距最大风速为标准确定的我国基本风压分布图。当没有当地的风速统计资料时，可按图 5-2-1 所示的全国基本风压分布图近似地确定。例如，北京为 0.45kN/m<sup>2</sup>，上海为 0.55kN/m<sup>2</sup>，广州为 0.65kN/m<sup>2</sup>。对高层建筑，要求重现期为 100 年，则可乘以 1.05 的系数。

**风荷载标准值** 建筑物所处高度不可能恰好为 10m，周围的地形也不一定空旷平坦，因而必须对基本风压进行修正。此外，前面推导的风速与风压的关系是基于自由气流碰到障碍面而完全停滞所得到的。但一般工程结构物并不能理想地使自由气流停滞，而是让气流以不同方式在结构表面绕过，因此实际结构物所受的风压并不能直接按式（5-2-1）计算，而需对其进行修正，其修正系数与结构物的体型有关。

于是，当计算垂直于建筑物表面上的风荷载标准值时，可按式（5-2-2）计算

$$F_{wk} = \beta_z \mu_s \mu_{z1} w_0 \quad (5-2-2)$$

式中  $F_{wk}$ ——风荷载标准值（kN/m<sup>2</sup>）；  
 $\mu_s$ ——风荷载体型系数；  
 $\mu_{z1}$ ——风压高度变化系数；  
 $w_0$ ——基本风压（kN/m<sup>2</sup>）；  
 $\beta_z$ ——风振系数。计算主要承重结构时取高度为  $z$  处的风振系数  $\beta_z$ ；计算围护结构时则取高度为  $z$  处的阵风系数  $\beta_{gz}$ 。

（5）高度修正系数。根据实测结果分析，平均风速沿高度变化的规律可用指数函数来描述，即

$$v_z = v_{z0} \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (5-2-3)$$

式中  $v_z$ ——任一点的平均风速和高度；  
 $v_{z0}$ ——标准高度处的平均风速和高度，大多数国家的基本风压都规定标准高度为 10m；  
 $\alpha$ ——与地貌或地面粗糙度有关的指数，地面粗糙积度越大， $\alpha$  越大。

为应用方便，我国《建筑结构荷载规范》将地面粗糙度分为 A、B、C、D 四类，每一类的风压高度系数见表 5-2-2



表 1.2.1 风压高度变化系数  $\mu_z$

离地面或海平面高度 m	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	0.50	0.50	0.50	0.50
10	0.60	0.60	0.60	0.60
15	0.65	0.65	0.65	0.65
20	0.70	0.70	0.70	0.70
30	0.75	0.75	0.75	0.75
40	0.80	0.80	0.80	0.80
50	0.85	0.85	0.85	0.85
60	0.90	0.90	0.90	0.90
70	0.95	0.95	0.95	0.95
80	1.00	1.00	1.00	1.00
90	1.05	1.05	1.05	1.05
100	1.10	1.10	1.10	1.10
120	1.15	1.15	1.15	1.15
140	1.20	1.20	1.20	1.20
160	1.25	1.25	1.25	1.25
180	1.30	1.30	1.30	1.30
200	1.35	1.35	1.35	1.35
250	1.40	1.40	1.40	1.40
300	1.45	1.45	1.45	1.45
350	1.50	1.50	1.50	1.50
400	1.55	1.55	1.55	1.55
450	1.60	1.60	1.60	1.60
500	1.65	1.65	1.65	1.65
≥ 550	1.70	1.70	1.70	1.70

注：A类指近海面、海岛、海岸、沙漠地区；B类指田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区；C类指有密集建筑群的城市地区；D类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。

(四) 体型系数。目前还没有对各类体型均适合的体型系数计算公式，我国学者对常见的各类建筑物作了系统的试验和分析，并参照国外的先进经验对常见的房屋和构筑物的体型，给出了风载体型系数，可供直接查用。对于重要而特殊的建筑物其体型系数应由风洞试验确定。对于一般建筑结构体型，我国《建筑结构荷载规范》给出了体型系数，现摘录部分如图 1.2.2 图 1.2.3 所示。

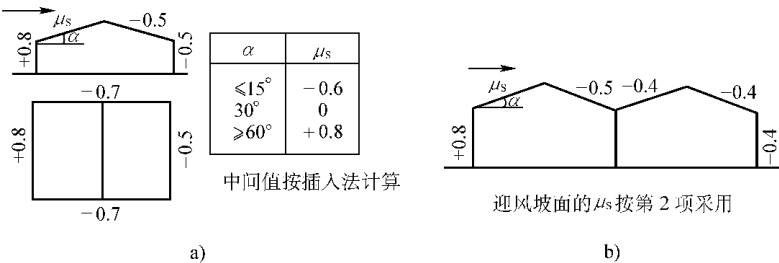


图 1.2.2 坡顶屋面房屋体型系数  
a) 封闭式双坡屋面 b) 封闭式双跨双坡屋面

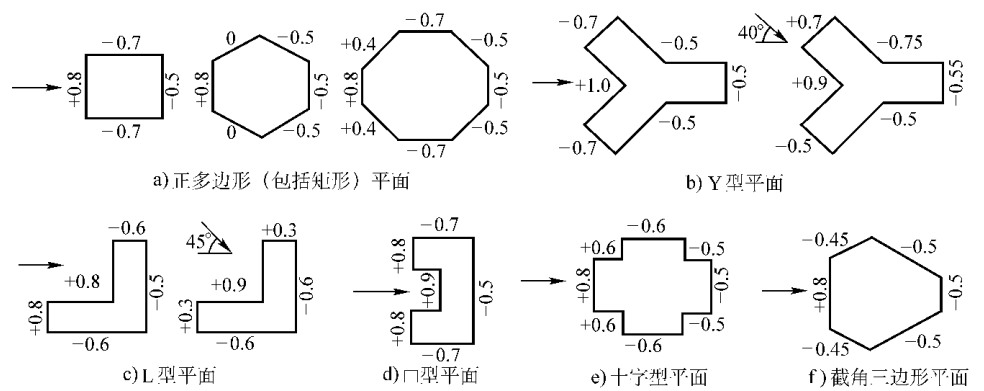


图 1-1-1 封闭式房屋和构筑物的体型系数

(1) 风振系数  $\beta_{zj}$  对于自振周期  $T_{zj}$  约 0.1s 的结构和高度小于 10m 或高宽比小于 1.5 的房屋，风振影响不大，一般对单层、多层建筑可取  $\beta_{zj}=1.0$ 。对于高层、高耸、柔性结构  $\beta_{zj}$  的计算，将在下一节说明。

关于计算围护结构的阵风系数  $\beta_{zj}$ ，按地面粗糙度不同，可按表 1-1-2 中所列数据采用。

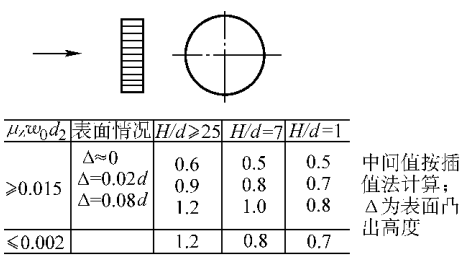


图 1-1-2 圆截面构筑物（包括烟囱、塔桅等）按整体计算时的体型系数

表 1-1-2 阵风系数  $\beta_{zj}$

离地面高度 m	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
10	1.0	1.0	1.0	1.0
20	1.0	1.0	1.0	1.0
30	1.0	1.0	1.0	1.0
40	1.0	1.0	1.0	1.0
50	1.0	1.0	1.0	1.0
60	1.0	1.0	1.0	1.0
70	1.0	1.0	1.0	1.0
80	1.0	1.0	1.0	1.0
90	1.0	1.0	1.0	1.0
100	1.0	1.0	1.0	1.0
120	1.0	1.0	1.0	1.0
140	1.0	1.0	1.0	1.0
160	1.0	1.0	1.0	1.0
180	1.0	1.0	1.0	1.0
200	1.0	1.0	1.0	1.0

(续)

离地面高度 h	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
10m	0.12	0.15	0.22	0.35
15m	0.11	0.14	0.21	0.34
20m	0.10	0.13	0.20	0.33
30m	0.09	0.12	0.19	0.32
40m	0.08	0.11	0.18	0.31

对于广告牌及玻璃幕墙，建议取  $\beta_{gz}$  取值

4.2.2 顺风向风振及风振系数

对于基本自振周期  $T_1$  的工程结构，如房屋、屋盖、各种高耸结构，以及高度超过 10m 且高宽比大于 4 的高柔房屋，由于风引起的结构振动比较明显，而且随着结构自振周期的增长，风振也随之增强，因而均应考虑风压脉动对结构发生顺风风向风振的影响，原则上还应考虑多个振型的影响，对于前几个振型比较密集的结构，如桅杆、大跨屋盖应考虑振型可多达 5 个及以上。对此类结构应按结构的随机振动理论进行计算。

随机振动理论比较复杂，一般由专业计算程序进行。对于一般的悬臂型竖向结构，如框架、塔架、烟囱等，以及高度大于 10m，高宽比大于 4 且可忽略扭转影响的高层建筑，可只考虑第 1 振型的影响。这时可用风振系数来表达。结构在高度  $z$  处的风振系数  $\beta_{gz}$  可按下式计算

$$\beta_{gz} = 1 + \xi \nu \varphi_{1z} \mu_{gz} \quad (4.2.2)$$

- 式中  $\xi$ ——脉动增大系数；  
 $\nu$ ——脉动影响系数；  
 $\varphi_{1z}$ ——振型影响系数；  
 $\mu_{gz}$ ——风压高度变化系数。

其中风压高度变化系数  $\mu_{gz}$ ，在前节中已说明。关于其他 3 个系数，简要说明如下。

1. 脉动增大系数  $\xi$  这实质上是风的动力作用产生的增大系数，它与风的脉动规律与结构的振动特性有关。如取 4.1.2 节建议的风谱密度经验公式，并把响应近似取静态分量及窄带白噪声共振响应分量之和，则可得

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{S_w(\omega_1) \omega_1^2}{S_w(\omega_1) \omega_1^2 + 1}} \quad (4.2.3)$$

式中  $\xi = 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega_1^2 T_1^2}}}$

$\zeta$ ——结构阻尼比，对钢结构取 0.015；对混凝土及砖石砌体结构取 0.025；  
对有墙体填充的房屋钢结构取 0.030

$w_0$ ——考虑当地地面粗糙度后的基本风压；

$T_1$ ——结构的基本自振周期。

为方便应用，脉动增大系数可按表 5.2.2 中数据取用。

表 5.2.2 脉动增大系数  $\zeta$

结构类型(房屋高度/m)	≤5	5~15	15~30	30~45	45~60	60~90	90~120	120~150	150~200
钢结构	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
有填充墙的房屋钢结构	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
混凝土及砌体结构	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
结构类型(房屋高度/m)	≤5	5~15	15~30	30~45	45~60	60~90	90~120	120~150	150~200
钢结构	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
有填充墙的房屋钢结构	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
混凝土及砌体结构	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

注：计算  $w_0$  时，对地面粗糙度 B 类地区可直接代入基本风压，而对 C 类、D 类和 E 类地区应按当地的基本风压分别乘以 1.1、1.2 和 1.3 后代入。

5.2.3 脉动影响系数 这一系数考虑了脉动风压及其相关性的影响，其值按随机振动理论，通过计算机计算确定。

对于一般常见结构形式，脉动影响系数，可按下列情况分别确定。

(1) 结构迎风面宽度远小于其高度的情况（如高耸结构等）：

(2) 若外形、质量沿高度比较均匀，脉动系数可按表 5.2.3 中数值来确定。

表 5.2.3 脉动影响系数  $\nu$ （一）

总高度 H/m	≤5	5~15	15~30	30~45	45~60	60~90	90~120	120~150	150~200	200~250	250~300	300~350	350~400	400~450	450~500	500~550	550~600	600~650	650~700
粗糙度类别	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
粤	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
月	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
悦	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
阅	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

5.2.4 当结构迎风面和侧风面的宽度沿高度按直线或接近直线变化，而质量沿高度按连续规律变化时，表 5.2.3 中的脉动影响系数应再乘以修正系数  $\theta_H$  和  $\theta_v$ 。  
 $\theta_H$  为构筑物迎风面在 H 高度处的宽度  $B_H$  与底部宽度  $B_0$  的比值； $\theta_v$  可按表 5.2.4 中数值确定。

表 5.2.4 修正系数  $\theta_v$

$B_H/B_0$	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
$\theta_v$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

注： $B_H$ 、 $B_0$  分别为构筑物迎风面在顶部和底部的宽度。

(圆) 结构迎风面宽度较大时 (如高层建筑等), 应考虑宽度方向风压空间相关性的情况; 若外形、质量沿高度比较均匀, 脉动影响系数可根据总高度  $H$  及其与迎风面宽度  $B$  的比值, 按表 5.5.1 中数值确定。

表 5.5.1 脉动影响系数  $\nu$  (二)

$H/B$	粗糙度类别	总高度 $H$ 与 $B$ 的比值							
		$\leq 1/10$	$1/10 \sim 1/5$	$1/5 \sim 1/3$	$1/3 \sim 1/2$	$1/2 \sim 1$	$1 \sim 2$	$2 \sim 5$	$> 5$
$\leq 1/10$	粤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	月	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	悦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	阅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1/10	粤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	月	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	悦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	阅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1/5	粤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	月	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	悦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	阅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1/3	粤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	月	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	悦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	阅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1/2	粤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	月	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	悦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	阅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1	粤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	月	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	悦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	阅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
2	粤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	月	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	悦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	阅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
5	粤	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	月	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	悦	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	阅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

结构振型系数 结构振型系数应按实际工程由结构动力学计算得出。这里仅给出截面沿高度不变的两类结构第 1~ 第 5 源的振型系数和截面沿高度规律变化的高耸结构第 1 振型系数的近似值。在一般情况下, 对顺风向响应可仅考虑第 1 振型的影响, 对横风向的共振响应, 应验算第 1~ 第 5 源振型的频率, 因此列出相应的前 5 个振型系数。

(1) 迎风面宽度远小于其高度的高耸结构, 其振型系数见表 5.5.2

(2) 迎风面宽度较大的高层建筑, 当剪力墙和框架均起主要作用时, 其振型系数见表 5.5.3

(3) 对截面沿高度规律变化的高耸结构, 其第 1 振型系数可见表 5.5.4

表 员缘苑 高耸结构的振型系数

相对高度 挂	振型序号			
	员	圆	猿	源
园	园	原	园	原
园	园	原	园	原
园	园	原	园	原
园	园	原	园	园
园	园	原	园	园
园	园	原	原	园
园	园	原	原	园
园	园	园	原	园
园	园	园	园	原
园	园	园	园	园
园	园	园	园	园

表 员缘愿 高层建筑的振型系数

相对高度 挂	振型序号			
	员	圆	猿	源
园	园	原	园	原
园	园	原	园	原
园	园	原	园	原
园	园	原	园	园
园	园	原	原	园
园	园	原	原	园
园	园	原	原	园
园	园	园	原	园
园	园	园	园	原
园	园	园	园	园

表 员缘怨 高耸结构的第 员振型系数

相对高度 挂	高耸结构				
	月	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园
园	园	园	园	园	园

湍流振型影响系数  $\varphi_{\text{扎}}$  式 (4-1-1) 中的  $\varphi_{\text{扎}}$  为结构的振型影响系数, 理应在结构动力分析时确定, 为了简化, 在确定风荷载时, 可采用近似公式。按结构变形特点, 对高耸构筑物可按弯曲型考虑, 采用下式计算

$$\varphi_{\text{扎}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{H^2}{4L^2}}} \quad (4-1-2)$$

对高层建筑, 当以剪力墙的工作为主时, 可按弯剪型考虑, 采用下式计算

$$\varphi_{\text{扎}} = \left[ \frac{\pi}{4} \left( \frac{H}{L} \right)^2 \right] \quad (4-1-3)$$

对高层建筑也可进一步考虑框架和剪力墙各自的弯曲和剪切刚度, 根据不同的综合刚度参数, 给出不同的振型系数。

《建筑结构荷载规范》的附录中给出了有关计算公式, 这里就不一一列出了。

## 4.2 横风向风振

很多情况下, 横风向力较顺风向力小得多, 横风向力可以忽略。然而, 对于一些细长的柔性结构, 例如高耸塔架、烟囱、缆索等, 横风向力可能会产生很大的动力效应, 即风振, 这时, 横风向效应应引起足够地重视。

横风向风振都是由不稳定的空气动力形成, 其性质远比顺风向更为复杂, 其中包括旋涡脱落 (vortex shedding)、驰振 (galloping)、颤振 (flutter)、扰振或称抖振 (buffeting) 等空气动力现象。其中, 驰振与颤振主要出现在长跨柔性桥梁上。颤振和驰振都属于自激型发散振动, 它们都具有对结构造成毁灭性破坏的特点。其中颤振是指桥梁以扭转振动形式或扭转与竖向弯曲振动相耦合 (即两种或两种以上振动形式同时发生, 耦连在一起) 形式的破坏性发散振动; 驰振则是指桥梁象骏马奔驰那样上下舞动的竖向弯曲形式的破坏性发散振动。1940年美国科罗拉多桥的毁坏就属于颤振破坏。驰振现象一般会出现在桥梁的绞缆索上。抖振是指风速中随机变化的脉动成分激励起的桥梁不规则的有限振幅振动。这在桥梁工程中, 尤其在长大跨的柔性桥梁中有专门论述, 这里不作介绍。长而细的建筑物受横向风的振动, 主要是旋涡脱落引起的涡激共振, 当然也可能伴有抖振。

对圆截面柱体结构, 当发生旋涡脱落时, 若脱落频率与结构自振频率相符, 将出现共振。大量试验表明, 旋涡脱落频率  $\nu$  与风速  $v$  成正比, 与截面的直径  $D$  成反比。同时, 雷诺数  $Re = \frac{vD}{\nu}$  ( $\nu$  为空气运动粘性系数, 约为  $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ )

和斯脱罗哈数  $St = \frac{v}{fD}$  在识别其振动规律方面有重要意义。下面简要介绍这两个数的物理意义。

(1) 雷诺数和斯脱罗哈数。

在空气流动中, 对流体质点起着主要作用的是两种力: 惯性力和粘性力。根

据牛顿第二定律，作用在流体上的惯性力为单位面积上的压力 $\rho v^2$ 乘以面积。

粘性是流体抵抗剪切变形的性质，粘性越大的流体，其抵抗剪切变形的能力越大。流体粘性的大小可通过粘性系数 $\mu$ 来衡量，流体中粘性应力为粘性系数 $\mu$ 乘以速度梯度 $\frac{dv}{dy}$ 或剪切角 $\gamma$ 的时间变化率，而粘性力等于粘性应力乘以面积。

雷诺通过大量实验，首先给出了惯性力与粘性力之比为参数的动力相似定律，该参数以后被命名为雷诺数（ $Re$ ），它是流体的惯性力与粘性力之比。只要雷诺数相同，流体便动力相似，后来发现，雷诺数也是衡量平滑流动的层流（ $Re < 2300$ ）向混乱无规则的湍流（ $Re > 2300$ ）转换的尺度。

因为惯性力的量纲为 $\rho v^2$ ，而粘性力的量纲是粘性应力 $\mu \frac{dv}{dy}$ 乘以面积 $A$ ，故雷诺数 $Re$ 的定义为

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1.1.1)$$

式中， $\frac{\mu}{\rho}$ 为动粘性，它等于粘性系数 $\mu$ 除以流体密度 $\rho$ ，对于空气其值为 $1.5 \times 10^{-4} m^2/s$ 。将该值代入上式，并用垂直于流速方向物体截面的最大尺度 $L$ 代替上式的 $A$ ，则上式成为

$$Re = \frac{v L}{\nu} \quad (1.1.2)$$

由于雷诺数的定义是惯性力与粘性力之比，因而如果雷诺数很小，如小于 $1$ ，则惯性力与粘性力相比可以忽略，即意味着高粘性行为。相反，如果雷诺数很大，如大于 $1$ ，则意味着粘性力影响很小，空气流体的作用一般是这种情况，惯性力起主要作用。

由圆形截面结构的阻力系数与雷诺数的关系可以将雷诺数分为三个临界范围，即亚临界范围（ $Re < 10^3$ ），超临界范围（ $10^3 < Re < 10^5$ ）和跨临界（ $10^5 < Re < 10^6$ ）。

如图1.1.1所示，气体流过圆形截面结构时，在圆柱边 杂点处产生旋涡，并在圆柱体后脱落。若雷诺数在亚临界和跨临界范围内，尾流的旋涡会产生周期性的不对称脱落，其频率 $f$ 为

$$f = \frac{v}{D} St \quad (1.1.3)$$

式中  $v$ ——风速；  
 $D$ ——圆柱体的直径；



雷诺数——与结构截面几何形状和雷诺数有关的参数，称为斯脱罗哈（Strouhal）数，对于亚临界和跨临界范围内圆截面结构， $St \approx 0.2$

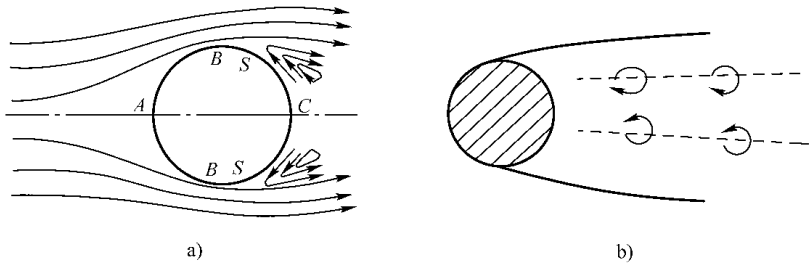


图 4-1 旋涡的产生与脱落

横风向风力系数与雷诺数有关，图 4-2 是由试验得出的圆形平面结构雷诺数与横风向风力  $\mu_{\text{横}}$  的关系曲线。可见，在亚临界范围（ $Re \leq 3 \times 10^5$ ），圆形平面结构横风向风力系数  $\mu_{\text{横}}$  在 0.4~0.6 之间变化；在超临界范围（ $3 \times 10^5 < Re \leq 10^6$ ），由于圆形平面结构横风向作用具有随机性，不能准确确定  $\mu_{\text{横}}$  值；而在跨临界范围（ $Re > 10^6$ ），结构横风向风力系数  $\mu_{\text{横}}$  又稳定在 0.1~0.2 之间。以上这些系数对于其他平面形式结构也可参考使用。

结构顺向风力系数  $\mu_{\text{顺}}$  一般在 0.8 左右，比结构横风向风力系数  $\mu_{\text{横}}$ （一般小于 0.6）大 30% 以上。因而在一般情况下可以忽略横向风的效应。但是，当横风向作用与结构发生共振时，则不能忽略，甚至还会起控制作用，因而必须考虑。

横风向效应分两段考虑。

（圆）当风速在亚临界或超临界范围内时，即  $Re \leq 3 \times 10^5$  时，应控制结构顶部风速  $v$  不超过临界风速  $v_{\text{临}}$ ， $v_{\text{临}}$  可按式确定

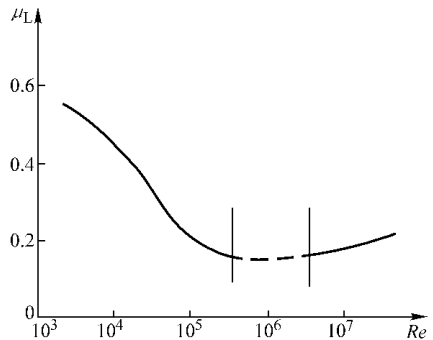


图 4-2 圆形平面结构  $\mu_{\text{横}}$  与  $Re$  的关系

$$v_{\text{临}} = \frac{v_{\text{基}}}{St} \quad (4-1)$$

$$v_{\text{基}} = \sqrt{\frac{G_{\text{风}}}{\rho}} \quad (4-2)$$

式中  $T_{\text{基}}$ ——结构基本自振周期；

$St$ ——斯脱罗哈数，对圆截面结构取 0.2；

$\gamma_{\text{风}}$ ——风荷载分项系数，取 1.4；



(续)

结构类型	振型序号	风振系数				
		顺风向	横风向	扭转	顺风向	横风向
高耸结构	1	$\mu_{s1}$	$\mu_{s1}$	$\mu_{s1}$	$\mu_{s1}$	$\mu_{s1}$
	2	$\mu_{s2}$	$\mu_{s2}$	$\mu_{s2}$	$\mu_{s2}$	$\mu_{s2}$
	3	$\mu_{s3}$	$\mu_{s3}$	$\mu_{s3}$	$\mu_{s3}$	$\mu_{s3}$
	4	$\mu_{s4}$	$\mu_{s4}$	$\mu_{s4}$	$\mu_{s4}$	$\mu_{s4}$
高层建筑	1	$\mu_{s1}$	$\mu_{s1}$	$\mu_{s1}$	$\mu_{s1}$	$\mu_{s1}$
	2	$\mu_{s2}$	$\mu_{s2}$	$\mu_{s2}$	$\mu_{s2}$	$\mu_{s2}$

校核横风向风振时，风的荷载总效应可将横风向风荷载效应  $W_{\text{横}}$  与顺风向风荷载效应  $W_{\text{顺}}$  按下式组合后确定

$$W_{\text{总}} = \sqrt{W_{\text{顺}}^2 + W_{\text{横}}^2}$$

(1) 顺风向

1.1 常用结构频率、周期和振型计算

计算周期的较精确方法 分为有限元法和能量法两种。

(1) 有限元法计算。由下式

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_n}{M_n}}$$

(2) 顺风向

可求得所有各阶自振圆频率  $\omega_n$  ( $n=1, 2, \dots$ )，周期  $T_n$  ( $n=1, 2, \dots$ )。通常均用计算机计算。圆频率  $\omega$  与频率  $f$  及周期  $T$  关系为

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

(3) 顺风向

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$

(4) 顺风向

得到了各阶圆频率  $\omega_n$ ，由下式

$$(\omega_n^2 - \omega^2) \phi_n = 0$$

(5) 顺风向

可求得各阶振型  $\phi_n$ ，一般采用计算程序求得。

(2) 能量法计算。能量法是一个准确的计算方法，但由于计算时需要假定振型，因而实际应用中是近似的方法。但是只要选择假定的振型曲线满足该振型的形状和所有边界条件（一般可取第 1 振型，其振型可以将质量作为力引起的变形曲线而近似得到），就可得到很高的精确度。计算公式有不同的表达形式，如

$$\omega_n^2 = \frac{\int_0^H \rho A \dot{\phi}_n^2 dx}{\int_0^H \rho A \phi_n^2 dx}$$

(6) 顺风向

$$T_{\text{自振}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\rho A} \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{H_i^3} + \frac{1}{H^3} \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{H_i^3}}} \quad (5.2.1)$$

实用公式 按上面的理论，或根据实测统计，可列出一些常用的结构的实用公式。

(1) 等截面等惯性矩的立杆，在不同高度处承受 灶个质量为  $m_1, m_2, \dots, m_n, \dots, m_n$  的重物时（如图 5.2.2 所示），其基本自振周期  $T_{\text{自振}}$  为

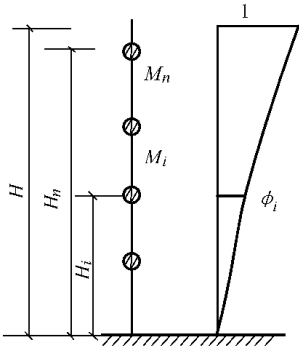


图 5.2.2 等截面直杆

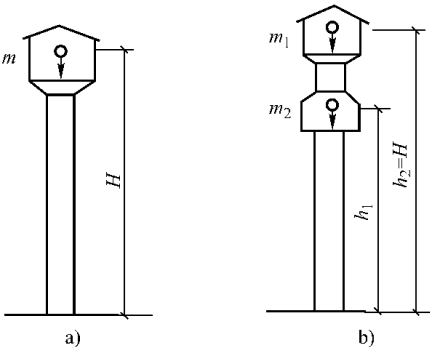


图 5.2.3 水箱塔架  
a) 单水箱 b) 双水箱

$$T_{\text{自振}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\rho A} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{H_i^3} + \frac{1}{H^3} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{H_i^3}}} \quad (5.2.2)$$

式中  $H$ ——建筑物高度；  
 $A$ ——截面面积；  
 $I$ ——截面惯性矩；  
 $E$ ——弹性模量；  
 $m_i$ ——高度为  $H_i$  的重物质量；  
 $\rho$ ——杆密度；  
 $\alpha$ ——系数可按下式计算

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\rho A} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{H_i^3} + \frac{1}{H^3} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{H_i^3}}} \quad (5.2.3)$$

图 5.2.3a 所示的单个水箱塔架基本自振周期为

$$T_{\text{自振}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\rho A} \frac{m}{H^3} + \frac{1}{H^3} \frac{m}{H^3}}} \quad (5.2.4)$$

图 5.2.3b 所示的双水箱塔架基本自振周期为

$$T_{\text{自振}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\rho A} \left( \frac{m_1}{h_1^3} + \frac{m_2}{h_2^3} \right) + \frac{1}{H^3} \left( \frac{m_1}{h_1^3} + \frac{m_2}{h_2^3} \right)}} \quad (5.2.5)$$

(圆) 立杆为 喇叭型截面, 承受 灶个质量为 皂<sub>员</sub>, 皂<sub>圆</sub>, ..., 皂<sub>蚤</sub>, ..., 皂<sub>灶</sub> 的集中重物 (如图 员缘源所示), 其基本自振周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E I_i}{H_i^3}}} \quad (4.1.1)$$

式中,

$$E I_i = \sum_{j=1}^i \rho A_j \left[ \frac{E I_j}{H_j^3} - \frac{E I_{j-1}}{H_{j-1}^3} \right]$$

皂<sub>员</sub> 为第 蚤个喇叭杆体横截面面积; 当 蚤=1 时, 皂<sub>员</sub> 近似地按式 (4.1.2) 计算。

(猿) 烟囱的基本自振周期。

员) 高度不超过 远皂的砖烟囱:

$$T = 0.15 \frac{H}{\sqrt{E I}} \quad (4.1.3)$$

圆) 高度不超过 员缘皂的钢筋混凝土烟囱:

$$T = 0.15 \frac{H}{\sqrt{E I}} \quad (4.1.4)$$

猿) 高度超过 员缘皂, 但低于 圆缘皂的钢筋混凝土烟囱:

$$T = 0.15 \frac{H}{\sqrt{E I}} \quad (4.1.5)$$

式中 匀——烟囱高度 (皂);

蚤——烟囱 员缘 高度处的外径 (皂)。

(源) 石油化工塔架 (如图 员缘源所示) 的基本自振周期

员) 圆柱 (筒) 基础塔 (塔壁厚不大于 猿皂):

① 当 匀 < 苑 时

$$T = 0.15 \frac{H}{\sqrt{E I}} \quad (4.1.6)$$

② 当 匀 ≥ 苑 时

$$T = 0.15 \frac{H}{\sqrt{E I}} \quad (4.1.7)$$

式中 匀——从基础底板或柱基顶面至设备塔顶面的总高度 (皂);

阅——设备塔的外径 (皂); 对变直径塔, 可按各段高度为权。取外径的加权平均值。

圆) 框架基础塔 (塔壁厚不大于 猿皂):

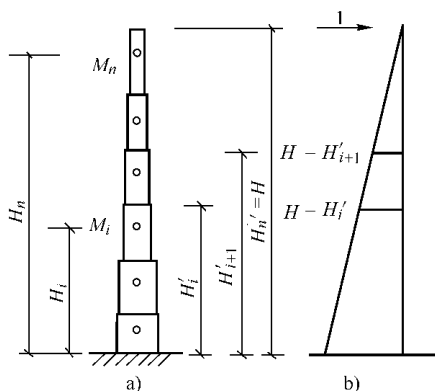


图 4.1.1 阶形截面杆

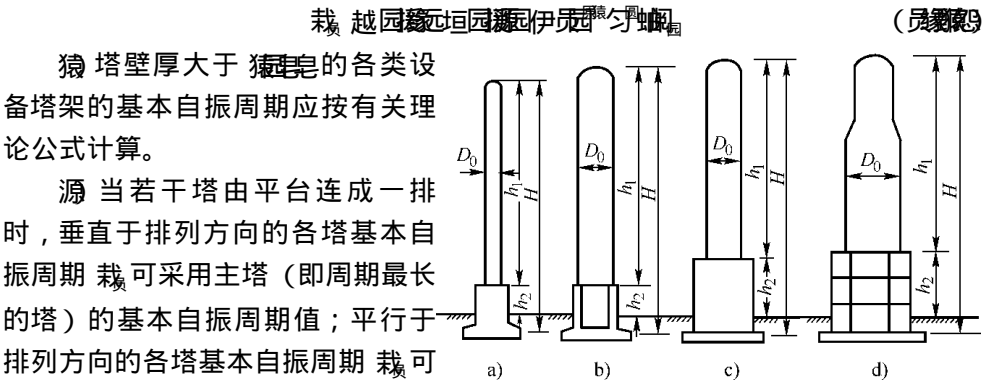


图 5-1-1 设备塔架的基础型式

葬 圆柱基础塔 遭 圆筒基础塔 糟 方形（板式）  
框架基础塔 凹 环形框架基础塔

塔壁厚大于 10mm 的各类设备塔架的基本自振周期应按有关理论公式计算。

当若干塔由平台连成一排时，垂直于排列方向的各塔基本自振周期可采用主塔（即周期最长的塔）的基本自振周期值；平行于排列方向的各塔基本自振周期可采用主塔基本自振周期乘以折减系数 0.8。

（缘）高层建筑的基本自振周期  
一般情况估算。

① 钢结构

$$T = 0.1n \sim 0.15n$$
 (5-1-2)

② 钢筋混凝土结构

$$T = 0.1n \sim 0.15n$$
 (5-1-3)

式中  $n$ ——建筑层数。

（圆）具体结构的计算。

① 钢筋混凝土框架和框剪结构

$$T = 0.1n \sim 0.15n$$
 (5-1-4)

② 钢筋混凝土剪力墙结构

$$T = 0.1n \sim 0.15n$$
 (5-1-5)

式中  $n$ ——房屋总高度（m）；  
 $m$ ——房屋宽度（m）。

## 缘 高层建筑和高耸结构的抗风设计要求

由于高层建筑和高耸结构的主要特点是高度较高而横截面积相对较小，因而水平方向刚度较柔，因此水平荷载的作用所引起的反应就会较大。

首先，为了使高层建筑和高耸结构不会发生破坏、倒塌、结构开裂和残余变形过大等现象，以保证结构的安全，结构的抗风设计必须满足强度要求。也就是说，要在设计风荷载和其他荷载组合作用下，使结构的内力满足强度或承载力设计要求。

其次，为了使高层建筑和高耸结构在风力作用下不会引起隔墙开裂、建筑装饰以及非结构构件的损坏，结构的抗风设计还必须满足刚度设计要求。也就是说，要使设计风荷载作用下的结构顶点水平位移和各层相对位移满足规范要求，以保证上述设备正常使用和人的舒适度，并使非结构构件不会因结构位移过大而损坏。根据高层建筑和高耸结构的设计规范的要求，对风力作用下高层建筑和高耸结构的顶点位移  $\Delta$  和各层相对位移  $\delta$  的限值规定分别见表 10.2.1 和表 10.2.2。

表 10.2.1 高层建筑结构水平位移限值

结构类型 位移限值	框架		剪力墙	筒体
	实心砖填充墙	空心砖填充墙		
$\delta$	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000
$\Delta$	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000

注：其中  $\Delta$  和  $\delta$  分别为结构总的高度和结构层高。

表 10.2.2 高耸结构的水平位移限值

位移类型	$\Delta$	$\delta$
位移限值	1/1000	1/1000

此外，为了使高层建筑和高耸结构在风力作用下不会引起居住者不舒适，结构的抗风设计还必须满足舒适度的设计要求。根据国内外医学、心理学和工程学专家的实验研究结果可知，影响人体感觉不舒适的最主要因素是振动频率、振动加速度和振动持续时间。由于持续时间取决于阵风本身，而结构振动频率的调整又十分困难，因此一般采用限制结构振动加速度的方法来满足舒适度的设计要求。由于高层建筑和高耸结构的风振反应一般以第 1 振型为主，且其基本周期一般大于 1s，因此根据国内外人体振动的舒适度界线标准建议的结构舒适度的控制界限见表 10.2.3。

表 10.2.3 人体振动舒适度控制界限

建筑类型	公寓建筑	公共建筑
界限 [m/s <sup>2</sup> ]	0.001	0.001

显然，应根据结构层的不同功能来具体选择舒适度的控制界限。

此外，除了要使结构的抗风设计满足上述的强度、刚度和舒适度的设计要求外，还需对高层建筑和高耸结构上的外墙、玻璃、女儿墙及其他装饰构件合理设计，以防止风荷载引起此类构件的局部损坏。

## 第 12 章 防风减灾对策与风振控制

### 12.1 防风减灾对策

风造成灾害的主要方式有：大风、大浪、风暴潮、暴雨，其破坏对象主要有建筑工程、园林绿化设施、城市生命线工程、海岸护坡等。

防止风灾害的主要对策有：

(1) 在北方大陆内地建造防风固沙林，在沿海地区建造防风护岸植被，以减小风力及大风对城市或海岸的破坏。

(2) 在经常受风灾危害的地区，建立预报、预警体制。以目前的气象预报水平，提前几小时到几十小时进行大风预报是完全可能的。接到预报后采取紧急的防灾措施，可以大大减小风的灾害。例如，渔船可及时返港，停泊的船只加强锚锭，高层建筑门窗注意及时紧闭，行人不在广告牌等易倒建筑物下停留，高耸机械及时加上索缆等。

(3) 城市应编制风灾害影响区划，建立合理有效的应对策略，如避风疏散规划等。

(4) 加强工程结构的防风设计，针对生命线工程，非主体但易损构件的防风易损性分析，及时加固并进行防风设计。

(5) 针对各地区的风荷载特性研究，如地区风压分布、地面粗糙度划分、高层建筑风效应、大跨结构的风振分析等。

### 12.2 风振控制

由于科技的进步，高层建筑和高耸结构日益增高，高强轻质材料的应用日益广泛，而结构的刚度和阻尼不断地下降，因此结构在风荷载作用下的摆动也在加大，这样，就会直接影响到高层建筑和高耸结构的正常使用，使得结构刚度和舒适度的要求越来越难满足，甚至有时威胁到建筑物的安全。

传统的结构抗风对策是首先保证强度，然后验算位移，但位移过大则通过增强结构自身刚度和抗侧力能力来抵抗风荷载作用。这是一种被动的也是不经济的方法。近 10 多年来发展起来的结构振动控制技术开辟了结构抗风设计的新途径。结构振动控制技术就是在结构上附设控制构件和控制装置，在结构振动时通过被动或主动地施加控制力减小或抑制结构的动力反应，从而减少动力位移，以满足结构的安全性、使用性和舒适度的要求。



结构振动控制理论、方法是从控制工程移植过来的。从控制方式上,结构振动控制可分为:被动控制(无源控制)、主动控制(有源控制)、半主动控制(半有源控制)和混合控制(半有源控制)。其中,被动控制无需外部能源的加入,其控制力是控制装置随结构一起运动而被动产生的;主动控制是有外加能源的控制,其控制力是控制装置按最优控制规律,由外加能源主动施加的;半主动控制一般为有少量外加能源的控制,其控制力虽也由控制装置随结构一起运动而被动产生,但在控制过程中控制机构能由外加能源主动调整本身参数,从而起到调节控制力的作用;而混合控制是主动控制和被动控制有机结合的控制方案。一般来说,主动控制的效果较好,但由于高层建筑和高耸结构本身体型巨大,主动控制所需的外加能源,需要长期加入并精心维护,实际操作起来很困难且投资尤其是维护费用高。半主动控制系统结合了被动控制的可靠性和主动控制的适应性,通过一定的控制律可以接近主动控制的效果,是一种极具前途的控制方法,也是目前国际控制领域研究的重点。

针对不同的振动控制技术,科研工作者们开发了多种形式的风振控制装置,如调谐质量阻尼器、调谐液体阻尼器、主动质量阻尼器等,这些控制装置的研制和应用均有一些成功的例子。

## 5.1 主动控制技术

主动控制装置通常由传感器、计算机、驱动设备三部分组成。传感器用来监测外部激励或结构响应,计算机根据选择的控制算法处理监测的信息及计算所需的控制力,驱动设备根据计算机的指令产生需要的控制力。土木工程结构相比于机械结构重而大,不能直接运用经典的最佳控制方法,对于控制方式尤其是控制装置而言,现应用于土木工程结构中的主动控制系统有:

(1) 主动调谐质量阻尼器(Active Tuned Mass Damper,简称 ATMD),它是将调谐质量阻尼器与电液伺服机构连接,构成一个有源质量阻尼器,因质量运动所产生的主动控制力和惯性力都能有效地减小结构的振动反应。

(2) 主动拉索(Active Cable)控制装置,它是利用拉索分别连接着伺服机构和结构的适当位置,伺服机构产生的控制力由拉索实施于结构上以减小结构的振动反应。

(3) 主动挡风板(Active Wind Deflector),在建筑物的适当位置安装主动挡风板可以减少在暴风荷载作用下结构的振动。

世界上第一个在实际工程结构中安装 ATMD 的建筑位于日本东京,这是一个 10 层的钢框架结构,整个尺寸长 100m,宽 30m,高 100m,在顶部安装了 ATMD 系统以减小它的振动幅值。利用两个 ATMD 系统来控制结构的响应。建成后,进行了强迫振动试验和实际观测,获得了在地震及强台风作用时的实测数据,试验、地震响应数值分析及风振观测均表明控制效果很好。

1985年我国兴建的南京电视塔高 319m，在设计风荷载的作用下，不能满足舒适度的要求，通过安装 耗能器装置使得观光平台的加速度反应得到控制。投入使用后的实际结果表明，耗能器装置有效地减小了电视塔的风振反应，基本上满足了观光游客对舒适度的要求。

对于土木工程结构来说，主动控制还处于开始阶段，特别是其经济因素和长期可靠性有待于接受更多的实践检验。

### 1.2.2 被动控制技术

主动控制效果较好，但需要从外部输入能量，主动控制装置十分复杂，需要经常维护，经济上增添了额外的负担。并且由于计算方法和控制机构的灵敏度所带来的“时迟”效应，使它必然滞后于结构反应，尽管采取了“校正”的办法，也还未能很好地解决这一问题。另外，控制机构的可靠性还存在一些问题，往往使控制效果打折扣。而被动控制装置诸如 耗能器等，用于实际工程经验已趋于成熟。理论研究和实际经验已经证实：对不同的结构，如果能选择适当的被动控制装置及其相应的参数取值，往往可以使其控制效果与采用相应的主动控制效果相仿。因此，目前被动控制在抗风减灾工程的应用更为广泛。

被动控制中具有代表性的装置有：耗能器（又称阻尼器）、被动拉索（又称减振索）、被动调频质量阻尼器（又称调频质量阻尼器，简称 TMD 或 减振器）、调频液体阻尼器（又称调频液体阻尼器，简称 TLD 等）。

1.2.2.1 耗能器控制 高层建筑和高耸结构中加入耗能器装置，可以降低结构在外界干扰下的敏感性，从而达到减小结构振动的目的。耗能器通常安装在主体结构两点间位移较大处，由于两点间的相对位移，耗能器往复运动，从而带动耗能器变形而耗散能量。耗能器还可以安装在互联结构或多结构联系体系中，利用结构之间或主体结构与附属结构之间的相对位移，使耗能器产生减振效果。耗能器的种类按照耗能方式的不同可分为如下几种：

(1) 粘弹性耗能器。粘弹性材料是粘弹性的，同时具备弹簧和流体的性质。在适度的变形能力范围内，可以恢复到它原来的形状，具有弹性性能；另一方面也具有一定的抗剪能力，它不像弹簧那样贮存能量，而是把能量转换成热能向四周扩散。通常用非常薄的薄层粘弹性材料加工成的阻尼器，效果很好。当粘弹性材料在一个方向受力变形以后，当力的解除后，缓慢地恢复到无应力状态，由此可以减小结构的振动。美国匹兹堡钢铁大厦（30层）、西雅图哥伦比亚中心（39层）等大楼中都安装了粘弹性耗能器。

(2) 粘滞阻尼器。粘滞流体阻尼器是利用其内部活塞前后压力使粘滞流体流过阻尼孔产生阻尼力，从而耗散能量。目前已经研制开发出的粘滞阻尼器主要有筒式流体阻尼器、油动式阻尼器等。

(獭) 摩擦耗能支撑。摩擦耗能装置是可滑动而改变形状的机构。该机构带有摩擦制动板；机构的滑移受板间摩擦力控制，而摩擦力取决于板间的挤压力，可通过松紧节点板的压紧螺栓来调节。该装置在正常使用荷载及小震作用下不发生滑动，在强风或强震作用下，主要构件尚未屈服时装置滑移，以摩擦功耗能，并改变了结构的动力特性达到减振目的。新西兰、美国和我国一些高校分别进行了摩擦装置在循环荷载作用下的试验研究，结果表明摩擦装置具有良好的滞回性能，滞回曲线呈丰满的矩形，稳定而衰减小，耗能能力强的特点。这种耗能结构制作方便，价格便宜，适于在中国推广。

图 10-10 调频质量阻尼器 (TMD) 是最常用的一种被动控制系统。它是在结构物顶部或上部某位置上加上惯性质量，并配以弹簧和阻尼器与主体结构相连。当结构在风荷载和地震作用下产生水平响应时带动 TMD 系统振动，而 TMD 系统振动产生的惯性力反馈回来作用于主体结构，从而产生制振效果。应用共振原理，对主体结构某些振型（通常是第 1 振型）的动力响应加以控制。

根据 TMD 系统的组成方式不同，系统可以分为以下几种：

(1) 支撑式。质量块支撑与结构的某部位上，可双向滑动并具有双向弹簧和双向阻尼器，大多设在顶部。

(2) 悬吊式。质量块悬吊于结构的某部位上，可双向自由摆动，有时可利用结构的附属设备作为悬吊质量。

(3) 碰击式。在结构的某些部位上悬挂摆锤，但结构振动时，该摆锤碰击结构（在碰击处要设减震或消能装置），使结构振动衰减，常用于烟囱、塔架等高耸结构的控制。

要提高系统的控制效果，主要是通过调整 TMD 系统与主体结构控制振型的质量比、频率比和阻尼器的阻尼等参数，使系统吸收更多的振动能量，从而大大减轻主体结构的振动响应。TMD 是一种动力吸振装置，同时也是较为可靠及成熟的装置，实验及应用表明它对抑制结构振动及减振降噪方面是有效的。

调频质量阻尼器的具体应用，已有不少实例，比较早应用 TMD 技术的工程有：1972 年建于美国波士顿的约翰·汉考克大厦（图 10-11），在顶层上安装了两个重 TMD。结果表明，该 TMD 系统有效地减小了大楼的风振响应，防止了玻璃幕墙的掉落；1978 年建于美国纽约的花旗银行，是高 118 层的一幢多功能的银行办公大楼，由于特殊原因，大楼底部仅设置四根粗大的柱子，相对较柔，在强风作用下水平摆动很大，于是在建筑物顶部的第 118 层内安装了调频质量阻尼器系统。实践证明该系统的控制效果十分理想。目前，美国的 TMD 系统公司已正式生产这种阻尼系统。

图 10-11 调频质量阻尼器 (TMD) 对建筑物所起减振作用的机理与 TMD 有相似之处，TMD 的构造是一充液的储液箱。一旦结构产生运动，安装于结构上的储液箱中的自由

液面就作相对于结构的晃动，晃动产生作用于箱壁和箱底的正压力和粘滞力，这些分布力合成作用于结构上的力，由作用于箱壁部分的正压力合成作用于结构上的力，与 阻尼的惯性力性质相同；但箱底有粘滞力合成作用于结构的力，与 阻尼不同。阻尼对建筑物的减振作用只是近几年才被认识到，研究方面远不及 阻尼深入，但 阻尼具备了 阻尼所不具备的许多优点：① 阻尼构造简单，易于安装；② 自动激活性能好，即 阻尼的晃动阻尼小，在很小的反应下就能产生作用；③ 减振频带宽；④ 在剧烈振动后，阻尼储液箱中的自由液面破碎后可再次生成，而 阻尼的弹簧破坏后就不可挽回。

一般说来，调频液体阻尼器的减振效果与容器中液体的晃动频率、液体的粘滞性、容器的粗糙度、液体的质量等多种因素有关。调频液体阻尼器所提供的控制力由两部分组成：一部分是水随容器所在的结构层一起运动所引起的惯性力；另一部分是波浪对容器壁产生的动压力。设计调频液体阻尼器时，通过适当调整容器中水和波浪的晃动频率和水的质量，就可使调频液体阻尼器的控制效果最佳。

日本的新横滨王子旅馆是世界上第一个在高层建筑中应用 阻尼来减振的例子，该建筑主体部分为钢结构，呈圆柱形，外径为 140m，高为 150m。四个相同的 阻尼被安装在建筑的顶部，沿周边布置。数值模拟结果表明，加了 阻尼后，在平均风速为 10m/s 时，结构响应可减小到原来的 1/10。实测结果表明，当平均风速超过 15m/s 时，结构响应可减小到原来的 1/10~1/20。另外两个安装了 阻尼的高耸结构是日本长崎的机场塔和横滨港的导航塔，它们都装有多层圆形的 阻尼，风振结果表明，减振效果显著。

## 阻尼 混合控制技术

混合控制就是主动控制和被动控制的结合。由于具备多种控制装置参与作用，混合控制能摆脱一些对主动控制和被动控制的限制，从而更好地实现控制效果。尽管它相对于完全主动结构更复杂，但是其效果比一个完全主动控制结构要可靠一些。现在，有越来越多的高层建筑和高耸结构采用混合控制来抑制动力反应。现在混合控制的研究与应用主要集中在这两个方面：混合质量阻尼器系统和混合基础隔震系统。对于风振控制主要是混合质量阻尼器系统（阻尼+主动控制），简称 混合。

混合是现在应用最普遍的工程控制装置，其构成原理是联合了一个 阻尼和一个主动控制驱动器，其降低结构反应的能力主要依靠 阻尼运动时的惯性力，主动控制驱动器所产生的作用力主要是增加 混合的作用效率，以及通过增加强度来改变结构的动力参数。研究结果表明，达到同样的控制效果，一个 混合装置所需要的能量远小于一个完全主动控制装置的能量。

世界上第一个安装混合质量控制系统的建筑是位于日本东京清水公司技术研究所的 7 层建筑。平时装置保持控制力为零的状态,当强风或地震作用下的响应超过一定水平时,驱动装置自动启动。通过几次强迫振动试验和风振观测表明,控制效果是令人满意的。另外,还可以利用若干个调谐来减小建筑物不同方向的振动。

## 4.2.2 半主动控制技术

半主动控制系统结合了主动控制系统与被动控制系统的优点,既具有被动控制的可靠性又具有主动控制系统的强适应性,通过一定的控制律可以达到主动控制的效果,而且构造简单,所需能量小,不会使结构系统发生不稳定。

半主动控制系统根据结构的响应和(或)外激励的反馈信息实时地调整结构参数,使结构的响应减到最小。该系统概括起来可以分为三类:主动变刚度控制系统,主动变阻尼控制系统和主动变刚度阻尼控制系统。

**4.2.2.1 主动变刚度(半主动)控制系统** 主动变刚度控制系统即在外界激励作用下,根据检测到结构响应和(或)外激励的反馈信息,利用一定的控制算法通过开关切换技术随时调整结构的刚度,从而使受控结构尽量避开共振状态,达到减小结构响应的目的。

**4.2.2.2 主动变阻尼(半主动)控制系统及试验研究** 主动变阻尼(半主动)控制系统即是在外激励作用下,根据检测到结构响应和(或)外激励的反馈信息,利用一定的控制算法通过开关切换技术随时向受控结构提供最佳的阻尼,从而达到减小结构响应的目的。随着对变阻尼装置不断深入研究,出现了许多控制装置,主要有以下几种:

(1) 半主动流体阻尼器:该装置由充满硅油的外缸、不锈钢活塞杆、铜制活塞和具有一控制阀的旁路组成,利用控制阀改变通过旁路的流体流量,进而控制阻尼器的阻尼特性。

(2) 可变孔隙阻尼器:该装置以传统的液压流体阻尼器为基础,利用一可调的机电变孔隙阀来改变对流体流动的阻力,从而提供可调的阻尼。

(3) 变摩擦阻尼器:该装置主要由外缸、滑移杆、两个制动垫、压电作动器、支撑板和间隙可调螺栓组成,下部的制动垫附着在外壳上,上部制动垫放在滑移杆上,压电作动器一面与上部的制动垫相连,另一面与支撑板相连,并且根据主控制器提供的电压指令改变自身长度,进而改变制动垫与滑移杆间的压力实现摩擦力可调。

(4) 半主动液压阻尼器:该阻尼器由一可调阻尼单元和一阻尼力控制器两部分组成,变阻尼单元包括一双推杆式液压缸体和一管路,在管路中装有流量控制阀、止回阀和一蓄能器。阻尼力的大小通过流量控制阀来调节,阻尼力指令由主

计算机根据使结构每一层的风振响应达到最优的反馈控制算法计算。

(缘 半主动调频质量阻尼器和半主动调频液体阻尼器：被动的调谐质量阻尼器基本上由一单自由度的质量-弹簧-阻尼器系统组成，一般固定在多层结构的顶层。

主动变刚度阻尼（粤文）控制系统 主动变刚度阻尼（粤文）控制系统在外激励作用下，根据检测到结构响应和（或）外激励的反馈信息，利用一定的控制算法使结构在不同的刚度、阻尼间进行切换。这种系统既具有主动变刚度系统避开共振状态的优点，同时又具有主动变阻尼系统削减动力反应峰值的减振性能，因而是一种极具发展前景的半主动控制系统。目前对主动变刚度阻尼控制装置的研究较少，但由于这一控制方式将 粤文控制和 粤文控制结合起来，极具开发潜力。

# 第 缘篇 地 质 灾 害

## 第 员章 地 质 灾 害 概 述

自然的变异和人为的作用都可能导致地质环境或地质体发生变化,当这种变化达到一定程度,其产生的后果便给人类和社会造成危害,称为地质灾害,如崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝、地面沉降、地面塌陷、岩爆、坑道涌水、瓦斯爆炸、煤层自燃、黄土湿陷、岩土膨胀、砂土液化、土地冻融、水土流失、土地沙漠化及沼泽化、土壤盐碱化,以及地震、火山、地热害等。

### 员.1 地质灾害的分类

地质灾害的分类十分复杂,从不同的角度有不同的标准。

(员) 地质灾害 就其成因而论,主要由自然变异导致的地质灾害称自然地质灾害;主要由人为作用诱发的地质灾害则称人为地质灾害。因岩土工程处置不当而发生事故,形成灾害的是人为地质灾害的主要组成部分。

(圆) 地质灾害 就地质环境或地质体变化的速度而言,可分突发性地质灾害与缓变性地质灾害两大类。前者如崩塌、滑坡、泥石流等,即习惯上的狭义地质灾害;后者如水土流失、土地沙漠化等,又称环境地质灾害。岩土工程事故灾害也属于突发性的。

(猿) 根据地质灾害发生区的地理或地貌特征,可分山地地质灾害,如崩塌、滑坡、泥石流等;平原地质灾害,如地面沉降等。

### 员.2 地质灾害对人类的危害

地质灾害给人类造成损失及危害是很严重的。我国有 圆豫地区属于山地,地质灾害十分严重。据统计,在 圆世纪的后 缘年,每年中国因地质灾害而导致伤亡的人数在万人左右,造成经济损失总数可达上百亿元。国际上,世界各国都或多或少受到地质灾害的危害,因而 员989年的世界地球日(源月 圆日)的主题确定为“防治地质灾害”。

本篇内容只涉及狭义的地质灾害,即与土木工程有关的部分,也即一些常见的突发性的地质灾害。其中地震灾害在本书第 猿篇已有专门章节介绍,这里就着重介绍滑坡、泥石流、崩塌、城市地面沉陷及岩土工程事故引起的灾害及其防治。

# 第 1 章 滑坡灾害及其防治

## 1.1 滑坡灾害及分级分类

### 1.1.1 滑坡灾害实例

滑坡作为一种重要的地质灾害，它往往给人类造成重大损失，下面以实例说明滑坡的危害。

(1) 我国特别是西南地区曾发生很多滑坡灾害，表 1.1.1 记录了 20 世纪我国重要的滑坡灾害。

表 1.1.1 20 世纪中国滑坡灾害表

时间	地点	规模 (万 m <sup>3</sup> )	死亡人数	备注
1958.8.1	青海查纳	1000	10	堵黄河 1 处
1959.7.1	西藏年楚河	1000	10	淹地 1000 公顷
20 世纪 50 年代	青海互助南门峡	1000	10	渠道滑坡
1959.7.1	湖南 1 溪水库	100	10	坝毁人亡
1959.7.1	云南普福沟	1000	10	堵沟溃决毁房 100 间
1959.7.1	四川南江白梅垭	100	10	毁房 100 间
1959.7.1	湖北盐池河矿	100	10	埋矿部
1959.7.1	四川越西	100		成昆路中断 1 天
1959.7.1	四川阳鸡扒子	100	10	毁房 100 间
1959.7.1	甘肃洒勒山	100	10	埋 1 个村庄
1959.7.1	四川巫溪城关	100	10	毁机关楼房及旅馆
1959.7.1	四川华蓥市溪口	100	10	毁矿山、机关
1959.7.1	云南昭通头寨沟	100	10	毁村寨、农田

(2) 国内西南地区的滑坡灾害的报道。

例如，1959 年 7 月，重庆市武隆县城发生山体滑坡，滑坡瞬间，一幢建筑面积为 1000 m<sup>2</sup> 的 3 层楼房顷刻被砸得粉碎，死亡 10 人。在事故发生前，坡顶已经出现了滑坡裂缝，但没有引起人们的警觉和防范，终于酿成惨剧。而重庆市早在 1959 年和 1959 年在市中区中二路和洪崖洞地区分别发生了滑坡和危岩崩塌，1959



破坏房屋数十间，导致 1 人死亡。

又如 1994 年，1 月份雨季中，四川省发生多起滑坡，造成部分旅游人员的伤亡。

(3) 香港地区也是经常有滑坡灾害的实例。

1983 年 7 月 1 日，记录了 1983 年降雨量的连续三天大雨引发香港半山区宝兴坊滑坡时，一座高大石砌挡墙倒向多排房屋，摧毁 1 座楼房，死亡 1 人。从 1983 年 7 月 1 日至 7 月 3 日的三天内连日暴雨雨量达 100 mm，导致多处滑坡，在 7 月 3 日这一天因滑坡而死亡的人数高达 10 多人，其中，宝珊道滑坡发生在陡峭的洪坡积层形成的天然山坡上，该滑坡摧毁了一座 10 层高的楼宇和一幢 15 层高的大厦，导致 1 人死亡，另一个发生在九龙秀茂坪公共屋邨，高约 10 m 的填土在大雨中滑动，淹没了坡脚下的许多木屋，导致 1 人死亡。1983 年 8 月 1 日在一场雨量为 100 mm 的暴雨后，全港又发生了上百起滑坡破坏，死伤 1 人。这些事故提醒人们必须研究滑坡规律，采取防治措施。经历了多次滑坡事故的经验后，香港政府成立了土木工程署，颁布了一系列有关斜坡整治与维护的技术手册，作为现场调查和土木工程的指南。

(4) 国外滑坡灾害实例。

例如，1983 年 1 月 1 日法国 100 m 高的 1 号重力拱坝因坝基失稳而毁于一旦，死亡 1 人，10 余人失踪。1983 年 1 月 1 日，意大利 100 m 高的 1 号重力拱坝，其上游 100 m 左岸发生大规模的滑坡，滑坡体从大坝附近向上游扩展长达 100 m，并跨越峡谷滑移 100 m，估计有 10 万 m<sup>3</sup> 的岩块滑入水库，冲到对岸形成 100 m 高的岩堆，致使库水漫过坝顶，冲毁了下游的朗格罗尼镇，死亡约 10 人。这两起震惊世界的特大事故，直接给人们敲起了警钟，必须重视对滑坡灾害的研究。

## 1.1 滑坡的危害

滑坡不仅会毁坏耕地，冲毁房屋，掩埋人、畜，还会破坏铁路、高速公路、输油管道、水电站等，这些城市间交通、能源、建筑的破坏所造成的损失就比对毁坏一般建筑物要严重得多。这种破坏不但对承灾地点造成重大损失，也会给其相联系的其他地方造成重大影响。例如，因滑坡造成的铁路断道，火车不能运行，就会严重影响该条铁路沿线所有的大中城市的运输和旅行。

## 1.2 滑坡要素与滑坡的分级、分类

### 1.2.1 滑坡要素

斜坡上的岩土体由于种种原因在重力作用下沿一定软弱面整体向下滑动的现

象叫滑坡，滑坡的构成要素如图 员圆园 所示。

滑坡体——指滑坡的整个滑动部分，简称滑体；

滑坡壁——指滑坡体后缘与不动体脱离后暴露在外面的形似壁状的分界面；

滑动面——指滑坡体沿下伏不动体下滑的分界面，简称滑面；

滑坡床——指滑体滑动时所依附的下伏不动体，简称滑床；

滑坡舌——指滑坡体前缘形如舌状的凸出部分；

滑坡裂缝——指滑坡活动时在滑体及其边缘所产生的一系列裂缝。位于滑体上(后)部多呈弧形展布者称拉张裂缝；位于滑体中部两侧滑动体与不动体分界处者称剪切裂缝；剪切裂缝两侧又常伴有羽毛状排列的裂缝称羽毛状裂缝；滑坡体前部因滑动受阻而隆起形成的张性裂缝称鼓张裂缝；位于滑坡体中前部、尤其滑舌部呈放射状展布者称扇状裂缝。

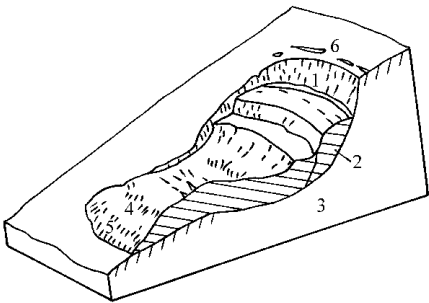


图 员圆园 滑坡示意图

员—滑坡壁 圆—滑动面 猿—滑坡床 源—滑坡舌 缘—扇形裂缝 远—后缘拉张裂缝

员圆园 滑坡的分级、分类

员圆园 滑坡按强度或规模分级 按滑坡体积的大小、将滑坡强度或规模分为四级，见表 员圆园

表 员圆园 滑坡分级表

强度或规模	滑坡体积 圆 (员伊圆 <sup>3</sup> ~圆伊圆 <sup>3</sup> )	死亡人数 圆	直接经济损失 圆 (元)
巨型	跃圆伊圆 <sup>3</sup>	跃圆伊圆 <sup>3</sup>	跃圆伊圆 <sup>3</sup>
大型	跃圆伊圆 <sup>3</sup> ~圆伊圆 <sup>3</sup>	圆伊圆 <sup>3</sup> ~圆伊圆 <sup>3</sup>	圆伊圆 <sup>3</sup> ~圆伊圆 <sup>3</sup>
中型	圆伊圆 <sup>3</sup> ~圆伊圆 <sup>3</sup>	圆伊圆 <sup>3</sup> ~圆伊圆 <sup>3</sup>	圆伊圆 <sup>3</sup> ~圆伊圆 <sup>3</sup>
小型	约圆伊圆 <sup>3</sup>	圆	圆

员圆园 滑坡常见滑动面的类型 根据以往经验和岩土工程原理，滑坡常见滑动面分为三种类型。

(员) 均质土滑动面。对于基岩埋深很大，整个滑动面均发生在土体内部而未触及基岩。一般来说，均质土滑面形状以圆形和弧形为主，这和一般边坡稳定分析原理是一样的。如图 员圆园 所示。

(圆) 碎石土滑动面。在基岩或稳定土层之上堆积的碎石土沿坡体下滑的滑动面，滑动面形状一般随下卧滑床形状呈折线型。如图 员圆园 所示。

(猿) 基岩滑动面。上层基岩沿软弱带下滑时的滑动面，一般为直线。如图 员圆园 所示。

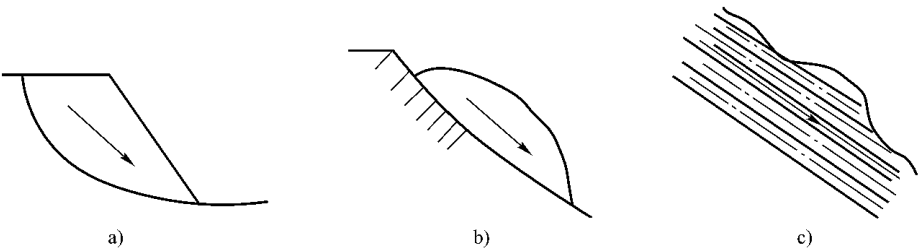


图 5-1-1 滑动面类型

均质土滑动面 碎石土滑动面 基岩滑动面

**典型滑坡的多角度分类** 由于不同的自然环境、地层条件、地质年代、人类活动和其他因素的影响，自然界的滑坡是多种多样的。为了对滑坡机理进行深入而具体的分析，也便于勘探研究人员有针对性地进行调查与勘察，更有利于进行滑坡的稳定分析和防护整治工作，有利于不同行业或地区针对不同滑坡类型制定相关的规范和防治方法，一般从多种角度对滑坡进行分类，见表 5-1-1。

表 5-1-1 典型滑坡分类一览表

分类依据	滑坡分类	滑坡特征描述
滑体物质组成	黄土滑坡	
	粘性土滑坡	
	堆填土滑坡	人工填筑土
	堆积土滑坡	所有第四系堆积物
	破碎岩石滑坡	
	岩石滑坡	
滑体厚度	浅层滑坡	滑体厚度小于 2m (有的规定 3m)
	中层滑坡	滑体厚度 2m~10m (有的规定 3m~10m)
	厚(深)层滑坡	滑体厚度 10m~50m (有的规定 10m~50m)
	超厚(深)层滑坡	滑体厚度大于 50m (有的规定 50m)
主滑面成因类型	堆积面滑坡	堆积作用形成的软弱面,内部层面
	层面滑坡	沉积变质岩层面,喷出岩上下层接触面
	构造面滑坡	节理面、断层面,原生、构造裂隙面
	同生面滑坡	土质滑坡,不通过软弱面
地形发育过程	幼年期滑坡	滑坡后部新鲜岩石,突发性,多成一块
	青年期滑坡	滑坡后部风化岩石,一定间歇性程度
	壮年期滑坡	滑坡后部混砾砂土,间歇性
	老年期滑坡	滑坡后部混巨砾砂土,连续性

分类依据	滑坡分类	滑坡特征描述
岩体结构类型	块状岩体滑坡	岩浆岩滑坡、厚层岩滑坡
	层状岩体滑坡	薄层岩滑坡、层状岩滑坡
	碎裂岩体滑坡	碎裂岩滑坡
	松散岩体滑坡	黄土滑坡、粘性土滑坡、碎石土滑坡
滑动时代分类	新滑坡	发生于河漫滩时期、具有现代活动性
	老滑坡	发生于河漫滩时期、目前暂时稳定
	古滑坡	发生在河流阶地侵蚀时期或稍后、目前稳定
	始滑坡	发生在当地现今水系形成之前、极稳定
滑动历史分类	首次滑坡	滑速高、滑体为完整的原始地层
	再次滑坡	滑速低、滑体为滑坡堆积物
滑体规模	小型滑坡	体积小于 1 万 m <sup>3</sup>
	中型滑坡	体积 1 万~10 万 m <sup>3</sup>
	大型滑坡	体积 10 万~100 万 m <sup>3</sup>
	巨型(超大型)滑坡	体积大于 100 万 m <sup>3</sup>

图 9-1 滑坡稳定分析

图 9-2 产生滑坡的主要条件

产生滑坡的主要条件：一是内在因素，即地质条件和地貌条件；二是外部环境条件和人为作用的影响。

- 内在因素 这是产生滑坡的第一个条件，与以下几个方面有关：
- (一) 岩土类型。岩、土体是产生滑坡的物质基础。通常各类岩、土都有可能构成滑坡体，其中结构松软，抗剪强度和抗风化能力较低，在水的作用下其性质易发生变化的岩、土，如松散覆盖层、黄土、红粘土、页岩、泥岩、煤系地层、凝灰岩、片岩、板岩、千枚岩等及软硬相间的岩层所构成的斜坡易发生滑坡。
- (二) 地质构造。斜坡岩、土只有被各种构造面切割分离成不连续状态时，才可能具备向下滑动的条件。同时，构造面又为降雨等进入斜坡提供了通道。故各种节理、裂隙、层理面、岩性界面、断层发育的斜坡，特别是当平行和垂直斜坡的陡倾构造面及顺坡缓倾的构造面发育时，最易发生滑坡。
- (三) 地形地貌。只有处于一定地貌部位、具备一定坡度的斜坡才可能发生滑坡。一般江、河、湖（水库）、海、沟的岸坡，前缘开阔的山坡、铁路、公路和工程建筑物边坡等都是易发生滑坡的地貌部位。坡度大于 45°、小于 15°、下

陡中缓上陡、上部成环状的坡形是易于产生滑坡的地形。

(源) 水文地质条件。地下水活动在滑坡形成中起着重要的作用。它的作用主要表现在：软化岩、土，降低岩、土体强度，产生动水压力和孔隙水压力，潜蚀岩、土，增大岩、土的堆密度，对透水岩石产生浮托力等。尤其是对滑面（带）的软化作用和降低强度作用最突出。

(圆) 外部环境条件和人为作用 包括两方面。

(员) 外界因素和作用可以使产生滑坡的基本条件发生变化，从而诱发滑坡，主要诱发因素有：地震，降雨和融雪，地表水的冲刷、浸泡，河流等地表水体对斜坡坡脚的不断冲刷。

(圆) 不合理的人的行为，主要是各种违反自然规律的行为，这些破坏斜坡稳定条件的人类活动（以土木工程建设为主）都会诱发滑坡。具体有以下几种：

① 开挖坡脚。修建公路、铁路、依山建房、建厂等工程，常常因使坡体下部失去支撑而发生下滑。例如，我国西南、西北的一些铁路、公路，因修建时大力爆破、强行开挖，事后，陆陆续续地在边坡上发生了滑坡，给道路施工，运营带来危害。

② 蓄水、排水。水渠和水池的漫溢和漏水、工业生产用水和废水的排放、农业灌溉等，均使水流渗入坡体，加大孔隙水压力，软化土石，增大坡体容重，从而促进或诱发滑坡的发生。水库的水位上下急剧变动，加大了坡体的动水压力，也可诱发滑坡发生。

③ 堆填加载。在斜坡上大量兴建楼房、修建重型工厂、大量堆填土石、矿渣等，使斜坡支撑不了过大的重量，失去平衡而沿软弱面下滑。尤其是矿厂废渣的不合理堆弃，常常触发滑坡的发生。

此外，劈山开矿的爆破作用，可使斜坡的岩土体受振动而破碎，产生滑坡；在山坡上乱砍滥伐，使坡体失去保护，便有利于雨水等水体的渗入从而诱发滑坡。如果上述的人类作用与不利的自然作用互相结合，则就更容易促进滑坡的发生。

## 5.2 土坡的稳定分析

5.2.1 简单土坡的稳定分析 具体如下。

(员) 无粘性土简单土坡。由于无粘性土颗粒之间没有粘聚力，只有摩擦力，只要坡面不滑动，土坡就可以保持稳定状态。其稳定平衡条件可由图 5-2 所示的力系来分析。

设土坡上土的隔离体自重为  $G$ ，则自重在法向和切向的分力分别为

$$G \cos \alpha$$

$$G \sin \alpha$$

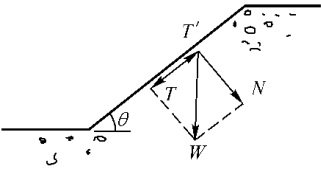
分力 裁是使土体向下滑动的力，阻止下滑的力是由垂直于坡面的法向分力 晕引起的摩擦力

裁乙越 晕哪

稳定安全系数为

运越 裁越 宰哪哪 越哪哪 (晕哪哪)

由式 (晕哪哪) 可见，当坡角  $\theta$  与土的内摩擦角  $\phi$  相等时，土坡的稳定安全系数 运越哪，此时的抗滑力等于滑动力，土坡处于极限平衡状态。由此可知，图 晕哪哪 无粘性土简单土坡土坡稳定的极限坡角等于砂土的内摩擦角。从 (晕哪哪) 式还可以看出，无粘性土土坡稳定性只与坡角有关，与坡高无关，只要  $\theta$  约  $\phi$ ，运跃哪，土坡就处于稳定状态，但是为了保证土坡有足够的稳定性，运值应大于 晕哪哪~ 晕哪哪



(圆) 土坡分析的圆弧法 圆弧法适用于比较均质的土质边坡分析。如土质边坡(粘土，粉质粘土，砂质粘土)，厚层杂填土，也可用于松散的、碎裂的岩体边坡均质土坡滑动面如图 晕哪哪所示。

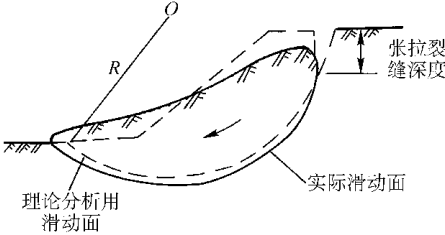


图 晕哪哪 均质土坡滑动面

圆弧法的基本假定是岩体内的切应力超过了滑动面的抗剪强度，致使不稳定体沿圆弧形剪切滑移面下滑。圆弧法的稳定分析一般采用条分法计算下滑力及抗滑力，按极限平衡理论求最危险的滑动面。

如图 晕哪哪所示，土坡沿着 哪哪圆弧面滑动时，可看作土体 哪哪绕圆心 韵转动，取 走宽度的土条进行分析。

滑动力矩 哪哪，由滑动土体 哪哪的自重 在滑动方向上分力产生。

抗滑力矩 哪哪，由滑动面 哪哪上的摩擦力和粘聚力产生。

土坡稳定要求抗滑力矩大于滑动力矩，其比值称为土坡稳定安全系数，用 运表示。

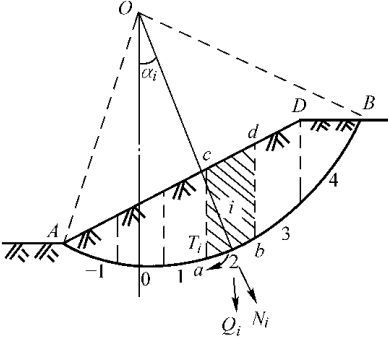


图 晕哪哪 土坡稳定分析圆弧法

运越 抗滑力矩 越 哪哪 越哪哪~ 晕哪哪

(晕哪哪)

安全系数 运的大小根据建筑物等级、土的性质 糟  $\phi$  值的可靠程度及地区经验等因素综合考虑，一般在 晕哪哪~ 晕哪哪之间适当取值。如重要工程取 运越哪哪，临时性

## 小工程取 运越元

因为土坡的滑动面是任意确定的，不一定是真正最危险的滑动面，所以需要  
通过试算找到安全系数最小的滑动面，才是真正的危险的滑动面，为此，取一系列  
圆心 韵、韵、韵... 计算出各滑动面的安全系数 运、运、运...，取其中最小  
值 运的圆弧为危险圆弧进行设计。

可见这种方法计算还是比较麻烦的。缘多年来，在岩  
土工程已发展了十余种算法，其中简化的毕氏（月）  
算法较为简便，适于人工手算，也便于计算机编程求解。  
在有关土力学的教材或专著中介绍了各种改进的毕氏算  
法，这里仅介绍一种比较简单的条分法迭代算法。

这一算法不是迭代求圆心位置，而是直接求抗滑安全  
系数。取出一土条（如图 员，若忽略条与条之间的作  
用力，则该条的安全系数 云可按下式计算

$$\text{云越} \frac{(\text{糟原}(\text{宰原}(\text{造} \cdot \text{怎})) \cdot \text{皂})}{\text{宰} \cdot \text{皂}} \quad (\text{员})$$

式中 糟——土体粘结力（噪）；

遭——单条宽度（皂）；

$\alpha$ ——滑动面与水平面夹角（毅）；

宰——单条土体自重（噪）；

造——滑动面长度（皂）；

怎——孔隙水压力。

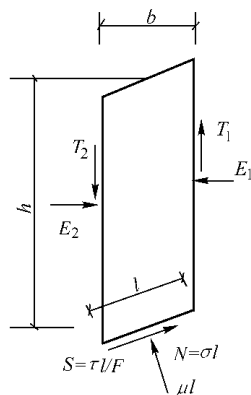


图 员 单条土  
体分析法图示

皂 越 (员恒 (噪 噪) 噪) 噪 (员)

对于某一滑坡体，可以将之分为若干条，每条宽度为 员缘 源，总条数在 远  
~ 员条之间即可。则总的滑坡安全系数为

$$\text{云越} \frac{\sum (\text{糟恒}(\text{宰恒}(\text{造} \cdot \text{怎})) \cdot \text{皂})}{\sum \text{宰} \cdot \text{皂}} \quad (\text{员})$$

将式 (员) 代入式 (员) 后，等式左右两边均有安全系数 云，故要先估算一个  
安全系数 云 (如取 云越或 猿，然后进行迭代计算。当两次算出的安全系数很  
接近时，可结束计算。当计算出稳定安全系数大于 员圆 缘时，可以认为是安  
全的，否则就需要进行加固。

(猿 折线滑坡稳定分析。折线破坏发生在土体下部有不规则的可能滑动面  
——折线滑动面存在的场合，如坡积土层中。在该滑动面的下部，一般为基岩或  
硬土层。

折线破坏为土体内累积滑坡推力超过折线滑动面累积抗剪强度所造成的破

坏。因此，确定折线滑动面上抗剪强度指标是稳定分析的关键。

折线破坏的稳定分析方法宜采用《地基设计规范》建议的传递系数法（如图 5.5.10 所示）。传递系数法计算推力时假定：

- ① 滑坡体不可压缩并作整体下滑，不考虑条块之间挤压变形。
- ② 滑坡推力平行于各段滑面，作用点在界面中点。
- ③ 不计土条两侧摩擦力。
- ④ 土体处于极限平衡状态。

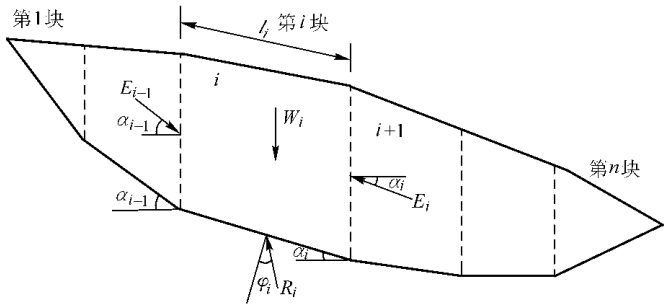


图 5.5.10 传递系数法计算滑坡推力

折线形破坏滑动面安全系数可根据滑动面的倾斜方向，将其分为下滑段和抗滑段按下式计算

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{W_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i} + \sum_{j=1}^m \frac{W_j \sin \alpha_j}{\cos \alpha_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{W_i \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i} + \sum_{j=1}^m \frac{W_j \cos \alpha_j}{\cos \alpha_j}}$$

运越

(5.5.10)

- 式中
- $W_i$ ——滑体下滑部分第  $i$  条块所受的重力 (kN)；
  - $W_j$ ——滑体阻滑部分第  $j$  条块所受的重力 (kN)；
  - $\alpha_i$ ——滑体下滑部分第  $i$  条块所在折线段滑面的倾角 (°)；
  - $\alpha_j$ ——滑体阻滑部分第  $j$  条块所在折线段滑面的倾角 (°)；
  - $l_i$ ——滑体下滑部分第  $i$  条块所在折线段滑面的长度 (m)；
  - $l_j$ ——滑体阻滑部分第  $j$  条块所在折线段滑面的长度 (m)；
  - $c$ ——折线形滑动面上的综合单位粘聚力 (kPa)。

在实际工程中，一般通过直接计算滑坡的剩余下滑力来判断边壁（坡）的稳定性。

第  $i$  条块的剩余下滑力（即该部位的滑坡推力） $P_i$ 可按下式计算

$$P_i = W_i \sin \alpha_i - \frac{1}{2} W_i \cos \alpha_i \tan \phi_i - \frac{1}{2} W_i \cos \alpha_i \tan \phi_i$$

(5.5.11)

- 式中
- $P_i$ ——第  $i$  条块的剩余下滑力，作用于分界面的中点；
  - $W_i$ ——第  $i$  条块产生的支撑力，作用于分界面的中点；



砸——第  $i$  条块滑面的滑床反力，作用于本段滑面的中点，其大小等于

宰 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ ；

云——第  $i$  段滑面的抗滑力，其大小等于 宰 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$  恒悦 $\frac{1}{2}$ ；

$\Psi$ ——传递系数，其值为  $\Psi$  越 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$  原 $\alpha_{\text{原}}$  原 $\alpha_{\text{原}}$  原 $\alpha_{\text{原}}$  原 $\alpha_{\text{原}}$ ；

$\alpha_{\text{原}}$ ——第  $i$  条块所在滑动面的倾角（毅）；

运——滑坡推力安全系数，应根据滑坡现状及其对工程的影响等因素确定，一般可取 运 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$  员 $\frac{1}{2}$ ；

计算滑坡推力的具体作法是：自上而下逐块计算各块的剩余下滑力，并逐块传递，直至传到支挡结构或滑体的最后一块，当任何一块的剩余下滑力为零或负值时，说明该块以前块段不存在滑坡推力，应从下一块重新开始累积；当最后一块滑体的剩余下滑力为负值或零时，表明整个边坡是稳定的；如为正值，则不稳定，应做加固设计，并在抗滑力增加基础上再次重复上述过程，直至边坡稳定为止。

䄀岩石边坡稳定分析 岩石边坡稳定分析首先要作好地质工程勘测。勘察应查明影响岩石边坡稳定的地质、坡貌条件，具体如下：

① 地貌和形态、发育阶段和微地貌特征；当存在滑坡、崩塌、泥石流等不良地质现象时，应查明其范围和性质。

② 构成边坡岩体的种类、成因、性质和分布。当有软弱层时，应着重查明其性状和分布。在覆盖层地区，应查明其厚度及下伏基岩面的形态与坡度。

③ 查明岩体内结构面的类型、产状、间距、延伸性、张开度、粗糙度、充填及胶结情况，组合关系和主要结构面产状与坡面的关系等。

④ 地下水的类型、水位、水量、水压、补给和动态变化，岩层的透水性及地下水在地表的出露情况。

⑤ 地区的气象条件（特别是雨期、暴雨量），坡面植被，岩石风化程度，水对坡面、坡脚的冲刷情况和地震烈度，判明上述因素对坡体稳定性的影响。

⑥ 岩体内各岩石材料的物理力学性质和软弱结构面的抗剪强度。

当然，勘测的详细程度应视实际工程情况而定，有时还要分阶段进行。在勘测基础上绘制地质平面及剖面，图上对岩质边坡的节理裂隙要详细注明，这是影响岩石边坡稳定的重要因素。








取得勘测资料后，便可进行边坡稳定的定性分析。表 䄀总结了常见的岩石边坡破坏类型。

(员) 边坡稳定的定性分析方法。边坡稳定的定性分析方法主要有工程类比法、图解法和数值分析法。

员) 工程类比法。工程类比法主要是对比已有的，在类似地质、地貌条件地

区开挖边坡时工程经验（包括稳定的和破坏的），进行类比推测。根据已往经验，下列情况对岩石边坡的稳定是不利的，应特别关注：

表 员圆源 岩石边坡破坏类型

破坏类型	示意图	特 征	
平面破坏		主要结构面的走向、倾向与坡面的基本一致，结构面的倾角小于坡角且大于其摩擦角	一个滑动平面和一个滑动块体
			一个滑动平面和一条张裂隙
			若干滑动平面和横节理
			一个主要滑动平面和主动、被动两滑动块体
楔形破坏		两组结构面的交线倾向坡面，交线的倾角小于坡角且大于其摩擦角	
曲线形破坏		节理很发育的破碎岩体发生旋转破坏，破坏面是圆弧或非圆弧曲线	
倾倒破坏		岩体被陡倾结构面分割成一系列岩柱，当为软岩时，岩柱产生坡面弯曲；当为硬岩时，岩柱可再被正交节理切割岩块，向坡面翻倒	

- ① 边坡及其邻近地段已有滑坡、崩塌、陷穴等不良的现象存在。
- ② 岩质边坡中有页岩、泥岩、片岩等易风化、软化岩层或软硬交互的不利岩层组合。
- ③ 土质边坡中网状裂隙发育、有软弱夹层，或边坡由膨胀土（或岩）构成。
- ④ 软弱结构面与坡面倾向一致或交角小于  $30^{\circ}$  且结构面倾角小于坡角，或基岩面倾向坡外且倾角较大。
- ⑤ 地层渗透性差异大，地下水在弱透水层或基岩面上积聚流动；断层及裂隙中有承压水出露。
- ⑥ 坡上有水体漏水，水流冲刷坡脚或因河水位急剧升降引起岸坡内动水力的强烈作用。
- ⑦ 边坡处于强震区或邻近地段采用大爆破施工。

圆 图解法。图解法包括赤平极射投影、实体比例投影与摩擦圆等方法。图解法用于岩质边坡的稳定分析，可快速、直观地分辨出控制边坡的主要和次要结构面，确定出边坡结构的稳定类型，判定不稳定块体的形状、规模及滑动方向。

对用图解法判定为不稳定的边坡，需进一步用计算加以验证。

④ 边坡稳定的数值分析方法。边坡稳定的数值分析方法主要有有限元法和极限平衡法。

① 有限元法。由地质勘察得到了有关参数后，可用已有有限元软件进行分析，与一般连续体有限元分析不同，可引入节理、裂缝单元，这对于中、大型工程已经是常用的、甚至是必用的方法。

② 极限平衡法。极限平衡法可用于平面型、简单的块体滑坡。在极限平衡法中，根据地质剖面的节理图设定某滑动面，将滑体视为刚体，将沿滑动面的滑动力和抗滑力分别计算，二者之比为稳定系数  $K$ 。若  $K > 1$  (实际应用取  $K=1.2$  左右) 则岩体是稳定的。

其他类型，尤其是岩石类型的滑坡，则可根据具体情况进行分析，这里不再细述。

## 15.2 滑坡的防治措施

对于滑坡地带的建筑，一般均应首先考虑绕避原则。对于无法绕避的滑坡地区工程，经过技术经济比较，在经济合理及技术可能的情况下，即可对滑坡工程进行整治。滑坡整治可以从两个角度进行，一是直接整治滑坡，采取各种工程技术措施阻止滑坡的产生；二是采取工程技术措施，保护滑坡发生时可能受到危害的生命财产和各种重要国防交通、通信设施。

15.2.1 滑坡整治的原则 滑坡整治应根据滑坡的性质、规模、被保护对象的重要性、工程技术可行性而遵循以下主要原则：

(1) 以防为主，尽量避开。对于重要建设工程项目，如安全国防工程、交通通讯、都市住宅等，应尽量避开。对于滑坡地带已建工程、难以绕避地区，应尽量避免破坏原有平衡，防止滑坡的产生。

(2) 区别情况，综合防治。不同类型的滑坡或不同地质环境中的滑坡，其形成条件和发育过程各不相同。深入研究分析滑坡产生的原因、类型、范围、地质特征、发展阶段后，才能对症下药，提出合理的治理方案。同时，对于大型滑坡或滑坡群地带，形成滑坡的原因是多方面的，应有针对性地采取措施，进行综合防治。

(3) 彻底根治，以绝后患。对于直接威胁人民生命财产和重要工程的滑坡，原则上要彻底根治，以绝后患，避免滑坡反复、重复整治而造成巨大浪费。对于大型滑坡或滑坡群，若一次性根治的投资过大，则应一次规划，分期实施治理，保证滑坡整治的连续性。对于突发性滑坡，可采取应急措施，先行恢复正常生活和生产工作，待查明原因后再对症下药，彻底根治。其他滑坡整治原则包括：早下决心，及时处理；因地制宜，经济合理；方法简便，安全可靠。

圆 陡坡整治的途径 具体有：

(员) 终止或减轻诱发滑坡的外部环境条件，如截流排水、卸荷减载、坡面防护。

(圆) 改善边坡内部力学特征和物质结构，如土质改良。

(猿) 设置抗滑工程直接阻止滑坡的发展，如抗滑桩、挡土墙、预应力锚固等。

猿 具体工程防治措施 工程实践中有以下几种方案：

(员) 截流排水。截流排水主要是为了防止地表水、地下水以及冲刷侵袭。

对于滑坡体外的地表水，采取拦截旁引的方法阻止滑坡体外的地表水流向滑坡体内。对于滑坡体内的地表水，采取防渗汇流、快速排走的方法减轻该部分地表水对滑坡的作用。常用的拦截排水工程有以下几种：

员 外围截水沟。外围截水沟应设置在滑坡体（滑坡周界外侧）或老滑体后缘裂缝缘以外，根据山坡的汇水面积、设计降雨量设置外围截水沟。如果坡面汇水面积、地表径流的流速、流量较大，则可设置多条、多级外围截水沟以满足排水需要。

圆 内部排水沟。对于滑坡体内的地表水，除充分利用自然沟谷排水外，还可设置内部排水沟，以加快地表水向滑坡体外排出。排水主沟方向应和滑坡主轴方向一致，应尽量避免横切滑动方向。支沟方向与主轴方向斜交成猿园°~源园°。内部排水沟平面多呈树枝状，一般设置在呈槽型的纵向谷地中间。当排水沟跨越地表裂缝时，应采用迭置式的沟槽以防地表水下渗。

猿 坡面夯实防渗。为了防止地表水下渗，对表土松散易渗的土体，应夯填坑洼和裂缝，并整平夯实，使落到地表的雨水能迅速向自然沟谷和排水沟汇集排走。在滑坡体表面应种植草皮减轻地表水对滑坡体的表面冲刷，必要时可设计护面。滑坡体内若有水田，应改为旱地耕种，最好停止种植活动。

源 盲沟。对于滑坡体外的地下水，可设置截水盲沟旁引排走。对滑坡体内的地下水，可设置排水孔、排水隧洞、支撑盲沟或以灌浆阻水方法拦截导引。

盲沟（渗沟）可以用来排泄浅层地下水。支撑盲沟的布置应与主轴方向一致，适合排泄缘米以内的浅层地下水，兼具排水和支撑功能。截水盲沟一般设置在滑坡周界外侧缘以外，与地下水的流向垂直。每隔一定距离，设置相应检查井以便维修疏通。

缘 排水孔。对于深层地下水，可设置排水孔群以加速排泄。按钻孔布置形式，排水孔可以分为垂直排水孔、倾斜排水孔和放射状排水孔。排水隧洞主要用于其他排水措施不力的地带，可汇集不同层次和区域的地下水并集中排走。排水隧洞按其功能可分为体外截水隧洞和体内排水隧洞，并可与排水孔群联合设置以增加排水能力。灌浆阻水主要是通过帷幕灌浆拦截地下水或固结灌浆减轻地下水

的侵袭。

(圆) 削坡减荷。这种措施的目的是为了降低坡体的下滑力，其主要的方法是将较陡的边坡减缓或将滑坡体后缘的岩土体削去一部分。这种措施在滑坡防治中应用较广，尤其对推落式滑坡效果更佳。有时单纯的减荷不能起到有效阻滑的作用，所以最好与反压措施结合起来，即将减荷削下的土石堆于滑体前缘的阻滑部位，使之起到既降低下滑力，又增加抗滑力的良好效果。

(猿) 边坡护坡。内陆地区为了防止易风化的岩石组成的边坡表层因风化而产生剥落；沿河、沿海地区为防止斜坡被河水冲刷或海、湖、水库水的波浪冲蚀，一般要采取护坡措施。

#### 员 岩石边坡的坡面防护措施。

防护措施大致有用灰浆、三合土等抹面、喷浆、喷混凝土、浆砌片石护墙、锚杆喷浆护坡、挂网喷浆护坡等。这类措施主要用以防护开挖边坡坡面的岩石风化剥落、碎落以及少量落石掉块现象，如常用于风化岩层、破碎岩层及软硬岩相间的互层（如砂页岩互层、石灰岩页岩互层）的路堑边坡的坡面防护，用以保持坡面的稳定，而其所防护的边坡，应有足够的稳定性。当采用封闭式坡面防护类型（如抹面、喷浆、喷混凝土、浆砌片石护坡等），应在坡面设置泄水孔和伸缩缝。对高陡边坡，应在中部适当位置设置耳墙。并应有便于检查维修用的安全设备。

对于坡度大且风化严重的岩石边坡，应采用喷锚网防护，即在坡面上打锚杆挂钢筋网后，再喷混凝土，兼有加固与防护作用。挂网喷射使用  $\phi$  远钢筋作成圆型或圆形的方框，用细铁丝捆扎成网，挂在  $\phi$  员短锚杆元钉上，按一定的排列方式将框架连在一起，然后喷射混凝土。近年来有用土工格栅代替钢筋挂网的，施工方便，造价较低，效果亦佳。

#### 圆 土质边坡的防护措施。

雨水的冲蚀作用，会造成土质边坡冲刷流泥和溜坍等破坏，日晒和冰冻也加速岩土表层的风化剥落。为保护边坡加固表土，防止风沙对沙质路基的破坏，防止冻土的热融，在坡面上植草是经济而有效的办法。该法适用于路堤边坡可以保持、岩土较软、草根可以生长的地段。

经人工降雨试验，在历时 猿皂强度为 园愿~ 员圆皂的暴雨下，有密铺草皮的边坡径流量有所减少，因冲蚀而产生的泥沙量减少 忽豫。雨滴落下时的溅蚀作用和细流的冲刷大为减弱，有一种消能作用和茎叶的截留、分流作用，以及根部对边坡的加筋作用。雨季中土的抗剪强度可提高 猿豫~ 远豫，粘结系数 糟值可提高 员倍左右。

草种宜就地选用覆盖率高、根部发达、茎叶低矮、耐寒耐旱、具匍匐茎的多年生草种，也宜引进适应当地土壤气候的优良草种，其中属于禾木科有兰茎冰

草、扁穗冰草和无芒雀麦等；豆科植物有红豆草、小冠花和柠条等。

在坡度较陡且易受冲刷的土坡和强风化的岩质堑坡上，可采用框架内植草护坡。框架制作有多种做法，例如：①浆砌片石框架成  $1\text{m} \times 1\text{m}$  方格型，净距  $0.5\text{m}$ ，条宽  $0.2\text{m}$ ，嵌入坡面  $0.1\text{m}$  左右；②锚杆框架护坡，预制混凝土框架梁断面  $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ ，长  $1\text{m}$ ，用  $\phi 16$  钢筋，两头露出  $0.1\text{m}$ ，另在杆件的接头处伸入一根  $\phi 16$  锚杆，灌注混凝土将接头固定。锚杆作用是将框架固定在坡面上。框架尺寸和形状由具体工程而定，其形状有正方形、六边形、拱形等。框架内再种植草类植物。

3. 江河湖海和水库边坡防护措施。

靠近江河湖海和水库区的路基，边坡要受水流、波浪和流水的冲击，尤其在有台风雨和暴雨洪水的季节，还有涨大潮的时候，路基易遭破坏，应有必要和足够的冲刷防护措施，才能保证正常使用和安全行车。

山区河谷陡深，水流湍急，多急弯急滩，比降大、流速快、径量丰富，洪水中，中间流速大至  $3\text{m/s}$ ，冲刷、侧蚀作用十分强烈。尤其是大洪水发生时有很大的破坏力。

沿路基、边坡的冲刷防护工程有以下四个重点：

① 凹岸必防。凹岸受水流强烈的冲刷，流速和水力动能大，又受环流影响，侧蚀最为明显，故凹岸路堤边坡易遭冲毁，应做护坡。

② 当冲必防。凹岸或急滩下皆当冲之处，水面广阔，吹向边坡的风又受波浪的冲击，水流就要直冲路基，均宜有良好的护坡和基础才足以抵御。

③ 软岸必防。如将基岩裸露、石质坚硬、允许流速甚高的一岸称为硬岸，那么土质一岸则称为软岸。洪水时软岸易遭冲刷。修路后土质路堤就是新生的软岸，如没有有力防护迟早要遭冲毁。

④ 凡有局部冲刷的地方，如堤埝交界、路堤和路肩墙交界和桥头路基等处，都要求做好顺接，主要地点要做片石护锥。河岸在平面和横断面上的任何急剧变化，都会引起水位、比降、流速和泥沙冲淤的变化，并引起局部冲刷。

冲刷防护设计应收集河段的水流性质、平均流速水位、波浪、涨落历时、土质和风速风向等资料。目前冲刷防护工程中广泛使用土工布作为反滤层。因土工布对细粒土有良好的隔离和反滤作用，并能随石块形状密贴坡面，在水流冲刷和波浪动应力作用下不至破坏。用三维土工格栅内填砂砾石小片石可抵御  $3\text{m/s}$  流速的冲刷。石块填在格栅内平整稳当，用料较省。

间接防护有防洪堤、丁坝、导流堤，透水格栅和防水林等河调工程。用以改变边坡受威胁地段的水流流向，减少流速、波浪和冲刷并防止不稳河道的摆动和歧流的发展，对路基、边坡起间接防护作用。

（四）抗滑工程。抗滑工程是提高斜坡抗滑力的有效工程措施，主要有挡土

墙、抗滑桩、锚杆(索)和支撑工程等。

**④ 挡墙。**挡墙也称挡土墙,是防治滑坡常用的有效措施之一,并与排水等措施联合使用,它是借助于自身的所受重力以支挡滑体的下滑力。按建筑材料和结构形式不同,有砂浆砌石抗滑挡墙、混凝土或钢筋混凝土抗滑挡墙,抗滑片石垛及抗滑片石竹笼等,单独使用挡墙只适合于中小型滑坡。挡墙的优点是结构比较简单,可以就地取材,而且能够较快地起到稳定滑坡的作用。挡墙的基础一定要砌置于最低的滑动面之下,以避免其本身滑动而失去抗滑作用。

**⑤ 抗滑桩。**抗滑桩是用以支挡滑体下滑力的桩柱,一般集中设置在滑坡的前缘附近。它施工简便、可灌注,也可以锤击贯入。桩柱的材料有混凝土、钢筋混凝土、钢等。这种支挡工程对正在活动的浅层和中厚层滑坡效果较好。为使抗滑桩更有效地发挥它支挡的作用,根据经验,应将桩身全长的  $\frac{1}{3}$  埋置于滑坡面以下的完整基岩或稳定土层中,并灌浆使桩和周围岩上体构成整体;而且宜设置于滑体前缘厚度较大的部位。抗滑桩能承受相当大的土压力,所以成排的抗滑桩可用来止住巨型的滑坡体。

**⑥ 锚杆(索)。**岩质斜坡一般采用预应力锚索加固,这是一种很有效的防治滑坡的措施。利用锚杆或锚索上所施加的预应力,以提高滑动面上正应力,进而提高该面的抗滑力,改善剪应力的分布状况。锚杆(索)的方向和设置深度应视斜坡的结构特征而定。

**⑦ 支撑。**这种方法主要用来防治陡峭斜坡顶部的危岩体,制止其崩落。施工时,将支撑的基础埋置于新鲜基岩中,且在危岩体中打入杆杆,将危岩与支撑连接起来。

**⑧ 土质改良。**滑坡的形成是坡体物质的抗滑能力不足以抵挡下滑趋势造成的。通过土质改良,增强滑动面岩土的物理力学性质,改善滑坡体内土体的结构,从而达到加大抗滑能力和减轻下滑状态的目的。目前,土质改良有两种途径:一种是加进某种材料以改变斜坡岩土体成分,如直接拌和法和压力灌浆法;另一种途径是采用某种技术改变土的结构状态,如热处理(焙烧法)或电化学(电渗)方法等。

**⑨ 直接拌和**是将固化材料如沥青、水泥、石灰和其他化学固化剂掺入斜坡土体并拌和压实,使土胶结以提高土的强度和抗水性。其中沥青和水泥用于无粘性土的效果较好,而石灰粉、煤灰多用于粘性土的改良。

**⑩ 灌浆法**是把胶结材料的浆液通过钻孔压入岩土体的孔隙或裂隙中,待其凝固后增强岩土体强度和抗水性。灌浆方法与灌浆压力的选择尤为重要。在灌浆材料上最常见的灌浆是水泥灌浆,其他高分子化学材料也可用于灌浆加固,但成本较高。

**⑪ 防御绕避。**当线路工程(如铁路、公路)遇到严重不稳定斜坡地段,处

理又很困难时，则可采用防御绕避措施。具体工程措施有：明硐和御塌棚及内移做隧、外移做桥等。

⑤ 明硐和御塌棚，用于陡峻斜坡上部经常发生崩塌的地段。

⑥ 内移做隧和外移做桥的措施，用于难于治理的大滑坡地段。

上述各项措施，可归纳为“挡、排、削、护、绕”五字方针。要根据斜坡地段具体的工程地质条件、变形破坏特点及发展演化阶段，选择采用，有时则采取综合治理的措施。

## 5.2 滑坡的监测与预报

⑤ 滑坡的动态监测 滑坡的监测是指通过对滑坡的动态观测，判断滑坡的发展发育阶段，并进行防灾减灾预报。滑坡的动态观测包括滑坡位移观测和滑坡水文地质观测。其中更主要的是进行滑坡位移观测。

⑥ 滑坡位移观测。滑坡位移观测可以对滑坡发育的不同阶段的位移进行分析，编制滑坡水平位移矢量图及累计水平位移矢量图，随时掌握滑坡的发展趋势。对经过整治的滑坡进行观测，可以检查整治效果，积累整治经验。位移观测主要通过布桩观测来进行。对大型滑坡或滑坡群，也可借助地理信息系统的地形数据进行综合判断。位移观测的内容包括滑坡体整体变形和开裂变形。

观测网的布置可以有十字交叉网、放射网、三角网和任意方格网等。主要依据当地地形条件和滑坡特征选用。位移观测可以通过埋设观测桩和参照实地建筑物进行。用于长期观测网的观测桩一般可用就地灌注混凝土桩，桩顶外露。观测桩包括置镜点和照准点桩、水准基点桩、位移观测桩。水准基点桩应设置在滑体周界外侧稳定土层中。

⑦ 滑坡的动态监测要注意以下一些异常现象：

⑧ 大滑动之前，在滑坡前缘坡脚处，有堵塞多年的泉水复活现象，或者出现泉水（水井）突然干枯、井（钻孔）水位突变等类似的异常现象。

⑨ 在滑坡体中，前部出现横向及纵向放射状裂缝。它反映了滑坡体向前推挤并受到阻碍、已进入临滑状态。

⑩ 大滑动之前，在滑坡体前缘坡脚处，土体出现上隆（凸起）现象。这是滑坡向前推挤的明显迹象。

⑪ 大滑动之前，有岩石开裂或被剪切挤压的音响。这种迹象反映了深部变形与破裂。动物对此十分敏感，有异常反应。

⑫ 临滑之前，滑坡体四周岩体（土体）会出现小型坍塌和松弛现象。

⑬ 如果在滑坡体上有长期位移观测资料，那么大滑动之前，无论是水平位移量还是垂直位移量，均会出现加速变化的趋势。这是明显的临滑迹象。

⑭ 滑坡后缘的裂缝急剧扩展，并从裂缝中冒出气体。



(3) 各地区应进行滑坡危险性评估，划出危险等级，以供工程建设参考。

**5.3.2 滑坡预报** 当有不良气象条件，尤其是有大暴雨或长期阴雨天气时，对危险等级高的地区除加强观测外还应加强滑坡预报。

目前，我国气象预报中已加入地质灾害发生危险等级的预报，对预防地质灾害及减少灾害损失有很大作用。

# 第 8 章 崩塌的灾害及防治

崩塌也叫崩落、垮塌或塌方，是较陡斜坡上的岩土体在重力作用下突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚（或沟谷）的地质现象。

## 8.1 崩塌的类型和成因

### 8.1.1 崩塌的类型

按崩塌体物质分类 按崩塌体的物质组成为两大类：一是产生在土体中的，称为土崩。二是产生在岩体中的，称为岩崩。当其岩崩的规模巨大，涉及到山体者，又俗称山崩。当其崩塌产生在河流、湖泊或海岸上时，称为岸崩。

按崩塌体规模、范围、大小分类 按崩塌体的规模、范围、大小可以分为剥落、坠石和崩落等类型。

(1) 剥落的块度较小，块度大于  $10m^3$  者占  $10\%$  以下，产生剥落的岩石山坡一般在  $30^\circ \sim 45^\circ$

(2) 坠石的块度较大，块度大于  $10m^3$  者占  $10\% \sim 20\%$ ，山坡角在  $30^\circ \sim 45^\circ$  范围内。

(3) 崩落的块度更大，块度大于  $10m^3$  者占  $20\%$  以上，山坡角多大于  $45^\circ$

### 8.1.2 崩塌的成因

内部条件 崩塌的形成与岩土类型、地形地貌、地质构造等内部条件有关。

(1) 岩土类型。岩、土是产生崩塌的物质条件。一般而言，各类岩、土都可能形成崩塌。通常，岩性坚硬的各类岩浆岩、变质岩及沉积岩类的碳酸盐岩、石英砂岩、砂砾岩、初具岩性的石质黄土、结构密实的黄土等会形成规模较大的崩塌，页岩、泥灰岩等互层岩石及松散土层等往往以小型坠落和剥落为主。

(2) 地质构造。各种构造面，如节理、裂隙面、岩层界面、断层等，对坡体的切割、分离，为崩塌的形成提供脱离母体（山体）的边界条件。坡体中裂隙越发育，越易产生崩塌。与坡体延伸方向近于平行的陡倾构造面，最有利于崩塌的形成。

(3) 地形地貌。江、河、湖（水库）、沟的岸坡及各种山坡、铁路、公路边坡、工程建筑物边坡及其各类人工边坡都是有利崩塌产生的地貌部位，坡度大于

源较的高陡斜坡、孤立山嘴或凹形陡坡均为崩塌形成的有利地形。

岩土类型、地质构造、地形地貌三个条件，又统称地质条件，它是形成崩塌的基本条件。

■ 外部环境及人工活动因素 崩塌的形成与外部环境及人工活动有关。

(员) 主要的环境影响因素有：

员 地震。地震引起坡体振动，破坏坡体平衡，从而诱发崩塌。一般烈度大于 Ⅴ 度以上的地震都会诱发大量崩塌。

圆 融雪、降雨特别是大雨、暴雨和长时间的连续降雨，使地表水渗入坡体，软化岩、土及其中软弱面，产生孔隙水压力等，从而诱发崩塌。

猿 地表水的冲刷、浸泡。河流等地表水体不断地冲刷坡脚或浸泡坡脚、削弱坡体支撑或软化岩、土，降低坡体强度，也能诱发崩塌。

(圆) 不合理的人类活动。开挖坡脚、地下采空、水库蓄水、泄水等改变坡体原始平衡状态的人类活动，都会诱发崩塌活动。具体来说，主要有以下几种人类活动会诱发崩塌：

员 采掘矿产资源。我国在采掘矿产资源（如煤矿、铁矿、磷矿、石膏矿、粘土矿等）活动过程中出现崩塌的例子很多。有露天采矿场边坡崩塌，也有地下采矿形成采空区引起地表崩塌的。

圆 道路工程开挖边坡。修筑铁路、公路、灌渠时，开挖边坡切割了外倾的或缓倾的软弱地层，加之爆破对边坡强烈震动，有时削坡过陡都可以引起崩塌。此类实例还是较多的。

猿 水库蓄水与渠道渗漏。这里，主要是水的浸润和软化作用，以及水在岩体（土体）中的静水压力、动水压力，可能导致崩塌发生。

源 堆（弃）渣填土。加载、不适当的堆碴、弃碴、填土，如果处于可能产生崩塌的地段，等于给可能的崩塌体增加了荷载，从而可能而诱发崩塌。

缘 强烈的机械振动。如火车机车行进中的振动，工厂锻轧机械振动均可起诱发作用。

还有一些其他因素，如冻胀、昼夜温差变化等，也会诱发崩塌。

此外，在地质普查认定的地质不稳定地区，在以下几种情况下，极易发生崩塌，应特别加以注意。

员 降雨过程之中或稍微滞后。这里说的降雨过程主要指特大暴雨、大暴雨、较长时间连续降雨。这是出现崩塌最多的时间。

圆 强烈地震过程之中。主要指在震级 Ⅵ 级以上的强震过程中，震中区（山区）常有崩塌集中出现。地震过程之后发生崩塌很少。

猿 开挖坡脚过程之中或滞后一段时间。因工程（或建筑场）施工开挖坡脚，破坏了上部岩体（土体）的稳定性，常常发生崩塌。崩塌的时间有的就在施工

中，这以小型崩塌居多。较多的崩塌发生在施工之后一段时间里。

源 水库蓄水初期及河流洪峰期。水库蓄水初期或库水位的第一个高峰期，库岸岩土体首次浸没（软化），上部岩土体容易失稳产生崩塌。

缘 强烈的机械震动或大爆破之后。

## 崩塌的特征

源 崩塌的地域分布特征 崩塌具有明显的地域性。西南地区为我国崩塌分布的主要地区；崩塌类型多，规模大，频率高，分布广，危害重，已成为该地区主要自然灾害之一。其次是西北黄土高原地区，该地区以黄土崩塌广泛分布为其显著特征。东南、中南等省的山区和丘陵地区，崩塌也较多，但规模一般较小。西藏、青海、黑龙江省北部的冻土地，分布着与冻融有关、规模较小的冻融堆积层崩塌。秦岭—大巴山地区既是滑坡主要分布地区、也是多崩塌地区；尤其是宝成铁路，自通车以来沿线滑坡、崩塌年年发生，这与修筑铁路时开挖坡脚有密切关系。

源 崩塌与滑坡的区别 崩塌与滑坡的区别主要表现在以下几个方面：

源 从斜坡坡度看，崩塌面坡度常大于  $45^\circ$  而滑坡面则常小于  $45^\circ$

源 从运动本质上看，崩塌属于倾倒、坠落，而滑坡则属于剪切滑动。崩塌发生之后，崩塌物的垂直位移量远大于水平位移量，其重心位置降低了很多；而滑坡则不然，通常是滑坡体的水平位移量大于垂直位移。多数滑坡体的重心位置降低不多，滑动距离却很大。同时，滑坡下滑速度一般比崩塌缓慢。崩塌总是突发性的，滑坡则有快有慢，或先缓慢而后突发。

源 崩塌发生之后，崩塌物常堆积在山坡脚，呈锥形体，结构零乱，而滑坡堆积物常具有一定的外部形状，滑坡体的整体性较好，反映出层序和结构特征。也就是说，在滑坡堆积物中，岩体（土体）的上下层位和新老关系没有多大的变化。

源 崩塌体完全脱离母体（山体），而滑坡体则很少是完全脱离母体的，多数总有一部分滑体残留在滑床之上。

源 崩塌堆积物表面基本上不见裂缝分布。而滑坡体表面，尤其是新发生的滑坡，其表面有很多具有一定规律性的纵横裂缝。例如，分布在滑坡体上部（也就是后部）的弧形拉张裂缝；分布在滑坡体中部两侧的剪切裂缝（呈羽毛状）；分布在滑坡体前部的横张裂缝，其方向垂直于滑动方向，亦即受压力的方向；分布在滑坡体中前部，尤其是以滑坡舌部为多的扇形张裂缝，或者称为滑坡前缘的放射状裂缝。

## 4.1 崩塌的危害

崩塌是多山地区及黄土高原常见的自然灾害之一。崩塌可以单独发生,也可能与滑坡一起发生,甚至可能和泥石流同时发生。崩塌(包括崩塌加滑坡,崩塌加泥石流)的主要危害有:

(1) 崩塌给工、农业生产及人民的生命财产造成巨大损失。

位于城镇附近的崩塌常常砸埋房屋,伤亡人畜,毁坏田地,摧毁工厂、学校、机关单位等,并毁坏各种设施,造成停电、停水、停工,有时甚至毁灭整个城镇。例如,1982年8月15日凌晨四川巫溪县城龙头山发生岩崩,摧毁一栋远层的宿舍、两家旅舍、居民房 10 余间,掩埋公路干线 40 余米,造成 10 人死亡,直接经济损失达 100 万元左右。

发生在工矿区的崩塌可摧毁矿山设施,伤亡职工,毁坏厂房,使矿山停工停产,常常造成重大损失。例如云南省威信县墨黑煤矿山区,分别于 1982 年、1983 年、1984 年 1 月、1985 年 1 月、1986 年 1 月发生较大崩塌。据不完全统计共毁坏民房 10 户,毁坏耕地 100 亩,损失粮食 10 万斤;摧毁煤矿通信井 1 处、回风巷 10 米、运输巷 10 米;损坏 10 千伏高压输电线 10 米,造成煤矿停产的经济损失 10 万元。

又如,1984 年 1 月 1 日湖北省远安县盐池河磷矿突然发生了一场巨大的岩石崩塌(岩崩,又称山崩)。山崩时,标高 100 米的鹰嘴崖部分山体从 100 米标高处俯冲到 50 米标高的谷地。在山谷中乱石块覆盖面积南北长 100 米,东西宽 100 米,石块加泥土厚度 10 米,崩塌堆积的体积共 10 万  $m^3$ 。最大的岩块约有 100 吨。顷刻之间,盐池河上筑起一座高达 10 米的堤坝,构成了一座天然湖泊。乱石块把磷矿的五层大楼掀倒、掩埋,死亡 10 人,还毁坏了该矿的设备和财产,损失十分惨重。

(2) 崩塌对水利工程的危害。我国许多崩塌、滑坡发生在水电工程附近。它们毁坏水渠管道、破坏大坝、水电站、变电站以及其他设施。崩塌、滑坡体落入水库中常造成水库淤积,有时甚至激起库水翻越大坝冲向下游造成伤亡和损失。有些崩塌、滑坡还可以造成水库报废。总之,崩塌、滑坡常常破坏山区水利水电工程,使其不能正常运营,造成经济损失。

(3) 崩塌对交通运输线的危害。

(4) 崩塌对铁路的危害。铁路是遭受崩塌、滑坡危害最频繁、最严重的一项工程。在我国,尤其是宝成线、陇海线的宝天段及成昆线,几乎年年遭受崩塌、滑坡的袭击。据不完全统计,我国铁路沿线的大中型崩塌点有 100 处,致使铁路部门每年花费大量资金进行整治。崩塌、滑坡对铁路的危害主要表现为:破坏线路、中断行车、危害站场、砸坏站房;毁坏铁路桥梁及其他设施,错断隧道、

摧毁明硐，造成车翻、人亡的行车事故。例如，1985年 愿月宝成线略阳至王家沱间发生崩塌性滑坡，破坏线路 员里，轨道被推入江中，中断行车 缘天。1986年 源月成昆线上某处因崩塌造成列车颠覆事故。

④ 崩塌对公路的危害。山区公路也是遭受崩塌、滑坡危害最频繁的一项工程。主要表现是：掩埋公路、砸坏路基及公路桥、中断交通；造成行车事故、引起人身伤亡。例如，1985年云南奕良县板桥发生滑坡，掩埋公路 源里余米，中断交通 猿个月，因公路中断而绕道行车运货增加经费 缘万元。

⑤ 对河运工程的危害。崩塌、滑坡体落入江河之中，可形成巨大涌浪，击毁对岸建筑设施和农田、道路；推翻或击沉水中船只，造成人身伤亡和经济损失。落入水中的土石有时形成激流险滩，威胁过往船只、影响或中断航运。落入水库中的崩塌、滑坡体可产生巨大涌浪，有时涌浪翻越大坝冲向下游形成水害。

(源 崩塌(或崩塌加滑坡)形成的次生灾害。

滑坡、崩塌除直接成灾外，还常常造成一些次生灾害。最常见的次生灾害是为泥石流累积固体物质源，促使泥石流灾害的发生；或者在滑、崩过程中在雨水或流水的参与下直接转化成泥石流。

滑坡、崩塌另一常见的次生灾害是堵河断流、形成天然坝，引起上游回水使江河溢流，造成水灾；或堵河成库，一旦库水溃决，便形成泥石流或洪水灾害。

## 员 崩塌的防治

崩塌的防治方法大多与滑波的防治相同，主要有：

(员 遮挡，即遮挡斜坡上部的崩塌落石。这种措施常用于中、小型崩塌或人工边坡崩塌的防治中，通常采用修建明硐、棚棚等工程进行，在铁路工程中较为常用。

(圆 拦截。对于仅在雨季才有坠石、剥落和小型崩塌的地段，可在坡脚或半坡上设置拦截构筑物。例如，设置落石平台和落石槽以停积崩塌物质；修建挡石墙以拦坠石；利用废钢轨、钢钎及钢丝等编制钢轨或钢钎栅栏来挡截落石。

(猿 支挡。在岩石突出或不稳定的大孤石下面，修建支柱，支挡墙或用废钢轨支撑。

(源 护墙、护坡。在易风化剥落的边坡地段，修建护墙，对缓坡进行水泥护坡等。一般边坡均可采用。

(缘 镶补沟缝。对坡体中的裂隙、缝、空洞，可用片石填补空洞，水泥砂浆沟缝等以防止裂隙、缝、洞的进一步发展。

(远 刷坡(削坡)。在危石、孤石突出的山嘴以及坡体风化破碎的地段，采用刷坡来放缓边坡。

(苑 排水。在有水活动的地段，布置排水构筑物，以进行拦截疏导。

## 第 四 章 泥石流灾害及防治

泥石流是产生于山区的一种严重的地质灾害，它是由暴雨、冰雪融冰等水源激发的，含有大量泥沙石块的特殊洪流。其特征往往突然爆发，在很短的时间内大量泥沙石块如流体一般沿着陡峻的山沟前推后拥，奔腾咆哮而下，地面为之震动，山谷犹如雷鸣，常常给人类生命财产造成很大灾害。泥石流的发生发展，与山地环境的形成演化过程息息相关，是环境退化，生态失衡、地表结构破坏、水土流失，地质环境恶化的产物。人口的增长及在山区进行的不合理的生产活动，在很大程度上加剧了泥石流的形成和发展。泥石流在全球山地广为分布，据现有报道，除南极洲外，其余各大洲几乎都有泥石流活动，泥石流灾害波及世界 120 多个国家和地区。

### 四 一 泥石流的灾害

在我国，泥石流是山区众多自然灾害中具有突发性灾变过程的主要灾种。据不完全的资料，泥石流灾害波及全国 26 个省、市、自治区、不仅影响山区城镇、工矿、交通运输、能源基地、水利设施和国防建设以及农田村寨等各种建筑设施的安全，而且造成人畜伤亡。在全世界每年发生的泥石流造成数以亿元计的经济损失和几百甚至上千人的伤亡，而我国世界上泥石流灾情最严重的国家之一。

### 四 二 泥石流的破坏与危害

对居民点的危害 泥石流最常见的危害之一是冲进乡村、城镇。摧毁房屋、工厂、企事业单位及其他场所、设施。淹没人畜，毁坏土地，甚至造成村毁人亡的灾难。例如，1982 年 8 月，云南大盈江流域弄璋区南拱泥石流使新章金、老章金两村被毁，2 人丧生，经济损失近百万元。

泥石流对铁路、公路和航道的危害 具体如下：

(1) 据铁路部门资料，铁路是受泥石流危害最严重的部门之一。目前全国有铁路营业里程为 5.2 万公里，其中有 1.2 万公里在山区，铁路沿线约有泥石流沟 1000 条，威胁着 1.2 万公里长度的铁路线的安全。从 1953—1982 年这几十年来，累计发生泥石流灾难 1000 余起，其中造成铁路被毁、中断行车的重大泥石流灾难有 100 起，列车出轨和颠覆的严重事故 10 起，10 人伤亡的特大事故 1 起，车站被淤埋 10 次（10 个），每年仅用于复旧和改建工程的费用就高达 2000 万元。泥石流冲毁路基，淤埋车场，切断桥梁，堵塞隧道，乃至造成火车颠覆和人员伤亡。

亡。成昆铁路、宝成铁路、陇海铁路、兰青铁路、昆明至东川铁路以及辽东半岛的风上线和新修的大秦铁路，都是泥石流灾害较集中的路段。

(圆) 泥石流对公路的危害更为严重，诸如川藏公路、滇藏公路、川滇公路、甘川公路、川陕公路以及中尼公路和中巴公路等，均穿越泥石流发生的山区，常因泥石流灾害而断道停车。川藏公路是内地通往西藏的交通干道，沿线有泥石流沟近千条，全线长 圆源园公里，几乎 缘缘% 以上路段以泥石流灾害为主，尤以凶猛而巨大的冰川型泥石流为特色。每年 缘- 怨月间，冰川泥石流、暴雨泥石流以及由山崩、滑坡、冰崩、雪崩、冰湖溃决等形成的各类泥石流，倾巢而出，全线侵袭，公路严重受阻（少则几十天，多则几个月），是影响公路畅通和西藏建设的一大灾祸。

(猿) 泥石流对航道开发和江河整治的影响，在我国西南山区也很严重。金沙江中下游段是具有开发前景的地区，金沙江航道若能充分利用，将在很大程度上缓解该区因陆路交通不便而造成的困难。但这段急待开发的千里航道，有 缘园% 多条泥石流沟，泥石流将大量砂石运砾倾泄于金沙江之中，形成大小不等的急流险滩，而且常会填江断流。

猿 泥石流对农田村寨的危害 泥石流或直接吞噬农田村寨，或者因断江河而壅水，淹没沿江两岸的农田村寨和城镇。堵塞溃坝后，又以溃决洪水侵袭农田村寨，进而吞没两岸土地和村寨，或冲蚀沟谷，吞食坡地，导致沟谷扩大，耕地锐减，水土流失。我国甘肃的白龙江两岸泥石流沟密布，两岸大片农田和村舍，一直饱受泥石流的侵袭之灾。云南省西南隅的大盈江流域，也是泥石流的重灾区，沿江两岸大片农田和村寨经常受灾，损失严重。

源 对矿山的危害 主要是摧毁矿山及其设施，淤埋矿山坑道、伤害矿山人员、造成停工停产，甚至使矿山报废。

## 圆 圆 圆 泥石流灾害的实例

圆 圆 圆 国外泥石流灾难事例 具体如下：

(员) 圆 圆 年 苑月 愿日，原苏联小阿尔马京卡河发生泥石流，造成阿拉木图市死亡 缘园多人。

(圆) 圆 圆 年 缘月 猿日，秘鲁瓦斯卡兰雪崩堵河溃决型泥石流，造成荣盖城死亡 愿园人，毁埋荣盖城。

(猿) 圆 圆 年 缘月 怨日，意大利滑坡引起水库溃坝型泥石流，死亡 圆园人。

(源) 圆 圆 年 员月 员日，哥伦比亚一火山喷发引起了鲁伊斯水山冰源（波哥大以西 员公里，海拔 缘园米）灾难性融化，导致巨大的泥石流。东侧泥石流覆盖了 猿园% 地区，吞没了赫尔梅罗城镇，死亡人数达 圆园人，另有 员园人受伤，大量的庄稼被毁坏。西侧泥石流到达钦契拉，据报道有 圆园人失踪，



缘人受伤。这次灾害的经济总损失价值 源亿美元。

我国泥石流灾难事例 具体如下：

(员 缘缘年 苑月 缘日，四川省西昌市东河的暴雨泥石流、“膏腴万顷，人千口”，造成近千人死亡。

(圆 缘缘年 苑月 圆日，西藏桑旺冰碛湖溃决型泥石流，死亡 源人。

(猿 缘缘年 怨月 缘日，四川省南江县滑坡型泥石流，死亡 猿人。

(源 云南小江流域是中国泥石流活动最为频繁的地区之一，灾害损失也最大。云南东川蒋家沟自 缘缘—缘缘年，曾 苑次堵断小江，淹没农田 万多亩，损失粮食 万斤。缘缘年 缘月 圆日凌晨 源时 猿分，因民矿区暴发灾难性泥石流，造成人员死亡 苑人，伤 猿人，冲毁矿山厂房、住房、商店 源万 皂，农民房屋 猿，冲走粮食 万 皂，冲死大小牲畜 猿头 (只)，毁坏农田 亩，毁坏供水管道 圆，折合经济损失 万多万元。缘缘年 远 苑月间，小江两岸多条沟谷同时暴发泥石流，冲毁和淤埋铁路桥 远座，淤埋隧道 源座，毁坏路基 处，共 员有余，堵塞小桥涵洞 圆座，使铁路断运半年之久。缘缘年 愿月 缘日暴发的泥石流长达 远个月之久，小江水位升高 皂，上游万亩良田颗粒无收；中断公路交通 猿个月。由于河床淤高，东川—汤丹公路于 缘缘年被迫进行改线，耗资 缘万元。铁路、公路因泥石流灾难增加维修费达 圆万元。

(缘 缘缘年 苑月 怨日，四川甘洛利子依达沟暴发泥石流，造成了成昆铁路桥毁车翻的严重事故。泥石流历时约 皂，流速 皂，流量为 皂，冲入大渡河的固体物质达数 万 皂，堵断江流数小时。泥石流冲毁了桥墩和大梁，摧毁河对岸 皂公路。当天凌晨 员时 源分，由格里平至成都的 源次客车，不幸在桥位处遭遇泥石流，两辆机车、一节邮政车、一节客车及一批旅客、一起被泥石流推入奔腾咆哮的大渡河中，死亡 圆人，受伤数十人，酿成了我国铁路史上罕见的泥石流灾难事故。这次泥石流还造成了很大的次生灾害。泥石流冲出山口，在几分钟之内就将宽达 皂，最深处达 皂的大渡河拦腰截断，河水断流达 之久。堵河沙石坝体约为 万 皂，最大坝高达 皂，上游迴水 皂，淹没沿河低地及工矿设施，冲毁沿河公路 皂，阻断公路交通半年之久。由于大量沙石倾入大渡河，造成下游河道阻塞，形成险滩，并使下游龚嘴电站蓄水库泥沙淤积，经济损失惨重，为我国泥石流毁坏交通铁路的一次最严重的灾难。

(源 缘缘年 苑月 缘日 园时 猿分，在我国西藏边境次仁玛错冰湖溃决，暴发泥石流，使中国—尼泊尔公路工程和其他设施造成严重破坏。次仁玛错冰川位于西藏樟木口岸境内，冰湖与冰川唇舌相接，冰川崩裂后，约 万 皂的冰体滑入冰湖，引起泥石流暴发。泥石流冲出章藏布沟口，越过沟谷直捣对岸有 户人家的曲乡，使部分民房和水电站被毁。泥石流冲入波曲直泻而下，引起两岸坍塌滑坡，有的滑坡垂直落差达 皂。在友谊桥附近泥石流“龙头”高达 皂，

一座跨度 100m 的钢筋混凝土桥被埋，大桥附近的建筑物被摧毁；江岸附近约 100m 铁路路基被冲毁，变成主河道，约 100m 公路路面被毁，死亡 100 人。

(缘 1955 年，暴雨引起宝成铁路和陇海铁路宝天段暴发泥石流。淤埋宝成线车站 缘座，缘余处道轨被堆积物覆盖，总淤积量达 100 万 m<sup>3</sup> 以上，中断行车达 圆个月之久。宝天段的泥石流泛滥，造成几处断道。这次泥石流造成的经济损失没有确切的资料，仅灾害后的修复改造费就达 100 亿元。

(远 1955 年 苑月下旬和 愿月上旬，甘肃省武都城区连降大暴雨。愿月 猿日，武都城区暴发了北峪河泥石流、东江水沟泥石流、北山诸沟（共 怨条沟）、灰崖子和钟楼滩诸沟（共 10 条沟）泥石流也同时暴发。泥石流淤埋公路、淹埋房屋、冲毁河堤和田地，多处泥石流汇入白龙江，引发了近 缘年一遇的洪水，使 100 万户、100 万人受灾，毁房 100 万间，冲淹农田 100 万亩，死亡 100 人，伤 100 人，直接经济损失 缘00 余万元。

(苑 1955 年安徽省遭受罕见的特大洪涝灾害，位于安徽境内的大别山腹地的岳西县从 缘月 1 日开始一直持续到 苑月 1 日的长时期的连阴雨，加上暴雨频繁，共出现 10 次 缘00mm 以上的降水，出现了大暴雨和特大暴雨，部分地区 远降降水量达 1000mm 以上，致使山洪暴发，伴随着罕见的泥石流。这次泥石流使全县国民经济总损失达 100 亿元。

(愿 解放以来，北京地区泥石流灾难频繁（见表 10-10），如 1954 年北京西山清水河流域的许多支流，普遍爆发泥石流，冲毁耕地 10 万多亩，倒塌房屋 1000 间，死亡 100 人。

表 10-10 解放以来北京地区主要泥石流灾难统计表

时 间	受灾地点	死亡数 人	毁房数 间
1954.7.1	门头沟区	100	1000
1954.7.1	平谷县	100	
1954.7.1	怀柔县	100	1000
1954.7.1	密云县	100	1000
1954.7.1	怀柔县	100	1000
1954.7.1	延庆县	100	1000
1954.7.1	密云县	100	1000
1954.7.1	密云县	100	1000
1954.7.1	房山县	100	1000
1954.7.1	密云县	100	1000

1955 年 远月 远- 1 日，北京市发生特大暴雨。大雨造成延庆、海淀、昌平、门头沟、密云、怀柔发生泥石流 10 处，冲毁农田 100 万亩，房屋 1000 间，公路 100 公里。

源 2 公里, 桥涵 2 处。死亡人数 10 人, 失踪 2 人。

## 4.1 泥石流的分类及形成条件

### 4.1.1 泥石流的分类

泥石流按其物质状态分类可分为两类:

(1) 粘性泥石流, 含大量粘性土的泥石流或泥流。其特征是: ①粘性大——固体物质占 50%~90%, 最高达 90%。泥石流中水不是搬运介质, 而是组成物质。②稠度大——石块呈悬浮状态, 暴发突然, 持续时间短, 破坏力大。

(2) 稀性泥石流, 以水为主要成分, 粘性土含量少, 固体物质占 10%~50%, 有很大分散性。泥石流中水为搬运介质, 石块以滚动或跃移方式前进, 具有强烈的下切作用。其堆积物在堆积区呈扇状散流, 停积后似“石海”。

此外还有多种分类方法。如按泥石流的成因分类有: 冰川型泥石流, 降雨型泥石流; 按泥石流沟的形态分类有: 河谷型泥石流, 山坡型泥石流; 按泥石流流域大小分类有: 大型泥石流, 中型泥石流和小型泥石流; 按泥石流发展阶段分类有: 发展期泥石流, 旺盛期泥石流和衰退期泥石流等。

### 4.1.2 泥石流的形成条件

泥石流的形成客观条件 泥石流的形成必须同时具备以下三个条件: 陡峻的便于集水、堆积物的地形地貌; 丰富的松散物质; 短时间内有大量的水源。

(1) 地形地貌条件。在地形上具备山高沟深、地势陡峻、沟床纵坡降大、流域形状便于水流汇集。在地貌上, 泥石流的地貌一般可分为形成区、流通区和堆积区三部分。上游形成区的地形多为三面环山、一面出口的瓢状或漏斗状, 地形比较开阔、周围山高坡陡、山体破碎、植被生长不良, 这样的地形有利于水和碎屑物质的集中; 中游流通区的地形多为狭窄陡深的峡谷, 谷床纵坡降大, 使泥石流能够迅猛直泻; 下游堆积区的地形为开阔平坦的山前平原或河谷阶地, 使碎屑物有堆积场所。

(2) 松散物质来源条件。泥石流常发生于地质构造复杂、断裂褶皱发育、新构造活动强烈、地震烈度较高的地区。地表岩层破碎, 滑坡、崩塌、错落等不良地质现象发育, 为泥石流的形成提供了丰富的固体物质来源; 另外, 岩层结构疏松软弱、易于风化、节理发育, 或软硬相间成层地区, 因易受破坏, 也能为泥石流提供丰富的碎屑物来源; 一些人类工程经济活动, 如滥伐森林造成水土流失, 开山采矿、采石弃渣等, 往往也为泥石流提供大量的物质来源。

(3) 水源条件。水既是泥石流的重要组成部分, 又是泥石流的重要激发条件和搬运介质(动力来源)。泥石流的水源有暴雨, 冰雪融水和水库(池)溃决水

体等形式。我国泥石流的水源主要是暴雨、长时间的连续降雨等。

### 诱发泥石流的人为因素

(员) 毁林。毁林的原因很多,包括取用木材、薪材、药材,扩展耕地、牧地以及军事活动等。

全球陆地森林覆盖率为 19%, 而我国森林覆盖率不足 15%。

森林土壤对泥石流的促进和抑制作用均有阶段性。当土地森林消失后,地面水土流失与土层结构强度在无林条件下达到新的平衡时,森林土壤消失后,其抑制作用便降为零;反之,当在泥石流源地森林植被和土壤逐渐恢复过程中,林、灌、草根系的稳土、固土作用跟随增加,土层逐渐增厚,而土层强度又随其厚度的递增而递降,直至低于森林土壤流失的下限值,森林的固土、稳土作用亦相应消失。

(圆) 开荒与陡坡耕作。由于我国人口剧增,工矿、道路、城镇、农田水利建设不断占用耕地,人均耕地面积不断减少。由于山区耕作地向山坡不断扩展,先缓坡后陡坡。而这些耕地,既无地埂,又年年翻耕,表土松动,因此一遇暴雨,沙石俱下,汇集而成泥石流。

(猿) 过度放牧。我国草原加上农区草山草被的面积约占全国总面积的 1/3, 约为耕地面积的 1/5 倍。其中山区草坡一般分布山坡等地的林间、林下地段,有些位居山地陡坡土层较薄地带,这些地方一旦过度放牧,尤其是泥石流源地,便可迅速出现草场退化,草场退化可发展为裸露地或裸岩地,在一定条件下,山坡裸露地往往变成泥石流源地。

(源) 水库溃决、渠水渗漏。随着山区资源开发,越来越多地修建山区水库和渠系。在储存和流动中,这些水体均有不同程度的渗漏。当渗漏超过泥石流始发临界值时,便可暴发人为泥石流,例如,1981年,四川未易水陡沟内水库溃决,形成溃决型泥石流,淤埋成昆铁路湾丘火车站,迫使铁道断道阻车 3 昼夜。

(缘) 不合理开挖。主要指修建铁路、公里、水渠以及其他工程建筑的不合理开挖。有些泥石流就是在进行不合理开挖时破坏了山坡表层而形成的。如云南省东川至昆明公路的老干沟,因修公路及水渠,使山体破坏,加之 1982 年犀牛山地震又形成滑坡、崩塌,致使泥石流更加严重。又如香港多年来修建了许多大型工程和地面建筑,几乎每个工程都要壁山填海或填沟方可获得合适的建筑场地。1984 年一次暴雨,使正在施工的挖掘工程现场有 1 人死于滑坡造成的泥石流。

(远) 不合理的弃土、弃渣、采石。不合理的弃土、弃渣及采石等形成的泥石流事例很多。如四川冕宁县泸沽铁矿汉罗沟,因不合理堆放弃土矿渣,在 1980 年一场大雨时暴发了矿山泥石流,冲出松散固体物质约 10 万 m<sup>3</sup>,淤埋成昆铁路雅西和喜(德)—西(昌)公路 10 公里,中断行车,给交通运输带来严重损失。又如甘川公路两水附近,1983 年冬在沿公路的沟内开采石料,1984 年 7 月 15 日

发生泥石流，致使 1 号桥涵淤塞。

## 四、泥石流的防治

泥石流与滑坡、崩塌的关系 滑坡、崩塌、泥石流三者除了相互区别外，常常还具有相互联系、相互转化和不可分割的密切关系。

(一) 滑坡与崩塌的关系。

滑坡和崩塌如同孪生姐妹，甚至有着无法分割的关系。它们常常相伴而生，产生于相同的地质构造环境中和相同的地层岩性构造条件下，且有着相同的触发因素，容易产生滑坡的地带也是崩塌的易发区。如宝成铁路宝鸡—绵阳段，即同时是滑坡和崩塌多发区。

崩塌可转化为滑坡。一个地方长期不断地发生崩塌，其积累的大量崩塌堆积体在一定条件下可生成滑坡；有时崩塌在运动过程中直接转化为滑坡运动，且这种转化是比较常见的。有时岩土体的重力运动形式介于崩塌式运动和滑坡式运动之间，以至人们无法区别此运动是崩塌还是滑坡，因此地质科学工作者称此为滑坡式崩塌，或崩塌型滑坡。

崩塌、滑坡在一定条件下可互相诱发、互相转化。崩塌体击落在老滑坡体或松散不稳定堆积体上部，在崩塌的重力冲击下，有时可使老滑坡复活或产生新滑坡。滑坡在向下滑动过程中若地形突然变陡，滑体就会由滑动转为坠落，即滑坡转化为崩塌。有时，由于滑坡后缘产生了许多裂缝，因而滑坡发生后其高陡的后壁会不断地发生崩塌。另外，滑坡和崩塌也有着相同的次生灾害和相似的发生前兆。

(二) 滑坡、崩塌与泥石流的关系。

滑坡、崩塌与泥石流的关系也十分密切，易发生滑坡、崩塌的区域也易发生泥石流，只不过泥石流的暴发多了一项必不可少的水源条件。

崩塌和滑坡的物质经常是泥石流的重要固体物质来源。滑坡、崩塌还常常在运动过程中直接转化为泥石流，或者滑坡、崩塌发生一段时间后，其堆积物在一定的水源条件下生成泥石流。即泥石流是滑坡和崩塌的次生灾害。

泥石流与滑坡、崩塌有着许多相同的促发因素。

泥石流的防治措施 泥石流的防治，应贯彻综合治理的原则，要突出重点，因害设防，因地制宜，讲求实效，要充分考虑到被防护地区与具体工程的要求。具体防治措施有生物措施和工程措施两大项。

(一) 防治泥石流的生物措施。生物措施包括恢复或培育植被，合理耕牧，维持较优化的生态平衡这些措施可使流域坡面得到保护、免遭冲刷，以控制泥石流发生。

植被包括草被和森林两种，它们是生物措施中不可分割的两个方面。植被可

调节径流，延滞洪水，削弱山洪的动力：可保护山坡，抑制剥蚀、侵蚀和风蚀，减缓岩石的风化速度，控制固体物质的供给。因此在流域内（特别是中、上游地段）要加强封山育林，严禁毁林开荒。

为使此项措施切实有效地发挥作用，还需注意造林方法和选择树种。幼苗成活后要严格管理；严防森林火灾，消灭病虫害。此外，要合理耕收，甚至退耕还林。在崩滑地段要绝对禁止耕作。

（圆）防治泥石流的工程措施。

夙 蓄水、引水工程。这类工程包括调洪水库、截水沟和引水渠等。工程建于形成区内，其作用是拦截部分或大部分洪水，削减洪峰，以控制暴发泥石流的水动力条件。同时，还可灌溉农田、发电或供生活用水等。大型引水渠应修建稳固而短小的截流坝作为渠首，避免经过崩滑带而应在它的后缘外侧通过，并严防渗漏、溃决。

圆 支挡工程。支挡工程有挡土墙、护坡等。在形成区内崩塌、滑坡严重地段，可在坡脚处修建挡墙和护坡，以稳定斜坡。此外，当流域内某地段山体不稳定，树木难以“定居”时，应先辅以支挡建筑物以稳定山体，生物措施才能奏效。

獠 拦挡工程。这类工程多布置在流通区内，修建拦挡泥石流的坝体，也称谷坊坝。它的作用主要是拦泥石流和护床固坡。目前国内外挡坝的种类繁多。从结构来看，可分为实体坝和格栅坝；从材料来看，可分为土质、圬工、混凝土和预制金属构件等；从坝高和保护对象的作用来看，可分为低矮的挡坝群和单独高坝。挡坝群是国内外广泛采用的防治工程。沿沟建筑一系列高缘- 夙 的低坝或石墙，坝（墙）身上应留有水孔以渲泄水流，坝顶留有溢流口可渲泄洪水。我国这种坝一般采用圬工砌筑。国外拦挡小型稀性泥石流，推广采用格栅坝。

源 排导工程。这类工程包括排导沟、渡槽、急流槽、导流堤等，多数建在流通区和堆积区。最常见的排导工程是设有导流堤的排导沟（泄洪道），它们的作用是调整流向，防止漫流，以保护附近的居民点、工矿点和交通线路。

缘 储淤工程。这类工程包括拦淤库和储淤场，前者设置于流通区内，就是修筑拦挡坝，形成泥石流库。后者一般设置于堆积区的后缘，工程通常由导流堤、拦淤堤和溢流堰组成。储淤工程的主要作用是在一定期限内，一定程度上将泥石流固体物质在指定地段停淤，从而削减下泄的固体物质总量及洪峰流量。

我国铁道部门在泥石流地段的线路、站场，采取了很多行之有效的防治措施，如跨越泥石流的桥梁、涵洞，穿过泥石流的护路明硐、护路廊道、道隧、渡槽等。

# 第 四 章 地面沉降及其防治

## 第一节 地面沉降及其类型

地面沉降 又称地面下沉、地面塌陷或地陷，它主要是受开采石油、煤、地下水等资源以及工程施工、灌溉等人工经济活动的影响，或造成人工地下空洞，或使地下松散土压缩固结，导致地面标高下降的现象。

地面沉降的类型 我国出现的地面沉降的城市较多。按发生地面沉降的地质环境可分为三种模式：

(一) 现代冲积平原模式，如我国的几大平原地区。

(二) 三角洲平原模式，尤其是在现代冲积三角洲平原地区。如长江三角洲就属于这种类型。常州、无锡、苏州、嘉兴、肖山的地面沉降均发生在这种地质环境中。

(三) 断陷盆地模式，它又可分为近海式和内陆式两类。近海式指滨海平原，如宁波；而内陆式则为湖冲积平原，如西安市、大同市的地面沉降可作为代表。

不同地质环境模式的地面沉降具有不同的规律和特点，在研究方法和预测模型方面也应有所不同。

## 第二节 地面沉降造成的危害

地面下沉使区域性地面标高降低，因而会导致一些次生灾害，如地裂缝和地面塌陷（指地表岩、土体在自然或人为因素作用下向下陷落，并在地面形成洞坑的地质现象）等。例如，西安市因地裂缝破坏建筑物及道路工程，损坏管井，年经济损失数亿元。天津市因地面下沉导致海水上岸，防潮堤相应加高；滨海平原潜水位抬高，加重土壤次生盐渍化、沼泽化；海河泄洪能力降低，如遇较大洪水，市区有淹没之险；河道纵坡降变形，航运受阻，部分地段水管破损，污水溢出等。本溪市已采空的 采空区 的地面建筑物遭到破坏，采空区地表平均下沉达 1.5m，最深的达 3.5m；在受灾面积达 1.5km<sup>2</sup> 的市中心区，许多户灾民无法正常生活。湖北的荆江大堤因地面下沉，其实际标高已远低于原先的设计标高，使防洪能力相应降低。上海市由于过度开采地下水及高楼密度过大，自 20 世纪 70 年代起，平均每年下沉 1.5cm。

以下是我国部分城市地面沉降情况的记录。

上海市 从 1957 年发现地面下沉开始，到 1985 年止，最大的累计沉降量

已达 10mm，影响范围达 100m<sup>2</sup>。有关部门采取了综合治理措施后，市区地面沉降已基本得到控制。从 1979~1985 年的 6 年间，累计沉降量 100mm，年平均沉降量为 16.7mm。80 年代开始，又以每年下沉 1mm 的速度下沉，下沉的原因主要是高楼密度过大。

天津市 从 1953~1980 年间最大累计沉降量为 100mm。1980 年测得市区的平均沉降速率为 10mm。目前，最大累计沉降量已达 100mm，沉降量 100mm 以上的范围已达 100m<sup>2</sup>。

北京市 自从 19 世纪 50 年代以来，北京的地下水位平均每年下降 1m，最严重的地区水位下降可达 1m。地下水位的持续下降导致了地面沉降。有的地区（如东北部）沉降量 100mm。沉降总面积超过 100m<sup>2</sup>。而北京城区面积仅 100m<sup>2</sup>，说明沉降范围已波及到郊区。

西安市 地面沉降发现于 1953 年。1953 年后随着过量开采地下水而逐渐加剧。1953~1980 年，最大累计沉降量 100mm，年平均沉降量 16.7mm。沉降中心有 10 处。1980 年后，西安市地面沉降趋于稳定发展，部分地区还有减缓的趋势。到 1985 年最大累计沉降量已达 100mm，沉降量 100mm 的范围达 100m<sup>2</sup>。

太原市 经 1953 年、1955 年、1957 年三次在市区 100m<sup>2</sup> 范围的测量，发现沉降量大于 100mm 的面积有 100m<sup>2</sup>，大于 100mm 的沉降区面积达 100m<sup>2</sup>。最严重的是吴家堡，其次是小店。吴家堡水准点的累计沉降量：1953 年——100mm，1955 年——100mm，1957 年累计沉降量达 100mm。

武汉市 常见的是岩溶地面塌陷，主要分布在长江两岸的白沙洲和鹦鹉洲。1953 年 10 月，中南轧钢厂形成 10m 塌陷坑，约 100m<sup>2</sup> 煤和 100m<sup>2</sup> 钢坯陷入坑内，切断专用铁路线、工厂、停产月余。形成塌陷主要是附近桥梁机械厂的抽水井长期抽取岩溶地下水所致。据专家分析，这个“两洲”地区还有再次发生地陷的可能，应作为岩溶地下水禁采区。

此外，还有宁波市、常州市、苏州市、无锡市、嘉兴市、杭州市、沧州市、邯郸市、安阳市、阜阳市、保定市等。均发生了不同程度的地面沉降，见表 10-1。

表 10-1 我国部分城市地面沉降情况统计

沉降城市	最大累积沉降量/mm	沉降范围/m <sup>2</sup>	致沉原因	地面沉降及灾害简况
河北沧州市	100mm	100m <sup>2</sup>	主要为抽水，其次为构造下沉	1953 年后发生比较强烈的沉降活动，后迅速发展，造成井管上升、个别房屋开裂、汛期积水



(续)

沉降城市	最大累积沉降量/mm	沉降范围/mm <sup>2</sup>	致沉原因	地面沉降及灾害简况
河北邯郸市	1400		抽水	1950年开始, 1960年加剧; 1980年后采取措施, 沉降减缓。个别房屋开裂
河北保定市	1500		抽水	1950年开始, 主要发生在一亩泉水源地, 建筑设施受到危害
河北衡水市	1500	10000	抽水	1950年出现并急剧发展
山东济宁市	1500	500	主要为抽水	1950年后逐渐发展
山东德州市	1500		抽水	1950年后逐渐发展
河南安阳市	1600	1600	抽水	1950年后安阳东部楚旺一带发生地面沉降
山西太原市	1500	10000	主要为抽水	一些房屋受到破坏, 汛期积水
陕西西安市	1500	10000	主要为抽水, 其次为构造下沉	1950年出现较明显的地面沉降活动, 1960年后迅速发展, 一些房屋开裂, 名胜古迹下沉倾斜, 排水管道破坏
安徽阜阳市	1500	10000	主要为抽水	始于 1950年初, 1960年开始加剧, 至今继续发展, 造成井管上升、倾斜, 房屋开裂, 泉河堤坝下沉, 部分节制闸破坏, 洪水威胁加固, 高程标志失效
江苏苏州市	1500	500	主要为抽水	造成: 井管上升、倾斜; 地面开裂; 测量标志失效, 洪峰警戒水位不准; 桥梁净空减小, 影响河运; 排水不畅, 积洪滞涝, 洪水威胁严重; 地下水环境恶化
江苏无锡市	1500	1000	主要为抽水	
江苏常州市	1500	1000	主要为抽水	
浙江杭州市	1500		主要为抽水	造成井管上升, 局部排水不畅
浙江宁波市	1600	1500	抽水	井管倾斜和上升, 排水不畅; 潮水上岸, 淹没码头、仓库等
广东湛江市	1500	1500	抽水	井管上升, 局部积洪滞涝
台湾台北市	1000	1000	抽水	始于 1950年, 1960年后迅速发展, 除建筑设施安全受威胁以外, 还造成海水侵袭、风暴潮灾害加剧

## 环境 地面沉降的控制和治理

当前对地面沉降的控制和治理措施可分为两类。

**环境表面治理措施** 对已产生地面沉降的地区，要根据灾害规模和严重程度采取地面整治及改善环境。其方法主要有：

(1) 在沿海低平面地带修筑或加高挡潮堤、防洪堤，防止海水倒灌、淹没低洼地区。

(2) 改造低洼地形，人工填土加高地面。

(3) 改建城市给、排水系统和输油、气管线，整修因沉降而被破坏的交通路线等线性工程，使之适应地面沉降后的情况。对地面可能沉陷地区预估对管线的危害，制定预防措施。

(4) 修改城市建设规划，调整城市功能分区及总体布局。规划中的重要建筑物要避开沉降地区。

**环境根本治理措施** 从研究消除引起地面沉降的根本因素入手，谋求缓和直到控制或终止地面沉降的措施。主要方法有：

(1) 人工补给地下水（人工回灌）。选择适宜的地点和部位向被开采的含水层、含油层采取人工注水或压水，使含水（油、气）层中孔隙液压恢复或保持在初始平衡状态。把地表水的蓄积储存与地下水回灌结合起来，建立地面及地下联合调节水库，是合理利用水资源的一个有效途径。一方面利用地面蓄水体有效补给地下含水层，扩大人工补给来源；另一方面利用地层孔隙空间储存地表余水，形成地下水库以增加地下水储存资源。

(2) 限制地下水开采，调整开采层次，以地面水源代替地下水源。其具体措施如下：

(1) 以地面水源的工业自来水厂代替地下供水源。

(2) 停止开采引起沉降量较大的含水层而改为利用深部可压缩性较小的含水或基岩裂隙水。

(3) 根据预测方案限制地下水的开采量或停止开采地下水。

(4) 限制或停止开采固体矿物。对于地面塌陷区，应将塌陷洞穴用反滤层填上，并加松散覆盖层，关闭一些开采量大的厂矿，使地下水状态得到恢复。

**环境地面塌陷治理实例**

(1) 工程事故概要。

江苏省西北部徐州市，位于微山湖以南。徐州市区东部新生街，为居民住宅密集地区，该地区在 1954 年 9 月发生一次塌陷。塌陷区离黄河故道约 1 公里，地貌上处在黄河转折西侧的高漫滩上。

这次地面塌陷发生的时间，由 1954 年 9 月 10 日晚 8 时开始，一直持续到次

日上午 10 时终止。一共发生大小塌陷 30 处。最大的一处为 10 号塌陷, 塌陷长度 10m, 宽度 10m, 深度 10m。最小的一处塌陷, 直径为 1m。所有地面塌陷深度, 普遍为 10cm 上下。整个塌陷区范围, 长达 100m, 宽达 100m。

徐州市区地面塌陷造成的灾情严重。位于塌陷内的房屋, 无一例外地全部陷落倒塌, 共计 10 间。邻近塌陷周围的房屋, 因地基向塌陷处滑动, 造成地基不均匀沉降, 使数百间房屋的墙体发生开裂, 相当一部分成为危房。塌陷区当地居民住宅, 大部分为平房和两层楼房, 破坏严重。幸在地面塌陷开始后, 政府到现场动员居民, 男女老少全部撤出, 无一伤亡。

时隔 10 个月, 1985 年 10 月上旬, 徐州市区发生第二次塌陷。第二次塌陷位于徐州市东北部, 大小塌陷 10 余处。

#### (四) 事故原因分析。

徐州市区地面塌陷的原因, 查明原因如下:

1. 徐州市地面塌陷区, 地基土的强度低, 为故黄河泛滥沉积的粉土与粉砂, 厚达 10m。在调查塌陷周围环境时, 见到黄河故道在徐州市区北部呈东西方向, 至徐州市东部转向东南和南北方向, 贯穿整个徐州市区。在利济桥, 黄河故道宽度超过 100m, 水深达 10m, 水很清。两次地面塌陷都紧靠黄河故道, 第一次塌陷位于黄河故道西侧, 第二次塌陷位于黄河故道东侧。

2. 地表下 10m 处, 即为古生代奥陶系灰岩。粉土与粉砂直接覆盖在灰岩上, 中间缺失老粘土隔水层。

3. 灰岩中存在大量的溶洞(喀斯特)与裂隙。

4. 徐州市开采地下水过量, 使地下水位变幅较大。地下水位上下波动, 对覆盖层粉土与粉砂形成潜蚀与空洞。空洞随时间不断扩大, 导致大型空洞上方的土体, 因失去支承而塌陷。

5. 徐州市两次地面塌陷都是当地下大雨后发生的。因大量雨水下渗产生渗透力, 同时降低土的强度, 导致两次事故发生。

#### (五) 事故处理方法。

1. 应急处理。拆除残存毁坏房屋, 用粘性土填平塌坑, 以防止雨水顺塌坑下渗, 避免扩大塌陷范围。

2. 长远处理方法。采用浅层人工地震新技术查明了徐州市区下部石灰岩岩溶分布与发育情况。对今后可能发生塌陷的潜伏危险区, 进行分析和评价, 进而预测并采取有效措施, 防止发生新的塌陷。例如, 在严重塌陷危险处禁止搭建重要建筑物; 建筑基础应经处理使之不受或少受塌陷的影响等。

## 第 8 章 岩土工程灾害

### 8.1 岩土工程事故分类

人类进行的任何土木建筑活动，必定有地基基础，即总会与岩土工程有关。一般的岩土工程不会引起灾害，但重大的岩土工程可能形成灾害，因岩土工程处理不当而引起灾害事故有不同的类型。

**8.1.1 地基变形造成的工程事故** 地基在建筑的载荷作用下产生沉降，包括瞬时沉降、固结沉降和蠕变沉降三部分。如果总沉降量和沉降差超过允许值时会造成事故，严重的突发性的事故会形成灾害。主要表现有：

(1) 严重沉降。由于建筑物的荷载，使地基产生附加应力，引起地基的沉降。严重沉降不仅使散水倒坡、雨水积聚，而且往往使上下水道、照明与通信电缆以及煤气管内外网连接断裂，造成事故。

(2) 倾斜。由于不均匀沉降，使建筑物整体倾斜，严重的造成建筑物倒塌。

**8.1.2 地基失稳造成的工程事故** 凡建筑物荷载超过地基极限荷载，则该地基将发生强度破坏，整幢建筑物将沿着地基中某一薄弱面发生滑动而倾倒，这是灾难性的事故。

**8.1.3 建筑物地基溶蚀与渗透破坏** 这类事故由于地下水的运动而引起。若当地为石灰岩溶洞发育地区或矿产开采采空区，在地下水渗流作用下，溶洞或采空区顶部土体不断塌落或管涌，最终导致地面塌陷。若大量抽取地下水，虽非溶洞发育区，也会引起管涌使地面下陷。

**8.1.4 边坡强度破坏** 人工边坡如开挖基槽，不注意护坡或护坡不周，将发生基槽变位或滑动。天然边坡如山坡、河岸可能因切削坡脚或建造工程引起山坡滑动、河岸移滑，导致工程破坏，甚至房屋埋没、倒毁。

**8.1.5 地基震害** 凡地基为饱和状态疏松粉、细砂或粉土，在强烈地震作用下，地基发生液化，丧失承载力，导致建筑物倾倒、裂缝破坏。若地基为软弱粘性土，则在强烈地震作用下，地基将发生严重的震沉。

**8.1.6 冻胀及其他事故** 寒冷地区地基可能发生冻胀，导致墙体裂缝。废基础、机器振动等等都可能造成事故。

关于边坡破坏已在 8.2 节介绍过，关于地震引起地基破坏也已在地震灾害篇中专门论述，这里不再重复。本章主要是用实际例子来说明岩土工程事故及灾害的分析。

## 4.1 岩土工程中因地基沉降造成的事故实例

### 4.1.1 例 1 某市 15 层大楼因严重倾斜而被爆破拆除

**工程事故概况** 某市 15 栋大楼是一栋在建的 15 层钢筋混凝土剪力墙结构住宅楼（以下简称 15 栋楼），建筑面积 15 万  $\text{m}^2$ ，总高度 45 m。1998 年 1 月开始桩基施工，1 月初基坑挖土，11 月中旬主体工程封顶。12 月底完成室外装修和室内部分装饰及地面工程，图 4-1-1 为结构封顶时的照片。1999 年 1 月 1 日发现该工程向东北方向倾斜，顶端水平位移 15 mm，为了控制因不均匀沉降导致的倾斜，采取了在倾斜一侧减载与在对应一侧加载，以及注浆、高压粉喷、增加锚杆静压桩等抢救措施，曾一度使倾斜得到控制。但从 1999 年 1 月 1 日起，15 栋楼又突然转向西北方向倾斜，虽多次召集专家会商，并采取纠偏措施，但无济于事，倾斜速度加快，1999 年 1 月 1 日顶端水平位移 15 mm，整座楼重心偏移了 15 mm，如图 4-1-2 所示。为确保工程质量、确保 15 栋楼相邻建筑及住户的生命财产安全，建设单位主动要求并报市政府同意，采取上层结构 15 层定向爆破拆除的措施，从根本上消除了 15 栋楼的质量隐患，图 4-1-3 是控爆后的照片。由此造成直接经济损失 15 万元，社会影响极坏，已近于灾害性事故。

**事故原因分析** 具体如下：

(1) 桩型选用不当。该楼的地基是经过正规工程勘察的。在勘察报告中提出，最上面的一层是人工回填杂土（厚 15~20 m），往下依次是高压缩性淤泥（15~20 m），淤泥质粘土（厚 15~20 m），稍中密细砂（厚 15~20 m），中密粉细砂（厚 15~20 m），砂卵石（厚 15~20 m）、基岩。为此，如采用桩基，其桩体必须要穿过较厚的淤泥层。勘察报告按土质情况提出以下建议：对拟建建筑物多层（15 层）部分，建议采用复合沉管灌注桩或夯扩桩，可选择层面埋深 15~20 m 的稍密中密粉细砂作为桩尖持力层，该层面在局部地段有较大起伏，设计与施工应予以注意。对高层（15 层）部分，因建筑物荷载较大，若上述桩型不能满足设计要求时，建议选用大口径钻孔灌注桩，桩尖持力层可选用层面埋深 15~20 m 强度较好的砂卵石层作为桩尖的持力层。

实践说明，此工程的地质勘察报告对勘察情况和有关数据是经过认真分析的，报告提出的有关建议是恰当、合理的。

在选择桩型时，根据勘察资料提供的地质条件，该地流塑淤泥厚达 15~20 m，含水率最高 70%。设计单位原决定采用钻孔灌注桩基础。但是建设单位为了节约投资，竭力推荐夯扩桩，设计单位迁就了建筑单位的要求，决定选用夯扩桩。事故专家分析指出设计选择夯扩桩基础有以下缺陷：①夯扩桩是一种挤土型桩，在超厚饱和水淤泥地层中施工，像其他打入或预制桩和沉管灌注桩一样，打

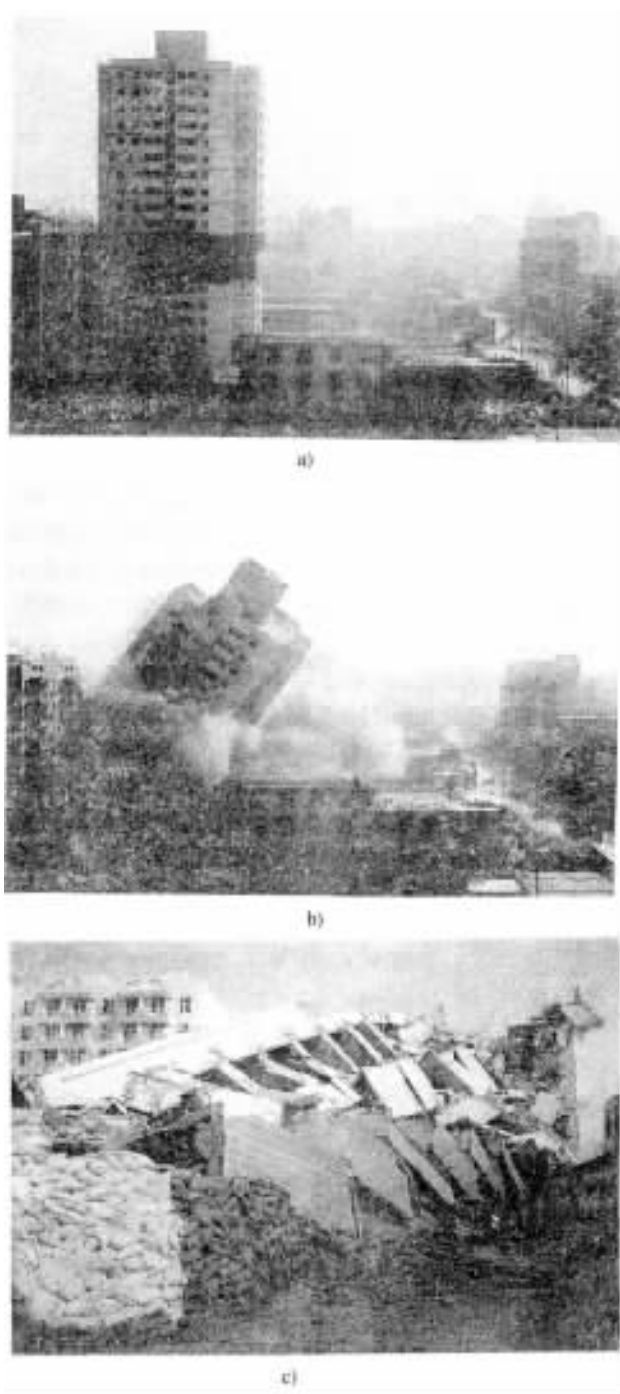


图 10-2-1 某市 15 层楼爆破拆除图  
a) 爆前的情况 b) 控制爆中的情况 c) 控制爆后的现场情况

入如此巨量、密集的群桩，必然会产生后打入桩对先打入的已达初凝的邻桩的挤压，使之产生偏位。②夯扩桩的桩端进入持力层（源-员）层粉细砂内的深度较浅，不利于抗水平推力，加上桩周淤泥水平抗力很小，不利于桩基稳定等。设计方虽然同意采用夯扩桩基础，但同时设计猿根砂桩，以改良地基条件，并在施工图说明上明确交代。但建设单位为节约投资，以砂桩打不下去为由，自主取消了砂桩。在基础施工完毕后，设计方认为既成事实，再打砂桩已不可能，签字同意取消了砂桩。

综上所述，桩型设计存在先天不足，施工中又取消了砂桩，未考虑淤泥场地条件下对施工的不利影响，形成了严重隐患。

（圆）基坑支护方案不能满足开挖要求。该工程地质勘察报告中强调指出：“基坑开挖时应采取坑壁支护及封底补强措施。”并列出了坑壁支护设计所需要的有关参数表。建设单位曾委托某单位设计过基坑开挖缘的支护方案，该设计为怨排粉喷桩重力式挡土墙，设计单位经过稳定和变形计算，认为不能满足要求，故未出任何正式施工图。但是，建设单位为了节省投资，自行决定在基坑南侧和东南段打缘排粉喷桩，在基坑西端打圆排粉喷桩，其余坑边采用放坡处理，基坑未形成完全封闭，这样基坑开挖后，边坡产生滑移，出现险情，专家分析认为支护方案存在严重缺陷。造成工程桩大量歪斜，这是桩基整体失稳的重要原因。

（猿）基坑开挖未按方案实施，造成工程桩大量倾斜。在基土十分软弱，又无封闭支护措施的情况下，施工单位编制基坑开挖方案规定：先在基坑内满揭表层土猿，再在深坑区跳格开挖接桩。但是，施工时，为赶进度违背开挖方案规定，仅在深坑区揭表层土猿，接着采用缘宽条状连续顺序开挖，一次到位，在条间形成缘高的临空面，致使大量工程桩倾斜，而且工程桩还受到重型机械的碾压和铲斗的碰撞，造成两根断桩。建设单位曾向施工单位提出停止使用机械，改用人工取土，但事实上施工单位仍然使用机械挖土，给桩基的稳定和质量带来严重冲击。且施工单位违背施工规范，在部分工程桩和粉喷桩龄期未到的情况下就进行基坑开挖。据查，基坑内工程桩共猿根，其中歪桩员根，占缘，歪桩最大偏位达员。与此同时，对工程桩的动测试验检测抽查的猿根工程桩，其中有员根有严重缺陷，占被检测数的员。专家分析，原来的基坑开挖方案在当时当地的具体条件下还是比较合理的，但是并未得到实施，实际开挖施工的不当是导致基桩大量定向偏斜的主要原因。

（源）将地下室底板抬高缘，建筑物埋深达不到国家规范的规定，削弱了建筑物的整体稳定性。该工程原设计桩顶标高为原缘。当猿根夯扩桩已施工完员根时，设计人员竟然同意建设单位将地下室底板标高提高缘，从而带来以下问题：

员）地下室底板标高往上提高缘，就使工程埋置深度由原缘变为原缘

按《钢筋混凝土高层建筑设计规程》(1989)规定、最小埋置深度不应小于建筑物高度的 1/18,埋置深度改为 1/12,仅仅是建筑物高度的 1/12,很显然不合规范,削弱了建筑物的整体稳定性。

由于地下室底板标高往上提高 1.0m,使已完成的 1/12 根桩均要接长 1.0m,灌注桩的接桩处是桩体的最薄弱处,通常个别桩体接桩是有的,但如此大量的桩要接桩具有较大的危险性、特别是已完成的 1/12 根桩体中已发现有不少桩是倾斜的,如垂直地面水平接桩,就使接桩后的桩体形成折线形。如此桩体,不仅严重降低单桩承载力,而且在水平推力作用下,往往使接桩的部位首先发生破坏。

因此设计人员同意将地下室底板标高往上提高 1.0m,应该说是一个严重的错误之举。

(缘)歪桩上接桩,竖向荷载形成分量,降低了单桩承载力。在 1/12 根桩施工完成后,施工单位即对所完成的桩进行动测检验,从检验结果分析,有不少桩是存有质量问题的。

在 1/12 根桩中,有 1/12 根桩是歪桩,其垂直度超出了规范规定的允许偏差值,而其中最大偏位竟达 1/12,这种歪桩导致作用力方向的改变,使桩的承载力明显降低,又由于地下室底板抬高 1.0m,使先期打入的 1/12 根低桩在同一层面上必须接桩,在歪桩上接桩,桩身形成折线,引起桩身的侧向荷载分量。导致单桩承载力下降。

施工单位在发现所施工的夯扩桩中存有严重质量问题时,即向设计单位提出对该工程的桩基进行加固补强,并提出增加 1/12 根锚杆静压桩的建议。建设单位在收到加固补强方案后,怕耽误工期、即邀请有关工程技术人员进行咨询,希望能提出一个少延误或不延误工期的加固补强方案。咨询结果提出了以下方案:

沿底板四周预留 1/12 个 1/12 洞口,以备一旦出现不均匀沉降时采取加固补强的措施。

在 1/12 标高以上施工中,采用信息法施工,每层都做沉降观测。

减轻上部主体荷载。

上述方案提出后,建设单位请设计人员认可,设计人员竟也认可了咨询方案,而忽略了施工单位提的加固补强方案。尽管实施了咨询方案的一些措施,但并不能根本解决桩体倾斜而使单桩承载力降低的问题,从而失去了早期治理和补救的时机。

(远)基坑回填土未按规范结构设计总说明回填夯实。专家分析认为,回填土是采用杂填土随意堆积,更没有分层夯实,降低了基础的侧向限制,不利于建筑物的稳定。

由于设计、施工的种种失误,终于造成了重大事故。

这次事故的原因是桩基整体失稳,失稳的原因是大量工程桩偏斜,而偏斜的



原因是多种因素综合影响所造成的。设计、建设、施工的有关工程技术人员在技术管理上严重失职,甚至个别环节上弄虚作假,掩盖了重大质量隐患。由于建设单位急于求成,质量监督执法不严,多种缺陷汇集叠加一起,造成混合错误,致使该工程桩基整体失稳。这是一起多种原因造成的重大质量事故,也是一起技术责任事故。

### 4.4.1 例 4.4.1 墨西哥市艺术宫地基沉降事故

**工程事故概要** 墨西哥市艺术宫是一座具有纪念性的早期建筑,此艺术宫于 1913 年落成,至今已有 90 年历史。艺术宫动工修建时,附近的公路路面与艺术宫室外地面齐平。当艺术宫建成后,经几十年时间,地基下沉量高达 1.5m,而临近的公路也下沉 0.5m。公路路面至艺术宫门前,高差达 1.5m。参观者需步下九步台阶,由公路进入艺术宫。这是地基沉降最大的典型实例。由于艺术宫严重下沉,不仅使散水倒坡,雨水积聚,室内外高差悬殊;而且水、电外网连接断裂,造成使用不良和修理的工程量增加。

**事故原因分析** 墨西哥市地处四面环山的盆地中,古代原是一个大湖泊。由于周围火山喷发的火山灰沉积和湖水蒸发,天长日久,湖水干涸形成目前的大盆地。墨西哥市典型的地质情况,自上而下土层分为 5 层:

(1) 表层为人工填土及砂夹卵石层。孔隙比 1.0~1.2,天然含水量 30%~40%,无侧限抗压强度 0.1~0.2MPa,标准贯入试验锤击数 10~15 击,厚度为 1.5m。

(2) 第二层为超高压缩性淤泥。孔隙比竟高达 2.5,世界上极罕见。天然含水量 40%~50%,标准贯入试验锤击数 5~10 击,厚度达 1.5m。

(3) 第三层为砂夹卵石,厚度约 1.5m。

(4) 第四层为粘土,厚约 1.5m。

(5) 第五层为砂卵石,坚硬状态,厚度达 1.5m。

墨西哥市艺术宫严重沉降的原因,是由于建筑地基持力层,为第二层超高压缩性淤泥的压缩引起的。由于采用浅基础,严重沉降就不可避免。

**事故处理方法** 艺术宫严重下沉是由于地基超高压缩性淤泥的压缩变形造成的。因此,可以采取桩基托换法,将桩尖置于第三层砂夹卵石层顶部,来承受艺术宫建筑物荷载。

### 4.4.2 例 4.4.2 上海奉贤县贝港桥坍塌事故

**工程及事故概况** 奉贤县贝港桥,位于奉贤县南桥镇新建西路的贝港河上,该桥东西方向共 3 个孔,每个边孔跨径各为 15m,采用非预应力预制梁,中孔跨径为 20m,采用预应力预制梁,全长 50m,桥宽 12m,设计荷载为汽—10。

图 挂一质点 人群 缘 河中的两个桥墩的桩基分别为 远 桩尖标高设计为 原 桩长 边跨在两岸上的二个桥台的桩基分别为 远 桩尖标高设计为 原 桩长 (如图 所示)。

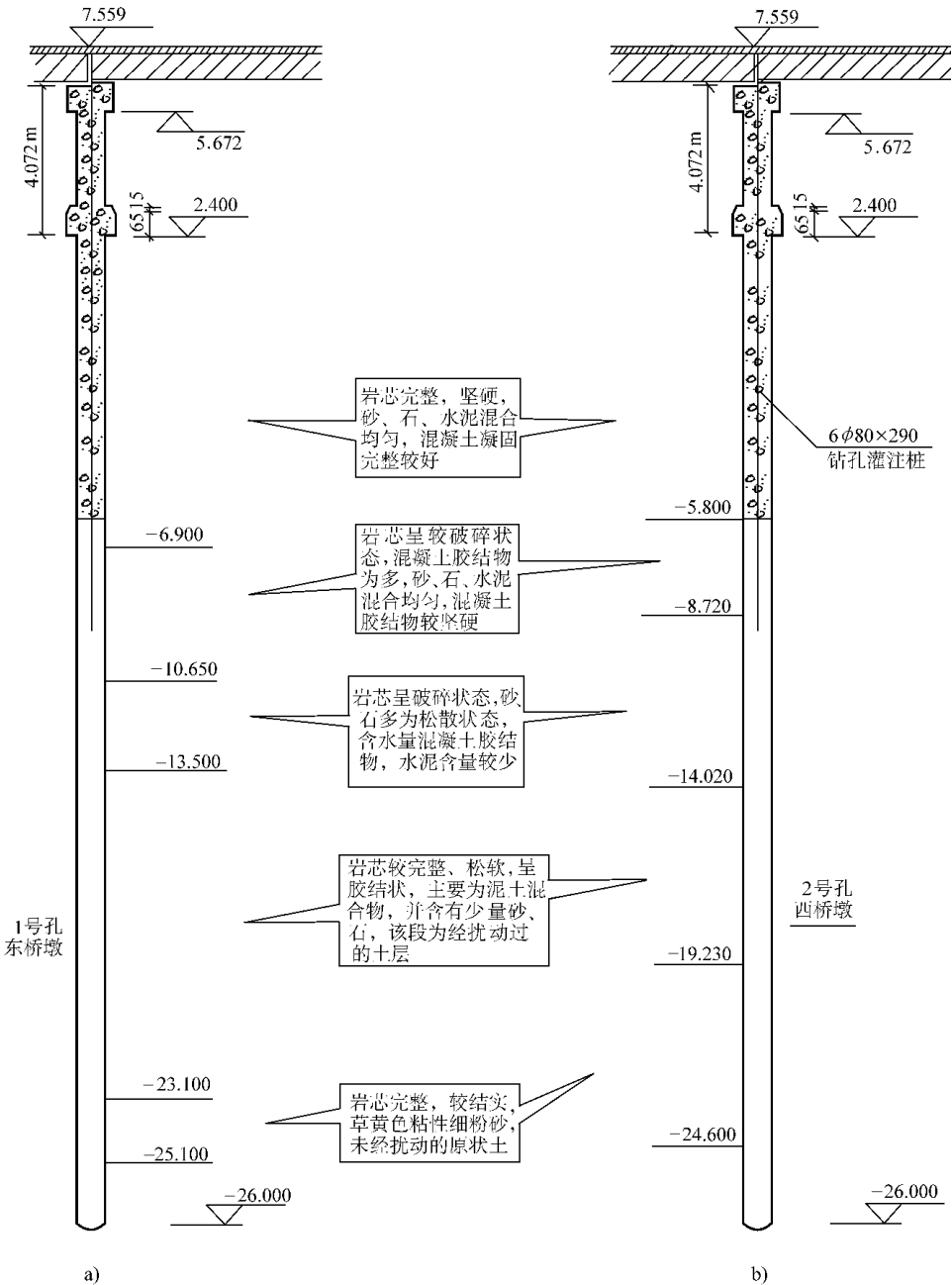


图 1 钻孔灌注桩剖面图

该工程 1993 年 5 月 1 日开工同年 12 月 1 日桥梁部分竣工因桥接坡未完成, 在桥梁坍塌时, 尚未验收使用。1993 年 10 月 12 日下午 14 时 15 分, 贝港桥 4 个桥墩突然下沉, 致使整座桥面中间部位下沉后呈“灾”字形。事故发生后至桥面拆除近 1 个月, 贝港桥河道不能通航, 严重影响交通、物流。拆除桥面后, 经实测桥墩实际下沉量为: 东桥墩下沉 1.01m~1.03m, 西桥墩下沉 1.01m (如图 4-1 所示)。

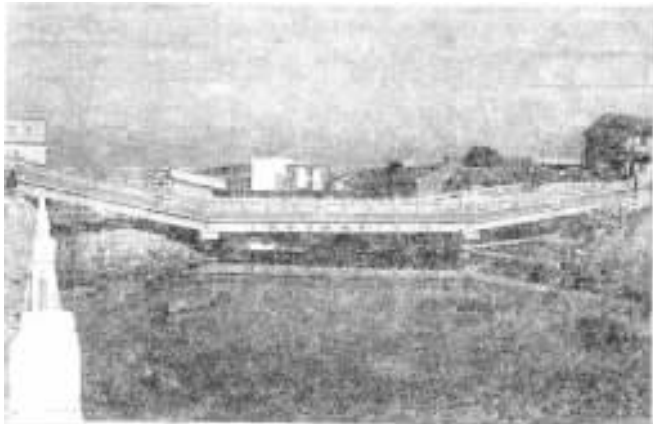


图 4-1 桥墩下沉情况

1. 事故原因分析 1993 年 10 月 12 日, 该市建筑业管理办公室成立贝港桥坍塌事故调查组, 调查组察看了事故现场, 调查了设计、施工的委托手续, 复核了工程勘察、设计、施工质量。根据调查结果, 造成这起桥梁下沉坍塌事故的主要原因是桥梁桩基钻孔灌注桩施工质量低劣。

(1) 钻孔灌注桩施工技术资料不齐全, 不正确。

① 无成孔测试资料, 无孔径曲线图, 无垂直度, 孔壁稳定曲线, 混浆密度及回淤检测资料, 无钢筋质量评定, 无隐蔽验收资料。

② 检查混凝土灌注记录发现桥墩每根桩的实灌混凝土量为 1.01m<sup>3</sup>, 资料虚假。按照  $\phi 1000$  桩长 10.0m, 加上应截去上部浮桩 1.0m, 再算上充盈系数 1.0~1.1, 则每根桩应浇灌混凝土数量为 1.01m<sup>3</sup>。

(3) 用钻芯取样法, 查明了桩身范围内的实物质量和实际桩长。根据调查组要求, 对发生下沉的东、西 4 个桥墩下的钻孔灌注桩进行钻芯取样, 以探求桩身的混凝土质量与长度。市建设工程质量检测中心于 1993 年 10 月 12 日发出了贝港桥钻孔灌注桩钻芯取样检测报告, 其钻芯取样检测结论如下:

① 桩顶部分 (1.0m 范围) 混凝土密实, 强度较高, 达到设计要求。

② 桩身混凝土质量从外观看由上而下逐步衰减, 其规律是从密实→疏散→淤泥 (含少量骨料)→原状土。

③ 1 号孔 (东桥墩) 钻孔在 1.0m 处, 2 号孔 (西桥墩) 钻孔在 1.0m 处, 以

下为已搅动过的淤泥、含有少量骨料，已丧失承载能力。

源 员号孔在原~~圆~~以下为原状土，圆号孔在原~~圆~~以下为原状土。

缘 桩身混凝土没有达到设计持力层 原~~圆~~。

捷调查结果 事故原因查明，造成这起桥梁下沉坍塌事故的主要原因是 圆个桥墩的钻孔灌注桩施工质量严重低劣，桩身质量差，长度不足，桩尖没有达到设计要求的持力层，由于承载力严重不足，造成桥梁突然下沉。

圆~~圆~~ 岩土工程中因地基失稳造成的工程事故实例

圆~~圆~~ 例 源美国纽约某水泥仓库地基滑动事故

圆~~圆~~工程事故概要 美国纽约某水泥仓库，位于汉森河旁。水泥仓库的上部结构为圆筒形，直径 圆~~圆~~，地面以上高度为 圆~~圆~~。基础为整块筏板基础，筏板厚度 圆~~圆~~，基础埋深 圆~~圆~~。圆~~圆~~年，当水泥仓库装储水泥后，仓库发生大量沉降。不久，水泥仓库整体倾倒。仓库倾斜角呈 源~~圆~~ 地基土被挤出地面，高达 缘~~圆~~。与此同时，离水泥仓库净距 圆~~圆~~以外的办公楼，也发生了倾斜。

圆~~圆~~事故原因分析 纽约水泥仓库地基，由上至下分为四层。

(员) 表层为黄色粘土，厚度约 缘~~圆~~。

(圆) 第 圆层为蓝色粘土，标准贯入试验锤击数 晕越愿~~圆~~，承载力为 愿~~圆~~。缘~~圆~~层厚约为 员~~圆~~。

(猿) 第 猿层为碎石混粘土，棕色，厚变较小，仅约 员~~圆~~。

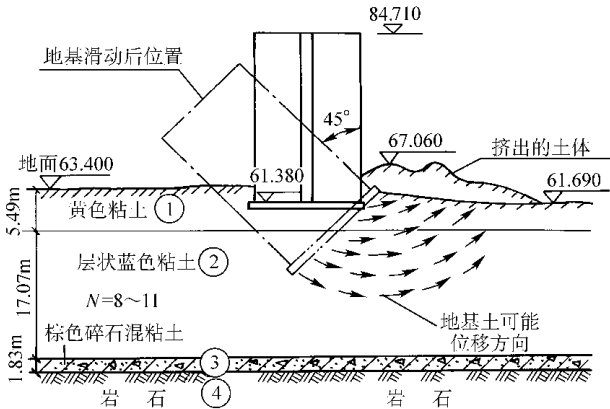


图 圆~~圆~~ 美国纽约水泥仓库地基倾倒剖面图

(源) 第 源层为岩石。

水泥仓库筏板基础，位于表层黄色粘土中部。此黄色粘土在筏板基础下很薄，仅约 圆~~圆~~。筏板宽度 遭~~圆~~。上部荷载传到第 圆层蓝色粘土，严重超载，

引起地基强度破坏,导致地基整体滑动和水泥仓库倾倒。图 4-10 中实线表示仓库竣工时的位置,虚线表示地基滑动后仓库的位置。

**事故处理方法** 在水泥仓库装载水泥后,已发现仓库严重下沉。如果立即卸除储藏的极重的水泥,很容易挽救,可以在仓库下托换基础,即做桩基,支承在岩石上,即可保证安全。但负责人仅安排了仔细进行沉降观测与记录,未采取卸荷措施,结果发展成灾害。当水泥仓库已经倾倒成漏后,再进行纠倾比较困难,而且代价很高。

### 4.1.2 例 加拿大特朗斯康谷仓地基超载事故

**工程事故概要** 加拿大特朗斯康谷仓为圆筒仓,每排 4 个圆筒仓,共 12 个圆筒仓组成整体。谷仓平面呈矩形,长度 100m,宽度 40m,高度 30m,总容积为 120000m<sup>3</sup>。谷仓的基础为钢筋混凝土筏板基础,筏板厚度为 1.5m,基础埋深 1.5m。谷仓 1959 年动工,1 年后,于 1960 年秋季完工。谷仓自身质量为 1000t,相当于装满谷物后,满载总质量的 1/3。1960 年 1 月起,谷仓开始仔细地装载谷物,谷物均匀分布。1961 年,当谷仓已装载 1000t 谷物时,发现谷仓严重下沉,1 周内,竖向沉降量达 1.5m,结构向西倾斜。1 年后,即 1962 年 1 月,谷仓整体倾倒。倾斜度离垂线达 10°。谷仓西端下沉 1.5m,谷仓东端反而上抬 1.5m (见图 4-11)。

**事故原因分析** 1960 年春,事故发生预兆:当冬季的大雪开始融化,附近由石碴堆成高为 1.5m 的铁路路堤,下面的粘土下沉 1.5m 左右,迫使路堤两边的地面成波浪形。为处理此事故,穿过石碴打入几百根桩长 1.5m 的木桩,形成一个台面,用以铺设铁轨。

特朗斯康谷仓的地基,事先未进行勘察研究。根据邻近结构物基槽开挖试验结果,计算地基承载力为 100kPa。谷仓的场地,位于冰川湖的盆地中,地基中存在冰川沉积的粘土层,厚达 1.5m。粘土层上面是近代沉积层,厚 1.5m。粘土层下面为固结良好的冰川下冰碛层,厚 1.5m。这层冰碛层,支承了这地区很多质量更大的结构物。

1960 年 1 月,加拿大国家研究委员会建筑研究部,会同曼托托巴(配森)大学和裴克(珀里)教授,在离谷仓 1.5m 处打了一些钻孔(见图 4-12)。从不扰动的粘土试样测试确定:粘土层的平均含水量随深度而增加,宰 10%~15%;无侧限抗压强度 10kPa,从 1.5m 深度减少至 1.5m 深度,平均为 10kPa。平均液限 宰 25%,塑限 宰 15%,塑性指数为 10。试验表明,这层粘土是高胶体、高塑性的。

按太沙基(基)教授公式,计算谷仓地基承载力:如采用粘土层的无侧限抗压强度试验平均值 10kPa,地基承载力为 10kPa。这数值已小于破坏

发生时，谷仓地基实际压力 ~~远超过原设计值~~。如用无侧限抗压强度最小值 ~~择~~ ~~远超过原设计值~~ 计算，则谷仓地基承载力为 ~~远小于原设计值~~，远小于谷仓地基破坏时的实际压力。由此可知，谷仓地基发生事故的原因为：地基严重超载，发生强度破坏、即剪切破坏，引起地基整体滑动。

卡拉费斯（~~远超过原设计值~~）计算指出：地基上加荷的速率，对发生事故起作用。因为当荷载突然施加的地基承载力，要比加荷固结逐渐进行的地基承载力小。这个因素对粘性土尤为重要，因为粘性土需要很长时间才能完全固结。根据裴克教授的资料计算，固结抗剪强度发展所需时间约为 ~~15~~ 年，而谷物荷载施加仅 ~~15~~ 天，几乎相当于突然加荷。

综上所述，加拿大特朗斯康谷仓，地基强度破坏的根本原因是：

- (员) 谷仓地基事先未作勘察、试验与研究。
- (圆) 借用邻近工程的资料，盲目设计，采用的设计荷载超过地基土的抗剪强

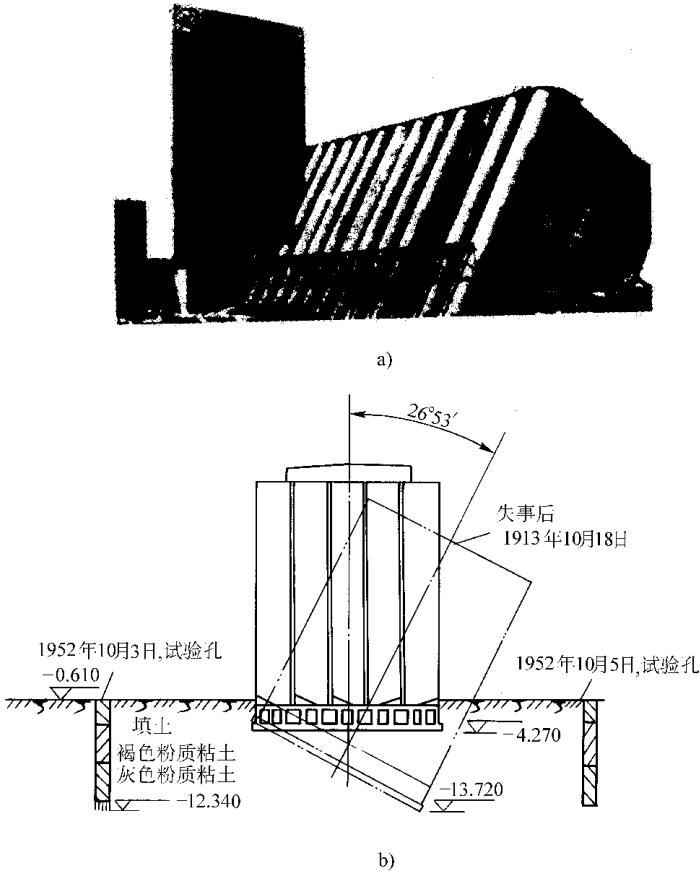


图 10-10 加拿大特朗斯康谷仓事故分析图

度, 导致这一严重事故发生。

(獭 谷仓使用时, 加荷速率太快, 粘土地基中孔隙水压力上升, 使有效应力降低, 促使地基滑动致破坏。

獭事故处理方法 特朗斯康谷仓地基滑动、严重倾倒后, 经检查上部结构筒仓完好。于是采用墩基支托法处理。具体来说, 在谷仓筏板基础下, 做 苑多个新的混凝土墩, 墩的底端支承在岩石地基上。使用共 獭个 缘级千斤顶, 将倾倒的基础慢慢顶起。谷仓的补救工作是在倾斜谷仓底部原水平巷道中进行。新的墩基础埋深在地表下 员m 左右。经过艰难的纠倾处理后, 谷仓于 苑年恢复使用。

## 4.2 岩土工程中因建筑物地基溶蚀与渗透破坏造成的事故实例

如果建筑场地的基岩为岩浆岩、变质岩或沉积层中的碎屑岩等稳定的岩石, 基岩上的覆盖层为密实的砂土或粘性土, 这类场地通常是稳定的。而下列情况则是不稳定的:

(员 如当地基岩是石灰岩, 在地下水长期作用下, 可能产生岩溶(喀斯特), 并伴生土洞, 则影响建筑场地的稳定性。

(圆 在山区残积土或坡积土, 因土的粒径大小相差悬殊, 在地下水作用下, 可能产生溶蚀。

(猿 在岩溶发育地区或矿产采空区, 在地下水作用下, 尤其地暴雨时, 在向下的渗透力作用下, 可能产生地表坍塌, 直接危及建筑物的安全。

(源 在地下水的流速大的区域, 如土质级配不良, 则细土颗粒可能被冲走而产生管涌。

(缘 在地下水位以下基槽开挖, 遇土质为粉细砂或粉土, 则将产生流砂。

(远 建造水库, 抬高水位时, 如处理不当, 使水力坡降超过临界值, 则水库下游将产生渗透破坏。

上述各类建筑物地基, 由于地下水活动, 造成地基的各类事故, 必然危及建筑物的安全。因此, 在建筑场地的工程地质勘察中, 不仅要注意工程地质情况, 还应注意水文地质情况, 尤其是地下水分布及流动情况。

### 4.2.1 例 4.2.1 美国亚拉巴马州净水厂地基事故

4.2.1.1 工程事故概况 美国东南部, 亚拉巴马州净水厂, 建在一座小山旁, 厂区地基为残积土, 基岩为石灰岩。在净水厂的沉淀池和过滤建筑物的建造中, 开挖基槽达 远m 深。施工时发现槽底局部粘土很软, 曾使推土机陷入很深, 最后需使用起重机把推土机吊起。

建筑物施工期间，不慎打破了附近的自来水总管。水管直径为  $150\text{mm}$ 。在阀门关闭前，将容量为  $100\text{m}^3$  的大水箱的水放空，大量水渗入地下。

净水工厂竣工后，过滤建筑物发现不均匀沉陷，沉淀池的墙体发生裂缝。

工厂投产一个月后，一天早上，值班操作人员突然听到很响的咕嘟声，随着一连串的像远距离大炮开炮的隆隆声后，又以尖锐的劈啪响声达到高潮。过滤建筑物发生摇动，并从建筑物顶部一直裂到底部。建筑物的一半发生了倾斜。沉淀池的水已完全排干，在池底出现大洞穴，宽达  $10\text{m}$ 。这座净水工厂遭到完全破坏。

**事故原因分析** 净水工厂沉淀池，直接位于高度裂隙的石灰岩带上面，残积土的颗粒大小相差悬殊，岩石表面高低不规则。当自来水总管破坏后， $100\text{m}^3$  的大量水渗入地基，使土的细颗粒被冲走流失，发生侵蚀破坏，导致沉淀池底部出现大的缺口。

大量水入渗地基，泡软了地基土，使土的压缩性增大，引起严重的不均匀沉降，导致建筑物墙体开裂与倾斜。

**经验教训** 通过这个事故，告诫我们应注意以下问题：

(1) 净水工厂是经常大量处理水的工厂，建筑场地必须选在稳定的场地上。这个净水工厂选址在石灰岩高裂隙带和残积层上，这是绝对错误的。

(2) 选址时如无其他场址可选，则地基必须加固处理，如可采用强夯，将残积土超压密。

(3) 施工期间对水管应严格保护，不允许把自来水总管打破，连小的自来水管都应注意不被打破，做到严格防水。

(4) 设计要保证沉淀池有足够的强度，池底板必须用整体的钢筋混凝土结构，并与侧墙整体联结好。

### 例 海口市一沿海建筑地下室上浮事故

1991年8月，海口市经受8级飓风袭击，并伴有  $100\text{mm}$  以上的大暴雨。在滨海大道旁某商住小区内，一座停工中的占地面积达  $1000\text{m}^2$  的 4层地下室突然窜出地面  $1\text{m}$ ，整体倾斜，犹如平地出现一艘水泥船，停泊在两幢高楼的中间。虽然经过降水、牵引、归位等工程措施处理，但仍因地下室两端高差达  $1\text{m}$  而无法扶正，且顶板 and 外墙均已开裂，不能继续利用而报废。这一典型的抗浮失稳的事故再次告诫人们，粘性土中的巨大浮力不容忽视。

### 例 上海市某基坑塌方事故

1991年11月15日，上海发生  $10\text{m}$  深的倒虹引水渠道基坑塌方事故。基坑开挖采用高压水冲法施工，已开挖至设计标高，正在绑扎底板钢筋时，基坑北侧边坡



突然整体失稳。将位于边坡顶部的第 1 级井点管推移达 1.5m, 滑坡长度 2.5m, 约 1000m<sup>3</sup> 的土方迅速涌入坑中, 淹没了整个基坑, 涌高 1.5m 多, 将 10 名工人埋入土中。原设计边坡坡度为 1:0.5、1:0.4 和 1:0.3 的复合坡, 变化的坡度之间设 1.5m 宽的马道, 边坡的坡度不能算是不缓, 但仍未能避免事故, 这值得引起人们的深思, 提示我们遇此类情况应注意切断虹吸。

## 4.2 岩土工程事故灾害的防治措施

勘察、设计、施工是建筑工程三大主要环节。国内外对岩土工程的勘察、设计和施工颁布了很多规程和指南, 如果能够严格地遵守这些规程或指南要求, 做到正确勘察、精心设计和精心施工, 绝大部分岩土工程事故是可以避免的。

### (1) 精心勘察。

预防地基与基础工程事故首先要重视对建筑场地工程地质和水文地质条件的全面、正确了解。要做到这一点, 关键要搞好工程勘察工作。要根据建筑场地特点、建筑物情况合理确定工程勘察的目的和任务, 工程勘察报告要能正确反映建筑场地工程地质和水文地质情况。

通过工程地质调查与测绘、勘探与岩土取样、原位测试、室内试验和岩土工程监测等工作, 岩土工程勘察将完成以下任务:

1) 场地稳定性的评价。对若干可能的建筑场地或建筑场地不同地段的建筑适宜性进行技术论证, 对建筑物所在地区的工程地质和水文地质条件进行可行性分析。

2) 为岩土工程设计提供场地地层和地下水分布的几何参数和岩土体工程性状参数。

3) 对岩土工程施工过程中可能出现的各种岩土工程问题(如开挖、降水、沉桩等)作出预测, 并提出相应的防治措施和合理施工方法的建议。

4) 对建筑地基作出岩土工程评价, 对基础方案、岩土加固与改良方案或其他人工地基设计方案进行论证和提出建议, 根据设计意图监督地基施工质量。

5) 预测由于场地及邻近地区自然环境的变化对建筑场地可能造成的影响, 以及工程本身对场地环境可能产生的变化及其对工程的影响。

6) 为现有工程安全性的评定、拟建工程对现有工程的影响和事故工程的调查分析提供依据。

7) 指导岩土工程在运营和使用期间的长期观测, 如建筑物的沉降和变形观测等工作。

### (2) 精心设计。

1) 对一般工业与民用建筑在全面、正确了解场地工程地质条件的基础上, 根据建筑物对地基的要求, 进行地基基础设计。如天然地基不能满足要求, 则应

进行地基处理形成人工地基，并采用合理的基础形式。对地基处理和基础工程力求做到精心设计。此外，地基、基础和上部结构是一个统一的整体，在设计中应统一考虑。要认真分析地基变形，正确估计工后沉降，并控制建筑物工后沉降在允许范围内。

④ 对深基坑开挖，要认真进行支挡设计和降水方案设计。对地下洞室开挖，要正确计算洞室顶、侧荷载，正确进行支护设计。对边坡要进行稳定分析及边坡防护设计。对局部不良地质，应有对策预案。

（獠 精心施工。

正确的勘察，合理的设计需要通过精心施工来实现。施工中要按图施工，如遇异常情况，应由设计决定并办理施工洽商来更改。所用支护材料及结构要严格把关，不能因其临时工况而降低要求。在施工中加强观察，如有超常情况应及时采取措施加以处理。注意环境变化，尤其是地下水的变化对岩土工程的影响。

# 第 远篇 城市防灾减灾概要

## 第 圆章 概 述

### 圆 圆 前言

城市是人类经济、文化、政治、科技信息的中心，世界城市面积是人口居住面积的 员豫，但是住着占世界总人口 员豫的居民，集中了世界社会财富的 圆豫以上。城市是社会进步的主要力量。正因为城市具有“人口集中，建筑集中，生产集中，财富集中”的特点，因此一旦遭到自然灾害，势必造成巨大的损失。无论现代还是古代，城市灾害一般都引起了相当惨重的损失，甚至导致整个城市的消失。如众所周知的楼兰古城，据考证其消逝就是风沙及其旱灾所致。因此，《中国 圆世纪议程》的核心就是城市可持续发展。

改革开放加快了我国城市化各方面的进程，至 员怨怨年，我国城市化水平已达 圆豫，城市有 远园多座。历史与现实地看，城市灾害源于城市化进程。圆世纪初期的城市灾害一般发生在发达国家及地区。在我国，系统的城市灾害现象发生在 圆世纪 源园年代，但真正对城市单灾种如地震、火灾、洪水等的深入研究是 圆世纪 苑园年代以来的事。针对自然灾害对全人类、特别是对发展中国家的危害，员怨怨年联合国提出“国际减灾十年”计划，以“关注人为灾害及自然灾害”为主题，倡导全球统一行动适应全世界灾情。如 员怨怨年“国际减灾日”的口号明确提出“城市化与灾害”，它标志着全球范围内，城市灾害已成为减灾重点。目前越来越多的专家认为，欲研究国家的可持续发展战略，首先要解决的是城市抗御灾害的能力。任何城市化发展迅猛的国家都必须关注城市化进程中的灾害趋势，城市是否具备减灾能力是城市文明、质量、能力的标志之一。

### 圆 圆 基本概念

灾害，是指由于某种不可控制或未能预料的破坏性因素的作用，使人类赖以生存的环境发生突发性或累积性破坏或恶化，引起人群伤亡和社会财富灭失的现象和过程。城市灾害是城市系统或其子系统为承灾体的灾害，是指由于自然或人为的原因对城市系统中的生命和社会物质造成危害的自然社会事件。城市灾害属

自然性~~性~~与社会性~~性~~为一体的混合灾害，在城市地区发生灾害事件造成的人员伤亡和经济损失将更为严重。

城市灾害学是研究灾害系统（含事故机理）对城市系统之间作用机制的学科，它是现代灾害学、事故理论与城市学及城市化发展战略学的有机组成的综合学科。虽然城市灾害学仍处于边创建、边应用的发展阶段，但它可以为城市可持续发展提供最重要的一系列防御系统及预警网络，为现代城市安全少灾提供可靠的科学保障基础。

## 图图图 城市灾害类型

对于城市灾害的分类国家建设部早在 1985 年公布的《城市建筑综合防灾技术政策纲要》中，把地震、火灾、洪水、气象灾害、地质破坏等五大灾种列为导致我国城市灾害的主要灾害源，它们同时也是国家认可的主要城市灾害；1995 年美国 9.2 级地震事件后，全球安全格局有了新变化，研究城市灾情，再不能仅从自然灾害、人为事件上着眼，而必须包括恐怖事件在内的诸项灾害源；而 2003 年在中国及东南亚地区肆虐的 SARS 疫情，让我们全面反思人类行为的失当，聚焦环境灾害及生物灾害。由于急性突发传染病是生物灾害的重要表现，故也有学者将灾害分为生物性和非生物性两大类。

灾害按基本成因可分为三种类型：①纯自然灾害；②人为自然灾害；③人为及社会灾害。

### 图图图 纯自然灾害

纯自然灾害是指由于天文系统以及地球和它的各个圈层运动变化所引起的灾害。它又可以分为天文灾害和地球灾害两类，具体包括以下灾害类型：

（一）地震。地震是我国危害最大、分布面积最广的一大城市灾害。从地震区的分布来看，我国有 1/3 的国土、一半以上的大中城市位于地震基本烈度 Ⅵ 度及 Ⅵ 度以上的地区，1/3 的城市位于地震基本烈度 Ⅶ 度及 Ⅶ 度以上的地区；特别是北京、天津、西安、兰州、太原、包头、海口、呼和浩特等均在地震的高危区。大地震造成的强烈地面运动除直接使建筑物倒塌或破坏之外，还诱发山崩、滑坡、泥石流、地基液化等地质灾害。和其他国家相比，近 50 年来，我国城市地震死亡总人数和一次最高死亡人数均居世界各国之首，死亡人数约占全世界死亡人数的 1/3。

（二）洪水。我国大江大河的中、下游地区有 100 多个县市处于洪水水位以下，占全国县市总数的 1/3，人口 2 亿多，工农业总产值占全国的 1/3。生活其间的 2 亿人口全赖 10 万公里的堤坝保其安全，一旦决堤，灾害之大不堪设想。1998 年的大洪水使一系列重点城市被包围、淹泡，造成至少 1000 亿元的直接经济损失。

(獭) 气象灾害。典型的气象灾害有大气风暴, 包括雨暴、热带风暴(台风)、雷暴、雹暴、暴雨暴、大风风暴和龙卷风暴等。我国东临西北太平洋, 是世界上发生台风最多的地区, 从 1951—1994 年间, 平均每年在我国登陆的台风约有 10 个。1991 年台风袭击杭州, 倒屋上 10 万间, 损坏房屋 10 万间, 直接经济损失 100 亿元以上。

(源) 城市生物灾害。城市生物灾害包括鼠害、白蚁、蟑螂、狂犬、蚊虫等。1991—1994 年间, 北京地铁因老鼠造成了 10 次停电事故, 全线停运、一片漆黑, 最长一次停电历时 100 分钟。

## 4.2 人为自然灾害

人为自然灾害指由于人类的活动引起的自然灾害。

(源) 地质灾害 我国山地、高原、丘陵占国土面积的 2/3。在大气、地震及人类活动影响下, 每年都产生大量山崩、滑坡、泥石流等城市地质灾害, 其危害有: 导致人员伤亡, 破坏城镇、矿山、学校、铁路、公路、航运、水坝等多种工程设施。我国受泥石流灾害威胁的城市有 100 余座, 特别是中西部地区的大部分城市处于崩、滑、流灾害包围之中。另外, 我国的上海、天津、常州、无锡、宁波、北京、太原等城市, 由于过量开采地下水, 造成地面沉降和地面裂缝, 导致房屋倾斜、开裂, 市政管网错位、断裂, 河口、沿海地区潮水上岸, 地面积水, 桥墩、码头和仓库下沉等。另外, 地下岩溶和采矿空洞也可能造成城市地面的塌陷, 危及地面建筑和工程设施。

(源) 环境公害 环境公害指由于物理、化学、生物污染环境引起的自然灾害, 它包括酸雨、大气污染、水污染、赤潮、固体废弃物污染、噪声、光污染、电磁辐射、放射性物质污染等, 是我国城市灾害中的严重问题, 严重威胁着居民的健康和生命财产安全。

(獭) 内涝 城市化造成不透水地面面积大量增加, 使得地面水流加大增加。由于城市发展很快, 许多城市排水工程能力滞后, 造成城市洪水灾害频发。当大城市不透水地面面积占到 1/3 时, 同样暴雨的情况下, 其洪水流量可较城市化前(不透水地面面积在 1/4 以下时)增加数倍, 不仅造成城市洪水来不及排出, 淹没公路等, 还能造成下游排水河道洪水流量成倍增长, 加重了洪涝灾害。如 1991 年 7 月 18 日的一场大雨使北京市很多道路被淹, 有的司机不得不从车窗游出以逃生。

## 4.3 人为及社会灾害

人为及社会灾害即主要由于人类在生产、生活活动中的过错或过失造成的灾害, 一般称为事故或事故灾害。它对于人身安全的威胁要超过自然灾害, 对经济的直接影响亦不亚于自然灾害。

(獭) 战争 在我国古代称为“兵灾”或“兵祸”, 它对城市的破坏力最大。

**Ⅰ火灾** 火灾在城市中发生频率极高，破坏力也相当大，伦敦、巴黎、芝加哥、东京和我国的长沙，都曾发生过城市性大火，造成大量的人员伤亡与财产损失。我国城市在过去 50 余年间累计发生火灾 10 万多起、死伤 20 多万人、经济损失 100 亿元，且呈逐年增加趋势。

**Ⅱ交通事故** 城市中交通流量大，人、车交叉点多，交通事故发生频繁，人员伤亡数和财产损失也十分巨大，已成为城市灾害中致命致伤的头号杀手。1995 年 1 月，北京市共发生道路交通事故 1000 多起，伤 1000 多人，死亡 100 多人。上海市 1995 年发生道路交通事故 1000 多次，伤 1000 多人，死亡 100 多人，直接损失 10 亿元。

**Ⅲ化学灾害** 城市中有一些生产、储存、运输化学危险品的设施，往往由于人为失误引起中毒、爆炸等事故。化学灾害中，又以煤气中毒和煤气爆炸最为常见。在上海市，化学灾害所造成的人员伤亡数已在诸多灾害中名列前茅。

**Ⅳ传染病流行** 由于城市人口稠密，一些传染性疾病易在短时间内大范围爆发。上海市曾大规模爆发过甲肝和红眼病疫情，给城市居民的生产、生活造成极大影响，也一度损害其城市形象；1968 年的霍乱疫情曾使世界各国处于高度戒备状态，并扰乱了居民的正常生活秩序。

**Ⅴ职业病** 随着城市经济社会发展和科技进步，职业病在我国城市的分布已经涉及到煤炭、冶金、建材等 10 余个行业。据统计，在世界范围内，1985 年，职业病只有铅中毒、汞中毒和炭疽病 3 种，1995 年上升为 10 种，到 2005 年，上升到 20 种。

我国的职业病共有 10 大类，20 种，主要分布在煤炭、冶金、建材、有色金属、机械、化工等行业。1985~2005 年，我国共报告职业病新病例 100 多例，年均增加新职业病人数为 100 多例。其中，急性职业中毒者 1985 年比 1980 年增加 100 多例，中毒人数增加 100 多例，死亡人数增加 100 多例，2005 年与 1985 年相比死亡率增加 100 左右。我国职业病增加主要由于：①防范意识差，②缺乏明确而规范的法律保护，③缺乏严格的赔偿制度。

**Ⅵ药害** 全球共有 100 多病人死亡不是源于疾病本身，而是由于用药。药害已成为威胁人类健康的五大杀手之一。据不完全统计，我国每年 100 多万住院病人中至少有 100 万人是因为药物不良反应而住院治疗的，它占了住院人数的 10%。

**Ⅶ物理灾害** 主要有室内氡灾害、次声波灾害和电磁波污染。高剂量的氡可以产生体外辐射，导致肺癌（是仅次于吸烟的第二大肺癌诱因）、白血病和呼吸道病变，其危险程度超过交通事故。此外，氡还对人体脂肪有很高的亲和力，从而影响人的神经系统，使人精神不振；次声波的频率大致为 10~100 Hz，它低于声波，在次声波作用下，人体器官将受到伤害；电磁污染损伤着人的神经系统、心血管系统、生殖系统，甚至诱发癌症，成为继大气污染、水质污染、噪声污染

声污染后的第四大公害。

**生产事故** 城市生产事故是指城市中发生的、因人的不符合客观规律的行为,造成技术失控、能量流动失控,导致死亡、财产损失及技术本身功能丧失或减弱的灾害性事件。当前,我国城市重大生产事故大多数是“人祸”,每年全国因生产事故死亡的人数均在 1 万人以上。

**恐怖事件** 震惊世界的美国 9·11 事件使人们开始关注恐怖事件并将其纳入城市灾害范畴,恐怖袭击的危害不仅在于所造成的人员伤亡及财产损失,更重要的是它给城市居民带来的心理上的不安定感,严重影响社会秩序的稳定。

## 城市主灾与次生灾害

城市灾害往往是多灾种持续发生,各灾种间有一定因果关系。因此,也有一些学者从引起灾害的直接原因或间接原因出发,将灾害分为主灾与次生灾害;发生在前,造成较大损害的城市灾害称为城市主灾;发生在后,由主灾引起的一系列灾害称为城市次生灾害。城市主灾的规模一般较大,常为地震、洪水、战争等大灾。次生灾害在开始形成时一般规模较小,但灾种多,发生频率高,作用机理复杂,发展速度快,有些次生灾害的最终破坏规模甚至还超过主灾。1995 年 1 月 17 日发生在日本的著名关东大地震中,共死亡 2 万人,其中因地震而倒塌房屋压死者占 1/3,而被地震引起的全城性大火烧死者占总死亡人数的 1/3;次生灾害对城市的损害由此可见一斑。

## 城市灾害特点

**经济及社会危害性** 城市由于其人口和财富的高度集中,使城市在灾害面前的脆弱性更为突出,一旦遭受重大灾害,所造成的人员伤亡和经济损失将十分严重。一方面,由于城市功能网的整体性强,当一种功能失效时,常波及到其他系统的功能:如建筑物的倒塌能造成管线破坏、交通受阻。而且城市居民对城市的功能依赖性很强,一旦功能失效,极易引起社会秩序的混乱;另一方面,城市是社会发展的动力源,那些在国民经济建设中发挥重要作用的城市,如国家首都、金融中心城市,一旦发生了灾难性的破坏,其破坏的影响不仅涉及该城市本身,甚至可以波及整个国家,乃至世界。这种现象在发达国家如此,在一些发展中国家更为明显。如 1976 年 7 月 28 日唐山市发生 7.5 级地震,顷刻之间使这座具有百万人口的大城市毁坏殆尽,死亡 24 万人,重伤 15 万人,就是一个明显的例证。而在经济发达的国家也不例外,1995 年 1 月 17 日的日本阪神 7.3 级地震,造成人员伤亡 2 万多,其中死亡 6400 多人,直接经济损失超过 1000 亿美元。由于人口集中,人为灾害的可能性也大为增加,如城市火灾、交通事故、各类公共场所惨案(如足球场人员拥挤,看台倒塌等),而大量人员同时受到伤

害也使有限的医疗救护能力更显得严重不足，延误抢救治疗的时机，从而加重了城市灾害人员伤亡，进而扩大了城市灾害的危害。

**突发性及高度扩张性** 城市灾害具有“一触即发，一发即惨”的鲜明性，小灾若得不到及时控制，会发展成灾害；一种灾害的发生常诱发出一连串的灾害现象，而且灾因复杂、突发性强、灾度难测，对城市和区域的持续发展产生迟滞效应。

**多样性及复杂性** 城市由于处于特殊的地理位置（如江、河、湖、海，冲击平原，山前平原），因而受灾频繁；而且，城市灾害作为“天、地、生、人”灾害大系统的子系统，可能导致灾害发生的因素很多。自然因素方面，如气象因素中的台风、龙卷风、暴雨、冰冻、大雾等，地质因素中的地震、滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降、海水倒灌等；环境方面的污染、酸雨、噪声等；生物灾害中的瘟疫、病虫害等；由社会人文因素引起的有盗窃、绑架、凶杀、破坏等。此外，由于人为或技术原因，造成的城市灾害隐患也越来越多，如火灾、爆炸、交通事故、工伤事故、电梯伤人事故、化学事故、输电事故、煤气泄露、水管破裂等，这些都是导致城市灾害的因素。

由于要考虑多种灾种的作用，在设计建筑物、生命线工程等人工建筑时，难度大，施工程序相对复杂，施工质量要求也比较严格。也只有认识到了城市灾害的复杂性，才能在城市建设过程中自觉保证城市抗御灾害的综合能力。

**区域性** 区域性是我国城市灾害的一个重要特点。一方面，我国城市灾害往往是区域性灾害的组成部分，尤其是发生较大的自然灾害时，常有多个城市受同一灾害影响，灾害的治理和防御不仅仅是一个城市的任务，单个城市也无法有效地防抗区域性灾害。另一方面，城市灾害的影响往往超出城市范围，扩展到城市周边地区和其他城市。这种影响不仅是物质性的，也包括精神性的灾后灾民安置与恢复重建工作，这也是一个区域性课题。

**群发性** 地震、洪水等大灾则体现群发性，次生灾害多，危害时间长，范围广，形成灾害群，从多方面连续地给城市造成灾害。

**模糊周期性** 任何灾害的发生都有一个能量聚集、发展、演变过程，而且周期长、中、短不一，灾害的强度有极大的随机性。

**修复难度大，恢复期长** 城市的基础设施是城市功能中很重要的一部分，一般来说，由于不同的设施互相关联，一旦某一部分设施破坏，势必影响另一部分设施功能的发挥，因此修复的工作量明显增大。例如电力的中断，使供水、通信都可能因此受阻受损，交通秩序也将受到影响，因此需要动用较多的人力物力才能修复。同时，城市中由这些基础设施构成的功能网常呈现立体交叉的结构，许多管线深埋地下几米，甚至几十米，纵横交错。一旦这些功能网受阻，不但给检测工作带来一定的困难，而且也增加了修复的难度。一般城市受灾害作用发生



中等破坏时，其功能的基本恢复需要一个月以上；有时一次中型灾害甚至可使一个城市的现代化进程延缓 10 年。

**四、防灾难度大** 城市不仅基础设施等物理功能网复杂，而且社会结构也很复杂，在各行各业中推行统一的防灾减灾措施或法律法规，其执行的程度常常很难保证达到统一的标准。行业的经济状况、领导的防灾意识和群众的自我保护能力等方面的差异是造成这一结果的主要原因。兼之世界各国又面临着人口迅速膨胀，城市不断扩张的问题。我国在解放初期仅有 100 个百万人口的大都市，现在拥有百万人口以上的都市发展到了 100 多个。城市人口剧增，城市空间也势必不断扩张。由于城市规划和管理不能与城市的发展迅速紧密联系，造成一些原来经过勘察认为不适合建筑的区域（灾害易损性大的地区）被盲目开发利用，无形中增大了灾害侵袭和损失的概率。场地条件的恶化，使实施防灾的科学技术难度加大，资金投入增加，从而使整个防灾体系的建立困难重重。在由世界银行举办的城市发展与减灾工程科技讨论会上，各国学者都谈到了城市化不仅使城市发生灾害的概率增大，同时也为城市设防提出了越来越多的技术难题。

## 四、城市灾害的成因

我国从解放后至唐山大地震共发生 1500 次灾害性地震，其中，1000 次在农村，另 500 次在唐山和海城。在 1500 次地震总的经济损失中，唐山占 70%，海城占 10%，农村只占 20% 左右；总的人员伤亡中，唐山占 80% 以上。这表明，工商业和人口集中的现代化城市抵御灾害的能力非常脆弱，其原因主要在于：

（一）城市是危险要素（如人员、建筑、社区和基础设施）高度集中的地区，因而成为最易遭受灾害的地区。

（二）城市的不断膨胀和工业规模的不断扩大，既破坏了城市环境，也导致了城市地区生态的恶化和灾害的发生。

（三）一些重要因素，如人口密度、地区的危险度、城市功能的重要程度以及对基础设施的依赖程度和城市的管理能力，影响了城市的易损性。

（四）由于城市无法控制外来居民的增长，又没有能力提供基本的服务，而使城市地区的防灾减灾变得更加复杂。

总之，城市作为特殊的承灾体，未来可能导致灾害发生的因素越来越多。自然因素方面，如气象因素中的大风、暴雨、冰冻、大雾等，地质因素中的滑坡、地面沉降、海水倒灌、地震等，环境方面的污染、噪声等，生物灾害中的瘟疫、病虫害等。此外，由于人为或技术原因，造成的城市灾害隐患也越来越多，如火灾、交通事故、化学事故、水管破裂、煤气泄露、输电事故等。这些灾害因素，均可以导致城市自然灾害和人为灾害以及城市主灾与次生灾害的发生。

# 第 0 章 城市灾害风险性分析

## 0.1 风险的定义

风险（~~灾害或灾难~~）是指不幸事件发生的可能性及其发生后将要造成的损害。这里，“不幸事件发生的可能性”称为“风险概率”（~~灾害发生的可能性~~，也称风险度）；不幸事件发生后所造成的损害称为“风险后果”（~~灾害造成的损失~~）。有关专家对风险定义为两者的积。即

风险 = 风险度 × 风险后果

上述的“不幸事件”指能造成伤害、损失、毁坏和痛苦的事件。就风险自身而言，具有两个特点：一方面风险具有发生或出现人们不期望后果的可能性；另一方面风险具有不确定性或不肯定性。

风险伴随着人类的活动而存在，不同的活动会带来不同性质的风险，如经常遇到灾害风险、工程风险等；风险与随机性因素有关，其大小可以度量；根据概率论，风险大小取决于所致损失概率分布的期望值和标准差。最后，风险与一定的时间、空间条件有关，当这些条件发生变化时，风险也可能发生变化。

## 0.2 风险分析的目的、内容与程序

### 0.2.1 风险分析的目的

风险分析是对人类社会中存在的各种风险进行风险识别、风险估计、风险评价，并在此基础上优化组合各种风险管理技术、做出风险决策。对风险实施有效的控制和妥善处理风险所致损失的后果，期望以最小的成本获得最大的安全保障。

从这个定义可以看出，风险分析的目的在于，以最小的成本实现最大安全保障的效能。所谓“成本”是指风险分析研究对象的人力、物力、财力、资源的投入；所谓“最大安全保障”是指将预期的损失减少到最低限度，以及一旦出现损失时获得经济补偿的最大保证。由于风险具有动态性，人们认识水平以及风险管理技术处于不断完善的过程中，因此风险分析是一动态过程，管理者必须根据实际情况随时修改决策方案，才能达到以最少的成本实现最大安全保障的目的。

### 0.2.2 风险分析的主要内容

风险分析的具体工作内容很多，主要内容可以分为风险识别、风险估计与风

险评价、风险处理、风险决策等四个方面。

#### (一) 风险识别。

风险识别又称风险辨识，是风险分析的第一步。风险识别就是要找出风险之所在和引起风险的主要因素，并对其后果做出定性的估计。

#### (二) 风险估计与评价。

风险估计是在风险识别的基础上，通过对所收集的大量损失资料加以分析，运用概率论和数理统计方法，对风险发生的概率及其后果作出定量的估计。风险估计的这两项内容往往是有联系的：风险控制程度大小不同时，其相应发生的机会也不同。

风险评价是根据风险估计得出的风险发生概率和损失后果，把这两个因素结合起来考虑，用某一指标决定其大小，如期望值、标准差、风险度等，再根据国家所规定的安全指标或公认的安全指标去衡量风险的程度，以便确定风险是否需要处理和处理的程度。

具体讲，对所有灾种及人为事故都适合的风险评估原则及基本内容是：

(一) 综合防灾对策——综合历史资料和现在的观察预报数据，建立全国、省、市级的灾害区划图或风险图；成立国家与地方、企事业单位的各级紧急救援组织；制订紧急响应和救灾措施；充分利用遥感测试技术和计算模拟；编制综合防灾规划，验证防灾对策和措施的可靠性与效率。

(二) 灾后恢复重建决策标准——根据可靠的灾害损失数字、城市建设环境、人文环境、经济技术实力等制定恢复重建决策标准（如搬迁、部分搬迁或就地重建等）；建立专家决策系统。

(三) 灾害风险预测方法和保险与投资决策——根据各类灾害基础数据和发生模式，提出风险预测方法，按照国家、集体与个人、工农业生产与人民生活等方面的经济活动规律、供求关系和灾害的风险程度，制订相应的金融保险和投资决策。

#### (四) 风险处理。

风险处理就是根据风险评价的结果，选择风险管理技术，以实现风险分析目的。

风险管理技术分为控制型技术和财务型技术。前者指避免、消除和减少意外事故发生的机会，限制已发生的损失继续扩大的一切措施，重点在于改变引起意外事故和扩大损失的各种条件，如回避风险、风险分散、工程措施等；后者则在实施控制技术后，对已发生的风险所做的财务安排。这一技术的核心是对已发生的风险损失及时进行经济补偿，使其能较快地恢复正常生产和生活秩序，维护财务稳定性，如保险、发行股票、租赁等。

#### (五) 风险决策。

它是风险分析的一个主要的阶段。在对风险进行识别、做出风险估计及评价、并对其提出若干种可行的风险处理方案后，需要由决策者对各种处理方案可

能导致的风险后果进行分析，做出决策，即决定采用哪一种风险处理的对策和方案。因此，风险决策从宏观上讲是对整个风险分析活动的计划和安排，从微观上讲是运用科学的决策理论和方法来选择风险处理的最佳手段。

图 风险分析的一般程序

风险分析的一般程序是风险识别、风险估计与风险评价、风险处理和风险决策的周而复始过程。风险分析之所以是一个周期循环过程，是由风险分析的动态性所决定的。风险分析的一般过程如图 所示。

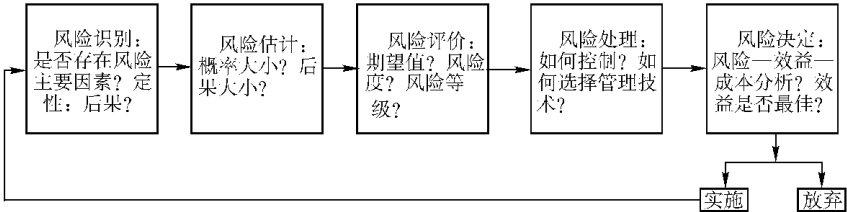


图 风险分析的一般程序

图 风险识别

风险识别又称风险辨识，其主要任务是找出风险之所在及引起风险的主要因素，并对后果做出定性的分析；由此可见，风险识别是风险分析中最基本、最重要的阶段。能否正确地识别风险，对风险管理能否取得较好的效果有着极为重要的影响。但是，在许多实际工作中，风险识别的重要性并未得到应有的重视。但如果没有认真做好风险识别的工作、忽略了某些重要的风险问题，将必然导致风险管理的失误。

风险识别的内容有：

(员) 城市灾害基础资料调查。收集本地区的地理、地貌、地质、地震、水文等资料，建立城市地理结构模型；收集城市气候、气象资料，建立区域环境大气扩散迁移模型；收集生物、生态资料，建立城市生态结构模型；收集人口资料，建立城市人口结构分布模型；调查城市灾害历史与现状，收集灾害风险评价与管理所需的各种标准，如各项污染物的浓度限制标准等。

(圆) 灾害风险源调查。常规灾害调查，计算和实测重大技术设施在生产运行中危害物质的排放参数，如危险物的类型、排风口位置、排放量等；调查和模拟灾害物质进入环境的迁移过程与归宿，实测危害物在环境中时空浓度分布。分析危害物质进入人体的途径；调查本区域环境生态变化过程，公众健康状况，如职业病、地方病等。

(猿) 事故风险调查。统计城市各企业、单位以及重大技术设施在生产运行

中, 年发生重大事故频率、伤亡人数、经济损失等; 统计年交通事故频率、伤亡人数、经济损失等; 统计年火灾频率、伤亡人数、财产损失等; 调查城市重大技术设施是否发生过灾难性事故, 发生原因, 发生后对整个城市环境生态、公众健康、社会经济的危害。

(源) 潜在风险调查。技术设施的损耗测量, 检查重大技术设施的完好程度, 评估它们的安全使用寿命。调查城市易燃、易爆、有毒、放射性物质储存库的位置、储存量, 这些危险物质储存库是否有安全保证; 特别要调查这些危险物质储存库位置与高密度的人口区, 与企业区群的距离是否合适; 评估这些危险物质一旦发生恶性事故时的爆炸、杀伤及毒害范围; 调查城市的自然灾害史, 如地震、洪水、飓风、旱灾等发生的年频率, 历史上发生过的自然灾害最大危害程度。

风险识别工作需要跨学科的综合知识, 并需要有丰富的专业知识和实际工作经验, 同时也需要对风险问题有较深入的认识。当前我国政府对城市风险问题的研究分析还很不够, 主要表现为对某些重要的风险问题没有识别, 或把一些风险性问题简单地当作确定性问题处理, 没有进行必要的风险分析和风险决策研究, 这就可能给决策造成失误, 给工程建设带来隐患。

## 8.2 风险估计与评价

### 8.2.1 风险估计的概率分析法

风险的测度 在风险分析中, 对风险的测度有两类指标, 即平均指标和变异指标。平均指标反映了风险变量的集中趋势, 而变异指标则表达了风险变量的离散趋势。常用的平均指标为期望值, 变异指标则为标准差和变异系数。标准差体现了在灾难状态下的风险损失和风险损失期望值的离散程度, 是风险测度的绝对指标; 变异系数 (也称为风险度) 是标准差与期望值之比, 为风险测度的相对指标, 是对标准差的补充。

(员) 期望值  $E(X)$ 。

$$E(X) = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (8.2.1)$$

$$E(X) = \int_{a}^b x f(x) dx \quad (8.2.2)$$

式中  $x_i$  (或  $x$ ) —— 离散型风险变量及相应的概率;

$a$ 、 $b$  ——  $x$  取值的上、下限;

$f(x)$  —— 连续型风险变量的密度函数。

(圆) 标准差  $\sigma$ 。

$$\sigma = \sqrt{E(X^2) - [E(X)]^2} \quad (8.2.3)$$

式中  $\bar{x}$  曾原曾<sup>圆</sup>——(曾原曾)的数学期望值。  
(猿 风险度 云阅

$$\text{云阅} \propto \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

(圆原源)

风险度越大，就表示对将来愈没有把握，风险也就越大。

**圆 风险变量的概率分析** 主要包括风险变量的概率估计，给出风险出现的可能性的<sup>大小</sup>。风险估计方法有主观和宏观两种方法：主观估计是专家根据长期积累的各方面的经验及当时搜集到的信息所做的估计；宏观估计是依据现有的各种数据和资料对未来事件发生的可能性进行预测。无论是主观估计还是客观估计都要给出风险变量的概率分布。用概率分布来描述各风险变量的变化规律，是进行风险分析的一种较完善方法。风险估计中常用的概率分布有阶梯长方形分布、梯形分布、三角形分布、理论概率分布。

(员 阶梯长方形分布。其概率密度分布如图 圆原圆所示。

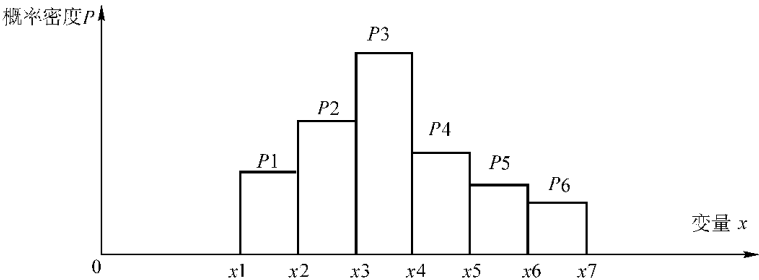


图 圆原圆 阶梯长方形分布

这种分布可以充分利用所获得的信息，并且有多少信息就用多少信息，不苛求更多的信息。估计者可根据要求将所获信息分成任意几个区间，画出大致概率分布图来。由于这种分布分段取常值，故其均值  $\bar{x}$  曾和方差 阅曾为

$$\bar{x} \text{ 曾} \propto \sum_{i=1}^n \frac{x_i \text{ 曾} \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

(圆原缘)

$$\text{阅曾} \propto \sum_{i=1}^n \frac{[x_i \text{ 曾}^2 \cdot P_i - \bar{x} \text{ 曾}^2 \cdot \sum_{i=1}^n P_i]}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

(圆原四)

(圆 梯形分布。如图 圆原猿所示，此时对变量的最可能值有所估计，且又估计不准，只是知道一个区间及相应于在正常情况下的取值。另外又估计出在极端情况下的最小值和最大值(曾和曾)。极端情况与正常情况之间即属于不正常情况，发生的概率要比正常情况下小，这里用直线相连。可以看出，很多主观概率分布都比较符合梯形分布。其均值与方差为

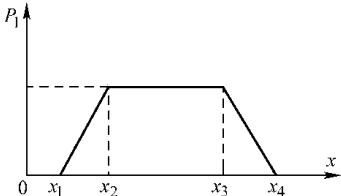


图 圆原猿 梯形分布

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-10)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-11)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-12)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-13)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-14)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-15)$$

(源 三角形分布。图 8-10 是三角形分布，它表示的是梯形分布的一种特殊情况，在主观估计中最为常用。该分布的一个突出优点是对所论风险变量只需专家提供最小值、最可能值和最大值三个特征的估计值。三角形分布的均值及方差为

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-16)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-17)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-18)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{b-a} \left[ \frac{(b-a)^2}{6} \left( \frac{a+b}{2} \right) + \frac{(b-a)^3}{24} \left( \frac{a+b}{2} \right) \right] \quad (8-19)$$

(源 理论概率分析。它是风险估计中大量采用的估计方法，是用数学方法抽象出来的概率分布规律，并用数学表达式进行精确的描述。如果根据某些随机现象的性质分析或大量数据统计的结果，能看出这些随机现象符合一定的理论概率分布或与它近似地吻合，便可由一、两个参数来确定整个变量的分布，并由这一理论分布来描述所研究的随机现象。理论概率分布依据其变量的形式，可分为离散型随机变量的概率分布和连续型随机变量的概率分布。其中，常用的离散型随机变量的概率分布有二项分布和泊松分布；连续型随机变量的概率分布有正态分布、对数正态分布、皮尔逊Ⅲ型分布和极值分布。

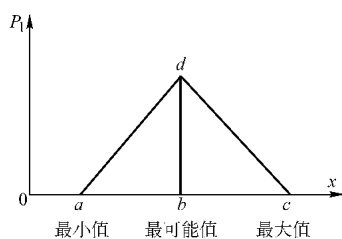


图 8-10 三角形分布

概率树 “树”是一种在系统分析中对大系统分解的简单、直观的常用方法，它把所研究的系统作为树的主干，把第一层次分解的各个问题作为主干上的第一层分枝，第二层子问题则是由第一层分支枝上分出的第二分支枝；这样逐层

分枝下去，就像树的生长形态一样，故这类分层次的图形分解法统称为“树”。一般的概率树如图 9-1-1 所示，把所研究的对象作为初始事件  $E$ ，它有一些可能的后果  $C_{ij \cdots k}$ 。可以看出，某一特定后果取决于初始事件后面的后续事件，即出现的某一给定的后果，在概率树中必然会出现一个系列的后续事件或途径；而给定一初始事件，就可能随后有几个“第一次后续事件”，显然，这些后续事件是互斥的；假定某一项第一次后续事件，则可能出现一组互斥的“第二次后续事件”。所以，概率树的每条途径表示某项给定的后续事件序列，并产生某种特定后果；某一特定途径发生的概率，就是该条途径上所有事件概率的乘积，由图 9-1-1 可得到

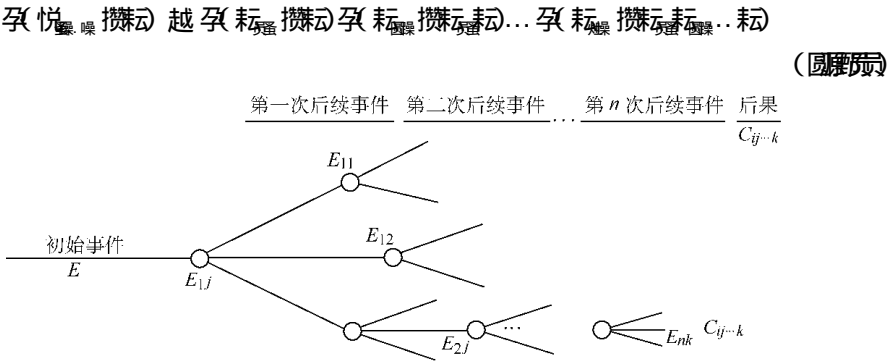


图 9-1-1 概率树的结构

9-1-2 风险评价的主要方法

9-1-2-1 层次分析法 层次分析法是人们在研究复杂事物时常用的一般性的方法。层次分析法（英语翻译为层次分析法，简称 AHP）是美国运筹学家沙泰（A.L.Saaty）在 20 世纪 70 年代提出的一种定性与定量相结合的多因素决策分析方法，其优点是将专家的经验判断进行量化。用 AHP 作系统分析，首先要把问题层次化，根据问题的性质和要达到的总目标，将问题分解为不同的组成因素，并按照因素间的关联影响和隶属关系，将因子按不同层次组合，形成一个多层次的分解结构模型，最终将系统分析归结为最低层次相对于最高层次的相对权重值的确定或优劣次序的排序问题。这种方法的主要特点就是把复杂的事物，按一定的分解原则，分层次地逐步分解为若干个比较简单、容易分析和认识的事物，以便对这些较简单的事物进一步作具体、深入的研究。

在复杂的系统中，由于不确定性的广泛存在而引起的风险因素很多，研究中不能把所有的风险因素杂乱无章地罗列在一起，这会使分析工作无法入手。层次分析法是在复杂的大系统研究中常用的方法，利用层次分析法可以分析各因素之间的因果关系，并便于分别识别各个层次的主要风险因素。利用这种方法要经历



一个由简到繁、再由繁到简的过程；由简到繁是为了不遗漏重要的风险因素；由繁到简是对已列举的各种风险因素作认真的分析和筛选，找出影响较大，需要深入研究的主要风险因素。

层次分析法可以用直观的图形即“树”的形式来表示。“树”的用途很广，用于决策分析的称决策树，用于概率分析的称概率树，用于风险分析的称风险树。

(四) 故障树分析。故障树分析采用树形图的形式，把系统的故障与组成系统的部件的故障有机地联系在一起。故障树分析首先确定系统不发生的事件作为顶事件，然后，按照演绎分析的原则，从顶事件一级一级向下分析各自的直接原因事件，根据彼此间的逻辑关系，用逻辑门符号连接上下事件，直至所要求的分析深度。根据构造出来的故障树，分析导致系统顶事件发生的部件失效组合状态（最小割集）与结构重要度。应用故障树分析时，还可进行顶事件发生概率的计算等定量的分析和计算。

(五) 事件树分析。任何事故都是一个多环节事件的变化结果。在给定一个初因事件的情况下，事件树分析指利用逻辑归纳法，以人、物和环境综合系统为对象，分析事故的起因、发展和结果的全过程及可能导致的各种事件序列与后果。事件树分析由初因事件出发，确定事故发展的阶段，形成环节事件。事件可能有两种情况：成功与失败。事件树分析按照事故发展的顺序，从每种事件的成功与失败两种可能性出发进行定性分析，这种分析一直持续到可用树形图表示其可能结果为止。在定性分析的基础上，事件树分析还可进行事故序列发生概率的计算等定量分析。

(六) 因果分析。因果分析是故障树分析（表明原因）和事件树分析（表明后果）的综合。因果分析以事件树中失败的初因事件和环节事件为故障树的顶事件进行故障树分析；采用事件树动态分析系统的危险事件，预测系统可能发生的各种事故结果；以故障树对形成事故的机理进行微观分析，寻求控制事故的安全措施。因果分析中的故障树是一棵倒置的树，树根是故障，树叶是故障的原因。因果分析中的事件树也是一棵倒置的树，树根是初因事件，树叶是可能的后果。因果分析综合故障树和事件树可以得到因果分析图，从而可以清楚地列出事故因果链，从原因到危险事件直至后果。因果分析图是从危险事件出发，向下生长为表示原因的故障树，向上生长为表示结果的事件树。故障树分析和事件树分析两种方法各自保持其自然的发展程序，但又通过危险事件有机地联系起来，成为有因有果的因果分析。

(七) 专家调查法 在风险识别工作中很难采用实验分析及建立数学模型来进行理论上的推导，主要还是依靠实际经验和采用推断的方法。为了克服个别分析者经验上的局限性，采用集中一些专家意见的专家调查法在风险识别阶段是很有

用的。专家调查法的方法很多，并没有固定的模式，工作中可以根据实际情况灵活地采用或根据需要创造新的方法。

**阅读题** 专家调查法就是其中的一种。**阅读题** 专家调查法，是美国兰德公司发明的一种通信式调查方法，这种方法使专家“背对背”的发表意见，便于听取各方面专家的意见。具体的方法是：第一轮调查时，向专家说明调查意图，请专家广泛地发表自己的意见；第二轮调查时，把第一轮调查的结果整理列表，请专家修改和补充；第三轮调查时，对第二轮结果整理列表，请专家提出优缺点。每次调查结果用层次分析法进行计算整理。

**獐幕景分析法** 它是一种研究、辨识引起风险的关键因素及其影响程度的方法。一个幕景就是对某个风险事件未来某种状态的描述。这种描述可以在计算机上进行计算和显示，可用图表、曲线等进行描述。由于计算复杂、方案众多，一般都在计算机上进行。研究的重点是：当某种因素变化时，整个事件变化情况以及会有什么风险出现。就像电影上一幕一幕的场景一样，供人们进行研究比较。

**獐统计分析法** 收集历史上的有关数据，利用统计分析的方法求取类似事故发生的概率，即“依旧推新”，如事故时天气条件的计算、疾病发生率的估计等多用此方法。

**獐公式评价法** 通过对事故的模拟分析，推导或实验得出经验公式，利用公式计算出风险的可能大小，通过进一步实验和观测，对公式逐步修正。例如，有毒气体的泄漏，利用在类似条件下的大气扩散模式；污染物在水中的泄漏，利用水体迁移扩散模式；人体健康风险也可采用暴露危害计算公式。

**獐模糊数学法** 风险就是可能发生的危险，用模糊数学的语言来描述，风险是对安全的隶属度。城市灾害风险涉及复杂的因果关系，往往用精确的方法难以解决，风险在大与小之间没有明显的界限，模糊数学恰恰能够表达这种差异的中间过渡性，较为客观地刻画出风险的大小。如在输油管线的泄漏风险评价中，运用该方法就得到了比较满意的结果，其研究和应用正在逐步深入。

**獐图形迭加法** 单因素城市灾害风险评价结果有时采用图形表示，特别是风险危害后果在用上述方法难以计算时采用图形表达，如有毒危险性气体的泄漏扩散一般可绘制浓度等值线图。在风险综合评价时，将各个环境风险因素的分布图进行合理迭加，得到整个研究区域中不同功能区的风险相对大小。

## **獐獐獐獐** 风险评价指标

(员) 可靠性。指系统在一定时间、条件下，某一期望事件发生的概率。

(圆) 回弹性。指系统一旦发生破坏，恢复到满意状态或正常状态的历时特性。系统在遭受一次破坏中，如果破坏历时长，系统则恢复得慢，还可能对系统

产生更严重的后果。

(獾) 脆弱性。它是衡量系统遭到破坏强度大小的指标。对于某些系统的破坏,虽然破坏的历时不长,但破坏的深度过大,超过了系统承受的能力,也就是通常所说的集中破坏的方式,这同样要造成非常不利的后果。

## 8.2 风险决策

(貘) 回避风险的方法。回避风险是指人们放弃某些有风险性的事件,割断其与风险的联系,将风险的影响降低到最低限度,因而也不用将它与其他风险或获利情况作比较讨论。

(貘) 可靠性风险评价法。可靠性风险评价就是对事件发生的风险率进行比较,其基本步骤是:先计算出风险率,然后把风险率与安全指标相比较。若风险率大于安全指标,系统处于危险状态,两数据相差越大,系统越危险;对于危险系统需要采用控制措施。若风险率小于安全指标,则认为系统是安全的,没有必要或暂时没有必要采取控制措施。

(獾) 减少风险的费用——效益分析法。为了减少风险,就需要采取措施,付出一定的代价。付出多大费用,所能获取的效益如何,这就是费用——效益分析所要解决的问题。

## 8.3 减灾决策

### 8.3.1 减灾决策的特点

减灾决策就是在预测未来灾害之危险性及其灾情的基础上,所作出的应采取何种减灾措施或方案的决策。由于减灾决策的研究对象是“人——自然——社会”所组成的复杂系统,因此减灾决策具有三个鲜明特征:①风险大;②投资大;③与人民生命安全紧密相关。

### 8.3.2 减灾决策的过程

通常,人们决策行为模型主要包括:确定目标、收集信息、提出方案、方案优选以及决策,这一过程如图 8-1 所示

(貘) 建立目标的原则 选择和建立正确的目标是减灾决策的基础。减灾决策的目标,首先是确保或尽量减少生命损失,其次是尽量减少财产损失。具体而言,应考虑以下几条原则:

(貘) 信息完备原则。

(貘) 可行性原则。

(獾) 人身安全第一原则。

(源) 减灾效益原则。

Ⅲ设计方案 当建立目标，并取得一定的资料、信息后，就可以设计出多种预选方案，以供决策者或决策机构进行选择。

Ⅳ方案评价 当方案设计完后，要利用定性、定量、定时的分析方法，对各预选方案进行评价。它包括：所收集的资料和信息是否正确和完善，方案设计中使用的方法是否科学，方案的经济性、技术性等方面是否可行，是否违法等。

Ⅴ方案选择与决策 此阶段是减灾过程中最为关键的环节。决策者或决策机构要对各种方案从必要性、可行性、经济性等方面进行比较论证，然后选择最满意的方案拍板定夺。

Ⅵ反馈与控制 此阶段的任务在于准确而迅速地把减灾决策实施过程中所出现的问题反馈给决策者或决策机构，使其能够及时根据客观情况的变化，对决策方案进行相应的调整与修正。

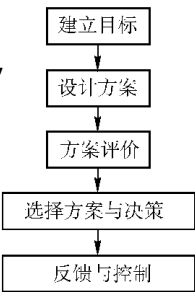


图 圆 圆 圆 减灾决策流程示意图

圆 圆 圆 圆 减灾决策方法

减灾决策的研究方法可分为硬决策与软决策两种。

硬决策也称为数学决策，一般方法是先建立方程式、不等式、逻辑式或概率分布函数来反映减灾决策问题，然后直接用数学手段求解，找出最优方案。

软决策又称为专家决策，主要指“专家决策”的推广和科学化，当然也包括一些硬决策的软化工作。

各种方法均适用于不同种类的决策，下面针对各种不同类型的决策，讨论不同的减灾方法。

Ⅲ确定型减灾决策方法 确定型减灾决策是指未来情况的发生为已知条件下的决策，其常用的方法有：

- (员) 用微分方法求极值。
- (圆) 用拉格朗日法求极值——条件极值。
- (猿) 用线性规划与非线性规划求最优值。
- (源) 用动态规划求各阶段决策过程的期望值等。

Ⅳ不确定型减灾决策方法 指未来的情况为未知条件下的决策，它是减灾决策中经常要遇到的决策问题。由于未来将要发生的灾害及可能造成的损失往往不能预先为决策者或决策机构所了解，所以决策者或决策机构常常面临着这一类型的决策问题。

在不确定型减灾决策的研究中主要是确定衡量方案优劣的原则。这个原则一旦确定，问题便不难得到解决。从不同角度出发可以确定不同的优劣原则，从而得到各种不同的决策方法，其决策结果也不见得一样。至于在何种场合下应该应

用哪种方法,要根据具体情况而定,不能一概而论。

**风险型减灾决策** 风险型减灾决策指决策因素中的未控制因素再具有概率变化的决策。该决策中未来事件可能发生的概率为

$$P_{ij} \leq P_{ij} \leq \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (8-10)$$

为了提高减灾决策的可靠性,可利用贝叶斯条件概率公式将风险型减灾决策转化为确定型减灾决策。

**马尔可夫型减灾决策** 马尔可夫型减灾决策是用近期资料进行预测和决策,特别是对于洪水灾害,马尔可夫方法有着良好的应用前景。

## 8.2 城市自然灾害风险分析

城市灾害风险分析属于系统分析,是用技术的、经济的、效率的观点综合评价、审查研究城市防灾系统的合理性以及系统设计成功的可能性,选择适当的可实现的最优系统或方案供决策者参考。

自然灾害系统是复杂的巨型系统,减灾方案必须建立在风险分析的基础上。盲目的减灾投入对发展中国家可能意味着灾难性的后果。

### 8.2.1 城市灾害风险分析的原则

(1) 客观性。城市灾害风险分析的目的是为了决策,评价的质量影响着决策的正确性。因此,须注意以下的客观性:评价资料的全面性和可靠性,防止评价人员的倾向性,评价人员的代表性,不能只邀请个别领域的专家,还要保证自由表态的可能、行动不受压力(如头脑风暴法、名义组法),也要保证不同层次评价人员的比例,另外,评价标准的制定也要具有代表性。

(2) 可比性。备选方案在保证实现系统的基本功能上要有可比性和一致性,既不能全面肯定,也不能全面否定,个别功能突出或方案内容新,并不能代表整体,要具有综合平衡和整体的观点。

(3) 系统性。评价指标要包括系统评价目标所涉及的一切方面,而且对定性、定位以及动态的问题也要考虑,以保证评价的全面性与系统性。评价指标还尽可能地要与国家和地方的方针、政策、法规的要求相一致。

### 8.2.2 评价的一般步骤

(1) 确定评价的目标、范围和对象。

(2) 围绕评价目标,分析影响评价指标的指标因素,构造评价指标体系结构图;

(3) 指标量化,即排除各因素量纲的影响,转化到统一的区间内,如 [0, 1]

员 区间，以提高因素的可比性。

(源 确定权重，根据各指标、因素在评价目标中的地位，以权重值区别不同的因素在系统评价中的相对重要性程度。

(缘 单项评价，即评价各对象在单一指标因素上的地位。

(远 综合评价，在单项评价的基础上，综合平衡，确定各评价对象的总体地位并排序，供决策阶段使用。

(苑 灵敏度分析，由于指标体系设计、指标量化、权重确定以及评价方法的选择都存在一定的不确定性，因此需要分析评价结果的稳定性。

### 图 9-1-1 评价指标体系的确定

图 9-1-1 指标体系的内容 指标体系的设计是否实际、客观、合理、科学，是决定综合评价成败的关键。指标体系的主要内容包括：

(员 政策性指标：包括政府的方针、政策、法令以及法律约束和发展规划等方面的要求，这在城市规划、管理和建设中尤为重要。

(圆 技术性指标：重大建设工程项目的地质条件、设备、设施等技术指标要求。

(猿 经济性指标：如方案成本、方案效益、建设周期等。

(源 社会性指标：如社会福利、居民文化素质、人口结构等。

(缘 效益性指标：如经济效益、社会效益、环境效益等。

(远 环境性指标：如大气污染、水体污染、固体废物等。

(苑 空间性指标：即与评价对象的空间地理位置和空间关系密切相关的指标，如选址中常用的交通、资源接近性等。

指标体系的设计是一件很困难但很重要的工作步骤，在建模者知识和经验有限的情况下，常须辅助以专家咨询法。

图 9-1-2 城市灾害指标体系设计 城市灾害风险分析问题不仅要考虑自然系统，还要考虑社会系统，所以在设计其指标体系时，包含了灾害指标和社会经济指标。图 9-1-2 给出了城市火灾风险评价的指标体系。

### 图 9-1-3 城市自然灾害风险分析的基本原理

自然灾害风险分析是对风险区遭受不同强度自然灾害的可能性及其可能造成的后果进行定量分析和评估。它涉及到以下三个主要环节：

(员 致灾因子风险分析。在灾害系统中，灾害源称为致灾因子。如地震、洪水均称为致灾因子。致灾因子风险分析的主要任务是，研究给定区域内各种强度的自然灾害发生的概率或重现期。

(圆 承灾体易损性评价。

城市火灾风险评价指标体系

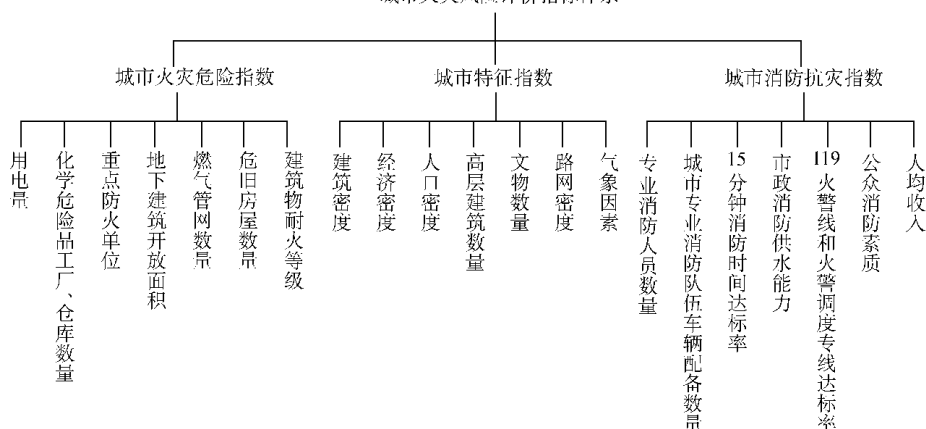


图 4-1-1 城市火灾风险评价指标体系

员 风险区确定：研究一定强度自然灾害发生时的受灾范围。

圆 风险区特性评价：对风险区内主要建筑物、其他固定设备和建筑内部财产，风险区内的人口数量、分布和经济发展水平等进行分析和评价。

獭 抗灾性能分析：对风险区内的财产进行抗灾性能分析。

(獭 灾情损失评估。

评估风险区内一定时段内可能发生的一系列不同强度自然灾害给风险区造成的可能后果。

自然灾害风险分析具体工作和各步骤之间的关系如图 4-1-2 所示。显而易见，自然灾害风险分析，依赖于一整套贯穿于从致灾因子到灾害影响的、能前后相连的模型。在国内，通常说的自然灾害风险，主要是致灾因子（~~深基地~~）风险，侧重于自然系统，因此，在地震工程领域，也叫危险性分析。有人进一步提出了 ~~砸裂此并建地~~ 的说法，即：风险等于致灾因子加易损性。广义来说，这是对的，但具体量化时，各环节内的不确定性不易组合。事实上，致灾因子是导致自然灾害风险的要素之一，易损性和社会经济特性决定了是否成灾。经济要素与损失大小关系密切，这方面的工作，国内一直研究得很少。所以，我们倾向于将自然灾害风险译成 ~~砸裂果旱地建地~~ 这与“国际减灾十年”的英文说法 ~~砸裂果旱地建地~~ 相一致。因此，自然灾害风险分析应归结为计算出 ~~砸裂果旱地建地~~ 而不是 ~~砸裂果旱地建地~~ 这就决定了自然灾害风险分析的基本原理是：由各灾种的专家提供给定区域内自然致灾因子的时、空、强的可能性数值，由防灾减灾工程师依据致灾因子强度，提供人类社会系统各种破坏的可能性数值，由经济学家和社会学家们依据破坏程度，推测各种损失的可能性数值，最后，由自然灾害风险分析人员将三个环节的可能性数值组

合起来，给出损失风险。这一基本原理可如图 图 所示。

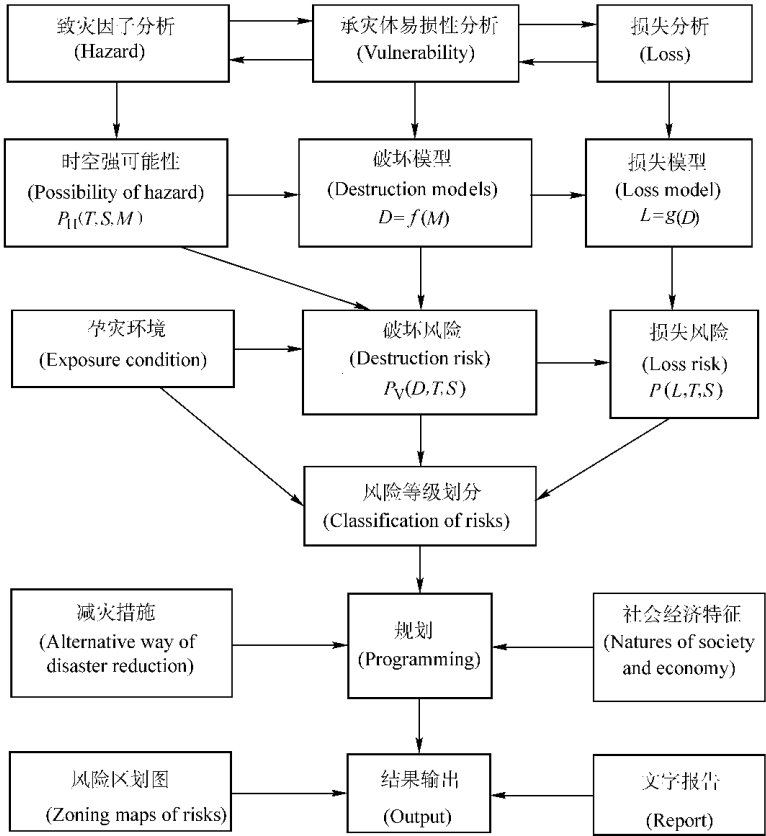


图 自然灾害风险分析流程

注：裁——灾害事件发生的时间；杂——灾害事件发生的地点；酝——灾害事件的强度；阅——承灾体破坏程度；蕴——自然灾害系统损失值

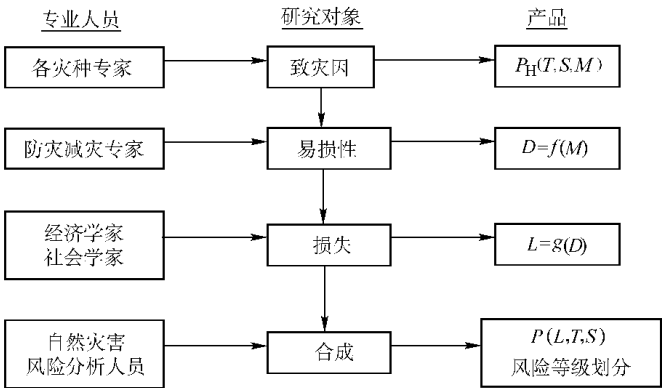


图 自然灾害风险分析原理



# 第 1 章 城市防灾减灾规划

## 1.1 城市防灾减灾规划概述

### 1.1.1 制定城市防灾减灾规划的必要性

城市是国家和区域政治、经济和文化中心。随着经济成长,人口及产业纷纷涌向都市,都市范围不断扩大,城市化进程加快,中心地区的城市功能与高层大型建筑日益密集,一旦发生大规模灾害,例如地震,其损失将可能无法计数。另外,灾害还是威胁城镇生存和发展的重要因素之一。灾害不仅造成巨大经济损失和人员伤亡,还干扰破坏城市各种活动的秩序,产生心理压力,导致心态失衡;另一方面,灾害的分布和强度直接影响城市的发展方向、规模及建设速度。

在灾害面前,人们并非束手无策,而是可通过采取事先的措施如制定防灾减灾规划消灭或削弱灾害源、限制灾害载体、保护或转移承灾体。1989年 9月在日内瓦召开的世界减灾大会上,联合国安南秘书长号召人们从今天起做一个改变,即从“一个引起反作用的文明进步到一个预防灾难的文明,因为未来灾害会因为人类不经济的开发实践而进一步恶化”。会议着眼于 21世纪和社会发展,提出了城市减灾。因此,都市防灾减灾成为近年来都市发展的重要课题,而根据城市灾害的特点和城市防灾工程现状,制定长期的、系统的城市综合防灾减灾规划,是实现城市综合防灾减灾的前提。

### 1.1.2 城市防灾减灾规划概念

城市防灾减灾规划是以社会科学和自然科学综合研究为先导,形成以地方应急管理局为主体的灾害预防、救援及灾后重建的行政管理体系以及以防灾保险为依托的社会保障机制。

长期以来,城市防灾工作一直不受重视,许多国家的城市在进行城市规划时,考虑防灾的内容都显得不足。我国的城市规划中至今尚没有一个系统、综合的防灾减灾规划,有的发达城市也仅有单灾种规划,如城市抗震防灾规划、城市防洪规划、城市消防规划、城市地质灾害防治规划、城市人防规划等专项规划。但一个城市往往受多种灾害的威胁,而各种灾害的发生发展都有各自的特点,同时,一种城市灾害往往引起其他次生灾害的发生,以致灾害相继,破坏严重。

提高一个城市的防灾能力旨在提高这个城市综合减灾科技与管理能力,它绝不仅仅是城市的抗震能力、防洪能力等单一指标的问题,而应强调协调能力的水

准。只有协调得好，这个城市的防灾总体规划才可行，城市也才有应付意外灾害风险的综合水平及能力。因此防灾减灾规划应与各种灾害的特点相适应，如抗震防灾规划不能适应防洪排涝的需要，消防规划不能满足抗震防灾的需要等。因此，编制综合防灾减灾规划的第一步就是编制各单灾种规划，各单灾种规划是综合防灾减灾规划的基础。由于城市灾害的多样性及其链式效应，如果各单灾种减灾规划自行其事，条块分割，将会造成各种防灾减灾规划之间极不协调甚至相互矛盾，并可能导致抗灾救灾设施和机构重复设置，进而造成人、财、物的巨大浪费，因此，编制综合防灾减灾规划就是要协调综合各单灾种规划，并与城市总体规划功能和目标相一致。换句话说就是：城市综合减灾规划作为城市总体规划中的专项规划，必须与其他专项规划相协调。如城市道路既供城市日常交通运输使用，也可供灾害发生时应急抢险和防火隔离带使用，所以，在制定城市交通规划时，必须考虑综合减灾的功能，城市综合减灾规划也必须以交通规划作为依据之一。

每一个城市均应根据其具体情况制定一个综合的防灾减灾规划，并设立实施这一综合防灾减灾规划的领导机构，形成横向的城市防灾网络系统。所谓综合防灾减灾就是强调系统化的综合分析决策，抓住“综合”的关键，至少协调好以下“十大”关系：

- (员) 经济建设与防灾减灾建设一起抓。
- (圆) 防灾、抗灾、救灾与恢复建设一起抓。
- (猿) 各行政管理部门应相互配合，实施工程与减灾管理的综合网络。
- (源) 灾害预测研究部门、工程建设、政府机构及学术社团相互结合。
- (缘) 促进灾害科学自然态与社会态的结合(含人的生理与心理)、形成交叉性课题。
- (远) 工程减灾的硬措施与非工程性减灾的软措施的结合。
- (苑) 数据观测、灾情资料、趋势预测的交流、发布警报与救灾措施的结合。
- (愿) 减灾与兴利相结合。
- (怨) 政府科技行为与社会公众安全文化活动相结合。
- (员园) 可持续发展与跨世纪减灾未来学的关系等。

经研究表明，无论是自然灾害或是由人为影响为主的人为灾害，还是人为决策失误型灾害，坚持综合防灾减灾的思想都是最根本的。

### 圆缘园 城市防灾减灾规划和城市规划的关系

《中华人民共和国城市规划法》明确规定：编制城市规划应当符合城市防火、防爆、抗震、防洪、防泥石流等防灾要求。可见，城市防灾减灾规划不是一个全新的规划，它是依附于城市总体规划的分规划。但它又是在传统的城市规划理论

及方法上的新发展,是总体规划的补充和完善,同时具有自身的完整性、独立性和系统性;缺少防灾减灾规划便无法构成完整的城市总体规划体系。城市总体规划要有长远的减灾规划和目标,提高安全防灾指标,增强城市防灾能力。在进行城市建设总体规划的同时,制定既具有独立性又隶属于它的二级规划——城市防灾减灾规划。

城市防灾减灾规划除了规划本身要符合国家标准以外,在规划布局上应当服从城市规划的统一安排,如城市的防洪、消防工程规划布局都要在城市规划中加以协调。另外,城市规划也要尽量满足城市防灾减灾规划的要求。例如,城市详细规划中要保持建筑物的合理间距,使街道宽度在两侧建筑倒塌后仍有救灾的通道;规划足够的绿地和空地作为灾时避灾场地等。

## 8.1 城市防灾减灾规划的目标

城市减灾规划应以实现以下各项为其主要目标:

(1) 城市在发生当地频度较高的各类自然灾害时,综合直接灾损指数在最小。

所谓综合直接灾损指数,其定义为:在一定地区(如一座城市)一定时间区间(如一年)内,各类自然灾害直接造成的各类破坏后果(如人员伤亡、房屋倒塌、资产焚毁)按照一定的数学模型或广义量化关系式折合成以可比价格衡量的相应的经济损失,与某给定参照值的比值。即可用下式表示

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot W_i}{C_0} \quad (8-1)$$

式中, $C_i$ 是第  $i$  类灾损的经济转换模型, $W_i$ 是第  $i$  类自然灾害; $C_0$ 是给定的,以某一年某城市的综合直接灾损经济转换值(以  $\sum_{i=1}^n C_i \cdot W_i$  计算),在可比人口或可比财政收入、工农业总产值、国民总收入等基础上建立的,据规划城市状况加权修正后的参照值。

(2) 城市在发生任一类型的自然灾害破坏时,破坏后果不易旁延、后延、次生它灾,或灾害链易于被人为中断。

与直接灾损不同,旁延灾害、后延灾害、次生灾害的产生有时与人类的行为失当或防范低能有很大的关系;而且它们也是较易于被人们终止或防止的。例如,火灾发生点周围有密度较大的较易燃的人工建筑、构筑物时,火灾势必易于向周围地区扩散(灾害旁延);大地震发生后,若因街巷过于狭窄而被瓦砾堵塞,路网结构不合理,且受地震破坏后与避难场地难以匹配等原因而使灾民不能及时地撤离危险地带,他们便可能受到余震的伤害,伤员得不到及时医护,便增加了地震死亡率(后延灾害);因有毒化工气体的生产、储备容器被大滑坡破坏后引起有毒气体泄漏,危及位于下风口的城市中心区(次生灾害)。具体的例子就有,1995 年 1 月日本关东 8 级大地震后发生了次生火灾,因城市规划不合理,无法

扑灭大火，以至有数万人被烧死，数十万栋房屋被烧毁，最后东京烧毁了三分之二，横滨几乎全被烧光。

(獐 城市在发生任一类型的自然灾害破坏时，不至于瘫痪。主要生命线系统的基本功能得以维持，城市职能机构仍能保证社会动态系统的“活力”与完整性。

1976年海城大地震时，只因大石桥二次变电所一个蓄电瓶被震翻，就使水电设施并未严重破坏的营口市停电停水，给救灾工作与社会、经济造成了不应有的损失。唐山地震后，因主要道路皆被破坏，重型救灾设备不能在紧急救灾期内及时运进现场，以至必须靠人力搬开沉重的楼板，救援被压埋的伤员，救灾效率难以提高。诸如此类的生命线或社会职能因素关键部位的防灾环境较弱，某些社会维系条件的耐灾力差（例如，震断了几座桥梁或道路就切断了与外围地区的陆地联系；震坏几个水管就使一大片地区的供水中断等）的现象皆可通过城市规划得到较大的改善。

(源 城市在发生任一类型的自然灾害破坏时，救灾、避灾不至于因支持条件失效而“卡壳”。

1992年 5月 5日圣·萨尔瓦多地震时，某建筑物废墟中至少有 13人 被地震次生大火所围困，因水压不够，泡沫灭火剂又不适用而使救援人员束手无策。

(缘 救灾、避灾行为可以最便利、最经济地进行

例如，多功能救灾预备站按照图的一般绝对中心问题的解法进行选址，以保证其按最迅捷的方式对服务范围内的市民实行救助。

## 图 城市防灾减灾规划的基本原则

城市减灾规划评价减灾规划优劣的基本着眼点，需遵循以下几个原则：

(员 防灾减灾与城市社会发展是有机的统一。

一方面，城市化发展应当与减灾投入相适应；另一方面，减灾规划必须尽量有利于城市其他社会职能的实现，有利于社会经济发展目标或其他城市规划任务的实现。一些减灾必备的因素，如地震避难场地，救灾预备站应该还有其平时的用途。

(圆 防灾减灾应与城市环境协调发展。

防灾减灾规划应为城市建设与城市日常生产、生活活动及减灾活动创立低耗、高效的环境条件。

(獐 防灾减灾规划应具有系统性并可适应防灾减灾的动态发展趋势。

城市灾害虽然有多种，但其危害各不相同，发生频率不同，而且防治的难易程度和防治效果也不同。所以，在制定城市防灾减灾规划时，应明确基本目标，在总目标下划分若干阶段性目标，区分轻重缓急，区别对待，并根据城市发展的

阶段水平和能力,采取分阶段实施的办法;另外,灾害是生态因子在内外力作用下的量变异常现象,是生态系统自我调节以求实现系统平衡的一种方式。由于对灾害形成的内力作用,人们无法改变和抗拒,同时,对其外力作用的影响和调控能力是有限的,加之对一些灾害发生的机理在短期内尚无法弄清楚,从这个意义上讲,灾害是一种永恒现象,防灾减灾工作也应该是一项永恒性的内容,所以要保证城市防灾减灾规划与城市总体规划一样是发展和动态的,要坚持定期补充和修订。

(源 在专业规划中体现防灾意识。

由于城市总体规划的落实是通过专业规划实现的。只有建设规划和设计考虑防灾需要,才可能使防灾这一基本思想落到实处。如城市道路宽度的确定,除满足交通流和地下管网敷设的要求外,还要考虑防灾救灾的需要。因为道路可以有效地阻止火灾蔓延,起到防火隔离带的作用,同时又是救援工作的基本条件。事实证明,地震灾害死亡人数中,有相当一部分人是由于得不到及时有效的抢救而死亡的。

(缘 防灾减灾规划应具备全局性和独立性。

灾害具有区域性的特点,尽管不同灾种表现出的规律不同,例如,地震灾害的发生与断裂带分布有关;洪涝灾害主要与流域里降水总量、降水强度、降水时态特点及河流的水文状况有关;人为灾害大多与城市产业结构及生产力布局的特点有关,但是灾害的发生受区域环境条件的制约,灾害的危害会波及区域的其他地方,也是正常现象。所以,城市防灾要建立在区域防灾规划的基础上,并按照整体部署,采用统一协调的防灾标准和防灾措施。

由于城市的集聚特征决定了城市在区域性防灾中的地位 and 作用。它既是防灾的重点,也是救灾的中心。在一个城市里,人口、财产等密集程度也是有差异的,因此,在防灾指导思想上不仅要承认这种差异性,而且需要明确给予必要的“优惠”,适当地提高城市或其中某些地段的防灾标准,考虑相应的防灾应急系统。对综合危险性较大,灾害综合损失期望值较高的地段,在规划时应注意在其附近重点配置防灾基础设施,重点检测和加固维护该处的生命线系统,尽量避免在该区域内建设重要建筑和企业,降低其财产分布,以减少灾害造成的经济损失,而且还可以利用城市原有的自然景观和人文景观,在该区多开辟公共绿地,一方面可改善城市生态环境,另一方面也增加了城市遭受灾害时的疏散场地,提高城市的综合抗灾能力。

## 4.1 城市防灾减灾规划的主要内容

城市的防灾减灾规划,是指城市规划中的防灾减灾内容、内涵或有关方面,虽然它在城市技术性基础设施规划中占有重要的一席之地,但却远非局限于此。

实际上，它渗透到城市规划的方方面面，涉及到总体规划与专业规划的每一个环节。

广义的城市防灾减灾规划按灾害发生的前后时间可分为防灾规划和救灾规划两部分。

**防灾规划** 城市防灾规划的目的是有准备、有计划地预防灾害。其主要内容为以下几方面：

(一) 要科学选择城市建设用地，制定与自然共生存、维护生态系统的土地利用规划。

选择城市建设用地，要从城市用地评定做起，即在调查城市各项自然和社会基础资料的基础上，对可能成为城市的发展建设用地的地区进行科学的分析与评定，确定城市用地在防灾上的适用程度。通过选址避开自然易灾地段，例如避开易产生崩塌、滑坡的山坡的坡脚，易发生洪水或泥石流的山谷的谷口，易发生地震液化的饱和砂层地区，易发生震陷的填土区或古河道等。如果选择得当，就可以节约大量资金，提高城市安全性，加快城市建设速度；反之则有可能带来许多后患，一旦发生灾害，损失将大幅加剧。

(二) 要合理考虑城市各项用地的功能布局。

对城市用地进行综合评定后，要解决好用地的功能布局，在布局中不但使其达到经济合理、使用方便，而且要符合防灾抗灾的要求。通过合理规划布局避免建城时产生人为的易灾区。如工业用地需特别考虑防火、防毒、防污染及遇到自然巨灾及气候变化的适应空间；使易爆物仓库区远离易燃物集中处与人口、建筑物密集区；使易释放有毒、有害烟尘、气体的单位建于下风口等。

(三) 建立适于防灾的城市单元结构布局，以实现较优的系统防灾环境。

(四) 进行城市抗灾能力的评估。如评估城市社会经济状况、防灾设施现状等。

总的说来，城市防灾规划的最主要考虑点是：优选地质、地貌等自然环境；规划有利于避灾、防灾、抗灾、救灾等社会功能与结构布局；强化某些社会功能性网点并赋能为减灾隐性“韧”环境；根据实际情况插补减轻重大自然灾害共适性特殊建造物等。

**救灾规划** 城市救灾规划是在临灾或灾害发生时以及灾后所采取的抗灾、救灾措施与规划，它是广义上的城市防灾规划内容的重要部分，因为就某些大的自然灾害而言，即使有了预防规划，仍会造成严重的破坏后果，给人民生命财产造成或多或少的损失；如果有了救灾规划，届时才有可能有组织地、系统地进行救灾抢险，及时控制混乱局面，进一步减少城市灾害损失。其主要内容为：

(一) 规划生命线系统的最简抗灾性功能覆盖网络。

规划生命线系统的最简抗灾性功能覆盖网络，即是使城市的生命线系统形成

有机的综合网络。如城市的道路系统是城市结构布局的骨架，是城市综合防灾减灾的重要设施，对城市防灾应急有重大影响，若从抗灾要求看，在城市的总体规划中必须将城市的主次干道加以有机配置，并与外界和疏散地区相连接。城市道路也必须保持一定的宽度，以保证在遭受灾害侵袭造成两侧建筑倒塌时，依然能保持道路运输的畅通，而且不可没有防灾专用道。

(圆) 要综合开发利用城市地下空间。

地下空间具有节地、安全、抗震等优点，开发地下空间，一方面要搞好总体布局，要将城市的抗震、防火、防空等总体布局结合起来；另一方面要将人防系统与民防系统结合起来；同时必须解决好重要地区的地下设施的综合布局，形成网络，以达到有效地分散地上交通，增加活动空间，提供避灾场所等目的。

(猿) 规划城市结构、设计抗灾目标以尽量防止灾害链节点的存在。

(源) 规划多功能临时性救灾“中转”场地。如避难场地、救灾物资集散地、临时医护站等。

(缘) 规划救灾指挥系统。

(远) 规划救灾支持环境。

(苑) 要有应急管理方案。其主要内容是突发性事故灾害的应急监测、应急措施、应急对策等。有资料表明：有效的应急方案可将事故损失降低到无应急方案情况下的 远缘。

防灾规划与救灾规划中有局部重合，且在进行规划时二者是统一的。

总之，城市防灾减灾规划的核心内容是在搞清城市灾害性质及背景的基础上，对城市环境治理及城市土地利用进行科学的控制。具体的方法是：通过对灾害形成与发生机制、影响规模的分析，制定城市防灾的总体规划、灾害数据库与灾害专题系统、灾害的中长期预测模型与防灾地理信息系统 ( 鄢鄢)，进而建立城市防灾管理的决策支持系统 ( 鄢鄢鄢) 包括数据库、模型库及人机对话管理系统、防灾预警系统与有关的灾害控制和治理法规 ) 。

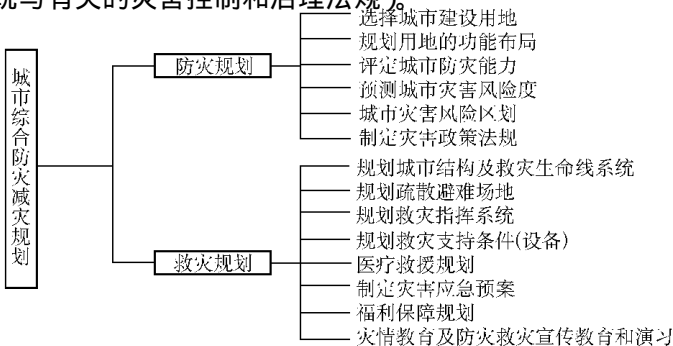


图 鄢鄢鄢 城市综合防灾减灾规划的主要内容

城市综合防灾减灾规划的主要内容如图 9-1 所示。

9.1 城市防灾减灾规划的方法

9.1.1 经验法 在缺少灾情资料的城市，其防灾减灾规划的依据是以定性和相对量为主。为使防灾规划合理和安全可靠，就需借助与之条件相仿城市的经验，并和城市历史上防灾效果结合在一起，判断哪种或哪几种灾害是最主要的及其影响范围和分布情况，哪些可通过适当措施防范，哪些需要治理等，以此来绘制城市避灾区、治理区、应急疏散区。

9.1.2 灾害频度分析法 通过对城市历史上各种灾害出现的次数和周期规律的统计分析，按照灾种出现的频度排序，并考虑对灾害发生机理可能的调控能力进行权值处理，求出城市防灾的重点，然后进行具体规划。目前有些城市灾害虽然危害很大，但出现的周期很长，甚至历史上只有过一次，而且目前还不可能治理和预防，那么就无需“因噎废食”，应把主要精力放在频度高和能够调控的灾种上，这样才能保证城市获得一个较长时期的安全发展的外部环境，使城市建设从“惶恐不安”、“应接不暇”的防灾工作中解脱出来。

9.1.3 灾害影响度分析法 此法是以减轻和控制灾害危害损失为目标的一种防灾规划。任何一个城市在发生灾害时和灾害后都会造成损失，一般以伤亡人数、经济损失量表示。灾害影响度是灾害对一定区域社会、经济所产生影响的大小，是致灾因子和承灾条件（或承灾体）的综合体现。对于致灾因子的强度，城市是无力调控的，因此，防灾主要是提高城市的承灾能力，即根据城市的实际情况制定出灾害防治的指标体系。这种指标体系不仅要反映对不同灾害的抗御能力，而且应当注重体系的整体效益，注重指标体系中的“软件”质量——灾害管理水平。

9.1.4 地域重叠法 此法是以灾害危害范围为依据的一种防灾规划。首先，要编绘各灾种灾害危害的地域分布图，城市人口和财产密度分布图，城市路网密度图，城市医疗、消防、人防等防御急救系统分布与能力图等，然后进行图形重叠，这样便可获得不同灾种的灾度与防救能力综合图，最后将各灾种的这种综合图再次重叠，即获得城市灾害灾度与防救能力综合图。根据重叠情况建立防灾等级，并使之与城市总体规划的防灾目标比较，找出差距，提出强化治理措施或者修订城市总体规划，以期达到城市防灾的总目标，这种方法由于工作量大，需借助计算机制图或遥感分析等现代技术，同时，还需要城市数据库提供资料，因此，在现阶段城市防灾规划中尚难以运用。

9.2 系统动力学 (Systems Dynamics, 缩写为 SD) 系统动力学是由美国麻省理工学院 (MIT) 的詹姆斯·米纳斯基教授于 20 世纪 60 年代创立的。系统动力学是一门分析研究信息反馈系统的学科，也是一门认识系统问题和解决系统问题的交叉学科。



叉性的、综合性的新兴学科，它是系统科学中的一个分支，也是一门沟通自然科学和社会科学等领域的横向学科。

城市系统具有动态性、非线性和随机性，这类问题若用经典的、常规的解析法，不但非常困难，甚至毫无可能，而系统动力学则是解决这类问题的有效方法；另外，城市系统中存在很多不能定量的因素，如各种方针政策，各种方案的社会、环境效益等，系统动力学可将这些较难量化的因素放入模型中进行仿真，将人的主观判断、经验与逻辑推导结合起来，在仿真中统筹考虑，而不依靠大量的统计数据，这对于资料不完整的城市来说，具有重要意义。

系统动力学能在实验室模拟自然灾害的结果，优选减灾决策方案。当然，系统动力学模拟优选时，应排除主观判断的误差。为了加大对重大自然灾害预报工作的最佳预防，加大模拟试验次数，认真评价数学建模，筛选评价模型，确定指标权重等，分析应用主成分，将防灾减灾方案优劣排序，理解优选过程中的系统机制，实现人机对话。

## 8.2 城市综合防灾减灾规划的编制

防灾减灾规划应包括全市防灾减灾总体规划、行业防灾减灾规划、分灾种防灾减灾规划和区域防灾减灾规划等，这当中以全市性规划为主，专业性和区域性规划为辅。城市综合减灾规划是城市总体规划的重要组成部分，目前我国尚未规定城市防灾减灾规划的编制程序并严格界定其范围，这里参照日本城市防灾减灾规划编制的程序提供一些相关思路。总体讲，城市防灾规划要依据《城市规划法》及国家防震、抗洪、气象、环保等方面的法律、法规。基本程序是：①根据不同城市灾害的特点，确定城市防灾的指导思想及目标，如促进防灾地域的再开发等；②在广泛的城市灾害危险度测定调查研究基础上，制定城市危险度评定图；③根据城市最大危险度分析，划定避难地、避难道路及防灾缓冲地带，从而核定出城市的“安全岛”；④遵照各项防灾技术法规，无论对新区还是旧城按防灾级别统一规划，采取减灾措施。

防灾减灾规划的内容应包含历史灾情调查，防灾减灾效益和现有防灾减灾能力评估、存在问题、防灾减灾目标、防灾减灾行动、防灾减灾体系建设、防灾减灾优先项目建设和可行性分析等。首先，城市防灾减灾规划需建立在以下几个基础上：

(1) 城市历史与现状，城市性质、规模以及其政治、经济、人文特征。

(2) 城市发展目标。

(3) 当地灾害史研究，各类自然灾害趋势性预测与规律分析。

(4) 当地自然环境、人工环境调查、监测分析与评价，社会系统与单元灾害易损性分析，自然灾害与防灾、救灾区划。

图 1-1-1 编制城市防灾减灾规划的模式

城市综合减灾规划的编制在总体上应遵循以下模式及程序，如图 1-1-1 图 1-1-2 所示。

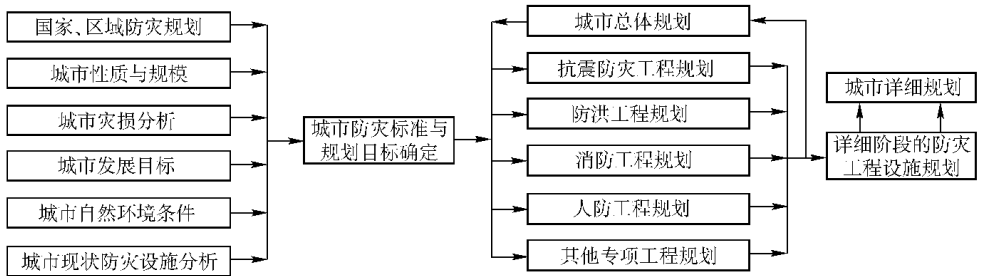


图 1-1-1 城市防灾减灾规划模式

**1.1.1 灾害调查分析** 主要是利用灾害历史资料及现场调查等方法，着重调查历史上曾经发生过的重大自然灾害和解放以来发生的各种自然灾害。调查各次灾害发生的经过，灾害预测预报、抗灾救灾过程、受灾损失情况和分析灾害发生的原因、频度、烈度等特征，寻找灾害发生的规律。定量统计受灾损失（包括人畜、设施、经济损失估价），按受灾损失严重程度，排列出主要自然灾害的次序。利用现代科学成果与研究方法，对灾害的成因和发展趋势进行初步分析，要特别注意分析频度较低的特大自然灾害，预测次生灾害和新灾种的发生可能性，并对目前灾害防御现状进行评价。

**1.1.2 详细普查当地资源概况** 普查的内容包括当地地域、地理位置、地质地貌、气候、水、土地资源，植被、人口、交通、邮电、社会经济、环境等有关情况，以及社会经济发展规划或预测的远景情况。

**1.1.3 对防灾工程的调查** 包括河流、涵闸、桥梁、堤坝、水库、湖泊、防护林、消防工程，防灾组织（防汛防旱、防风、防台风、防海潮、森林防火指挥部等机构），气象、水文机构、设施，厂矿、机关、公共建筑、文物、古迹、居民住宅等结构、设施情况，所有有关防灾工程的管理概况。

**1.1.4 对已建防灾设施实际防灾能力进行定性定量分析** 着重分析总结解放以来兴建的各种防灾设施的防灾能力和当地群众在政府领导下，在防灾、抗灾和救灾中已经取得的巨大成就，积累的丰富经验。同时应分析现有防灾设施的不足和存在的问题，全面评估城市规划设计潜伏的致灾隐患，并针对性地提出加固改造和续建配套要求。

**1.1.5 灾害预测** 预测是科学决策的基础，预测—规划—决策所形成的完整体系

系是整个规划工作的核心。

灾害预测是在灾害调查和现状评价基础上，结合城市建设和社会经济发展规划，通过综合分析或一定的数学模拟手段，推求未来灾害发生的期望经济损失和人员伤亡的状况。预测的主要目的是为了了解灾害发展的趋势，减少灾害损失，寻求减灾与社会、经济协调发展的途径。灾害预测分三个步骤：

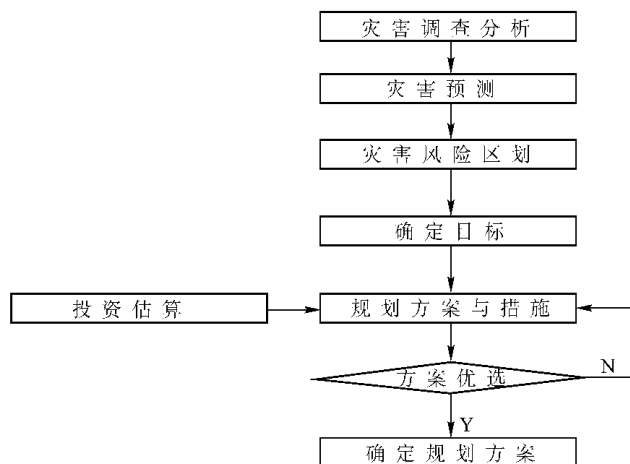


图 4-1-1 城市防灾减灾规划的基本程序

（员）灾害危险性分析。灾害危险性分析主要是弄清未来灾害特点、严重程度和频度、可能影响的范围以及袭击的时间和可能持续的时间等。用地点、频度和强度等参数或图形勾画出危险程度，包括危险性描述、参数预测和险势图等资料，供规划人员使用。危险性估计开始于资料、数据和图表收集，然后分析整理，最终以灾害发生的概率等形式表示出来。就地震而言，危险性估计包括：地震目录、地震震中分布图，地震地质构造图，以地震烈度、地震动加速度（速度、位移）反应谱等参数表示地震区划或地震小区划、地震液化势图等。对洪水灾害危险性估计，通常用图和序列淹没阶段来表示，从图中可以得出淹没面积、洪水流向、排水方向、淹没开始日期、淹没持续天数、淹没深度、淤积厚度、淤积面积和侵害面积等参数。

（圆）城市灾害易损性分析。所谓城市灾害易损性分析，是分析城市在面临灾害时，受到伤害或损伤的程度及敏感性，它反映了城市对灾害的承受能力和敏感程度。城市灾害易损性分析的目的是从城市整体构成角度出发，找出薄弱环节，以便有所侧重地采取综合减灾措施。另外，城市灾害、城市建设和土地利用模式随社会经济发展和时间的推移而发生显著变化，因此有必要了解城市现在及将来的社会经济和人文地理情况，以确定未来城市易灾薄弱环节。

(獭) 经济损失和人员伤亡。经济损失和人员伤亡估计是灾害预测的核心内容,灾害危险性分析、城市灾害易损性的最终归宿是经济损失和人员伤亡的期望值,它是城市综合减灾规划的依据。

(潺) 城市灾害风险可接受水平的确定。由于灾害事件的程度不同,其风险水平也不相同。确定以某种为人们所接受的风险水平作为编制防灾规划的决策依据即是灾害风险的可接受水平的评判过程。从严格的逻辑意义上讲,任何事物所面临的灾害风险不可能降到零,人类无论居住在何处,无论从事何种建设项目,都面临着灾害的威胁,人类只有通过提高各种经济活动过程中防灾标准,才能降低灾害的损失。因此灾害风险的可接受水平的评判就是人类经济活动过程中防灾设防标准的确定。

灾害事件中人们最关心的是人员伤亡和资源等物质损失,因此灾害风险可以按人员伤亡来确定设防标准,也可以按物质损失来确定设防标准。

员) 人员伤亡的可接受水平。在正常情况下,人的自然死亡率是年龄的函数,如果灾害造成死亡率的风险超过人口自然死亡率水平,那是人们不可接受的。通过预期措施将死亡率降到人口的自然死亡率标准以下,则是社会可以接受的。

圆) 物质损失的风险的评判标准。物质损失可以核算成经济损失,它的标准易于确定,一般采用补偿极限标准。随着安全防护措施的增加,灾害事件发生的风险降低、损失减少,当达到某一水平后,追加投资从减少灾害损失中得到的补偿极微,则此时的灾害风险水平可作为社会接受标准。如果过分强调降低灾害的风险水平,以致所需花费的代价太大,则是不现实的,也是社会所不能接受的。

遑) 灾害风险区划 不同的灾害在城市的不同区域发生的频度、强度和造成的损失是有区别的。确定城市各区域各种灾害的风险度是综合减灾规划标准和措施确定的依据。风险区划的关键是确定现在和将来人口和建筑物的数量与性质,及其处于一定强度灾害威胁下所承担的风险度。

彳) 确定综合减灾目标 城市综合减灾目标的提出要与城市建设和经济发展的战略部署相协调,同时还要与未来可能发生灾害的情况和经济实力相适应。综合减灾目标的提出需要经过多方案比较和反复论证,在规划目标最终确定前,需提出几种不同的目标方案,经过具体措施论证以后,才能确定最终目标。

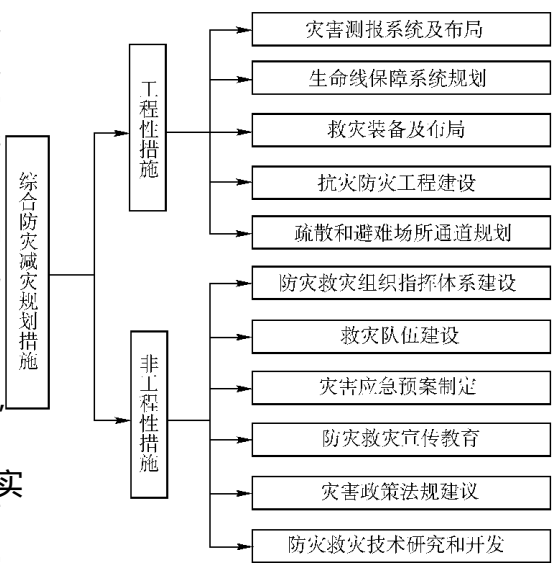
愿) 综合减灾规划措施 综合减灾措施是规划的核心内容。从措施的性质上划分,它应包括工程性措施和非工程性措施,具体内容如图 圆獭原所示。

遑) 费用—效益分析及方案优选 根据灾害经济学理论,综合减灾效益是指在投入经费后,减少灾害造成的经济损失和投入经费之差。由于灾害的发生还会引起人员伤亡,影响社会稳定,通过减灾资金的投入不但可以减少灾害造成的经济损失,而且可以减少人员伤亡,安定民心,因此在费用—效益分析时,也应考虑这两方面的因素。在每一规划方案确定后,必须对其进行投资估算,对可能取

得的效益进行预计，以便对已确定的多个方案进行优选。如果已确定的多个方案通过分析均不合适，需要重新考虑综合减灾的目标或重新确立方案，直到方案可行为止。

编制 城市防灾减灾规划图的编制 城市防灾规划图是区域专题地图，应反映城市各种防灾设施，如灾后人员疏散场所及通道、垃圾和污水处理场所、各种防灾建筑等，其制图规范与区域规划图相一致。

图 4-1-1 城市减灾规划的主要内容



(员 由政府出面组建“城市综合防灾减灾规划”领导班子和工作班子，也可委派科委或某个主管部门牵头成立工作班子进行工作。工作班子应由一定资历、热心于减灾事业的领导干部和专业性广泛的有关专家、科技人员组成。

图 4-1-2 城市综合减灾措施的主要内容

(圆 确定城市减灾目标、实施标准与途径。城市的防灾减灾规划目标和任务，应根据全国减灾规划目标，结合当地实际提出，并应提出分年目标和任务计划。

(猿 结合总体规划，进行城市减灾结构分区。

(源 根据城市社会与环境间的复杂的动态特征关系、城市发展目标与减灾目标等，在减灾结构分区与减灾环境评估的基础上，应用专业知识与运筹学、系统论、信息论或其他有关的理论与方法，规划具有较高抗灾能力与功能覆盖能力的道路、水电供应或其他生命线工程的主干网络，以及最重要的救灾支持条件。

(缘 进行全方位体现防灾减灾意图的城市详细规划。无论是建筑类型，还是建筑密度、高度等控制指标的总平面布置，道路系统的规划设计，工程管网的综合规划与竖向规划，无不与防灾减灾目的的实现有密不可分的关系。故需把防灾减灾意识渗入到城市规划的指导思想中去。例如，由于地震波的共振效应，在某些高度时，建筑物的地震易损性比在其他高度时大得多。城市管线的布局、连接关系、断面特征、结构形式、物流控制，所处的地质环境等更是决定了这些建筑、构筑物的防灾能力及其支持防灾、救灾的职能是否能得以顺利地高效地实现。

(远 进行防灾、救灾的计算机模拟，作投资效果分析，进而改善与补充防灾

减灾规划。

## 四、城市灾害应急预案的编制

城市灾害应急救援预案又称城市灾害应急计划，是城市灾害预防系统的重要组成部分，是政府或企业为了降低事故或灾害的后果严重程度，以对灾害源的评价和事故预测结果为依据而预先制定的灾害控制和抢险救灾方案，是应急救援活动的行动指南，以其指导应急准备、训练和演习，乃至迅速高效的应急行动。应急预案的总目标是控制城市灾害的发展并尽可能将城市灾害对人、财产和环境的损失减小到最低限度。统计表明，有效的应急系统可将城市灾害损失降低到无应急系统的近半。

### 一、编制城市灾害应急预案的要求

良好的城市灾害应急反应预案对于减轻城市灾害损失，提高城市居民的生活质量有着至关重要的作用，并且规划的有效性在某种程度上反映了政府的管理水平。对城市灾害应急反应预案应有以下认识：

(一) 灾害应急反应预案（以下简称预案）应是一个连续的过程。预案不是一个有着明确的时间上终点的行动，而是一个连续不断的过程，因此，需要不断地根据变化了的情况及时作出调整和修改。某些情况下，一个过时的预案比没有预案还要糟糕。

(二) 预案应建立在对未来情况合理估计的基础上。预案的编制过程主要包括预期未来可能出现的问题和选择适当的解决办法两部分。预案并不企图防止各种情况的发生，而是寻求处理将来可能发生的各种事件的办法。

(三) 预案的目的在于采取正确的措施。预案有时被认为是一种提高对紧急事件反应速度的机制，但是正确的作出反应比提高反应速度更加重要。

(四) 预案应合理地预期人们在灾害中的行为。预案应当根据人们在正常环境下的一般行为估计他们在紧急环境下可能采取的行动，而不应期望人们在灾害发生时急剧地转变他们一贯的行为方式。

(五) 预案应当基于已有的知识和经验。预案者应当知道灾害发生时实际将出现的情况，并针对这种情况作出预案。

(六) 预案首先应当确定出必要的原则。人们不可能对未来所有的情况都作出安排，因此预案的制订尽管不应完全忽视所有的细节，特别是组织层次问题的细节，但是首先要确定的是用于处理各种情况的一般原则。

(七) 预案在某种程度上是一种宣传教育活动。预案者应当使可能卷入灾害的人们和组织了解他们在紧急状态下将面临的环境、将会有哪些情况发生、应采取何种有效的反应措施等。

(愿) 预案需不断克服执行的阻力。对大多数人来说, 预案的优点不是不言自明的, 因此不应该设想预案一经提出就会被多数人接受, 更多的情况是需要介绍和宣传。

(怨) 应急预案应当简明扼要, 以便于有关人员在应急行动中使用。可将应急预案中的整体应急反应对策和应急行动放在应急预案的文本中, 具体实施程序和应采取的行动放在预案附录中并做详细说明。另外, 应急预案应有足够的灵活性, 以适应随时变化的实际情况。

(员) 应急救援组织应具有系统性。由于目前体制上的原因, 我国的灾害管理和应急救援基本是分地域、分部门、分灾种进行的, 这使得整个城市的防灾、救灾组织不能高效协同作战, 发挥最大的救灾能力, 在遇到重大灾害或突发事件时不能及时有效控制事故的发展和进行应急救援。因此, 城市防灾减灾应急预案中组织机构的设置, 需要遵循系统论的原则, 建立以市政府为核心, 由公安、防汛抗旱、军队、医务、抗震、人防、城建、交通、供电、电信等部门组成的城市防灾减灾综合指挥体系和应急救援系统。

(员) 应急救援组织应具有动态性。城市在发生重大灾害或突发事件时, 应急救援工作十分复杂, 不仅需要各类抢险、急救队伍立即进场, 而且要保证各类救援物资及时供应, 因此预案中要按照动态性原则合理配置人员、物资。同时要按照层次性原则, 合理配置城区内的医疗卫生设施, 提高城市医院的防灾救护能力。

## 四、应急预案的类型

根据应急预案的对象和级别分类 可分为下列四种类型:

(员) 应急行动指南或检查表。针对已辨识的危险采取特定应急行动。简要描述应急行动必须遵从的基本程序, 如发生情况向谁报告, 报告什么信息, 采取那些应急措施。这种应急预案主要起提示作用, 对相关人员要进行培训, 有时将这种预案作为其他类型应急预案的补充。

(圆) 应急响应预案。针对现场每项设施和场所可能发生的事故情况编制的应急响应预案, 如化学泄漏事故的应急响应预案, 台风应急响应预案等。应急响应预案要包括所有可能的危险情况, 明确有关人员在紧急情况下的职责。这类预案仅说明处理紧急事务的必需的行动, 不包括事先要求(如培训、演练等)和事后措施。

(猿) 互助应急预案。相邻企业为在事故应急处理中共享资源, 相互帮助制定的应急预案。这类预案适合于资源有限的中、小企业以及高风险的大企业, 需要高效的协调管理。

(源) 应急管理预案。应急管理预案是综合性的事故应急预案, 这类预案详细

描述事故前、事故过程中和事故后何人做何事、什么时候做、如何做。这类预案要明确完成每一项职责的具体实施程序。应急管理预案包括事故应急的源个逻辑步骤：预防、预备、响应、恢复。

根据制定的部门不同分类 主要分为政府部门的应急预案和企业的应急预案。

(员) 政府部门的预案主要是针对其管辖范围内的重大灾害和突发事件的救援，其侧重于应急救援整体实施的部署和协调工作，是一种宏观的具有指导性的应急预案。政府部门的应急预案主要是应急程序，不含具体作业层文件，但应对政府各部门和企业的应急预案提出制定要求。

(圆) 企业部门的应急预案是针对本企业内部所有可能发生事故的应急救援，是针对企业的具体事故制定的应急预案，是一种微观方面的预案，其内容十分具体，针对性非常强。

为了充分发挥政府应急预案和基层企业应急预案的作用，应在编制预案时，将两者相结合，使政府预案真正起到指导和协调作用，企业应急预案更符合实际也更有效。

### 应急预案 应急救援预案的分级

城市灾害重大事故应急预案由企业（现场）应急预案和现场外政府的应急预案组成。现场应急预案由企业负责，场外应急预案由各级政府主管部门负责。现场应急预案和场外应急预案应分别制定，但应协调一致。

根据可能的事故后果的影响范围、地点及应急方式，建立我国事故应急救援体系可将事故应急预案分为以下五种级别：

(员) I 级（企业级）应急预案。

这类事故的有害影响局限在一个单位（如某个工厂、火车站、仓库、农场、煤气或石油管道加压站端站等）的界区之内，而且可被现场的操作者遏制和控制在该区域内。这类事故可能需要投入整个单位的力量来控制，但其影响预期不会扩大到社区（公共区）。

(圆) II 级（县、市、区级）应急预案。

这类事故所涉及的影响可扩大到公共区（社区），但可被该县（市、区）或社区的力量，加上所涉及的工厂或工业部门的力量所控制。

(猿) III 级（地区级）应急预案。

这类事故影响范围大，后果严重，或是发生在两个县或县级市管辖区边界上的事故。应急救援需动用地区的力量。

(源) IV 级（省级）应急预案。

对可能发生的特大火灾、爆炸、毒物泄漏事故，特大危险品运输事故以及属



省级特大事故隐患、省级重大危险源应建立省级事故应急反应预案。它可能是一种规模极大的灾害事故,或可能是一种需要用事故发生的城市或地区所没有的特殊技术和设备进行处理的特殊事故。这类以外事故需用全省范围内的力量来控制。

(缘 V 级(国家级)应急预案。

对事故后果超过省、直辖市、自治区边界以及列为国家级事故隐患、重大危险源的设施或场所,应制定国家级应急预案。

企业一旦发生事故,就应即刻实施应急程序,如需上级援助应同时报告当地县(市)或社区政府事故应急主管部门,根据预测的事故影响程度和范围,需投入的应急人力、物力和财力逐级启动事故应急预案。

## 8.2.2 应急救援预案的基本要素

应急预案基本要素应包括以下十项:

(员 组织机构及其职责。

员 明确应急反应组织机构、参加单位、人员及其作用。

圆 明确应急反应总负责人以及每一具体行动的负责人。

猿 列出本区域以外能提供援助的有关机构。

源 明确政府和企业事故应急中各自的职责。

(圆 危险辨识与风险评价。

员 确认可能发生的事故类型、地点。

圆 确定事故影响范围及可能影响的人数。

猿 按所需应急反应的级别,划分事故严重度。

(猿 通告程序和报警系统。

员 确定报警系统及程序。

圆 确定现场 圆原小时的通告、报警方式,如电话、警报器等。

猿 确定 圆原小时与政府主管部门的通信、联络方式,以便应急指挥和疏散居民。

源 明确相互认可的通告、报警形式和内容(避免误解)。

缘 明确应急反应人员向外求援的方式。

远 明确向公众报警的标准、方式、信号等。

苑 明确应急反应指挥中心怎样保证有关人员理解并对应急报警反应。

(源 应急设备与设施。

员 明确可用于应急救援的设施,如办公室、通信设备、应急物资等;列出有关部门,如企业现场、武警、消防、卫生、防疫等部门可用的应急设备。

圆 描述与有关医疗机构的关系,如急救站、医院、救护队等。

獭 描述可用的危险监测设备。

源 列出可用的个体防护装备（如呼吸器、防护服等）。

缘 列出与有关机构签订的互援协议。

（缘 应急评价能力与资源。

员 明确决定各项应急事件的危险程度的负责人。

圆 描述评价危险程度的程序。

獭 描述评估小组的能力。

源 描述评价危险场所使用的监测设备。

缘 确定外援的专业人员。

（远 保护措施程序。

员 明确可授权发布疏散居民指令的负责人。

圆 描述决定是否采取保护措施的程序。

獭 明确负责执行和核实疏散居民（包括通告、运输、交通管制、警戒）的机构。

源 描述对特殊设施和人群的安全保护措施（如学校、幼儿园、残疾人等）。

缘 描述疏散居民的接收中心或避难场所。

远 描述决定终止保护措施的方法。

（苑 信息发布与公众教育。

员 明确各应急小组在应急过程中对媒体和公众的发言人。

圆 描述向媒体和公众发布事故应急信息的决定方法。

獭 描述为确保公众了解如何面对应急情况所采取的周期性宣传以及提高安全意识的措施。

（愿 事故后的恢复程序。

员 明确决定终止应急，恢复正常秩序的负责人。

圆 描述确保不会发生未授权而进入事故现场的措施。

獭 描述宣布应急取消的程序。

源 描述恢复正常秩序的程序。

缘 描述连续检测受影响区域的方法。

远 描述调查、记录、评估应急反应的方法。

（怨 培训与演练。

员 对应急人员进行培训，并确保合格者上岗。

圆 描述每年培训、演练计划。

獭 描述定期检查应急预案的情况。

源 描述通信系统检测频度和程度。

缘 描述进行公众通告测试的频度和程度并评价其效果。

远 描述对现场应急人员进行培训和更新安全宣传材料的频度和程度。

(五) 应急预案的维护。

员 明确每项计划更新、维护的负责人。

圆 描述每年更新和修订应急预案的方法。

獭 根据演练、检测结果完善应急计划。

## 8.3.2 应急预案的组成

应急预案的具体组成主要包括准备程序、基本应急程序、特殊危险应急程序等内容。

**准备程序** 准备程序是整个应急预案的第一部分内容，主要论述针对事故应急行动所需采取的应急准备，包括若干子程序。准备程序能指导应急准备，主要有以下子程序：

(员) 评审程序。在修改或制定一个新的应急预案之前，对已有的计划或程序进行评审和回顾是非常必要的，因为这种回顾不仅能为预案制定者提供新预案制定的参考模式，特别是针对类似事故的应急预案制定，而且还能使制定者弥补原有预案的不足和缺陷，避免原有预案中不适当应急步骤的再次出现。

(圆) 明确应急责任程序。制定应急预案时必须熟知各机构的主要职责，因为它牵涉到预案中应急行动的责任分配。

(獭) 应急资源和应急能力评价程序。应急资源包括人员、应急设备、装置和物资；应急能力包括人员的技术、经验和接受的培训。预案制定者应该评价与预知危险相匹配的应急资源和能力，从而选择最现实、最有效的应急策略，并制定相应的应急预案。

(源) 培训程序。培训程序是应急准备中的重要环节，因为无论应急资源多么充分，应急组织多么完善，如果缺乏必要的人员培训和应急行动的演练，任何一个事故应急救援行动都不会获得成功。培训程序的制定就是为了保证所有应急队员都能接受有效的应急培训。从而具备完成其应急任务所需的知识和技能。

培训程序必须标明“做什么”、“怎么做”、“谁来做”，并在程序中指明应急预案和相关法规所列出的事故危险和应急责任，保证提供每个应急角色所需的培训。培训的效果好坏是整个应急预案能否成功得到实施的关键性因素。

(缘) 训练与演习程序。训练与演习作为培训的目的，其主要作用是检测应急准备的充分性，包括物资资源、设备及人员的应急水平等。在程序中应该注明训练和演习的类型与频率，以及训练演习的组织、指导、评价等具体步骤。

应急演习为应急人员提供一次实战模拟训练，使应急人员熟悉必需的应急操作，并积累应急工作经验，为真正的事故应急行动提供宝贵的经验保证。应急演习必须定期举行，但间隔的长短根据实际情况而定。

**㊦ 基本应急程序** 基本应急程序的内容主要是针对任何事故应急都必需的基本应急行动，包括有一系列的子程序，以保证应急行动的连续性，为事故指挥者和应急管理者提供有效的现场应急指导，保证应急行动的及时性与合理性。

(员) 报警程序。在发生紧急情况或突发事件的过程中，任何人员都有可能发现事故或险情，此时他们的首要任务就是向有关部门报警，提供事故的所有信息，并在力所能及的范围内采取适当的应急行动。该程序主要指导人员如何使用报警与通信设备，如电话、报警器、信号灯、无线电等，并明确安全人员、操作人员或其他人员的报警职责。

(圆) 通信程序。通信程序描述在应急中可能使用的通信系统，以保证应急救援系统的各个机构之间保持联系。

(猿) 疏散程序。疏散程序主要内容是从事故影响区域内疏散的必要行动。疏散程序的重要地位是十分明显的，因为发生事故时，有关人员安全有序地疏散是最重要的应急行动。

(源) 交通管制程序。危险品运输车辆通过重要区段时，为防止交通堵塞和人员的过于密集带来的危险，应该施行交通管制，从而使危险品车辆迅速顺利地通过复杂的关键路段，可以极大地降低危险。

(缘) 恢复程序。当事故现场应急行动结束以后，应该开展的最紧迫的工作是使在事故中一切被破坏或耽搁的人、物和事得到恢复，进入正常运作状态，这就是恢复程序的基本内容。

**㊦ 特殊危险应急程序** 特殊危险应急程序是主要针对具体事故以及特殊条件下的事故应急而制定的指导程序。其具体的程序内容根据不同事故情况而定，通常除了包括基本应急程序的行动内容以外还应该包括特殊事故的特殊应急行动内容。

存在有毒、有害、易燃、易爆物质的企业常发生的事故是，危险品的泄漏及由其引发的火灾、爆炸等，然而在特殊情况下可能会遭遇台风、洪水等自然灾害的侵袭。为保障安全，有必要制定一系列下述条件下的特殊危险应急程序：

(员) 危险品泄漏。企业中最常发生的事故就是危险品的泄漏，而且泄漏有可能导致火灾、爆炸等其他恶性事故的发生，因此，针对危险品泄漏制定特殊应急程序是十分必要的。程序中应详细描述应急队员在控制危险品泄漏时所需采取的具体行动，并标明不同于其他事故应急的特殊应急步骤。

除此之外，程序中还应注明，在应急过程中需要实施的人员防护，以免应急队员因过度暴露而受到伤害。

(圆) 火灾。火灾是最常见也是最易发生的事故之一，如果不能对其实施有效应急以控制火势蔓延，那么就有可能造成巨大的事故损失，酿成灾祸悲剧。因此在拥有了基本应急程序的基础上，应针对火灾事故的特点，制定特定应急程序，重点突出在应急行动中的灭火要点、应特别注意和回避的事项，使应急行动具有

更强的针对性，提高行动的效率。

程序应详细说明各应急组织和应急队员的灭火能力、任务和各自的职责，说明事故指挥者、安全人员及其他应急者的个人责任等。程序将有助于制定行动计划、决定是否需要额外援助、指导事故指挥者收集有用信息等等。

(獾 台风。制定台风的应急程序应与当地的应急救援部门和气象服务中心紧密联系，根据政府气象服务部门所提供的气象信息和指导，应急管理者应提前在原-源-源内采取适当的行动措施。制定“台风”应急程序时，需要根据预报的台风种类、强度、登陆点不同确定相应的应急行动措施。由于台风会影响到工作、生活、交通等各个方面，因此每个部门都应在台风到来之前部署好应急行动，以保证人员的安全。

(源 洪水。洪水应急程序主要适用于企业所在的区域历史上有洪水记录或可能发生洪水时对可能事故的预防和发生事故后的应急。该程序根据各个不同的企业所能承受的不同洪水强度，考虑气象中心发布的应采取的洪水应急措施来制定具体的程序内容。

程序中的事故预防措施应包括对洪水预兆标志（暴雨、雷阵雨、冬季冰雪的融化等）的识别，以实现在洪水到来之前或气象中心发布洪水警报之前采取必要的预防性措施。在事故应急措施中，应列出在洪水应急中需采取的特别行动，例如，对需要用沙包填充区域的划分，沙包的获得和补充，重要设备的移动，对建筑物的记录，疏散路线的确认，汽车特别是储罐车的防滑等各项具体措施。

## 獾獾 城市中需要编制应急预案的单位和场所

(员 城市政府部门。

(圆 城市的灾害和安全管理部門。如城市的防洪、抗震、气象、公安、消防、人防、泥石流防治等管理部门及其下属部门。

(猿 可能由危险物或设备引起火灾和爆炸事故的场所。主要是爆炸性物质、活性化学物质、可燃、易燃物质的生产、经营和储存场所，例如，民用爆炸物质、危险化学品生产、储存单位的危险品库区、罐区；有高压容器、压力管道和特种设备的场所；可能发生毒物泄漏的场所等。

(源 有毒物质的生产、经营、储存场所。

(缘 容易发生重大工业事故的企业。矿山、建筑施工及涉及危险化学品的生产、经营、储存、运输等企业。

(远 运输部门。道路交通、水上交通、铁路运输、民航等运输管理部门及各个运输企业。

(苑 无危险物质，但可由活动中的因素引发火灾或爆炸的场所。例如，歌舞厅、影剧院等公共娱乐场所；医院、酒店、宾馆等服务场所；图书馆、商场、大

型超市、汽车站、火车站、机场等公共场所；举办集会、焰火晚会、灯会等大型活动的场所。

(愿) 国家或地方政府规定的城市的其他场所或单位。

(怨) 大型活动的举办单位也应制定针对本次活动的应急预案。

### 图 10-1-1 城市灾害应急预案的编制流程

城市防灾减灾应急预案的编制是一项很复杂的系统工程，目前国内仍然处于探索阶段。根据美国国家应急领导小组（~~晕~~）建议的社区（地方政府）制定应急预案的步骤，以及我国学者提出的应急预案编制步骤，建议采用如图 10-1-1 所示的城市灾害应急预案编制流程。

1. 确定应急预案的类型 城市防灾减灾应急预案中包含政府部门的应急预案、政府各防灾减灾职能部门的应急预案、企业的应急预案，根据需要选择需要制定的应急预案，如城市洪水应急预案、城市破坏性地震应急预案、城市火灾应急预案、各生产企业应急预案等。

2. 选择应急预案的编制人员及编制负责人 由于城市防灾减灾涉及面非常广，编制城市防灾减灾应急预案是一个很复杂的工程，因此编制人员应来自涉及城市防灾减灾的各个部门。总的来讲，应急预案编制人员应包括安全生产、环保、公安、消防、城市规划、交通运输、军队、工程、技术服务、维护保养、医疗、地震、水利、人防、气象、城市防灾减灾办公室等部门的人员。为了使应急预案能够顺利编制，协调来自各个部门的编制人员，应在编制应急预案之前确定编制的负责人，编制的负责人应对各个部门的职责有简单的了解，并且能够把握全局，因此建议编制的负责人来自城市政府部门。

3. 收集资料 收集资料是编制城市防灾减灾应急预案的首要工作，为了保证预案的有效性，在资料收集过程中应保证资料真实、准确、全面而详尽。所收集的资料应包括以下几方面的内容：

(1) 相关的法律、法规和标准。在制定城市防灾减灾应急预案时，应收集的有《中华人民共和国安全生产法》、《中华人民共和国消防法》、《危险化学品安全管理条例》、《破坏性地震应急条例》、《中华人民共和国防震减灾法》、《中华人民共和国防洪法》、《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国人民防空法》、《中华人民共和国传染病防治法》、《中华人民共和国城市规划法》等法律法规及防灾、减灾和安全生产方面的条例，同时还应该收集相关的工程技术标准。

(2) 城市的历史灾害数据。城市历史灾害发生的种类、起因、经济损失、人员伤亡、救灾记录等资料。

(3) 国内外关于城市防灾减灾和防灾减灾方面的应急预案。重点要收集美国、加拿大、澳大利亚、欧盟、日本等国家的应急预案，国内方面要收集北京、

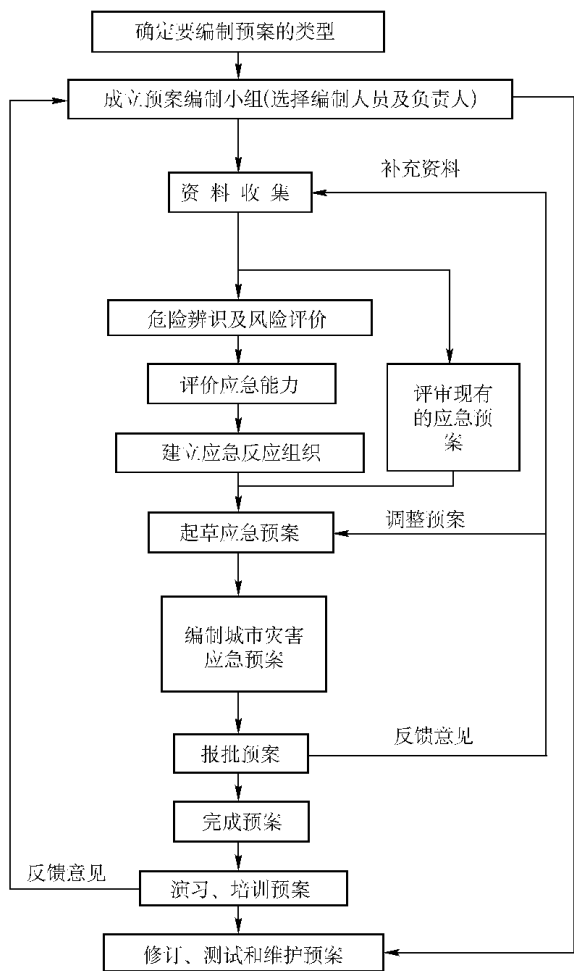


图 4-2-3 城市灾害应急预案编制流程图

上海、武汉等大城市的应急预案。

(源 城市的基本情况。包括城市的地形、地貌、气象、水源等环境条件，城市消防力量的部署，城市应急救援的装备情况，城市医疗设施，城市的防空设施，城市的路网情况，城市生命线情况，城市避难场所的情况，城市防灾救灾物资储备情况，城市消防重点单位的基本情况，城市高层建筑及地下建筑情况，城市防洪设施等。

(缘 城市现有的灾害应急预案。在制定城市防灾减灾应急预案时应先收集城市现有各防灾职能部门、生产企业制定的应急预案，可以从中吸取精华，对城市防灾减灾应急预案的编制有很大帮助。

(远 企业的具体情况。企业的区域平面布局、运输路线、生产工艺过程、生

产设备装置、特种设备（锅炉、压力容器等）、石油库、危险品库等。

上述资料的收集可在城市防灾减灾普查所得资料的基础上加以补充得出，但必须保证资料的可靠性。

**危险辨识及风险评价** 危险辨识与风险评价是编制应急预案的关键步骤，所有应急预案都是建立在风险评价的基础之上的。危险辨识的过程就是利用我国现行的各种法规和技术标准，如《中华人民共和国安全生产法》、《中华人民共和国消防法》、《危险化学品安全管理条例》、《中华人民共和国防洪法》、《中华人民共和国防震减灾法》等，对威胁城市公共安全的自然灾害、人为灾害以及生产材料、设施和生产条件进行评定，并列出清单以进行风险评价。

风险评价就是对影响城市公共安全的各种灾害的危险程度进行分析，并确定其级别，以根据不同级别的风险制定不同的应急预案，如在洪涝灾害的风险评价中如果评价结果为第一级，即“很安全”，就可以不制定应急预案，但应进行定期监控，而对于其他四个级别则应制定相应的应急预案。

**确定应急反应组织的人员职责** 应急预案中必须明确人员在事故应急中的职责，尤其是在应急救援不同阶段的指挥人员的确定。在编制应急预案时，可以根据企业的正常生产管理系统或政府各职能部门的正常运作系统来分配应急救援时的任务，这样可以减少培训的机会，也可以使应急指挥更加有效，决策更加具有权威性。

但是，应该对企业或政府的组织管理结构中的领导的应急能力进行评价，要保证这些人经过培训以后能够应对紧急局势。另外，预案中还必须明确在指挥人员休假或者因故不能进行指挥时的替代人员。

另外，应急预案中的人员职责必须明确写出来，并尽可能详尽，对人员的权限也应该有明显的规定。城市各部门在应急救援中的职责可参见表 10-2。

表 10-2 城市各部门在应急救援中的职责

应急救援指挥部	组成单位	职责
警戒指挥部	公安局	警戒、疏散、疏导交通等
抢险救灾指挥部	消防、建委、驻军等部门	工程抢险
医疗救护指挥部	卫生局	伤员救护、医疗宣传
物资供应指挥部	经贸委	物资供应
善后处理指挥部	民政、工会、保险等部门	慰问家属、善后、理赔等
信息中心	电信局、移动公司	信息传输



**应急评估应急能力** 主要是评价城市在紧急情况下的应急能力。应急能力是进行应急救援的基础,是事故应急救援中至关重要的部分。应急能力分为两大类,即应急设备和应急人员能力。

(员) 应急设备评估。主要是对应急设备的数量以及其功能、性能的评估。应急设备的评估首要是应急通信设备,通信设备必须能保证救援时通信畅通,主要的通信设备还必须配有备用。另外还有洪水、地震、台风等灾害的检测设备、灭火系统、消防设备、火灾侦检系统、医疗设备、个人防护设备、照明设备、交通设备、毒物泄漏控制设备、抢修设备、测量设备等用于应急救援的设备。

(圆) 应急人员能力的评估。主要是对参加应急救援的人员的数量、参加培训的情况、技术水平等情况的评估。主要有城市的驻军数量、专业救援队伍的数量和技术水平、城市消防人员的数量和培训情况、城市工程抢险队伍的情况、城市医护人员的情况等。

**建立应急反应组织** 建立应急反应组织是编制应急预案的一个最重要目的,完善而合理的应急组织能在紧急时刻,在最短的时间内及时部署完毕应急力量,并且能及时作出果断而合理的决定。应急反应组织建立过程中,最重要的就是确定指挥结构,如紧急情况下的指挥结构(又叫最初应急反应组织),外来的增援力量和资源到达时指挥结构如何发生变化,救援指挥时应急反应组织成员能作出哪些决定,应急反应组织之间如何进行联系等。可以通过应急反应组织结构和职责表格来建立完善的应急反应组织。图 4-1 为某企业的应急反应组织图。

**评审现有应急预案** 在修改或制定新城市防灾减灾应急预案之前,应对已有的应急预案进行评审分析,这些应急预案既包括城市的各灾害急应急预案和城市已有的防灾减灾应急预案,也包括国内外相关的应急预案。可参考这些预案的编制模式,了解其中的不足和缺陷,避免在新预案中再次出现,对于已经在实际事故中应用过的预案,其价值更高,应作为重点进行分析和评审。

**预案的培训和演习** 为了验证预案的可行性和符合实际情况的程度以及提高救援队伍的实际救援能力,必须对应急预案进行培训和演习。通过培训和演习,可以把应急预案加以验证和完善,确保事故发生时应急预案得以实施和贯彻。参加培训和演习的人员有城市防灾减灾应急指挥中心工作人员、急救人员、消防部门、安全生产部门、社区负责人、学校负责人、企事业单位负责人、交通运输企业负责人等。图 4-2 为某企业的应急反应组织图。

预案的培训和演习应设置一些与实际情况尽可能接近的情形进行,即现场发生的事故类型、各种可能的后果以及硬件设施都与现场实际情况尽可能相符,使应急救援人员能具备应急救援能力。

**应急预案的修订、测试和维护** 经过培训和演习,不可避免会发现预案中的缺陷和弊端,因此必须根据反馈的意见对应急预案进行修订。另外,城市和

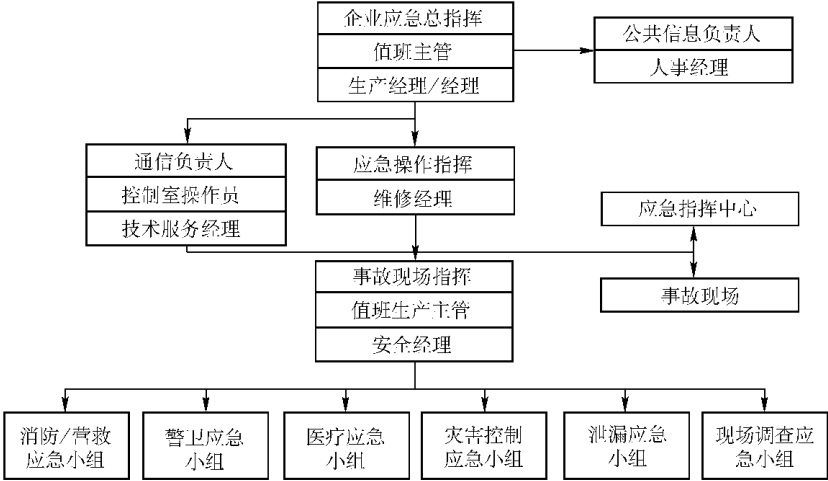


图 某企业的应急反应组织图

注：事故发生初期，应按中线下面为顺序，先由值班主管担任初期应急岗位指挥，直到按应急预案规定的负责人到岗后再交接岗位。

企业的各种情况都是在不断发生变化，预案也应该不断进行修改和维护。因此，预案的编制不是独立、短期的行为，应该不断地调整、变化。

城市灾害应急预案的内容

- 城市的基本情况 包括以下几方面：
- 城市的地理、气候情况。
  - 城市灾害源、危险源的情况。
  - 城市所面临的灾情的预测。
  - 城市救援力量（包括消防、工程技术力量、医疗力量、城市驻军等）及其分布。
  - 各种救灾设备的数量、功能、状况等。
  - 城市内各个需要制定应急预案的企业和单位的具体情况，如企业的布局、危险源的种类、数量等情况。
- 组织机构的构成及职责 具体如下：
- 组织机构的组成，包括城市各级政府、城市各职能部门、灾害管理部门、救灾机构等队伍的编制。
  - 组织机构的职责包括各个组织的职责和各类人员的职责。
- 各类应急程序及其他文件 包括应急程序、各种说明书、记录表格、有

关图表等。

各种制度 包括应急救援的各种规章制度；针对预案演练修改的一些制度、规定等。

总之，城市灾害应急预案必须具有针对性，使之适合本企业和本地区的实际情况，切不可使应急预案变成“应付预案”。另外，应急预案必须具有可操作性，尤其在应急反应组织的人员职责方面，以保证灾时的有效性。

## 第 10 章 城市灾害管理信息系统

城市由于人口及财产的高度集中，一旦发生灾害，其损失非常巨大，所以必须采取有效措施预防事故的发生及减轻灾害损失，但由于城市是一项巨大的系统工程，相关管理和决策部门对城市灾害进行有效管理时需要大量信息来制定城市综合防灾减灾规划及城市灾害应急预案，指导各项防灾减灾活动，以引导城市健康而持续发展。这些信息包括城市灾害历史数据、城市空间形态及其变迁、城市要素的空间分布及其演变、城市产业结构及其空间特征、城市人口空间分布等，数据量相当大，而且为实现城市灾害的预测分析和评价所采取的分析模式和数学模型也较复杂，传统方法难以实施；另外，城市灾害在发生时，往往具有来势凶猛、发展快、波及面大、条件恶劣等特点，这也要求辅助分析与决策支持系统具有很高的标准，要能够包含丰富的相关信息，迅速预测预报灾害位置、波及范围和损失情况，动态、直观定位，以便于决策者研究分析对策，全面掌握信息，指挥抗灾救灾工作。但一般采用的人工实地考察、航测等技术手段，虽然可以提供大量、全面和丰富的灾害信息，但仍存在有许多不足之处，如信息处理落后，不能对灾害进行实时监测和动态显示，难以进行准确预报。为了提高城市灾害管理的效率，有必要借助现代计算机技术建立城市灾害管理信息系统。该系统能提供城市灾害及与其评估有关的历史、自然环境和社会经济现状的背景数据；对城市灾害发生的可能性、空间分布、危险程度等进行综合分析、评价、模拟分析及趋势预测；提供灾情快速评估与紧急救援方案，辅助防灾减灾决策。

### 10.1 建立城市灾害管理信息系统的基本原则

在城市灾害管理信息系统的建设中，应遵循以下基本原则：

(1) 标准化。各类信息的分类编码、数据交换格式、数据内容与组织应严格遵循现有的国家标准、行业标准和地方标准。

(2) 开放性。必须面向空间信息的服务、分发、交换、更新和共享，能够方便地为各种应用系统提供动态信息支持。

(3) 可扩展性。数据库及管理系统的功能应可以方便地进行扩充，系统具有可持续维护和发展的能力。

(4) 先进性。系统建设中应积极运用新技术，充分利用遥感、地理数据库及网络技术等方面的最新发展成果。

(5) 实用性。系统建设必须以实用性和可靠性为基本原则，保证能尽快地投

入实际运作,发挥作用。系统界面应直观、简捷,充分顾及非专业用户的需要。系统在运行、维护及大数据量处理、多用户并发等方面要有高的适应性和稳定性。

(4) 安全性。城市管理信息安全性十分重要,系统设计与建设中应充分考虑各种数据与资料的保密与安全,防止数据的非正常损失和丢失。

## 4.1 城市灾害管理信息系统的功能

4.1.1 建立灾害信息数据库及城市基础设施数据库 城市防灾减灾是一项涉及自然、社会经济的复杂的系统工程,其中的城市灾害危险性分析、灾害传播方式、城市整体的灾害预测和损失估计,以及城市综合防灾对策和救灾对策等带有全局性的问题,需要包括城市的地理、地貌、水文、地质和生命线系统、人口状况在内的大型数据库。

4.1.2 城市灾害相关信息的查询和处理 系统应具备强大的数据查询、统计功能,完成对现有的城市灾害综合管理中海量空间信息和非空间信息的更新、查询、检索、处理、分类管理和统计,根据查询或统计的结果生成满足要求的报表、图形等输出信息,并有效地利用这些空间信息为防灾减灾信息系统开发服务。

(1) 信息查询。包括面向空间和数据库的查询,按照决策者要求提供图到表、表到位的相关查询。例如,灾害发生期间,确定其影响区域,显示受灾地点的地理特征;协助选择救灾物资运输路线,紧急救援的最短路径;查询选择最近的有较好医疗条件的医院或急救中心的名称和地址等信息。系统还应提供空间查询功能。

(2) 信息分析和评价。在空间数据库管理系统的支持下,运用空间分析技术对各种灾害信息进行统计分析计算,如街道通行能力、受灾范围、淹没街区等的多种动态统计分析,以及信息叠加复合处理,评价灾害的损失程度,划分各类灾害的重点防灾区等。

(3) 显示和输出。作为面向广大用户和公众的信息服务系统,系统的显示功能(可视化程度)决定了系统的应用前景。首先,是查询操作和查询结果可视化:操作可视化指查询描述将用直观的图形、符号和自然语言来代替计算机语言,形成非计算机专业人员易于操作的查询环境;查询结果可视化即用图形、图像或其他更适合人的视觉特性的方式表达查询结果,即使查询结果是文字和数字,也应配合其他方法更形象地描述该结果。其次,是三维、四维空间模拟,这是当前可视化研究的重点,其中包括数据模型、算法、软件系统等方面的内容。

系统应具有灵活、强大的数据输出功能,能够使地形图、各类专题图以及系统生成的各种数据按照规范的要求输出高质量的图形和各种研究报告、报表,辅

助有关部门进行决策。

**评价城市防灾能力现状** 利用已建的城市基础设施及灾害信息数据库，结合相应的评价方法，对城市的防灾能力现状进行评价，找出薄弱环节加以重点建设。

**灾害预测及模拟** 每一种灾害均有自己独特的发生、发展规律，因此，应建立相应的模型对其加以评价。灾害管理系统应在计算机软件 and 硬件的支持下，以地理信息系统和数据库技术为基础，建立主要灾害行为或过程的数值模拟模型，以预测可能发生的灾害及其强度和规模，并结合适当的数学方法分析其蔓延路径和影响范围。

**灾害风险分析及灾害预测** 城市灾害的发生虽然具有突发性，但其孕育过程却是相关因素积聚、耦合的结果。因此，在系统数据库的支持下，依据各种灾害的发生发展规律，可以导出各种灾害发生的风险指数，据此可以进行相应的预测预报。

**灾害损失评估** 城市灾害的直接后果就是造成人民生命财产的损失，可以根据灾害强度、影响面积、经历时间及承灾体状况等因素来进行灾害损失评估。

**防灾减灾对策及决策支持系统** 针对各种灾害的特征与行为，在专家知识和系统数据库的支持下，融合决策支持技术，研究开发城市防灾减灾决策支持系统，提出城市防灾减灾的对策，供用户选择。该系统可在灾害发生前，根据掌握的各类建（构）筑物和生命线工程的抗灾性能，为相关政府部门编制防灾规划及应急预案提供科学依据；在灾害发生时，方便政府实施相应的应急预案，快速做出科学化、程序化的应急响应，提前组织疏散人员财产、实施医疗急救等，辅助救灾指挥决策者在远离现场的情况下全面掌握灾情并进行救灾指挥决策，将人员伤亡及财产损失减少到最小；在灾后重建时，快速收集详细的受灾信息，组织物资调配、清理废墟及灾害损失评估，使受灾地区尽快恢复到正常状态。

## 城市灾害管理信息系统的结构

城市灾害管理信息系统的结构如图 所示。

该图表示：

（1）由于关于城市地理信息的影像数据非常有限，图形数据的主要来源为矢量图，所以系统的基础是矢量图导入到系统形成城市地图信息的图形数据库，用于城市地图的管理。

（2）属性数据库有专门的数据库管理系统来管理，构成管理信息系统（MIS），用于各种防灾资料的管理以及办公信息处理。

（3）系统的核心是图形数据库与属性数据库的链接，通过图文链接完成在地

图环境中管理防灾资料。

(源 配 景 与 图 景 通过图文链接，构成“所想即所得”的地理管理信息系统 (图配景)，用于地图管理和防灾资料管理两系统的融合。

(缘 以图文链接为桥梁，图景与地理相关的决策支持系统构成地理决策支持系统 (图配景)；此时，地理信息系统为决策支持系统的数据源，决策支持系统的结果再返回到地理信息系统显示，用于宏观规划辅助决策。

(远 基于知识的系统 (远 决策支持系统) 通过属性数据库融入整个系统；此时，属性数据库为基于知识的系统的数据源，基于知识系统的决策结果再记入属性数据库，用地理管理信息系统 (图配景) 来管理，用于微观防灾设施技术决策。

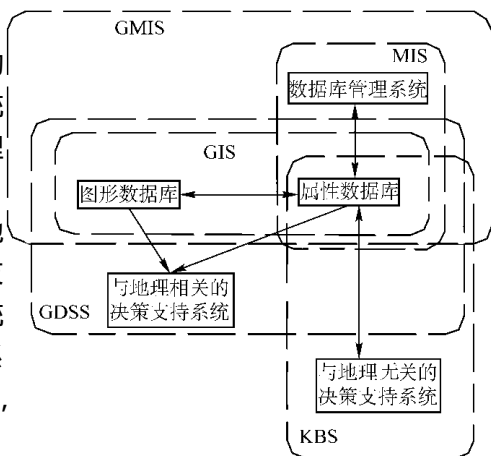


图 4-1-1 城市灾害信息管理系统结构

注：图中箭头方向表示数据流动方向；虚线框表示各部分所组成的子系统

## 4.1 城市灾害管理信息系统概念设计

建立城市灾害管理信息系统的目的在于提供城市灾害及与其评估有关的历史、自然环境和社会经济现状的背景数据；对城市灾害发生的可能性、空间分布、危险程度等进行综合分析、评价、模拟分析及趋势预测；提供灾情快速评估与紧急救援方案，辅助防灾减灾决策。

### 4.1.1 系统的组成

城市灾害管理信息系统的组成应以选择优化分析模型，有效地利用相关空间与非空间数据为实现系统目标的前提。该系统的各个子系统组成如图 4-1-2 所示。图中的地震分析子系统和火灾分析子系统可根据城市的主要灾害类型而有所不同。

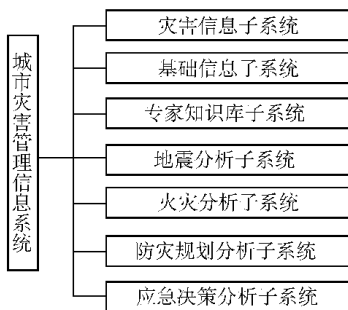


图 4-1-2 城市灾害管理信息系统组成

### 4.1.2 系统数据库

数据库是进行城市灾害评估分析研究的基础，按照数据的不同来源包括以下几部分：

(1) 图像数据。包括城市卫星影像、远红外航空影像、有关建筑物的照片

等。

(圆) 观测数据。反映城市生态环境的有关数据,如地下水位,输水管网监测点的水质、水流量,房屋结构参数、工业“三废”排放量等。

(猿) 统计数据。涉及与各城市灾害类型,如洪水、地震、火灾、地面形变(地面沉降、岩溶塌陷、地裂缝)、风灾、泥石流、火山以及环境污染有关的自然与社会经济信息,包括全省及主要城市范围内环境地质、地貌、气象、水文、工农业、交通、通信、人口、各项基础设施条件的基本数据。

(源) 历史灾害数据。全省及主要城市历次灾害发生的强度、频度、时空分布、引发的次生灾害、造成的伤亡和损失情况数据。

(缘) 灾害背景图件。城市行政区划图、城市土地利用图、绿地分布图、断层分布图、地震烈度分区图、建筑和工程分布图、工程地质图、消防分布图等。

数据库中的各类数据的组织在内容上按专题分层,空间上按城市分块,形成段块结合的三维数据结构。

## 圆园猿 系统应用模型与用户界面设计

圆园猿.1 系统应用模式 用户对地理信息系统的应用大体可以分为三个层次:

(员) 系统数据库应用。主要是对系统数据库进行查询、检索,并进行一些简单的统计计算,以获取有关城市灾害的基本信息。

(圆) 系统产品应用。直接利用系统所提供的一些方案或产品,解决具体的城市灾害问题。

(猿) 系统分析应用。利用系统的分析工具及应用分析模型,输入或调入相关数据进行分析,得到城市灾害管理所需要的信息。

圆园猿.2 用户界面设计 用户界面设计要求简单直观、人一机交互便捷,符合国家有关标准以及灾害管理的一些习惯,使系统容易掌握和操作,达到较好的应用效果。

## 圆园源 城市灾害管理系统的建立

### 圆园源.1 建立城市灾害管理信息系统的总体框架

城市灾害管理系统由两大模块构成。

(员) 数据库模块,包括图形数据库、属性数据库和专家知识库。

(圆) 分析模块。分析模块的分析功能涵盖了灾前的灾害区划、灾情预测、防灾减灾规划和应急预案的制定等;灾害即将发生时的灾害预警、疏散人员与物资等;灾时的抗灾和救援、指挥决策等;灾后的损失评估和恢复重建。图 圆园源为城市灾害管理信息系统的总体构成图。



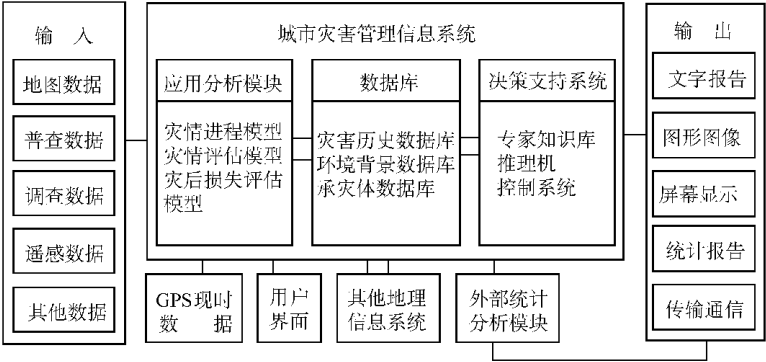


图 4-2-8 城市灾害管理信息系统总体构成图

图 4-2-9 为城市灾害管理信息系统的总体逻辑结构。

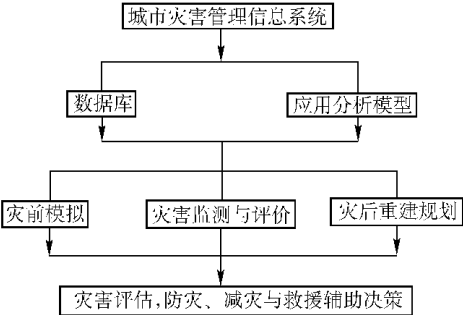


图 4-2-9 城市灾害管理信息系统的总体逻辑结构

图 4-2-10 为系统分析模块的专业模拟构成图。

4.2.3 系统数据库的组织与建立

在现有城市基础设施及灾害信息的基础上，利用信息化技术，把与城市灾害相关的各种信息输入空间数据库，使之转化为数字化的信息，并参照国家有关城市信息化的标准体系，加以有效的约束和取舍，将图形数字化、代码化、文字规范化，以形成城市灾害管理信息系统数据库的主体。

**建库流程** 系统数据库组织和建立是最基本也是最费人力物力的工作，数据的丰富性、正确性及现实性直接关系到系统的应用效果。为克服空间数据库的各种局限性，采用基于高分辨率影像图进行屏幕矢量化，综合各种历史资料，构建城市空间数据库的技术方案。它充分利用 ArcGIS 软件的多源数据集成能力，集成高分辨率影像、高精度 GPS 数据、历史规划设计数据和社会经济统计数据，快速建立高质量的空间数据库，其技术流程详如图 4-2-11 所示。

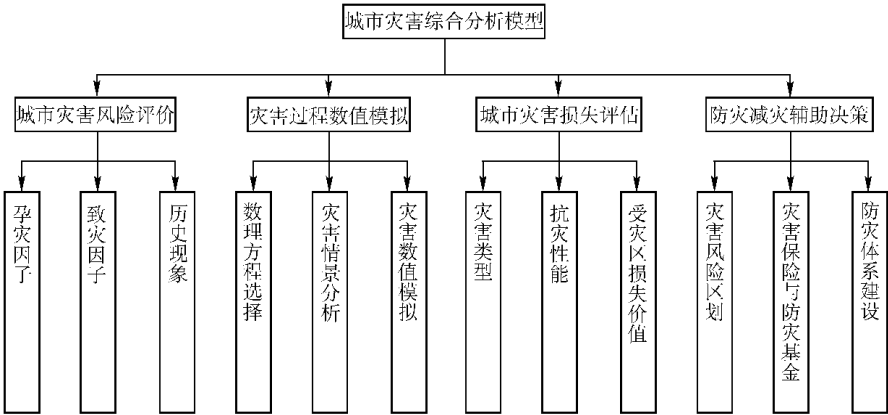


图 图例 城市灾害综合分析专业模拟构成图

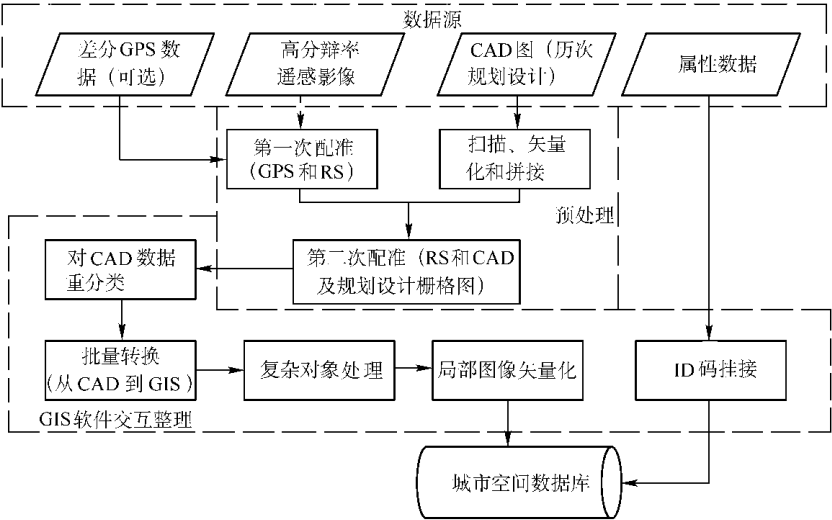


图 图例 空间数据库建库流程

数据的分层组织 城市灾害管理信息系统数据库主要包括两大部分：基础数据库与灾害数据库。

- 基础数据库主要包括以下图层：
- ① 地形影像图层。属于栅格数据，采用高分辨率的美国商用遥感快鸟影像（分辨率可达1米），分辨率可达1米。
  - ② 等高线地形图层。通过转化为等高线（或等高线数据）或等高线数据（或等高线数据）得到城市的三维地形，用于洪水淹没模拟。
  - ③ 房屋建筑物图层。包括所有房屋建筑物分布等，属性数据包括结构类

型、用途、面积、建造时间、高度和电话号码等。

④ 道路街区图层。包括主干道、次干道及支路路网、路网节点等,属性数据包括名称、道路等级、长度、宽度和路面材料等。

⑤ 煤气管网图层。包括煤气主干管网及阀门分布图等,属性数据包括管网的管径、管材、埋设年代、接头形式、埋深、使用状况、流量和压力值等。其他如输油管或输料管等,也可另设图层,其内容同煤气管图层。

⑥ 通信系统图层。包括通信枢纽楼、电视和电台分布图、通道(阅读)电缆线分布、通道空间(数)等,属性数据包括结构形式及各类主要通信设备和相应属性、电缆的通信能力(通道数)、各通道状态、埋深(或架设高度)、使用日期、所属控制箱等。

⑦ 供电线路图层。包括电厂、变电站、电杆、电线等,属性数据包括型号、编号、容量、电压值、架设日期、电线的直径、埋设深度(或架设高度)、绝缘与否、相位数、长度和所属变电站(或所属区域)等。

⑧ 供水线路图层。包括水源、加压站、供水公司、供水管线等,属性数据包括名称、型号、接头、管径、长度和管材。

⑨ 排水管路图层。主要用于污水、雨水的处理,其特点与煤气管相同,所以数据内容可参照煤气管网图层。

⑩ 水域图层。包括河流、湖泊、水库等水域分布,属性数据包括水源名称和常水位高度等。

⑪ 防汛工程图层。包括河堤、湖堤、引水渠等设施,属性数据包括高度、长度、结构类型等。

圆 灾害数据库主要包括以下图层:

① 医疗救护图层。包括卫生局、防疫站、医院、血库等分布,属性数据有名称、医疗器械名称及其数量和特点、急救车辆、后勤保障信息和电话等。

② 重点消防单位图层。包括各类易燃易爆危险源分布及消防设施位置等,属性数据包括各类危险源的名称、特性与扑救方式,消防器械的数量与属性等。

③ 危险源图层。包括压力容器、易燃易爆、化学物品、危险建筑物等图层,属性数据包括危险源的名称、从属单位、联系方式、特性与扑救方式、配备扑救器械的数量与属性。

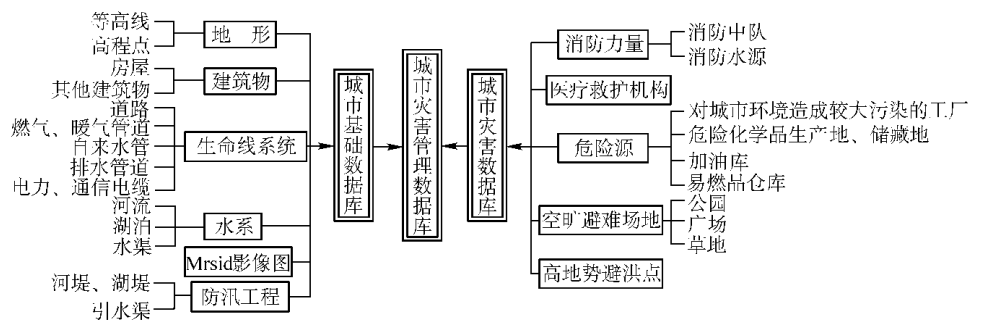
④ 消防力量分布图层。包括消防指挥中心、消防中队和消防栓分布等,属性数据有消防中队名称、消防器械名称及数量特点、后勤保障信息和电话等。

⑤ 空旷避难据点图层。包括公园、广场、草地等空旷避震场地,属性数据包括名称、容量、物资储备等。

⑥ 高地势避难据点图层。包括山岭等避洪场所,属性数据包括名称、容量等。

⑦ 政府机构图层。包括各级政府、公安、交警、环境等机构的分布与服务范围，属性数据包括名称、联系方式、责任人等。

图 9-1-1 为数据库框架图。



9.1.2 系统功能模块设计

9.1.2.1 数据库管理模块 该模块功能主要包括：

(1) 图层控制。主要指基础与灾害专题图层的调用、选择、放大、缩小、自由缩放、平移及全图显示等。

(2) 智能查询。包括由图查属性、按属性查图，图形、属性联合查询，距离查询等。

(3) 基本编辑。主要指添加、删除、修改基础与灾害专题的点、线、面等对象，关联地修改属性数据。

9.1.2.2 灾害分析模块 根据城市的历史灾害情况，选取主要的灾种进行灾害分析，每一灾种对应一子系统，各子系统功能包括：灾情预测、灾害影响范围分析、疏散路径选择、救灾物资调配、灾害损失评估、灾后重建等。

9.1.2.3 应用模型模块 根据灾害分析模块采用的分析方法，结合相应地理软件提供的功能，应用模型如下：

(1) 平面分析模型：缓冲区分析模型；叠加分析模型；网络分析模型等。

(2) 三维分析模型：洪水淹没模拟模型（同时加载环游、旋转、放大、缩小等工具）。

9.1.2.4 应急决策模块 以文本链接方式给出各种灾害的应急预案、防灾减灾规划等。

9.1.2.5 数据输出模块 包括以下两种：

(1) 专题地图形式输出，按照一定的布局，通过打印机输出各种专题地图。

(2) 数据文件形式输出，将成果输出为数据文件，以利于保存和数据交换。

图 4-1-1 北京后沙裕灾害管理系统示例

系统流程图和总体框架

(员) 系统流程图如图 4-1-2 所示。

(圆) 系统总体框架。基于 80 年代的后沙裕镇基础设施防灾减灾决策支持系统主要包括：基础信息子系统、灾害信息子系统、火灾分析子系统、洪灾分析子系统、地震分析子系统和应急决策子系统等，其构成框架如图 4-1-3 所示。

员 基础信息子系统、灾害信息子系统。基础信息子系统、灾害信息子系统分别具有维护和管理基础设施和灾害信息所需的基本功能，诸如图层控制、智能查询、基本编辑等。其中，智能查询分为以下三种：属性查询、空间查询、联合查询。属性查询是指根据一定的属性条件进行查询空间对象，该属性条件要符合 杂蕴(杂蕴数据库)结构化查询语言的规范，也称为 杂蕴查询；空间查询是通过地物间的包含、相交、相离等位置关系进行查询，找出符合一定空间条件的地物；联合查询是将属性查询和空间查询综合起来的一种查询方式，必须同时满足空间条件和属性条件。

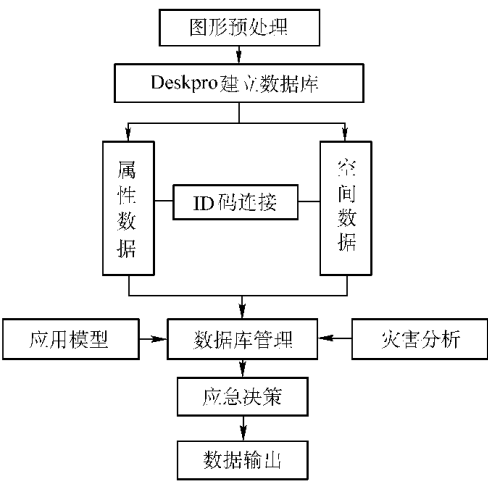


图 4-1-2 系统流程图

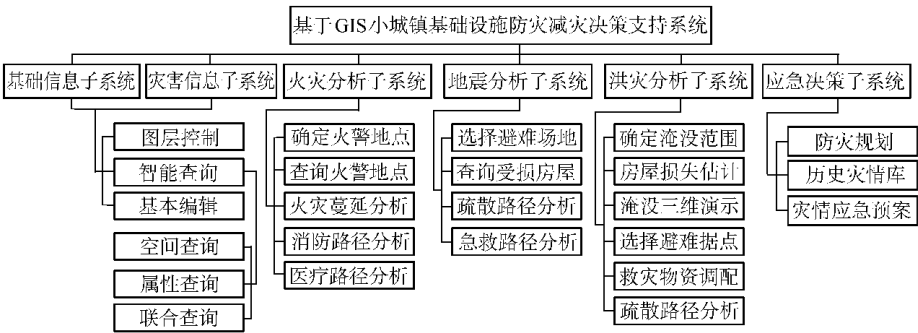


图 4-1-3 系统结构框架图

圆 火灾分析子系统。火灾分析子系统是主要针对提高建（构）筑物火灾扑救、医疗急救的调度指挥和应急能力的分析子系统，具备查询火警地点、确定火

警地点、火灾蔓延分析、消防路径分析、医疗路径分析等功能。

獭 地震分析子系统。地震分析子系统是在发生破坏性地震时快速作出程序化对策，为小城镇政府实施相应的地震应急预案提供依据和对策方案，其功能包括选择空旷避难场地、查询受损房屋、人员财产疏散路径分析、医疗急救路径分析等。

源 洪灾分析子系统。洪灾分析子系统是在对小城镇地形、水系与建筑物三维建模的基础上，针对汛情预报的江河水位，提前对小城镇进行分析模拟，为防洪抢险与应急指挥提供决策支持，其功能包括确定淹没范围、房屋损失估计、淹没三维演示、选择避难据点、人员财产疏散路径分析、救灾物资调配等。

缘 应急决策子系统。应急决策子系统是指为加强小城镇重大灾害事件处理的综合指挥能力，提高紧急救援反应速度和协调水平，将突发灾害事件对人员、财产和环境造成的损失降至最小程度，其功能包括历史灾情库、防灾规划、火灾应急预案、洪灾应急预案、地震应急预案等。

系统运行图示

(员 登录界面 (如图 圆园园所示)。系统的安全性十分重要，为保证数据与资料的保密和安全，防止非法和越权使用，特设置用户登录验证功能。



图 圆园园 登陆界面

(圆 运行界面 (如图 圆园员所示)。系统运行界面中最上面为菜单栏和工具框，左边窗口从上到下依次为工作空间管理器、图层控制窗、鹰眼窗口，右边窗口上面为地图窗口、下面为属性显示窗口。

(獭 查询界面 (如图 圆园圆所示)。从加载的图层中查询满足有关的属性条件的对象，该属性条件要符合 獭獭结构化查询语言的规范，如选择对象所在的图层，输入所要查询的字段、运算符与相应的值后，会在地图窗口中高亮居中



图 4-1-1 运行界面

显示所得的查询结果。



图 4-1-2 查询界面

(源 火灾蔓延分析 (如图 4-1-3 所示)。从接到火警电话后,通过查询获得详细的着火点位置,在综合考虑风力,房屋材料、雨量等因素后进行火灾蔓延分析,迅速在地图定位出受影响的房屋,这样就可以在火势蔓延之前,提前组织人员疏散及财产转移工作,为消防工作争取主动,赢得时间。



图 4-2-1 火灾蔓延分析

（缘 最短路径分析（如图 4-2-2 所示）。当进行医疗急救、消防扑救、人员疏散、财产转移时需要进行最短路径分析，在选择起点和终点，输入车速后，系统经运算迅速给出最短路径，并给出路径总长、路段数和所需时间，为现场应急指挥工作提供决策支持。

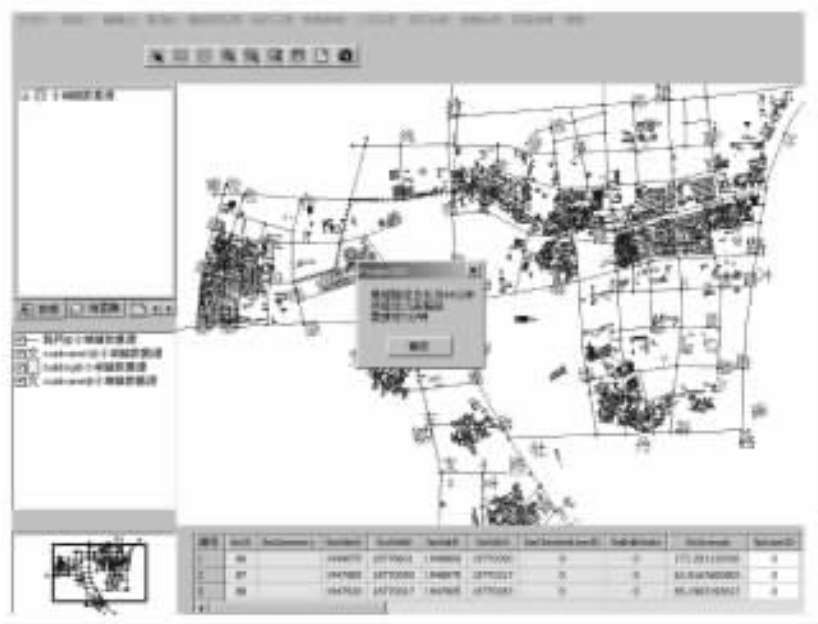


图 4-2-2 最短路径分析



(远) 避难据点选择 (如图 4-15 所示)。以灾害点为圆心, 输入搜寻半径, 按就近原则选择空间距离最近的避难据点。



图 4-15 避难据点选择

(远) 防灾规划图 如图 4-16 所示。

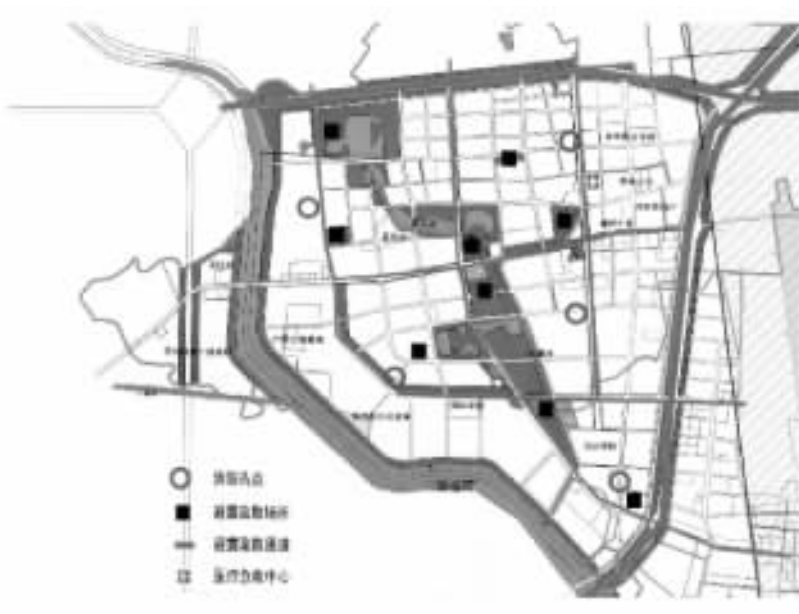


图 4-16 防灾规划图

(愿) 淹没三维演示 (如图 愿所示)。在指定洪水淹没高度之后, 可以在地形和房屋叠加形成的三维图上进行淹没的动画演示, 清晰直观地演示洪灾现场情景。



图 愿 淹没三维演示

(怨) 制图排版 (如图 怨所示)。在对专题地图编辑完毕之后, 按照一定的布局, 插入比例尺、指北针和图例后, 即可输出各种专题地图。

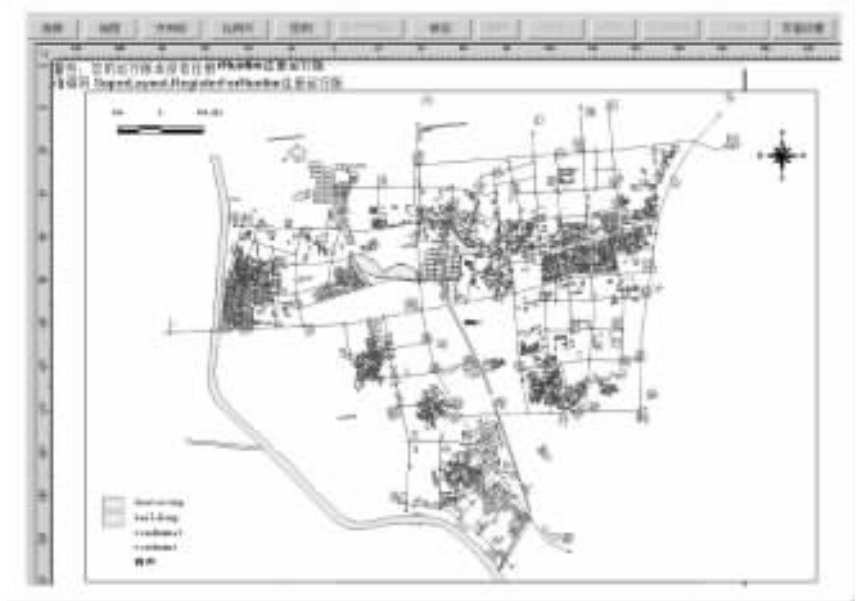


图 怨 制图排版

# 附录 粤 我国主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震分组

本附录仅提供我国抗震设防区各县级及县级以上城镇的中心地区建筑工程抗震设计时所采用的抗震设防烈度、设计基本地震加速度值和所属的设计地震分组。

注：本附录一般把“设计地震第一、二、三组”简称为“第一组、第二组、第三组”。

## 粤 首都和直辖市

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

北京（除昌平、门头沟外的 15 个市辖区），平谷，大兴，延庆，宁河，汉沽。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

密云，怀柔，昌平，门头沟，天津（除汉沽、大港外的 15 个市辖区），蓟县，宝坻，静海。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

大港，上海（除金山外的 15 个市辖区），南汇，奉贤。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

崇明，金山，重庆（15 个市辖区），巫山，奉节，云阳，忠县，丰都，长寿，璧山，合川，铜梁，大足，荣昌，永川，江津，綦江，南川，黔江，石柱，巫溪\*。

注：Ⅷ首都和直辖市的全部县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组；

Ⅷ止标 \* 指该城镇的中心位于本设防区和较低设防区的分界线，下同。

## 粤 河北省

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：廊坊（10 个市辖区），唐山（15 个市辖区），三河，大厂，香河，丰南，丰润，怀来，涿鹿。

圆抗震设防烈度为 苑度，设计基本地震加速度值为 园圆象：

第一组：邯郸（源个市辖区），邯郸县，文安，任丘，河间，大城，涿州，高碑店，涞水，固安，永清，玉田，迁安，卢龙滦县，滦南，唐海，乐亭，宣化，蔚县，阳原，成安，磁县，临漳，大名，宁晋。

抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度值为 0.15g；

第一组：石家庄（远个市辖区），保定（猿个市辖区），张家口（源个市辖区），沧州（圆个市辖区），衡水，邢台（圆个市辖区），霸州，雄县，易县，沧县，张北，万全，怀安，兴隆，迁西，抚宁，昌黎，青县，献县，广宗，平乡，鸡泽，隆尧，新河，曲周，肥乡，馆陶，广平，高邑，内丘，邢台县，赵县，武安，涉县，赤城，涞源，定兴，容城，徐水，安新，高阳，博野，蠡县，肃宁，深泽，安平，饶阳，魏县，藁城，栾城，晋州，深州，武强，辛集，冀州，任县，柏乡，巨鹿，南和，沙河，临城，泊头，永年，崇礼，南宫\*。

第二组：秦皇岛（海港、北戴河），清苑，遵化，安国。

抗震设防烈度为 Ⅷ 度，设计基本地震加速度值为 0.15g；

第一组：正定，围场，尚义，灵寿，无极，平山，鹿泉，井陘，元氏，南皮，吴桥，景县，东光。

第二组：承德（除鹰手营子外的 圆个市辖区），隆化，承德县，宽城，青龙，阜平，满城，顺平，唐县，望都，曲阳，定州，行唐，赞皇，黄骅，海兴孟村盐山，皇城，故城，清河，山海关，沽源，新乐，武邑，枣强，威县。

第三组：丰宁，滦平，鹰手营子，平泉，临西，邱县。

粵東張 山西省

员抗震设防烈度为 Ⅷ 度, 设计基本地震加速度值为 0.15g; 属早

第一组：太原（远个市辖区），临汾，忻州，祁县，平遥，古县，代县，原平，定襄，阳曲，太谷，介休，灵石，汾西，霍州，洪洞，襄汾，晋中，浮山，永济，清徐。

圆抗震设防烈度为 苑度，设计基本地震加速度值为 园圆缘：

第一组：大同（源个市辖区），朔州（朔城区），大同县，怀仁，浑源，广灵，应县，山阴，灵丘，繁峙，五台，古交，交城，文水，汾阳，曲沃，孝义，侯马，新绛，稷山，绛县，河津，闻喜，翼城，万荣，临猗，夏县，运城，芮城，平陆，沁源\*，宁武\*。

抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度值为 0.15g；

第一组：长治（圆个市辖区），阳泉（猿个市辖区），长治县，阳高，天镇，左云，右玉，神池，寿阳，昔阳，安泽，乡宁，垣曲，沁水，平定，和顺，黎城，潞城，壶关。

猥亵

第二组：平顺，榆社，武乡，娄烦，交口，隰县，蒲县，吉县，静乐，孟县，沁县，陵川，平鲁。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅱ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第二组：偏关，河曲，保德，兴县，临县，方山，柳林。

第三组：晋城，离石，左权，襄垣，屯留，长子，高平，阳城，泽州，五寨，岢岚，岚县，中阳，石楼，永和，大宁。

## 粤Ⅲ 内蒙古自治区

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅱ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：土默特右旗，达拉特旗\*。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅱ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：包头（除白云矿区外的 缘个市辖区），呼和浩特（源个市辖区），土默特左旗，乌海（猿个市辖区），杭锦后旗，磴口，宁城，托克托\*。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅲ度，设计基本地震加速度值为  $0.30g$ ：

第一组：喀喇沁旗，五原，乌拉特前旗，临河，固阳，武川，凉城，和林格尔，赤峰（红山\*，元宝山区）。

第二组：阿拉善左旗

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅲ度，设计基本地震加速度值为  $0.30g$ ：

第一组：集宁，清水河，开鲁，傲汉旗，乌特拉后旗，卓资，察右前旗，丰镇，扎兰屯，乌特拉中旗，赤峰（松山区），通辽\*。

第三组：东胜准格尔旗。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅲ度，设计基本地震加速度值为  $0.30g$ ：

第一组：满洲里，新巴尔虎右旗，莫力达瓦旗，阿荣旗，扎赉特旗，翁牛特旗，兴和，商都，察右后旗，科左中旗，科左后旗，奈曼旗，库伦旗，乌审旗，苏尼特右旗。

第二组：达尔罕茂明安联合旗，阿拉善右旗，鄂托克旗，鄂托克前旗，白云。

第三组：伊金霍洛旗，杭锦旗，四王子旗，察右中旗。

## 粤Ⅲ 辽宁省

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅱ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

普兰店，东港。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅲ度，设计基本地震加速度值为  $0.30g$ ：

营口（源个市辖区），丹东（猿个市辖区），海城，大石桥，瓦房店，盖州，金州。

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.10g$ ：

沈阳（Ⅵ个市辖区），鞍山（Ⅵ个市辖区），大连（除金州外的 Ⅴ个市辖区），朝阳（Ⅵ个市辖区），辽阳（Ⅴ个市辖区），抚顺（除顺城外的 Ⅵ个市辖区），铁岭（Ⅵ个市辖区），盘锦（Ⅵ个市辖区），盘山，朝阳县，辽阳县，岫岩，铁岭县，凌源，北票，建平，开原，抚顺县，灯塔，台安，大洼，辽中。

Ⅵ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

本溪（Ⅵ个市辖区），阜新（Ⅴ个市辖区），锦州（Ⅵ个市辖区），葫芦岛（Ⅵ个市辖区），昌图，西丰，法库，彰武，铁法，阜新县，康平，新民，黑山，北宁，义县，喀喇沁，凌海，兴城，绥中，建昌，宽甸，凤城，庄河，长海，顺城。

注：全省县级及县级以上设防城镇的设计地震分组，除兴城、绥中、建昌、南票为第二组外，均为第一组。

### 附录 吉林省

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.10g$ ：

前郭尔罗斯，松原。

Ⅵ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

大安\*。

Ⅶ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

长春（Ⅶ个市辖区），吉林（除丰满外的 Ⅵ个市辖区），白城，乾安，舒兰，九台，永吉\*。

Ⅷ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.20g$ ：

四平（Ⅵ个市辖区），辽源（Ⅵ个市辖区），镇赉，洮南，延吉，汪清，图们，珲春，龙井，和龙，安图，蛟河，桦甸，梨树，磐石，东丰，辉南，梅河口，东辽，榆树，靖宇，抚松，长岭，通榆，德惠，农安，伊通，公主岭，扶余，丰满。

注：全省县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组。

### 附录 黑龙江省

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

绥化，萝北，泰来。

Ⅵ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.20g$ ：

哈尔滨（Ⅶ个市辖区），齐齐哈尔（Ⅶ个市辖区），大庆（Ⅴ个市辖区），鹤岗（Ⅶ个市辖区），牡丹江（Ⅵ个市辖区），鸡西（Ⅶ个市辖区），佳木斯（Ⅴ个市辖区），七台河（Ⅵ个市辖区），伊春（伊春区，乌马河区），鸡东，望奎，穆棱，

绥芬河，东宁，宁安，五大连池，嘉荫，汤原，桦南，桦川，依兰，勃利，通河，方正，木兰，巴彦，延寿，尚志，宾县，安达，明水，绥棱，庆安，兰西，肇东，肇州，肇源，呼兰，阿城，双城，五常，讷河，北安，甘南，富裕，龙江，墨河，青冈\*，海林\*。

注：全省县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组。

粵東總督 江苏省

抗震设防烈度为 Ⅵ 度，设计基本地震加速度值为 0.05g；

第一组：宿迁，宿豫\*。

圆抗震设防烈度为愿度,设计基本地震加速度值为 圆圆早:

第一组：新沂，邳州，睢宁。

抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度值为  $0.15g$ 。工程地质:

第一组：扬州（猿个市辖区），镇江（圆个市辖区），东海，沐阳，泗洪，江都，大丰。

濠 抗震设防烈度为 Ⅵ 度，设计基本地震加速度值为 0.10g；

第一组：南京（6个市辖区）淮安（除楚州外的 7个市辖区），徐州（5个市辖区），铜山，沛县，常州（4个市辖区），泰州（3个市辖区），赣榆，泗阳，盱眙，射阳，江浦，武进，盐城，盐都，东台，海安，姜堰，如皋，如东，扬中，仪征，兴化，高邮，六合，句容，丹阳，金坛，丹徒，溧阳，溧水，昆山，太仓。

第三组：连云港（源个市辖区），灌云。

缘抗震设防烈度为 远度。设计基本地震加速度值为 园圆豫。

第一组：南通（圆个市辖区），无锡（远个市辖区），苏州（远个市辖区），通州，宜兴，江阴，洪泽，金湖，建湖，常熟，吴江，靖江，泰兴，张家港，海门，启东，高淳，丰县。

第二组：响水，滨海，阜宁，宝应，金湖。

第三组：灌南，涟水，楚州。

粵東總督 浙江省

抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度值为 0.15g；

岱山，嵊泗，舟山（圆个市辖区）。

圆抗震设防烈度为 远度，设计基本地震加速度值为 圆圆圆圆：

杭州（远个市辖区），宁波（缘个市辖区），湖州，嘉兴（圆个市辖区），温州（猿个市辖区），绍兴，绍兴县，长兴，安吉，临安，奉化，鄞县，象山，德清，嘉善，平湖，海盐，桐乡，余杭，海宁，萧山，上虞，慈溪，余姚，瑞安，富

阳, 平阳, 苍南, 乐清, 永嘉, 泰顺, 景宁, 云和, 庆元, 洞头。

注: 全省县级及县级以上设防城镇, 设计地震分组均为第一组。

### 第四部分 安徽省

Ⅰ抗震设防烈度为 Ⅶ度, 设计基本地震加速度值为 0.15g:

第一组: 五河, 泗县。

Ⅱ抗震设防烈度为 Ⅶ度, 设计基本地震加速度值为 0.15g:

第一组: 合肥 (源个市辖区), 蚌埠 (源个市辖区), 阜阳 (猿个市辖区), 淮南 (缘个市辖区), 枞阳, 怀远, 长丰, 六安 (圆个市辖区), 灵璧, 固镇, 凤阳, 明光, 定远, 肥东, 肥西, 舒城, 庐江, 桐城, 霍山, 涡阳, 安庆 (猿个市辖区)\* , 铜陵县\* 。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅶ度, 设计基本地震加速度值为 0.15g:

第一组: 铜陵 (猿个市辖区), 芜湖 (源个市辖区), 巢湖, 马鞍山 (源个市辖区), 滁州 (圆个市辖区), 芜湖县, 弋山, 萧县, 亳州, 界首, 太和, 临泉, 阜南, 利辛, 蒙城, 凤台, 寿县, 颖上, 霍丘, 金寨, 天长, 来安, 全椒, 含山, 和县, 当涂, 无为, 繁昌, 池州, 岳西, 潜山, 太湖, 怀宁, 望江, 东至, 宿松, 南陵, 宣城, 郎溪, 广德, 泾县, 青阳, 石台。

第二组: 濉溪, 淮北。

第三组: 宿州。

### 第四部分 福建省

Ⅰ抗震设防烈度为 Ⅶ度, 设计基本地震加速度值为 0.15g:

第一组: 金門\* 。

Ⅱ抗震设防烈度为 Ⅶ度, 设计基本地震加速度值为 0.15g:

第一组: 厦門 (苑个市辖区), 漳州 (圆个市辖区), 晋江, 石狮, 龙海, 长泰, 漳浦, 东山, 诏安。

第二组: 泉州 (源个市辖区)。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅶ度, 设计基本地震加速度值为 0.15g:

第一组: 福州 (除马尾外的 源个市辖区), 安溪, 南靖, 华安, 平和, 云霄。

第二组: 莆田 (圆个市辖区), 长乐, 福清, 莆田县, 平潭, 惠安, 南安, 马尾。

Ⅳ抗震设防烈度为 Ⅶ度, 设计基本地震加速度值为 0.15g:

第一组: 三明 (圆个市辖区), 政和, 屏南, 霞浦, 福鼎, 福安, 柘荣, 寿宁, 周宁, 松溪, 宁德, 古田, 罗源, 沙县, 尤溪, 闽清, 闽侯, 南平, 大田,



漳平，龙岩，永定，泰宁，宁化，长汀，武平，建宁，将乐，明溪，清流，连城，上杭，永安，建瓯。

第二组：连江，永泰，德化，永春，仙游。

## 粤 江西省

抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.10g$ ：

寻乌，会昌。

抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

南昌（缘个市辖区），九江（圆个市辖区），南昌县，进贤，余干，九江县，彭泽，湖口，星子，瑞昌，德安，都昌，武宁，修水，靖安，铜鼓，宜丰，宁都，石城，瑞金，安远，定南，龙南，全南，大余。

注：全省县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组。

## 粤 山东省

抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.10g$ ：

第一组：郯城，临沭，莒南，莒县，沂水，安丘，阳谷。

抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：临沂（猿个市辖区），潍坊（源个市辖区），菏泽，东明，聊城，苍山，沂南，昌邑，昌乐，青州，临朐，诸城，五莲，长岛，蓬莱，龙口，莘县，鄄城，寿光\*。

抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：烟台（源个市辖区），威海，枣庄（缘个市辖区），淄博（除博山外的源个市辖区），平原，高唐，茌平，东阿，平阴，梁山，郓城，定陶，巨野，成武，曹县，广饶，博兴，高青，桓台，文登，沂源，蒙阴，费县，微山，禹城，冠县，莱芜（圆个市辖区）\*，单县\*，夏津\*。

第二组：东营（圆个市辖区），招远，新泰，栖霞，莱州，日照，平度，高密，垦利，博山，滨州\*，平邑\*。

抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：德州，宁阳，陵县，曲阜，邹城，鱼台，乳山，荣成，兖州。

第二组：济南（缘个市辖区），青岛（苑个市辖区），泰安（圆个市辖区），济宁（圆个市辖区），武城，乐陵，庆云，无棣，阳信，宁津，沾化，利津，惠民，商河，临邑，济阳，齐河，邹平，章丘，泗水，莱阳，海阳，金乡，滕州，莱西，即墨。

第三组：胶南，胶州，东平，汶上，嘉祥，临清，长清，肥城。

## 粤图新原 河南省

震抗震设防烈度为 愿度, 设计基本地震加速度值为 园圆园早:

第一组: 新乡 (源个市辖区), 新乡县, 安阳 (源个市辖区), 安阳县, 鹤壁 (猿个市辖区), 原阳, 延津, 汤阴, 淇县, 卫辉, 获嘉, 范县, 辉县。

震抗震设防烈度为 苑度, 设计基本地震加速度值为 园圆园早:

第一组: 郑州 (远个市辖区), 濮阳, 濮阳县, 长垣, 封丘, 修武, 武陟, 内黄, 浚县, 滑县, 台前, 南乐, 清丰, 灵宝, 三门峡, 陕县, 林州\*。

震抗震设防烈度为 苑度, 设计基本地震加速度值为 园圆园早:

第一组: 洛阳 (远个市辖区), 焦作 (源个市辖区), 开封 (缘个市辖区), 南阳 (圆个市辖区), 开封县, 许昌县, 沁阳, 博爱, 孟州, 孟津, 巩义, 偃师, 济源, 新密, 新郑, 民权, 兰考, 长葛, 温县, 荥阳, 中牟, 杞县\*, 许昌\*。

震抗震设防烈度为 远度, 设计基本地震加速度值为 园圆园早:

第一组: 商丘 (圆个市辖区), 信阳 (圆个市辖区), 漯河, 平顶山 (源个市辖区), 登封, 义马, 虞城, 夏邑, 通许, 尉氏, 睢县, 宁陵, 柘城, 新安, 宜阳, 嵩县, 汝阳, 伊川, 禹州, 郑县, 宝丰, 襄城, 郾城, 鄢陵, 扶沟, 太康, 鹿邑, 郸城, 沈丘, 项城, 淮阳, 周口, 商水, 上蔡, 临颖, 西华, 西平, 栾川, 内乡, 镇平, 唐河, 邓州, 新野, 社旗, 平舆, 新县, 驻马店, 泌阳, 汝南, 桐柏, 淮滨, 息县, 正阳, 遂平, 光山, 罗山, 潢川, 商城, 固始, 南召, 舞阳\*。

第二组: 汝州, 睢县, 永城。

第三组: 卢氏, 洛宁, 渑池。

## 粤图新缘 湖北省

震抗震设防烈度为 苑度, 设计基本地震加速度值为 园圆园早:

竹溪, 竹山, 房县。

震抗震设防烈度为 远度, 设计基本地震加速度值为 园圆园早:

武汉 (猿个市辖区), 荆州 (圆个市辖区), 荆门, 襄樊 (圆个市辖区), 襄阳, 十堰 (圆个市辖区), 宜昌 (源个市辖区), 宜昌县, 黄石 (源个市辖区), 恩施, 咸宁, 麻城, 团风, 罗田, 英山, 黄冈, 鄂州, 浠水, 蕲春, 黄梅, 武穴, 郧西, 郧县, 丹江口, 谷城, 老河口, 宜城, 南漳, 保康, 神农架, 钟祥, 沙洋, 远安, 兴山, 巴东, 秭归, 当阳, 建始, 利川, 公安, 宣恩, 咸丰, 长阳, 宜都, 枝江, 松滋, 江陵, 石首, 监利, 洪湖, 孝感, 应城, 云梦, 天门, 仙桃, 红安, 安陆, 潜江, 嘉鱼, 大冶, 通山, 赤壁, 崇阳, 通城, 五峰\*, 京山\*。

注：全省县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组。

## 粤 湖南

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为 0.10g：

常德（1个市辖区）。

Ⅵ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：

岳阳（1个市辖区），岳阳县，汨罗，湘阴，临澧，澧县，津市，桃源，安乡，汉寿。

Ⅶ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.20g：

长沙（1个市辖区），长沙县，益阳（1个市辖区），张家界（1个市辖区），郴州（1个市辖区），邵阳（1个市辖区），邵阳县，泸溪，沅陵，娄底，宜章，资兴，平江，宁乡，新化，冷水江，涟源，双峰，新邵，邵东，隆回，石门，慈利，华容，南县，临湘，沅江，桃江，望城，溆浦，会同，靖州，韶山，江华，宁远，道县，临武，湘乡\*，安化\*，中方\*，洪江\*。

注：全省县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组。

## 粤 广东

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为 0.10g：

汕头（1个市辖区），澄海，潮安，南澳，徐闻，潮州\*。

Ⅵ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：

揭阳，揭东，潮阳，饶平。

Ⅶ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.20g：

广州（除花都外的 1个市辖区），深圳（1个市辖区），湛江（1个市辖区），汕尾，海丰，普宁，惠来，阳江，阳东，阳西，茂名，化州，廉江，遂溪，吴川，丰顺，南海，顺德，中山，珠海，斗门，电白，雷州，佛山（1个市辖区）\*，江门（1个市辖区）\*，新会\*，陆丰\*。

Ⅷ抗震设防烈度为 Ⅸ度，设计基本地震加速度值为 0.30g：

韶关（1个市辖区），肇庆（1个市辖区），花都，河源，揭西，东源，梅州，东莞，清远，清新，南雄，仁化，始兴，乳源，曲江，英德，佛冈，龙门，龙川，平远，大埔，从化，梅县，兴宁，五华，紫金，陆河，增城，博罗，惠州，惠阳，惠东，三水，四会，云浮，云安，高要，高明，鹤山，封开，郁南，罗定，信宜，新兴，开平，恩平，台山，阳春，高州，翁源，连平，和平，蕉岭，新丰\*。

注：全省县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组。

粤区附录 广西壮族自治区

Ⅰ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：  
灵山，田东。

Ⅱ抗震设防烈度为 Ⅷ度设计基本地震加速度值为 0.15g：  
玉林，兴业，横县，北流，百色，田阳，平果，隆安，浦北，博白，乐

业\*。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅸ度，设计基本地震加速度值为 0.25g：

南宁（远个市辖区），桂林（缘个市辖区），柳州（缘个市辖区），梧州（猿个市辖区），钦州（圆个市辖区），贵港（圆个市辖区），防城港（圆个市辖区），北海（圆个市辖区），兴安，灵川，临桂，永福，鹿寨，天峨，东兰，巴马，都安，大化，马山，融安，象州，武宣，桂平，平南，上林，宾阳，武鸣，大新，扶绥，邕宁，东兴，合浦，钟山，贺州，藤县，苍梧，容县，岑溪，陆川，凤山，凌云，田林，隆林，西林，德保，靖西，那坡，天等，崇左，上思，龙州，宁明，融水，凭祥，全州。

注：全自治区县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组。

粤区附录 海南省

Ⅰ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：  
海口（猿个市辖区），琼山。

Ⅱ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：  
文昌，定安。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：  
澄迈。

Ⅳ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：  
临高，琼海，儋州，屯昌。

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅸ度，设计基本地震加速度值为 0.25g：  
三亚，万宁，琼中，昌江，白沙，保亭，陵水，东方，乐东，通什。

注：全省县级及县级以上设防城镇，设计地震分组均为第一组。

粤区附录 四川省

Ⅰ抗震设防烈度不低于 Ⅷ度，设计基本地震加速度值不小于 0.15g：  
第一组：康定，西昌。

Ⅱ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：  
第一组：冕宁\*。

Ⅲ 抗震设防烈度为 Ⅴ 度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：松潘，道孚，泸定，甘孜，炉霍，石棉，喜德，普格，宁南，德昌，理塘。

第二组：九寨沟。

Ⅳ 抗震设防烈度为 Ⅵ 度，设计基本地震加速度值为  $0.25g$ ：

第一组：宝兴，茂县，巴塘，德格，马边，雷波。

第二组：越西，雅江，九龙，平武，木里，盐源，会东，新龙。

第三组：天全，荥经，汉源，昭觉，布拖，丹巴，芦山，甘洛。

Ⅴ 抗震设防烈度为 Ⅶ 度，设计基本地震加速度值为  $0.40g$ ：

第一组：成都（除龙泉驿清白江的 缘个市辖区），乐山（除金口河外的 猿个市辖区），自贡（源个市辖区），宜宾，宜宾县，北川，安县，绵竹，汶川，都江堰，双流，新津，青神，峨边，沐川，屏山，理县，得荣，新都\*。

第二组：攀枝花（猿个市辖区），江油，什邡，彭州，邛崃，温江，大邑，崇州，邛崃，蒲江，彭山，丹棱，眉山，洪雅，夹江，峨边，若尔盖，色达，壤塘，马尔康，石渠，白玉，金川，黑水，盐边，米易，乡城，稻城，金口河，朝天区\*。

第三组：青川，雅安，名山，美姑，金阳，小金，会理。

Ⅵ 抗震设防烈度为 Ⅷ 度，设计基本地震加速度值为  $0.60g$ ：

第一组：泸州（猿个市辖区），内江（圆个市辖区），德阳，宣汉，达州，达县，大竹，邻水，渠县，广安，华蓥，隆昌，富顺，泸县，南溪，江安，长宁，高县，珙县，兴文，叙永，古蔺，金堂，广汉，简阳，资阳，仁寿，资中，犍为，荣县，威远，南江，通江，万源，巴中，苍溪，阆中，仪陇，西充，南部，盐亭，三台，射洪，大英，乐至，旺苍，龙泉驿，清白江。

第二组：绵阳（圆个市辖区），梓潼，中江，阿坝，筠连，井研。

第三组：广元（除朝天区外的 圆个市辖区），剑阁，罗江，红原。

## 粤 贵州省

Ⅲ 抗震设防烈度为 Ⅴ 度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：望谟。

第二组：威宁。

Ⅳ 抗震设防烈度为 Ⅵ 度，设计基本地震加速度值为  $0.25g$ ：

第一组：贵阳（除白云外的 缘个市辖区），凯里，毕节，安顺，都匀，六盘水，黄平，福泉，贵定，麻江，清镇，龙里，平坝，纳雍，织金，水城，普定，六枝，镇宁，惠水，长顺，关岭，紫云，罗甸，兴仁，贞丰，安龙，册亨，金沙，印江，赤水，习水，思南\*。

第二组：赫章，普安，晴隆，兴义。

第三组：盘县。

## 云南省

抗震设防烈度不低于 Ⅷ度，设计基本地震加速度值不小于 0.15g：

第一组：寻甸，东川。

第二组：澜沧。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：

第一组：剑川，嵩明，宜良，丽江，鹤庆，永胜，潞西，龙陵，石屏，建水。

第二组：耿马，双江，沧源，勐海，西盟，孟连。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：

第一组：石林，玉溪，大理，永善，巧家，江川，华宁，峨山，通海，洱源，宾川，弥渡，祥云，会泽，南涧。

第二组：昆明（除东川外的 9 个市辖区），思茅，保山，马龙，呈贡，澄江，晋宁，易门，漾濞，巍山，云县，腾冲，施甸，瑞丽，梁河，安宁，凤庆\*，陇川\*。

第三组：景洪，永德，镇康，临沧。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：

第一组：中甸，泸水，大关，新平\*。

第二组：沾益，个旧，红河，元江，禄丰，双柏，开远，盈江，永平，昌宁，宁蒗，南华，楚雄，勐腊，华坪，景东\*。

第三组：曲靖，弥勒，陆良，富民，禄劝，武定，兰坪，云龙，景谷，普洱。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：

第一组：盐津，绥江，德钦，水富，贡山。

第二组：昭通，彝良，鲁甸，福贡，永仁，大姚，元谋，姚安，牟定，墨江，绿春，镇沅，江城，金平。

第三组：富源，师宗，泸西，蒙自，元阳，维西，宣威。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g：

第一组：威信，镇雄，广南，富宁，西畴，麻栗坡，马关。

第二组：丘北，砚山，屏边，河口，文山。

第三组：罗平。

## 西藏自治区

抗震设防烈度不低于 Ⅷ度，设计基本地震加速度值不小于 0.15g:

第二组：当雄，墨脱。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.10g:

第一组：申扎。

第二组：米林，波密。

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.10g:

第一组：普兰，聂拉木，萨嘎。

第二组：拉萨，堆龙德庆，尼木，仁布，尼玛，洛隆，隆子，错那，曲松。

第三组：那曲，林芝（八一镇），林周。

抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为 0.05g:

第一组：札达，吉隆，拉孜，谢通门，亚东，洛扎，昂仁。

第二组：日土，江孜，康马，白朗，扎囊，措美，桑日，加查，边坝，八宿，丁青，类乌齐，乃东，琼结，贡嘎，朗县，达孜，日喀则\*，噶尔\*。

第三组：南木林，班戈，浪卡子，墨竹工卡，曲水，安多，聂荣。

抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为 0.05g:

第一组：改则，措勤，仲巴，定结，芒康。

第二组：昌都，定日，萨迦，岗巴，巴青，工布江达，索县，比如，嘉黎，察雅，左贡，察隅，江达，贡觉。

抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为 0.05g:

第一组：革吉。

## 陕西省

抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为 0.15g:

第一组：西安（愿个市辖区），渭南，华县，华阴，潼关，大荔。

第二组：陇县。

抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为 0.10g:

第一组：咸阳（猴个市辖区），宝鸡（圆个市辖区），高陵，千阳，岐山，凤翔扶风，武功，兴平，周至，眉县，宝鸡县，三原，富平，澄城，蒲城，泾阳，礼泉，长安，户县，蓝田，韩城，合阳。

第二组：凤县。

抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为 0.05g:

第一组：安康，平利，乾县，洛南。

第二组：白水，耀县，淳化，麟游，永寿，商州，铜川，（圆个市辖区）\*，

柞水\*。

第三组：太白，留坝，勉县，略阳。

~~Ⅲ~~抗震设防烈度为 远度，设计基本地震加速度值为 ~~Ⅲ~~~~Ⅲ~~早:

第一组：延安，清涧，神木，佳县，米脂，绥德，安塞，延川，延长，定边，吴旗，志丹，甘泉，富县，商南，旬阳，紫阳，镇巴，白河，岚皋，镇坪，子长\*。

第二组：府谷，吴堡，洛川，黄陵，旬邑，洋县，西乡，石泉，汉阴，宁陕，汉中，南郑，城固。

第三组：宁强，宜川，黄龙，宜君，长武，彬县，佛坪，镇安，丹凤，山阳。

~~Ⅲ~~~~Ⅲ~~缘 甘肃省

~~Ⅲ~~抗震设防烈度不低于 忽度，设计基本地震加速度值不小于 ~~Ⅲ~~~~Ⅲ~~早:

第一组：古浪。

~~Ⅲ~~抗震设防烈度为 愿度，设计基本地震加速度值为 ~~Ⅲ~~~~Ⅲ~~早:

第一组：天水（圆个市辖区），礼县，西和。

~~Ⅲ~~抗震设防烈度为 愿度，设计基本地震加速度值为 ~~Ⅲ~~~~Ⅲ~~早:

第一组：宕昌，文县，肃北，武都。

第二组：兰州（缘个市辖区），成县，舟曲，徽县，康县，武威，永登，天祝，景泰，靖远，陇西，武山，秦安，清水，甘谷，漳县，会宁，静宁，庄浪，张家川，通渭，华亭。

~~Ⅲ~~抗震设防烈度为 苑度，设计基本地震加速度值为 ~~Ⅲ~~~~Ⅲ~~早:

第一组：康乐，嘉峪关，玉门，酒泉，高台，临泽，肃南。

第二组：白银（圆个市辖区），永靖，岷县，东乡，和政，广河，临潭，卓尼，迭部，临洮，渭源，皋兰，崇信，榆中，定西，金昌，两当，阿克塞，民乐，永昌。

第三组：平凉。

~~Ⅲ~~抗震设防烈度为 苑度，设计基本地震加速度值为 ~~Ⅲ~~~~Ⅲ~~早:

第一组：张掖，合作，玛曲，金塔，积石山。

第二组：敦煌，安西，山丹，临夏，临夏县，夏河，碌曲，泾川，灵台。

第三组：民勤，镇原，环县。

~~Ⅲ~~抗震设防烈度为 远度，设计基本地震加速度值为 ~~Ⅲ~~~~Ⅲ~~早:

第二组：华池，正宁，庆阳，合水，宁县。

第三组：西峰。



## 粤 圆 苑 青海省

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.10g$ ：

第一组：玛沁。

第二组：玛多，达日。

Ⅵ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：祁连，玉树。

第二组：甘德，门源。

Ⅶ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.20g$ ：

第一组：乌兰，治多，称多，杂多，囊谦。

第二组：西宁（源个市辖区），同仁，共和，德令哈，海晏，湟源，湟中，平安，民和，化隆，贵德，尖扎，循化，格尔木，贵南，同德，河南，曲麻莱，久治，班玛，天峻，刚察。

第三组：大通，互助，乐都，都兰，兴海。

Ⅷ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.30g$ ：

第二组：泽库。

## 粤 圆 愿 宁夏回族自治区

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.10g$ ：

第一组：海原。

Ⅵ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：银川（猿个市辖区），石嘴山（猿个市辖区），吴忠，惠农，平罗，贺兰，永宁，青铜峡，泾源，灵武，陶乐，固原。

第二组：西吉，中卫，中宁，同心，隆德。

Ⅶ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.20g$ ：

第三组：彭阳。

Ⅷ抗震设防烈度为 Ⅷ度，设计基本地震加速度值为  $0.30g$ ：

第三组：盐池。

## 粤 圆 怨 新疆维吾尔自治区

Ⅴ抗震设防烈度不低于 Ⅵ度，设计基本地震加速度值不小于  $0.10g$ ：

第二组：乌恰，塔什库尔干。

Ⅵ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第二组：阿图什，喀什，疏附。

Ⅶ抗震设防烈度为 Ⅵ度，设计基本地震加速度值为  $0.10g$ ：

第一组：乌鲁木齐（苑小区辖区），乌鲁木齐县，温宿，阿克苏，柯坪，米泉，乌苏，特克斯，库车，巴里坤，青河，富蕴，乌什\*。

第二组：尼勒克，新源，巩留，精河，奎屯，沙湾，玛纳斯，石河子，独山子。

第三组：疏勒，伽师，阿克陶，英吉沙。

Ⅲ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：库尔勒，新和，轮台，和静，焉耆，博湖，巴楚，昌吉，拜城，阜康\*，木垒\*。

第二组：伊宁，伊宁县，霍城，察布查尔，呼图壁。

第三组：岳普湖。

Ⅳ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：吐鲁番，和田，和田县，昌吉，吉木萨尔，洛浦，奇台，伊吾，鄯善，托克逊，和硕，尉犁，墨玉，策勒，哈密。

第二组：克拉玛依（克拉玛依区），博乐，温泉，阿合奇，阿瓦提，沙雅。

第三组：莎车，泽普，叶城，麦盖提，皮山。

Ⅴ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：于田，哈巴河，塔城，额敏，福海，和布克赛尔，乌尔禾。

第二组：阿勒泰，托里，民丰，若羌，布尔津，吉木乃，裕民，白碱滩。

第三组：且末。

## 粤港澳大湾区和台湾省

Ⅵ抗震设防烈度不低于 Ⅷ度，设计基本地震加速度值不小于  $0.15g$ ：

第一组：台中。

第二组：苗栗，云林，嘉义，花莲。

Ⅶ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第二组：台北，桃园，台南，基隆，宜兰，台东，屏东。

Ⅷ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第二组：高雄，澎湖。

Ⅸ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：香港。

Ⅹ抗震设防烈度为 Ⅶ度，设计基本地震加速度值为  $0.15g$ ：

第一组：澳门。

# 附录 月 中华人民共和国防震减灾法

## 第一章 总 则

第一条 为了防御与减轻地震灾害，保护人民生命和财产安全，保障社会主义建设顺利进行，制定本法。

第二条 在中华人民共和国境内从事地震监测预报、地震灾害预防、地震应急、震后救灾与重建等（以下简称防震减灾）活动，适用本法。

第三条 防震减灾工作，实行预防为主、防御与救助相结合的方针。

第四条 防震减灾工作，应当纳入国民经济和社会发展规划。

第五条 国家鼓励和支持防震减灾的科学技术研究，推广先进的科学研究成果，提高防震减灾工作水平。

第六条 各级人民政府应当加强对防震减灾工作的领导，组织有关部门采取措施，做好防震减灾工作。

第七条 在国务院的领导下，国务院地震行政主管部门、经济综合主管部门、建设行政主管部门、民政部门以及其他有关部门，按照职责分工，各负其责，密切配合，共同做好防震减灾工作。

县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构和其他有关部门在本级人民政府的领导下，按照职责分工，各负其责，密切配合，共同做好本行政区域内的防震减灾工作。

第八条 任何单位和个人都有依法参加防震减灾活动的义务。

中国人民解放军、中国人民武装警察部队和民兵应当执行国家赋予的防震减灾任务。

## 第二章 地震监测预报

第九条 国家加强地震监测预报工作，鼓励、扶持地震监测预报的科学技术研究，逐步提高地震监测预报水平。

第十条 国务院地震行政主管部门负责制定全国地震监测预报方案，并组织实施。

省、自治区、直辖市人民政府负责管理地震工作的部门，根据全国地震监测预报方案，负责制定本行政区域内的地震监测预报方案，并组织实施。

第十一条 国务院地震行政主管部门根据地震活动趋势，提出确定地震重点监视防御区的意见，报国务院批准。

地震重点监视防御区的县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构，应当加强地震监测工作，制定短期与临震预报方案，建立震情跟踪会商制度，提高地震监测预报能力。

第十二条 国务院地震行政主管部门和县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构，应当加强对地震活动与地震前兆的信息检测、传递、分析、处理和对可能发生地震的地点、时间和震级的预测。

第十三条 国家对地震监测台网的建设，实行统一规划，分级、分类管理。全国地震监测台网，由国家地震监测基本台网、省级地震监测台网和市、县地震监测台网组成，其建设所需投资，按照事权和财权相统一的原则，由中央和地方财政承担。

为本单位服务的地震监测台网，由有关单位投资建设和管理，并接受所在地的县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构的指导。

第十四条 国家依法保护地震监测设施和地震观测环境，任何单位和个人不得危害地震监测设施和地震观测环境。地震观测环境应当按照地震监测设施周围不能有影响其工作效能的干扰源的要求划定保护范围。

本法所称地震监测设施，是指地震监测台网的监测设施、设备、仪器和其他依照国务院地震行政主管部门的规定设立的地震监测设施、设备、仪器。

第十五条 新建、扩建、改建建设工程，应当避免对地震监测设施和地震观测环境造成危害；确实无法避免造成危害的，建设单位应当事先征得国务院地震行政主管部门或者其授权的县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构的同意，并按照国务院的规定采取相应的措施后，方可建设。

第十六条 国家对地震预报实行统一发布制度。地震短期预报和临震预报，由省、自治区、直辖市人民政府按照国务院规定的程序发布。

任何单位或者从事地震工作的专业人员关于短期地震预测或者临震预测的意见，应当报国务院地震行政主管部门或者县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构按照前款规定处理，不得擅自向社会扩散。

### 第三章 地震灾害预防

第十七条 新建、扩建、改建建设工程，必须达到抗震设防要求。本条第三款规定以外的建设工程，必须按照国家颁布的地震烈度区划图或者地震动参数区划图规定的抗震设防要求，进行抗震设防。

重大建设工程和可能发生严重次生灾害的建设工程，必须进行地震安全性评

价；并根据地震安全性评价的结果，确定抗震设防要求，进行抗震设防。

本法所称重大建设工程，是指对社会有重大价值或者有重大影响的工程。

本法所称可能发生严重次生灾害的建设工程，是指受地震破坏后可能引发水灾、火灾、爆炸、剧毒或者强腐蚀性物质大量泄漏和其他严重次生灾害的建设工程，包括水库大坝、堤防和贮油、贮气、贮存易燃易爆、剧毒或者强腐蚀性物质的设施以及其他可能发生严重次生灾害的建设工程。

核电站和核设施工程，受地震破坏后可能引发放射性污染的严重次生灾害，必须认真进行地震安全性评价，并依法进行严格的抗震设防。

第十八条 国务院地震行政主管部门负责制定地震烈度区划图或者地震动参数区划图，并负责对地震安全性评价结果的审定工作。

国务院建设行政主管部门负责制定各类房屋建筑及其附属设施和城市市政设施的建设工程的抗震设计规范。但是，本条第三款另有规定的除外。

国务院铁路、交通、民用航空、水利和其他有关专业主管部门负责分别制定铁路、公路、港口、码头、机场、水工程和其他专业建设工程抗震设计规范。

第十九条 建设工程必须按照抗震设防要求和抗震设计规范进行抗震设计，并按照抗震设计进行施工。

第二十条 已经建成的下列建筑物、构筑物，未采取抗震设防措施的，应当按照国家有关规定进行抗震性能鉴定，并采取必要的抗震加固措施：

- (一) 属于重大建设工程的建筑物、构筑物；
- (二) 可能发生严重次生灾害的建筑物、构筑物；
- (三) 有重大文物价值和纪念意义的建筑物、构筑物；
- (四) 地震重点监视防御区的建筑物、构筑物。

第二十一条 对地震可能引起的火灾、水灾、山体滑坡、放射性污染、疫情等次生灾害源，有关地方人民政府应当采取相应的有效防范措施。

第二十二条 根据震情和震害预测结果，国务院地震行政主管部门和县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构，应当会同同级有关部门编制防震减灾规划，报本级人民政府批准后实施。

修改防震减灾规划，应当报经原批准机关批准。

第二十三条 各级人民政府应当组织有关部门开展防震减灾知识的宣传教育，增强公民的防震减灾意识，提高公民在地震灾害中自救、互救的能力；加强对有关专业人员的培训，提高抢险救灾能力。

第二十四条 地震重点监视防御区的县级以上地方人民政府应当根据实际需要与可能，在本级财政预算和物资储备中安排适当的抗震救灾资金和物资。

第二十五条 国家鼓励单位和个人参加地震灾害保险。

## 第四章 地震应急

第二十六条 国务院地震行政主管部门会同国务院有关部门制定国家破坏性地震应急预案，报国务院批准。

国务院有关部门应当根据国家破坏性地震应急预案，制定本部门的破坏性地震应急预案，并报国务院地震行政主管部门备案。

可能发生破坏性地震地区的县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构，应当会同有关部门参照国家破坏性地震应急预案，制定本行政区域内的破坏性地震应急预案，报本级人民政府批准；省、自治区和人口在一百万以上的城市的破坏性地震应急预案，还应当报国务院地震行政主管部门备案。

本法所称破坏性地震，是指造成人员伤亡和财产损失的地震灾害。

第二十七条 国家鼓励、扶持地震应急、救助技术和装备的研究开发工作。可能发生破坏性地震地区的县级以上地方人民政府应当责成有关部门进行必要的地震应急、救助装备的储备和使用训练工作。

第二十八条 破坏性地震应急预案主要包括下列内容：

- (一) 应急机构的组成和职责；
- (二) 应急通信保障；
- (三) 抢险救援人员的组织和资金、物资的准备；
- (四) 应急、救助装备的准备；
- (五) 灾害评估准备；
- (六) 应急行动方案。

第二十九条 破坏性地震临震预报发布后，有关的省、自治区、直辖市人民政府可以宣布所预报的区域进入临震应急期；有关的地方人民政府应当按照破坏性地震应急预案，组织有关部门动员社会力量，做好抢险救灾的准备工作。

第三十条 造成特大损失的严重破坏性地震发生后，国务院应当成立抗震救灾指挥机构，组织有关部门实施破坏性地震应急预案。国务院抗震救灾指挥机构的办事机构，设在国务院地震行政主管部门。

破坏性地震发生后，有关的县级以上地方人民政府应当设立抗震救灾指挥机构，组织有关部门实施破坏性地震应急预案。

本法所称严重破坏性地震，是指造成严重的人员伤亡和财产损失，使灾区丧失或者部分丧失自我恢复能力，需要国家采取相应行动的地震灾害。

第三十一条 地震灾区的各级地方人民政府应当及时将震情、灾情及其发展趋势等信息报告上一级人民政府；地震灾区的省、自治区、直辖市人民政府按照国务院有关规定向社会公告震情和灾情。

国务院地震行政主管部门或者地震灾区的省、自治区、直辖市人民政府负责

管理地震工作的部门，应当及时会同有关部门对地震灾害损失进行调查、评估；灾情调查结果，应当及时报告本级人民政府。

第三十二条 严重破坏性地震发生后，为了抢险救灾并维护社会秩序，国务院或者地震灾区的省、自治区、直辖市人民政府，可以在地震灾区实行下列紧急应急措施：

- (一) 交通管制；
- (二) 对食品等基本生活必需品和药品统一发放和分配；
- (三) 临时征用房屋、运输工具和通信设备等；
- (四) 需要采取的其他紧急应急措施。

## 第五章 震后救灾与重建

第三十三条 破坏性地震发生后，地震灾区的各级地方人民政府应当组织各方面力量，抢救人员，并组织基层单位和人员开展自救和互救；非地震灾区的各级地方人民政府应当根据震情和灾情，组织和动员社会力量，对地震灾区提供救助。

严重破坏性地震发生后，国务院应当对地震灾区提供救助，责成经济综合主管部门综合协调救灾工作并会同国务院其他有关部门，统筹安排救灾资金和物资。

第三十四条 地震灾区的县级以上地方人民政府应当组织卫生、医药和其他有关部门和单位，做好伤员医疗救护和卫生防疫等工作。

第三十五条 地震灾区的县级以上地方人民政府应当组织民政和其他有关部门和单位，迅速设置避难场所和救济物资供应点，提供救济物品，妥善安排灾民生活，做好灾民的转移和安置工作。

第三十六条 地震灾区的县级以上地方人民政府应当组织交通、邮电、建设和其他有关部门和单位采取措施，尽快恢复被破坏的交通、通信、供水、排水、供电、供气、输油等工程，并对次生灾害源采取紧急防护措施。

第三十七条 地震灾区的县级以上地方人民政府应当组织公安机关和其他有关部门加强治安管理和安全保卫工作，预防和打击各种犯罪活动，维持社会秩序。

第三十八条 因救灾需要，临时征用的房屋、运输工具、通信设备等，事后应当及时归还；造成损坏或者无法归还的，按照国务院有关规定给予适当补偿或者作其他处理。

第三十九条 在震后救灾中，任何单位和个人都必须遵纪守法、遵守社会公德，服从指挥，自觉维护社会秩序。

第四十条 任何单位和个人不得截留、挪用地震救灾资金和物资。各级人

民政府审计机关应当加强对地震救灾资金使用情况的审计监督。

第四十一条 地震灾区的县级以上地方人民政府应当根据震害情况和抗震设防要求，统筹规划、安排地震灾区的重建工作。

第四十二条 国家依法保护典型地震遗址、遗迹。典型地震遗址、遗迹的保护，应当列入地震灾区的重建规划。

## 第六章 法律 责任

第四十三条 违反本法规定，有下列行为之一的，由国务院地震行政主管部门或者县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构，责令停止违法行为，恢复原状或者采取其他补救措施；情节严重的，可以处五千元以上十万元以下的罚款；造成损失的，依法承担民事责任；构成犯罪的，依法追究刑事责任：

（一）新建、扩建、改建建设工程，对地震监测设施或者地震观测环境造成危害，又未依法事先征得同意并采取相应措施的；

（二）破坏典型地震遗址、遗迹的。

第四十四条 违反本法第十七条第三款规定，有关建设单位不进行地震安全性评价的，或者不按照根据地震安全性评价结果确定的抗震设防要求进行抗震设防的，由国务院地震行政主管部门或者县级以上地方人民政府负责管理地震工作的部门或者机构，责令改正，处一万元以上十万元以下的罚款。

第四十五条 违反本法规定，有下列行为之一的，由县级以上人民政府建设行政主管部门或者其他有关专业主管部门按照职责权限责令改正，处一万元以上十万元以下的罚款：

（一）不按照抗震设计规范进行抗震设计的；

（二）不按照抗震设计进行施工的；

第四十六条 截留、挪用地震救灾资金和物资，构成犯罪的，依法追究刑事责任；尚不构成犯罪的，给予行政处分。

第四十七条 国家工作人员在防震减灾工作中滥用职权，玩忽职守，徇私舞弊，构成犯罪的，依法追究刑事责任；尚不构成犯罪的，给予行政处分。

## 第七章 附 则

第四十八条 本法自 1995 年 12 月 1 日起施行。



# 附录 悦 破坏性地震应急条例

## 第一章 总 则

第一条 为了加强对破坏性地震应急活动的管理，减轻地震灾害损失，保障国家财产和公民人身、财产安全，维护社会秩序，制定本条例。

第二条 在中华人民共和国境内从事破坏性地震应急活动，必须遵守本条例。

第三条 地震应急工作实行政府领导、统一管理和分级、分部门负责的原则。

第四条 各级人民政府应当加强地震应急的宣传、教育工作，提高社会防震减灾意识。

第五条 任何组织和个人都有参加地震应急活动的义务。

中国人民解放军和中国人民武装警察部队是地震应急工作的重要力量。

## 第二章 应 急 机 构

第六条 国务院防震减灾工作主管部门指导和监督全国地震应急工作。国务院有关部门按照各自的职责，具体负责本部门的地震应急工作。

第七条 造成特大损失的严重破坏性地震发生后，国务院设立抗震救灾指挥部，国务院防震减灾工作主管部门为其办事机构；国务院有关部门设立本部门的地震应急机构。

第八条 县级以上地方人民政府防震减灾工作主管部门指导和监督本行政区域内的地震应急工作。

破坏性地震发生后，有关县级以上地方人民政府应当设立抗震救灾指挥部，对本行政区域内的地震应急工作实行集中领导，其办事机构设在本级人民政府防震减灾工作主管部门或者本级人民政府指定的其他部门；国务院另有规定的，从其规定。

## 第三章 应 急 预 案

第九条 国家的破坏性地震应急预案，由国务院防震减灾工作主管部门会同国务院有关部门制定，报国务院批准。

第十条 国务院有关部门应当根据国家的破坏性地震应急预案，制定本部门的破坏性地震应急预案，并报国务院防震减灾工作主管部门备案。

第十一条 根据地震灾害预测，可能发生破坏性地震地区的县级以上地方人民政府防震减灾工作主管部门应当会同同级有关部门以及有关单位，参照国家的破坏性地震应急预案，制定本行政区域内的破坏性地震应急预案，报本级人民政府批准；省、自治区和人口在 500 万以上的城市的破坏性地震应急预案，还应当报国务院防震减灾工作主管部门备案。

第十二条 部门和地方制定破坏性地震应急预案，应当从本部门或者本地区的实际情况出发，做到切实可行。

第十三条 破坏性地震应急预案应当包括下列主要内容：

- (一) 应急机构的组成和职责；
- (二) 应急通信保障；
- (三) 抢险救援的人员、资金、物质准备；
- (四) 灾害评估准备；
- (五) 应急行动方案。

第十四条 制定破坏性地震应急预案的部门和地方，应当根据震情的变化以及实施中发现的问题，及时对其制定的破坏性地震应急预案进行修订、补充；涉及重大事项调整的，应当报经原批准机关同意。

## 第四章 临震应急

第十五条 地震临震预报，由省、自治区、直辖市人民政府依照国务院有关发布地震预报的规定统一发布，其他任何组织或者个人不得发布地震预报。

任何组织或者个人都不得传播有关地震的谣言。发生地震谣传时，防震减灾工作主管部门应当协助人民政府迅速予以平息和澄清。

第十六条 破坏性地震临震预报发布后，有关省、自治区、直辖市人民政府可以宣布预报区进入临震应急期，并指明临震应急期的起止时间。

临震应急期一般为 7 日；必要时，可以延长 7 日。

第十七条 在临震应急期，有关地方人民政府应当根据震情，统一部署破坏性地震应急预案的实施工作，并对临震应急活动中发生的争议采取紧急处理措施。

第十八条 在临震应急期，各级防震减灾工作主管部门应当协助本级人民政府对实施破坏性地震应急预案工作进行检查。

第十九条 在临震应急期，有关地方人民政府应当根据实际情况，向预报区的居民以及其他人员提出避震撤离的劝告；情况紧急时，应当有组织地进行避震疏散。

第二十条 在临震应急期，有关地方人民政府有权在本行政区域内紧急调用物资、设备、人员和占用场地，任何组织或者个人都不得阻拦；调用物质、设备或者占用场地的，事后应当及时归还或者给予补偿。

第二十一条 在临震应急期，有关部门应当对生命线工程和次生灾害源采取紧急防护措施。

## 第五章 震后应急

第二十二条 破坏性地震发生后，有关的省、自治区、直辖市人民政府应当宣布灾区进入震后应急期，并指明震后应急期的起止时间。

震后应急期一般为 5 日；必要时，可以延长 10 日。

第二十三条 破坏性地震发生后，抗震救灾指挥部应当及时组织实施破坏性地震应急预案，及时将震情、灾情及其发展趋势等信息报告上一级人民政府。

第二十四条 防震减灾工作主管部门应当加强现场地震监测预报工作，并及时会同有关部门评估地震灾害损失；灾情调查结果，应当及时报告本级人民政府抗震救灾指挥部和上一级防震减灾工作主管部门。

第二十五条 交通、铁路、民航等部门应当尽快恢复被损毁的道路、铁路、水港、空港和有关设施，并优先保证抢险救援人员、物资的运输和灾民的疏散。其他部门有交通运输工具的，应当无条件服从抗震救灾指挥部的征用或者调用。

第二十六条 通信部门应当尽快恢复被破坏的通信设施，保证抗震救灾通信畅通。其他部门有通信设施的，应当优先为破坏性地震应急工作服务。

第二十七条 供水、供电部门应当尽快恢复被破坏的供水、供电设施，保证灾区用水、用电。

第二十八条 卫生部门应当立即组织急救队伍，利用各种医疗设施或者建立临时治疗点，抢救伤员，及时检查监测灾区的饮用水源、食品等，采取有效措施防止和控制传染病的暴发流行，并向受灾人员提供精神、心理卫生方面的帮助。医药部门，应当及时提供救灾所需药品。其他部门应当配合卫生、医药部门，做好卫生防疫以及伤亡人员的抢救、处理工作。

第二十九条 民政部门应当迅速设置避难场所和救济物资供应点，提供救济物品等，保障灾民的基本生活，做好灾民的转移和安置工作。其他部门应当支持、配合民政部门妥善安置灾民。

第三十条 公安部门应当加强灾区的治安管理和安全保卫工作，预防和制止各种破坏活动，维护社会治安，保证抢险救灾工作顺利进行，尽快恢复社会秩序。

第三十一条 石油、化工、水利、电力、建设等部门和单位以及危险品生产、储运等单位，应当按照各自的职责，对可能发生或者已经发生次生灾害的地

点和设施采取紧急处置措施，并加强监视、控制，防止灾害扩展。

公安消防机构应当严密监视灾区火灾的发生；出现火灾时，应当组织力量抢险人员和物资，并采取有效防范措施，防止火势扩大、蔓延。

第三十二条 广播电台、电视台等新闻单位应当根据抗震救灾指挥部提供的情况，按照规定及时向公众发布震情、灾情等有关信息，并做好宣传、报道工作。

第三十三条 抗震救灾指挥部可以请求非灾区的人民政府接受并妥善安置灾民和提供其他救援。

第三十四条 破坏性地震发生后，国内非灾区提供的紧急救援，由抗震救灾指挥部负责接受和安排；国际社会提供的紧急救援，由国务院民政部门负责接受和安排；国外红十字会和国际社会通过中国红十字会提供的紧急救援，由中国红十字会负责接受和安排。

第三十五条 因严重破坏性地震应急的需要，可以在灾区实行特别管制措施，省、自治区、直辖市行政区域内的特别管制措施，由省、自治区、直辖市的人民政府决定；跨省、自治区、直辖市的特别管制措施，由有关省、自治区、直辖市人民政府共同决定或者由国务院决定；中断干线交通或者封锁国境的特别措施，由国务院决定。

特别管制措施的解除，由原决定机关宣布。

## 第六章 奖励和处罚

第三十六条 在破坏性地震应急活动中有下列事迹之一的，由其所在单位、上级机关或者防震减灾工作主管部门给予表彰或者奖励：

- (一) 出色完成破坏性地震应急任务的；
- (二) 保护国家、集体和公民的财产或者抢救人员有功的；
- (三) 及时排除险情，防止灾害扩大，成绩显著的；
- (四) 对地震应急工作提出重大建议，实施效果显著的；
- (五) 因震情、灾情测报准确和信息传递及时而减轻灾害损失的；
- (六) 及时供应用于应急救援的物资和工具或者节约经费开支，成绩显著的；
- (七) 有其他特殊贡献的。

第三十七条 有下列行为之一的，对负有直接责任的主管人员和其他直接责任人员依法给予行政处分；属于违反治安管理行为的，依照治安管理处罚条例的规定给予处罚；构成犯罪的，依法追究刑事责任：

- (一) 不按照本条例规定制定破坏性地震应急预案的；
- (二) 不按照破坏性地震应急预案的规定和抗震救灾指挥部的要求实施破坏性地震应急预案的；

- (三) 违抗抗震救灾指挥部命令，拒不承担地震应急任务的；
- (四) 阻扰抗震救灾指挥部紧急调用物资、人员或者占用场地的；
- (五) 贪污、挪用、盗窃地震应急工作经费或者物资的；
- (六) 有特定责任的国家工作人员在临震应急期或者震后应急期不坚守岗位，不及时掌握震情、灾情，临震脱逃或者玩忽职守的；
- (七) 在临震应急期或者震后应急期哄抢国家、集体或者公民的财产的；
- (八) 阻碍抗震救灾人员执行职务或者进行破坏活动的；
- (九) 不按照规定和实际情况报告灾情的；
- (十) 散布谣言，扰乱社会秩序，影响破坏性地震应急工作的；
- (十一) 有对破坏性地震应急工作造成危害的其他行为的。

## 第七章 附 则

第三十八条 本条例下列用语的含义：

- (一) “地震应急”，是指为了减轻地震灾害而采取的不同于正常工作程序的紧急防灾和抢险行动；
- (二) “破坏性地震”，是指造成一定数量的人员伤亡和经济损失的地震事件；
- (三) “严重破坏性地震”，是指造成严重的人员伤亡和经济损失，使灾区丧失或者部分丧失自我恢复能力，需要国家采取对抗行动的地震事件；
- (四) “生命线工程”，是指对社会生活、生产有重大影响交通、通信、供水、排水、供电、供气、输油等工程系统；
- (五) “次生灾害源”，是指因地震而可能引发水灾、火灾、爆炸等灾害的易燃易爆物品、有毒物质贮存设施、水坝、堤岸等。

第三十九条 本条例自 1995 年 1 月 1 日起施行。

# 附录 阅 国家破坏性地震应急预案

为保证地震应急工作高效、有序进行，最大限度地减轻地震灾害，根据《破坏性地震应急条例》，制定本预案。

一般破坏性地震发生后，由省、自治区、直辖市人民政府领导本行政区域内的地震应急工作。严重破坏性地震发生后，由省、自治区、直辖市人民政府领导本行政区域内的地震应急工作；国务院根据灾情组织、协调有关部门和单位对灾区进行紧急支援。造成特大损失的严重破坏性地震发生后，省、自治区、直辖市人民政府抗震救灾指挥部组织、指挥灾区地震应急工作；国务院抗震救灾指挥部领导、指挥和协调地震应急工作。

破坏性地震临震预报发布后或破坏性地震发生后，有关县级以上地方各级人民政府立即自动按照本应急预案采取紧急措施。

## 一、一般破坏性地震的应急反应

一般破坏性地震是指造成一定数量的人员伤亡和经济损失（指标低于严重破坏性地震）的地震。

一般破坏性地震发生后，省、自治区、直辖市人民政府要迅速了解震情、灾情，确定应急工作规模，报告国务院并抄送国务院有关部门；宣布灾区进入震后应急期；由设立的抗震救灾指挥部部署本行政区域内的地震应急工作。

中国地震局要及时将震情、灾情上报国务院并抄送国务院有关部门，根据灾情向国务院提出建议。国务院视情对灾区进行慰问。

## 二、严重破坏性地震的应急反应

严重破坏性地震是指造成人员死亡 ~~四千人~~ 五千人，直接经济损失达到该省、自治区、直辖市上年国内生产总值 ~~一亿~~ 一亿~二亿的地震。

在 ~~五万~~ 五万以上的大城市或地区发生大于 ~~五级~~ 六级、小于 ~~七级~~ 七级的地震，或在 ~~一亿~~ 一亿人口的城市或地区发生 ~~七级~~ 七级以上级的地震，也可视为严重破坏性地震。

严重破坏性地震发生后，省、自治区、直辖市人民政府应立即采取应急行动并向国务院报告，国务院视情作出应急反应。

### （一）省、自治区、直辖市人民政府的应急行动

省、自治区、直辖市人民政府迅速了解震情、灾情，确定应急工作规模，报告国务院并抄送国务院有关部门，同时通报当地驻军领导机关；宣布灾区进入震后应急期；由设立的抗震救灾指挥部部署本行政区域内的地震应急工作；必要时决定实行特别管制措施。

省、自治区、直辖市抗震救灾指挥部迅速组织进行人员抢救和工程抢险工作；组织本行政区域内的非灾区对灾区进行援助。

## （二）国务院的应急反应

震中国地震局及时向国务院报告震情、灾情并抄送国务院有关部门，提出地震趋势估计和应急工作的建议。

震后根据情况，国务院领导同志或秘书长召集国务院有关部门和总参谋部、武警总部通报震情、灾情；派出国家地震灾害紧急救援队；协调总参谋部和武警总部迅速调集部队参加抢险救灾和组织国务院有关部门对灾区进行紧急支援。必要时，国务院决定采取干线交通管制或者封锁国境等特别管制措施。

震后国务院向灾区发出慰问电或视情派工作组赴灾区慰问，指导应急工作。

震后根据灾情和受灾省、自治区、直辖市人民政府的请求，国务院确定对灾区进行紧急支援的部门和单位。有关部门和单位按国务院部署对灾区进行紧急支援。

### （员）人员抢救与工程抢险。

总参谋部、武警总部：迅速调集部队赶赴灾区，抢救被压埋人员并协助有关部门进行工程抢险。

### （圆）医疗救护与卫生防疫。

卫生部门：迅速组织急救队伍抢救伤员；帮助灾区采取有效措施防止和控制传染病的暴发流行；及时检查、监测灾区的饮用水源、食品等。

经贸部门：迅速向灾区提供所需药品、医疗器械。

### （猿）交通运输保障。

交通、铁道、民航部门：尽快恢复被毁坏的公路、铁路、港口、空港和有关设施；优先保证抢险救援人员、物资的运输和灾民的疏散。

### （源）通信保障。

电信部门：负责组织、协调电信运营企业尽快恢复被破坏的通信设施，保证抗震救灾通信畅通；经批准可调用其他有关部门的通信系统。

其他有关部门尽快恢复本部门被破坏的通信设备，协助保障抗震救灾通信畅通。

### （缘）电力保障。

经贸部门：指导、协调、监督灾区所在省级以下电力主管部门尽快恢复被破坏的发、送、变、配电设施和电力调度通信系统功能等，保证灾区用电供应。

(远) 粮食食品物资供应。

计划、粮食部门：调动粮食，保障灾区粮食的供应。

内贸部门：调运食品与物资，保障灾区生活必需品的供应。

(苑) 灾民安置。

民政部门：调配救济物品，保障灾民的基本生活，做好灾民的转移和安置工作。

(愿) 城市基础设施抢险与应急恢复。

建设部门：组织力量对灾区城市中被破坏的供排水、燃气热力、公共客货交通、市政设施进行抢排险，尽快恢复城市基础设施功能。

(怨) 维护社会治安。

公安部门、武警总部：协助灾区加强治安管理和安全保卫工作，预防和打击各种违法犯罪活动，维护社会治安，维护道路交通秩序，保证抢险救灾工作进行。

(癸) 重要目标警卫。

武警总部：增加兵力，加强对首脑机关、要害部门、金融单位、储备仓库、救济物品集散点、监狱等重要目标的警戒。

(癸) 消防。

公安部门：协助灾区采取有效措施防止火灾发生和火灾的扩大蔓延。

(癸) 次生灾害防御。

水利、经贸、石油和化学工业、煤炭、国防科学技术工业、冶金、建设、机械、信息产业、民航、环保、国土资源等有关部门：对本系统处在灾区的易于发生次生灾害的地区和设施采取紧急处置措施并加强监视、控制，防止灾害扩展，减轻或消除污染危害。

(癸) 地震监测。

地震部门：向震区派出工作组，加强地震监测工作，协调震区与相邻省市的监测工作。

(癸) 灾害损失评估。

地震部门：会同有关部门开展灾害损失评估。

(癸) 应急资金。

财政部门：做好中央应急资金以及应急拨款的准备。

民政部门：做好中央应急救济新的发放工作。

(癸) 呼吁与接受外援。

民政、外经贸、外交等部门：按国家有关规定举行新闻发布会，介绍震情、灾情，呼吁国际社会提供援助，提出急需救灾物资种类、数量，援助捐款总金额。民政部门负责接受和安排国际社会提供的紧急救援。



中国红十字会：向国际对口组织发出提供救灾援助的呼吁；接受和安排境外红十字会和国际社会通过中国红十字会提供的紧急救援。

(四) 宣传报道。

新闻部门：按照规定及时向公众发布震情、灾情等有关信息。

(五) 涉外事务。

外交、外经贸、海关、旅游、新闻等部门：除军事禁区和由国务院确定的特殊区域外，一般地区可以允许外国专家和外国救灾人员到现场进行考察和救灾；视具体情况决定是否允许外国新闻记者到现场采访。上述人员来华后的接待工作，由对口单位负责安排。

外交部门对申请来华救灾人员、新闻记者及科学考察专家的入境手续可作特殊处理，海关予以配合；运送救灾物资的外国飞机经批准允许直接飞往灾区就近的对外开放机场降落。

处于灾区的外国驻华使领馆及其人员、外国民间机构或国际组织代表机构及其人员，由对口管理部门负责安置；应有关部门邀请临时来华的外宾、外商及海外人士，由邀请单位负责安置；外国来华旅游者和港澳台旅游者由旅游接待部门负责安置。

### 三、造成特大损失的严重破坏性地震的应急反应

造成特大损失的严重破坏性地震是指造成人员死亡数超过 5000 人，直接经济损失超过该省、自治区、直辖市上年国内生产总值 1% 以上的地震。

在 50 万人口以上的大城市或地区发生 7 级以上的地震，也可视为造成特大损失的严重破坏性地震。

造成特大损失的严重破坏性地震发生后，省、自治区、直辖市人民政府立即成立抗震救灾指挥部，组织、指挥灾区地震应急工作。同时，国务院领导同志迅速召开国务院有关部门和总参谋部、武警总部的负责同志参加急会议，通报震情、灾情；国务院抗震救灾指挥部开始运作，领导、指挥和协调地震应急工作；中国地震局为指挥部办事机构；国务院有关部门设立部门地震应急机构，负责本部门的应急工作并派出联络员参加指挥部办公室工作。

(一) 国务院抗震救灾指挥部组成

指挥长：国务院领导同志。

副指挥长：国务院副秘书长；

中国人民解放军总参谋部负责同志；

国家计委负责同志；

国家经贸委负责同志；

民政部负责同志；

中国地震局负责同志。

成员：外交部、教育部、科技部、国防科工委、公安部、财政部、国土资源部、建设部、铁道部、交通部、信息产业部、水利部、外经贸部、卫生部、海关总署、环保总局、民航总局、广电总局、旅游局、新闻办、保监会、内贸局、煤炭局、冶金局、石化局、武警总部等有关部门和单位负责同志。

### (二) 指挥部办公室组成及主要职责

指挥部办公室组成

主任：中国地震局负责同志。

成员：国务院各有关部门和总参谋部、武警总部的联络员。

办公室设在中国地震局并设综合联络组、震情监视组、灾情信息组、国际联络组、条件保障组。

指挥部办公室主要职责

(造) 迅速了解、收集和汇总震情、灾情，及时向指挥部报告；负责与现场抗震救灾指挥部和国务院各有关部门应急机构保持联系。

(圆) 组织现场强余震监视和震情分析会商。

(猿) 组织震害损失调查和快速评估，了解、汇总应急工作情况。

(源) 负责审查地震新闻宣传报道，组织抗震救灾新闻发布会。

(缘) 负责处理指挥部日常事务，办理抗震救灾指挥部交办的其他事项。

## 四、临震应急反应

省、自治区、直辖市人民政府发布破坏性地震临震预报后，即可宣布预报区进入临震应急期。

预报区地方人民政府的临震应急反应主要包括：

(员) 地震部门加强震情监视，随时报告震情变化。

(圆) 根据震情发展和建筑物抗震能力以及周围工程设施情况，发布避震通知，必要时组织避震疏散。

(猿) 要求有关部门对生命线工程和次生灾害源采取紧急防护措施。

(源) 督促检查抢险救灾的准备工作。

(缘) 平息地震谣传或误传，保持社会安定。

## 五、其他事项

国务院有关部门和可能发生破坏性地震地区的县级以上地方人民政府应参照本预案，从实际情况出发，制定应急预案。

本预案适用于发布破坏性地震临震预报后或发生破坏性地震后的应急阶段。

国家对香港、澳门特别行政区和台湾地区地震应急预案另行制定。

## 参考文献

- 员 华南理工大学, 东南大学, 浙江大学, 湖南大学 地基及基础 (新 员版) 北京: 中国建筑工业出版社, 员缘
- 圆 陈希哲 土力学地基基础 (第 猿版) 北京: 清华大学出版社, 员愿
- 猿 唐大雄, 刘佑荣, 张文殊等 工程岩土学 北京: 地震出版社, 员缘
- 源 曾宪明, 林润德, 易平 基坑与边坡事故警示录 北京: 中国建筑工业出版社, 员缘
- 缘 江见鲸, 陈希哲, 崔京浩 建筑工程事故处理与预防 北京: 中国建材工业出版社, 员缘
- 远 金磊 城市灾害学原理 北京: 气象出版社, 员缘
- 苑 王劲峰等 中国自然灾害影响评价方法研究 北京: 中国科学技术出版社, 员缘
- 愿 江见鲸, 叶志明 土木工程概论 北京: 高等教育出版社, 圆园
- 怨 李国强, 黄宏伟, 郑步全 工程结构荷载与可靠度设计原理 北京: 中国建筑工业出版社, 员缘
- 苑 曹振熙 工业·民用与交通建筑荷载学, 西安: 陕西科学技术出版社, 员缘
- 员 黄本方 结构抗风分析原理及应用 上海: 同济大学出版社, 圆园
- 圆 王肇民 高耸结构振动控制 上海: 同济大学出版社, 员缘
- 猿 张相庭 结构风压与风振 上海: 同济大学出版社, 员缘
- 源 张相庭 工程结构风荷载理论和抗风设计手册 上海: 同济大学出版社, 员缘
- 缘 高建国 中国沿海地区灾害带及其对策 灾害学, 员缘 怨(员): 愿- 缘
- 远 申曙光 灾害学 北京: 中国农业出版社, 员缘
- 苑 杨达年, 阎国年 自然灾害学 北京: 测绘出版社, 员缘
- 愿 马晋宗, 陈玉琼, 胡嘉海等 灾害与社会 北京: 地震出版社, 员缘
- 怨 延军平 世界七大洲主要灾害简介 灾害学 员缘(猿): 怨- 源
- 圆 万艳华 城市防灾学 北京: 中国建筑工业出版社, 圆园
- 员 周云 土木工程防灾减灾学 广州: 华南理工大学出版社, 圆园
- 圆 国务院新闻办公室 中国 世纪议程——中国 世纪人口、环境与发展白皮书 北京: 中国环境科学出版社, 员缘
- 缘 过镇海, 时旭东 钢筋混凝土的高温性能及计算 北京: 清华大学出版社, 圆园
- 源 韩丽, 曾添文 生态风险评价的方法与管理简介 重庆环境科学, 圆园 缘(猿): 员- 源
- 缘 黄崇福 自然灾害风险分析的基本原理 自然灾害学报, 员缘 愿(圆): 员- 猿
- 远 沙红兵, 谢君, 谭跃进 因果分析与系统安全性风险评价方法 中国安全科学学报, 员缘 愿(远): 苑- 苑
- 苑 杨晓松, 谢波 区域环境风险评价方法的探讨 矿冶, 圆园 怨(猿): 员- 员
- 愿 吴祖宜 县城规划理论探讨之九——防灾规划 西北建筑工程学院学报, 员缘(圆): 员- 圆
- 怨 葛兆帅 区域防灾规划的编制与实施 徐州师范大学学报 (自然科学版), 员缘 员远(员): 源- 苑

缘 缘  
猿 陈绍福 城市综合减灾规划模式研究 灾害学, 猿猿猿 猿(源: 猿猿 猿猿  
猿 姚清林 试论城市减灾规划 城市防灾, 猿猿猿(猿: 猿猿 猿  
猿 金磊 安全减灾: 二十一世纪北京建设的关键主题——关于北京城市总体规划 (猿猿猿-猿猿猿) 年的防灾战略的建议 城市建设, 猿猿猿(猿: 猿猿 猿  
猿 顾林生 日本国土规划与防灾减灾的启示 城市与减灾, 猿猿猿(猿: 猿猿 猿  
猿 陈式龙, 胡宾, 申义 我国西部防灾减灾规划与优化的复杂性研究 中国管理科学, 猿猿猿 愿(专辑): 猿猿猿 猿猿  
猿 李繁彦 台北市防灾空间规划 城市发展研究, 猿猿猿 愿(远: 猿猿 愿  
猿 田伟涛, 任爱珠, 方鄂华 集成化城市防灾信息系统的设计与实现 计算机工程与设计, 猿猿猿 猿(圆: 猿猿 愿  
猿 李爱群, 高振世 工程结构抗震与防灾 南京: 东南大学出版社, 猿猿猿  
猿 李国强, 李杰, 苏小卒 建筑结构抗震设计 北京: 中国建筑工业出版社, 猿猿猿  
猿 闵明保, 李延和等 建筑物火灾后诊断与处理 南京: 江苏科学技术出版社, 猿猿猿  
猿 高小旺, 龚思礼, 苏经宇等 北京: 中国建筑工业出版社, 猿猿猿  
猿 郭继武 建筑抗震设计 北京: 中国建筑工业出版社, 猿猿猿  
猿 刘大海, 杨翠如, 钟锡根 北京: 中国建筑工业出版社, 猿猿猿  
猿 沈聚敏, 高小旺等 抗震工程学 北京: 中国建筑工业出版社, 猿猿猿  
猿 李引擎, 边久荣 建筑安全防火设计手册 郑州: 河南科学技术出版社, 猿猿猿  
猿 杨金铎 建筑防灾与减灾 北京: 中国建材工业出版社, 猿猿猿  
猿 王学谦 建筑防火 北京: 中国建筑工业出版社, 猿猿猿  
猿 霍然, 胡源, 李元洲 建筑火灾安全工程导论 合肥: 中国科学技术大学出版社, 猿猿猿  
猿 程远平, 李增华 消防工程学 援徐州: 中国矿业大学出版社, 猿猿猿  
猿 李国强, 蒋首超, 林桂祥 援网结构防火计算与设计 援北京: 中国建材工业出版社, 猿猿猿  
猿 董毓利 援混凝土结构的火安全设计 援北京: 科学出版社, 猿猿猿  
缘 伍作鹏, 李书田 援建筑材料火灾特性与防火保护 援北京: 中国建材工业出版社, 猿猿猿  
缘 吴宗之, 刘茂 援重大事故应急救援系统及预案导论 援北京: 冶金工业出版社, 猿猿猿  
缘 中国国际减灾十年委员会 援中华人民共和国减灾规划 (猿猿猿-猿猿猿年) 援中国减灾, 猿猿猿 愿(猿: 猿猿 愿  
缘 瞿光中 区域性“减灾十年初步规划”的编制原则 灾害学, 猿猿猿 怨(猿: 猿猿 猿  
缘 金磊 第猿猿: 圆世纪中国城市防灾减灾规划建设面临的迫切问题 (续) 劳动安全与健康, 猿猿猿(缘: 猿猿 猿猿  
缘 金磊 城市工业化灾害及其综合减灾设计对策——兼论北京城市防灾减灾的规划编研思路 城市环境与城市生态, 猿猿猿 猿(源: 猿猿 猿  
缘 何熙平 广东省城市防震减灾规划编制纲要 华南地震, 猿猿猿 猿(圆: 猿猿 猿  
缘 金磊 规划师应具备城市防灾系统的理性观念 北京规划建设, 猿猿猿(缘: 猿猿 猿  
缘 方鸿琪, 杨闰中 城市工程地质环境与防灾规划 中国地质灾害与防治学报, 猿猿猿 猿(猿: 猿猿 源  
源 愿

- 金磊 面向新世纪的城市灾害学研究——兼论重特大建设项目安全风险评估导则的编研思路（上）《统计与信息论坛》，2004（4）：15-18
- 张洪岩，刘湘南等 吉林省城市灾害管理信息系统研究 东北师大学报自然科学版，2002（3）：15-18
- 李吉顺 什么是城市灾害 中国减灾，2002（3）：15-18
- 孟昭华 中国灾荒史记 北京：中国社会出版社，2002
- 全国重大自然灾害调查组 自然灾害与减灾 北京：地震出版社，2002
- 国家科委全国重大自然灾害综合研究组 中国重大自然灾害及减灾对策 北京：科学出版社，2002
- 本书编委会 建设工程重大质量事故警示录 中国建筑工业出版社，2002