

隧道衬砌设计指南

[美]T·D·奥罗克 主编

侯学渊 李桂花 孙逸明 译

侯学渊 张 弥 校

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 7 年·北京

市公共交通局发起，会上写出了《隧道衬砌设计指南》的简介内容纲要，至第二年，把纲要扩充成为本书。

本指南由G·Wayne Clough、Ralph B. Peck和Eugene B. Waggoner等专家组成的小组审阅，还由美国土木工程师协会所属的岩土工程分会执行委员会审阅，并经美国土木工程师协会技术研究委员会执行委员会批准。

本指南从概念和实际两方面陈述了隧道衬砌设计的程序，但并不想作为一本法规式规范。它包括很多内容，如运营标准、衬砌选型和尺寸估计、隧道施工、地质勘察、水的影响以及观察与量测。隧道衬砌受使用、施工和岩土技术等许多要求所支配，故设计时需从这些方面来考虑，因此委员会认为：作为设计的背景，需要这样广阔的内容。

委员会企图避免采用专门术语，但必要处仍用了一些施工或地质方面的专门词汇。

本指南供产权者、资助者、设计者和承包商使用。本书简明扼要便于携带，委员会希望他能成为一本能普遍采用的小册子。

T. D. 奥罗克

地下工程研究委员会隧道衬砌设计
技术委员会主席

内 容 简 介

本书共分八章：内容从运营标准、衬砌选择、施工条件、地质勘察、渗透水量、观察监控等方面论述了衬砌设计方法。书中按照地层与衬砌相互作用原理，将变形和松动压力、开挖应力释放、初期和最终支护、柔性衬砌结构、非线性衬砌性能等现代隧道力学概念用于衬砌设计。书中还列出了一些工程实例纪录。

本书可供从事地下工程的设计、施工、教学人员参考。

Guidelines for Tunnel Lining Design
Prepared by the Technical Committee on Tunnel
Design of the Underground Technology Research
Council

Edited by T.D.O'Rourke

Published by the American Society of Civil
Engineers, 1984

* * * 隧道衬砌设计指南

[美] T.D.奥罗克 主编

侯学渊 李桂花 孙逸明 译

侯学渊 张弥 校

中国铁道出版社出版

责任编辑 刘曼华 封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：3 字数63千

1987年8月第1版 第1印刷

印数：0001—3,000册 定价：0.75元

译者序

美国土木工程师协会于1984年出版的《隧道衬砌设计指南》一书，通过大量隧道工程实践和衬砌理论研究，全面和系统地提出了隧道衬砌设计方法，对我国隧道界是一本有参考价值的好书。

地下结构是介于结构工程和岩土工程之间的一门新兴边缘学科。隧道支护包括衬砌结构和岩土地层两个组成部分。隧道衬砌设计很大程度上取决于使用要求、地质条件和施工措施，设计计算理论是用以了解地层参数变化对衬砌的灵敏度和衬砌上下限设计，再加上判断和经验，构成衬砌设计方法，故隧道衬砌设计是一个从规划、勘察、设计、计算、施工、观测直至投入使用的全过程设计。

本书由美国土木工程师协会和美国采矿工程师协会联合发起成立的地下技术研究委员会所属隧道衬砌设计委员会组织编写，经美国土木工程师协会岩土工程分会执行委员会审阅。

全书由侯学渊、李桂花、孙逸明三同志分工翻译，并经侯学渊、张弥校阅。译文不当之处，欢迎批评指正。

译者

1985年8月于上海同济大学

前 言

1968~1983年是隧道建设的兴旺时期，美国的7项地下铁道系统和西欧的20多个快速运输系统中都修建了大量的地下工程。同时，在公路、分洪、水电等工程中也修建了很多大型和复杂的隧道工程。在此期间动工建设的芝加哥（Chicago）、密尔沃基（Milwaukee）和罗切斯特（Rochester）污水输送系统的隧道工程，其最后的总长将超过258km。

大量的地下建筑项目也促使衬砌系统设计方法的多样化，时常在同样地层条件的相邻隧道中采用着很不相同的衬砌，这种差异反映了缺乏固定的设计原则。此外，过分保守的标准和设计方法亦将导致隧道衬砌的不必要的浪费。尽管近15年来存在着这种矛盾现象，而且也做了许多研究工作，但至今还没有总结出隧道衬砌设计原则的统一文本。

为了降低造价而进行衬砌设计原则的调查，由地下工程研究委员会发起并于1977年成立了隧道衬砌设计技术委员会。1978年在土木工程杂志上发表了委员会的一篇阐明看法的论文，1979年根据委员会工作结果，在马萨诸塞州（Massachusetts）坎布里奇举行了隧道衬砌设计学术讨论会，该会由城市公共交通局发起，并出版了论文集。上述论文和论文集中在描写隧道衬砌设计应注意的因素，尤其是和施工方法有关的因素方面，都十分着力。

在1980年，委员会扩建成地下技术研究委员会的一部分，此后两年间举行了若干次会议。于1982年在纽约Ithaca举行了第二次隧道衬砌设计学术讨论会，这次讨论会仍由城

目 录

1. 引 言	1
1.1 背 景	1
1.2 宗 旨	2
1.3 范 围	3
2. 运营标准	4
2.1 建立运营标准	4
2.2 运营标准的影响	5
2.2.1 服务年限	5
2.2.2 运营安全	6
2.2.3 尺寸误差	8
2.2.4 运营和维修费	9
2.2.5 表面装饰	9
3. 衬砌选择和尺寸确定	11
3.1 衬砌型式	11
3.2 影响衬砌性能的因素	12
3.2.1 地下荷载的性质	13
3.2.2 地层-衬砌相互作用	16
3.2.3 施工方法的影响	19
3.3 衬砌断面尺寸的选定	20
3.3.1 解析方法	21
3.3.1.1 经验方法	22
3.3.1.2 弹性封闭解	22
3.3.1.3 梁-弹簧模型	23
3.3.1.4 梁-连续介质模型	23

3.3.2 解析结果的描述	23
3.3.3 衬砌承载能力	24
3.3.4 规范的应用	26
4. 隧道施工	28
4.1 施工的可能性	28
4.1.1 尺寸保持不变	28
4.1.2 混凝土浇注	29
4.1.3 止水带和施工缝	30
4.1.4 容许误差	31
4.1.5 特殊结构	31
4.2 合同实施	31
4.2.1 有关现场条件改变的条款	32
4.2.2 地质报告	32
4.2.3 争议评论委员会	33
4.2.4 证明文件	33
4.3 技术要求	34
4.3.1 技术要求的一般形式	34
4.3.2 专门考虑的问题	35
4.3.2.1 安 全	35
4.3.2.2 施工容许误差	35
4.3.2.3 初始支护	35
4.3.2.4 混凝土配合比设计	36
4.3.2.5 浇注的准备工作	36
4.3.2.6 混凝土浇注	36
4.3.2.7 施工接缝	36
4.3.2.8 模板拆除	37
4.3.2.9 混凝土养护	37
4.3.2.10 灌 浆	37

4.3.2.11 渗 漏	37
5. 地质勘察	38
5.1 特别关心的领域	38
5.2 勘察方法	41
5.2.1 勘 察	41
5.2.2 钻孔程序	42
5.2.3 专用勘探	42
5.2.4 室内试验	42
5.3 报 告	43
5.4 报告的合同地位	44
6. 水的影响	46
6.1 渗漏的控制	46
6.2 外水压力的支挡	50
6.3 内水压力的限制	52
7. 观测程序	54
7.1 观测和测试	54
7.2 测试的应用	55
7.3 计划实施	58
8. 特殊考虑事项	59
8.1 洞 室	59
8.2 相邻、相交、重叠或交叉的隧道	60
8.3 挤压地层	60
8.4 膨胀地层	61
附录 A 地层-衬砌相互作用的弹性理论模型	62
A.1 背 景	62
A.2 分析成果	63
A.3 应 用	66
附录 B 混凝土衬砌的非线性反应	69

B.1	弯矩-轴力相互作用图	69
B.2	线性和非线性影响	70
附录C	实测和规定的隧道渗漏率	73
C.1	实测的渗漏率	73
C.2	高速交通隧道的渗漏率	73
C.3	污水隧道的渗漏率	76
参考文献		79

1. 引 言

1.1 背 景

隧道的永久衬砌是规划和确定技术标准、地质勘测、地层-衬砌相互作用分析、施工、观测和施工中修改等全过程的最终产物。不能把衬砌只看作是这个复杂过程中的一个独立部分，设计者必须综合考虑许多有影响的施工和地质的因素，这些因素决定了实际情况下衬砌的选择和建造。只有了解了与工程主要系统和承包合同有关的运营标准、施工方法和地质条件等，才能建立有效的设计原理。因此，本指南涉及和隧道衬砌有关的许多领域，为衬砌设计提供适当的背景 and 实际方向。

隧道为高速交通运输、铁路、公路、给排水和水电站引水等提供通道。用作人行过道和市政管道。并广泛应用于矿山，也可用作运河分水道、工业冷藏、仓库和军事工程。隧道处于各种不同的地下环境中，有土、岩土互层和岩石等几种，地下水情况、初始应力状态和地质构造等的变化也很大。修建隧道的施工方法有很多种：如手工开挖、钻爆法和应用各种机械化隧道施工机具的方法。

如果关于功能、地质和施工的现场特定情况不明确，即使知道了影响隧道工程的许多因素，也很难给出一般规律和处理方法。经验是极端重要的，在设计的前期阶段，依靠施工工程师和营造单位的知识，会得到施工方便和造价经济的衬砌。

设计者最关心的是确定隧道运营标准，而其确定需经上

级管理机构 and 高级技术人员的审批。设计者应该认识到，运营标准或要求将控制着最后产品的特征，包括衬砌型式和尺寸。

隧道衬砌的选择首先是根据运营标准，再从施工观点进行审查，最后按预估的地层荷载核算。但设计有可能不受地层荷载的控制。因为，当地层和衬砌紧密且连续接触时，地层和衬砌将共同承担荷载，所以，很多种衬砌都能够满足结构承载力的要求。

采用衬砌设计分析方法时应当了解：分析方法的精度远超过所掌握的地层主要参数的精度，且沿着隧道的地层可能会有很大变化。分析方法的主要优点是能够获得各项参数变化幅度内的衬砌状态，估计上下限条件下的性能。设计者不应用计算成果去代替判断和经验。

虽然衬砌型式和尺寸并无甚变化，但衬砌的造价却因不同承包商的实践经验和技術条件而变化很大。设计者需考虑施工特点，即强调施工的实际可行性和经济性，施工是影响造价的最重要因素之一，应当成为区分设计隧道衬砌方法好坏的一个标志。

1.2 宗 旨

本指南的宗旨是从理论和实践两方面来叙述隧道衬砌设计的程序，而不想去确定规则和分析技术。因此，除本书附录外，未引用一个简单的方程或数量规定，但对发展适当模型，强调重要的特征，以及关于地层性质，施工过程和最终衬砌结构的判断等方面，本书作了详尽介绍。

针对隧道衬砌设计的复杂性和多样化，本书仅介绍某种特定的情况，但其基本思路和原理仍可应用于许多实际问题。本指南着重介绍连续圆环和马蹄形隧道，只承受重力、

静水压力和相当低的初始地应力。本指南未包括明挖法隧道，但讨论了大气常水压和高内水压力的引水隧道。上述这些情况可适用于足够广泛的实践领域，当然，也应看到本指南的局限性，故不应将本书的方法推广至不相关的领域。

1.3 范 围

本指南分成八章：第一章背景和宗旨；第二章运营标准和建立这些标准的关键问题；第三章衬砌选择和尺寸确定的普遍原则，汇总了各种衬砌型式并讨论了地层-衬砌相互作用模型、施工方法的影响和计算步骤；第四章衬砌施工并介绍施工方案、承包合同和技术要求；第五章地质勘察，并叙述如何把岩土数据和设计意图介绍给承包商；第六章与水有关的衬砌问题：包括渗透、外静水压和高内水压力；第七章观测程序，并提供以衬砌设计为目的的观察和量测组织工作；第八章提出指南中未讨论的几个方面，并指出需要附加考虑的重要特性。

2. 运营标准

首先，因为用户的需要是修建隧道的唯一根据，所以，设计者一开始就应该仔细地考虑用户所提出的运营标准。而这些标准是受很多条件影响的，例如，拟建的隧道可能是一个新系统的一部分，也可能是已成系统的续建部分；隧道预计的服务年限可能很长，也可能比较短；有时用户可能想稍增加些运营费以降低基建投资等等。因此，设计人员应和用户密切合作共同确定运营标准。应该认识到，用户所提出的运营标准的意见对设计的影响很大，常常决定结构物的特性，包括永久衬砌的型式和尺寸。

2.1 建立运营标准

建立标准需经上级管理部门和高级技术人员审阅，这个问题最好在设计过程尽早地办妥。委托设计的用户应对工程提出符合他们希望的标准，当然，这些标准不要求是技术性的，设计人员知道他们的要求后，可以将其转换成技术用语。

运营标准经常可按工程类比得到，但有时候却不行。虽然，工程类比可能是一种很有价值的手段，但仍应根据每个新工程的独特要求而发展自己的运营标准。当拟建的隧道要去凑合一个已成的系统，设计者则应掌握已成系统的运营标准，这一点很重要。

提出要修建隧道的用户对于运营标准可能十分清楚，然而，在确定要求和标准时，仍需要工程师的帮助。及早地、

清楚地确定运营标准，对设计者和用户来说都是很重要的。在没有这样的标准时，设计者的基本职责就是和用户合作去进行倡导。

2.2 运营标准的影响

运营标准必须符合隧道的用途。表2.1汇集了四座隧道的运营标准，包括服务年限、使用安全、尺寸误差、运营和维修费、表面装修和渗漏等较重要而被广泛采纳的六项。还有其他许多的特殊设施，如通风和照明都未列入。隧道的其他功能和要求可从Megaw和Bartlett (1981) 及Bickel和Knesel (1982) 的文献中查到。

隧道设计人员应能估计出不同的标准对特殊设计的需要情况以及对建筑费的影响大小。表格内，把对特殊设计的需要情况分为二大类：特殊设计、常规设计。对工程造价的影响在表中分为高、中、低三类。这些区别是为了用来建立一个大致、能在通常情况下显出它的重点的顺序。但也应考虑到在特殊条件下可能出现的不同要求以及重点的变化。

渗漏的标准通常对设计和施工有很大的影响，由于水的特殊重要性，这个专题将在第六章中单独叙述。

涉及服务年限、使用安全、尺寸误差、运营和维修费用以及表面装修的标准，在以下各节中加以简要的说明。

2.2.1 服务年限

交通、输水和电力部门的隧道都是需要连续不断运行的重要设施，所以，这些隧道一般都要求建筑得能保持尽可能的长期使用和经济效益。设计中如考虑长期使用则建筑材料需与周围环境具有相适应的耐久性，而且也要考虑设置检查和维修措施。

短期和长期服务之间的主要区别是结构构件防腐蚀或变质的等级不同。混凝土衬砌的使用寿命取决于混合物类型的选择、配合比的控制以及浇注的质量。当隧道穿越含有硫酸盐的土壤或岩石时，V型水泥或II型水泥与粉煤灰的混合物能够用来提高混凝土的抗变质能力。衬砌承受反复的冻结和融化时，加气可增加其耐久性。根据污水的腐蚀情况，必须对污水隧道采取必要的专门措施。

在长期使用的隧道中，所有的运营设备如通风机、抽水机、电缆管线路以及监视系统必然要进行更换。总体设计中应预留出更换这些设备的通道，并尽量不影响正常运营，不改变原来的结构。

在铁路和污水隧道中，砖、石衬砌并不少见，它的使用寿命有的长达50到100年。尽管其中许多衬砌情况极好，但屡有需要重新鉴定的实例。检查的主要项目包括断面变形、砖和砂浆的损耗、衬砌厚度以及衬砌周围土体的空隙等。新衬砌的设计必须考虑工人和隧道使用者的安全，以及隧道长期不停的运行。

特殊的情况下，隧道的使用寿命可能相对地比较短，这种隧道通常用于采矿和军事用途上。例如通向采空区的隧道可以用来作为通风和运输矿石的巷道，其服务年限较短。

2.2.2 运营安全

关于安全通常包括两个方面：群众和工作人员的安全以及财产的安全。铁路隧道和公路隧道除了乘务人员通过外，还供群众使用，故其安全要求较高。在水工隧道和其他隧道中，通常只供专业人员出入，因此，遇到危险的机会少些，业主的责任也将减轻些。

故障可能是由于周部问题而引起的。在水工隧道中，由

于衬砌破坏而造成的隧道阻塞会引起水流不畅，从而导致严重的倒流，进一步造成外溢，而影响其它结构物并危及生命和财产的安全。所以，在确定设计的安全度时，要考虑到这些潜在危险的发生。

运营标准及其对设计与施工的影响

表2.1

		隧 道 用 途			
标 准	影 响	水工(常压)	水工(高压)	铁 路	公 路
长期服务年限	设 计	常 规	常 规	常 规	常 规
	施工费用	中 等	中 等	中 等	中 等
对运营安全要求严格	设 计	常 规	特 殊	特 殊	特 殊
	施工费用	低	中 等	中 等	中 等
对严格尺寸误差要求	线 路	设 计	常 规	常 规	特 殊
		施工费用	中 等	中 等	高
	坡 度	设 计	常 规	常 规	特 殊
		施工费用	低	低	高
低的使用和保养费用	设 计	可 变	特 殊	特 殊	特 殊
	施工费用	低	低	可 变	可 变
专门的表面装饰	设 计	特 殊	特 殊	常 规	可 变
	施工费用	可 变	可 变	低	可 变
最大渗水量预防	设 计	常 规	特 殊	拱顶特殊 起拱线以下常规	
	施工费用	高	高	高	

注释：

1. 特殊——涉及的项目对设计有控制性影响；
2. 低、中、高——表示对施工费用的影响程度；
3. 水工隧道——包括输运饮水、污水或泄洪等各种类型的隧道。

在地下铁道中，为了保护工作人员的安全和在紧急情况

下乘客能迅速地疏散，往往需要设置人行道。在净空范围内，人行道的位置是一个重要的问题，净空大小决定着隧道的尺寸，在确定人行道位置时应考虑：1）人行道应靠近车辆地板水平面，以便于乘客疏散；2）养路工人能迅速回到人行道，以免与列车相撞；3）在列车出轨时，人行道应能给操作人员提供工作的空间。

2.2.3 尺寸误差

为了确保竣工后的隧道具有准确的内部尺寸和中线位置，规定误差是必要的。隧道正常运行所要求的尺寸是运营标准中的一项，而达到这种尺寸的误差在施工规范中有相应的规定。同样地，准确的隧道位置通常也是使用运营标准的一个项目，就位置而论的误差又是施工规范的一部分。

当确定尺寸、位置和相应的施工误差时，业主和设计师都应考虑到施工设备和技术条件的限制。在铁路隧道中，根据车辆尺寸、车轮摩擦力和信号设备的特点，业主可以提出线路和坡度的限制标准，这些标准包括：像最小的平面曲线半径、竖曲线半径和最大坡度。由于信号设备和速度档次不同的原因，为了使列车能产生均匀的加速或减速，曲率变化必须光滑连续。由于施工误差使线路偏离了预定的方向而需要调正时，必须仔细地考虑曲率的变化。所以，铁路隧道应优先选用线路的中线方向和坡度作为标准。因为在曲线隧道中，隧道断面中线是偏离线路中线的，而线路中线又随线路曲率的改变而变化。因此，隧道断面必须根据线路横断面而确定，反之则不行。隧道掘进机与盾构的操纵公差可能起控制作用，放在第四章中讨论。

水工隧道的容许误差通常比运输隧道的规定要大些。在输水隧洞中，必须保持一个自由水表面，故坡度的误差对维

持设计水流特性和防止过量的水头损失都是很重要的。发电站的输水隧洞需根据基本建设费和摩阻损失之间的最佳比例来确定尺寸，涉及的因素诸如：发电量、电站的设备和利用率、利润率等。通常，在水工隧洞中，过分限制容许误差时则要增加不必要的投资。

2.2.4 运营和维修费

良好的设计通常都应包括维修费用低这一要求。然而，一般情况下都是投资低者维修费和使用费总是比较高。设计师还应考虑到隧道中断运营期间所需要的维修费用。应有定期检查（包括检查时的通风设备）及定期清理碎石的措施。为了维修方便应该安排和建造照明、通风机和排水泵等设备，也应该考虑紧急事故时施工设备的出入口。高速交通工程设计中减少维修量的广泛论述见Birkmyer (1978)。

对于公路隧道，运输监视和运输指挥，事故和火灾救急装置（包括乘客的出口、救急设备及工作人员的入口）以及周围环境监视（有害的烟雾气体）都是极端重要的职能。这就需要有安装设备和标记的空间，救急入口和出口线路的平面位置（成对隧道之间的横向通道）。对于长大公路隧道，通风装置是设计中首要考虑的问题，并且决定了断面的尺寸和形状。

2.2.5 表面装饰

对于输水隧洞，权衡了隧道尺寸和水头损失的关系后要考虑有一个包括接头在内的光滑表面。对于发电站隧道，减小水头损失意味着能发更多的电，因此修饰光滑表面的初期投资可以从多发电这方而得到经济补偿。

对于公路隧道，边墙和顶板上应有坚硬的反射表面，可

以承受住周期性的冲刷和摩刷。表面装饰要能增强隧道的采光效果、有一个比较好的外观以及减少火灾和危害安全的机率。墙体装饰可直接附在结构墙上，或者间隔一个排水空间。

3. 衬砌选择和尺寸确定

衬砌通常按运营标准来选择，再根据工程环境予以评价，最后用一定的假设地层荷载进行验证。设计不是必然由地层荷载控制，例外是可能发生的，尤其当周围土壤很软或遇到挤压和膨胀地层时。在不利的或不能断定的情况下，衬砌可以暂时选定，而后通过现场观测和量测再来考查它的性能。

地下施工的实践经验将大大地帮助设计师。开挖隧道的第一手经验使设计者可以将地层-结构相互作用的原理和许多施工因素揉合在一起，而这些施工因素对隧道工程的可行性和造价都是有影响的。

本章讨论衬砌选择和尺寸确定，重点放在地层-结构相互作用的分析以及与施工有关的设计问题。

3.1 衬 砌 型 式

设计师必须从种类繁多的支护体系中选择一种衬砌，对一个工程可能有若干种适宜的衬砌。表3.1列出常用衬砌型式和各种型式在使用中的特点，衬砌型式包括无支护的岩石到预制钢筋混凝土管段。对于无支护的隧道，岩体就是永久衬砌，设计师的责任就是决定隧道的方位、横断面形状，而施工技术要适应由于开挖而引起的应力重分布。各种型式的衬砌其作用都是为了增补地层的原有强度和连续性。在岩石中，临时和永久支护结构的数量通常是与不连续面和软弱区域的数量成比例增加的。如果地层的特性接近于土壤，此时

要求支护体系有较好的连续性。岩石锚杆和喷射混凝土体系很适用于含有少量到中等节理的岩石。通常采用管片体系或整体式混凝土作为风化岩石和土壤的长期支护。

对于盾构掘进的隧道，常分为一次衬砌和二次衬砌。但这两个名词并不是统一的，例如一次衬砌又可称为地层的立即支护，而它需要二次衬砌作为永久支护和保护层(Hewett和Johannesson1922)。在某些实际工程中，一次衬砌被认为就是永久支护结构，而二次衬砌则主要作为内部表面处理(Megaw和Bartlett1981)。

本书中，把隧道支护区分为初次的及最终的二种。设置初次支护是为了建立一个稳定的施工作业坑道，它应尽可能地靠近开挖面设置，以保护施工人员和控制地层移动。初次支护常常包括岩石锚杆、喷射混凝土或拱架系统。最终支护是用来确保隧道的长期稳定以及与业主的运营标准相符合的正常使用。

关于初始支护的长期作用问题，目前还没有一个简单或通用的原则来加以说明，因为，可能的腐蚀、合同执行过程中的争论、质量控制等每个工程都不同。要鼓励设计者去考虑初始支护的作用，至少要将它作为永久衬砌的一部分。在某些情况下初次支护能直接用作永久结构。当钢拱架完全埋入混凝土或喷射混凝土中，则它可用作为永久结构构件。同样地，如果有足够的长度和密度的岩石锚杆，所处地层的岩石强度、节理和原始应力都较有利时，则全长灌浆的岩石锚杆可作为长期钢筋。预制管片衬砌通常可作为初次的和最终的支护。

3.2 影响衬砌性能的因素

已知使用要求、地层条件和施工方法后，隧道设计师必

须挑选最适当的衬砌。此时，设计师必须仔细地考虑影响衬砌性能的各种因素，包括地层荷载性质、地层-衬砌相互作用的特点和施工方法等。

主要衬砌型式一览

表3.1

衬砌型式	主 要 特 点
无支护岩石	适用于质量非常好的岩石，必须满足原始应力的要求。为了使岩石表面干燥和增加它的整体性要求涂表面密封层，以抑制长期变质。
岩石锚杆系统	用来加强其它的支护系统或作为最终支护。非预应力锚杆适用于优质岩石。预应力岩石锚杆造价高，使用效果好。插管可预先加固地层和增加壁立时间。水泥和树脂灌浆能提供永久锚固和防止腐蚀。岩石锚杆常与喷射混凝土或金属网片共同使用，以控制岩石松动和防止剥落。
喷射混凝土系统	经常与岩石锚杆合用。能用焊接钢筋网加强，网的最小孔口是100mm，优先用150mm。能用钢纤维混凝土。与钻爆法施工和小断面掘进机开挖相配。很难接近全断面隧道掘进机的工作面操作。
钢拱架	可适应于绝大部分的岩石和土壤条件，对于大多数开挖方法也能适应。喷射混凝土可以将轻型拱架埋住，但混凝土厚度和填充孔隙都较大时泵送混凝土会更经济些。
管片系统	管片通常由预制混凝土或钢材组成。接缝的渗漏通常用螺栓固定压缩垫圈来控制。无螺栓的扩张管片环可用在具有一定强度和壁立时间的土层。有灌浆环带的无螺栓管片可用于某些岩石隧道。
整体式混凝土	通常都需要有初次支护。表面光滑和抗渗性能好。使用专门设备和施工技术时则会有利。
预制管段	顶管管段适用于相对来讲比较短的直线隧道，其最大长度约为450m。应该考虑偏心顶力和地面荷载。亦可设置在初次支护里面，然后进行回填。

*系高度为100~150mm的钢轨断面。

3.2.1 地层荷载的性质

隧道衬砌通常不直接承受上面覆盖土壤或岩石的全部重量。例如山岭隧道的衬砌显然不能支撑几百米岩层的重量。

在所有隧道中，依靠地层的固有剪切强度和连续性，在开挖孔洞周围出现了初始地应力的重分布。剪切强度的利用，以及应力从地下坑道向外迁移的现象一般叫作“成拱作用”。衬砌在理论上仅承受未经天然拱传向邻近地层的那一部分应力。天然拱的效能取决于土壤或岩石的固有强度和变形特性，以及隧道施工（和后建的）对地层的扰动程度，不连续面的存在、水压力对减少剪切强度的影响等等。

作用于土质隧道衬砌上的荷载为土壤-衬砌相互作用的接触应力。通常都认为地层压力对衬砌有影响，但这样讲容易引起误解，并被解释为地层以主动或静止压力的型式直接地作用在衬砌上。这种解释是不恰当的，衬砌对土壤作用的反应取决于衬砌和周围地层之间的相对刚度。已经得到了分析上述情况的若干弹性封闭解，列入附录A中。

Paul等（1983）指出重力荷载可能作用在一些土质隧道上，相应于此情况的称为松动压力。土壤体积变化特性和衬砌变形将对松动程度有很大的影响。如果衬砌和周围土壤之间接触紧密，可以完全防止松动或将它限制在拱顶很小的范围内。

浅埋岩石隧道衬砌上的荷载主要是重力荷载，即隧道周围邻近的岩石楔块重量。这种荷载可由岩石的容重和切割岩体的节理和非连续面系统来确定。作用在连续衬砌上的荷载可考虑不同的节理组合来估算，即根据地质条件找出上覆的或邻接于隧道的楔块，而最大临界楔块的重量，扣除沿滑动面的摩擦力和联锁力后即为最大的支承荷载。关于地下坑道的临界楔块和支护要求已经进行过很多研究工作，如Cor-Ding和Deere（1972），Brierley（1975）Ward（1978）及Hoek和Brown（1980）等。节理性质（例如方位、频率、厚度、摩擦或粘结阻力和节理表面的联锁程度）对决定重力

荷载的大小和分布规律起着重要作用。由于荷载估算要了解岩石的结构特征和定量评价岩石及节理特性，故需要进行岩土勘测工作。

根据支护与各种岩体分类（定量的或不定量的）之间的经验关系来选择岩石支护系统的方法已经有人提出了（例如 Terzaghi 1946; Deere、Merritt 和 Coon 1969; Wickham, Tiedemann 和 Skinner 1974; Barton、Lien 和 LunDe 1977; Bieniawski 1979）。这些岩体分类对估算支护的需求是有帮助的。但设计者通常还需要进行更详细的估算以确定永久衬砌的型式和尺寸。Cording 和 Mahar (1978) 提出了一个通用的方法，能更全面地决定衬砌，可按下列步骤进行：

1) 对地质和重要的岩石质量指标进行评价，2) 根据已给定的地质背景和洞室的几何形状，估算和施工程序与岩石性质相符的岩石荷载，3) 选择最适于既定的施工程序和设备的支护系统。

正如上面已经指出，隧道开挖会改变土或岩体的应力状态。即使开挖以后尽快地敷设支护，一般也会产生足够的位移而引起初始地应力的大量释放。因此，隧道衬砌难得用原始状态的应力作为荷载进行设计的。这样的荷载对于支护往往是不切实际的，而且在建造永久衬砌时，初始应力的释放也已完成，由初始应力所形成的荷载就不存在了。

初始地应力的释放常用地层特性曲线来说明，该曲线表示了衬砌-地层接触面上的径向压力和向内的径向位移之间的函数关系。已经有了各种材料性质模型的地层特性曲线，如 Brown 等 (1983) 的讨论。在浅埋的土质和岩石隧道中，非常小的位移就足以使径向压力减小很多。例如 Peck (1969) 已经利用地层的特性曲线来说明土质隧道的开挖是怎样导致初始地应力大大减小的情况。在低强度和高应力的岩石

中开挖隧道，岩体尚未充分发挥其剪切强度并减小径向压力之前，塑性状态就可以引起相当大的向内的位移。在挤压地层条件下修建欧洲的几座公路隧道时，就曾经根据初次支护设置和向内收敛量测相协调的基本概念，利用了这类的地层特性曲线（例如，Rabcewicz 1969, 1975, Einstein和Azzouz 1980）。

3.2.2 地层-衬砌相互作用

隧道衬砌既被围岩所约束又承受围岩的压力。衬砌形状的改变将受到地层的阻碍，因此，任何主动荷载作用下，在部份衬砌上都会引起地层的被动抗力。正如前述，土或岩石的位移会产生剪切阻力，使得初始地应力和重力荷载被衬砌与邻近地层共同承受。为了说明这种情况，研究一个连续的圆形衬砌是有指导意义的，其基本原理适用于各种形状的衬砌，其中包括马蹄形断面和变曲率半径的衬砌。

假定衬砌是与地层连续接触，而且在地层应力达到平衡状态以前衬砌已设置。在极个别情况下，边开挖边建筑衬砌，则原始应力将直接作用在衬砌上。实际上不可能在建筑衬砌时无应力释放，因此，上述情况系限制地层内部运动的一种极限状况。

图3.1表示土中刚性和柔性衬砌的接触应力分布和变形的图式。水平原位应力是静止侧压力系数 K_0 和垂直应力 σ 的乘积。刚性衬砌变形很小，其原位应力保持不变。因此，在衬砌中产生了较大的弯矩，其值取决于垂直和水平应力之差。相反，相对柔性的衬砌会变成一个近似于椭圆的形状。拱顶向内变形，从而使垂直应力有所减小，这是因为在地层中产生了阻止地层向下移动的剪切阻力。起拱线附近的衬砌向外变形，从而引起了地层的被动抗力，而使水平应力增

加，衬砌上接触应力的最终分布形式几乎是均匀的。柔性衬砌中的弯矩较之刚性衬砌要小得多。

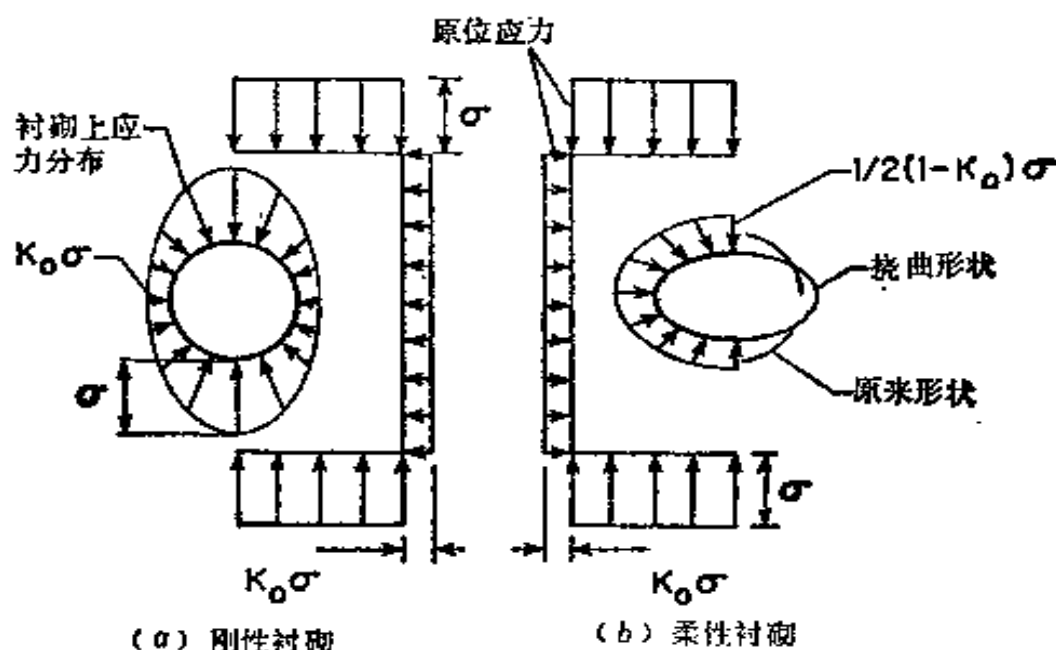


图3.1 土中刚性和柔性圆形衬砌的接触应力分布和变形形状图

实际上，一个衬砌既不像图中所示的刚性，也不会是如此柔性，因而实际衬砌的弯矩和轴力在这二个极端情况之间。施工过程中，在衬砌设置前地层已产生变形，故在支护与地层接触前就发生了应力重分布。衬砌的最终变形，轴向推力和弯矩通常小于图例所示的。减小的数值取决于安装支护离开挖面的距离和支护与围岩的紧贴程度。

如图3.2所示，衬砌常常受到隧道顶上地层重量的作用。这种情况很可能发生在明显的不连续岩层中以及被施工破坏而非常松散的土中。荷载作用于拱顶后衬砌会产生弯曲。但它的弯曲变形受到周围岩体的限制，地层越坚硬则其变形越小。因此，当地层和衬砌之间的相对刚度增加时，在一定垂直压力作用下所产生的弯矩将会减小，这种情况与以前所述的差别在于主动荷载几乎是不均的，而侧向被动压力仅取决于衬砌的变形。

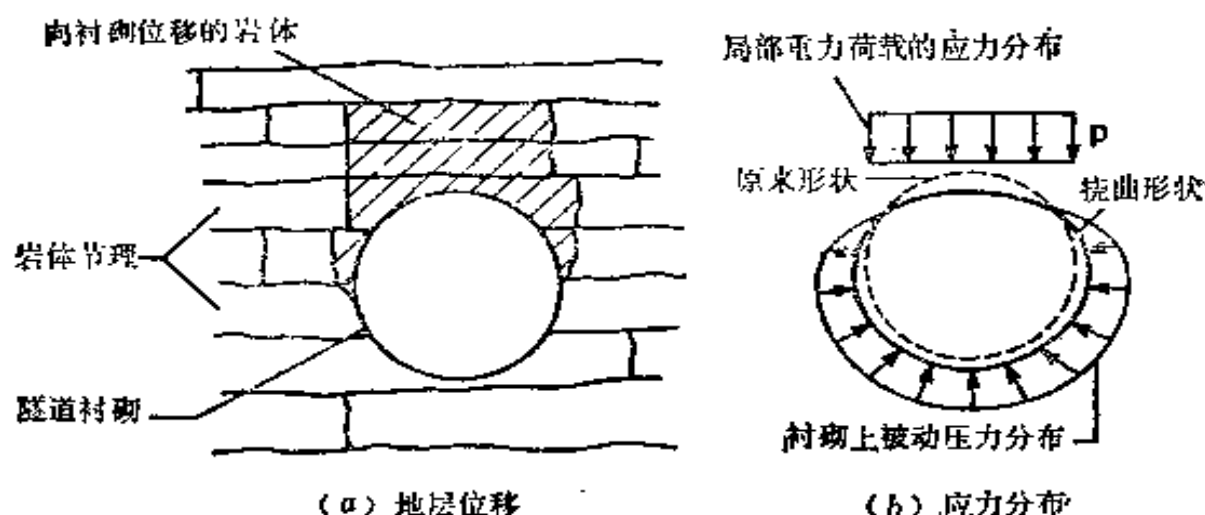


图3.2 重力荷载作用下圆形衬砌的应力分布和变形形状图

事实上在所有地层中，如果衬砌与周围介质之间是紧密接触的，那么，产生较大被动抗力所需的变形与衬砌的弯曲能力相比是很小的。现场观测表明，甚至在软的或塑性的土中，即使柔性衬砌直径的变化大于百分之零点几，也能被周围地层所发挥出来的强度有效地阻止 (Peck 1969)。实践证明这种衬砌的弯曲应力不是主要的控制因素。在设计中主要应考虑直径的变化是否满足渗漏等使用要求。柔性衬砌可以按均匀径向压力设计，径向压力的大小等于隧道中心处土压力和地下水压力的平均值，然后，再加上直径变化（很小的百分数）所产生的应力。

若衬砌和地层是紧密而连续地接触，则衬砌和地层就能共同承担土压力，因此，很多种衬砌都能比较容易地满足结构要求，甚至厚度很薄也常能满足结构的整体性要求。在极软的土层中，隧道的变形是地层刚度的函数而与衬砌刚度无关。此时衬砌的弯曲应力与其厚度成正比。相反地，由于圆环压缩而产生的环向正应力则与衬砌厚度成反比。对于浅埋隧道，地层压力值相对地比较小，但压力分布不均匀，宁可选用薄型衬砌使弯曲应力减至最小值。对于深埋隧道，地层

压力较大，但分布较均匀，可能需要较厚的衬砌来承受轴向压力。深埋隧道的变形可能更小些，也就更起不到控制作用了。

柔性衬砌的性能类似于薄膜，而不是单独的结构拱。因此，一般不希望它具有弯曲刚度，因为弯曲刚度只能引起应力，而不能明显地减少变形，轴向刚度能保证被动抗力的产生，所以是必不可少的。无螺栓管片衬砌中的轴向刚度提高了衬砌的整体稳定性，就是一个很好的例子。在衬砌的管片间打入楔块使其膨胀而与周围地层紧密接触，则轴向压力和围岩的侧向制约使其成为一个连续的结构环。

衬砌断面的刚度与厚度的立方成正比，故厚度略浅就能较多地增加柔度。在相邻环错缝拼接的螺栓管片衬砌中决定柔性是个复杂问题。但对软粘土中同样断面的衬砌可合理地取为整体衬砌的一半刚度（Paul等1983）。

应该强调，为了模拟地层-衬砌相互作用，需要有关土和岩体刚度的资料。因此，地质勘察必须提供介质的荷载型式、大小和分布以及荷载-变形特性的资料。

3.2.3 施工方法的影响

设计师必须熟悉给定隧道的合理施工方法，以及不同施工工期的荷载估计值。地层的自稳能力受施工方法的影响很大。例如，钻爆法可使岩石破碎，而产生用全断面隧道掘进机开挖时所没有的荷载。开挖的程序和支护设置的时间可对永久衬砌发生影响，特别是岩体的松动会减小它的抗剪强度和联锁作用。

土质隧道工程的经验表明，隧道盾构在搬运、安放和相继的推进过程中施加在管片衬砌上的荷载，常常比地层-衬砌相互作用所产生的压力更危险，灌浆的接触压力对管片和

整体式混凝土衬砌都要引起注意。

邻近隧道的开挖可以改变作用在一个已成衬砌上的荷载，并引起附加的变形。设计者应该考虑今后毗连隧道的施工以及邻近建筑物的开挖和地表面上填土的影响。

实际上，所有现场浇注的混凝土衬砌都需要有一个初次支护系统，在土中通常由拱架和背板或预制衬板组成，而在岩石中则由拱架和锚杆组成。拱架系统与地层相比是非常柔性的，若能将拱架背后空隙充分回填或用千斤顶将其顶紧，则在垂直于隧道轴线的平面内将产生显著的变形，从而使不均布的地层压力重新调匀。混凝土衬砌则应在这种地层压力重分布发生并趋稳定后再进行浇注。由于荷载被初始支护所承受，故第二阶段作用在现浇混凝土衬砌上的荷载是很小的。即使混凝土衬砌相对地较厚、刚度较大，它的弯曲变形一般也是较小的，故弯曲应力的实际意义不大。

软地层中两座相距较近的平行隧道的情况是个例外，开挖第二条隧道所引起的地层的变形可以影响第一条隧道。所以，将浇注第一条隧道混凝土衬砌的时间推进到第二条隧道的开挖面通过以后是适宜的。

3.3 衬砌断面尺寸的选定

选择衬砌断面尺寸首先应根据施工和使用要求。现浇混凝土衬砌的最小厚度通常取决于初始支护拱架和混凝土内部模板两者之间的净空。必须提供足够的空间，使混凝土能通过拱顶处滑桶来充满模板和支护之间全部部位。考虑施工的容许偏差和拱架的变形，这种净空对不大于9m直径的隧道通常规定为200mm，对大的隧道或洞室可规定为300mm。图3.3表示岩石隧道现浇混凝土衬砌的典型外形。

管片衬砌的最小厚度可能由运输应力控制，但是通常取

决于接头的要求，带有垫层接头的螺栓混凝土管片衬砌，其最小厚度通常为200mm，而金属管片则为150mm。没有螺栓的铰接衬砌，常被用于有足够粘结力和壁立时间的地层，厚度可取为125mm。

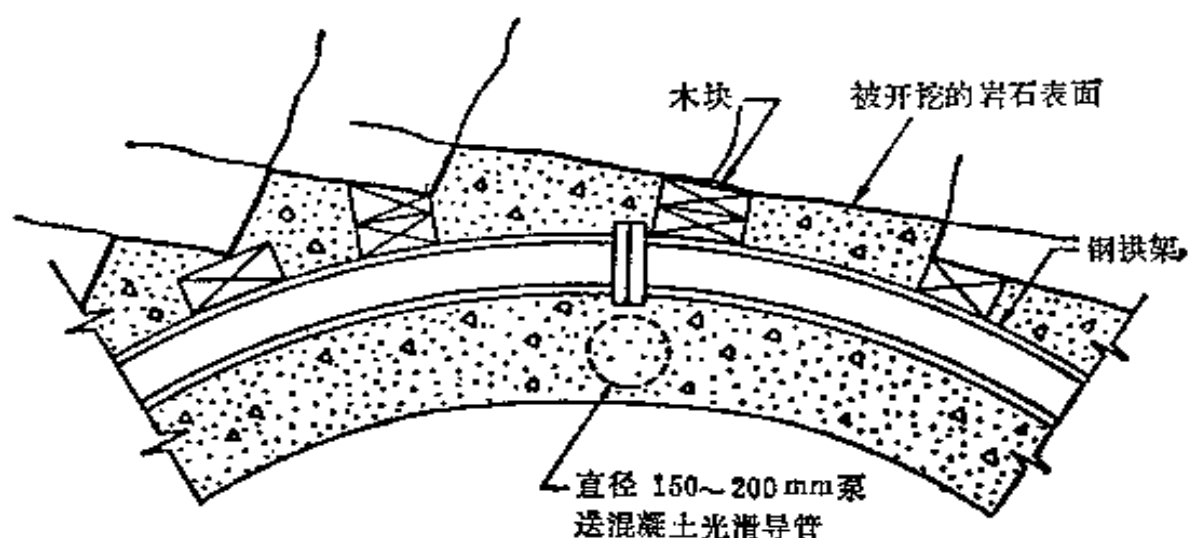


图3.3 岩石中现浇混凝土衬砌的典型断面

对于埋深为3倍直径的浅埋土质隧道，采用上述的最小厚度通常就足够了。对于深埋隧道，初次选择厚度时，要假定环向压缩的平均轴向应力不超过它的容许应力的一半，即假设应力线在断面核心之内。

初期选择的衬砌断面尺寸，可再辅以地层-衬砌相互作用的解析方法进行校核，用解析方法计算出的内力应该与衬砌的承载能力相比较。衬砌的尺寸和钢筋的选择应该符合规范所规定的安全标准。

3.3.1 解析方法

分析隧道衬砌的正确方法必须能够按照地质和施工条件描述荷载和变形，并且能够准确地估计地层-衬砌相互作用。

能满足这些要求的方法很多,例如,经验估计,封闭弹性解以及数值模拟。虽然,很多数值方法都是有效的,但本指南仅讨论梁-弹簧法和有限单元法。一般来说,适宜的方法可能不只是一种,故有时需要采用两种或三种方法来研究不同参数的影响,并对结果进行相互校核。

3.3.1.1 经验方法

如上所述,土质隧道衬砌的变形量通常仅是隧道原始直径的千分之几。根据已量测的直径变化数据(例如 Peck 1969, Attewell 1978),对于地层条件和施工程序都相似的工程,设计者能够选择现场观察的资料来估算衬砌变形量。而最大弯矩可按如下假定估算,即衬砌中的轴力有一个与圆环变形形状相一致的偏心距。或者假设衬砌变成椭圆形,则弯矩可作为曲率最大变化的函数求得(Deere等1969, Golder Associates和James F. Maclaren Ltd. 1976)。通常假设衬砌的轴力由均匀分布于拱部的全部覆盖层重量所产生。

3.3.1.2 弹性封闭解

弹性介质中圆形衬砌的轴力和弯矩已有若干个封闭解(例如Peck、Hendron和Mohraz 1972, Muir Wood 1975, Ranken, Ghaboussi和Hendron 1978, Schwartz和Einstein 1980),这些解的发展过程和一些分析结果的图表在附录A中叙述。简化的弹性模型很难直接去推断现场结果,实际应用时还需要加上大量的判断。然而如果用它来把更复杂的模型结果进行分类和研究主要参数变化对设计的影响,这些解是非常有益的。

3.3.1.3 梁-弹簧模型

在这种模型中，一些研究者用一系列梁单元代表衬砌，用径向和切向弹簧表示介质（例如Brierley 1975, Paul 等1983）。这种方法能准确地分析衬砌，改变切向弹簧的刚度就可以模拟接触面的条件，在滑动与不滑动之间。荷载必须预先确定并直接作用在衬砌上，可以是任一方向的，并可沿衬砌任意分布。这个模型尤其适用于土壤或岩石中重力荷载作用的情况。其缺点是该模型忽略了剪应力随径向平面的法向荷载而变化的因素，这一点和winkler的弹性地基梁的解很接近。这个模型能计算出衬砌的变形，以及由变形而引起的地层的侧向压力，并可以很容易地应用于微型计算机。

3.3.1.4 梁-连续介质模型

这种方法中，地层用连续介质的有限单元表示，衬砌可用连续介质单元或若干梁单元表示。Paul 等（1983）的有限元分析使用非线性单元表示衬砌，而土层用等参单元，在地层与衬砌之间具有专门的接触面单元。这种方法能解重力和开挖荷载问题，同时也能模拟土壤或岩石中径向平面上剪应力的变化。适用的有限元程序在设计部门一般是不可能有的，解题需要一个中央处理系统或小型计算机，今天这种方法主要用于科学研究。复杂的模型需要地层应力-应变特性的详细资料，并依赖于土壤的本构模型，这在大位移情况下还需要充分的检验。

3.3.2 解析结果的描述

应该承认所有解析方法的计算精度都大大地超过了决定地层特性的精度。此外，一个相同衬砌断面通常用于一长段

隧道，而隧道穿过的地层特性会有重大的变化。所以分析方法对于研究个别参数变化对衬砌断面的影响程度，以及确定衬砌性能的上、下限是很有用的。不能设想，隧道衬砌分析所决定的实际隧道中真实应力的精度，能够达到地面建筑物的结构分析的精度。

分析结果表明，隧道衬砌的性能主要取决于周围地层的特性，而衬砌断面性质的改变对整体性能的影响很小。增加衬砌刚度可能引起应力，但几乎不会减少衬砌变形，减少衬砌的抗弯刚度但不降低它的轴向刚度，一般可以使衬砌调整变形而与地层即隧道的主要结构单元变形一致。

一些研究者已经估算出模拟实际衬砌性能的各种不同理论模型的结果。按照连续介质力学原理的衬砌设计模型综述已经由Duddeck和Erdman (1982) 给出，Schmidt(1984) 已经研究了设计中所采取的各种假定，并与隧道实际作了比较，Kuesel (1983) 已经详述了应用模型的实际条件，并总结出了地层荷载和典型衬砌尺寸之间的若干简化关系式。

3.3.3 衬砌承载能力

一个精心建造的衬砌，它的工作状态相当于一个受到约束的拱圈，能保证和周围地层共同工作，有利于拱上侧限压力的产生。混凝土衬砌发生结构性的破坏，都是由于受压面达到了极限应力或极限应变而被压碎所引起的。这种极限状态是衬砌在外荷载作用下所产生的轴力和弯矩共同形成的，轴力和弯矩可用上述的任一种分析方法进行计算，然后将其进行组合并与破坏时的极限组合相比较。弯矩-轴力相互作用曲线是进行比较的一个有用工具，并能进一步了解衬砌承载过程的内部机理。

弯矩-轴力相互作用曲线的一个应用实例示于附录B中。

正如附录中所讨论的，衬砌的承载能力可以明显地超过结构截面的弯曲能力。因为衬砌相当于一个约束拱，它的承载力是由偏心轴力作用下的截面压缩极限所控制的。

刚性衬砌弯曲变形过大，可以产生不允许的裂缝，而导致漏水，但不影响它的承载力。当预计到衬砌周边的荷载可能分布极不均匀时，则应采取专门的预防措施。一般认为，先修建易变形的初始支护来承受地层的早期变形，然后再建造永久衬砌，比起直接建造刚性衬砌来承担不均匀荷载的方法要好得多。

涉及衬砌的承载能力，以及渗漏等其它使用功能时，钢筋的采用也是一个主要考虑的问题。在现浇混凝土衬砌中对于是否需要和有无可能采用，钢筋的看法有相当大的意见分歧。如果承认在混凝土衬砌建立以前，初始支护系统已适应了地层变形并使不均匀压力产生重分布，则混凝土衬砌实际上不可能再向外弯曲而引起被动压力，这说明外层钢筋环是不需要的。然而，由于重力荷载的作用，向内弯曲，尤其是在拱部仍然会产生。若认为这种向内的弯曲变形可能超过已埋入的初次支护构件的承载力，就需要配置内层钢筋环。为了抵抗收缩和温度裂缝，尤其是在已埋有钢拱架处，可以考虑配置内层纵向钢筋，并和固定它位置的横向钢筋一起，共同承受沿模板向下流动的现浇混凝土的压力。

在岩石隧道中，许多未配筋的混凝土衬砌已经长期地安全运用，所以，现在还不清楚配置钢筋在经济上是否合算。向衬砌背后进行高质量的灌浆可以改善衬砌承受荷载的工作条件。由于增加了材料消耗和施工麻烦，因此，配置钢筋将增加衬砌造价，配筋对衬砌施工的影响将在第四章中讨论。

3.3.4 规范的应用

结构规范应该谨慎地应用，根据不考虑地层-结构相互作用的假设，已经编写了许多地面结构规范。因此，鉴于地层的共同作用和施工方法对衬砌受力和造价的重大影响，盲目地应用结构设计规范将使衬砌承载能力受到不恰当的限制。

特殊的荷载系数在本书中不作介绍。应该仔细和系统地考虑地质和施工影响后再估计荷载情况。重要的是，在选用安全系数时，需将地层荷载的估计和结构细节设计二者协同起来考虑。如果已经选定最大的可能荷载，因其中已包含了安全系数，所以，结构设计中不需要再重复。若选定的是实际预期的荷载，那么结构设计中应有安全系数，以反映荷载的可能变化和衬砌承载力的可能波动。在采用极限状态设计方法时，需取一个总安全系数，将使用荷载作用下的平均应力控制在混凝土强度的一半范围内。将衬砌上的真实荷载乘上一个荷载系数，即为这种情况。当用承载能力减少系数除以荷载系数，即可得到一个等于或大于2的安全系数。

用弯矩-轴力破坏包络图或其相互作用曲线来验算弯矩和轴力的组合是非常方便的。美国混凝土学会的规范，ACI 318—83（ACI委员会318，1983），所提供的作图法可以采用。这个方法考虑了材料性质波动所造成的承载力减少系数、断面强度计算以及圆柱体试验强度与结构中混凝土强度的差异。

分析所得到的剪应力可以直接和按照ACI318—83 11.3节计算的抗剪强度进行比较，规范计及了轴力的影响。若需要验算剪力的部位靠近可作为构件支座的拱的拐角处，则应取离支座面一个有效高度的距离处的截面进行验算。如果没

有这种支座（譬如圆形隧道），则应该验算剪应力最大的那一点。埋在混凝土里面的钢支撑的抗剪强度可以叠加到混凝土断面上。这里不推荐采用钢箍等剪力钢筋，需要时一般可调整混凝土厚度以承受剪力。滑动岩块所形成的集中荷载可能在岩块边缘处引起很高的剪力，应该对这种情况进行验算。

4. 隧 道 施 工

正象前章所讨论到的，为了估算荷载和判断某种支护系统的可行性，对施工的了解是重要的。隧道的造价直接地受设计师所选的衬砌方案、辅助支撑数目和实际尺寸的影响。同时施工的难易也影响造价。即使衬砌的型式和尺寸保持不变，但衬砌的费用实质上随着合同执行的情况和技术要求的不同而变化。

经济效益好的工程是因为施工方便、施工计划和设计者对承包商的交底方法周到。本章讨论的范围为：1) 施工可能性，2) 合同实施，3) 技术要求。

4.1 施工的可能性

施工的可能性是衡量设计是否重视施工中的实际情况和经济条件的一个标志，也是影响造价的最重要的因素之一。在设计阶段，如能听取熟悉施工的工程师和施工单位的意见，可以使拟建的衬砌具有更好的施工可能性和经济效益。所以，设计者的职责就是：一方面要选择那些符合当前技术发展水平的施工方法，另一方面又要考虑施工单位的合理化建议，包括：隧道尺寸、施工缝位置等等，与现浇混凝土衬砌施工有关的项目分以下若干题目讨论。

4.1.1 尺寸保持不变

在一个合同中，若隧道有尽可能长的区段保持断面尺寸不变，则将取得最好的经济效益，开挖断面尺寸也应保持相

同。这个因素很重要，因为可减少模板和模板支撑的变化，并使混凝土模板制作和安装自动化。例如，在两个隧道交会处需要更强的断面，设计者不应改变其厚度与形状，而应配置钢筋以获得附加强度。尺寸的标准化和重复性还有一个附加的好处，即在一个合同和较大工程的独立合同项目中混凝土模板可以重复使用。

4.1.2 混凝土浇注

隧道混凝土的浇注通常可采用直接式或挤压式混凝土泵，以及附在排料管端部的空气缓动器，或光滑导管。气压浇注机能提高浇注混凝土的效率。从位于拱顶的排料管中排出混凝土料，再流到模板边缘。用此法建成的许多隧道，其混凝土衬砌的质量都极好，证明了方法的实用性。用外部振动器可以提高表面的质量和密实度。模板上开孔后，可由此将插入式振动器放到混凝土里面。

混凝土的坍落度应选择得大一些，这样可增加泵送能力和浇注的和易性。混凝土搅拌厂所采用的坍落度，应能保证运到浇注现场仍有100~200mm的坍落度，这一要求可以靠加进掺合剂和粉煤灰来达到。选择坍落度时应考虑到混凝土运送的距离、系统之间的转运次数，高压输送时材料的性能以及模板后面支护构件和钢筋的阻塞情况。具有配筋量大和重型或密排的支护构件的衬砌中，骨料的最大尺寸应减小。

在混凝土衬砌中一般不需要配筋，尤其在稳定地层条件下。设计者应估计在什么情况下需要配置钢筋，并确定出钢筋的正确位置，以减少对浇注混凝土的影响。

圆形断面混凝土衬砌时常不设纵向施工缝而整体浇注。但在特长的隧道或其它特殊条件下也可以设置施工缝，这样做可能更合理些。灌注混凝土的次序最好是先边墙和拱圈后

仰拱。在大直径隧道中，这种灌注次序可以不必移动运输轨道，并使向前开挖和灌注边墙与拱圈同时进行。

当仰拱与边墙、拱圈分开浇注时，灌注仰拱混凝土最实用的方法就是采用混凝土输送器或直接由搅拌车供料。灌注扁平形的仰拱已经采用了泵送混凝土，但对于圆形隧道的仰拱，因泵送混凝土坍落度比较大，不能适应大曲率表面整平的要求。

对于边墙和拱圈混凝土脱模时间的限制，若过分保守势必将增大造价，因为脱模时间过长就需要用较多的模板。多余的模板增加了投资，增加了安装与拆卸模板的劳动力和搬运费用。混凝土浇注后达到衬砌稳定所需的最小时间通常相当于混凝土达到最小抗压强度 $4.2\sim 5.5\text{MPa}$ 所需的时间，一般在混凝土浇注后 $8\sim 10\text{h}$ 即可达到这个强度，因而可以在灌注后大约 8h 开始拆模。

4.1.3 止水带和施工缝

在结硬过程中，混凝土衬砌由于水化热而发生膨胀，而后再因冷却而产生收缩和裂缝。上述情况是隧道混凝土的普遍规律，设计者应注意这种情况。混凝土衬砌的这种收缩裂缝通常会降低止水效果，无法控制渗漏。在水泥中掺入粉煤灰后，减少了水化热因而可减少裂缝数量，另一个附带的优点是粉煤灰能增加混凝土的可塑性。

经过妥善清洗和加强的径向施工缝在结构上是比较合理的。采用倾斜的施工缝可以不用全长的挡板，因而不必严格限制灌注的体积，这将提高灌注混凝土的效率，也是一种节约措施。在整体灌注的衬砌中，建议采用一种高度足以保证正常封闭和接缝位置的短挡板放在仰拱模板的下面。

4.1.4 容许误差

建造一个断面略大的隧道通常比建造一个断面虽然比较小但精度要求很高的隧道来得经济。在一般情况下，衬砌尺寸的最小容许误差应该和运营标准相一致。确定这些值时必须考虑所采用的施工机具，例如，用全断面隧道掘进机开挖时，隧道衬砌的容许误差应尽量接近机械操作的公差。掘进机的操作公差，在30m的长度上，对理论值的最大偏差：中线的水平容许 $\pm 75\text{mm}$ ，左右容许 $\pm 300\text{mm}$ 。平面和竖向曲线的半径应尽可能的大，以方便开挖和衬砌施工。直径约为6m的隧道，如采用全断面掘进机开挖，其最小的曲线半径一般约在122~137m之间。

灌注曲线上的衬砌经常利用直线段的模板和一些楔形段，使灌好的混凝土衬砌成为折线形的并和掘进轴线相配合。弦线段衬砌侵入理论净空线的可能性应仔细地从施工实际和造价限制上来考虑。弦线段的最大实际长度大约为曲线半径的十分之一。对于一个120m半径的曲线，则弦段长度宜为12m，通常被认为这是伸缩式模板台车的最大实际长度。

4.1.5 特殊结构

水力上的复杂结构，可能要进行试验室研究或计算机模拟，应该审核它与施工方法的关系，对于那些有利于施工的修改设计应予以研究，表面翘曲和横断面变化等特殊形状应尽可能避免。

4.2 合同实施

隧道工程本来是一个无法预言和不能确定的活动过程，

地下情况不能在工程竣工前彻底了解。因此隧道承包商必须估计到它的风险并提高了造价，即使如此，承包商仍时常遇到事先无法预料的问题。当然承包商必然试图要获得克服这些问题所需的费用，在许多常见的施工合同案例中，这个问题常引起业主和承包商之间的争议，它的结果可能需要化费昂贵的诉讼费用。同时，业主和承包商都分散精力去设法保护本身的合法地位，则工程将受到更大的损失，并且造价也要成倍地提高。

合同中应该鼓励与隧道工程项目有关的单位共同承担风险。对于改进签订合同的方法已有很多公布的文件，包括解决地下工程争议的程序（合同实施分委员会1977），施工风险的责任和义务调查研究（职责、义务和施工中风险责任委员会1978），对管理的建议（重大地下工程管理分委员会1978，城市工程项目管理委员会1980）。合同实施分委员会（1974）完成的一项研究对美国的工程界特别重要，其中提出了17个专门的建议，业主和设计者应该考虑这些建议。若干极为有利的合同措施分以下标题讨论。

4.2.1 有关现场条件改变的条款

这个条款按美国政府合同型式规定，当遭遇到的地下或隐藏的真实情况，在合同中没有表明，或者与合同中指明的条件不同时，可以对合同价值进行合理的调整。其目的就是为了避免承包商将可能发生事故所造成的损失预先计入到报价中，因而减少项目的总投资。

4.2.2 地质报告

有预见的投标者应该做出有关地下资料的完整报告，这种报告应该协调和集中在两个报告或一个报告的两节或二本

中，包括：1) 地质勘察的结果，2) 设计的岩土技术依据。在实施过程中，对报告的格式或它在合同中的地位可能会存在不同意见，故现在倾向于将上述内容归纳为具有实际资料的全面勘察报告以及由此得出的土工技术说明两个方面。若合同文件中包括了这两部分内容将是十分有益的。其它所有的地下资料和有关数据都被列成表格，供有预见的投标者作参考。设计方面的内容是说明合同中指出的地下条件以及地下条件改变等有关条款的工具。仔细做好准备工作，会提高承包商和工地工程师的判断力，应该阻止在改变现场条件上的无效争论，而应促进获得一个合理的估计。

4.2.3 争议评论委员会

当工程刚开始时应创立一个争议评论委员会。这个委员会由三个高级成员组成，一个由业主指定，一个由承包商指定，另一个由他们双方以外的人担任。每个成员为三方合同之一，即本人、业主和承包商。最好由业主和承包商共同平均分担委员会每一成员的报酬。委员会定期地视察现场工作，并同等对待发生的重大事件。如果工地一级不能解决争议，则委员会能迅速和有效地确定。尽管它的建议不是强制的，但它会得到合同各方的重视。如果事后发生仲裁或诉讼，委员会的报告可作为证据。这种委员会最适宜于大型工程，而且预期施工时会遇到困难或无法进行详细地质勘察。当许多工程的现场条件相对讲较易确定时，就可能不一定需要。

4.2.4 证明文件

由于附加任务、工作量变化和现场条件改变等问题都需要合理调整价格，所以，承包商具有详细的分项投标概算是有

益的。然后，在原来建议相同的基础上，调整总部办公室的管理费、间接费、设备负荷等及其它所需费用。每个投标者必须在投标之外另行密封提交这些数据。在裁决时，中标者的上述这些证明文件，当着他的面再次审阅后再密封起来。此后，需估算调整价格时，必需在双方都在场时，才能拿出来看。应该清楚地懂得不能利用证明文件内任何内容去取消或修改合同文件中的任何要求或措施。由于证明文件也同样代表了承包商的最初思想，譬如工程如何进行等，而且也有业主的预测，为了进行比较是有价值的。

4.3 技术要求

技术要求是设计的根据，应该和施工可能性评价平行发展。隧道工程的技术要求是特殊的，和地面结构的技术要求有所不同，应该由具有地下工程知识的人员制定，并经隧道施工工程师，最好包括代表业主的监察工程师审阅。投标文件分发给未来的投标者们之后，对于投标者的询问和投标前的谈判，应该给予足够的时间和安排。

4.3.1 技术要求的一般形式

施工技术要求协会（1975）考虑二种基本技术要求：指定的技术要求和执行的技术要求。指定的技术要求规定材料、构件和最后产品的有关性能，以及生产或施工所要求的方法。执行的技术要求描述需要的成果、对上述标准的检验和施工中可能活动的余地。

设计师很少可能按照一种技术要求去说明所有的意图，因此他必须仔细地考虑每个施工特征去挑选和综合不同的技术要求。在隧道工程中，一般来说，执行的技术要求优先于指定的技术要求。地面建筑的技术要求不应该照搬，只有那

些与隧道工程方法相一致的部分才可采用。

4.3.2 专门考虑的问题

在研究制订技术要求时，有以下若干方面应该考虑，现简短地分以下标题进行讨论。

4.3.2.1 安 全

施工安全措施应该由承包商负责，也必须符合联邦、州和地方的规定。

4.3.2.2 施工容许误差

容许误差如果太严格则造价会成倍地增加。影响容许误差的两个主要的因素是：1) 运营标准中规定的衬砌内部尺寸，2) 施工方法，包括开挖和支护方法。正像本章前面讨论的，用全断面隧道掘进机开挖时，距离超过30m，其轴线偏离误差为 $\pm 30\text{mm}$ ，这是不奇怪的。这种偏离比混凝土浇注的相应的误差要大4~5倍左右，故一般由它控制衬砌施工的误差。在采用盾构或隧道掘进机施工时，开挖直径应稍大于隧道内部尺寸加上衬砌厚度。将内部尺寸比理论上需要的内径增大150mm，这样就可以不用专门的校正措施来调整较小的轴线偏移。这些措施包括修改开挖轴线（如果可能）和局部性的二次开挖。

4.3.2.3 初 始 支 护

通常承包商应该确定初始支护的型式和数量，但下述情况例外：当初始支护被设计成永久衬砌的一个组成部分或在工程范围之外，为弥补支撑不足时的措施。

4.3.2.4 混凝土配合比设计

混凝土配合比的设计应该考虑到混凝土的运输方法、转运次数、浇注顺序、设备以及和易性等因素，同时，也应考虑到衬砌中需要设置钢筋的密度。地面工程的配合比设计通常不能用于地下工程，地面结构中坍落度通常是38~76mm，而地下工程中运到浇注现场的坍落度通常是100mm。当掺入粉煤灰或超强增塑剂时宜采用比较高的坍落度。应考虑混凝土配合的执行技术要求，它受砂石料质量的控制。业主应给予承包商最大的灵活性以确保产品质量，从这点来说，指定的技术要求是必要的。

4.3.2.5 浇注的准备工作

混凝土运送的转运次数对造价有重要影响。在这方面必需有指定的技术要求，这样可以充分避免工地及检查人员含糊不清的结论。足够的溜槽和水管是浇注结构坚固的混凝土衬砌所必需的。工程中可以采用按所费时间和材料为基础的单独立款项目，以促进上述要求的实现。

4.3.2.6 混凝土浇注

应给承包商以机会，用来制订和说明混凝土浇注的方法，因此，这种作业的技术要求应当尽可能详细。

4.3.2.7 施工接缝

衬砌接缝的位置和方向，除了某些为结构要求而指定的以外，应该委托给承包商处理。设置接缝的方法应该详细说明。用压缩空气或水清除浮浆和凿毛接缝，通常是适当的处理施工缝的方法。

4.3.2.8 模 板 拆 除

总的来说拆卸模板的决策权包括从混凝土浇注到开始拆模的时间应该授予承包商，因此承包商担负由于拆模而发生的事故或检修的义务。

4.3.2.9 混凝土养护

混凝土养护程序对地面结构有详细规定，而隧道衬砌通常不需要。因为隧道的周围环境一般比较冷和潮湿，只要规定在模板拆除后的特定期限内，能保持此潮湿条件就足够了，通常不需要采取任何专门的措施。

4.3.2.10 灌 浆

为了确保拱顶上方能和周围地层全面接触，对拱部进行压浆是必要的。需有指定的技术要求，灌浆孔选择和灌浆次序应根据现场灌浆情况进行调整。

4.3.2.11 渗 漏

一个很重要的工程质量指标是渗漏问题，渗漏的容许值应由业主确定。制定渗漏标准所考虑的因素在第六章中讨论，量测的实例和规定的渗漏速率在附录C中。如果存在困难的地质条件，需要采取特殊的压浆或其它防水措施，可以按所费时间和材料计算费用，并采取临时付款的方法处理。

5. 地 质 勘 察

地质勘察在隧道衬砌设计中起着极其重要的作用，它给设计师提供地层、土壤和岩石的特性，用以判断荷载和地层-衬砌的相互作用。它也能提供决定施工程序的资料，地下水短期和长期的情况、开挖隧道对邻近结构的影响等。地质勘察所提供的数据对隧道工程项目的所有阶段都是有用的。

设计师应该了解和地下施工特别有关的领域，因而尽力进行现场调查，以提供适应于地下情况和专门施工措施的数据。地质勘察的结果包括现场的和室内的试验数据，应该概括成一个清晰的综合报告。根据地质勘察，设计师和地质工程师需要提出一份解释报告，综合地预测隧道工程条件和选择永久衬砌。

5.1 特别关心的领域

表5.1汇总了隧道工程地质勘察特别关心的领域。如表所示认为土工数据应给三个主要领域提供信息，包括1) 规划、设计和合同文件；2) 施工方法；3) 隧道工程对邻近结构和周围环境的影响。规划阶段的主要问题为隧道线路、纵断面和横断面的选择。衬砌设计需要估算地层荷载、地层-衬砌相互作用和地下水对衬砌长期性能的影响。地质资料作为选择施工方法的基础，并据以设计与隧道工程技术和临时支护相应的永久衬砌。设计者和施工者必须考虑第三方面的利益，设法采取措施使建造隧道对邻近结构物、地下水和总

体环境的影响减至最小。

隧道工程地质勘察特别关心的领域

表5.1

规划、设计、合同文件的制订	
隧道定线和纵断面选择	<ul style="list-style-type: none"> • 地下总体条件 • 大的不连续性，接触带、不整合性 • 邻近建筑物和地下设施
隧道地层特性预测	<ul style="list-style-type: none"> • 土壤或岩石的分类与性能 • 地层荷载、稳定性和变形 • 渗透性、地下水流速 • 节理、断面擦痕、剪切和断层
隧道横断面和衬砌的选择	<ul style="list-style-type: none"> • 衬砌和地层的相对刚度 • 顶部、仰拱和边墙的稳定性和 • 地层结构对洞室形状的影响 • 原始应力与隧道定向的关系
决定水压阻力或卸荷	<ul style="list-style-type: none"> • 地下水的数量和质量 • 不透水性-特殊表面渗漏检验 • 腐蚀、沉淀、细屑的充填
施 工 方 法	
开挖和清渣	<ul style="list-style-type: none"> • 地层结构和岩石硬度的变化，软地层中障碍物和粘结性 • 水的影响、污染、溶解
地层稳定性	<ul style="list-style-type: none"> • 固有稳定性和壁立时间 • 灌浆或冻结的渗透性和适用性 • 压缩空气可能喷出的危险
地下水问题	<ul style="list-style-type: none"> • 数量和流动集合 • 流砂和管涌 • 需要控制措施：降水、压缩空气、灌浆
地层条件的变化	<ul style="list-style-type: none"> • 平均条件的变化，地层变更，接触面高度的变动 • 不连续面和断层的数量和方位。 • 混合面的情况

续上表

对邻近结构物和环境的影响	
危险条件	<ul style="list-style-type: none"> • 突然下沉，流砂或土层流动。 • 炸药和毒气。 • 侵蚀性的土壤或地下水。 • 由废弃的溶剂、渗漏的石油、化学物和污水引起的地层浸透 • 污染的隧道弃渣。
邻近结构物的影响	<ul style="list-style-type: none"> • 隧道开挖、固结和爆炸震动引起的地层损失 • 市政管线路的干扰或引起的断裂。
地下水状态的变化	<ul style="list-style-type: none"> • 对农作物、水井和自然植物的影响。 • 降水引起的大面积固结。 • 地下水位长期变化。

对于岩石隧道，地层条件的描述应包括：岩石的覆盖层、风化和变质程度、节理型式等资料，以估计坑道的稳定性和判断各种开挖方式和支护措施的可行性。软土地层条件的描述应包括每一个主要层次的深度、水位和土层分类的一般描述。主要的问题是把性质类似的地层和本质上不同的地层区别开来。室内试验应能得到充足的数据以核实或修正现场描述，并获得基本工程特性和估计稳定性。

按照自然和人为的原因去区分潜在的危险。自然危险指有毒的和爆炸性气体及大量的地下水流。人为的危险包括溶剂、石油、化学废料、污水和埋没或废弃的结构物。通常在城市工程中，人为的危险是最可能遇到的。

隧道工程师的职责中最好包括对地层条件的描述，尤其对可能不稳定的地层。Terzaghi(1946)和Heuer(1974)都讨论过这个问题，这对在施工期间处理所遇到的危险是有益的。

5.2 勘察方法

地质勘察方法已经在各种出版的刊物中讨论过，包括普通的教科书（例如Tergaghi和Peck 1968, Sovero 1979），专门的学术论文（例如Hvorsleer 1948, Mitchell 1978, Kulhawy等1983）和美国土木工程师学会发表的实用手册（地下调查研究委员会1976）。专门从事隧道工程的调查研究，有Hampton Mel usker和Essex(1980)，Thompson等（1981）的工作，提供调查技术的综合处理方法已超出本书范围，读者可在其它刊物上寻求附加信息。常规的调查研究程序应是勘察、钻孔位置、专门的勘察和室内试验，下面就每个方面进行简短的讨论。

5.2.1 勘察

勘察包括评价区域性地质、地方建筑物、规范的历史资料和初步场址选择。重要的原始资料包括地质和地形图、出版的报告和论文、地下水研究、井眼记录及他人的钻孔调查研究。首先要对本地区地质的主要特征进行有用的说明，否则面对大量细节资料，有可能把有关工程的重要资料忽略掉。地层种类应根据其成因和局部组成的名字来鉴别，应当最大限度地利用背景参考材料，去描述地质年代和包括区域构造和总体线状构造在内的一般物理特征。

远距离的遥测、地面测量和构造测绘经常都是很有用的，历史记载特别有帮助尤其在市区环境中更是如此，包括早期表面地貌图、原有排水特征、以及诸如岸边结构、贮水池、管道等废弃的设施和残存地基。邻近结构物的资料包括业主及城市建筑管理机关拥有的结构平面图和显示现有公用事业设施位置的市政平面图。

5.2.2 钻 孔 程 序

钻孔勘测的程序应该与设计师的要求相协调，并由地质工程师掌握。布置钻孔方案之前，先绘出并评价他人的钻孔资料，美国试验与材料学会（ASTM）给出了钻孔取样和试验方法的标准（1983）。它包括麻花钻孔，对开式取样、薄壁原状取样、标准贯入度和野外十字板剪切试验。在土中要另加原位试验包括锥体贯入度和压力计试验。在岩石中包括各种岩芯取样和水力劈裂试验以确定原始应力，以及估计渗透性的水压试验。岩石中特殊钻孔方法有定向取样、钻孔摄影、气体监控和灌浆土样，以判断节理特性和小尺寸空隙的数量。钻孔还能提供地下水的必要资料，包括静止滞水层、自流水位和降落水位。在选定的钻孔中安装水压计，以确定初始条件和监测施工时地下水位的变化。

5.2.3 专 用 勘 探

现场抽水试验能提供关于排水和今后施工对局部地下水影响等有价值的数据。深坑试验能直接观察地下条件，并收集毛坯石或用人工开挖试样。在有基础和管线设施的地方可以采用浅试坑，以评价开挖隧道对它们的影响，监测危险状态时的位移和损坏，对于条件困难的较大工程，可利用探坑或隧道导洞、水平坑道和竖井进行勘探。在某些情况下，地球物理技术可用来探明介于钻孔之间的岩石覆盖层或应用这种技术于孔内以区分地层的类别。

5.2.4 室 内 试 验

美国试验与材料学会（ASTM）（1983）所提出的和国际岩石力学学会（1981）所建议的土和岩石室内试验的许多

标准方法都是很有用的。试验能够提供足够的数 据，以估计隧道开挖面土体的稳定性和相对自稳的时间。这些数据包括分类数据、粘土的不排水强度、砂的相对密度和级配。对判断粘土的超固结比和砂中粘结性的存在与程度都是很有用的。土样和地下水样的试验还可测到硫、碳酸盐、pH、硫酸盐和氯化物等的含量，以估计潜在的侵蚀性。在某些情况中，可用颗粒分析、压实试验以及对污染物和沥滤物的化学试验，来检验开挖的弃碴。

5.3 报 告

在调查研究中所提出的关于地下情况的数据，专业人员所加的说明以及基于这些数据所作的设计考虑，都应汇总在工程报告中。关于地下情况的调查研究和设计所需的土工基础资料常写成二部分或二卷本，这两部分内容的建议提纲示于表5.2及表5.3中。调查研究报告应包括组织成清楚条例的实际数据。

第二卷包括现场勘探的地质评定、土壤和岩石特性的估计、地质图和剖面图的解释以及依据实际数据分析面给出的设计与施工的推荐书。这个报告应该提出一个联系业主方面的地质工程师和隧道设计师之间的协作关系。报告应该汇集有关地层情况和性能、设计标准和关于施工程序的限制的说明。与施工方法有关的部分报告必须与承包商提交的图纸或工程提标建议中的规定和限制相一致。在这两部分内容中，应该将实际数据和意见以及说明分开来。设计报告应与最终的设计文件同时发表，并且应该精确地给出地下状况的基本说明而没有附加的臆能、引证或对地层特性作过份肯定的陈述。

A. 勘察和地质背景

- 根据地图、露头检验、地质背景材料鉴定和描述岩性和结构的单元。
- 列出有关地方的或区域性的地质、地下水的参考资料。

B. 钻孔岩芯记录、勘探和现场试验资料

- 由工地专业人员完成的岩芯记录或记录曲线包括各个深度上的定量数据，取样和回收。
- 钻孔和取样的方法和设备。
- 每一个土样或岩芯和全部地层的描述。
- 勘探期间的观察，有：钻进速率、钻孔中水的情况、钻头压力和每分钟转数。
- 水位量测：包括时间、日期和钻孔操作有关的资料、降雨量或地面水。
- 岩芯的专门详图：不连续面的特性、节理和断层产状、岩芯草图和岩芯照片（适宜时用彩色）。
- 原位试验数据：抽水或压实试验、地球物理试验、变形或强度试验。
- 有否孤石和其它障碍物。

C. 室内试验数据

- 说明试验程序的图表和数据，以及试验结果。
- 各种不同特性之间的相关性，例如砂的剪切强度和相对密度、单轴压缩强度和岩石指标性质等等。
- 按地层或岩性单元分类的土或岩石的性质。

d. 背景参考资料

- 技术参考文献编目。
- 相邻结构物、公用事业设施、原有工程情况的图纸和资料。
- 其它工程项目的钻孔和试验资料等的来源。
- 检查岩芯和土样的有效性。

5.4 报告的合同地位

上述建议的标准是切实可行的。但目前对报告的格式或它在合同中的地位存在不同的意见。一般倾向于全面列出实际资料以及由此得到的土工技术的说明，这两部分内容可作为投标者的情报，对投标者来说这些资料很全面，使用起来也很方便。在新近的一些工程项目中已将这两部分内容列入

合同文件，其结果是减少了诉讼的数量和范围。现在普遍地认为，否定土工数据的精度是不恰当的，它将使人产生误解而降低资料的价值，致使投标者可能不给它以应有的重视。

周围背景资料也是很重要的，例如别的工程所提供的土

土工技术说明报告资料

表5.3

<p>A. 地质和土工技术条件</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 有说明的地质图、横断面和土体剖面图，对现场和实验室调查研究已确定的主要地层进行分类并描述。 • 在设计中推荐和应用的地层综合性质。 • 根据土工技术说明得出的关于隧道工程条件的结论。
<p>B. 设计假定的说明</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 设计中采用的标准、假定、性质和限制。 • 技术要求的说明和对施工程序的限制。 • 承包商提供的关于临时支撑、围堰、生产图或工程投标价值的土工标准。

工数据，在施工中的邻近结构物的图纸、公用事业设施平面图、邻近基础的资料，人为制造的危险和预先存在的问题都应该精心地收集并列表加以说明。这些原始资料对投标者们的查阅是有用的。室内试验后保留的土样和岩芯有利于配合岩芯照片和草图进行观察，应该很好的编目，使投标者不过分耗费时间和精力而能清楚地鉴别和观察。

如果投标者利用了解释报告，则业主应承担一定的责任。当然，应由有隧道工程知识的专业人员进行调查研究，解释报告中应包括为地质工程师和设计师易懂的摘要，这些重要资料成为他们编制合同契书时的依据。如果采用这种做法，则业主在投标中由于降低了意外事故的费用而得到好处，但他必须分担由于现场条件可能改变而涉及的一部分风险。至于承包商的职责，应该熟悉作为合同契书的一部分的这个报告，包括实际的资料和关键说明两部分。他不应该事后否定这些资料，因这是认真制定的，对他来说也是便于使用的。

6. 水 的 影 响

水对隧道衬砌的影响可以根据三个条件来估计：1) 渗漏控制。2) 外水压的支挡。3) 内水压的限制。在这项工作中，渗漏控制是着重处理大气压下的隧道渗透问题，外渗问题主要在高压输水隧道中考虑。

6.1 渗漏的控制

渗漏可能会引起一系列的问题：地下水位的永久性下降。结构毁坏、影响使用、安全事故、建筑上的损坏以及增加抽水费用等。允许的渗漏极限值，必须在考虑所有潜在的困难、估计了各项费用和渗漏控制方法的实际限止后进行选择。一般来说，建造一座不渗水的隧道是不切实际的，大多数隧道运营时都有一定的漏水量，这些水被汇集后排出隧道。虽然连续抽水会使费用上升，但适当地采用抽水装置收集少量的渗水的确是有好处，而不应采用过份保守的渗漏标准，因为，这样做就必然要大大地提高造价。

隧道渗漏对邻近地区造成的后果将取决于土和岩石的特性，局部的水文情况以及地下水的利用情况，应该认识到渗漏路径可能是沿径向的，也可能是沿纵向的，渗漏量是有季节性的。在渗水较少的隧道中，或者地下水位的永久下降不会引起异议时，只要在隧道内给渗水以适当通道并加以收集就可以排掉。在特殊情况下，甚至少量渗漏也会导致麻烦。例如，挪威Oslo Frogner车站的渗漏造成软粘土中地下水压力的降低 (Karlsrud和Sander 1978)并引起150~200mm

的固结沉降。同样地,斯德哥尔摩地下铁道Gömmarbacken隧道的渗漏,影响了当地一家啤酒厂的水源供应,不得不采取一项专门的灌浆措施以填补隧道拱部破裂透水的岩石(Rosell等1976)。埋置于易受侵蚀的粉状土中的隧道,长期的渗漏会把土带进隧道,最终将削弱对衬砌的侧向支撑。

在局部或区域性的地下水位下降的地方,要探讨这种低水位的持久性问题。例如,纽约地下铁道的某些隧道是没有仰拱的,它们在标准的渗水条件下运营多年。后来由于土地利用和水源管理政策改变,引起地下水位上升,导致了隧道拦截水量的大量增加。

水的渗漏可能导致结构毁坏并影响使用。尤其在铁路和公路隧道中,使用电力会使这个问题更加复杂化,因为杂散电流会沿着水和潮湿的通路循环,所以在这些部位电蚀加剧了。应当考虑截流和收集渗漏水,并使其远离电力装置。

在某些情况下,水的渗漏会给通过隧道的车辆和行人造成不安全的条件,不应使公路隧道和交通隧道产生结冰现象,在公共汽车站和步行隧道中人行道不应过份潮湿。水的渗漏经常引起表面装修的褪色和污染。在人流集中和客流繁忙的地方更需特别注意。

水泵的长期使用和维修费用取决于水量,水的化学成份,砂土含量以及从轨道和路面冲走的粉末和岩屑量。应该特别注意地下水的化学成份,高浓度的钙、铁氢氧化物会使水泵和排水管堵塞。含有硫酸盐的地下水对混凝土衬砌有很大的破坏作用。有些隧道会在废弃的化学设备下穿过,从这些设备中可能渗出酸性或易燃液体,造成施工和长期安全事故。

选择渗漏标准主要取决于隧道的用途,进行防水的费用以及对漏水的长期维修费。表6.1汇总了不同类型隧道的一

些主要考虑。对于地下铁道车站，其渗漏标准一般都非常严格，因为潮湿会使建筑饰面产生斑点和褪色。采用离壁式的内隔墙可能是车站和人行隧道控制渗漏的一项有效措施。污水隧道的运营可能会受到地方、州或联邦政府根据处理费而规定的渗漏标准的影响。在雨季污水隧道有时会受到高内水压力的作用，应该估计到由于内水压力的临时增加而造成的外渗问题。

各类隧道考虑渗漏情况的概要

表6.1

隧 道 类 型	关于隧道渗漏的考虑
高速运输隧道	需要估计侵蚀。钢轨、轨道扣件、木枕、列车控制和信号装置、金属设备、电力装置以及钢筋混凝土可能产生的损坏。渗漏控制的初期费用必须与长期维修费用相比较。
地下铁道车站人行通道	避免潮湿斑点。截断人行道表面的水滴，保持路面清洁。对表面装饰的褪色和污蚀加以严格限制。
公路隧道	需要将交通事故减到最低限度。保持清晰的能见度和清洁的路面，避免结冰。由车辆运进水并定期喷洒冲洗内部路面。排水系统的能力通常由消防水标准控制。
输水隧道	污水隧道的渗透率常由联邦和州的立法规定，在雨季，隧道会受到内压的影响，在内压情况下应该计算外渗的问题。
电 缆	在连接电缆时必须临时控制渗漏，对仰拱的允许渗漏率常常比拱顶的大。

附录C简述了几座隧道中记录到的渗漏率，并列出了高速运输和污水传送系统的规定，还讨论了获取上述渗漏率的条件和渗漏规定的来源。

在规定允许的渗漏标准时，设计者必须同时考虑选择什么方法来限制渗漏，有五种控制渗漏的方法：1) 排水；2) 灌浆；3) 止水带和密封垫；4) 密封剂；5) 不透水膜。表6.2列出各种控制措施、设备和材料，以及各种方法

渗漏控制措施概要*

表6.2

控制措施	设备和材料	特殊的考虑
<u>排水</u> 在隧道周围截流 在隧道内集水 压力释放系统	仰拱排水管 管 道 海 器 外趾排水管	排水管应该设计成能抗淤集和化学沉淀。 应该做好清洗和维修的预防措施。
<u>灌 浆</u> 土、岩石节理和剪切区的封蔽灌浆 管片衬砌背后的接触灌浆 现浇混凝土衬砌背后接触灌浆	水-水泥 水、水泥、砂、粉煤灰或膨润土的混合物 硅酸盐类灰浆酚醛塑料树脂木质素类浆液 丙烯酰胺浆液	在衬砌安装后进行封蔽灌浆效果更佳，它可防止浆液倒流入隧道。 需要特别注意岩石与初期拱肋-衬板支护间的接触灌浆。 防止地层损失的环境灌浆还可以帮助控制渗漏。
<u>止水带和密封垫</u> 现浇混凝土接头处的止水带 衬砌管片上的密封垫 圈	橡胶和PVC止水带 刚性和柔性金属止水带 刚性丁基橡胶或聚合物衬垫 浸渍防腐软木衬垫 柔性聚合物衬垫	止水带的接头可能是长期渗水的地方。 密封垫要求严格的造型控制，并可能降低混凝土管片的接头强度。
<u>密封剂</u> 填缝混合物 注入液体	铅 水泥类材料 聚合物	填缝沟槽和注入口可能控制衬砌厚度。
<u>防水膜</u> 和岩石接触的防水膜 初期支护和久永衬砌之间的防水膜	PVC板 乳化沥青 丁基橡胶	隔膜是娇气的，需要仔细的敷设工艺。

* 参考永久水控制措施。

需要特殊考虑的问题。对于同一个衬砌常常会同时采用二种

或更多的方法。表中涉及的是永久控制措施，并不是专为施工或维修中临时排水而提供的。

在压缩空气下或在排水土层中砌筑衬砌时。大部份的渗漏一直要到压缩空气或排水停止时才会发生。在正常情况下，需要最后调整和重新密封，但其效果要到断面最终稳定后才会知道。在这些情况下，可能需要在内部使用密封剂（即用铅或石棉水泥填缝和尽可能的环氧注射灌浆），以实现可能的防水，尤其对装配式衬砌来说更是如此。

常常采用钢筋来控制收缩，以限制衬砌中裂缝的大小和分布。即使有了钢筋，也会发生体积改变，故还应预料到会出现某些裂缝和渗漏。现浇混凝土衬砌接头中的止水带不能防止接头间收缩引起的渗漏。的确，止水带常常就是集中渗漏的位置，主要原因在于止水材料的长期老化或止水带周围混凝土填充不实和质量较差。

渗漏控制措施的综合讨论超出本指南的范围，其它资料可以从Birkmyer(1978)、Craig和Muir Wood(1978)，施工工业研究和情报协会（1979）以及ACI委员会504(1982)等的报告中获得。

6.2 外水压力的支挡

在地下水位以下的透水土中，例如砂和砾石，衬砌设计考虑全部静水压力以及土的有效应力。在粘性的相对不透水的土中，衬砌弯矩和推力可以根据第三章叙述的原则按全应力条件估计。

水压对岩石中衬砌的作用取决于衬砌和围岩之间的相对渗透性。一般讲，混凝土能产生足够的渗漏，从而在岩体中形成水流，并相应地减小了衬砌外表面的外压力。依靠压力灌浆堵塞渗漏通道的方法还会封闭岩石中的其它水源，因而

降低了邻近地层的水流量和缩小了与水压接触面积。在这些条件下，在衬砌上形成全部静水压力是非常困难的。如果水压局部突变，衬砌就会发生微小的变形和裂缝以释放这一压力。在高透水的岩石中，如具有连通溶洞的石灰岩或白云岩，一般需采用专门的灌浆措施来减少水流一直达到允许渗漏量为止。

在许多情况下，都不需要将岩石隧道的混凝土衬砌设计成能抵抗全部外静水压力。同时，也不需要解除静水压力或提供外部排水条件，除非希望水能渗透过衬砌，或在外部排水系统中收集地下水源。

隧道形状对于外水压力造成的衬砌应力有很大的影响，静水荷载产生在圆形隧道衬砌的弯矩仅取决于拱顶和仰拱之间的高程差，在圆形衬砌中水压力引起的推力甚至可以抵消弯曲拉应力而增加衬砌承载能力。

如果岩石隧道的底板置于透水材料（如干净的隧道弃碴或砾石）之上，那么，通过这种介质的水流能够在某些降坡点上产生很大的压力，在这种情况下，仰拱就应按此压力进行设计。若将这些干净的石碴用不透水材料断断续续地隔开则可防止高压的聚积，或者设置一些泄水孔将水引入隧道而减轻外水压力。

承受很高的内水压力的隧道是个特殊问题，因混凝土衬砌并不是绝对不透水的，少量的外渗就能形成一个与内压基本平衡的外孔隙压力。对于紧贴岩石的衬砌，若隧道突然放水，几乎不会产生有害的影响。然而，若底板是在完整而干净的岩石上，隧道突然放水就可能引起底板开裂，因为此时外水压力很高，而靠通过混凝土的渗漏来降低外水压又很慢。为了避免出现这类问题，应采用曲线型的仰拱。采用钢衬砌时则应有刚性支承环，以防止隧道突然放水，外压过高

而造成的破坏。

6.3 内水压力的限制

内水压力使隧道衬砌向围岩方向膨胀，直到内力被外荷载和隧道衬砌中的拉应力所平衡，若这种膨胀足够大，就会使混凝土衬砌开裂，导致隧道漏水。在有些情况下，渗漏仅造成水的流失而无其它不利影响。但在另外一些情况下，水对邻近地层的侵蚀会使它发生结构性的破坏。因此，按内水压力进行设计时必须注重于控制或消除渗漏的措施。因为混凝土衬砌在养护和以后冷却过程中会收缩和开裂，所以，设计中的另一个主要问题就是计算为了控制开裂，和使渗漏降到允许水平时所需的钢筋量。

如果岩石的法向地层压力（总应力）等于或大于隧道的内水压力，那么膨胀量主要为岩石的弹性体积模量所控制。在具有很高模量的岩石如完整的花岗岩中，压力隧道的混凝土衬砌可以不需要配筋。在具有低模量的岩石中，无筋衬砌的变形可能很大以致产生不允许的裂缝。某些凝灰质围岩不仅弹模低，而且会发生蠕变。在这种围岩中的一些压力隧道的无筋衬砌，已经产生很大的裂缝，甚至发展到隧道完全不能使用。在主要用钢筋来控制渗漏时，对钢筋应变的限制应比对应力的限制更严格些。

如果作用于隧道衬砌上的外静水压力等于或大于内压力，那么只要在隧道使用期间外压能维持在一个适当的水平，就不应该有什么问题。如果法向土压力小于隧道的内压，那么内力自然会抬起上覆地层。如果此时的衬砌是无筋的，只有依靠上覆地层的抗剪强度来阻止彻底破坏。对这种情况，除了围岩的质量极好，否则就需要慎重地使用足够受拉钢筋以弥补土压力的不足。

在有些情况下，不允许有渗漏。如发电厂附近的高压渗漏可能导致灾难性的侵蚀和淹没。在相对浅埋的倾斜输水隧道中，显著的渗漏能增加地下水压力以触发崩塌。在这种情况下，可采用钢衬砌并用混凝土回填密实，这样的隧道是不透水的。在低或中等模量的岩石中，钢衬砌按全部内压力进行设计。对于高模量的岩石，只要将洞口向内延伸 1~5 个隧道直径这段距离的钢衬砌按全部静水压力设计，而超出这个范围的钢衬砌即可按岩石-衬砌共同作用来进行设计，允许衬砌与围岩和混凝土回填层共同承受内水压力。

岩石锚杆和灌浆可以改善岩体的模量。岩石锚杆包括全长粘结、预应力受拉锚杆或岩石销钉几种，这些锚杆在紧跟开挖面后安装是最有效的。经过混凝土衬砌的压力灌浆可以增加衬砌与岩石间的接触，尤其在拱顶。它还可提高作用于衬砌的外压力，因而减少内压作用的变形。但应强调灌浆产生的压力只在离开灌注点有限距离内是有效的，而且持续时间也可能较短。一般讲，不能依赖灌浆来代替衬砌配筋。但灌浆可以用来补充衬砌配筋和改善岩体的质量，这项技术已为欧洲和南非的压力隧道的成功应用所证实。

压力隧道的断面主要是圆形的，虽然其它曲线形式的断面和改进的马蹄形有时也使用，具有直边墙或平地板的断面应该很小心地使用。

压力隧道衬砌可以用弹性或弹塑性的封闭解进行分析（例如 Egan 1950, Obert 和 Dural 1967, Hendron 和 Aiyer 1972, 美国陆军工兵部队 1978），分析应该考虑岩石和衬砌的相互作用以节省钢筋用量。岩石的体积模量应该妥善地进行选择，以考虑原位岩体的岩性与实验室岩样试验中所获得的岩性之间的差别。

7. 观测程序

隧道施工期间的观测要达到几个重要目的,如预测稳定性,将观测到的性能外推到未开挖的断面,提供作为与地层条件和施工过程有关的隧道性态记录文件。观察和量测能提供有价值的数 据,以验证设计假定,改进地层特性的和地层-衬砌相互作用的模型,这对大型项目是非常有益的,其结果可直接用于后续衬砌管段的设计。

7.1 观测和测试

观测和测试必须加以区别, Pack (1972) 指出观测是一个广义词,一般包括测试。即使具备最完善的仪器,也需要对仪表读数有良好的观测。在观测过程中,应该把重点放在地层条件和施工措施的直接视觉鉴别和细微记录上,并力求详细。

隧道工程的观测程序可分成三部分: 1) 初步观测; 2) 仪表测试。初步观测都是直接,顶多用手持仪表进行的,表7.1简列了地下施工期间所获得的一些初步观测。初步观测可由测试予以补充。专门的仪表可用来量测初始支护和永久衬砌或远处的小位移和应力或荷载的变化。可供使用的仪器很多, Schmidt和Dunnicliff (1974)、Cording等 (1975) 以及 Thompson等 (1983) 叙述过这些仪器在隧道工程中的应用情况。表7.2简列了一些仪表和相应的量测。

不论是否要进行测试,都应进行初步观测。初步观测可以核对所遇地层的条件和提供隧道施工的一般记录。目测检

查也能部分地证实衬砌结构的完整性，渗漏标准亦可根据水流量测来确定。初步观测是评价承包商的要求和解决合同争端的主要方法。

7.2 测试的应用

隧道中的测试能使工程降低造价，所测数据将对现代技术的发展做出真正的贡献。Lane (1975, 1977) 已经总结了50个实例来说明测试所做出的贡献和降低造价的情况。但是，毫无目的测试反而会造成浪费。任何观测程序（其中包括范围广泛的测试），其关键问题是观测结果应能反馈于修改设计或施工决策。若某项隧道工程的性质决定了它的后续施工过程不可能有所改善，那么，就不必再去进行测试。

隧道工程初步观测概要

表7.1

被观测的主要目标	说 明
土和岩石特性	对土的观测包括类型、颜色、密实度、粒径特性和近似的自稳时间。结构特征如裂隙等也是很重要的。对岩石的观测包括不连续面和剪切区的类型和位置，以及它们相对隧道的方位、风化程度、溶洞、岩石类型、近似的硬度、不同岩层的位置和厚度。
地下水	进水位置和近似速率。从隧道中抽取或流出的总水量记录。
开 挖	严重破碎岩石的分布和数量。土的流失和局部剥落。在软粘土或流砂等极其困难的条件下，计算盾构法隧道每次推进的出碴量可以帮助估计土层损失和局部扰动。测站和机器上生产记录表的读数可以估计隧道掘进机的推进速度。根据刀具的更换情况以评价岩石中隧道机械开挖的难易。
支 护 灌 浆	初始支护的类型和数量，注意需要增加支护数量或按装困难的地方，说明和描述支护的局部变形。类型、数量、位置、泵送速度以及灌注压力。

对于衬砌设计者而言，重要的是要了解地层荷载和地层

与衬砌相互作用的假定是否符合实际。这两个问题都与施工过程和地层条件有关，但在提出假定时，施工过程和地层条件都还不能确切地知道，涉及衬砌设计的观测程序的基本目的就是要确定整个施工中遇到的地层条件是否与设计时所假定的相符。

隧道工程测试内容一览表

表7.2

量 测	合 适 的 测 试 仪 器 类 型
垂直位移	<ul style="list-style-type: none"> • 表面测点的光学水准测量 • 电动沉降盒 • 套管式倾斜仪 • 钻孔伸长仪
水平位移	<ul style="list-style-type: none"> • 倾斜仪 • 钻孔伸长仪
衬砌横截面变形	<ul style="list-style-type: none"> • 卷尺收敛计 • 杆式收敛计
初期支护和永久衬砌的荷载和应力	<ul style="list-style-type: none"> • 可粘、可焊、振动式金属丝应变片 • 荷载压力盒
地下水位和压力	<ul style="list-style-type: none"> • 露天观测井 • 密闭式竖管测压计 • 气压式振动金属丝和电阻式测压计
建筑物响应	<ul style="list-style-type: none"> • 光学测量 • 倾侧仪 • 卷尺收敛计 • 工程地震仪

隧道衬砌所用的测试仪器可有贴在钢构件上或埋入混凝土中的应变片，温度探头，量测内部净空形状变化的卷式或杆式收敛计以及量测衬砌和地层位移的钻孔伸长仪。应变片一般能可靠地量测某点应变，但当整个衬砌的应变图有很大变化时，难以将其转化成应力。此外，温度的改变（包括混

凝土的水化热) 会在衬砌局部地方产生很大应变, 衬砌背后的灌浆以及由收缩而不是由地层荷载也会引起衬砌的开裂。因此, 衬砌特性的最完整描述只有通过地层和衬砌的变形量测才能获得。

衬砌测试程序还包含大量平行的测试工作。埋入试件中, 尤其是浇注在隧道衬砌内的元件, 有助于为所采用的混凝土或喷射混凝土建立零读数。温度探头用来预测元件对气化热的反应。室内试验能提供时间效应的强度和模量改变的数据, 所以, 混凝土和喷射混凝土中的测试读数就能够根据相应的材料性质予以解释。

在下述条件下进行施工测试将是很有益的: 1) 地质条件差; 2) 大断面; 3) 交叉、重叠、平行和相交隧道; 4) 附近有结构物。所有这些条件中, 很差的地质条件通常是设计者遇到的最棘手的问题。

隧道施工是一个动态过程, 施工过程中地层和隧道结构的性质都会改变。因此, 在困难条件下, 对地层和衬砌性质的变化加以监测是很有用的。在一些项目中, “观测” 已成为整个施工方案的一个主要部分。建造在挤压地层中的 Tauern 和 Arlberg 隧道 (Steiner, Einstein 和 Azzouz, 1980), 对于喷射混凝土和岩石锚杆支护的需要量采用收敛量测方法估计。现场量测是选择支护量和类型, 判断开挖面何时稳定的依据。观测和施工的这种结合, 在隧道施工过程中并不是唯一不变的, 因观测方法有系统的和灵敏的适应性。

在城市范围进行地下施工非常需要预测邻近结构物是怎样受地层运动和爆破的影响的, 这种预测一般讲通过测试就能实现。的确, 测试常常是靠近结构物隧道施工的先决条件。对结构物反应的重视能够促使人们去研究由于开挖和衬砌安装引起的深层运动和地层流失。

7.3 计划实施

要成功地完成一项观测程序，最重要的因素是计划。观测程序的目的应该非常清楚，应急措施应该加以选择，这样就能根据观测到的数据去修改设计或施工决策。仪器应当具有和预定目的相适应的足够精度，以及可靠的耐久性、可重复性和坚实度。寻找一个可靠的仪器供应商是极其重要的，他会坚守工程对他的委托，并确保设备的良好性能。受过训练和有高度热情的工作人员是仪器可靠使用的基本保证。

仪器安装、监控和维护需要和承包商密切合作。许多工作，如钻孔，提供便道，保护仪器可以作为投标项目订入合同中。Dunncliff (1982) 指出与承包商建立良好关系的最佳途径，就是观测人员进行仪器安装或读数等实际活动以前，与承包施工队的高级人员进行数星期或数日的接触。仪器操作人员必须关心工期的延迟，注意劝说延迟施工的承包商调整他们的计划以达到最小限度的相互干扰。

所有仪器读数都应该进行归纳、绘图，以及转化成随时间变化的曲线。这个要求可能很难实现。在整理数据时现场人员应给予帮助，并能在现场及时提供所需的信息。必须周密计划以协调工地与办公室的活动。方便的数据格式，连续的数据整理，以及在关键时刻额外人员的配备都有助于快速交流信息。

数据的自动采集和计算机处理将大大地提高测试功能，但是否予以采用必须认真对待。因为电子仪器的采用不仅会增加仪器设备的易损性，而且自动处理使观测人员不能直接接触和筛选原始数据。故应选择部分量测内容由人工整理，因而可以对不同仪器所测得的数据进行相互核对性。初步观测应被用来选择一些特殊数据以供人工计算和外部校核。此外，初步观测必须作为解释测试结果而需要的现场条件和施

工过程的参考。

8. 特殊考虑事项

正如前面所述，本指南原则上是针对圆形和接近圆形横断面的隧道，且作用在衬砌上的主要荷载为自重的情况。地层条件，地下水情况和施工过程类型繁多，实际上需要比这本指南中所提供的，更多的处理措施，以充分地讨论实际中遇到的各种各样的问题。有下述几方面的问题值得专门考虑，因为相对地讲它们出现比较频繁，但是，所要求的设计措施已超出本指南的范围。

8.1 洞 室

大断面的坑道称为洞室，通常其横断面形状沿长度方向是变化的，而且可分为多阶段开挖。一般讲，这些洞室仅能在岩石中开挖。土中的洞室通常用明挖法修建。隧道和洞室之间的一些主要区别是：

1) 沿长度方向变化的横断面意味着一般不能用隧道掘进机来完成全部开挖过程，钻孔和爆破可以使岩石质量有所降低。

2) 多层式导坑引起频繁的岩石扰动、临时稳定和初始应力的重分布。

3) 洞室衬砌的曲率半径比隧道的曲率半径大得多，作用在衬砌上的荷载强度直接同曲率半径有关。

4) 洞室尺寸较大，这就意味着荷载极不均匀的可能性更大。大的不均匀荷载在连续衬砌中产生较大的弯矩，同

时，在衬砌和局部地层中形成了很高的剪应力集中。

虽然本指南中讨论的原则完全可应用于洞室，但应该指出，设计洞室的精度一般要高于大多数隧道。对于地层荷载、地层-衬砌相互作用和破坏准则的过份保守的假定将会导致非常昂贵的衬砌的需要量大大增加。一般讲，在相同的条件下洞室比隧道要求更广泛的地质勘察和更详细的地层荷载估计。

8.2 相邻、相交、重叠 或交叉的隧道

在隧道系统的设计和施工中，应该考虑与标准横断面不同时所产生的影响，这些不同包括平行的隧道，非常靠近的相交隧道，隧道与竖井的相交，隧道支管和三岔道，以及隧道的交叉。这些情况都会对投资、设计和施工产生重要的影响，而且要比对单个隧道的正常情况需要更多的经验和判断。

当地下工程开挖后，被挖去的那部分岩土所承受的荷载即被传递给周围地层，而且，开挖过程中所产生的变形和移动可以改变围岩的性质。如果第二条隧道接近或相交于已成隧道，这个区域的应力将比原来地层中的初始应力场要大得多，而地层的强度却相应地降低了，故坑道的影响跨度或宽度有所增加。已成隧道可能由于附近开挖一条新隧道引起应力和变形的变化面受到干扰甚至破坏，而且，相邻或相交的隧道会产生一个不利的平坦表面。

8.3 挤压地层

当荷载强度超过地层强度时，隧道周围产生了有时间效应的大量变形的地层称为挤压地层。这种荷载是由于靠近开

挖坑道的应力重分布所引起的,挤压地层所引起的后果,就是隧道支护将承受数星期甚至数月连续增加的,一个比最初值高好几倍的荷载值。在有些情况下,安装支护前允许地层自由变形将是有利的。通过这种办法,地层中的应力产生重分布,支护的需求量就可减少。然而,隧道上方地表的移动可能会增加。挤压地层中的隧道设计需要仔细研究诸如初始应力,风化程度,地层矿物学,地层中与时间和应力有关的强度和变形特性、开挖、支护技术及次序等因素。

8.4 膨 胀 地 层

地层的膨胀是由附加水造成的体积膨胀所形成的。隧道开挖引起初始应力降低,产生应力释放的裂缝,穿通了原先对地下水起栏隔作用的岩层,故而引起膨胀作用。

膨胀性能已经在大量的地质材料中观察到,包括超固结的粘土,页岩,风化的结晶岩和无水石膏等。在许多场合,地层最初暴露时是自稳的。以后产生膨胀造成底拱隆起,边墙收敛,支护系统变形。支撑膨胀地层的方法有: 1) 安装承受最大膨胀荷载的连续支护; 2) 安装可变形支护系统并换下变形过大的支护; 3) 采用柔性支护系统; 4) 采用装配式管片支护系统,可允许一定的位移,因而能降低膨胀荷载; 5) 密封膨胀地层潜在的缝隙,如凿孔填实节理而或狭窄剪切区,以阻止水和湿空气的接近。

附录A 地层-衬砌相互作用 的弹性理论模型

一些地层-衬砌相互作用的理论模型都是以地层和衬砌为弹性材料的基础上发展起来的,虽然这些模型限于弹性和特定荷载的假定,但仍具有若干优点,如相对讲形式简单,能估计地层和支护性质的各自影响,且能表示地层-衬砌相互作用的力学机理。这种模型可用来估计岩土和结构材料特性、初始应力和衬砌尺寸的变化所引起的衬砌内力和变形的改变。当然,应用这些模型时必须依靠隧道设计者的判断,他们的主要作用是确定边界条件,因此,补充了关于隧道运营、施工影响和地层变化等许多实际考虑,这些是本书讨论的重点, Schmidt(1984)讨论了弹性理论模型的一些特殊性质。

A.1. 背景

大部分弹性理论模型都假定地层是无限、弹性、均质和各向同性介质。地层和弹性圆形薄壁衬砌的相互作用认为处于平面应变状态,模型中考虑地层和衬砌的接触面为可充分滑动或无滑动的,有些模型(Muir Wood 1925; Curtis 1976)假定了一个介于全滑动和无滑动间具有一定剪切强度的接触面。垂直应力等于单位体积重 γ 和隧道中心埋深 H 的乘积,不考虑从拱顶至仰拱所增加的应力,故此模型适于深埋隧道。将Ranken、Ghaboussi和Hendron(1978)的有限单元分析与Einstein和Schwartz(1979)的解析解比较后

指出：当隧道埋深和其外径之比大于约 $1.5h$ ，解析解可以应用。

根据设置衬砌并承受荷载后原位应力的情况，弹性模型可分成二类：Morgan (1961)，Muir Wood (1975)，Curtis (1976)，Ranken, Ghaboussi, Hendron (1978)，Einstein和Schwartz (1979) 的工作基于先加载后开挖的衬砌受力状态，一般称为开挖加载条件；而 Burns, Richard (1964)，Hoeg (1968)，Peck, Hendron, Mohraz (1972)，Dar, Bates (1974) 和Mohraz等 (1975) 的工作基于先开挖后加载的衬砌受力状态，一般称为超压加载条件。

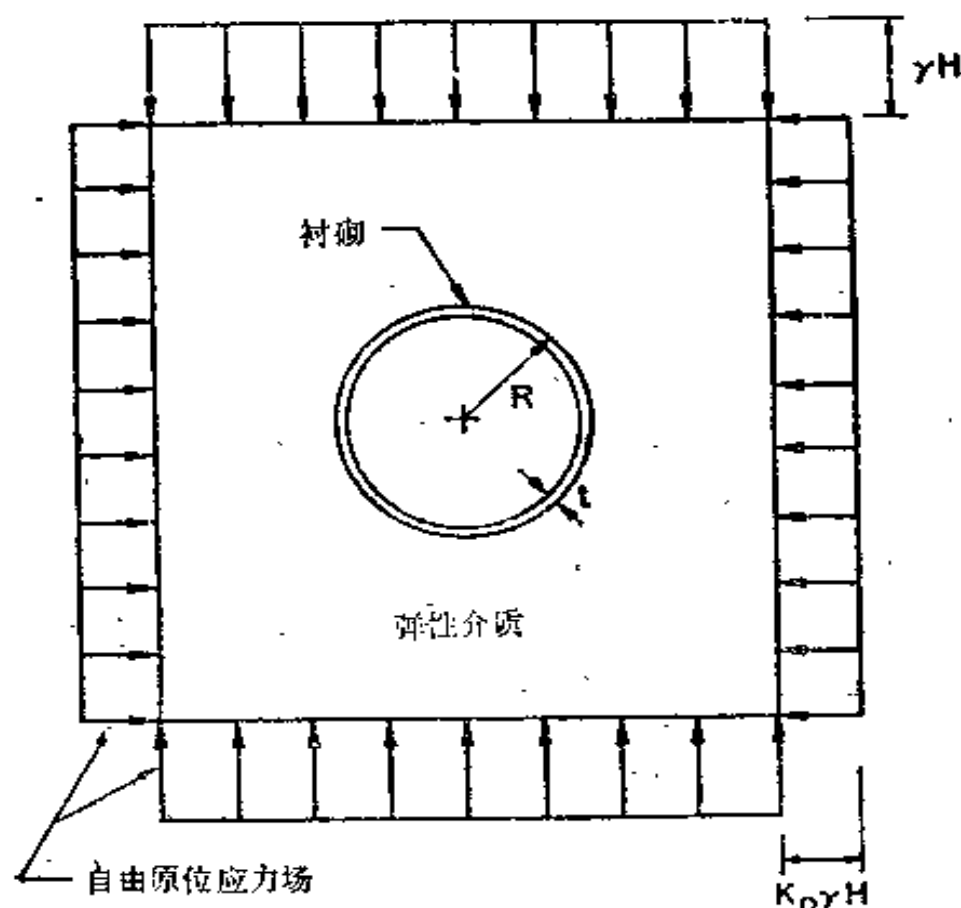
超压荷载意味着先设置衬砌然后再施加外荷载，这个假定和外部爆炸作用以及已成隧道上的回填重的作用是相符的。基于超压荷载的模型不能模拟常见的初始应力作用下岩土地层中修建的衬砌。一般讲，超压荷载模型与开挖荷载模型相比，其轴力和弯矩都较大。

A.2. 分析成果

本附录运用Ranken、Ghaboussi和Hendron (1978) 基于开挖荷载的分析结果来说明弯矩和轴力是地层和衬砌相对刚度的函数。假定的初始应力如图A.1所示，垂直应力前已提及，水平应力为静止侧压系数 K_0 和垂直应力的乘积。第三章中已讨论过，在设置衬砌时不可能不产生初始应力释放，已释放的应力值取决于开挖和支护方法，特别是支护设置与开挖面的距离，所以模型仅代表限制地层向内位移的一种极限情况。

采用无量纲来整理分析结果特别方便，相应地，用 $M/\gamma HR^2$ 表示无量纲弯矩或弯矩系数，其中 M 是单位长度

隧道的弯矩， γ 是地层单位体积重， H 是隧道中心线埋深， R 是衬砌外半径。同样，用 $T/\gamma HR$ 表示轴力系数，其中 T 是单位长度隧道的轴力。反映地层和衬砌相对刚度的无量纲参数称为柔度比 F 和压缩比 c 。



图A.1 弹性理论的地层-衬砌相互作用模型的应力和衬砌几何形状

柔度比反映地层和衬砌的弯曲刚度，如为圆形衬砌，其柔度比为

$$F = \left(\frac{E_m}{E_t} \right) \left(\frac{R}{t} \right)^3 \left[\frac{2(1-\nu_t^2)}{(1+\nu_m)} \right] \quad (\text{A.1})$$

式中 E_m 是周围介质或地层的弹性模量， E_t 是衬砌弹性模量， t 是衬砌厚度， ν_t 和 ν_m 分别为衬砌和地层的泊松比。

压缩比反映地层和衬砌的伸缩刚度，如为圆形隧道衬

砌，其压缩比为

$$c = \left(\frac{E_m}{E_t} \right) \left(\frac{R}{t} \right) \left[\frac{(1 - \nu_t^2)}{(1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)} \right] \quad (\text{A.2})$$

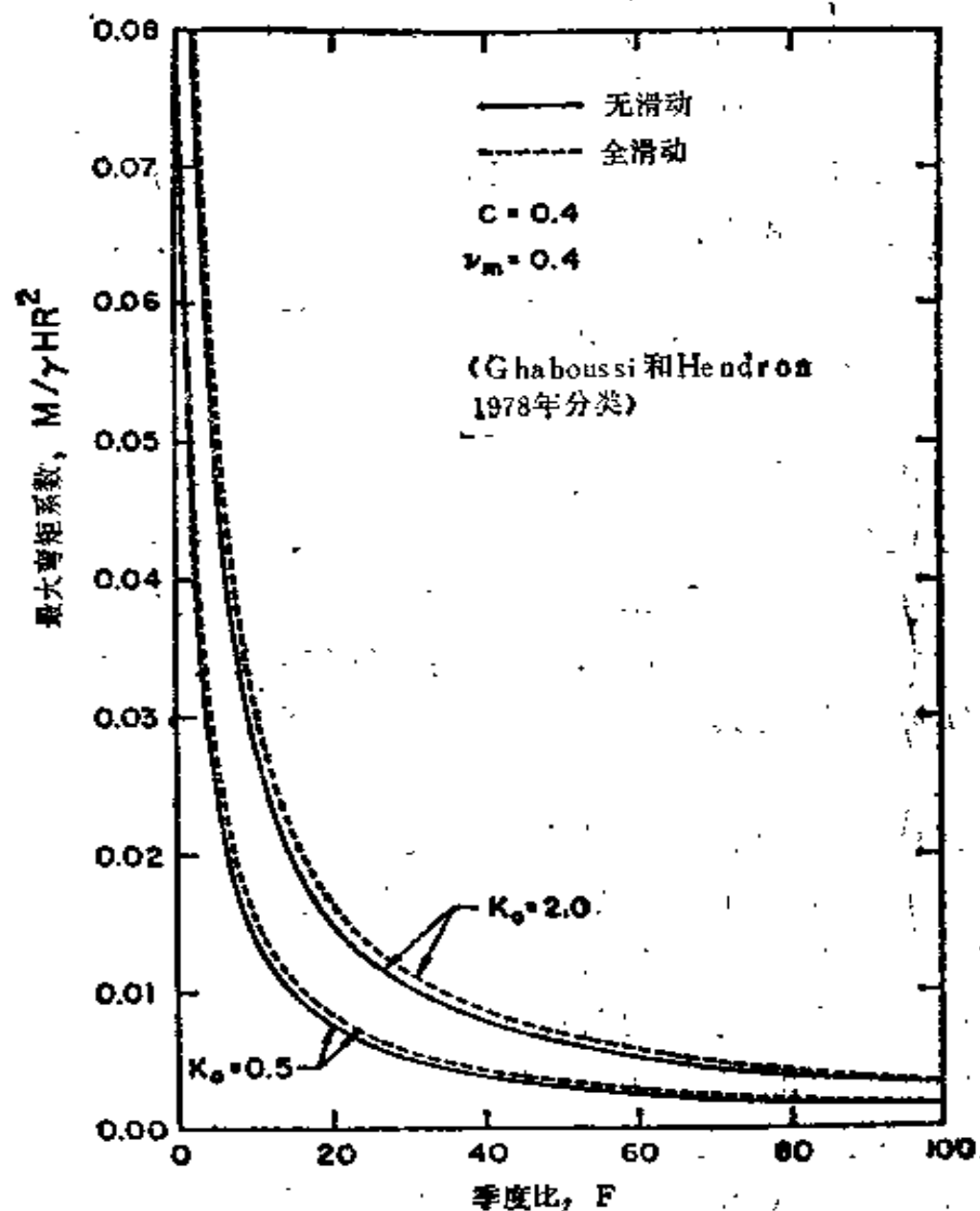
应当指出，其他人（如Muir Wood 1975, Einstein和Schwartz 1979）采用的柔度和刚度比与上式略有不同。在完全饱和土中，式A.2中 ν_m 用0.5时，则 c 值趋向无穷大，Einstein和Schwartz（1979）指出这个趋向会引起概念上的误解，故已推导了稍有不同假定的另一表示式。

图A.2表示相应于 $K_0=0.5$ 和2.0全滑动、无滑动情况下最大弯矩系数与 F 的函数关系，图中表示出拱顶、拱腰和拱底的弯矩绝对值为最大。 F 增至约20时，弯矩系数衰减很快，此时，地层和衬砌相对刚度增加，而弯矩变化很小。此图相应于 $c=0.4$ 和 $\nu_m=0.4$ ，但由于这些参数对弯矩影响不大，故实际遇到的其它 c 和 ν_m 值，此图也能很好地近似采用。

当 F 值约大于3时，轴力系数变化不大，但如图A.3所示，当 c 值增加时轴力明显减小。此图相应于 $K_0=0.5$ 和2.0， $F=10$ 和 $\nu_m=0.4$ 全滑动和不滑动情况。拱顶和拱底的轴力一般为最大，无滑动时比全滑动时为大。 ν_m 对轴力影响很大，图A.2上的曲线虽未绘出，但当 $\nu_m > 0.4$ 时会向上弯而 $\nu_m < 0.4$ 时会向下弯。

图A.2和图A.3可作为柔性隧道衬砌的定性指导，但应当认识，具体工程的定量分析在很大程度上取决于静止侧压力系数 K_0 值，通常可以根据实际现场的原始特性估计它在。近期形成的砂性土地层中，有较高的内摩擦力， K_0 可取0.5。超固结粘土 K_0 常超过1.0。经历复杂地质过程的岩石 K_0 变化幅度极大。开挖过程中释放了隧道衬砌附近的初始应力，又引起了附加的复杂性。而使衬砌的实际受力可能还

小于静止水平应力和全覆盖层的压力。

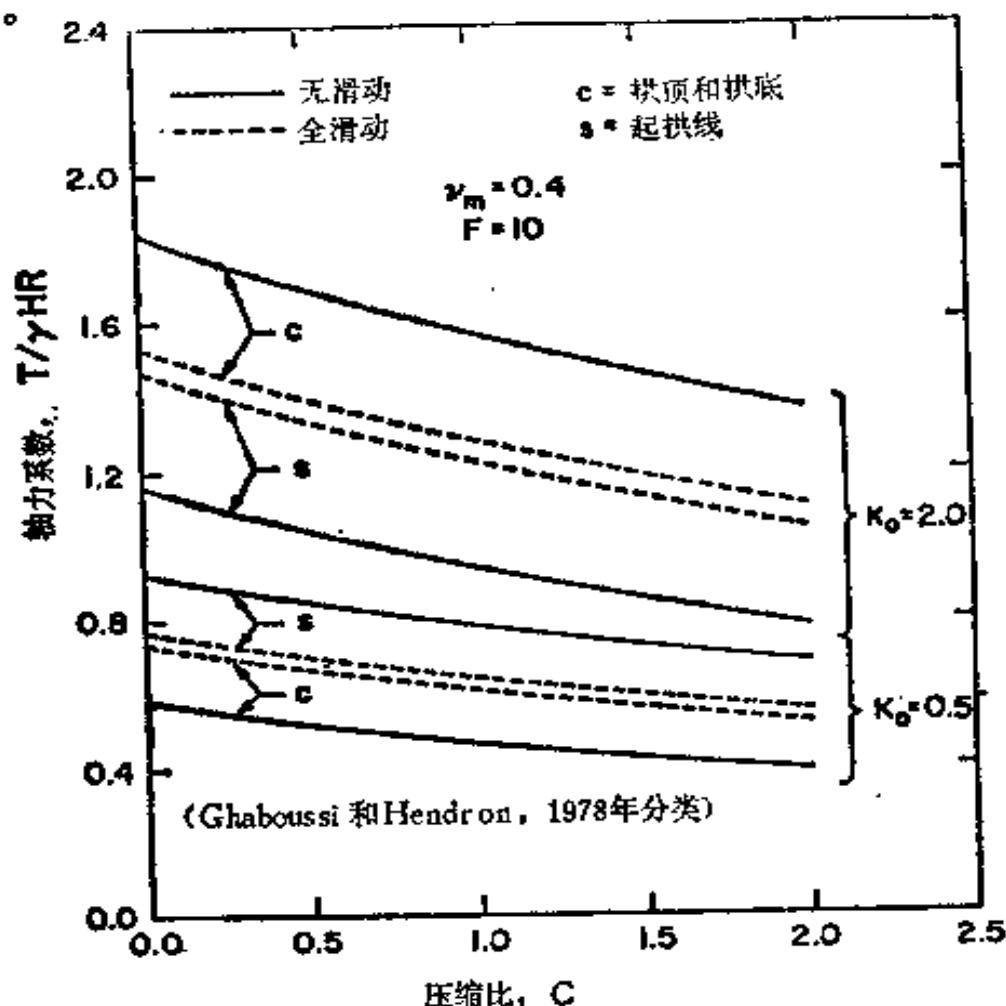


图A.2 最大弯矩系数和柔度比的函数关系

A.3. 应用

图A.2和A.3的方程式是按线弹性衬砌得到的, 而混凝土衬砌具有明显的非线性应力应变关系, 混凝土衬砌发生结

构性破坏都是由于受压面被压碎而引起的，故衬砌承载力远大于截面的弯曲承载力。而线弹性模型着重于截面抗弯能力，所以，实际上是低估了衬砌承载力，衬砌设计者应当记住这一点。附录B中作了混凝土衬砌非线性效应与线弹性解的比较。



图A.3 轴力系数和压缩比的函数关系

设计者还必须考虑非线性效应以外的许多因素，混凝土徐变和衬砌管片可使地层和衬砌相对刚度有所增加；开挖时初始应力的释放可引起开挖荷载的降低；在以重力荷载为主的节理岩体和产生较大松动的土层中，实际地层荷载可能不会沿衬砌连续分布，而是集中作用于某些特定部位。此外，千斤顶推力、灌浆压力和未来建筑的荷载可能比地层衬砌相

相互作用所产生的荷载更危险。

小心估计影响衬砌功能的许多因素需要判断，线弹性模型可以补充判断的不足，如前所述，模型之所以经常被采用是由于它们能提供隧道性态的极限状况和指出重要参数变化对衬砌的影响趋势。

附录B 混凝土衬砌的非线性反应

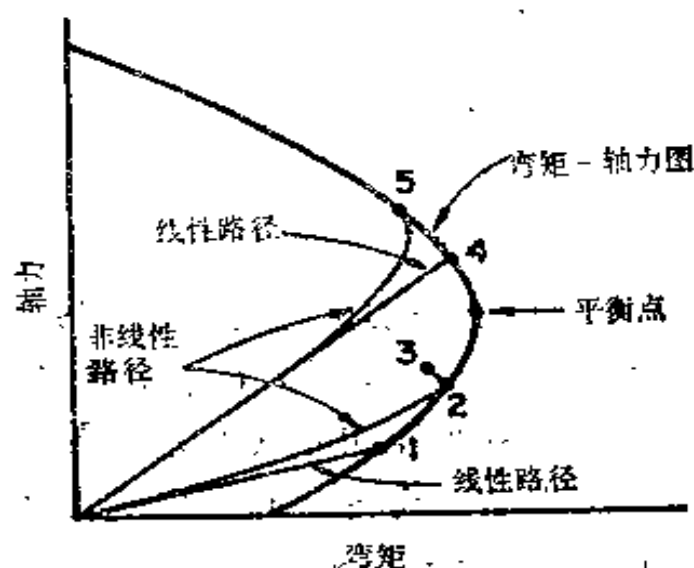
附录A中已提及，混凝土衬砌具有非线性应力应变关系，致使线弹性模型可能与实际性态不符。故有必要了解非线性对衬砌的影响。在同样的荷载条件和地层衬砌相对刚度时，弯矩-轴力图是比较线性和非线性差别的一种方法。本附录对弯矩-轴力图作简短讨论，并给出线性和非线性混凝土性质引起衬砌性态变化的分析结果。

B.1 弯矩-轴力相互作用图

衬砌的轴力和弯矩值被算出后，必须与许可值进行数量上的比较，一般只需比较最大内力或比较衬砌断面突变处的内力。弯矩和轴力对截面强度的影响是相互交织的，习惯上用表示二者允许组合的弯矩-轴力图来综合验算弯矩和轴力值， $M-T$ 图可以针对衬砌的每个截面绘制，它仅取决于截面尺寸和材料性质。

获得 $M-T$ 图的一个方法是按照美国混凝土协会规范（ACI委员会318，1983）所规定的，引起截面无侧限破坏的弯矩和轴力组合公式进行，并表示在轴力和弯矩为轴的图上。隧道衬砌截面的典型 $M-T$ 图如图B.1所示，若衬砌截面尺寸和材料不变，则此图代表全部截面，不然，可用若干个图来表示不同的衬砌截面。

分析所得的弯矩和轴力组合值应绘在图B.1所示的 $M-T$ 图上，以决定截面是否足够。美国混凝土协会规范考虑到材料性质、截面承载力以及结构混凝土的强度和圆柱体试验值之间的差别等不定因素，所以，在作图时故意将承载力降低。



图B.1 具有线性和非线性弯矩-轴力路径的钢筋混凝土衬砌的弯矩-轴力图

了，使它具有有一定的安全系数。如分析所得的弯矩、轴力组合值落在曲线内，则截面是安全的，如落在曲线外，则截面不安全。第三章中已经论及，衬砌荷载还可乘上荷载系数，这就使弯矩和轴力的组合具有附加的安全度。

B.2 线性和非线性影响

图B.1表示钢筋混凝土衬砌截面线性和非线性分析的差别，图中表示出两种地层和衬砌相对刚度时的弯矩-轴力路径。与 $M-T$ 曲线相交于平衡点以下的非线性和线性路径，其柔性比小于平衡点以上的路径。每种路径是相应于已定荷载型式的弯矩和轴力组合值的轨迹。如第三章和附录A所述，荷载和附带的地层衬砌相互作用可以用开挖、超压或重力加载条件进行模拟。

线性分析时，材料应力应变遵循线性关系，甚至当分析值超过衬砌所能承担的实际应力时也这样假定。在地面结构中，由于线性假定是属于保守的，故设计中常采用线性分

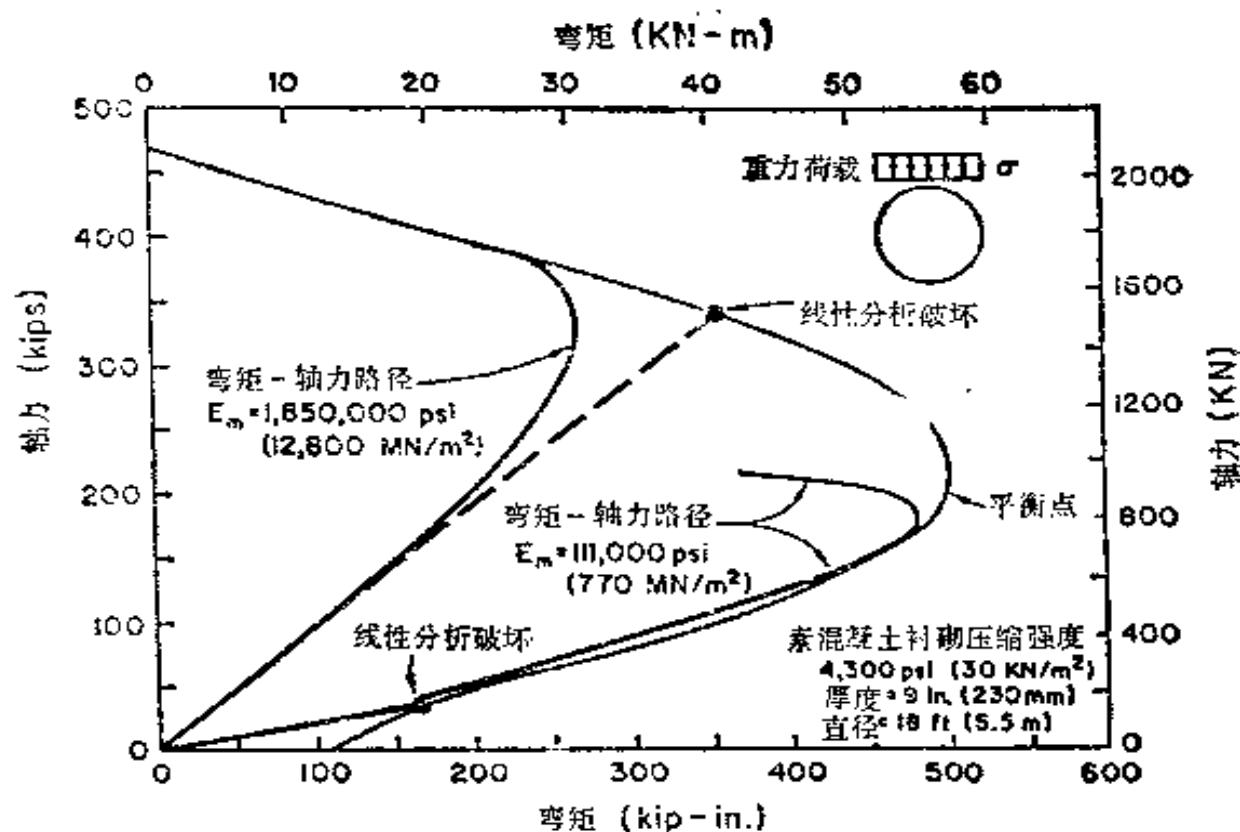
析。但在隧道衬砌中，由于其变形受限制和具有较大的不确定性更会引起弯矩重分布，采用线性分析将比地面结构产生更多的误差。

当图B.1中非线性弯矩-轴力路径与 $M-T$ 曲线相交于平衡点之下时，混凝土开裂，偏心距减小而轴力从线性分析（点1）增大至较高值（点2）。甚至在弯矩-轴力路径达到包络线时，断面仍有附加承载能力，即使弯矩能力减小（点5）*，而轴力承载力还可继续增加。当相交于平衡点以上时，非线性分析的轴力承载力接近于线性分析，这可从点4与点5间和点1与点3间差距的百分比的比较中看出。

由非线性分析得出的衬砌特性的主要方面是：混凝土隧道衬砌不会因为过量弯矩而破坏，它的破坏是由受弯矩间接影响的轴力所产生的。

图B.2用一个特例进一步说明图B.1的一般情况，图中表示230mm厚混凝土衬砌截面的弯矩-轴力曲线，从一段长305mm的无筋连续衬砌。图中也示出直径为5.5m圆衬砌分析所得的拱顶弯矩-轴力路径，其截面与 $M-T$ 曲线所采用的一样。隧道上的均布重力荷载如图所示。衬砌的几何和材料非线性性质的模拟见Paul等（1983）的叙述。用梁-弹簧模型进行模拟分析，其切向和径向弹簧刚度比是1:4，弹簧刚度相应于周围介质模量为770和12800MN/m²，以此来代表软岩和中等硬度岩石。在这两种情况中，由于介质刚度增加而引起承载力增加，因为最大轴力有二倍之差。弯矩和轴力在平衡点以下时，非线性分析的轴力承载力超过线性分析的四倍，弯矩-轴力路径交于 $K-T$ 图平衡点之上时，线性和非线性分析最大轴力之差仅约为百分之十。

* 译者注：原书为点3，似有错。



图B.2 岩石中素混凝土衬砌弯矩-轴力路径

应当着重指出：非线性分析实际边界条件与线性模型相同。如附录A所论及的，设计者还必须考虑许多附加因素，如材料性质、地层荷载和施工方法等的变化。然而，非线性提供了混凝土衬砌变形和与周围地层分担荷载的观念。当弯矩和轴力组合低于 $M-T$ 曲线平衡点时，线性分析特别低估了衬砌的承载能力，故非线性模型分析结果显得特别有效。

附录C 实测和规定的隧道渗漏率

本附录提供有关实测和规定的隧道允许渗漏率资料。分三部分讨论已发表的渗漏记录和有关高速交通及污水隧道的允许渗漏率规范。必须强调衬砌和地层条件对渗漏量有很大影响。所以，只把本附录的资料用作一般的背景是可取的。特定隧道的标准应该通过对该工程相应的现场条件和衬砌类型进行全面而仔细的评价后再加以确定。

C.1 实测的渗漏率

表C.1列出了由各种研究者发表的实测渗漏率。进水速率按 $L/m^2/\text{天}$ 表示，这是由施工工程研究和信息协会(1979)推荐的。对每种情况，单位面积的流水率可利用隧道内部表面积计算。根据隧道类型列出渗漏率。表中给出了关于土壤情况、起拱线上水的最大高度、内径、衬砌和防水类型。

表中所列渗漏率反映了正常的工作条件，可以认为与所列隧道的使用要求相一致。渗漏率是按记录提供的，可能包括用于清洗的水和从进口排进隧道的水流。

大多数实测的渗漏率都是来自螺栓连接的铸铁衬砌隧道。螺栓连接的钢和铸铁衬砌一般在水下条件工作良好。在施工后发现的漏水常可用重新填实接缝或拧紧螺栓使管片更好的接触等简单的应急措施加以堵塞。通过比较，螺栓连接的混凝土衬砌的水可以采用或注入专门的密封材料。

C.2 高速交通隧道的渗漏率

表C.2列出了为几条美国高速交通系统隧道所制订的最

几个隧道实测

隧道类型	名 字	依 据	完成日期	地质情况
铁 路	Sarnia	Hewett和Jahannesson, 1922	1890	软粘土
铁 路	Battesy	Hewett和Jahannesson, 1922	1906	部分片麻岩、片岩; 部分砂、粉砂和粘土
铁 路	Hudson和Manhattan	Hewett和Jahannesson, 1922	1908	粉砂、砂、砾石
铁 路	P.R.R.Hudson河	Hewett和Jahannesson, 1922	1906	粉砂、砂、砾石
铁 路	P.R.R.East河	Hewett和Jahannesson, 1922	1909	粉砂、砂、砾石
铁 路	Dorchester	Hewett和Jahannesson, 1922	1917	软粘土、砂
公 路	Blackwall	Hewett和Jahannesson, 1922	1897	粘土、砂、砾石
公 路	Rotherhithe	Hewett和Jahannesson, 1922	1908	粘土、砂、砾石
公 路	Blackwall	Craig 和 Muir Wood, 1978	1961—1967	粘土、砂、砾石
公 路	Clyde	Craig 和 Muir Wood, 1978	1963—1964	砂石、砂、粉砂和粘土
公 路	Dartford	Craig 和 Muir Wood, 1978	1963	白垩土、砂石
人行通道	Greenwich	Hewett和Jahannesson, 1922	1901	粘土、砂和砾石
高速交通	Toronto地铁车站	Bartlett, Noskiewicz和Ramsey, 1965	1966—1967	冰碛物、砂和粘土
高速交通	Toronto地铁区间隧道	Bartlett, Noskiewicz和Ramsey, 1965	1966—1967	冰碛物、砂和粘土
高速交通	London地下Victoria线	Craig和MuirWood, 1978	1969	粘土
电 缆	Thames	Craig 和 Muir Wood, 1978	1970	白垩土
电 缆	Severn	Craig 和 Muir Wood, 1978	1973	砂岩、页岩和石灰岩

a——1963年量测, b——1973年量测, c——隧道上半部量测, d——隧

渗漏率一览表

表C.1

起拱线上 最高水位 ft(m)	内径ft(m)	衬砌类型	防水措施	进水量 加仑/ft ² /天 (L/m ² /天)
67(20.4)	19.8(6.0)	螺栓接头铸铁	木和铅堵缝	0.057(2.33)
82(25.0)	15.5(4.7)	螺栓接头铸铁	铅堵缝	0.027(1.10)
87(26.5)	15.3(4.7)	螺栓接头铸铁	锈铁堵缝	0.048(1.94)
80(24.4)	19.0(5.8)	螺栓接头铸铁混 凝土	锈铁堵缝	0.001(0.41)
80(24.4)	19.0(5.8)	螺栓接头铸铁混 凝土	铅堵缝	0.006(0.24)
67(20.4)	19.8(6.0)	木衬板内混凝土	内部木表面用 油毡和沥青覆盖	0.004(0.15)
66(20.1)	24.8(7.4)	螺栓接头铸铁混 凝土	锈铁堵缝	0.004(0.16)
60(18.3)	27.0(8.2)	螺栓接头铸铁混 凝土	铅和锈铁堵缝	0.001(0.04)
95(29.0)	28.0(8.5)	螺栓接头铸铁	未报告	0.007(0.27)
110(35.4)	29.5(9.0)	螺栓接头铸铁	铅堵缝	0.013~0.017 ^a (0.52~0.68) 0.019 ^b (0.76)
98(29.9)	31.0(9.5)	螺栓接头铸铁	铅堵缝	0.019(0.77)
64(19.5)	10.5(3.2)	螺栓接头铸铁	铅堵缝	0.007(0.30)
50(15.2)	24.0(7.3)	螺栓接头铸铁	石棉水泥堵缝	<0.001(大约 0.01)
50(15.2)	16.0(5.0)	螺栓接头铸铁	石棉水泥	0.007(0.27)
135(41.2)	12.5—21.3 (3.9—6.5)	膨胀铸铁, 膨胀 混凝土和螺栓铸铁	灌浆铅堵缝	<0.001—0.029 (大约0.01—1.20)
155(47.3)	9.8(3.0)	螺栓连接混凝土	未报告	0.130 ^c (5.30) 0.800 ^d (32.6)
185(56.4)	9.8(3.0)	螺栓连接混凝土	未报告	0.800(12.2)

道下半部量测。

大允许渗漏率。表中渗漏率是根据典型的合同文件规范列出的。为了与表C.1比较,行车隧道的允许渗漏率也用 $L/m^2/\text{天}$ 表示。

华盛顿、亚特兰大和巴尔的摩地下铁道的允许渗漏率是类似的,而且代表了最初制定的海湾地区高速交通系统的设计标准。值得注意的是这些系统按照 $L/m^2/\text{天}$ 的单位的允许渗漏率非常接近由Hewett和Johannesson (1922) 测得的实际渗漏率的平均值。规定Buffalo轻便铁道高速交通系统的渗漏率接近多伦多地下铁道隧道实测到的内渗率(Bartlett, Noskiewicz和Ramsay 1965)。的确, Buffalo隧道的设计人员是采纳了多伦多地下铁道的施工经验,并籍以制订标准。

在一些高速交通系统中,允许的渗漏率关系到渗漏对隧道周围区域的影响。斯的哥尔摩地下隧道的允许渗漏率主要是根据该地区的建筑物密度和压缩性软粘土而制定的。规定的速率大约在 $2.00 \sim 10.00 L/min/\text{每}100m\text{长}$ 之间变化(Rossell等1976, Harding 1980)。这些速率与典型的单轨隧道 $1.91 \sim 9.45 L/m^2/\text{天}$ 的值相一致。渗漏水被汇集起来,必要时则引入底板排水管。

C.3 污水隧道的渗漏率

渗漏对废水和污水系统运营的影响表现在降低排污能力,增加辅助处理设施,产生超载或需在现设施外增设分路等方面。以前的最大允许渗漏率标准实际上已经发生了变化。1970年以前,最流行的允许内渗标准是每天每英里单位内径500L。这个标准被“十州标准”所采纳(公共卫生工程师密西西比河上游委员会和公共卫生工程师大湖委员会1968)，“十州标准”在中西部和大湖地区广泛采用。改善

管段接头和加强检查工作可以减少内渗流量。美国公共工程协会（1970、1971）和州卫生工程师大湖和密西西比河上游委员会（1978）已经建议新污水管线施工的渗漏率，为每天每英里单位内径200加仑。在某些场合，州的条例已经采纳了这个建议。例如威士康星州（1976）和德克萨斯州（1981）行政管理法规定对新的引水管最大内渗流为每天每英里单位内径200加仑。

几个美国高速交通系统的最大渗漏率

表C.2

高速交通当局和地区	合同规范中指定的允许渗漏率	行车隧道的允许渗漏率*加仑/ft ² /天 (L/m ² /天)
海湾地区高速交通 旧金山CA	0.2加仑/min/250ft	0.020(0.82)
华盛顿城市地区高速交通 当局华盛顿特区	0.2加仑/min/250ft 任何100英尺内都不超过 0.1加仑/min	0.020(0.82)
亚特兰大城市地区高速交通 当局亚特兰大, GA	0.2加仑/min/250ft	0.020(0.82)
巴尔的摩地区高速交通 当局巴尔的摩, MD	0.07加仑/min/100ft 任意10英寸都不超过 0.05加仑/min	0.018(0.11)
Massachusetts交通 当局波士顿, MA	10加仑/h/100ft 没有一处渗漏大于0.25 加仑/h	0.042(1.70)
Niagara边境高速交通 当局Buffalo, NY	a) 0.005加仑/ft ² 每24 h每300ft b) 每24h每30英尺0.01 加仑/ft ²	0.005(0.19)

* 基于5.5m内径估计。

属于减少污水溢流的区域性系统的一些大隧道项目。表C.3列出了用于芝加哥、罗切斯特和密尔沃基污水系统的渗漏标准。芝加哥最早期的工程允许渗漏率是原先在密西西比河上游和大湖地区所用标准的代表。以后在罗切斯特和密尔沃基施工中采纳的渗漏率反映了更新的建议。在密尔沃基的事例中，渗漏标准根据州条例确定的。

推荐给污水管道系统的内渗流似乎应该为建立隧道系统

的标准提供指导，但是管道工程和隧道工程之间的区别不应混淆。应该仔细地进行实践，应用这样现有标准就能符合预定的降低投资的目的。在一些场合，专门的地基处理和衬砌设计措施不会是经济的，而应该考虑收集和处理某些局部附加内渗的可能性。

几条美国废水隧道的最大渗漏率

表C.3

隧道和位置	主管机构规定的 允许渗漏率	允许渗漏率加仑/ft ² /天(L/m ² /天)
隧道和水库方案 Chicago, IL	每天每英里单位内径500 加仑	0.362(14.74)
Calumet隧道系统 Chicago, IL	每天每英里单位内径500 加仑	0.362(14.74)
Culver—Goodman 隧道Rochester, NY	每1000英尺每分钟4加 仑	0.115*(4.67)
Milwaukee水污染减 少计划Milwaukee, WI	每天每英里单位内径200 加仑	0.145(2.13)

*基于16英尺(4.9m)内径估计

參考文獻

- ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318-83)", American Concrete Institute, Detroit, MI, 1983.
- ACI Committee 504, "State-of-the-Art Report on Sealing Joints in Tunnels", Report No. ACI 504.1R-82, Concrete International, June, 1982, pp. 17-29.
- American Public Works Association, "Control of Infiltration and Inflow into Sewer Systems", Report for the Environmental Protection Agency, Program No. 11022EFF, Dec., 1970.
- American Public Works Association, "Prevention and Correction of Excessive Infiltration and Inflow into Sewer Systems", Report for EPA Water Quality Office, Program No. 11022EFF, Jan., 1971.
- American Society for Testing and Materials, Annual Book of Standards, Part 19, ASTM, Philadelphia, PA, 1983.
- Attewell, P. B., "Ground Movements Caused by Tunneling in Soil", Large Ground Movements and Structures, Ed. by J. D. Geddes, Pentech Press, London, U.K., 1978, pp. 812-948.
- Bartlett, J. V., T. M. Noskiewicz, and J. A. Ramsay, "Soft Ground Tunneling for the Toronto Subway", Proceedings, Institution of Civil Engineers, Vol. 32, Sept., 1955, pp. 53-75.
- Barton, N., R. Lien, and J. Lunde, "Estimation of Support Requirements for Underground Excavation", Proceedings, 16th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, MN, Sept., 1975, pp. 163-177.
- Bickel, J. O. and T. R. Kuesel, Tunnel Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, NY, 1982.
- Bienfawski, Z. T., "Tunnel Design by Rock Mass Classifications", Technical Report GL-79-19, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, Sept., 1979.
- Birkmyer, J., "Rapid Transit Subways - Maintenance and Engineering Report", Report No. UMTA-MA-06-0025-78-1, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Aug., 1978.
- Brierley, G. S., "The Performance During Construction of the Liner for a Large, Shallow Underground Opening in Rock", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana, 1975.

- Brown, E. T., J. W. Bray, B. Ladanyi, and E. Hoek, "Ground Response Curves for Rock Tunnels", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 1, Jan., 1983, pp. 15-39.
- Committee for the Manual on Subsurface Investigation, "Subsurface Investigation for Design and Construction of Foundations of Buildings, Manuals and Reports of Engineering Practice No. 56, American Society of Civil Engineers, New York, NY, 1976.
- Committee of the Great Lakes-Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers, "Recommended Standards for Sewage Works", Health Education Service, Albany, NY, 1978.
- Committee on Management of Urban Construction Programs, "Management of Urban Construction Programs", Vols. 1 and 2, Building Research Advisory Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1980.
- Committee on Responsibility, Liability, and Accountability for Risks in Construction, "Exploratory Study on Responsibility, Liability, and Accountability for Risks in Construction", Building Research Advisory Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1978.
- Construction Industry Research and Information Association, "Tunnel Waterproofing", Report 81, CIRIA, London, U.K., Apr., 1979.
- Construction Specifications Institute, "Manual of Practice", Vol. 1, Construction Specifications Institute, Washington, D.C., 1975.
- Cording, E. J. and D. U. Deere, "Rock Tunnel Supports and Field Measurements", Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Vol. 1, Chicago, IL, 1972, pp. 601-622.
- Cording, E. J., A. J. Hendron, H. H. MacPherson, W. H. Hansmire, R. A. Jones, J. W. Mahar, and T. D. O'Rourke, "Methods for Geotechnical Observations and Instrumentation in Tunneling", Report No. UILU-ENG 75 2022, Vols. 1 and 2, National Science Foundation, Washington, D.C., Dec., 1975.
- Cording, E. J. and J. W. Mahar, "Index Properties and Observations for Design of Chambers in Rock", Engineering Geology, Vol. 12, No. 2, July, 1978, pp. 113-142.
- Corps of Engineers, "Tunnels and Shafts in Rock", Engineer Manual EM 1110-2-2901, U.S. Department of the Army, Washington, D.C., Sept., 1978.
- Craig, R. N. and A. M. Muir Wood, "A Review of Tunnel Lining Practice in the United Kingdom", TRRL Supplementary Report 335, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K., 1975.
- Curtis, D. J., Discussion of: Muir Wood, A. M., "The Circular Tunnel in Elastic Ground", Geotechnique, Vol. 26, No. 2, June, 1976, pp. 231-237.

- Dar, S. M. and R. C. Bates, "Stress Analysis of Hollow Cylindrical Inclusions", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. GT2, Feb., 1974, pp. 123-138.
- Deere, D. U., A. H. Merritt, and R. F. Coon, "Engineering Classification of In Situ Rock", Technical Report No. AFWL-TR-67-144, Air Force Weapons Laboratory, Albuquerque, NM, 1969.
- Deere, D. U., R. B. Peck, J. E. Monsees, and B. Schmidt, "Design of Tunnel Liners and Support Systems", Final Report, Contract No. 3-D152, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Feb., 1969.
- Duddeck, H. and J. Erdman, "Structural Design Models for Tunnels", Tunneling '82, Institution of Mining and Metallurgy, London, U.K., 1982, pp. 83-91.
- Dunnicliff, J., "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 89, Transportation Research Board, Washington, D.C., Apr., 1982.
- Egan, W. A., "Pressure Tunnels - A Review of Early and Present Day Practice", Journal of the Institution of Civil Engineers, Australia, Mar., 1950, pp. 59-68.
- Einstein, H. H. and C. W. Schwartz, "Simplified Analysis for Tunnel Supports", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol. 105, No. GT4, Apr., 1979, pp. 499-518.
- Golder Associates and James F. MacLaren Ltd., "Tunneling Technology: An Appraisal of the State of the Art for Application to Transit Systems", Ontario Ministry of Transportation and Communications, Ontario, Canada, May, 1976.
- Hampton, D., T. G. McCusker, R. J. Essex, "Representative Ground Parameters for Structural Analysis of Tunnels", Report No. FHWA/RD-80/013, Vol. 2, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Oct., 1980.
- Harding, P. G., "Multiple Grouting Techniques Beat Stockholm's Groundwater", Tunnels and Tunneling, Vol. 12, No. 3, Apr., 1980, pp. 41-43.
- Hendron, A. J. and A. K. Ayer, "Stresses and Strains around a Cylindrical Tunnel in an Elasto-Plastic Material with Dilatancy", Technical Report No. 10, Missouri River Division, U.S. Corps of Engineers, Omaha, NB, 1972.
- Hewett, B. M. H. and S. Johannesson, Shield and Compressed Air Tunneling, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, NY, 1922.
- Hoeg, K., "Stresses Against Underground Structural Cylinders", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, No. SM4, Apr., 1968, pp. 833-858.

- Hoek, E. and E. T. Brown, Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, London, U.K., 1980.
- Hvorslev, M. J., "Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes", U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1948.
- International Society for Rock Mechanics, Rock Characterization Testing and Monitoring, Ed. by E. T. Brown, Pergamon Press Ltd., Oxford, U.K., 1981.
- Karlsrud, K. and L. Sander, "Subsidence Problems Caused by Rock-Tunneling in Oslo", Evaluation and Prediction of Subsidence, American Society of Civil Engineers, New York, NY, Jan., 1978, pp. 197-213.
- Kuesel, T. R. "The Structural Behavior of Tunnel Linings", Proceedings, American Society of Civil Engineers, Metropolitan Section Seminar on Tunneling and Underground Construction, New York, NY, Dec., 1983.
- Kulhawy, F. H., C. H. Trautmann, J. F. Beech, T. D. O'Rourke, W. McGuire, W. A. Wood, and C. Capano, "Transmission Line Structure Foundations for Uplift-Compression Loading", Final Report EPRI EL-2870, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Feb., 1983.
- Lane, K. S., "Field Test Sections Save Cost in Tunnel Support", Report for Underground Construction Research Council, American Society of Civil Engineers, New York, NY, Oct., 1975.
- Lane, K. S., "Instrumented Tunnel Tests: A Key to Progress and Cost Saving", Underground Space, Vol. 1, 1977, pp. 247-259.
- Megaw, T. M. and J. Bartlett, Tunnels: Planning, Design, Construction, Vols. 1 and 2, Ellis Horwood, Ltd., Chichester, U.K., 1981.
- Mitchell, J. K., "In-Situ Techniques for Site Characterization", Proceedings, NSF Specialty Workshop on Site Characterization and Exploration, Ed. by C. H. Dowding, Northwestern University, Evanston, IL, June, 1978, pp. 107-129.
- Mohraz, B., A. J. Hendron, Jr., R. E. Ranken and M. H. Salem, "Liner-Medium Interaction in Tunnels", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 101, No. C01, Jan., 1975, pp. 127-141.
- Morgan, H. D., "A Contribution to the Analysis of Stress in a Circular Tunnel", Geotechnique, Vol. 11, No. 1, Mar., 1961, pp. 37-46.
- Muir Wood, A. M., "The Circular Tunnel in Elastic Ground", Geotechnique, Vol. 25, No. 1, Mar., 1975, pp. 115-127.
- Obert, L. and W. Duvall, Rock Mechanics and Design of Structures in Rock, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 1967.

- Paul, S. L., A. J. Hendron, E. J. Cording, G. E. Sgouros, and P. K. Saha, "Design Recommendations for Concrete Linings for Transportation Tunnels", Report No. UMTA-MA, 06-0100-83-1 and 2, Vols. 1 and 2, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Nov. 1983.
- Peck, R. B., "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Mexico, State-of-the-Art Volume, 1969, pp. 225-290.
- Peck, R. B., "Observation and Instrumentation: Some Elementary Considerations", Highway Focus, Vol. 4, No. 2, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, June, 1972, pp. 1-7.
- Peck, R. B., A. J. Hendron, Jr. and B. Mohraz (1972), "State of the Art of Soft Ground Tunneling", Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Chicago, IL, Vol. 1, 1972, pp. 259-286.
- Rabcewicz, L. v., "The Stability of Tunnels Under Rock Load", Water Power, 1969, Part 1, June, pp. 225-229, Part 2, July, pp. 266-273; Part 3, Aug., pp. 297-302.
- Rabcewicz, L. v., "Tunnel under Alps Uses New Cost-Saving Lining Method", Civil Engineering, Vol. 45, No. 10, Oct. 1975, pp. 66-68.
- Ranken, R. E., J. Ghaboussi, and A. J. Hendron, "Analysis of Ground-Liner Interaction for Tunnels", Report No. UMTA-IL-G6-0043-78-3, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 1978.
- Rosell, B., C. Ehrman, I. Backstrom, and B. Hillbom, "The Stockholm Underground 1975", Stockholm Municipal Services Department and the Greater Stockholm Passenger Transport Company, 1976.
- Schmidt, B., "Tunnel Lining Design - Do the Theories Work?", Proceedings, Australia-New Zealand Geomechanics Conference, Perth, Australia, May, 1984.
- Schmidt, B. and J. Dunnicliff, "Construction Monitoring of Soft Ground Rapid Transit Tunnels, A Definition of Needs and Potential Developments", Report No. UMTA-MA-06-0075-74-13.1, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Nov., 1974.
- Sowers, G. F., Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering, 4th Ed., MacMillan Publishing Company, Inc., New York, NY, 1979.
- Steiner, W., H. K. Einstein, and A. S. Azzouz, "Improved Design of Tunnel Supports - Tunneling Practices in Austria and Germany", Report No. UMTA-MA-0100-80-7, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., June, 1980.
- Subcommittee on Contracting Practices, "Better Contracting for Underground Construction", U.S. National Committee on Tunneling Technology, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1974.

Subcommittee on Contracting Practices, "Recommended Procedures for Settlement of Underground Construction Disputes", U.S. National Committee on Tunneling Technology, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1977.

Schwartz, C. W. and H. H. Einstein, "Improved Design of Tunnel Supports: Volume 1 - Simplified Analysis for Ground-Structure Interaction in Tunneling", Report No. UMTA-MA-06-0100-80-4, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., June, 1980.

Terzaghi, K., "Rock Defects and Loads on Tunnel Support", Rock Tunneling with Steel Supports, Ed. by R. V. Proctor and T. White, Commercial Shearing Co., Youngstown, Ohio, 1946, pp. 15-99.

Terzaghi, K. and R. B. Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 1968.

Texas Administrative Code, Title 31, National Resources and Conservation, Part X, Texas Water Development Board, Chapt. 325, Design Criteria for Sewage Systems, Section 22, Sewage Collection System, Nov., 1981, p. 964.

Thompson, D. E., J. T. Humphrey, L. W. Young, and C. F. Wall, "Field Evaluation of Advanced Methods of Subsurface Exploration for Transit Tunneling", Report No. DOT-TSC-UMTA-80-1, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Dec., 1980.

Thompson, D. E., L. Edgers, J. S. Mooney, L. W. Young, and C. F. Wall, "Field Evaluation of Advanced Methods of Geotechnical Instrumentation for Transit Tunneling", Report No. UMTA-MA-06-0100-83-2, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. Sept., 1983.

Upper Mississippi River Board of Public Health Engineers and Great Lakes Board of Public Health Engineers, "Standards for Sewage Works", Ontario Water Resources Commission, 1968.

Ward, W. H., "Ground Supports for Tunnels in Weak Rocks", Geotechnique, Vol. 28, No. 2, June, 1978, pp. 135-171.

Wickham, G. E., H. R. Tiedemann, and E. H. Skinner, "Ground Support Prediction Model - RSR Concept", Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Vol. 1, New York, NY, 1974, pp. 691-707.

Wisconsin Administrative Codes, Vol. 9, Ch. NR 110-Sewage Systems, Section 13-Sewer Design Criteria, Subsection (6)(e), 1976, p. 118.