

清华大学研究生课程——《灾害学》

# 地质灾害

陆新征  
清华大学土木工程系  
2005

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 内容提要

- 地质灾害的概念、类型及分布
- 滑坡地质灾害及其防治
- 崩塌地质灾害及其防治
- 泥石流地质灾害及其防治
- 地面沉降及其防治
- 岩土工程灾害

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地质灾害概论

- 地球、地质体、地质环境在发展演化过程中，由于各种自然作用和人类活动发生变化，其产生的后果给人类和社会造成灾害就称为地质灾害。

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 广义、狭义地质灾害

- 广义地质灾害：
  - 任何成灾的地质活动都可以称为地质灾害
  - 火山、地震、土壤退化、煤层自燃……
- 狭义地质灾害
  - 主要与土木工程有关
  - 崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、岩土工程

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地质灾害成因

- 地壳活动
  - 火山、地震
- 自然环境变化
  - 暴雨
- 人为活动
  - 不适当的岩土工程

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地质灾害的属性特征

- 地质灾害的必然性、随机性和周期性
  - 人类活动区域日益广泛，地壳活动始终不断，必然有各种地质灾害出现
  - 人类对地下活动认识有限，地质活动周期往往很长，部分地质灾害发生有随机性
  - 部分地质灾害成因比较清楚，对其周期性有较多的认识

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地质灾害的属性特征

- 地质灾害的突发性和渐进性
  - 突然爆发的地质灾害
    - 火山、地震、崩落、泥石流等
  - 渐进发展的地质灾害
    - 土壤退化、地面沉降、煤层自燃等

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地质灾害的属性特征

- 地质灾害的群体性、多元性和复发性
  - 地质灾害往往不是独立存在的，而是彼此相互影响，反复发作
  - 崩落、泥石流、滑坡、地裂缝往往同时发作
  - 滑坡多发区常常反复发作，例如，我国西部川藏公路沿线的古乡冰川泥石流，一年内发生70多次

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地质灾害的属性特征

- 地质灾害的区域性
  - 地质灾害受地质体形态、自然环境和发展水平影响，有明显的区域性
  - 我国的地质灾害受我国“南北分区、东西分带、交叉成网”的区域性构造格局影响，有明显的区域性

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 我国四个主要的地质灾害区域

- 以地面沉降、地面塌陷和矿井突水为主的东部地区
  - 成因：平原地形、经济发达、人口稠密
- 以崩塌、滑坡和泥石流为主的中部区
  - 成因：山峦起伏、地形复杂
- 以冻融、泥石流为主的青藏高原区
  - 成因：海拔高、温度低
- 以荒漠化为主的西部区
  - 成因：干旱少雨，自然环境恶劣

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 人为地质灾害日趋严重

- 人类每年消耗 $500 \times 10^8$ 吨矿产物质，地球每年只能新生成 $300 \times 10^8$ 吨岩石物质，河流每年只能搬运 $165 \times 10^8$ 吨物质
- 地面建筑高度超过400米，地下开挖超过3000m，最高人工边坡超过600m，最大水库容量超过 $1500 \times 10^8 \text{m}^3$ ，人类建筑面积已经覆盖了地表6~8%，中国目前有8万多个水库和水电站
- 人类活动对自然界地质改造超过了流水、风力等自然作用

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 地质灾害的严重性

- 全国每年由于“崩、滑、流”灾害造成的死亡人员达到928人
- 全国共有较大型崩塌3000多处，滑坡2000多个，中小规模的“崩、滑、流”达到40多万处
- 全国有350多个县，上万个村庄，100余座大型工厂，55座大型矿山，3000多公里铁路受“崩、滑、流”威胁

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 地质灾害的严重性

- 全国处京、津、沪、豫、甘、宁、新以外的各省都发现岩溶塌陷灾害，总数近3000处，塌陷3万多个，塌陷面积300多平方公里
- 黑龙江、山西、安徽、江苏、山东等省为矿山采空塌陷严重发育区，全国工发生矿山采空塌陷180处以上，塌陷坑1595个，塌陷面积达1000多平方公里

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 15种主要地质灾害的直接经济损失

| 灾种名称      | 发生频率 | 平均经济损失(亿元) |
|-----------|------|------------|
| 崩塌、滑坡、泥石流 | 高    | 1.5        |
| 地面沉降      | 中    | 0.8        |
| 地面塌陷      | 中    | 0.5        |
| 岩溶塌陷      | 中    | 0.4        |
| 地震        | 中    | 0.3        |
| 地面裂缝      | 中    | 0.2        |
| 地面变形      | 中    | 0.1        |
| 地面沉降      | 中    | 0.1        |
| 地面塌陷      | 中    | 0.1        |
| 地面裂缝      | 中    | 0.1        |
| 地面变形      | 中    | 0.1        |
| 地面沉降      | 中    | 0.1        |
| 地面塌陷      | 中    | 0.1        |
| 地面裂缝      | 中    | 0.1        |
| 地面变形      | 中    | 0.1        |

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 直接和间接经济损失比

- 崩塌、滑坡为1:10
- 泥石流为1:5
- 地面沉降为1:3

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 斜坡地质灾害

- 体积巨大的表层物质在重力作用下沿斜坡发生向下运动，形成灾害。
- 主要形式：
  - 滑坡
  - 崩塌
  - 泥石流

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 导致斜坡灾害的原因

- 人类活动区域增大，大量在山地、丘陵开发，增大斜坡变形规模，诱发斜坡灾害。
- 筑路、修建水库、采矿等大规模工程活动是触发和加速斜坡产生运动的重要因素之一。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 斜坡灾害类型

- 斜坡物质的快速失稳，结果导致相对整体的土体或岩块向坡下运动
- 岩土与水的混合物向坡下的运动

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

斜坡灾害规模分类

| 灾种  | 灾害数量(万次) |          |      | 死亡人数 |      |      | 直接经济损失(万元) |          |      |
|-----|----------|----------|------|------|------|------|------------|----------|------|
|     | 种类       | 频数       | 率, % | 种类   | 频数   | 率, % | 种类         | 频数       | 率, % |
| 崩塌  | 1600     | 3~1000   | <1   | 100  | 1~10 | 0    | 1000       | 10~1000  | <10  |
| 滑坡  | 16000    | 10~10000 | <10  | 100  | 1~10 | 0    | 10000      | 100~1000 | <10  |
| 泥石流 | 1600     | 1~1000   | <1   | 100  | 1~10 | 0    | 10000      | 100~1000 | <10  |

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

斜坡灾害的影响因素

- 地形地貌
- 地质构造与新构造活动
- 地层岩性与岩体结构特性
- 地下水
- 暴雨和连续降雨
- 人类活动

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

斜坡灾害的影响因素

- 地形地貌
  - 边坡的高度、坡度
  - 山体稳定性, 长江、黄河上游山体稳定性差
  - 中国西南, 西北地区中高山区和大江大河两侧沟谷纵坡降较大, 易发生泥石流

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

斜坡灾害的影响因素

- 地质构造与新构造活动
  - 地层的断裂构造, 断裂的性质, 破碎带宽度, 节理裂隙的发育程度及其组合特性
  - 新构造活动、地震

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

斜坡灾害的影响因素

- 地层岩性与岩体结构特性
  - 岩体构造破碎、层状、散体
  - 有薄弱面
  - 存在透水和不透水的地下夹层

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

斜坡灾害的影响因素

- 地下水
  - 软化岩石裂隙抗剪强度
  - 软化土体强度
  - 空隙水压力降低有效应力
  - 降低摩擦阻力

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

斜坡灾害的影响因素

- 暴雨和连续降雨
  - 诱发斜坡灾害的主要因素
  - 大量雨水渗入地下引起地下水的动态变化, 直接诱发斜坡灾害

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

斜坡灾害的影响因素

- 人类活动
  - 破坏森林植被
  - 开挖坡脚, 切断岩层原始构造
  - 诱发地下水
  - 堆砌尾渣矿渣
  - 爆破

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国斜坡地质灾害分布

- 全国共发育有特大型崩塌51处、滑坡140处、泥石流149处; 较大型崩塌2984处以上、滑坡2212处以上、泥石流2277处以上;
- 仅据云南、辽宁、北京、河北、四川、甘肃6省(市)的初步统计, 虽无确切记载但仍有迹可辨(多指遥感解译)的崩、滑、流灾害点就达41万处之多。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学

中国地质大学

## 中国斜坡地质灾害分布

- 我国西部地区尤其是西南诸省区地处第一级台阶和二级台阶，长期处于地壳上升过程之中，地壳活动强烈，地形切割陡峻，地质构造复杂，岩石体支离破碎，再加上西南地区降水量和强度较大，西北地区植被不发育，因而崩、滑、流发育强烈，如云南、四川、贵州、陕西、青海、甘肃、宁夏等省区；其他地区新构造运动一般相对较弱，其中华北、东北地区的降水量相对较小，中南、华东大部分地区植被发育较好，因此，这些地区的崩、滑、流发育强度一般不及西部地区。
- 全国范围除山东未发现危害较严重的崩、滑、流灾点外，其余各地均有不同程度的发育，并造成一定的危害，其中四川、云南、陕西、宁夏、甘肃、贵州、湖北、辽宁、北京、河北、江西和福建等地的危害都相当严重。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学

中国地质大学

## 中国斜坡地质灾害分布

- 在地域上，可基本划分为15个多发区，它们是：  
(1)横断山区、(2)黄土高原地区、(3)川北陕南地区、(4)川西北龙门山地区、(5)金沙江中下游地区、(6)川滇交界地区、(7)汉江安康~白河地区、(8)川东大巴山地区、(9)三峡地区、(10)黔西六盘水地区、(11)湘西地区、(12)赣西北地区、(13)赣东北上饶地区、(14)北京北部怀柔~密云地区、(15)辽东岫岩~凤城地区。上述地区根据各省地质灾害区划统计面积达173.5km<sup>2</sup>，占全国总面积的18.10%。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学

中国地质大学

## 中国斜坡地质灾害分布

- 从规模上看，以滑坡的变形方量为最大，泥石流次之，崩塌最小。
- 一般滑坡的方量都在10000m<sup>3</sup>以上，大于100,000m<sup>3</sup>的占相当的比例，其中也不乏体积在数千万m<sup>3</sup>至数亿m<sup>3</sup>的巨型滑坡，最大的甚至达10亿m<sup>3</sup>(云南富源县老厂大格煤矿)
- 规模较大的泥石流一般在数十至数百万m<sup>3</sup>，大于1千万m<sup>3</sup>的泥石流较为少见；
- 而崩塌绝大多数在百万m<sup>3</sup>以下。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学

中国地质大学

## 中国斜坡地质灾害分布

- 不同地区崩、滑、流的发育规模有较大差别。
- 西部(西南、西北)地区的规模要远大于东部地区，一般在西部地区造成较严重危害的滑坡都在数十至数十万甚至数亿m<sup>3</sup>，而东部地区数千至数万m<sup>3</sup>的滑坡就能造成严重的危害，大于百万m<sup>3</sup>的非常少见；
- 东部地区崩塌规模同样远小于西部，一般在1万m<sup>3</sup>以下；虽然北京、辽宁等地经常发生泥石流灾害，但均为群发，单条泥石流的方量一般不大。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学

中国地质大学

## 中国斜坡地质灾害分布

- 从灾点分布密度上看，也是西部大于东部，西部不仅崩、滑、流多发区面积大，数量多，而且多发区内的崩、滑、流个体密度也大于东部，一般达30~100个/千km<sup>2</sup>，局部地区甚至达到1~2个/km<sup>2</sup>(甘肃白龙江流域)，而东部地区多发区的密度一般在10~30个/千km<sup>2</sup>。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学

中国地质大学

## 中国斜坡地质灾害分布

- 从发生频度上看，还是西部大于东部、西部、尤其是西南地区几乎每年雨季都有大量的崩、滑、流出现(有些不在雨季时也出现)，洪水灾年则形成大爆发。据云南省的研究，由于各种因素的共同作用，崩、滑、流还呈现了101~102、102~103、104~105年三种不同尺度的活跃周期。而东部地区则在一般年份较为安静，遇丰水年或人类工程活动的强烈扰动才发生崩、滑、流，频度远小于西部。
- 频度上的另一特点是南部大于北部。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学

中国地质大学

## 斜坡灾害的主要危害

- 据不完全统计，在1949年至1990年的42年中，崩、滑、流灾害至少造成9680人死亡，其中滑坡、崩塌灾害致死3635人，泥石流灾害致死6045人。42年中，平均每年每年死亡人数为231人，其中滑坡、崩塌灾害致死87人/年，泥石流灾害致死144人/年。从时间顺序来看，死亡人数呈增长趋势

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学

中国地质大学

## 斜坡灾害的主要危害

- 近10年来，全国由于崩、滑、流造成人员伤亡已近万人，平均每年达900多人
- 在三者中以泥石流造成的人员伤亡为最多
- 如辽宁复县(现为瓦房店市)、盖县。新金县(现为普兰店市)交界地带的老帽山地区，1981年7月27—28日爆发泥石流，16.36万人受灾，造成664人死亡，5058人受伤。
- 初步估计由泥石流造成人员伤亡要占崩、滑、流总数的一半左右。

清华大学


清华大学研究生课程——《灾害学》

中国地质大学


中国地质大学

## 斜坡灾害的主要危害

- 滑坡造成的人员伤亡仅次于泥石流，一些规模巨大的滑坡常摧毁压垮整个或多个村庄、城市地区的多栋建筑
- 如1991年9月23日发生于云南省昭通市头寨沟的滑坡，总方量1800万m<sup>3</sup>，造成216人死亡，又如1989年四川华莹山溪口镇的滑坡型泥石流造成221人死亡。
- 由滑坡致死的人数约占崩、滑、流三者死亡总人数的1/3强。
- 由于崩塌一般规模较小，破坏面积不大，所以造成的人员伤亡较小。




清华大学研究生课程——《灾害学》




## 斜坡灾害的主要危害

- 崩、滑、流的频繁发生，摧毁了大量的城乡建筑设施、耕地、工厂矿山和交通干线。
- 据初步统计，全国有400多个市、县、区、镇受到崩、滑、流的严重侵害，其中频受滑坡、崩塌侵扰的市、镇60余个，频受泥石流侵扰的市、镇50余个，有些市、镇甚至受到3种灾害的共同侵扰，给当地人民生命财产造成极大的损失，严重阻碍了当地经济和社会发展。
- 较为典型的有重庆市(市区内滑坡129处，崩塌58处)、攀枝花(市区内滑坡50余处)、兰州(市区内有泥石流沟55条，至少造成了322人死亡和数千万元经济损失)、东川(泥石流)、安宁河谷(泥石流)等。




清华大学研究生课程——《灾害学》




## 斜坡灾害的主要危害

- 解放以来，全国至少有355个县数千个乡村受到了崩、滑、流的严重危害，不仅使农民的生命财产受到了较大损失，而且破坏了大量耕地，仅据有统计数字的灾害点的统计，到1992年全国有9万公顷的耕地被破坏，而实际上被破坏的耕地面积要远大于此。
- 被崩、滑、流所摧毁的工厂和矿山也有相当数量，至1990年底，全国至少有100余座大型工厂和55座大型矿山受到严重危害，如第二汽车制造厂厂区内有滑坡、崩塌270处，总方量750万m³，严重威胁了工厂的安全；天水锻压机床厂滑坡，摧毁了6个车间，使工厂丧失生产能力，直接经济损失2000余万元。




清华大学研究生课程——《灾害学》




## 斜坡灾害的主要危害

- 由采矿等人类工程活动所引发的崩、滑、流也非常普遍，反过来对人类工程设施构成严重的直接危害
- 如抚顺西露天矿自1927年以来已发生滑坡54次，最近4次发生在1987年4月18日~6月19日期间，引起毗邻的石油一厂出现重大险情，造成数亿元的经济损失。
- 采矿并诱发泥石流也非常普遍且损失巨大，如四川盐井沟(死104人，1970年)、四川甘洛(死36人，1990年)、四川会理(死31人、伤29人，1990年)等均造成了重大的人员伤亡和经济损失。




清华大学研究生课程——《灾害学》




## 斜坡灾害的主要危害

- 全国几条山区干线铁路如宝成线、成昆线、兰兰线都受到了崩、滑、流的严重危害
- 如宝成铁路从50年代末至今，已出现了50年代末、80年代初(1981)两次大规模崩、滑、流爆发，不仅由于摧毁铁路、列车和运输中断给铁路部门造成严重的经济损失 (仅1981年用于宝成线修复铁路的资金就达3亿元以上)，而且由于停运给川陕两省乃至全国所造成的经济损失就更无法统计
- 1992年5~6月间宝成线秦岭梁处又连续发生大规模滑坡，累计中断行车28天，直接经济损失达数千万元
- 据统计，铁路沿线均有泥石流沟1368处，威胁着3000km长的铁路的安全，1949年以来，沿线共发生泥石流1200多次，平均每月用于铁路修复和改建和费用就高达7000万元。




清华大学研究生课程——《灾害学》




## 斜坡灾害的主要危害

- 崩、滑、流造成危害的大小，主要取决于变形方量、速度、破坏面积和当地地面设施密度等因素
- 一般规模较大的崩、滑、流常造成数百万元乃至数千万元的直接经济损失，个别甚至达到数亿元
- 如1981年辽宁老帽山地区一次损失5亿元、1991年北京北山泥石流一次损失2.65亿元、1989年云南漫湾电站滑坡一次损失10亿元以上、1986年四川高县文江后山沟泥石流一次损失1.3亿元、1988年四川宜宾大滩村滑坡一次损失2亿元等。




清华大学研究生课程——《灾害学》




## 斜坡灾害的主要危害

- 近10余年来全国共发生这类损失巨大的崩、滑、流330处以上，平均每处损失数千万元；
- 直接经济损失大于10万元的崩、滑、流超过7473处，平均每处直接经济损失近百万元；
- 直接经济损失在1~10万元的灾害点仅有记载的就达22817处；
- 直接损失在1万元以下的灾害点更多，仅据云南、北京、辽宁、四川、甘肃五省市统计就达41万余处，估计全国将以百万计，其直接经济损失亦非常可观。




清华大学研究生课程——《灾害学》




## 斜坡灾害的主要危害

- 由于崩、滑、流的发育强度、人口密度和国民经济发展程度在地域上差异很大，所以它们造成的危害在不同地区也有很大差别
- 在西部地区由于国民经济发展程度较低而崩、滑、流规模较大，所以危害以人员伤亡为主，尤其是西南地区人口密度大，更是如此。仅陕西、甘肃、宁夏、青海、云南、贵州、四川7省区年均死亡人数就达647.9人以上，约占全国的69.8%。
- 而东部地区尽管由于灾害强度较小(规模或破坏面积较小)，造成的人员伤亡数量较少，但由于经济发展程度较高，经济损失却与西部不相上下。也就是说，崩、滑、流在西部地区的危害以人员伤亡为主，而东部地区则以经济损失为主。




清华大学研究生课程——《灾害学》




## 斜坡灾害的发展趋势

- 1949年以来，由于“大跃进”和“文革”的两次大规模砍伐，我国森林面积不断减少，植被不断破坏，尤其是80年代以来人类工程活动的加剧，加之森林植被还没有根本性好转，所以崩、滑、流发育强度越来越大
- 如辽东地区的泥石流1949年前仅发生了一次，而60、70年代分别爆发了2次，特别是80年代爆发了6次，而且强度越来越大，死伤人数越来越多，经济损失越来越重。
- 可以预计，由于森林、植被很难在短期内得到恢复，而人类工程扰动则越来越强，减灾、防灾意识还很难在短期内提高，所以崩、滑、流的发育规模和危害都将增大。



清华大学研究生课程——《灾害学》



## 斜坡灾害的发展趋势

- 东部地区在近期内(10—20年)由崩、滑、流所造成的经济损失还将迅速增长，人员伤亡也会有一定增加，到中期(20年后)，随着国民经济的发展，国民减灾防灾意识增强和投入的增加，崩、滑、流及其危害将基本稳定并逐渐减少
- 而中西部地区在近期内(5年)国民经济发展速度不及东部，所以崩、滑、流及其危害将在目前水平上缓慢增加，之后随着人类工程活动的加剧和国民经济密度的增加，由崩、滑、流造成的经济损失将有较大的增长。

## 滑坡灾害

- 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做滑坡

## 滑坡的构成

- 滑坡体
- 滑坡壁
- 滑动面
- 滑坡床
- 滑坡舌
- 滑坡裂缝



### 滑坡照片

- 滑坡体
- 滑坡壁
- 滑动面
- 滑坡床
- 滑坡舌
- 滑坡裂缝



## 20世纪中国滑坡灾害

| 规格        | 项目    | 屈服点<br>( $\sigma_s$ ) MPa | 抗拉强度<br>( $\sigma_b$ ) MPa | 备注    |
|-----------|-------|---------------------------|----------------------------|-------|
| 900-1.2   | 普通结构钢 | 350                       | 575                        | 普通船用钢 |
| 1000-1.75 | 普通结构钢 | 350                       | 587                        | 普通船用钢 |
| 1000-2.25 | 普通结构钢 | 350                       | 590                        | 普通船用钢 |
| 900-2.25  | 普通结构钢 | 355                       | 605                        | 普通船用钢 |
| 900-3.0   | 普通结构钢 | 355                       | 610                        | 普通船用钢 |
| 900-3.5   | 普通结构钢 | 355                       | 615                        | 普通船用钢 |
| 900-4.0   | 普通结构钢 | 355                       | 620                        | 普通船用钢 |
| 900-4.5   | 普通结构钢 | 355                       | 625                        | 普通船用钢 |
| 900-5.0   | 普通结构钢 | 355                       | 630                        | 普通船用钢 |
| 900-5.5   | 普通结构钢 | 355                       | 635                        | 普通船用钢 |
| 900-6.0   | 普通结构钢 | 355                       | 640                        | 普通船用钢 |
| 900-6.5   | 普通结构钢 | 355                       | 645                        | 普通船用钢 |
| 900-7.0   | 普通结构钢 | 355                       | 650                        | 普通船用钢 |
| 900-7.5   | 普通结构钢 | 355                       | 655                        | 普通船用钢 |
| 900-8.0   | 普通结构钢 | 355                       | 660                        | 普通船用钢 |
| 900-8.5   | 普通结构钢 | 355                       | 665                        | 普通船用钢 |
| 900-9.0   | 普通结构钢 | 355                       | 670                        | 普通船用钢 |
| 900-9.5   | 普通结构钢 | 355                       | 675                        | 普通船用钢 |
| 900-10.0  | 普通结构钢 | 355                       | 680                        | 普通船用钢 |
| 900-10.5  | 普通结构钢 | 355                       | 685                        | 普通船用钢 |
| 900-11.0  | 普通结构钢 | 355                       | 690                        | 普通船用钢 |
| 900-11.5  | 普通结构钢 | 355                       | 695                        | 普通船用钢 |
| 900-12.0  | 普通结构钢 | 355                       | 700                        | 普通船用钢 |
| 900-12.5  | 普通结构钢 | 355                       | 705                        | 普通船用钢 |
| 900-13.0  | 普通结构钢 | 355                       | 710                        | 普通船用钢 |
| 900-13.5  | 普通结构钢 | 355                       | 715                        | 普通船用钢 |
| 900-14.0  | 普通结构钢 | 355                       | 720                        | 普通船用钢 |
| 900-14.5  | 普通结构钢 | 355                       | 725                        | 普通船用钢 |
| 900-15.0  | 普通结构钢 | 355                       | 730                        | 普通船用钢 |
| 900-15.5  | 普通结构钢 | 355                       | 735                        | 普通船用钢 |
| 900-16.0  | 普通结构钢 | 355                       | 740                        | 普通船用钢 |
| 900-16.5  | 普通结构钢 | 355                       | 745                        | 普通船用钢 |
| 900-17.0  | 普通结构钢 | 355                       | 750                        | 普通船用钢 |
| 900-17.5  | 普通结构钢 | 355                       | 755                        | 普通船用钢 |
| 900-18.0  | 普通结构钢 | 355                       | 760                        | 普通船用钢 |
| 900-18.5  | 普通结构钢 | 355                       | 765                        | 普通船用钢 |
| 900-19.0  | 普通结构钢 | 355                       | 770                        | 普通船用钢 |
| 900-19.5  | 普通结构钢 | 355                       | 775                        | 普通船用钢 |
| 900-20.0  | 普通结构钢 | 355                       | 780                        | 普通船用钢 |
| 900-20.5  | 普通结构钢 | 355                       | 785                        | 普通船用钢 |
| 900-21.0  | 普通结构钢 | 355                       | 790                        | 普通船用钢 |
| 900-21.5  | 普通结构钢 | 355                       | 795                        | 普通船用钢 |
| 900-22.0  | 普通结构钢 | 355                       | 800                        | 普通船用钢 |
| 900-22.5  | 普通结构钢 | 355                       | 805                        | 普通船用钢 |
| 900-23.0  | 普通结构钢 | 355                       | 810                        | 普通船用钢 |
| 900-23.5  | 普通结构钢 | 355                       | 815                        | 普通船用钢 |
| 900-24.0  | 普通结构钢 | 355                       | 820                        | 普通船用钢 |
| 900-24.5  | 普通结构钢 | 355                       | 825                        | 普通船用钢 |
| 900-25.0  | 普通结构钢 | 355                       | 830                        | 普通船用钢 |
| 900-25.5  | 普通结构钢 | 355                       | 835                        | 普通船用钢 |
| 900-26.0  | 普通结构钢 | 355                       | 840                        | 普通船用钢 |
| 900-26.5  | 普通结构钢 | 355                       | 845                        | 普通船用钢 |
| 900-27.0  | 普通结构钢 | 355                       | 850                        | 普通船用钢 |
| 900-27.5  | 普通结构钢 | 355                       | 855                        | 普通船用钢 |
| 900-28.0  | 普通结构钢 | 355                       | 860                        | 普通船用钢 |
| 900-28.5  | 普通结构钢 | 355                       | 865                        | 普通船用钢 |
| 900-29.0  | 普通结构钢 | 355                       | 870                        | 普通船用钢 |
| 900-29.5  | 普通结构钢 | 355                       | 875                        | 普通船用钢 |
| 900-30.0  | 普通结构钢 | 355                       | 880                        | 普通船用钢 |
| 900-30.5  | 普通结构钢 | 355                       | 885                        | 普通船用钢 |
| 900-31.0  | 普通结构钢 | 355                       | 890                        | 普通船用钢 |
| 900-31.5  | 普通结构钢 | 355                       | 895                        | 普通船用钢 |
| 900-32.0  | 普通结构钢 | 355                       | 900                        | 普通船用钢 |
| 900-32.5  | 普通结构钢 | 355                       | 905                        | 普通船用钢 |
| 900-33.0  | 普通结构钢 | 355                       | 910                        | 普通船用钢 |
| 900-33.5  | 普通结构钢 | 355                       | 915                        | 普通船用钢 |
| 900-34.0  | 普通结构钢 | 355                       | 920                        | 普通船用钢 |
| 900-34.5  | 普通结构钢 | 355                       | 925                        | 普通船用钢 |
| 900-35.0  | 普通结构钢 | 355                       | 930                        | 普通船用钢 |
| 900-35.5  | 普通结构钢 | 355                       | 935                        | 普通船用钢 |
| 900-36.0  | 普通结构钢 | 355                       | 940                        | 普通船用钢 |
| 900-36.5  | 普通结构钢 | 355                       | 945                        | 普通船用钢 |
| 900-37.0  | 普通结构钢 | 355                       | 950                        | 普通船用钢 |
| 900-37.5  | 普通结构钢 | 355                       | 955                        | 普通船用钢 |
| 900-38.0  | 普通结构钢 | 355                       | 960                        | 普通船用钢 |
| 900-38.5  | 普通结构钢 | 355                       | 965                        | 普通船用钢 |
| 900-39.0  | 普通结构钢 | 355                       | 970                        | 普通船用钢 |
| 900-39.5  | 普通结构钢 | 355                       | 975                        | 普通船用钢 |
| 900-40.0  | 普通结构钢 | 355                       | 980                        | 普通船用钢 |
| 900-40.5  | 普通结构钢 | 355                       | 985                        | 普通船用钢 |
| 900-41.0  | 普通结构钢 | 355                       | 990                        | 普通船用钢 |
| 900-41.5  | 普通结构钢 | 355                       | 995                        | 普通船用钢 |
| 900-42.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1000                       | 普通船用钢 |
| 900-42.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1005                       | 普通船用钢 |
| 900-43.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1010                       | 普通船用钢 |
| 900-43.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1015                       | 普通船用钢 |
| 900-44.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1020                       | 普通船用钢 |
| 900-44.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1025                       | 普通船用钢 |
| 900-45.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1030                       | 普通船用钢 |
| 900-45.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1035                       | 普通船用钢 |
| 900-46.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1040                       | 普通船用钢 |
| 900-46.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1045                       | 普通船用钢 |
| 900-47.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1050                       | 普通船用钢 |
| 900-47.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1055                       | 普通船用钢 |
| 900-48.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1060                       | 普通船用钢 |
| 900-48.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1065                       | 普通船用钢 |
| 900-49.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1070                       | 普通船用钢 |
| 900-49.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1075                       | 普通船用钢 |
| 900-50.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1080                       | 普通船用钢 |
| 900-50.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1085                       | 普通船用钢 |
| 900-51.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1090                       | 普通船用钢 |
| 900-51.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1095                       | 普通船用钢 |
| 900-52.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1100                       | 普通船用钢 |
| 900-52.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1105                       | 普通船用钢 |
| 900-53.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1110                       | 普通船用钢 |
| 900-53.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1115                       | 普通船用钢 |
| 900-54.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1120                       | 普通船用钢 |
| 900-54.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1125                       | 普通船用钢 |
| 900-55.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1130                       | 普通船用钢 |
| 900-55.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1135                       | 普通船用钢 |
| 900-56.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1140                       | 普通船用钢 |
| 900-56.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1145                       | 普通船用钢 |
| 900-57.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1150                       | 普通船用钢 |
| 900-57.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1155                       | 普通船用钢 |
| 900-58.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1160                       | 普通船用钢 |
| 900-58.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1165                       | 普通船用钢 |
| 900-59.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1170                       | 普通船用钢 |
| 900-59.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1175                       | 普通船用钢 |
| 900-60.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1180                       | 普通船用钢 |
| 900-60.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1185                       | 普通船用钢 |
| 900-61.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1190                       | 普通船用钢 |
| 900-61.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1195                       | 普通船用钢 |
| 900-62.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1200                       | 普通船用钢 |
| 900-62.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1205                       | 普通船用钢 |
| 900-63.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1210                       | 普通船用钢 |
| 900-63.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1215                       | 普通船用钢 |
| 900-64.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1220                       | 普通船用钢 |
| 900-64.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1225                       | 普通船用钢 |
| 900-65.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1230                       | 普通船用钢 |
| 900-65.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1235                       | 普通船用钢 |
| 900-66.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1240                       | 普通船用钢 |
| 900-66.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1245                       | 普通船用钢 |
| 900-67.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1250                       | 普通船用钢 |
| 900-67.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1255                       | 普通船用钢 |
| 900-68.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1260                       | 普通船用钢 |
| 900-68.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1265                       | 普通船用钢 |
| 900-69.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1270                       | 普通船用钢 |
| 900-69.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1275                       | 普通船用钢 |
| 900-70.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1280                       | 普通船用钢 |
| 900-70.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1285                       | 普通船用钢 |
| 900-71.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1290                       | 普通船用钢 |
| 900-71.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1295                       | 普通船用钢 |
| 900-72.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1300                       | 普通船用钢 |
| 900-72.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1305                       | 普通船用钢 |
| 900-73.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1310                       | 普通船用钢 |
| 900-73.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1315                       | 普通船用钢 |
| 900-74.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1320                       | 普通船用钢 |
| 900-74.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1325                       | 普通船用钢 |
| 900-75.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1330                       | 普通船用钢 |
| 900-75.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1335                       | 普通船用钢 |
| 900-76.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1340                       | 普通船用钢 |
| 900-76.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1345                       | 普通船用钢 |
| 900-77.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1350                       | 普通船用钢 |
| 900-77.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1355                       | 普通船用钢 |
| 900-78.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1360                       | 普通船用钢 |
| 900-78.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1365                       | 普通船用钢 |
| 900-79.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1370                       | 普通船用钢 |
| 900-79.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1375                       | 普通船用钢 |
| 900-80.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1380                       | 普通船用钢 |
| 900-80.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1385                       | 普通船用钢 |
| 900-81.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1390                       | 普通船用钢 |
| 900-81.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1395                       | 普通船用钢 |
| 900-82.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1400                       | 普通船用钢 |
| 900-82.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1405                       | 普通船用钢 |
| 900-83.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1410                       | 普通船用钢 |
| 900-83.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1415                       | 普通船用钢 |
| 900-84.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1420                       | 普通船用钢 |
| 900-84.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1425                       | 普通船用钢 |
| 900-85.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1430                       | 普通船用钢 |
| 900-85.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1435                       | 普通船用钢 |
| 900-86.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1440                       | 普通船用钢 |
| 900-86.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1445                       | 普通船用钢 |
| 900-87.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1450                       | 普通船用钢 |
| 900-87.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1455                       | 普通船用钢 |
| 900-88.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1460                       | 普通船用钢 |
| 900-88.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1465                       | 普通船用钢 |
| 900-89.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1470                       | 普通船用钢 |
| 900-89.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1475                       | 普通船用钢 |
| 900-90.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1480                       | 普通船用钢 |
| 900-90.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1485                       | 普通船用钢 |
| 900-91.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1490                       | 普通船用钢 |
| 900-91.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1495                       | 普通船用钢 |
| 900-92.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1500                       | 普通船用钢 |
| 900-92.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1505                       | 普通船用钢 |
| 900-93.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1510                       | 普通船用钢 |
| 900-93.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1515                       | 普通船用钢 |
| 900-94.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1520                       | 普通船用钢 |
| 900-94.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1525                       | 普通船用钢 |
| 900-95.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1530                       | 普通船用钢 |
| 900-95.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1535                       | 普通船用钢 |
| 900-96.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1540                       | 普通船用钢 |
| 900-96.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1545                       | 普通船用钢 |
| 900-97.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1550                       | 普通船用钢 |
| 900-97.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1555                       | 普通船用钢 |
| 900-98.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1560                       | 普通船用钢 |
| 900-98.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1565                       | 普通船用钢 |
| 900-99.0  | 普通结构钢 | 355                       | 1570                       | 普通船用钢 |
| 900-99.5  | 普通结构钢 | 355                       | 1575                       | 普通船用钢 |
| 900-100.0 | 普通结构钢 | 355                       | 1580                       | 普通船用钢 |

中国湿地发育图



## 滑坡的形成条件

- 外在因素
  - 自然原因
    - 地震、降雨降雪、地表水的冲刷、浸泡
  - 人为原因
    - 开挖坡脚
    - 蓄水排水
    - 堆填加载
    - 破坏植被

## 滑坡的发育阶段

- 蠕动变形阶段
  - 坡顶出现裂缝，两侧出现剪切裂缝、坡脚岩石被挤出
  - 滑动面尚未贯通
  - 从斜坡发生变形、坡面出现裂缝到斜坡滑动面全面贯通的发展阶段称为蠕动变形阶段
  - 持续时间从几年到几天

## 滑坡的发育阶段

- **滑动破坏阶段**
  - 滑动面贯通后，滑坡开始整体下滑的阶段
  - 滑动速度主要取决于滑动面的形状、抗剪强度、滑水体体积以及斜面上的位置
  - 如果滑带土的抗剪强度变化不大，则滑坡不会急剧下滑，一般每天只滑动几米
  - 如果滑带土的抗剪强度剧烈变化，可能会出现每秒几米到几十米的高速滑动

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 滑坡的发育阶段

- 压密稳定阶段
  - 重力作用下，滑坡体上的松散岩土逐渐压密，地表裂缝被填充，滑动面附近岩石强度由于压密、固结提高
  - 滑坡面变缓，滑坡前缘无渗水，滑坡表面植被重新生长，说明滑坡已经稳定
  - 持续几年甚至更长的时间

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 滑坡的分级

- 按照滑坡体大小

表 10-2 滑坡分级表

| 滑坡名称 | 滑坡面积 ( $10^4 m^2$ ) | 滑坡体积 ( $10^4 m^3$ ) | 滑坡滑动面积 ( $10^4 m^2$ ) |
|------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 特大型  | $> 100$             | $> 100$             | $> 100$               |
| 大型   | $10 \sim 100$       | $10 \sim 100$       | $10 \sim 100$         |
| 中型   | $1 \sim 10$         | $1 \sim 10$         | $1 \sim 10$           |
| 小型   | $< 1$               | $< 1$               | $< 1$                 |

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 滑坡常见滑动面的类型

- 均质土滑动面
- 碎石土滑动面
- 基岩滑动面

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 土坡的稳定性分析

- 无粘性土简单土坡

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 土坡的稳定性分析

- 土坡分析的圆弧法

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 土坡的稳定性分析

- 折线滑坡稳定分析

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 岩石边坡破坏类型

| 破坏类型      | 破坏特征  | 破坏原因      |
|-----------|---|-----------|
| 崩塌        | 陡坡上的岩石或土体，在重力作用下，突然脱离母体，垂直或近垂直地坠落。                      | 重力作用      |
| 滑坡        | 斜坡上的土体或岩体，在重力作用下，沿着一定的滑动面，整体地向下移动。                      | 重力作用      |
| 泥石流       | 山区沟谷中，由暴雨、冰雪融水等水源引发的，含有大量泥沙、石块等固体物质的特殊洪流。               | 重力作用、水源作用 |
| 崩塌、滑坡、泥石流 | 斜坡上的土体或岩体，在重力作用下，沿着一定的滑动面，整体地向下移动，并伴有大量泥沙、石块等固体物质的特殊洪流。 | 重力作用、水源作用 |

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 土坡的稳定性分析

- 有限元法
  - 建立有限元模型、划分网格
  - 设定材料模型（莫尔-库仑或其他材料本构）
  - 计算塑性应力区分布
  - 调整土体承载力参数直至位移发生转折点
  - 得到边坡的安全系数

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

灾害学

# 边坡稳定分析的参数反演法

- 土工项目大量存在参数无法准确测量的问题
  - 原状土
  - 试验方法
  - 水
- 土工材料在施工过程中会有很多不确定性变化
  - 降雨
  - 时间——流变
  - 冻融

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 需要采用参数反演技术

- 参数反演的基本思想
  - 首先根据试验结果或经验给出一组模型参数
  - 计算得到结构（岩土）的反应
  - 分析参数的敏感性
  - 根据实测结构变形对土体参数加以修正
  - 用修正后的参数来模拟模型下一步的行为

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 核心问题

- 计算模型
  - 极限平衡法
  - 有限元法
- 反演算法
  - 各种数学规划、数学优化算法

清华大学研究生课程——《灾害学》

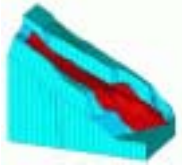
## 岩石边坡的稳定算法

- 工程类比法，应关注
  - 已有滑坡等不良现象
  - 有薄弱层或裂隙
  - 软弱层和坡面倾角一致
  - 地层渗水性差异较大
  - 坡上漏水
  - 存在爆破等施工方法

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 岩石边坡的稳定算法

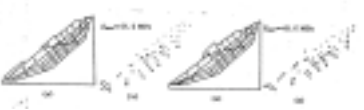
- 图解法
- 有限元法
  - 需要引入裂隙、节理单元
  - 需要考虑岩石之间的接触非线性



清华大学研究生课程——《灾害学》

## 岩石边坡的稳定算法

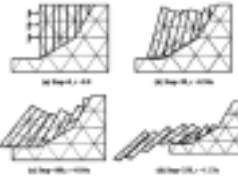
- 刚体-弹簧元法
- 离散单元法



清华大学研究生课程——《灾害学》

## 岩石边坡的稳定算法

- DDA方法



清华大学研究生课程——《灾害学》

## 滑坡的防治措施

- 选址尽量避开易滑坡的区域
- 在难以避免的情况下
  - 直接整治滑坡，避免滑坡发生
  - 采取工程技术措施，避免滑坡是造成严重危害

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 滑坡整治原则

- 以防为主，尽量避开
  - 尽量避免滑坡，尽量减少诱发滑坡的不利因素
- 区别情况，综合整治
  - 深入研究滑坡发生的原因和周边条件
- 彻底根治，以绝后患
  - 避免重复出现，长远规划，连续整治

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 滑坡整治的途径

- 终止或减轻诱发滑坡的外部条件
  - 截流排水，卸荷减载，坡面防护
- 改善边坡内部力学特性和物质结构
  - 土质改善，注水泥浆
- 设置抗滑工程直接阻止滑坡的发展
  - 抗滑桩，挡土墙，预应力锚固



清华大学研究生课程——《灾害学》

## 具体工程防治措施

- 截流排水
  - 滑坡体外的水避免进入滑坡体，滑坡体内的水要尽量排出
  - 外围截水沟
  - 内部排水沟
  - 破面夯实防渗
  - 排水孔和盲沟

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 具体工程防护措施

- 削坡减荷
  - 降低滑坡体的下滑力
  - 减小滑坡体坡度
  - 削去滑坡体后缘的土体
  - 增加滑坡体前缘的重量

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 具体工程防护措施

- 边坡防护
  - 岩石边坡防护
  - 抹面、喷浆、喷混凝土、片石护墙、锚杆喷浆护坡、挂网喷浆护坡
  - 避免边坡滑落和冲刷

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 具体工程防护措施

- 边坡防护
  - 土质边坡防护
  - 种草，降低水对边坡的冲刷，提高边坡土体的抗剪强度
  - 砌片石框架或锚杆护坡
  - 土工织物

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 具体工程防护措施

- 江河湖海和水库边坡
  - 边坡经常受到冲刷，以及水位变化的影响，非常容易发生滑坡
  - 凹岸必防
  - 当冲必防
  - 软岸必防
  - 凡有局部冲刷的地方

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 具体工程防护措施

- 抗滑工程
  - 支撑滑坡体，阻止滑坡体在重力下发生滑动
  - 挡土墙
  - 抗滑桩
  - 锚杆
  - 支撑

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 具体工程防护措施

- 土质改良
  - 增加土体强度，防止土体破坏
  - 添加材料改变岩土成分
  - 其他改变方法
  - 直接拌合（沥青，水泥，石灰等）
  - 灌浆法

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 具体工程防护措施

- 防御避让
  - 避开滑坡，施工防护结构
  - 明硐和御塌棚
  - 内移做隧和外移做桥

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 挡，排，削，护，绕



- 滑坡的动态监测
  - 滑坡位移观测
    - 监测坡体的水平位移和累积位移，掌握滑坡体变形情况
  - 滑坡水文观测
    - 监测滑坡体地下水位是否有明显变化

- 滑坡的动态监测
  - 滑坡位移观测
    - 监测坡体的水平位移和累积位移，掌握滑坡体变形情况
  - 滑坡水文观测
    - 监测滑坡体地下水位是否有明显变化

- 地下水位异常活动
- 坡体出现裂缝
- 岩石开裂和挤压声响
- 滑坡体周围土体出现坍塌和松弛
- 位移明显加速
- 滑坡后缘裂缝急剧张开

- 地下水位异常活动
- 坡体出现裂缝
- 岩石开裂和挤压声响
- 滑坡体周围土体出现坍塌和松弛
- 位移明显加速
- 滑坡后缘裂缝急剧张开

- 岩块、土体顺底
- 下降速度快,
- 崩塌体脱离母体
- 崩塌体的垂直
- 具有崩塌前兆体

- 岩块、土体顺坡猛烈下落，并堆积于坡底
- 下降速度快，发生突然
- 崩塌体脱离母岩运动
- 崩塌体的垂直位移大于水平位移
- 具有崩塌前兆的不稳定岩土体称为危岩体

- 土崩：
  - 土体中的
- 岩崩：
  - 岩石中的
- 山崩：
  - 涉及到山体
- 岸崩：
  - 河流、湖泊、海洋岸边

- 土崩：
  - 土体中的
- 岩崩：
  - 岩石中的
- 山崩：
  - 涉及到山体
- 岸崩：
  - 河流、湖泊、海洋岸边

[illegible][illegible]

- 内部条件
  - 岩石类型
    - 坚硬的岩石会形成较大规模的崩塌
    - 松散岩石会形成小型坠落和剥落
  - 地质构造
    - 断层、节理、界面导致崩塌易于发生
  - 地形地貌
    - 大角度边坡、孤立山嘴或凹形陡坡

- 内部条件
  - 岩石类型
    - 坚硬的岩石会形成较大规模的崩塌
    - 松散岩石会形成小型坠落和剥落
  - 地质构造
    - 断层、节理、界面导致崩塌易于发生
  - 地形地貌
    - 大角度边坡、孤立山嘴或凹形陡坡

- 外部条件
  - 环境因素
    - 地震
    - 降雨降雪, 冻融
    - 地表水冲刷, 浸泡
  - 不合理的人类活动
    - 开掘矿产
    - 切割边坡
    - 水库蓄水
    - 堆砌矿渣
    - 剧烈震动

- 外部条件
  - 环境因素
    - 地震
    - 降雨降雪，冻融
    - 地表水冲刷，浸泡
  - 不合理的人类活动
    - 开掘矿产
    - 切割边坡
    - 水库蓄水
    - 堆砌矿渣
    - 剧烈振动

- 降雨过后
- 强烈地震之中
- 开挖坡脚过程之中或者滞后一段时间
- 水库蓄水初期及河流洪峰期
- 强烈的机械振动或者大爆破之后

- 降雨过后
- 强烈地震之中
- 开挖坡脚过程之中或者滞后一段时间
- 水库蓄水初期及河流洪峰期
- 强烈的机械振动或者大爆破之后

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 我国主要的崩塌分布区域

- 西南地区
- 西北黄土高原的黄土崩塌
- 西藏、青海、黑龙江的冻融地区
- 秦岭—大巴山地区，宝成铁路沿线

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 崩塌和滑坡的区别

- 斜坡坡度
  - 崩塌坡度常大于 $50^\circ$
- 运动本质
  - 崩塌：倾倒、坠落，滑坡：切向位移
- 崩塌后崩塌体破碎凌乱，滑坡体整体性好
- 崩塌脱离母体，滑坡很少脱离母体

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 崩塌照片



清华大学研究生课程——《灾害学》

## 崩塌灾害



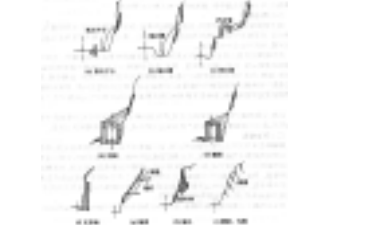
清华大学研究生课程——《灾害学》

## 崩塌的防治

- 遮挡
- 拦截
- 支挡
- 护坡、护墙
- 镶补沟缝
- 削坡
- 排水

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 崩塌的防治



清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流灾害

- 泥石流为山区特有的突发性地质灾害
- 包含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体，呈粘性层流或稀性紊流等运动状态
- 是地质、地貌、水文、气象、植被等自然因素和人为因素综合作用的结果

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流的基本特征

- 泥石流具有土体的结构性，即具有一定的抗剪强度
- 泥石流具有水体的流动性，即泥石流和沟床面之间没有截然的破裂面
- 泥石流一般发生在山地沟谷中，具有较大的流动性

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流灾害

- 对居民点的危害
  - 泥石流最常见的危害之一是冲进居民点，淹没人畜，毁坏土地，甚至造成村毁人亡的灾难

清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science

泥石流灾害

- 对铁路、公路和航道的危害
  - 全国铁路运营历程共5万余公里，其中3万余公里位于山区。
  - 铁路沿线有泥石流1386条，威胁着3000多公里铁路线的安全
  - 成昆、宝成、陇海、兰青、大秦等线都是泥石流灾害较集中的地区

清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science

泥石流灾害

- 对铁路、公路和航道的危害
  - 建国后累积发生泥石流灾难1200多起
  - 造成铁路被毁，中断行车的达300起
  - 出轨和颠覆事故10起
  - 100人伤亡的特大事故2起
  - 车站被埋41次（33个）
  - 每年修复改造费用高达7000余万

清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science

泥石流灾害

- 对铁路、公路和航道的危害
  - 川藏、滇藏、川滇、甘川、川陕公路以及中尼公路，中巴公路均穿越泥石流发生的山区
  - 川藏公路沿线有泥石流近千条，几乎1/3以上路段以泥石流灾害为主
  - 冰川泥石流
  - 暴雨泥石流
  - 山崩、滑坡、冰崩、雪崩、冰湖溃决

清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science

泥石流灾害

- 对铁路、公路和航道的危害
  - 直接影响：流入河道，阻塞航道或者形成险滩
  - 间接影响：增加河流含沙量，加速航道淤积
  - 金沙江沿线有500多条泥石流，形成大小不等的急流险滩而且常常会填江断流

清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science

泥石流灾害

- 对农田、矿山危害
  - 泥石流对农田的危害主要有冲刷危害和淤埋危害
  - 扩大沟壑、掩埋耕地、水土流失
  - 摧毁矿山，淤埋坑道

清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science



清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science

泥石流灾害实例

- 1921年7月8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500多人
- 1970年5月31日，秘鲁瓦斯卡兰雪崩堵河溃决型泥石流，造成荣盖城死亡18000人，毁灭该城
- 1963年10月9日，意大利滑坡引起水库溃坝型泥石流，死亡2125人
- 1999年底，委内瑞拉连续两个星期的大雨使得土壤的水分过于饱和，巴尔加斯州阿维拉山成千上万吨的泥石倾泻而下，冲毁城镇，造成大约1万5千人死亡，直接经济损失将近20亿美元

清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science

泥石流灾害实例

- 1985年11月14日，哥伦比亚一火山喷发引起冰山融化，导致巨大泥石流。东侧泥石流覆盖了3万km²地区，吞没了赫尔梅罗城镇，死亡人数达到20000人，另有10000人受伤，西侧泥石流到达钦契拉，2000人失踪，5603人受伤，总损失4亿美元

清华大学  
Tsinghua University

清华大学研究生课程——《灾害学》

清华大学  
Tsinghua University

灾害学  
Disaster Science

我国泥石流灾害实例

- 1891年，四川西昌，近千人死亡
- 1954年，西藏桑旺冰湖溃决导致泥石流，死亡407人

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 我国泥石流灾害实例

- 云南小江流域
  - 蒋家沟1919~1968年，7次堵断小江，淹没农田万亩
  - 1984年，死亡117人，伤37人，冲毁建筑4.5万m<sup>2</sup>，大小牲畜360头，农田500多亩，经济损失11000多万元
  - 1985年，冲毁和淤埋铁路桥6座，隧洞4座，毁坏路基12处，中断铁路行车6个月，小江水位上升10米，切断公路运输3个月

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 我国泥石流灾害实例

表 2-1 我国泥石流主要类型及主要分布地区统计

| 类 别 | 主要分布 | 死亡人数 | 经济损失 |
|-----|------|------|------|
| 山区型 | 山区型  | 82   | 82%  |
| 山区型 | 山区型  | 13   | 13%  |
| 山区型 | 山区型  | 88   | 88%  |
| 山区型 | 山区型  | 88   | 88%  |
| 山区型 | 山区型  | 28   | 28%  |
| 山区型 | 山区型  | 17   | 17%  |
| 山区型 | 山区型  | 88   | 88%  |
| 山区型 | 山区型  | 8    | 8%   |
| 山区型 | 山区型  | 8    | 8%   |
| 山区型 | 山区型  | 88   | 88%  |

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流的分类

- 按物质组成分类
  - 由大量粘性土和粒径不等的砂粒、石块组成的叫泥石流
  - 以粘性土为主，含少量砂粒、石块，粘度大的叫泥流
  - 由水和大小不等的砂粒、石块组成的叫水石流

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流的分类

- 按物质状态分类
- 粘性泥石流
  - 粘性大
  - 稠度大，石块处于悬浮状态
- 稀性泥石流
  - 分散性大
  - 石块以滚动或跃移方式运动

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流的分类

- 冰川泥石流，降雨泥石流
- 沟谷型泥石流，山坡型泥石流
- 大型、中型、小型泥石流
- 发展期泥石流、旺盛期泥石流、衰退期泥石流

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流形成的条件

- 陡峭的，便于集水、堆积物的地形地貌。
- 丰富的松散物质
- 短时间内有大量水源

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地形地貌特征

- 山高沟深、地势陡峭、沟床纵坡大、流域便于形成水流汇集
- 形成区，流通区和堆积区
- 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、植被生长不良，有利于水和碎散物质集中

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地形地貌特征

- 中游地区为狭窄陡深的峡谷，谷床纵坡降大，使得泥石流可以迅猛直泻
- 下游为开阔的平原和河谷，使碎屑有堆积场所

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 松散物质来源

- 泥石流常常发生在地质构造复杂、断裂褶皱发育、新构造活动强烈、地震烈度较高的地区
- 破碎的岩层提供丰富的松散物质
- 矿石弃渣

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

水源条件

- 既是泥石流的组成部分，又是泥石流的重要激发条件和搬运介质
- 暴雨
- 冰雪融水
- 水库溃决

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

人为因素

- 破坏植被
  - 毁林
  - 开荒和陡坡耕作
  - 过渡放牧
- 水库溃决
- 不合理的铁路、公路、水渠工程
- 不合理的弃土、弃渣、采石

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

云南小江流域泥石流

- 东川正好处于一个叫做小江深大断裂带的地质断层面上，所以这里地震频繁发生，岩层受到水平方向和垂直方向两种地质运动的反复挤压，岩石的强度大大降低，山体表面堆满了破碎和风化的岩石，这些都是产生泥石流的原材料，象世界上许多其他的地质断层一样，从这里地面上随处可见的地裂缝也可以想象得到小江地区地质断层的活动十分活跃。
- 在群峦叠嶂的小江流域，巨大的山峰高耸入云，与深深下切的河谷形成了几十米的落差。这里山势陡峭，山坡上不时地有石块滚落山谷。如果遇到暴雨，山石很容易在雨水的冲刷下冲下陡坡，形成泥石流。这样的乱石陡坡是形成泥石流的典型地貌。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

云南小江流域泥石流

- 小江深大断裂分成两支，东川刚好是两支的交汇口，地质构造也比较活跃一些，造成这个地区岩层异常破碎，几乎没有一块完整的岩石，这样的话就为泥石流形成提供了丰富的物质条件。
- 可以说蒋家沟里面的固体物质是无限丰富，所以只要有暴雨的话，就有泥石流产生。蒋家沟泥石流暴发的频率相当高，平均每年15次左右，最高的一年是28场。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

云南小江流域泥石流

- 降雨是发生泥石流的另一个关键因素。
- 小江地区的气候非常独特。这里地处亚热带季风气候区，所以有十分明显的干湿两个季节。每年的6月到9月是这里的雨季，降雨量占到了年降水总量的80%以上。由于山势险峻，空气对流十分强烈，丰富的水汽使得降雨的强度也很大。
- 由于地形关系，小江地区的暴雨大都集中在海拔2000米到3000米之间，正好落在山势陡峭的泥石流形成区。更为特殊的是，这里经常出现范围很小而强度很高的点暴雨。这样的高强度降雨落在岩石松散的陡坡上，就很容易引起泥石流。正所谓“万事齐备，只待暴雨”。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

云南小江流域泥石流

- 泥石流的发生要具备三个基本条件
- 第一是要有大量破碎的岩石
- 第二这些破碎的岩石要堆积在陡峭的山地上
- 第三还要有频繁暴雨
- 所有这些条件东川全部具备，所以自然条件决定了小江这个地方，泥石流是必然要发生的。事实上，远在几十万年前，这里就发生过无数次自然泥石流。现在的东川就建立在古泥石流的冲积扇上。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

云南小江流域泥石流

- 东川自古以来，就以产铜而著称全国。到了清朝中叶，东川铜就已经成为朝廷铸造货币的主要原料，东川的人口也随之逐渐增加。虽然现在炼铜方法完全不同，但是东川仍然是我国重要的铜都。古老的炼铜方法对木炭的需求量极大，每炼铜100斤，要用木炭1000斤，而烧出1000斤木炭，又要砍伐10000斤林木。据专家推算，在清朝乾隆年间，每年要砍伐约10平方公里的森林，才能满足当时炼铜的需要。这样的砍伐速度，远远超过了森林的再生能力。

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

泥石流和滑坡、崩塌的关系

- 滑坡和崩塌的关系
  - 崩塌和滑坡往往一同发生
  - 崩塌可以转化为滑坡
  - 崩塌、滑坡在一定条件下可以相互诱发、相互转化

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

灾害学

泥石流和滑坡、崩塌的关系

- 滑坡、崩塌和泥石流的关系
  - 地形地貌特性相似、泥石流还需要水源
  - 崩塌滑坡物质是泥石流的重要固体物质来源
  - 泥石流和崩塌、滑坡有着很多相似的诱发因素

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流的防治

- 生物措施
  - 恢复地表植被
  - 迟滞洪水
  - 避免地表侵蚀

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流的防治

- 工程措施
  - 蓄水引水
  - 支挡
  - 拦挡泥石流
  - 排导工程
  - 储淤工程

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流的防治



清华大学研究生课程——《灾害学》

## 泥石流的防治



清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地面沉降灾害

- 地面沉降又称为地面塌陷或地陷，主要是由于开采石油、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

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地面沉降的种类

- 现代冲击平原模式
- 三角洲平原模型
  - 长江三角洲
- 断陷盆地模型

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 地面沉降的危害

- 使得地面标高降低、并带来次生灾害
- 西安每年因地裂缝损失上亿元
- 天津地面下陷，防潮堤提高，土壤盐碱化，泄洪能力下降，水管破损
- 北京破坏建筑物和道路，损坏井管，土壤盐碱化
- 本溪大量采空区下限

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 上海市

- 从1921年开始发现地面下沉，到1965年累积最大沉降达到2.63m，影响范围400km<sup>2</sup>
- 1966年到1987年，累积沉降36.7mm
- 90年代开始，每年1cm速度下沉

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 天津市

- 从1959年到1982年累计最大沉降量达到2.15m
- 市区平均沉降速率94mm
- 沉降100mm以上地区达900km<sup>2</sup>

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

北京市

- 北京地下水位每年下降1~2m
- 北京东北部地区沉降量达到590mm
- 总沉降面积超过600km<sup>2</sup>

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

西安市

- 地面沉降发现于1959年
- 1971年后随过量开采地下水而加剧
- 1972年到1983年，累积最大沉降量777mm，年平均沉降量30~70mm的沉降中心有5处
- 到1988年最大累积沉降量达到1.34m，沉降100mm的范围达到200km<sup>2</sup>

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

| 序号 | 名称 | 时间   | 地点 | 备注   |
|----|----|------|----|--|
| 1  | 北京 | 1959 | 北京 | 北京地面沉降，1959年发现，1960年达到1.34m，1961年达到1.34m，1962年达到1.34m，1963年达到1.34m，1964年达到1.34m，1965年达到1.34m，1966年达到1.34m，1967年达到1.34m，1968年达到1.34m，1969年达到1.34m，1970年达到1.34m，1971年达到1.34m，1972年达到1.34m，1973年达到1.34m，1974年达到1.34m，1975年达到1.34m，1976年达到1.34m，1977年达到1.34m，1978年达到1.34m，1979年达到1.34m，1980年达到1.34m，1981年达到1.34m，1982年达到1.34m，1983年达到1.34m，1984年达到1.34m，1985年达到1.34m，1986年达到1.34m，1987年达到1.34m，1988年达到1.34m，1989年达到1.34m，1990年达到1.34m，1991年达到1.34m，1992年达到1.34m，1993年达到1.34m，1994年达到1.34m，1995年达到1.34m，1996年达到1.34m，1997年达到1.34m，1998年达到1.34m，1999年达到1.34m，2000年达到1.34m，2001年达到1.34m，2002年达到1.34m，2003年达到1.34m，2004年达到1.34m，2005年达到1.34m，2006年达到1.34m，2007年达到1.34m，2008年达到1.34m，2009年达到1.34m，2010年达到1.34m，2011年达到1.34m，2012年达到1.34m，2013年达到1.34m，2014年达到1.34m，2015年达到1.34m，2016年达到1.34m，2017年达到1.34m，2018年达到1.34m，2019年达到1.34m，2020年达到1.34m，2021年达到1.34m，2022年达到1.34m，2023年达到1.34m，2024年达到1.34m，2025年达到1.34m |

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

北京市



清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》



清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

地面沉降的治理措施

- 表面治理措施
  - 修筑或者加高堤坝
  - 人工填土加高地面
  - 改建修复管线
  - 修改城市规划，避开沉降区域

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

地面沉降的治理措施

- 根本治理措施
  - 人工补给地下水
  - 限制开采地下水
    - 停止开采压缩性大的表层地下水
  - 限制或者停止开采一些固体矿物

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

岩土工程灾害

- 地基变形导致的灾害
  - 严重沉降
  - 倾斜
- 地基失稳
- 地基溶蚀与渗透破坏
- 边坡强度破坏
- 地震
- 冻胀

清华大学

清华大学研究生课程——《灾害学》

岩土工程事故防治措施

- 精心勘察
  - 根据建筑场地特点和建筑物的情况合理确定勘察目的和任务，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
- 精心设计
- 精心施工