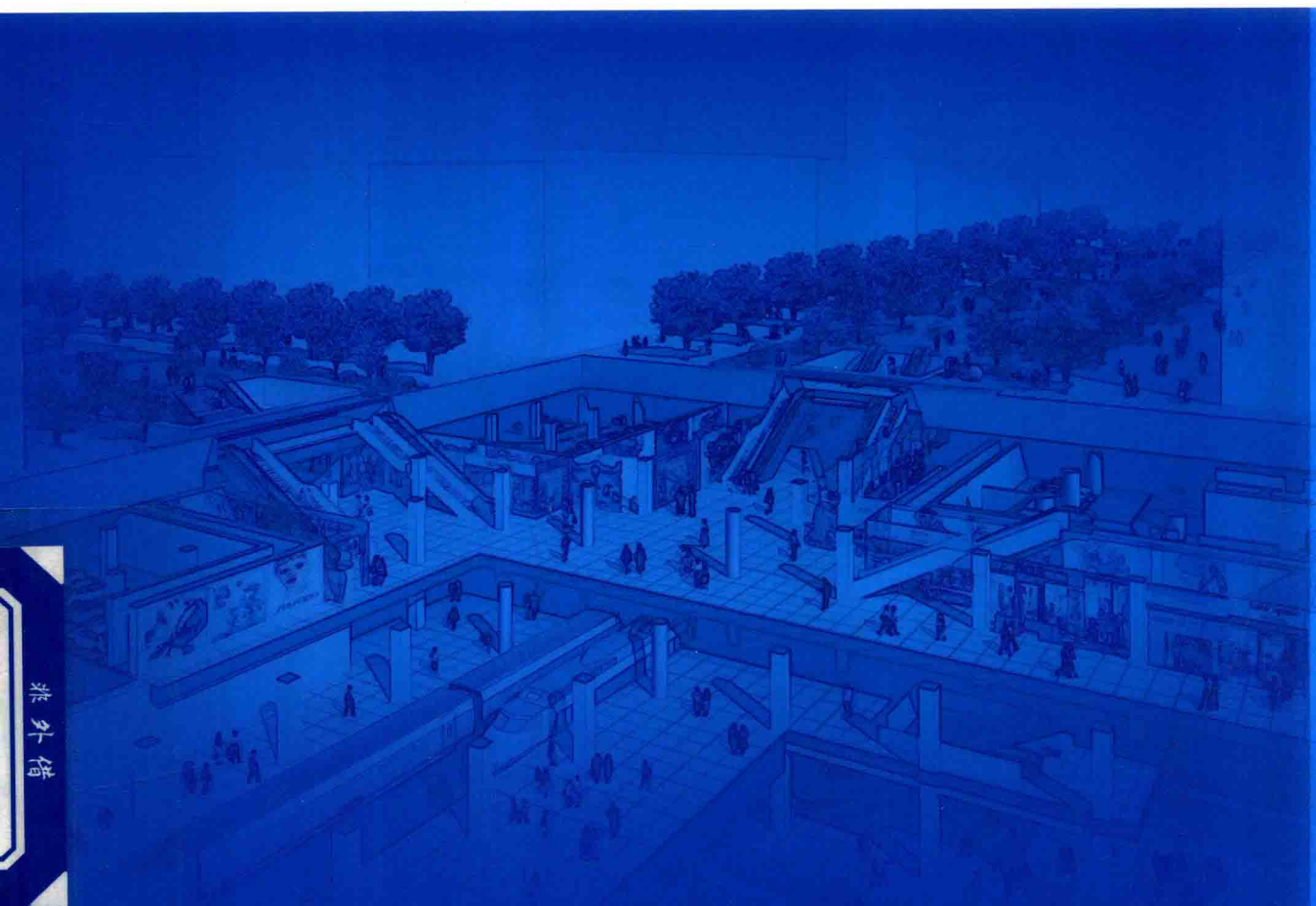


高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材

地下洞室工程

朱才辉 李宁 张志强 编著



非外借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材

地下洞室工程

朱才辉 李宁 张志强 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书结合新规范,着重从地下洞室工程的基本概念、基本理论和方法上介绍了其成熟的设计理念和成果。主要内容包括绪论、地下洞室的利用形态及基本设计理念、地下洞室围岩分级及围岩压力、水工隧洞基本设计技术、交通隧道基本设计技术等5章内容。涵盖了城市地下空间、铁路隧道、公路隧道、地铁、水工隧洞等多领域的地下洞室工程的结构设计基本理念。

本教材适用于岩土工程、城市地下空间工程、隧道工程、水利水电工程等专业的本科教学使用,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下洞室工程 / 朱才辉, 李宁, 张志强编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 11
高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-7217-1

I. ①地… II. ①朱… ②李… ③张… III. ①地下洞室—高等学校—教材 IV. ①TU929

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第271373号

书 名	高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材 地下洞室工程
作 者	DIXIA DONGSHI GONGCHENG 朱才辉 李 宁 张志强 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京合众伟业印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.75印张 373千字
版 次	2018年11月第1版 2018年11月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	49.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

20世纪80年代国际隧道协会(ITA)提出“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的口号,随后,我国钱七虎院士提出:“21世纪是地下空间开发利用的世纪”。目前,我国已将大力开发地下资源和空间作为一种国策执行,地下空间的利用程度也是一个国家综合国力的体现。对于承担高素质人才培养的工程类院校,除了有责任和义务传授地下洞室工程领域的设计、分析理论等基础知识,还应能启发学生理解这一领域的先进设计理念和科学的思维方法,为此,编著了《地下洞室工程》这本高等院校城市地下空间工程专业“十三五”规划教材。

本教材主要偏向于地下洞室工程支护结构的基础设计原理和基本理论。第1章绪论,由朱才辉编写,主要介绍地下洞室工程的发展趋势、地下洞室的特性及分类、地下洞室的工作环境特性及地下洞室结构设计特性;第2章介绍地下洞室的利用形态及基本设计理念,由朱才辉编写,主要包括生活和能源储备地下工程、城市地下空间工程、地下运输隧道工程;第3章介绍地下洞室围岩分级及围岩压力,由朱才辉编写,主要包括围岩分级方法、围岩压力的计算;第4章主要介绍水工隧洞基本设计技术,由李宁、张志强编写,包括水工隧洞工作特点、分类、布置与结构特点,水工隧洞的水力计算,水工隧洞衬砌结构和材料,水工隧洞的荷载及组合,有压圆形隧洞衬砌结构设计;第5章介绍了交通隧道基本设计技术,由朱才辉编写,主要包括公路和铁路隧道线路及断面设计、公路和铁路隧道结构构造、隧道支护结构计算原理等主要内容。

本教材编写单位及编写人员,在前期的教学、科研及工程咨询中积累了较为丰富的理论和工程经验,具有大量的工程背景知识,并且拥有多维度的专业背景,如岩土工程,水工隧洞,城市地下空间工程,地铁工程,铁路、公路隧道工程等各类专业。本教材在编写过程中参阅了大量专家和学者的著作、论文及相关规范,并汲取了其中一些重要成果,在此对所有同行及专家表示诚挚的谢意!西安理工大学土木建筑工程学院的李宁教授、张志强教授、李荣建教授

等提出了宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢！研究生兰开江、东永强、崔晨等为本教材的资料收集、插图绘制、文稿编排付出了辛勤劳动，亦在此表示感谢！

由于水平所限，书中难免有错误或疏漏之处，期望同行、专家及阅读本书的读者提出批评意见和建议，以便编者改正和完善。

编者

2018年春于西安理工大学

前言

第1章 绪论	1
1.1 地下洞室工程的发展趋势	1
1.1.1 地下洞室的发展历史	1
1.1.2 国外地下洞室利用特点	2
1.1.3 我国地下洞室发展过程及成就	3
1.1.4 地下洞室的未来发展趋势	4
1.2 地下洞室的特性及分类	5
1.2.1 地下洞室的特性及优、缺点	5
1.2.2 地下洞室的分类方法	6
1.3 地下洞室工作环境特性	7
1.3.1 岩体的地质特性	7
1.3.2 岩石的力学性质	9
1.3.3 岩体的工程性质	11
1.3.4 岩体的分级	13
1.4 地下洞室结构设计特性	14
1.4.1 支护系统设计理论的发展	14
1.4.2 支护系统的计算模型	17
1.4.3 地下洞室的结构设计内容	19
第2章 地下洞室的利用形态及基本设计理念	22
2.1 生活和能源储备地下工程	22
2.1.1 地下住宅	22
2.1.2 地下能源储藏库	23
2.2 城市地下空间工程	33
2.2.1 地下街及综合体	35
2.2.2 地下停车场	41

2.2.3	地下铁道	47
2.2.4	地下综合管廊和物流系统	59
2.2.5	地下能源供给设施	60
2.2.6	地下人防工程	64
2.3	地下运输隧道工程	65
2.3.1	铁路隧道	66
2.3.2	公路隧道	68
2.3.3	海峡隧道	70
2.3.4	水工隧洞	71
第3章	地下洞室围岩分级及围岩压力	73
3.1	围岩分级方法	73
3.1.1	基本分级方法及原则	73
3.1.2	铁路隧道围岩分级	79
3.1.3	公路隧道围岩分级	84
3.1.4	其他地下洞室围岩分级	89
3.2	围岩压力	91
3.2.1	影响围岩稳定的因素	91
3.2.2	围岩破坏机制	91
3.2.3	围岩压力计算	94
第4章	水工隧洞基本设计技术	109
4.1	水工隧洞工作特点及分类	109
4.2	水工隧洞的布置与结构特点	110
4.2.1	水工隧洞的洞线选择	110
4.2.2	水工隧洞洞身段横、纵断面	113
4.2.3	水工隧洞的进出口及渐变段	115
4.3	水工隧洞的水力计算	118
4.3.1	一般水力计算	118
4.3.2	高流速的防蚀设计	121
4.4	水工隧洞衬砌结构和材料	124
4.4.1	衬砌的作用	124
4.4.2	常见的衬砌材料	125
4.4.3	衬砌材料设计参数	128
4.4.4	混凝土衬砌强度及裂缝宽度计算	133
4.5	水工隧洞的荷载及组合	134

4.6	有压圆形隧洞衬砌结构设计	141
4.6.1	衬砌的初步拟定	141
4.6.2	混凝土衬砌设计	143
4.6.3	钢筋混凝土衬砌设计	145
第5章	交通隧道基本设计技术	150
5.1	隧道线路及断面设计	150
5.1.1	隧道位置的选择	150
5.1.2	隧道洞口位置的选择	158
5.1.3	隧道平、纵断面设计	160
5.1.4	隧道横断面设计	167
5.2	隧道结构构造	175
5.2.1	衬砌构造	175
5.2.2	洞门	186
5.2.3	明洞	191
5.2.4	附属建筑物	196
5.3	隧道支护结构计算原理	203
5.3.1	结构力学方法	203
5.3.2	岩体力学方法	219
5.3.3	信息反馈方法及经验方法	234
参考文献	243

当今人类正在向地下、海洋和宇宙开发。向地下开发可归结为地下资源开发、地下能源开发和地下空间开发 3 个方面。地下空间的利用也正由“线”的利用向大断面、大距离的“空间”利用进展。20 世纪 80 年代国际隧道协会 (ITA) 提出“大力开发地下空间, 开始人类新的穴居时代”的口号。顺应于时代的潮流, 许多国家将地下开发作为一种国策对待, 如日本提出了向地下发展, 将国土扩大 10 倍的设想。

地下洞室工程指的是在地面以下岩土体中修建各类地下建筑物或结构的工程, 一般情况下, 地下空间的纵向延伸较长, 横向剖面较小的地下线型洞室, 称为隧道 (洞); 而跨度较大、纵向延展度不大的地下“块状”空间, 称为洞室。天然形成的地下洞室主要有喀斯特溶洞、熔岩洞、风蚀洞、海蚀洞等; 人工形成的地下洞室有各种矿洞、工程建设需要开凿的地下洞室。在城市规划范围以内的地下洞室称为城市地下洞室。在城市以外山区岩层中开发的地下洞室称为山岭地下洞室; 在江、湖、河、海水下开发的地下洞室称为水下洞室。

1.1 地下洞室工程的发展趋势

1.1.1 地下洞室的发展历史

(1) 第一时代——原始时代 (人类出现至公元前 3000 年: 天然地下洞室穴居)。原始人类穴居, 天然洞窟成为人类防寒暑、避风雨、躲野兽的处所。亚洲、欧洲、美洲等地均发现穴居的遗迹。

(2) 第二时代——古代时期 (公元前 3000 年至 5 世纪: 陵墓建造)。随着社会生产力的进步, 人类地下空间的利用摆脱了单纯的居住要求。埃及金字塔、古代巴比伦引水隧道, 均为此时代的建筑典范。我国秦汉时期的陵墓和地下粮仓、秦始皇陵墓, 已具有相当技术水准和规模。最古老的隧道是古代巴比伦城连接皇宫与神庙间的人行隧道, 建在公元前 2160—公元前 2180 年间。古代使用原始工具挖掘, 速度最慢的例子是驱使 3 万奴隶挖掘, 每周进尺仅 75mm。我国最早的交通隧道位于今陕西汉中县, 称为“石门”隧道, 建于公元 66 年。

(3) 第三时代——中世纪时代 (5 世纪至 14 世纪: 陵墓和宗教需求)。世界范围矿石开采技术出现, 推进了地下工程的发展。欧洲地下空间利用基本处于停滞状态, 我国地下空间利用多用于建造陵墓和满足宗教建筑的一些特殊要求, 如北魏、隋、唐、宋、元等各

朝都建造了一些陵墓和石窟（云冈石窟、龙门石窟、敦煌莫高窟、麦积山石窟、响堂山石窟）等。此外，我国隋朝（7世纪）在洛阳东北建造了200多个总面积达420000m²的地下搁仓，最大的搁仓直径11m、深7m，可存量2500t以上；宋朝在河北建造的长约40km的军用地道等。

（4）第四时代——近代（15世纪开始至20世纪：隧道建造）。欧美产业革命期间，炸药、蒸汽机的发明和应用，成为开发地下空间的有力武器，地下洞室利用进入为社会服务的新时期。1613年建成英国伦敦地下水道；1681年修建了地中海比斯开湾长度为170m的连接隧道；1863年英国伦敦修建世界第一条城市地下铁道；1871年穿过阿尔卑斯山连接法国和意大利的公路隧道开通（长12.8km）。日本明治时期，隧道及铁路技术开始引进并得到发展。目前世界最长的汽车专用隧道是长16.3km的瑞士中部的圣哥达隧道，第一次使用了硝酸甘油炸药。

（5）第五时代——现代（20世纪后：大型地下交通、水利电力地下工程、城市地下公用设施和能源储备）。20世纪60、70年代，地下洞室主要用于建造各种交通隧道（公路隧道）、水工隧道、大型公用设施隧道和地下能源储库等；城市主要建造地铁、地下商业街（名古屋叶斯卡地下街、名古屋中央公园地下街）、地下停车场和地下管线等。20世纪70年代，我国修建了大量地下人防工程（哈尔滨地下疏散干道、南京人防工程），其中相当一部分目前已得到开发和利用，改建为地下街、地下商场、地下工厂和储藏库。20世纪80年代上海建成延安东路水底公路隧道，1985—1987年，上海建成黄浦江上游引水隧道一期工程。20世纪90年代以来，上海地铁1、2号线已相继开通。90年代后期至今，广州、深圳、南京等地相继开通地铁，南京、杭州、福州琅岐等正计划修建过江隧道。其中典型世界级的工程主要有：最长的日本青函隧道（全长53.85km，海底部分长23.3km）、处于海底部分最长距离的英法海底隧道（全长50.45km，海底部分长37.9km）；最长的公路隧道挪威—洛达尔隧道（全长24.51km）；最长的铁路隧道位于瑞士中部阿尔卑斯山区的戈特哈德铁路隧道，全长57km；最长的双孔公路隧道秦岭终南山特长公路隧道（全长18.04km）；最长的输水隧道纽约德拉瓦隧道（全长169km）；海拔最高的冻土隧道风火山隧道（位于海拔4909m，全长1338m）；最繁忙的两线过海隧道香港海底隧道；亚洲最长的陆上隧道乌鞘岭隧道（全长20.05km，右线及左线分别于2006年3月和8月正式建成通车）；居世界第二、亚洲第一的秦岭终南山公路隧道，长18.02km，被誉为“天下第一隧”。

1.1.2 国外地下洞室利用特点

现代地下工程发展迅速，各种典型工程不胜枚举。世界已有数百个城市修建了地下铁路；英法海峡隧道长50km，海底长度37km，历时7年建成；著名的公路隧道，如穿越阿尔卑斯山、连接法国和意大利的勃朗峰隧道和连通日本群马县和新泄县的关越隧道，它们的长度均超过10km。各类地下电站迅速增长，其中地下水力发电项目的数目，全世界已超过400座，其发电量达45亿W以上，世界已有55个国家的170座城市建有地铁。此外，城市地下洞室空间的开发和利用，在世界范围内也取得了巨大的发展，其主要特征如下。

(1) 大型建筑物向地下的自然延伸发展到复杂的地下综合体, 一些发达国家逐渐将地下商业街、地下停车场、地下铁道及地下综合管线工程等连为一体, 成为多功能地下综合体, 如加拿大多伦多 PATH 地下空间开发、日本新宿车站等。上述这种大型地下综合体, 基本上都具有以下特征。

1) 充分利用车站交通枢纽优势, 创造富有价值的商业空间, 方便人流与商业的联系, 构建有机的交通与商业综合体。

2) 强调地下与地上功能的有机复合, 提供集商业、艺术、文化娱乐于一体的购物天堂, 创造一个功能多元充满活力的城市空间。

3) 倡导行人优先的顺畅步行体系, 挖掘地下空间功能潜力, 对区域机动交通进行渠道化组织。

4) 地下空间与自然环境的有机融合, 巧妙引入阳光和绿色, 提升地下空间环境质量。

(2) 地下市政设施的建设从地下供、排水管网发展到地下大型供水系统, 地下大型能源供应系统, 地下大型排水及污水处理系统, 地下生活垃圾的清除、处理和回收系统以及地下综合管线廊道(共同沟), 如加拿大丘吉尔瀑布电站地下厂房(长 296m、宽 25m、高 47m)。

1.1.3 我国地下洞室发展过程及成就

我国的地下空间内工程在前期与世界的发展基本同步, 从近代时期后逐步落后。20 世纪后, 差距增大, 30—40 年代由于受外敌侵略, 以防空洞和地道为主; 60 年代主要以人防工程为主; 70 年代后期, 随着社会发展的需要, 主要致力于人防工程的平战结合, 公路隧道、地下商业街及地铁建设(北京地铁); 90 年代以后, 我国才真正走入城市地下空间利用的时期; 2000 年后, 在交通、商业、物流、仓储等方面进入了新的发展时期, 但规划、设计、施工和管理的水平还有待提高, 我国地下洞室开发和利用所取得的成就主要表现在以下几个方面。

(1) 居住空间。数千年前我们的祖先就在我国北方的黄土高原建造了许多供居住的窑洞和地下粮食储备工程, 至今仍有不少农民居住在不同类型的窑洞中。

(2) 人防工程。采取平战结合的方式, 既保证了战略效益, 又获得了社会效益和经济效益。

(3) 交通隧道工程。20 世纪 60 年代开始的大规模三线建设, 修建了为数众多的铁路、公路隧道。横穿万里长江的水下隧道也于 2004 年相继在南京和武汉破土动工。厦门、青岛、大连正在建设或即将建设海底隧道。据相关资料统计, 截至 2016 年, 我国拥有铁路隧道 14100 座, 总长 1.41 万 km, 预计 2020 年总量将达到 17000 座, 总长 2.0 万 km; 截至 2016 年, 我国拥有公路隧道 15181 条, 总长度约 1.40 万 km, 居世界第一。

(4) 城市地铁建设。自 1965 年在首都北京始建第一条城市地铁以来, 截至 2018 年, 我国已有 35 个城市开通地铁, 正在运行 114 条, 总里程达 5250km, 地铁车站总量达 2252 个; 在建地铁 120 条, 规划 2025 年以前通车的地铁 76 条。

(5) 水利水电建设。特别是大型地下水电站厂房的建设, 说明我国已具备开发大型或超大型地下空间的技术水平和能力。我国第一座水电站(1908—1912 年)是云南石龙坝

水电站 (240kW), 第一座梯级水电站 (1951 年) 是福建古田溪一级水电站 (装机 6.2 万 kW), 最早的坝内式厂房水电站 (1957 年) 是江西上犹江水电站 (装机 6 万 kW), 第一座自行设计建设安装的水电站 (1957—1960 年) 是浙江新安江水电站 (装机 66.25 万 kW), 首座百万千瓦级水电站 (1969 年) 是甘肃刘家峡水电站 (装机 116 万 kW), 第一个利用世界银行贷款兴建的大型水电站 (1984—1988 年) 是鲁布革水电站, 世界最大的水电站 (1994—2003 年) 是三峡水电站 (1820 万 kW), 其地下电站部分主厂房长 311.3m、高 87.24m、跨度为 32.6m。此外, 三峡库区水下博物馆也已建成。目前, 中国在建第二大水电站——白鹤滩水电站 (2013—2022 年), 初拟装机容量 1600 万 kW, 创造了多个世界第一, 即地下洞室群规模最大、圆筒式尾水调压井及无压泄洪洞规模最大、采用 289m 双曲拱坝使用低热混凝土。

(6) 城市地下商城、地下综合体等的建设。表明我国城市已经开始大规模开发和利用地下空间。例如, 上海静安公园地铁枢纽地下空间开发, 北京商务中心区地下空间开发, 北京中关村将投资数十亿元建设地下商城, 故宫拟建一个现代化地下展厅。可以预见, 随着经济、科技的发展, 我国地下空间的开发和利用将进入一个蓬勃发展的新时期。

1.1.4 地下洞室的未来发展趋势

(1) 综合化。地下洞室开发和利用的主要趋势是综合化, 其表现首先是城市地下综合体的出现, 其次是城市地下步行道系统和地下快速轨道系统、地下高速道路系统的结合, 以及地下综合体和地下交通换乘枢纽的结合; 再次是城市地上、地下空间功能既有区分, 更有协调发展的相互结合模式。

(2) 分层化与深层化。随着深层开挖技术和装备的逐步完善, 深层地下空间资源的开发已成为未来城市现代化建设的主要课题和国家综合国力的体现。在地下空间深层化的同时, 各空间层面分化趋势越来越强, 分层面的地下空间将人、车分流, 市政管线、污水和垃圾的处理分置于不同的层次, 各种地下交通分层设置。

(3) 城市交通与城际交通的地下化。城市交通和“高密度、高城市化地区”城市间交通的地下化, 将成为未来地下空间开发和利用的重点。

(4) 先进技术手段的不断成熟和应用。随着地下空间开发和利用程度不断扩展, 要求隧道开挖速度及开挖安全性越来越高, 先进技术应运而生, 如 TBM、盾构挖掘技术、微型隧道挖掘技术加速发展 (适用于在高层建筑、历史名胜古迹、高速公路和铁路以及河道的下边安设管道), GPS (卫星全球定位)、RS (遥感)、GIS (地理信息系统) 的 3S 技术在地下空间开发中的应用加强。钻爆法掘进中采用数字化掘进的趋势加强, 数字化自动控制准确定位施工, 开挖断面的超挖减少到最小并达到最优, 提高了开挖速度。地铁隧道断面减小, 成本降低, 线性电动机牵引的地铁列车减少了行走底架的尺寸, 地铁隧道截面积将减少一半以上, 从而降低地铁造价。

(5) 勘察、设计和施工的信息化整合。现代地下空间的勘察、设计和施工阶段将被整合成为一个统一的过程, 这个过程各个阶段的相互联系将借助信息技术实施统一管理。

(6) 市政公用隧道 (共同沟) 得到更广泛的应用和发展。随着城市和生活现代化水平的提高, 各种管线种类、密度和长度将快速增加, 易于维护检查的共同沟的发展成为

必然。

(7) 地下建筑的形态将向功能化、艺术化方向发展。由于不断增长的自动化和信息化技术在地下空间勘察、设计和施工中的应用,已有可能开挖几何形状复杂的地下空间实体,以满足建筑学的要求,将会出现一批具有多重空间功能、美感协调、能满足公共需求的地下空间建筑杰作,并将形成不同风格的地下空间建筑学派。

1.2 地下洞室的特性及分类

1.2.1 地下洞室的特性及优、缺点

1. 地下洞室特性

- (1) 环境特性:空间性、密闭性、隔离性、耐寒性。
- (2) 力学特性:耐压性、抗震性。
- (3) 物理特性:隔热性、恒温性、恒湿性、遮光性、难透性、隔音性。
- (4) 化学特性:组成地层的化学成分复杂,有可能与外界物质发生反应。

由结构物及其所处的环境而形成的构造特性,主要包括空间性(空间的有限性)、密闭性(埋设在封闭地层中)、隔离性(结构物间由于岩土的存在而相互隔离)、耐压性、耐寒性、抗震性,这些特性对不同的使用目的,有的是有利的,有的是不利的。因此,在规划和利用地下空间时应充分理解这些特性而加以有针对性地利用。

2. 地下洞室的优点

(1) 地面视觉不受影响。不影响地面自然景观,可修建地下建筑物;保护地面历史环境。

(2) 保留了地表面的开放空间。如城市中心的地下停车场、地面部分为花园草坪、城市中心多修地下通道而少修高架。

(3) 有效地土地利用。把能够置于地下的建筑物设于地下则地面土地可作其他用途。例如,地面:广场、道路、高层建筑;地下:停车场、地下街、地铁、地下室。

(4) 有效的往来和输送方式。在平面上,修建在地下的交通通道(地铁、地下通道、城市管网)对地表的障碍更小;在垂直距离上,附建于高层建筑之下的停车场,缩短了交通时间。

(5) 保护环境。覆土结构,恢复地面植被可保水,减轻城市排水系统压力,保持地下水位,不至于水土流失、进而发生塌陷;保护自然景观,改善水、空气质量。

(6) 节约能源、温湿恒定。地下具有恒温、恒湿功能,可储存能源;随着埋深的增加,地下处于相对稳定的温度和湿度状态。

(7) 防灾能力强。自然灾害:地震、飓风;战争防护:防爆炸、核战争。

(8) 隔离震动、噪声且不易受外部火灾的影响。

(9) 维修管理工作量少。

3. 地下洞室的缺点

(1) 视野和自然采光受到限制。

- (2) 进出和通行的限制。
- (3) 消耗能源较多。
- (4) 施工难度大，工程造价高。

1.2.2 地下洞室的分类方法

1. 按不同开挖方法分类

- (1) 开挖空间。
- (2) 开挖后覆土。
- (3) 明挖空间。

2. 按地下结构物与地表面的关系分类

- (1) 在建筑物上填土（一般高出地面）。
- (2) 埋设在地层中：平埋或利用倾斜地层，如图 1.2.2-1 所示。

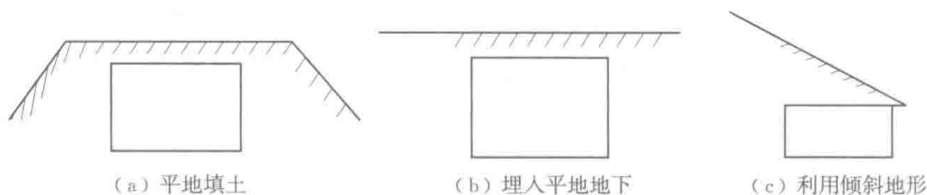


图 1.2.2-1 地下洞室结构与地表面的关系

3. 按开口部与地表面的关系分类

- (1) 密闭型。所有的开挖空间，如公路、铁路隧道、水工隧洞，地铁区间隧道，水底隧道，城市人防，地下街（综合体），地下停车场，地下储藏室，地下管廊，地下住宅，地下生产厂，地下废料处理储存室等。
- (2) 天窗型。可自然采光、感觉较好，如成都市顺城街地下街盐市口段。
- (3) 侧面开口型。适合于倾斜地层，如窑洞。
- (4) 半地下型。

4. 按照使用功能分类

- (1) 矿山巷道。包括各类矿物采掘后的洞室和输送矿石的巷道工程。
- (2) 地下储存洞室。如粮食、油料、水果、蔬菜、酒类、鱼肉食品的冷藏库及核废料储存等。
- (3) 水工洞室。如水力发电站的各种输水隧道、为农业灌溉开凿的输水隧洞以及给水排水隧洞、水电站地下厂房、地下抽水蓄能电站、地下水库等。
- (4) 地下工厂。如水力或火力发电站等各种轻重工业地下厂房、地下核电站、地下火电站等。
- (5) 地下民用与公共建筑。如地下商场、图书馆、体育场馆、展览馆、影剧院、医院、旅馆、餐厅、住宅及其综合建筑体系——城市地下街道等。
- (6) 地下交通工程。如各种公路和铁路隧道、城市地铁、地铁站及水底隧道等。

(7) 公用和服务性地下工程。如地下自来水厂、地下污水处理厂、给排水管道及煤气、供电、通信管线的综合工程等。

(8) 地下军事工程和人防工程。如各种野战工事、指挥所、通信枢纽、人员和武器掩蔽所、疏散干道、医院、救护站及大楼、防空地下室军火和物资库等。根据“以战为主、平战结合”的原则，这些建筑物平时可用作办公室、会议室、工厂仓库、食堂和招待所等。

(9) 地下市政工程。如给排水工程、污水、管路、线路、废物处理中心等。

(10) 国防地下工程。如飞机库、舰艇库、武器库、弹药库、作战指挥所、通信枢纽、军医院和各类野战工事以及永备筑城工事等。

5. 按洞壁受压情况分类

可分为有压洞室、无压洞室。

6. 按断面形状分类

可分为圆形、矩形、城门洞形、椭圆形及其他异形。

7. 按与水平面关系分类

可分为水平洞室、斜洞、垂直洞室（井）。

8. 按介质类型分类

可分为岩石洞室、土洞。

9. 按应力情况分类

可分为单式洞室、群洞。

1.3 地下洞室工作环境特性

地下洞室工程工作环境是指地下结构所赋存的岩土环境，包括地层特征、地下水状况、开挖地下洞室前就存在于地层的原始应力状态、地温梯度等。地下洞室工程在修建之前，需要通过工程地质调查测绘，查明隧道所处位置的工程地质和水文地质条件、施工和运营对环境保护的影响，为规划、设计、施工提供所需的勘察资料，并对存在的岩土工程问题、环境问题分析评价，提出合理的设计方案和施工措施，从而使地下洞室工程经济合理和安全可靠。为了给地下洞室的结构提供一套科学、简便的设计原则和指南（或规范），首先需要深入了解地下洞室所赋存的岩土环境的特性，了解岩土体的地质特性、力学特性、工程特性，为地下洞室的围岩分级、围岩压力计算和支护设计理论提供研究基础。

1.3.1 岩体的地质特性

地下洞室基本处在二次围岩应力场中，也就是洞室开挖后在初始应力场基础上应力重分布后的应力场，而岩体的初始应力主要是由于岩体的自重和地质构造作用和地质地温作用引起的。地温一般在深部岩体中作用才明显。初始应力场（又称原始地应力场）泛指由

于岩体的自重和地质构造作用，在洞室开挖前岩体中就已经存在的初始静应力场，其包括自重应力场和构造应力场。

1. 自重应力场

设岩体为均一连续半无限体，地面为水平。在距离地表深度 z 处取出一单元体（图 1.3.1），其上作用的应力为

$$\begin{cases} \sigma_z = \gamma H = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \\ \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_z = \lambda \sigma_z \end{cases} \quad (1.3.1)$$

式中 γ_i ——第 i 层岩体的容重；

H_i ——第 i 层岩体的厚度；

μ ——计算应力处岩体的泊松比，大多数岩石的泊松比 μ 在 0.15~0.35 范围内变化；

λ ——侧压力系数。

因此，在自重应力场中，水平应力总是小于垂直应力。深度对初始应力状态有着显著的影响，随着深度的增加，地应力是线性增大的。当地应力增大到一定数值后，围岩将处于塑性状态。随着深度的增加， μ 值趋近于 0.5，即与静水压力相似，此时围岩接近流动状态，初始应力场各应力分量趋于相等，即

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma H \quad (1.3.2)$$

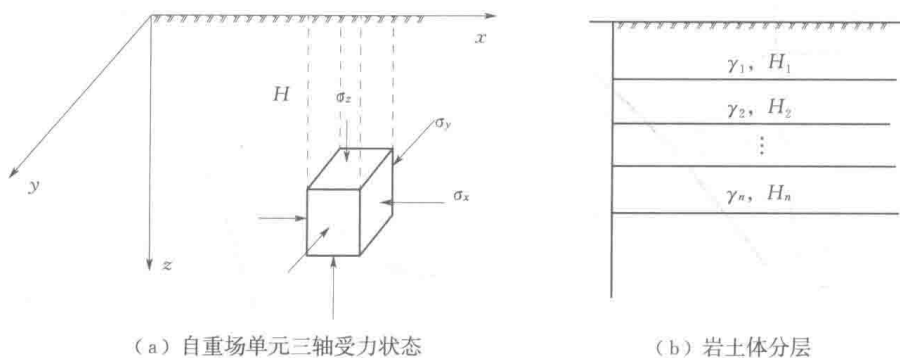


图 1.3.1 初始应力场（自重场）

2. 构造应力场

由于构造运动的作用，使得岩体内积存了一定的应力，称它为构造应力。当岩体再次受到新的破坏性扰动时，构造应力可能一部分或全部地释放出来，或者由于岩体的流变性质，在相当长的时间内，也会部分地把积存的能量释放出来，这时构造应力就指残余应力而言。地质力学把构造体系和构造形式在形成过程中的应力状态称为构造应力场，它是动态的。我国大陆初始应力场的变化规律大致可以归纳为以下几点。

(1) 地质构造形态不仅改变了重力应力场，而且除以各种构造形态获得释放外，还以各种形式积蓄在岩体内，这种残余构造应力将对地下工程产生重大影响。

(2) 水平应力有明显的区域性。大部分地区的地层属一般构造应力区,有少数地区属低构造应力区。对深度 H 在 100~200m 范围内岩体的初始应力,可分为 3 个等级:高构造应力区,水平应力大于 15MPa;一般构造应力区,水平应力在 5~15MPa 内;低构造应力区,水平应力小于 5MPa。

(3) 水平主应力具有明显的各向异性。在我国大部分地区,最大水平主应力约为最小水平主应力的 1.4~3.3 倍。

(4) 水平应力大多数为压应力,且随深度增加而增大,而且水平应力普遍大于垂直应力。

1.3.2 岩石的力学性质

1. 岩石的强度性质

岩石的强度是指它抵抗各种力的作用而不被破坏的能力(包括抗压、抗拉、抗剪强度)。影响岩石强度的因素如下。

(1) 岩石构造—力学性质因素,包括岩石的组成、构造、组织、非均质性、各向异性、含水量等。

(2) 试验工艺方面的因素,包括试件端部的接触条件、试件尺寸及其形状、加载速度。

2. 单向应力状态下岩石的变形特征

(1) 单轴压缩时应力—应变曲线。图 1.3.2-1 所示为单轴压缩时应力—应变曲线: A 表示凸向应力轴的形状—应变软化, B 表示线弹性特征, C 表示凸向应变轴的形状—应变硬化。将其不同阶段的应力—应变曲线进行分析,可得到岩石的初始切线模量 E_0 、平均切线模量 E_c 、平均割线模量 E_s 。

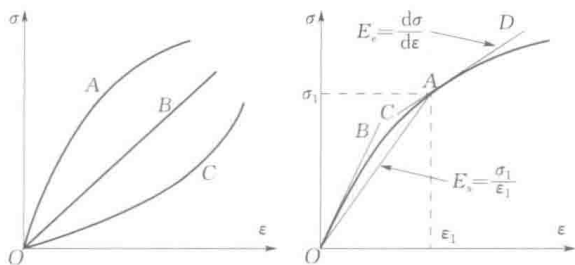


图 1.3.2-1 单轴压缩时应力—应变曲线

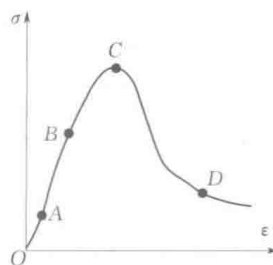


图 1.3.2-2 应力—应变全过程曲线

其侧向应变和轴向应变可表示为

$$\epsilon_x = \epsilon_y, \mu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}, \mu = -\frac{\epsilon_{x2} - \epsilon_{x1}}{\epsilon_{z2} - \epsilon_{z1}} \quad (1.3.2-1)$$

式中 $\epsilon_{x1}, \epsilon_{x2}$ ——垂直于轴向应力 σ_1, σ_2 方向的横向应变;

$\epsilon_{z1}, \epsilon_{z2}$ ——平行于轴向应力 σ_1, σ_2 方向的轴向应变。

岩石的横向变形常见 4 种情况: ① $\epsilon_x = \epsilon_y$, 且 $\epsilon_x + \epsilon_y < \epsilon_z$, 岩石是均质而连续的; ② $\epsilon_x \neq \epsilon_y$, 且 $\epsilon_x + \epsilon_y < \epsilon_z$, 岩石是非均质且连续的; ③ $\epsilon_x = \epsilon_y$, 且 $\epsilon_x + \epsilon_y > \epsilon_z$, 岩石不但有压缩变形, 还有剪切错动; ④ $\epsilon_x \neq \epsilon_y$, 且 $\epsilon_x + \epsilon_y > \epsilon_z$, 岩石同时有压缩变形、侧向变形