



建设部普通高等教育
土建学科专业“十一五”规划教材

高等
学
校
教
材

地下工程 (修订本)

主 编 贺少辉
副主编 叶 锋 项彦勇 李兆平
主 审 张 弥 刘维宁

清华大学出版社
北京交通大学出版社

● 建设部普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材

地下工程 (修订本)

主 编 贺少辉

副主编 叶 锋 项彦勇 李兆平

主 审 张 弥 刘维宁

清华大学出版社

北京交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书结合近年来地下工程设计理论与施工技术的发展,较为系统地介绍了地下工程规划与设计的基本概念、基本原理、主要理论和方法,以及地下工程主要施工方法的工艺过程和技术要点,力求系统、全面,且重点突出、有所侧重。全书共分4篇14章,主要内容包括地下空间资源及开发利用价值、地下工程地质环境及围岩分级、交通地下工程规划、地下结构设计方法、地下结构计算理论、交通地下工程支护结构类型及参数设计、地下工程结构防水、地下水赋存及运动的基本理论、地下水对地铁等地下工程施工的影响、地下工程施工降水方案与设计计算、地下工程施工降水技术、地下工程施工降水引起的环境问题及对策、地下工程施工方法、地下工程施工监控量测等。

本书主要作为高等学校土木工程专业本科生和研究生地下工程课程的教材或参考书,也可供从事地下工程研究、设计和施工的人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

地下工程 / 贺少辉主编. — 修订本. — 北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2008.3

建设部普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-81082-688-4

I. 地… II. 贺… III. 地下工程-高等学校-教材 IV. TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第019857号

责任编辑:高振宇

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京东光印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印张:27.75 字数:609千字

版 次:2006年2月第1版 2008年3月第1次修订 2008年3月第2次印刷

书 号:ISBN 978-7-81082-688-4/TU·20

印 数:4 001~8 000册 定价:36.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

序

地下工程是北京交通大学的传统强势学科之一。在新世纪，面对国家工程建设的大发展，我校应该保持这一优势，且更应有所作为。为达此目标，有赖于两大方面的成就：一是优秀的教学质量，另一是突出的科研贡献。

地下工程是理论性和实践性俱强的学科。大学生要学好这门课程，我认为有三点最重要：一是教材，二是学生的兴趣和努力，三是教师的布道功夫，且这三者是关联和统一的。

教材是基础，是学生学习 and 教师组织教学的纲。教师教学好比牧羊。一本好的教材好比一片肥美的草原，能不能把学生引领到这片肥美的草原，那要看牧羊人的功夫；但前提是要有这片草原。

地下工程是土木工程专业重要的必修课程，我校的培养计划凸显了这一点。但由于客观的缘故，尚没有一本正式出版的教材，而国内地下工程的高等学校教材很少，且大多内容陈旧、过时，不适应地下工程科技进步和教学的需要。可喜的是，地下工程成为北京交通大学2004年出版基金资助的教材之一，且于2007年3月遴选为建设部“十一五”规划教材，这实为远见卓识之举。我期待着这本教材尽快付梓。

主编贺少辉教授（博士生导师）是北京交通大学优秀主讲教师，一直在本科生、研究生教学第一线，并作为地下工程课程群的负责人主持这一专业方向的教学。教研相长，他在科学研究和为重大工程提供技术服务方面，同样出色。贺少辉、叶锋、项彦勇、李兆平编写的这本教材贯彻了这样的编写原则：贯穿地下工程是由围岩和支护结构组成的结构体系这一主线，吸收地下工程学科领域的最新理论和工程技术成果，以基本原理、基本概念和基本方法的阐述为主，强调内容的系统性、完整性，在关键知识点上力求新、精、深。应该说，这是目前国内全面反映规范、标准修订成果和地下工程最新进展的一本地下工程学科的高等学校教材，也是本教材区别于其他同类教材的显著特点之一。值得大学生、研究生、从事地下工程规划、设计和施工的技术人员捧读。

作为主审之一，审读之余，很自然地为本教材的出版作了上述感言。

中国著名隧道与地下工程专家 张 标

2007年12月

于北京交通大学红果园

前 言

迄今为止,国内学者编著的地下工程学科的高等学校教材不出5种。与其他学科,尤其是一些土木工程基础学科相比,显得很不足,同时也与地下工程理论、技术和该学科的历史、发展极不相称。

20世纪50年代初,我国高等教育的学科、专业、课程的设置及教学要求学习前苏联和一些东欧国家的模式。大学生在校期间的专业课学得精、深,到工作岗位后很快就能独立担负起某一方面的技术工作。以近50年高等教育所积累的成功经验为基础,为适应国内外高等教育和经济社会发展的形势,自20世纪末至21世纪的最初几年,我国对高等教育进行了大规模的调整和改革,实行宽口径培养的模式,较多地压缩了专业课教学课时;但强调采用先进的教学手段和教育教学理念,对学生专业素质、技能的培养提出了新的、更高的要求。

本教材是为适应高等教育改革的新形势,并针对北京交通大学土木工程专业新的培养计划而编写的。教材的编写原则是:贯穿地下工程是由围岩和支护结构组成的结构体系这一主线,吸收地下工程学科领域的最新理论和工程技术成果,以基本原理、基本概念、基本方法的阐述为主,强调内容的系统性、完整性,在关键知识点上力求新、精、深。

最近几年,我国对地下工程学科领域的设计规范、标准作了全面修订,颁布实施了如下新的设计规范、标准:

- (1)《工程岩体分级标准》(GB 50218—94);
- (2)《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001);
- (3)《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2001);
- (4)《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005);
- (5)《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004);
- (6)《地铁设计规范》(GB 50157—2003);
- (7)《水工隧洞设计规范》(SL 279—2002);
- (8)《新建时速200公里客货共线铁路设计暂行规定》(铁建设函[2005]285号);
- (9)《京沪高速铁路设计暂行规定(上、下)》(铁建设[2004]157号)。

本教材完全做到了结合上述新修订的规范、标准编写,对规范、标准修订的新成果进行充分吸收并加以解释和阐述。同时,在地下工程施工方法方面,也反映了近年来城市(尤其是北京市)地铁车站、大断面隧道暗挖施工的成果。完全可以说,这是目前国内全面反映规范、标准修订成果和地下工程最新进展的一本地下工程学科的高等学校教材,也是本教材区别于其他同类教材的显著特点之一。

读者在读完、学生在学完本书内容后,可能有一个体会:我不仅了解了地下工程的基本概念、基本原理、基本方法,同时也会进行地下结构设计和指导地下工程施工。

众所周知,地下工程种类繁多,本教材实难面面俱到。在地下工程规划设计和支护参数

设计两部分内容,我们仅集中论述交通地下工程,这体现了内容有所侧重。

高等学校的根本任务之一是培养学生的创新能力。编写出具有创新精神的教材是实现这一根本任务的具体体现。本教材就是按照求反映最新成果和学术动态、求新的编写思路和内容框架的宗旨编写的,尽管它还有不尽完美之处。

本书由北京交通大学隧道与岩土工程研究所和北京地矿奥通建设工程有限公司的几位从事较长时间教学科研和工程设计施工工作的教师与高级工程技术人员集体编写。贺少辉教授任主编,叶锋教授级高级工程师(总工程师)、项彦勇教授、李兆平副教授任副主编;张弥教授、刘维宁教授任主审。绪论、第1、2、6、7章由贺少辉编著;第3、4、5章由项彦勇编著,贺少辉编著了这3章的部分内容;第三篇(包括第8、9、10、11、12章)由叶锋和贺少辉编著;第四篇(包括第13、14章)由李兆平编著。贺少辉负责全书的统稿。

两位主审提出了许多宝贵的修改意见,为本教材添光加彩,在此深表谢意。

本书得到北京交通大学教材出版基金资助,在此表示由衷的感谢。

由于本书是4位编著者合作的产物,又因主编水平有限,以及客观条件和时戒精力等限制,难以很好地履行上述基本思想,缺点与错误在所难免,希望广大读者不吝赐教。

作者通讯地址:北京市海淀区上园村3号北京交通大学土建学院 贺少辉

邮政编码:100044

E-mail: heshaohui1114@126.com

贺少辉

2008年2月

目 录

绪论	1
----	---

第 1 篇 地下空间资源及开发利用价值

第 1 章 地下空间资源及开发利用价值	7
1.1 地下空间利用的基本概念	7
1.1.1 地下空间的含义	7
1.1.2 地下空间利用的历史沿革	7
1.1.3 地下空间发展的宏观背景	11
1.2 地下空间资源的潜在与实际价值	12
1.2.1 地下空间资源	12
1.2.2 开发地下空间的战略意义	14
1.2.3 地下空间的城市功能	16
1.2.4 地下空间的开发价值与综合效益	17
1.3 地下空间的防灾及环境特性	19
1.3.1 地下空间抗御外部灾害的能力	19
1.3.2 地下空间的内部防灾要求	22
1.3.3 地下空间与生态环境	23
1.3.4 地下空间的内部环境要求	25
1.4 地下空间开发的法律与政策问题	27
1.4.1 法律问题	27
1.4.2 政策问题	28

第 2 篇 地下工程设计

第 2 章 地下工程地质环境及围岩分级 (类)	33
2.1 概述	33
2.2 围岩结构分类及其破坏特征	34
2.2.1 岩体结构分类	35
2.2.2 地下工程围岩失稳破坏性态	35
2.3 围岩的初始应力场	36
2.3.1 围岩初始应力场的组成——自重应力场和构造应力场	37
2.3.2 围岩初始应力场的变化规律与影响因素	37

2.3.3	围岩初始应力场的确定方法	40
2.4	围岩稳定性的影响因素及围岩分级因素与指标的选择	44
2.4.1	影响围岩稳定性的主要因素	45
2.4.2	分级(类)的因素指标及其选择	48
2.5	国内外主要地下工程围岩分级(类)标准	50
2.5.1	国内主要地下工程围岩分级(类)标准	51
2.5.2	国外主要围岩分类系统简介	66
第3章	交通地下工程规划	71
3.1	地下工程投资分析	71
3.2	交通地下工程规划	72
3.2.1	山岭隧道的规划	73
3.2.2	水底隧道的规划	78
3.2.3	城市地下铁道的规划	80
3.3	交通隧道的限界与构造形式	84
3.3.1	交通隧道结构的限界与净空要求	84
3.3.2	铁路隧道曲线地段断面加宽	86
3.3.3	交通隧道结构的构造形式	89
第4章	地下结构的设计方法	94
4.1	地下结构的设计内容与目的	94
4.2	地下结构设计方法	95
4.2.1	容许应力法	96
4.2.2	破损阶段法	96
4.2.3	极限状态法——按结构可靠度设计	98
4.2.4	支护设计的特征曲线法	102
4.2.5	支护结构的工程类比设计法	104
第5章	地下结构计算理论	105
5.1	地下结构的受力特点和力学计算模型	105
5.2	荷载结构模型中荷载的计算方法	107
5.2.1	荷载(作用)及其组合	107
5.2.2	主动围岩压力的计算	110
5.2.3	围岩被动反力的计算	116
5.2.4	地下水压力和浮力的计算	118
5.2.5	地震力的计算	119
5.3	地下结构内力的计算方法	121

5.3.1	荷载结构法	121
5.3.2	地层结构法	132
第6章 交通地下工程支护结构类型及参数设计		144
6.1	地下工程围岩与支护结构的共同作用	144
6.1.1	围岩特征曲线	144
6.1.2	支护结构的补给曲线(支护特征曲线)	146
6.1.3	围岩与支护结构的相互作用	148
6.2	支护结构的设计原则	149
6.2.1	对支护结构的基本要求	149
6.2.2	支护结构类型的选择和设计	150
6.3	铁路隧道支护类型的选择和设计参数	151
6.4	公路隧道支护类型的选择和设计参数	158
6.4.1	支护(衬砌)类型及其选择	158
6.4.2	分离式独立双洞隧道复合式衬砌设计参数	158
6.4.3	小净距及连拱隧道支护类型选择及设计参数	159
6.5	盾构隧道衬砌结构类型选择与设计参数	159
6.5.1	盾构隧道衬砌结构类型选择	159
6.5.2	横截面内轮廓和结构尺寸拟定	164
6.5.3	盾构法施工时特殊地段的衬砌	166
第7章 地下工程防水		168
7.1	地下工程防水的重要性	168
7.2	地下工程中常遇的地下水	168
7.3	地下工程防水设计原则和要求	170
7.3.1	设计原则	170
7.3.2	设计要求	171
7.4	地下工程防水等级和设防要求	172
7.4.1	地下工程的防水等级	172
7.4.2	地下工程的防水设防要求	173
7.5	地下工程防排水系统	175
7.6	地下工程防水层的材料	175
7.6.1	卷材防水层	175
7.6.2	涂料防水层	176
7.6.3	塑料防水板防水层	177
7.6.4	膨润土(纳米)板(毯)防水层	177

7.7	地下工程混凝土结构自防水	179
7.7.1	现浇混凝土结构早期裂缝控制设计指南	180
7.7.2	现浇混凝土结构早期裂缝控制施工指南	190
7.8	地下工程混凝土结构细部构造防水	195
7.8.1	变形缝防水	195
7.8.2	施工缝防水构造	196
7.8.3	后浇带防水	197
7.9	盾构法隧道结构防水	198
7.9.1	管片防水	198
7.9.2	管片接缝防水	199
7.10	北京地铁区间暗挖隧道复合衬砌可穿刺自愈合材料防水新技术与新工艺	204
7.10.1	地铁暗挖隧道复合衬砌防水技术及工艺现状	204
7.10.2	可穿刺、自愈合防水材料	206
7.10.3	地铁暗挖区间隧道复合衬砌可穿刺、自愈合材料防水新技术及新工艺	212
7.10.4	工程应用结论	223

第 3 篇 地下工程施工降水

第 8 章	地下水赋存及运动的基本理论	227
8.1	岩土中水的存在形式	227
8.1.1	气态水	227
8.1.2	结合水	227
8.1.3	重力水	228
8.1.4	毛细水	228
8.1.5	固态水	229
8.1.6	矿物水	230
8.2	岩土的水理性质	230
8.2.1	容水性	230
8.2.2	持水性	230
8.2.3	给水性	231
8.2.4	透水性	231
8.2.5	毛细性	232
8.3	地下水的赋存	232
8.3.1	包气带与饱水带	232
8.3.2	含水层与隔水层	233

8.3.3	不同埋藏条件的地下水	234
8.3.4	水文地质单元与水文地质边界	236
8.3.5	不同岩土介质中的地下水	238
8.3.6	实例:北京城近郊区水文地质概况	241
8.4	地下水的运移	243
8.4.1	地下水的渗流	243
8.4.2	渗流的基本定律	245
8.5	流向井的地下水运动	247
8.5.1	地下水的稳定井流	247
8.5.2	地下水的非稳定井流	250
8.5.3	地下水流向直线边界附近完整井的运动	260
8.5.4	井群干扰的计算	264
8.6	地下水的渗透破坏作用	265
8.6.1	流砂	265
8.6.2	管涌	266
8.6.3	突涌	266
第9章	地下水对地铁等地下工程施工的影响	268
9.1	设置止水帷幕的情况	268
9.2	不设置止水帷幕的情况	269
第10章	地下工程施工降水方案与设计计算	273
10.1	施工降水的特点、作用、原则和方法	273
10.1.1	施工降水的特点	273
10.1.2	施工降水的作用	275
10.1.3	施工降水方案制定的原则	276
10.1.4	施工降水方法的选择	276
10.2	制定施工降水方案应掌握的资料	276
10.2.1	地质、水文地质资料	277
10.2.2	基坑支护结构设计资料	277
10.2.3	工程场地周边的环境状况资料	277
10.3	水文地质勘察的内容及要求	278
10.3.1	勘察孔布置	278
10.3.2	抽水试验	278
10.3.3	水文地质参数计算	280
10.4	施工降水设计计算	282

10.4.1	降水参数的确定	282
10.4.2	基坑涌水量计算	284
10.4.3	单井出水能力计算	288
10.4.4	降水井数量及间距的确定	289
10.4.5	水位降深检验	289
第 11 章 地下工程施工降水技术		290
11.1	管井降水	290
11.1.1	管井降水及自渗降水的工作特性及适用条件	290
11.1.2	管井设计	291
11.1.3	管井施工	294
11.1.4	管井降水维护管理	300
11.1.5	工程实例	300
11.2	辐射井降水	303
11.2.1	辐射井降水原理及特点	305
11.2.2	辐射井设计	305
11.2.3	辐射井施工	307
11.2.4	工程实例	314
11.3	轻型井点降水	318
11.3.1	轻型井点降水原理及适用条件	318
11.3.2	轻型井点种类及特点	318
11.3.3	轻型井点布置	320
11.3.4	轻型井点施工	320
11.3.5	轻型井点降水维护管理	324
11.4	喷射井点降水	324
11.4.1	喷射井点降水原理及适用条件	324
11.4.2	喷射井点施工	325
11.5	真空管井降水	327
11.5.1	真空管井降水系统的工作原理及适用条件	327
11.5.2	真空管井降水设计	328
11.5.3	施工工艺	328
11.5.4	抽水系统的自动控制	329
11.5.5	工程实例	330
11.6	明排降水	334
11.6.1	明排降水的特点及适用条件	334

11.6.2	明排降水施工	335
11.7	降水监测与管理	335
11.7.1	水位观测	335
11.7.2	水量观测	336
11.7.3	出水含砂量监测	336
11.7.4	建、构筑物及地面沉降监测	337
第 12 章 地下工程施工降水引起的环境问题及对策		339
12.1	施工降水引发的地面沉降	339
12.1.1	地面沉降的发生机制	339
12.1.2	地质环境模式与地面沉降	341
12.1.3	地层的固结特性与地面沉降	342
12.1.4	地面沉降预测计算	343
12.1.5	降水引发地面沉降的一般规律	345
12.2	地下水回灌	345
12.2.1	回灌井的布置	345
12.2.2	回灌水质要求	346
12.2.3	管井回灌技术	347
12.2.4	回灌过程中经常出现的问题及处理方法	349
12.3	施工降水与水资源的再利用	351

第 4 篇 地下工程施工

第 13 章 地下工程施工方法		355
13.1	地下工程明挖法施工	355
13.1.1	放坡开挖基坑的设计与施工	355
13.1.2	有围护结构的基坑设计与施工	360
13.2	地下工程逆作法施工	383
13.3	山岭隧道新奥法施工	386
13.3.1	山岭隧道工程特点	386
13.3.2	隧道施工方法及其选择	387
13.3.3	新奥地利隧道施工法——岩石地层的新奥法施工	387
13.4	城市地下工程浅埋暗挖法施工	395
13.4.1	地铁区间隧道的浅埋暗挖法施工	395
13.4.2	地铁车站的浅埋暗挖法施工	400
13.4.3	城市地下工程暗挖法施工控制地层沉降的主要措施	407

绪 论

20世纪80年代,国际隧道协会提出“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的倡议,得到了广泛的响应。日本也提出了利用地下空间、把国土扩大10倍的设想。各国政府都把地下空间的利用作为一项国策来推进其发展,使地下空间利用获得了迅速的发展。地下空间的利用,已扩展到各个领域,发挥着重要的社会和经济效益。

地下空间开发利用的历史与人类的文明史相呼应,可以分为4个时代。

第一时代 从出现人类至公元前3000年的远古时期。人类原始穴居,天然洞窟成为人类防寒暑、避风雨、躲野兽的处所。

第二时代 从公元前3000年至5世纪的古代时期。埃及金字塔、古代巴比伦引水隧道,均为此时代的工程典范。我国秦汉时期(公元前221年至公元220年)陵墓和地下粮仓,已具有相当技术水准与规模。

第三时代 从5世纪至14世纪的中世纪时代。世界范围矿石开采技术出现。欧洲经历约1000年的文化低潮,建筑工程技术发展缓慢。

第四时代 从15世纪开始的近代与现代。诺贝尔发明黄色炸药,成为开发地下空间的有力武器。

现代地下工程发展迅速,建成了一些举世瞩目的地下工程。

以我国交通地下工程——隧道工程为例,50多年来,得到了很大的发展。截止到2003年,共建成铁路隧道6876座,总长度为3670 km,居世界第一;公路隧道(包括水底隧道)1972座,总长度为835 km,我国是世界上公路隧道数量最多的国家;截止到2007年10月,我国已有北京、天津、长春、上海、南京、武汉、广州、重庆、大连、深圳10个城市开通了22条城市轨道交通线路,运营里程为630 km,在建线路约为837 km。预计“十一五”期间将有超过1500 km轨道交通投入运行。

地下工程是指建造在岩体或土体中的工程结构物。广义来讲,它包括建造在地下的全部工程结构物;但是一般把矿井等地下构筑物排除,单指建造在地下的工业、交通、民用和军事建筑物。地下工程有多种分类方法,常见的有如下几种。

1. 按地下工程的功能分类

工业地下工程:包括各类地下工厂、车间、电站等。

交通地下工程:各种铁路和公路隧道、城市地下铁道、水底(跨江河、湖泊和海峡等)隧道。

民用地下工程:地下商业街(商场)、地下车库、影剧院、展览馆、体育馆、人民防空工程,以及一些公共建筑。

仓储地下工程:各种地下储库,包括油库、气库、液化气库、热库、冷库、档案库、物资库、放射性废料库。

市政地下工程:地下自来水厂、污水处理厂、给排水管道、热力和电力管线、煤气管道、通讯电缆管道等。

军事地下工程:地下指挥所、地下飞机库、核潜艇库、地下通信枢纽、人员和武器掩蔽所、军火和物资库等。

2. 按地下工程的存在环境分类

地下工程不是建造在岩体环境中,就是建造在土体环境中。因此,可以分为岩石地下工程和土体中的地下工程。

3. 按地下工程的建造方式分类

地下工程是通过采用不同的施工方法修建而成。按照大类的施工方法,可分为明挖地下工程和暗挖地下工程。

4. 按埋置的深度分类

各类地下工程埋藏在地下不同深度。按埋深,可分为深埋地下工程和浅埋地下工程。

地下工程是研究各种地下工程的规划、勘测、设计和施工的一门应用科学和工程技术,是土木工程的一个分支。

地下工程是由围岩和支护结构(衬砌)组成的结构体系,其设计和施工都受到地质及其周围环境条件控制。因此,必须对工程所处环境作周密调查,尤其重要的是工程地质和水文地质的勘查;因为地质资料的正确与否关系到整个工程的成败。地质调查工作应贯穿在整个工程建设的始终。隧道和地下工程的规划、设计和施工都是根据围岩分级(类)所规定的级(类)别进行的。围岩分级(类)是将错综复杂的各种围岩按一定的稳定性影响因素和指标进行聚类,是统一地质工作者和隧道与地下工程设计、施工人员对围岩认识的共同基础。按照不同设计阶段的任务和目的,围岩分级(类)可以分为围岩的初步分级(类)和围岩的详细分级(类)。对于地质勘查的内容,除一般技术要求外,还应考虑不同施工方法对地质勘查的特殊要求。

隧道与地下工程的永久支护结构称为衬砌。衬砌设计计算理论经历了若干个发展阶段。目前衬砌设计计算方法可以归纳为如下4类方法。

(1) 以工程类比法为主的经验法。它是以围岩分级为基础,以已建成工程的实际经验为样本,用概率统计的方法,制定出适应于各级(类)围岩的结构形式和衬砌尺寸。这种方法至今仍然被广泛采用。

(2) 信息反馈法。它是一种用测试数据反馈于设计的实用方法。通常以施工中隧道与地下工程断面的变形量测值为依据。对于用新奥法施工的锚喷衬砌或复合衬砌中锚喷支护,在施工中定期进行位移或收敛量测,可根据位移的绝对值或位移速率进行判断,了解支护是否适当和变形是否趋于稳定。但判断的基准值目前尚只能根据已成工程的实际经验和量测数据进行分析而定。这是当前隧道与地下工程设计与指导施工的主要方法。

(3) 作用-反作用模型。又称为荷载-结构模型,其特点是将衬砌视为承载的主体,围岩

作为荷载的来源和衬砌的弹性约束,当衬砌受到围岩主动压力作用时,将有部分衬砌向围岩方向变形而受到围岩的反作用力(即弹性抗力),以约束衬砌变形。局部变形理论(winkler)假定认为,围岩的抗力仅与该点的变形成正比。在假定抗力图形的基础上,可用结构力学方法进行计算。这一设计理论原则上适用于用传统矿山法施工的整体式衬砌,目前也广泛用于新奥法、盾构法施工的隧道衬砌与其他地下结构的设计计算。

(4) 连续介质模型。它也可称之为连续介质力学法,包括解析法和数值法。对于复合式衬砌的初期支护即锚喷支护,因其能和围岩紧密接触,从而使围岩和衬砌形成一个整体,共同承受由于进行开挖而释放的初始地应力的作用;因此必须采用连续介质力学的方法。数值法目前以有限元法为主,尚有加权残数法和边界元法等。

应该指出,地下工程的关键问题之一是施工方法的选择。而其施工方法的选择应以地质、地形、环境条件和埋置深度为主要依据,其中对施工方法有决定性影响的是埋置深度和地质条件。在满足使用条件下,修建地下结构的施工方法要达到技术上可行与经济上合理,就需要进行多方案的比选。对埋置较浅的工程一般可采用明挖法施工。根据地质条件和周围环境情况,明挖法可用敞口开挖、工字钢桩或钢板桩侧壁支护。近年来,在城市施工时为减少打桩产生的噪声和振动,常采用地下连续墙、钻孔桩或人工挖孔桩作侧壁支护减少明挖施工对地面的影响,也可采用盖挖逆作法施工。明挖法施工可降低造价,缩短工期,保证工程质量,当条件许可时,应优先选用。当地下结构埋深超过一定限度后,常采用暗挖法施工。暗挖法最初采用传统的矿山法。20世纪60年代提出了新奥法,此法是尽量利用围岩的自承能力,用柔性支护如锚喷支护控制围岩的变形及应力重分布,使之达到新的平衡,目前已用于修建各种用途的隧道与地下工程。对松散含水地层可采用盾构法施工,为减少地面的沉陷可采用泥水加压式盾构或土压平衡式盾构。在坚硬的岩石中开挖隧道,为提高机械化程度,可采用隧道掘进机(TBM),在软硬的复合地层中可采用混合型盾构。在修建城市地下管道或地道时,为减少对地面建筑物的影响,可采用顶管法施工。修建水底隧道除采用盾构外,20世纪初开始采用沉埋法,此法主要工序在地面上进行,避免了水下作业,优点显著,应用日益广泛。

目前,城市内为人民生活、生产、交通、储存、防灾等方面修建的地下工程日益增多,20世纪70年代以来,地下空间已被人们视作为一种自然资源。

最后应该指出,尽管近年来隧道和地下工程已经有了长足的发展,但由于围岩的性质十分复杂而且多变,人们对它的认识还很模糊;所以长期以来隧道与地下工程的设计和施工仍停留在以经验为主的水平上,对人力和物力的消耗与浪费都较大。今后应当加强地下工程地质环境研究和施工过程监测,制定出符合施工过程中围岩力学状态变化的计算模型和计算理论,并逐步由定值设计过渡到以可靠性理论为基础的概率极限状态设计,研究合理的和适应性广的支护衬砌的结构形式与施工方法;施工方面要进一步提高机械化和自动化水平,进一步改善劳动条件和提高施工效率。总之,只要不断地实践,不停地进行探索,一定会将隧道与地下工程的科学技术水平提高一步,促进隧道与地下工程在21世纪的新发展。