



地下工程

UNDERGROUND ENGINEERING

徐 辉 李向东 主编



 武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

地 下 工 程

徐 辉 李向东 主 编

武汉理工大学出版社

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设计与施工的基本概念、基本原理、主要方法。全书共分8章,主要内容包括围岩分级与经验类比设计、围岩压力理论、地下工程施工、地下工程支护结构设计与计算、地下工程降水与防水设计、地下工程的数值计算方法、地下工程的病害与防治。

本书主要作为高等学校土木工程专业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。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程/徐辉,李向东主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2009.8

ISBN 978-7-5629-2997-0

I. 地… II. ①徐… ②李… III. 地下工程 IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 153940 号

出版发行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

印 刷 厂:湖北睿智印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.5

字 数:417 千字

版 次:2009 年 8 月第 1 版

印 次:2009 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:24.00 元

凡使用本教材的教师,可通过 E-mail 索取电子教案或邮件包。

E-mail: xuhui1968@163.com

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87394412 87383695 87384729 87397097(传真)

前 言

随着社会生产力的发展,人口快速增长,城市化进程也在不断加剧。由于城市人口密度的增加和城市建设的扩容,可利用的地面空间越来越趋于紧张,城市建设对土地需求的增长与地面土地资源日益紧张之间的矛盾日益突出。因此,开拓新的生存空间,已成为城市建设者们的一项重要研究课题。

地下空间是迄今尚未被充分利用的一种资源。从拓展人类生存空间的意义上看,合理开发与利用城市地下空间以满足未来城市发展的需要,是解决城市发展与土地资源紧张矛盾的最现实的途径,对地下空间的开发利用将成为 21 世纪的重大技术领域。为适应大规模地下空间开发利用对高级技术人才的需要,近年来,许多高校为土木工程专业陆续开设了地下工程的课程,希望通过本课程的学习,使学生了解或掌握地下工程设计、施工、养护的基本原理和方法,为以后从事相关的工作奠定良好的基础。本书正是为了适应我国高等学校土木工程专业教育的这一发展和变化而编写的。

本书在编写过程中,参考了高等学校土木工程专业指导委员会编制的《地下建筑结构》教学大纲以及近年来国内出版的有关地下工程的教材及专著。本书虽然是为土木工程专业的本科生编写的,但也可供从事地下工程专业的技术人员参考。

书中的第 3、4、5、6、7 章由徐辉编写,第 1、2、8 章由李向东编写。由于地下工程涉及的知识面广,内容庞杂,目前在教学内容的选择上,还存在着仁者见仁、智者见智的状况。尽管我们在本书正式出版前,曾以讲义的形式在本科生教学中进行了使用和修改,但仍存在错误和不足之处,敬请读者批评指正。

本书在编写过程中,参阅了许多学者的著作,并吸纳了其中的一些成果,在此对这些著作的作者表示诚挚的谢意。

感谢武汉理工大学出版社对此书出版给予的大力支持。

编 者

2009 年 4 月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 地下空间的开发与利用	(1)
1.1.1 地下空间发展的宏观背景	(1)
1.1.2 地下空间的城市功能	(2)
1.1.3 地下空间的开发价值与综合效益	(3)
1.1.4 地下空间的分类	(5)
1.2 地下工程的结构体系	(5)
1.2.1 围岩结构及其破坏特征	(6)
1.2.2 地下工程的支护结构形式	(7)
1.3 地下工程的特点	(10)
1.4 地下工程的设计与施工	(11)
第 2 章 围岩分级与经验类比设计	(14)
2.1 岩体结构简介	(14)
2.1.1 岩体的结构类型	(14)
2.1.2 结构面类型与特征	(15)
2.1.3 岩体结构面的统计	(16)
2.1.4 岩体结构力学特征	(18)
2.2 围岩分级与初期支护设计	(23)
2.2.1 围岩分级概述	(23)
2.2.2 Q 系统围岩分级与经验设计	(24)
2.2.3 我国公路隧道围岩分级方法	(30)
第 3 章 围岩压力理论	(38)
3.1 原岩应力	(38)
3.1.1 围岩初始应力场的组成	(38)
3.1.2 围岩初始应力场的变化规律	(39)
3.1.3 确定原岩应力的方法	(41)
3.2 围岩应力与变形的线弹性分析	(44)
3.2.1 无衬砌圆形洞室的围岩应力与变形	(45)
3.2.2 围岩在衬砌抗力作用下的应力与位移	(47)
3.2.3 开挖面的空间效应	(48)
3.2.4 非圆形洞室的围岩应力	(49)
3.2.5 无衬砌洞室的最佳形状	(51)
3.3 围岩应力与位移的弹塑性分析	(52)
3.3.1 轴对称条件下围岩应力的弹塑性分析	(53)

3.3.2	$\lambda \neq 1$ 时圆形洞室塑性区边界的近似计算	(55)
3.3.3	围岩塑性位移的计算	(56)
3.4	围岩压力	(56)
3.4.1	变形压力的计算	(58)
3.4.2	松动压力的计算	(60)
第4章 地下工程施工		(64)
4.1	地下工程明挖法施工	(64)
4.1.1	放坡开挖基坑的施工	(64)
4.1.2	有围护结构的基坑施工	(67)
4.2	地下工程逆作法施工	(74)
4.2.1	逆作法的优缺点	(74)
4.2.2	逆作法的适用条件	(75)
4.2.3	逆作法施工的难点	(75)
4.2.4	逆作法的应用现状	(75)
4.2.5	地铁车站的盖挖逆作法施工	(76)
4.3	隧道新奥法施工	(77)
4.3.1	新奥法概述	(77)
4.3.2	新奥法施工方法	(78)
4.3.3	施工中可能发生的问题及其对策	(83)
4.4	围岩预支护(预加固)	(84)
4.4.1	超前锚杆	(84)
4.4.2	管棚	(85)
4.4.3	超前注浆小导管	(86)
4.4.4	超前深孔帷幕注浆	(88)
4.4.5	水平旋喷预支护	(90)
4.4.6	机械预切槽法	(90)
4.5	不良地质条件下隧道施工	(91)
4.5.1	概述	(91)
4.5.2	膨胀土围岩	(92)
4.5.3	黄土	(94)
4.5.4	溶洞	(95)
4.5.5	坍方	(97)
4.5.6	松散地层	(99)
4.5.7	流沙	(100)
4.5.8	岩爆	(100)
4.5.9	高地温	(101)
4.5.10	瓦斯地层	(102)
4.6	隧道掘进机施工	(105)
4.6.1	掘进机的破岩机理	(105)
4.6.2	隧道掘进机施工配套的支护形式	(105)

4.7 盾构法施工	(106)
4.7.1 盾构法施工概貌及适用范围	(107)
4.7.2 盾构选型	(108)
4.7.3 盾构法施工	(108)
4.8 非开挖顶管法	(110)
4.8.1 概述	(110)
4.8.2 顶管工程设计方法	(111)
4.8.3 顶管法施工关键技术	(113)
4.9 沉管法	(116)
4.10 地下工程施工监控量测	(118)
4.10.1 概述	(118)
4.10.2 地下工程施工主要监测项目	(119)
4.10.3 监测资料的整理分析与反馈	(123)
4.11 新奥法工程实例	(126)
4.11.1 工程地质和水文地质概况	(126)
4.11.2 大瑶山隧道设计概况	(127)
4.11.3 大瑶山隧道施工概况	(127)
4.11.4 量测工作	(128)
第5章 地下工程支护结构与计算	(130)
5.1 轴对称条件下的锚喷支护结构	(130)
5.1.1 解析计算	(130)
5.1.2 图解方法	(135)
5.2 隧道衬砌受力计算	(138)
5.2.1 隧道衬砌受力分析	(138)
5.2.2 半衬砌结构计算简图	(141)
5.2.3 直墙式衬砌结构计算简图	(142)
5.2.4 曲墙式衬砌结构计算简图	(143)
5.2.5 隧道洞门计算	(144)
5.2.6 衬砌截面强度验算	(146)
5.3 盾构隧道的设计与计算	(147)
5.3.1 盾构隧道衬砌的基本类型及管片拼装	(147)
5.3.2 盾构几何尺寸的选定及盾构千斤顶推力计算	(148)
5.3.3 内力计算与管片结构设计	(149)
5.4 顶管壁后土体稳定验算	(156)
5.4.1 沉井支护工作井壁后土体稳定验算	(157)
5.4.2 钢板桩支护工作井壁后土体稳定验算	(158)
5.5 基坑支护设计计算	(160)
5.5.1 概述	(160)
5.5.2 重力混凝土挡墙设计	(162)
5.5.3 支护桩墙设计	(166)

5.5.4	支护系统设计	(173)
5.5.5	土层锚杆设计	(177)
5.5.6	土钉墙支护结构设计	(179)
第6章 地下工程降水与防水设计		(183)
6.1	地下工程降水与防水重要性	(183)
6.2	地下水的类型及性质	(183)
6.2.1	地下水的基本类型	(183)
6.2.2	地下水的基本性质	(184)
6.3	地下工程降水设计	(185)
6.3.1	地下工程降水方法	(185)
6.3.2	降水工程的平面布置	(186)
6.3.3	基坑总排水量计算	(187)
6.3.4	单井最大出水量计算	(189)
6.3.5	井点间距计算	(189)
6.3.6	降深与降水预测	(189)
6.3.7	降水观测	(191)
6.3.8	井点管拔除	(191)
6.4	地下工程防水设计	(191)
6.4.1	设计原则	(191)
6.4.2	设计要求	(192)
6.4.3	地下工程防水等级与设防要求	(192)
6.5	地下工程防水材料	(195)
6.5.1	卷材防水层	(195)
6.5.2	涂料防水层	(195)
6.5.3	塑料防水板防水层	(196)
6.5.4	膨润土板(毯)防水层	(197)
6.6	地下工程混凝土结构防水	(197)
6.6.1	变形缝防水	(197)
6.6.2	施工缝防水构造	(199)
6.6.3	后浇带防水	(200)
第7章 地下工程的数值计算方法		(202)
7.1	工程数值分析方法分类与比较	(202)
7.1.1	引言	(202)
7.1.2	工程数值分析方法分类	(203)
7.1.3	弹性力学分析与连续介质数值分析方法比较	(204)
7.2	有限差分法(FDM)及程序简介	(204)
7.2.1	理论基础与差分方式	(204)
7.2.2	有限差分程序FLAC简介	(206)
7.3	有限元法(FEM)及程序简介	(208)
7.3.1	理论基础与求解思路	(208)

7.3.2	有限元法概述	(208)
7.3.3	有限元法在地下工程中的应用简介	(209)
7.4	边界单元法(BEM)程序简介	(214)
7.4.1	概述	(214)
7.4.2	边界单元法程序简介	(214)
7.5	离散单元法(DEM)程序简介	(215)
7.5.1	概述	(215)
7.5.2	离散单元法程序简介	(215)
第8章	地下工程的病害与防治	(217)
8.1	地下工程病害概况	(217)
8.1.1	病害概况	(217)
8.1.2	病害防治	(218)
8.2	地下工程水害整治	(219)
8.2.1	水害的种类及其危害	(219)
8.2.2	水害的成因	(219)
8.2.3	运营过程中的水害整治	(220)
8.3	地下工程衬砌裂损整治	(221)
8.3.1	衬砌裂损类型	(222)
8.3.2	衬砌裂损的描述与观测	(223)
8.3.3	衬砌裂损的预防和整治	(225)
8.4	地下工程的冻害	(227)
8.4.1	隧道常见的冻害种类	(228)
8.4.2	冻害的成因	(229)
8.4.3	冻害的防治	(229)
8.5	衬砌腐蚀	(231)
8.5.1	衬砌物理性腐蚀	(231)
8.5.2	衬砌化学性腐蚀	(232)
8.5.3	环境水对混凝土侵蚀的判定标准	(233)
8.5.4	衬砌腐蚀的防治措施	(233)
参考文献	(237)

第 1 章 绪 论

1.1 地下空间的开发与利用

地球表面以下是一层很厚的岩石圈,岩层表面风化为土壤,形成不同厚度的土层,覆盖着大部分的陆地。岩层和土层在自然状态下都是实体,在外部条件作用下才能形成空间。在岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的空间称为地下空间。天然形成的地下空间,例如,在石灰岩山体中由于水的冲蚀作用而形成的空间,称为天然溶洞;在土层中存在地下水的空间称为含水层。人工开发的地下空间包括利用开采后废弃的矿坑和使用各种技术挖掘出来的空间。

建造在岩层或土层中的各种建筑物,是在地下形成的建筑空间,称为地下建筑。地面建筑的地下室部分,也是地下建筑;一部分露出地面,大部分处于岩石或土壤中的建筑物和构筑物称为半地下建筑。地下构筑物一般是指建在地下的矿井、巷道、输油或输气管道、输水管道、水库、油库、铁路和公路隧道、城市地铁、地下商业街、军事工程等。地下建筑物和地下构筑物一般统称为地下工程或地下设施。

1.1.1 地下空间发展的宏观背景

城市地下空间利用是城市发展到一定阶段而产生的客观要求。同时,一个国家或城市所处的自然地理环境和地缘政治环境对其开发利用地下空间的动因、重点、规模、强度等都有一定的影响。这些因素构成地下空间发展的背景和条件。例如,日本虽然经济发达,但国土狭小,人口众多,资源短缺,城市空间非常拥挤,因而在 20 世纪 50—80 年代,日本结合城市改造进行立体化的再开发,大量开发利用了城市地下空间。一些西欧和东欧国家在 20 世纪后半叶的冷战时期,为了防止在欧洲和两大阵营之间可能发生的大规模战争中受到袭击或波及,曾一度大规模修建地下民防工程,并成为这些国家城市地下空间利用的主体。瑞典等北欧国家缺少能源,故利用优越的地质条件,大量建造各类地下储油库,建立国家的石油战略储备,同时还在地下空间中储存热能、冷能、机械能、电能等多种能源。加拿大冬季漫长,气候寒冷,冰雪给城市生活造成很大不便,因此各大城市在建地下铁路的同时,大量建造地下步行道,进而形成大面积的地下商业街。这些情况表明,各国城市地下空间的发展,既符合城市发展的一般规律,又有各自的背景和条件。从我国国情出发,这种宏观背景可概括为以下 6 个方面内容。

(1)人口背景。2000 年我国人口为 12.6 亿人,占世界总人口的 22%,其中城镇人口为 4.56 亿人。预计到 2030 年前后全国人口开始零增长,届时将达 16 亿人;城镇人口按占 60% 计,将达到 9.6 亿人。这样的人口形势不但是生态空间的沉重负担,对以城市为主的生活空间的压力更大。在人口不断增多,生存空间日益缩小的情况下,地下空间能开拓新的生存空间,为城市发展提供充分的后备空间资源。在我国,这一资源还远没有被开发,其潜力是十分巨大的,比开发海下空间和宇宙空间要容易得多,现实得多。

(2)土地资源背景。我国虽幅员辽阔,但平原和耕地较少,人均耕地面积仅为世界平均水

平的 1/4,土地承受的人口负荷相当沉重,不得不以占世界 7%的耕地养活占世界 22%的人口。能够为城市发展提供的土地更为有限,这就决定了城市空间的拓展只能在不增用或少增用土地的前提下进行,这也是城市地下空间发展的重要背景。

(3)水资源背景。我国是缺少水资源的国家,人均水资源量为 2730m^3 ,列世界第 88 位,且分布不均。城市缺水相当严重,有一半城市不同程度缺水,其中严重缺水的有 108 座,许多大城市的发展受到水资源缺乏的制约。在人类力量尚无法改变气候条件的情况下,除节约用水外,只能是把丰水期多余的水储存起来供枯水期使用。地面上的水库虽然可用于储水,但要占用土地,而且蒸发和渗漏损失较大。地下空间为大量储水提供了安全、有效、方便的条件。

(4)能源背景。我国的能源不够丰富,有些能源已接近枯竭,如石油、天然气,都不得不花费很高的代价从西部向东部输送。因此城市的现代化只能在节约能源的条件下实现。此外,还可以利用地下空间把收集起来的天然能源(如空气和水中的热能、冷能及太阳能、风能等)储存起来,供能耗高峰时使用。

(5)环境背景。城市建设是人类与自然环境相互作用最为密切的人类活动,因而在城市迅速发展的同时,也出现了“建设性破坏”,对城市环境造成不同程度的污染,主要有大气污染、水污染、噪声污染等。城市植被对于保护和净化环境有明显的效果,因此如果通过开发利用地下空间而使城市地面上的植被面积有所扩大,也可以认为是地下空间利用的一种间接的积极作用。

(6)灾害背景。我国是地震多发国,国土的 70%处于季候风的影响范围,水、旱、风等灾害频繁;同时,世界仍处于复杂动荡的局势之中,战争的根源并没有消除。因此,城市面临战争及多种自然和人为灾害的威胁,城市安全还没有充分的保障。地下空间天然具有的防护能力,可以为城市的综合防灾提供大量有效的安全空间,对于有些灾害的防护,甚至是地面空间无法替代的。

从以上对几种背景的简略分析可以看出,在我国,城市的发展只能在控制人口、节约资源、防灾减灾和保护环境的前提下实现,而地下空间的开发利用在这几个方面都可以起到重要的作用,因而是中国城市化和城市现代化的必由之路。

1.1.2 地下空间的城市功能

地下空间作为城市空间整体的一部分,可以吸收和容纳相当一部分城市功能和城市活动,与地面上的功能活动互相协调与配合,使城市发展获得更大的活力与潜力。从近几十年世界上若干地下空间利用较先进的国家和城市看,城市地下空间的主要功能和主要内容有居住空间、交通空间、物流空间、业务空间、商业空间、文化活动空间、生产空间、储存空间、防灾空间、埋葬空间等。

城市地下空间利用尽管内容广泛,但不可能也没有必要容纳城市的全部功能,因此存在一个分工与配合的问题,即哪些功能在哪一个时期宜保留在地面上,以及哪些内容在什么条件下转入地下空间中是适宜的。从上面列举的内容看,城市浅层地下空间适合于人在其中短时间活动的内容和需要人工环境的内容,如出行、购物、文体活动等;对于根本不需要人或仅需少数人实行管理的一些内容,如物流、储存、废弃物处理等,则应在可能条件下最大限度地安排在地下空间中,其中,有些更适合于放在深层。此外应当强调的是,转入地下空间的城市功能,都应能适应并发挥地下环境的特性,才能产生最大的效益,否则不但无助于城市空间的拓展,还将造成不良的社会、经济后果。在日本的有关文献中,对城市地下空间利用内容按有人和无人的

分类方法见表 1-1。

表 1-1 日本地下空间分类

有人空间	无人空间			
	基础设施	生产设施	储存设施	防灾设施
住宅、地下室、学校、医院、商业街、办公室、文化设施、停车场	上下水道, 煤气、电力管道, 交通设施	发电厂房、生产厂房	能源库、粮库、水库、废弃物存入库	避难设施、防洪设施、储备设施

瑞典学者伯格·杨森(Birger Jansson)提出过一个地下空间利用的原则“让人留在地上,把物放到地下”,也是基于上面的一些考虑。

国内外的实践表明,充分利用地下空间,已经成为城市空间三维式拓展的主要组成部分,成为城市今后进一步现代化的必然趋势。

1.1.3 地下空间的开发价值与综合效益

地下空间在自然状态下只具有潜在的价值,当付出必要代价将其开发出来以后,就具有一定的使用价值,表现为使用后所能创造的效益;使用价值中除掉开发的费用后,就是地下空间的开发价值,如果为正值,说明开发是合理的。

一个城市在其发展过程中,在什么阶段和什么时期开始有开发利用地下空间的需要,以及开发多大规模是合理的,与国民经济发展的总水平有直接的联系,城市的历史与地理条件对此当然也有一定影响;也就是说,只有在客观上需要,经济上、技术上又有可能时,开发利用城市地下空间才是可行的,才有可能创造较高的开发价值。

开发城市地下空间,比在地面上建筑房屋要困难和复杂很多,要付出高昂的代价。以城市交通为例,如果地面上的轨道交通造价为 1,地上高架铁路为 3,地下铁路的造价则约为 10;地下铁道造价与地面汽车道路相比,则为 58:1。同类型、同规模的城市公共建筑,建在地下时的工程造价比在地面上一般要高出 2~4 倍(不含土地费);如果在地下空间保持不低于地面建筑的内部环境标准,则运行所耗费的能源,比在地面上要多 3 倍左右。日本在造价上所作的比较见表 1-2。

表 1-2 日本地下街造价与地面建筑的比较(地面建筑单位造价为 100)

比较项目		普通地面建筑	地下街	地下街与普通地面建筑的倍数关系
土 建 费	土方、地基	17	167	9.8
	结构	39	84	2.2
	装修	13	35	2.7
	合计	69	286	4.1
设 备 费	电气	12	25	2.1
	空调	14	23	1.6
	卫生	5	6	1.2
	合计	31	54	1.7
总计		100	340	3.4

当然,以上结论较为笼统,不一定完全符合我国情况。但是,这里重要的一点是在“同类

型、同规模”条件下进行比较,否则就会失去比较的意义。近年国内有的研究成果提出,地下工程造价不但不高于同类型地面工程,而且还略低一些。但这个结论是在地面高层框架建筑与地下单建式人防工程之间进行造价比较而得出的,既不是同类型,也不是同规模,故无可比性。总之,如果不在具体条件下进行比较,笼统地认为孰高孰低都是无益的,会对外界造成误导,更何况工程造价仅占工程总投资的一部分,而工程总投资则受到土地费和拆迁费的影响很大。

土地是城市空间的载体,不论是地上还是地下,不存在脱离土地的城市空间。土地的价值在很大程度上反映和体现了城市的效率,或者说,城市集约化程度和城市效益的提高就是不断发掘城市土地潜力,提高土地使用价值的过程。土地的价值基本上反映在其市场价格上,受经济规律的支配;但也受其他一些因素的影响,如法律的规定、政府的土地政策、土地市场的投机活动等。一般情况下,城市中土地昂贵的地区,表明那里的土地开发价值高,投资后可获得比其他地区更高的经济收益,因而起到将城市功能向这一地区吸引和聚集的作用。但是,高额的经济收益只有在以有限的土地取得最大空间容量的前提下才能获得,因而进一步促进了城市高层空间和地下空间的开发利用。

当开发城市地面空间必须付出高昂的土地费用时,如果开发地下空间不需支付或只需支付少量土地费用,则后者在开发费用上将显示出比较大的优势。以开发地下商业空间为例,据日本在1976年间建成的11处地下商业街的统计资料,工程造价随年度不同分别为250万~980万日元/ m^2 ,为地面同类型建筑的2~4倍;但如果在地面建筑造价中加上300万日元/ m^2 土地费,则地下街造价反而低于地面建筑造价,仅为后者的1/20~1/4。再以城市中的停车设施为例,越接近市中心区,停车需求量越大,土地价格也越高,以致投资者不愿以高价获得的土地去建造和经营收益很低的地面停车库;因此在许多大城市中,在不需支付土地费用的地下空间中兴建停车设施,就逐渐成为满足城市停车需求的主要手段。从我国情况看,在特大城市的最繁华地段,土地价格一般在1万元/ m^2 左右,最高的达3.6万元/ m^2 ,占工程总投资的比重很大。与不需付土地费的地下工程相比,单位建筑面积造价高出1000~2000元/ m^2 。如果地下工程建在城市广场或绿地之下,一般拆迁量较少,其工程投资自然要低于需大量拆迁的地面建筑投资。

此外还有一种情况,在城市中经济效益很高的地段,当地面建筑的层数和高度受到某些条件的限制时,投资者往往宁可原地建多层地下室,也不愿转移到别处去投资另建。例如,在东京市区内7万多幢4层以上的建筑物中,约有40%附建有地下室,开发深度平均为15m,最深的有5层,深达25m。

再如北京市的东方广场,地处王府井与东单之间的繁华地段,地价很高,因在长安街上建筑物高度受到限制,故投资方大规模开发利用了地下空间,地下容量占总容量的40%左右,从而使容积率大幅度提高,在经济上得到应有的回报。

地下空间的使用价值,一般表现为开发后所产生的综合效益,包括经济效益、社会效益和环境效益。有时防灾效益也被列入。但实际上,地下空间在防灾减灾中的作用,其中减少的经济损失可属于经济效益,对生命的保护则可作为很高的社会效益。经济效益比较容易用量化的指标表达,但社会效益和环境效益的量化则有一定困难。一般来看,地下空间的开发利用有两种情况,一种是营利性的,如商业空间;另一种是非营利性的,如地下交通设施、地下公用设施等。在后一种情况下,地下空间的使用价值较低,甚至无法用直接的经济效益衡量,但这并不等于没有开发价值,这时的开发价值表现为社会效益上,只是难以定量。当然,在可能的条件下尽力使社会效益或环境效益能得到一定程度的量化或货币化表达,将会使地下空间的综

合效益更为直观,更具说服力。例如,因地下轨道交通的建设而使居民出行缩短了时间,由于地面交通减少了堵塞时间这样的社会效益,都是可以折合成经济效益的。又如,当城市基础设施的主要部分实现地下化后,地面上节省出的用地可以集中起来用于绿化,而每平方米绿地所产生的环境效益,例如,空气污染降低多少和热岛效应减轻多少等,都是可以量化的。此外,由于开发地下空间对环境污染的减轻,也是可以转化为一种经济效益的。这样,就有助于对开发利用地下空间的效益进行综合的评估。

1.1.4 地下空间的分类

根据地下工程的特点,按用途和埋深的分类见表 1-3 和表 1-4。

表 1-3 地下工程按用途分类

用途	功能
工业民用	住宅、工业厂房等
商业娱乐	地下商业城、图书馆等
交通运输	隧道、地铁、地下停车场等
水利水电	电站输水隧道、农业给排水隧道等
市政工程	给水、污水、管路、线路、垃圾填埋等
地下仓储	食物、石油及核废料存储等
人防军事	人防工事、军事指挥所、地下医院等
采矿巷道	矿山运输巷道和开采巷道等

表 1-4 地下工程按埋深分类

名 称	埋深范围(m)			
	小型结构	中型结构	大型运输系统结构	采矿结构
浅埋	0~2	0~10	0~10	0~100
中深	2~4	10~30	10~50	100~1000
深埋	>4	>30	>50	>1000

1.2 地下工程的结构体系

地下工程是由围岩和支护结构(衬砌)组成的结构体系,地下工程围岩是指地层中受开挖作用影响的那一部分岩体。与楼房、桥梁等地面结构物一样,地下工程也是一种结构体系,但与地面结构体系之间在赋存环境、力学作用机理等方面都存在着明显的差异。在荷载方面,除了自重外,地面结构的荷载都是来自结构外部,如其他结构、设备、车辆、人群及自然力等;而地下工程是一种包括支护结构和围岩的复合结构体系,其中,支护结构埋入地层中,周围都与地层结构紧密接触。

支护结构与围岩接触,两者组成共同且相互作用的受力变形体系。理论与实践已经证明,各类围岩都具有一定程度的自支承能力,因而洞室围岩体能与支护结构共同承受荷载。

支护结构承受的荷载来自于洞室开挖后围岩的变形和坍塌区产生的压力,同时支护结构在荷载作用下发生的变形又受到围岩给予的约束。洞室围岩在承受自重应力的同时,也承受地应

力荷载的作用。在地层稳固的情况下,洞室围岩可以承受自重与地应力而不设支护结构。

地下工程的稳定性,首先取决于围岩能否保持持续稳定。围岩自承能力较强时,支护结构将承受较少的地层压力,否则将承受较大的荷载,直至几乎独立承受全部荷载作用。围岩是否稳定不仅取决于岩石强度,而且取决于地层构造的完整程度。相比之下,周围地层构造的完整性对洞室稳定更有影响。围岩既是承载结构的基本组成部分,又是形成荷载的主要来源。其实,洞室围岩在很大程度上是地下工程结构体系中承载的主体,应充分利用和更好地发挥围岩的承载能力。在需要设置支护结构时,支护结构能够阻止围岩的变形,使其达到稳定的作用,这种合二为一的作用机理与地面结构是完全不同的。

1.2.1 围岩结构及其破坏特征

从力学分析的角度来看,围岩的边界应划在因开挖而引起的应力变化可以忽略不计的地方,或者说在围岩的边界上因开挖而产生的位移应该为零。这个范围在横断面上为6~10倍的洞径。

围岩的工程性质主要是强度与变形两个方面,与岩体结构、岩石的物理力学特性、原始地应力和地下水条件有关。围岩主要是各种岩体,也包括土体。岩体是在漫长的地质历史中,经过岩石建造、构造变形和次生蜕变而形成的地质体。它被许多不同方向、不同规模的断层面、层理面、节理面和裂隙面等各种地质界面切割为大小不等、形状各异的块体。工程地质中将这些地质界面称为结构面或不连续面,将这些块体称为结构体,并将岩体看做是由结构面和结构体组合而成的具有结构特征的地质体。所以,岩体的力学性质主要取决于岩体的结构特征、结构体岩石的特性及结构面的特性。环境因素尤其是地下水和地应力对岩体的力学性质影响也很大。在众多的因素中,主导作用需视具体条件而定。

在软弱围岩中,节理和裂隙比较发育,岩体被切割得很破碎,结构面对岩体的变形和破坏不起控制作用,所以岩体的特性与结构体岩石的特性并无本质区别。当然,在完整而连续的岩体中亦是如此。反之,在坚硬的块状岩体中,由于受软弱结构面切割,使块体之间的联系减弱,此时,岩体的力学性质主要受结构面的性质及其在空间的组合所控制。由此可见,岩体的力学性质必然是各种因素综合作用的结果,只不过有些岩体对岩石的力学性质起控制作用,而有些岩体则对结构面的力学性质起主导作用。岩体与岩石相比,两者有着很大的区别,和工程总的尺度相比,岩石几乎可以被认为是均质、连续和各向同性的介质,而岩体则具有明显的非均质性、不连续性和各向异性。

试验和实践都已证明,岩体的变形、破坏及应力在岩体中的传播途径,除了受上述的结构体和结构面控制外,还有一个重要因素,就是岩体的构造特征。和宇宙间一切物体一样,岩体也是以它特有的结构形式存在着,并彼此相互区别。不同块度、形状、产状的结构体构成了各种岩体结构类型。根据它们对岩体力学性质和围岩稳定性的影响(称为岩体的结构效应),工程地质学中将岩体划分为如下4种结构类型:

- ①整体结构:包括整体结构和块状结构。
- ②层状结构:包括层状结构和板状结构。
- ③碎裂结构:包括镶嵌结构、层状碎裂结构和碎裂结构。
- ④散体结构。

整体结构岩体的变形主要是结构体的变形;块状和层状结构岩体的变形主要是结构面的变形,岩体的破坏主要是沿软弱结构面的滑动;碎裂和散体结构岩体的变形,开始是将裂隙或

孔隙压密,随后是结构体变形,并伴随有结构面张开。

地下工程围岩变形、破坏与岩体结构的关系十分密切,根据工程实践的观察,大致有以下5种情况:

(1)脆性破裂

整体状和块状结构岩体,岩性坚硬,在一般工程开挖条件下表现稳定,仅产生局部掉块。但在高应力区,洞壁处的应力集中可引起“岩爆”,岩石呈碎片射出并发出破裂响声,属于脆性破裂。

(2)块状运动

如图 1-1(a)所示,当块状或层状岩体受明显的少数软弱结构面切割而形成块体或数量有限的块体时,由于块体间的联系很弱,在自重作用下,有向临空面运动的趋势,逐渐形成块体塌落、滑动、转动、倾倒及块体挤出等失稳破坏性态。块体挤出是块体受到周围岩体传来的应力作用的结果。在支护结构和围岩之间如有较大空隙而又未回填密实或根本没有回填,块体运动可能对支护结构产生冲击荷载,而使之破坏。

(3)弯曲折断破坏

如图 1-1(b)所示,层状岩体尤其是有软弱夹层的互层岩体,由于层间结合力差,易于错动,所以抗弯能力较低。洞顶岩体受重力作用易产生下沉弯曲,进而张裂、折断形成塌落体。边墙岩体在侧向水平力作用下弯曲变形而鼓出,也将对支护结构产生压力,严重时可使支护结构折断而塌落。

(4)松动解脱

碎裂结构岩体基本上是由碎块组合而成的,在张拉力、单轴压力、振动力作用下容易松动,溃散(解脱)而呈碎块脱落。一般在洞顶表现为崩塌,在边墙则为滑塌、坍塌,如图 1-1(c)所示。

(5)塑性变形和剪切破坏

散体结构岩体或碎裂结构岩体,若其中含有较多的软弱结构面,开挖后由于围岩应力的作用,将产生塑性变形或剪切破坏。往往表现为塌方、边墙挤入、底鼓及洞径缩小等,而且变形的时间效应比较明显,如图 1-1(d)所示。有些含蒙脱土或硬石膏等矿物的膨胀性岩体或结构面,遇水膨胀并向洞内挤入,也属于塑性变形性质。

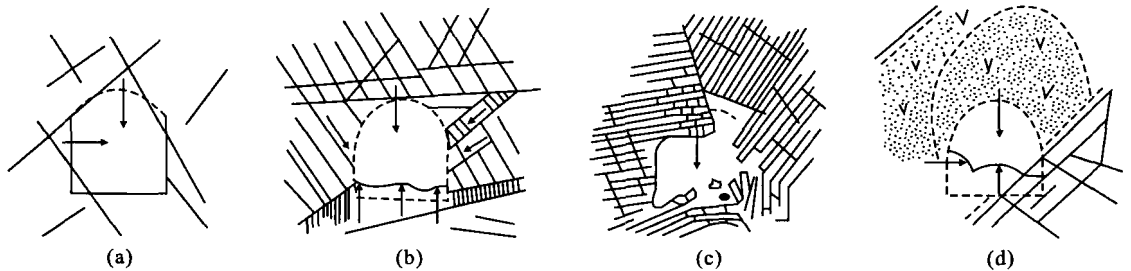


图 1-1 地下工程围岩失稳破坏性态

(a)块状运动;(b)弯曲折断;(c)松动解脱;(d)塑性变形

1.2.2 地下工程的支护结构形式

总体来看,支护结构有临时支护结构与永久支护结构,有单一支护结构和两种支护结构组成的复合支护结构。支护结构有两个最基本的使用要求:一是满足结构强度、刚度要求,以承受诸如水、围岩压力以及一些特殊使用要求的外荷载;二是提供一个能满足使用要求的工作环境,以保持隧道内部的干燥和清洁。这两个要求是彼此密切相关的。支护结构按设计与施工

要求分类如下：

(1)就地灌注整体式混凝土衬砌

适用于矿山法施工,且围岩可以在短时间内稳定,也适用于采用明挖法施工的衬砌形式。用模板灌注,衬砌的表面整齐美观,进度快,质量容易控制。

这种结构大多数由上部拱圈、两侧边墙和底部仰拱(或铺底)组成。其上部拱圈的轴线采用多心圆或半圆形,边墙可做成直边墙或曲边墙,当底部压力较大或有地下水时,应做成带仰拱的封闭式结构,如图 1-2 所示。

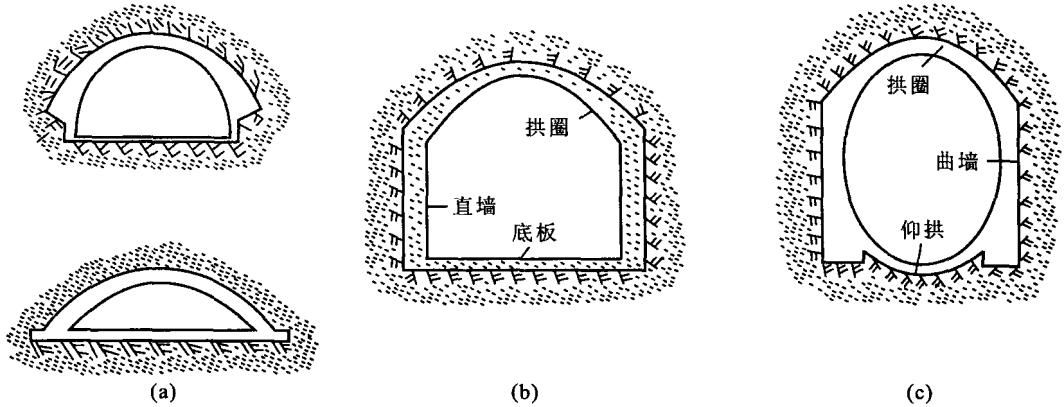


图 1-2 拱形衬砌

(a)落地拱;(b)直墙拱形衬砌;(c)曲墙拱形衬砌

采用明挖法施工常用的结构形式是矩形框架(图 1-3),其内部根据使用目的设有梁、柱或中墙,将整体框架分成多跨和多层。施工时常用桩或墙支挡作为施工时的临时支护,它们也可作为地下结构墙体的一部分。

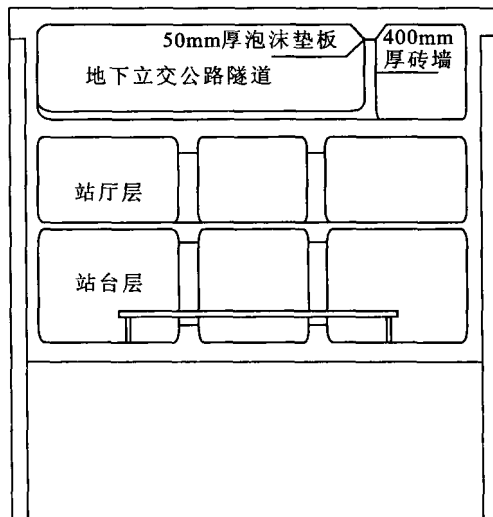


图 1-3 地下铁道车站

沉埋法施工(亦称水下明挖法)的衬砌结构形式(图 1-4),是在专门的制造场地预制的,其结构形式与制造方式有关。干船坞形的结构形式一般是多跨的钢筋混凝土管段,船台形一般外形为八角形,用钢板焊接而成,内轮廓一般为单圆或双圆。

(2)锚喷支护(图 1-5)