



高等学校土木建筑工程类系列教材

地下结构设计模型 (第二版)

■ 曾亚武 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



高等学校土木建筑工程类系列教材

地下结构设计模型 (第二版)

■ 曾亚武 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地下结构设计模型/曾亚武编著. —2版. —武汉: 武汉大学出版社, 2013. 9

高等学校土木建筑工程类系列教材

ISBN 978-7-307-11567-5

I. 地… II. 曾… III. 地下工程—结构设计—结构模型—高等学校—教材 IV. TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 210604 号

责任编辑:李汉保 责任校对:刘欣 版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北睿智印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:513千字 插页:1

版次:2006年10月第1版 2013年9月第2版

2013年9月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-307-11567-5 定价:38.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校土木建筑工程类系列教材

编 委 会

- 主 任** 何亚伯 武汉大学土木建筑工程学院, 教授、博士生导师, 副院长
- 副 主 任** 吴贤国 华中科技大学土木工程与力学学院, 教授、博士生导师
吴 瑾 南京航空航天大学土木系, 教授, 副系主任
夏广政 湖北工业大学土木建筑工程学院, 教授
陆小华 汕头大学工学院, 副教授, 副处长
- 编 委** (按姓氏笔画为序)
- 王海霞 南通大学建筑工程学院, 讲师
刘红梅 南通大学建筑工程学院, 副教授, 副院长
宋军伟 江西蓝天学院土木建筑工程系, 副教授, 系主任
杜国锋 长江大学城市建设学院, 副教授, 副院长
肖胜文 江西理工大学建筑工程系, 副教授
徐思东 江西理工大学建筑工程系, 讲师
欧阳小琴 江西农业大学工学院土木系, 讲师, 系主任
张海涛 江汉大学建筑工程学院, 讲师
张国栋 三峡大学土木建筑工程学院, 副教授
陈友华 孝感学院教务处, 讲师
姚金星 长江大学城市建设学院, 副教授
梅国雄 南昌航空大学土木建筑学院, 教授, 院长
程赫明 昆明理工大学土木建筑工程学院, 教授, 院长
曾芳金 江西理工大学建筑与测绘学院土木工程教研室, 教授, 主任
- 执行编委** 李汉保 武汉大学出版社, 副编审
谢文涛 武汉大学出版社, 编辑

内 容 简 介

本书是为普通高等学校土木工程专业地下建筑工程、岩土工程、交通工程、矿山工程等专业方向的本科生编写的地下建筑结构设计课程教材，系统地介绍了各种地下结构设计模型的基本原理和方法，涵盖了传统和现代两种不同的地下结构设计理念。

全书共分8章。第1章为绪论，简要介绍了地下空间、地下建筑和地下工程的概念，地下建筑的特点、结构型式、设计模型等；第2章~第6章分别介绍了地下结构经验类比设计模型、荷载结构设计模型、连续介质设计模型和收敛约束设计模型的原理和方法；第7章特别强调了现代支护结构的概念，介绍了新奥地利隧道设计施工方法的主要原则，以及喷锚支护结构的计算原理和方法；第8章简要介绍了地下结构的施工方法。

本书可以供普通高等学校土木工程专业本科生学习使用，也可以供相关专业研究生、高等学校教师以及从事相关工作的科研、设计和施工技术人员参考。

序

建筑业是国民经济的支柱产业，就业容量大，产业关联度高，全社会 50% 以上固定资产投资要通过建筑业才能形成新的生产能力或使用价值，建筑业增加值占国内生产总值较高比率。土木建筑工程专业人才的培养质量直接影响建筑业的可持续发展，乃至影响国民经济的发展。高等学校是培养高新科学技术人才的摇篮，同时也是培养土木建筑工程专业高级人才的重要基地，土木建筑工程类教材建设始终应是一项不容忽视的重要工作。

为了提高高等学校土木建筑工程类课程教材建设水平，由武汉大学土木建筑工程学院与武汉大学出版社联合倡议、策划，组建高等学校土木建筑工程类课程系列教材编委会，在一定范围内，联合多所高校合作编写土木建筑工程类课程系列教材，为高等学校从事土木建筑工程类教学和科研的教师，特别是长期从事土木建筑工程类教学且具有丰富教学经验的广大教师搭建一个交流和编写土木建筑工程类教材的平台。通过该平台，联合编写教材，交流教学经验，确保教材的编写质量，同时提高教材的编写与出版速度，有利于教材的不断更新，极力打造精品教材。

本着上述指导思想，我们组织编撰出版了这套高等学校土木建筑工程类课程系列教材，旨在提高高等学校土木建筑工程类课程的教育质量和教材建设水平。

参加高等学校土木建筑工程类系列教材编委会的高校有：武汉大学、华中科技大学、南京航空航天大学、南昌航空大学、湖北工业大学、汕头大学、南通大学、江汉大学、三峡大学、孝感学院、长江大学、昆明理工大学、江西理工大学、江西农业大学、江西蓝天学院 15 所院校。

高等学校土木建筑工程类系列教材涵盖土木工程专业的力学、建筑、结构、施工组织与管理等教学领域。本系列教材的定位，编委会全体成员在充分讨论、商榷的基础上，一致认为在遵循高等学校土木建筑工程类人才培养规律，满足土木建筑工程类人才培养方案的前提下，突出以实用为主，切实达到培养和提高学生的实际工作能力的目标。本教材编委会明确了近 30 门专业主干课程作为今后一个时期的编撰，出版工作计划。我们深切期望这套系列教材能对我国土木建筑事业的发展 and 人才培养有所贡献。

武汉大学出版社是中共中央宣传部与国家新闻出版署联合授予的全国优秀出版社之一，在国内有较高的知名度和社会影响力。武汉大学出版社愿尽其所能为国内高校的教学与科研服务。我们愿与各位朋友真诚合作，力争使该系列教材打造成为国内同类教材中的精品教材，为高等教育的发展贡献力量！

高等学校土木建筑工程类系列教材编委会

2008 年 8 月

第二版前言

《地下结构设计模型》一书于2006年初次出版以来，得到了广大师生的肯定和厚爱，在教学活动中发挥了重要作用，但在使用过程中也发现一些疏漏和不足。第二版在保留第一版特色的基础上，主要进行了以下几方面的修订：

1. 针对书中的大部分公式进行了复核、验算和文献查对，重点是针对引用国外学者建立的经验公式，通过查找原始文献，并经过充分的论证，进行了核查和更正。
2. 更新了部分陈旧内容，包括两个方面：其一是将第一版中使用的标准、规范等更新为现行的标准、规范，相应的内容也进行了调整；其二是删除了第一版中相对陈旧的内容，增补了一些新的、更具针对性的内容。
3. 重新绘制了书中所有的插图，使其表达的意义更明确、标注更清晰，避免错漏和歧义。

本书第1章~第4章、第6章、第7章由曾亚武教授修编；第5章由刘芙蓉讲师修编；第8章由高睿教授修编。全书仍由曾亚武教授统稿，赵震英教授审阅。

在本书修编过程中，得到了武汉大学、武汉大学土木建筑工程学院及武汉大学出版社相关领导和老师们的大力支持和帮助，尤其是武汉大学出版社李汉保编辑为本书第二版的及时出版付出了大量心血，提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢！在修编过程中，参考了国内外相关文献，在此对这些文献的作者表示感谢！

鉴于作者水平有限，虽经反复修改、订正，书中仍不可避免会存在疏漏和不足，敬请专家、同行和读者朋友批评指正。

作者
2013年8月

前 言

随着我国经济的快速发展, 各行各业对地下工程的需求越来越大, 要求越来越高, 发展也越来越快。如交通行业, 一方面大中型城市的市内交通拥堵、用地矛盾突出, 解决这一矛盾的出路就在于城市地铁、过街通道、过江通道的建设; 另一方面, 铁路、公路快速交通干道的建设, 尤其是山区快速交通干道的建设, 必然需要修建大量的隧道工程。其他如矿山、水电、能源、公共建筑、国防等各行业, 都需要建设大量的地下工程。世界上许多国家已将地下空间开发利用作为一项基本国策, 已经开始或正在进行大规模的地下工程建设。地下空间的开发利用已经得到普遍重视, 可以预见 21 世纪将是地下工程的世纪。

地下工程处于地层中, 其周围介质为岩石或土壤。因此, 地下结构与地面结构相比较具有完全不同的特点。首先, 与地面结构处于空气介质中不同, 地下结构处于地层介质中, 修建工程中和建成后都要受到地层(岩石或土壤)的作用, 包括地层应力、变形和振动的影响, 而且这些影响与所处地层的地质条件密切相关。因此地下结构的选址、选型及如何修建(施工)都必须充分考虑地层条件。其次, 地下结构是在受载状态下构筑的, 地下工程往往是一个大的空间体系, 地下结构的构筑过程就是用内含空间替代地层实体, 在地下结构构筑过程中是分部地完成这种替代的, 也就是说地下结构的受载状态还与地下结构(空间)的形成过程及空间效应密切相关。其三, 地层不单纯是荷载, 各类地层有不同程度的自承能力。实际上地下结构与围岩形成一个统一的受力体系。因此地下结构的受力状态往往并不像地面结构那样明确, 地下结构除了取决于结构物本身的特点外, 还与地层条件有关。其四, 地下结构处于地层中, 设计时所依据的条件只是前期地质勘探得到的粗略资料, 揭示的地质条件非常有限, 只有在施工过程中才能逐步地详细了解。另外, 还有一些因素随着施工进度会发生变化, 因此地下结构的设计和施工一般有一个特殊的模式, 即: 设计——施工及监测——信息反馈——修改设计——修改或加固施工, 建成后还需进行相当长时间的监测。

正是由于地下结构的这些特点, 地下结构的设计方法也在不断的发展中, 由传统的经验类比设计法、荷载结构设计法, 发展到现代连续介质设计法、收敛约束设计法等, 且目前各种设计方法在地下结构的设计中都在发挥着各自的作用, 出现了传统与现代设计理念并存的局面。因此, 地下工程的设计施工迫切需要一大批具有专门知识的工程技术人才。

为满足地下工程建设的需求, 加强地下工程设计和施工专门人才的培养, 全国高等学校土木工程专业指导委员会已将地下、岩土和矿山方向列为土木工程专业的一个重要专业方向, 地下结构为该方向核心课程之一。

根据土木工程专业课程建设需求以及地下结构的特点, 作者于 2002 年编写了地下结构讲义开始为武汉大学土木工程专业本科生讲授地下结构课程。通过这几年的教学实践,

逐步完善了课程内容,本教材就是在此基础上进行总结、修改、补充、完善后编写的。全书系统地介绍了各种地下结构设计模型的基本原理和方法,涵盖了传统和现代两种不同的地下结构设计理念。首先介绍了地下空间、地下工程的基本概念、特点、结构型式、设计方法等;其次以各种设计模型为主线,分别介绍了经验类比设计模型、荷载结构设计模型、连续介质设计模型、收敛约束设计模型等传统的和现代的地下结构设计模型的基本原理和方法及其工程应用;特别强调了现代支护结构的概念和设计原理;最后简要介绍了地下工程的施工方法。通过本课程的学习,可以为土木工程专业本科生毕业后从事相关工作打下坚实的基础。

全书共分8章,第1章,第3章和第7章由曾亚武副教授编写;第2章和第6章由张忠亭教授编写;第5章由刘芙蓉讲师编写;第4章和第8章由曾亚武副教授和张忠亭教授共同编写。全书由曾亚武副教授统稿,赵震英教授审阅。

本书在编写过程中,得到了武汉大学、武汉大学土木建筑工程学院及武汉大学出版社相关领导和老师们的大力支持和帮助,尤其是武汉大学出版社李汉保编辑为本教材的及时出版付出了大量的心血,提出了许多宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中不可避免会存在一些疏漏和不足,敬请专家、同行和读者批评指正。

作者
2006年7月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 地下空间及地下建筑的概念	1
1.2 地下空间的用途和地下工程分类	1
1.3 地下空间开发利用简况	2
1.4 地下建筑的结构形式	5
1.5 地下结构的特点	10
1.6 地下结构的设计方法	10
第 2 章 地下结构经验类比设计模型	14
2.1 概述	14
2.2 泰沙基岩体分类及支护压力估算	16
2.3 岩体结构等级分类及经验设计	18
2.4 岩体地质力学分类及经验设计	21
2.5 岩体 Q 指标分类及经验设计	24
2.6 我国工程岩体分级国家标准及岩体参数建议值	33
2.7 我国锚喷支护岩体分级及经验设计	39
2.8 我国铁路隧道围岩分级及经验设计	45
2.9 我国公路隧道围岩分级及经验设计	52
2.10 国防坑道工程围岩分级及经验设计	54
2.11 工程实例	63
第 3 章 地下结构荷载结构设计模型(一)	66
3.1 地下结构的荷载	66
3.2 离壁式地下结构设计	77
3.3 贴壁式地下结构设计	96
第 4 章 地下结构荷载结构设计模型(二)	130
4.1 浅埋式地下结构	130
4.2 盾构法装配式圆形地下结构设计	141
4.3 沉井式地下结构设计	161
4.4 沉管结构设计	178
4.5 基坑支护结构设计	186

第5章 地下结构连续介质设计模型	213
5.1 概述	213
5.2 围岩与地下结构相互作用原理	213
5.3 地下结构连续介质模型的解析计算法	220
5.4 地下结构连续介质模型的数值计算法	223
第6章 地下结构收敛约束设计模型	236
6.1 概述	236
6.2 洞周围岩的受力状态	236
6.3 洞周围岩的应力和位移	239
6.4 收敛约束设计模型原理	245
6.5 收敛约束设计模型应考虑的几个问题	253
6.6 设计实例	256
6.7 地下工程现场监控量测简介	259
第7章 现代支护结构设计原理和方法	274
7.1 概述	274
7.2 喷锚支护结构计算方法及设计原理	278
7.3 复合式地下结构设计	298
第8章 地下结构施工方法简介	301
8.1 概述	301
8.2 岩层地下结构工程施工技术	302
8.3 土层地下结构工程施工技术	311
8.4 新奥法施工简介	321
参考文献	328

第1章 绪 论

1.1 地下空间及地下建筑的概念

人类赖以生存的地球是一个表层为地壳、深处为地幔和地核的球体。地壳为一层很厚的岩石圈，表层岩石有的经风化成为土壤，形成不同厚度的土层，覆盖着大部分陆地。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。在岩石和土层中天然形成或人工开挖形成的空间称为地下空间。天然地下空间按成因有喀斯特溶洞、熔岩洞、风蚀洞、海蚀洞等；人工地下空间包括两类：一类是开发地下矿藏而形成的矿洞；另一类是因工程建设需要开凿的地下洞室。地下空间的开发利用为人类开拓了新的生存空间，并能满足某些在地面上无法实现的空间要求。因此地下空间被认为是一种宝贵的自然资源。

建造在岩层或土层中的各种建筑物(buildings)和构筑物(structures)，是在地下形成的建筑空间，称为地下建筑(underground buildings and structures)，地面建筑的地下室部分也是地下建筑。建造在地下的各种工程设施称为地下工程(underground engineering)。随着国民经济的发展和科学技术的进步，地下空间的应用越来越广泛。城市地铁、铁路、公路、水电站、商场、仓库、地下车库、工厂、体育场馆等许多工程都安排在地下，某些工程在特定情况下还必须安排在地下。

地下空间的利用为各类建筑工程物的选址开辟了广阔的前景。当前，地下空间作为一种重要的自然资源——一种新的国土资源加以开发和利用，在国民经济的各部门和国防建设中都得到了世界各国的高度重视。联合国自然资源委员会1982年会议指出，地下空间是人类潜在的和丰富的自然资源。20世纪80年代国际隧道协会(ITA)提出了“大力开发地下空间，开始人类新的穴居时代”的口号。许多国家将地下空间开发利用作为一项基本国策，已经开始或正在进行大规模的地下工程建设，地下空间的开发利用已经和正在得到普遍的重视，21世纪将是地下工程的世纪。

1.2 地下空间的用途和地下工程分类

地下空间有着广泛的用途。在远古时期，人类开始利用天然洞穴作为居住之用，以保护自己免遭自然灾害的威胁。在北京西郊周口店，50多万年前，北京猿人就居住在自然条件较好的龙骨山天然溶洞中。在日本也发现了距今2万年至3万年前的古人类居住洞穴。在欧美、中东、北非等地都发现了古人类穴居的遗迹。人类到地面居住以后，开始开发地下空间，用于满足居住以外的多种需求，如采矿、储藏、输水及交通工程、地下陵墓、宗教设施等，直到现代的大型公用设施、城市地下空间的综合利用与地下工业、商业

以及军事设施等,地下空间的开发利用已得到普遍重视。显然,人类对地下空间的开发利用,经历了从自发到自觉的漫长过程,推动这一过程的,一是人类自身的发展,如人口的繁衍和智能的提高,人类需求的扩展;二是社会生产力的发展和科学技术的进步。

按照用途的不同,地下工程可以分为以下几种类型:

(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,这类工程通常只要求在采矿过程中能维持洞室的稳定、安全,待采矿完成后,或者废弃或者转作其他用途。

(2)地下交通工程:包括各种公路和铁路隧道、城市地铁、地下过街通道等。

(3)地下储库:包括粮食、油料、水果、蔬菜等的储存库,鱼、肉食品的冷藏库,车库、核废料储存库等。

(4)水工地下洞室:包括各种输水隧道、水电站地下厂房、地下抽水蓄能电站、地下水库等。

(5)地下工厂:包括各种轻工业、重工业地下厂房、地下核电站、地下火电站等。

(6)地下民用与公共建筑:包括地下商场、图书馆、体育场馆、展览馆、影剧院、医院、旅馆、住宅及其综合建筑体系——城市地下街道等。

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

(8)地下军事工程和防护工程:包括各种野战工事、指挥所、通信枢纽、人员和武器掩蔽所、军火和物资库等。

地下工程可以修建在岩层中,也可以修建在土层中。根据地下工程所处的地层性质的不同,可以将其分为岩石地下建筑和土层地下建筑。由于两种地层地质条件的差异和介质特性的不同,这两类地下建筑工程无论在规划设计还是在施工维护等方面都是不同的。

1.3 地下空间开发利用简况

人类对地下空间的开发利用有着悠久的历史,经历了从自发到自觉的漫长历程。远古时代,人类就开始利用天然洞穴作为防雨避风的住所。随着人类走向文明与进步,人类社会进入了铜器和铁器时代,生产工具的改进和生产关系的改变,使奴隶社会中的生产力有了很大的发展,在其鼎盛时期形成了古埃及、古希腊、古罗马及古代中国的高度文明,这时期地下空间的利用也摆脱了单纯的居住要求,而进入更广泛的领域。在这期间的数千年中,遗留至今或有历史可考的大型地下工程很多,如古埃及金字塔,实际上是建于公元前2650年至公元前2500年前后的一种用于墓葬的地下空间;再如公元前22世纪古巴比伦幼发拉底河河底隧道,我国秦汉时期的地下陵墓及地下粮仓等。

中世纪以后,在采矿、地下交通、市政建设、工业和水工地下工程等方面,地下空间的开发利用得到了广泛的发展。随着经济建设的需要和科学技术的进步,特别是17世纪炸药的使用和18世纪蒸汽机的发明并使用于凿岩,人们能在坚硬岩石中快速挖掘洞室,这样地下空间的开发利用进入了一个较快速的发展时期。1613年修建了伦敦水道;1681年修建了地中海比斯开湾的连接隧道;1845年英国建成第一条铁路隧道;1871年建成穿越阿尔卑斯山连接法国和意大利的长12.8km的公路隧道,等等。

第二次世界大战期间,由于地下建筑物在防护方面的优越性十分明显,受到各参战国的高度重视,许多国家都将一些军事设施和工厂、仓库、油库等修建在地下。另一方面,将生产一些尖端产品的车间设在地下,能够满足恒温、恒湿、防震等生产工艺上的严格要求。

第二次世界大战后,随着经济的发展,对能源的需求与日俱增,从而开始了大规模的水利水电建设。有时在高山峡谷中修建水电站,由于施工场地的局限或者为了不破坏植被和生态环境,通常将水电站厂房建于地下。

随着世界人口的增长,城市面积扩大、土地资源减少、能源短缺、城市交通拥塞、环境污染及备战防灾诸方面的压力和问题,地下空间的开发和利用已成为建设现代化城市的重要标志。

20世纪以来,现代地下空间开发有了迅速发展,达到空前规模,主要用于建造各种隧道、水利水电地下工程、大型地下公用设施和地下能源储库等。特别是城市地下空间的开发利用成了人们关注的热点,视其为新的国土资源。这一时期最典型的工程主要反映在城市地铁、长大隧道(如日本的青涵隧道、英法之间的英吉利海峡隧道等)、地下水电站、城市地下公用设施等方面。

截至目前,世界上已有一百多个城市修建了地下铁道,线路总长超过6000km。长度大于10km的长大隧道超百座,包括穿越津轻海峡,总长53.85km的日本青涵隧道;穿越英法之间的英吉利海峡,总长51km的英吉利海峡隧道;总长57km的位于瑞士中部阿尔卑斯山区的戈特哈德铁路隧道等。地下电站发展迅速,包括地下水电站、地下火电站、地下核电站和地下抽水蓄能电站等,其中全世界的地下水电站已超过400座,如著名的加拿大丘吉尔瀑布电站地下厂房长296m、宽25m、高47m。城市地下空间的开发利用在这一时期成为城市建设的重要内容,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联为一体,成为多功能地下综合体等。

为了合理利用地下空间,加强学术交流与提高地下工程规划设计与施工技术,地下空间开发利用的学术研究也非常活跃。1970年联合国经济合作与发展组织在华盛顿召开了有19个国家参加的隧道工程咨询会议,标志着国际隧道工程学会的成立。1976年美国地下空间学会成立,并在明尼苏达大学建立地下空间研究中心,出版了《Underground Space》杂志。1977年,在瑞典首都斯德哥尔摩召开了地下空间国际学术会议(Rockstone77),第一次交流了与会各国开发利用地下空间的经验。1980年,联合国自然资源能源和运输中心及瑞典政府各部门及学术团体(岩石力学学会、隧道工程学会、工程地质学会)共同发起组织召开了有40个国家和国际组织代表团约1000人参加的国际地下空间学术会议(Rockstone80),这次会议产生了一个致各国政府开发利用地下空间资源为人类造福的建议书,并提出在开发利用地下空间资源中进行国际技术合作和经验交流的建议。1991年在日本东京召开的城市地下空间利用的国际会议上提出了开发利用地下空间的“东京宣言”,称地下空间是一种新型的国土资源。这些国际间的技术交流与合作,极大地促进了地下空间的开发和利用。

在我国,地下空间开发利用的历史悠久。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。

20 世纪中期以来,我国地下空间开发利用有了很快发展,取得了举世瞩目的成就。

首先是人防工程。20 世纪 60 年代末、70 年代初,我国城镇曾掀起了“深挖洞”的群众运动。各单位、街道居民修建了大量的人防工程,并相互连通,形成了四通八达的地下网络。由于缺少统一规划,缺乏经验,加上技术力量不足,这些工程一般规模较小,质量较差,目前统称为早期人防工程。现在,新建的人防工程在建设前都经过了可行性论证,既考虑到战时防空的需要,又考虑到平时经济建设、城市建设和人民生活的需要,具有平战双重功能。同时,人防工程严格按建设程序办事,从土建到装修都注重质量,建成投入使用后,取得了显著的战备效益、社会效益和经济效益。许多大中型人防工程成为城市的重点工程,如哈尔滨奋斗路地下商业街、沈阳北新客站地下城、上海人民广场地下停车场、郑州火车站广场地下商场、武汉汉正街地下商城等,在社会上产生了巨大的影响。

其次是交通隧道工程。20 世纪 60 年代开始的大规模交通设施建设,修建了为数众多的铁路隧道、公路隧道。据相关资料统计,至 2002 年底,我国共有铁路、公路交通隧道 8600 多条,总长度约 4370km,居世界第一;至 2010 年,铁路、公路交通隧道总数已突破 13000 条,总长超过 9000km。交通隧道单洞长度记录也不断被刷新,20 世纪 80 年代修建的当时国内最长的铁路隧道——长 14.295km 的大瑶山隧道,大大改善了京广线的行车条件。1999 年 6 月,长 18.4km 的秦岭铁路隧道贯通,在西(安)(安)康铁路上发挥着十分重要的作用。2006 年 3 月 30 日和 8 月 23 日,当时亚洲最长的陆上隧道——长 20.05km 的兰(州)新(疆)铁路乌鞘岭隧道右线、左线正式建成通车。2007 年 2 月 15 日,号称“天下第一隧”的秦岭终南山高速公路隧道建成通车,该隧道全长 18.02km,分上下行双隧,长度居世界第二、亚洲第一,建设规模世界第一,是世界上双洞最长、技术标准最高、建设规模最大的高速公路隧道。2009 年 4 月 1 日,长 27.848km(左线 27.839km)的石(家庄)太(原)客运专线太行山隧道随着我国最早开工建设(2005 年 6 月)的高速铁路——石(家庄)太(原)客运专线一起建成通车。2008 年 12 月 28 日,号称“万里长江第一隧”的武汉长江隧道建成通车。此外,穿越琼州海峡、渤海湾以及台湾海峡的海底隧道工程也正在论证或准备之中,其中渤海湾隧道已经开始前期准备工作。

其三是方兴未艾的城市地铁建设。1965 年我国在首都北京始建第一条城市地铁以来,已有天津、上海、广州、深圳、南京、武汉等城市地铁建成营运或处于施工阶段。截至 2010 年底,北京市已开通运营的轨道交通总里程达 336km;2010 年上海世博会开幕之前,上海地铁总运营里程已达到 408km,与伦敦地铁并列为世界上运营里程最长的地铁系统。

其四是水利水电建设中的地下工程,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。举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程,其地下电站部分主厂房长 311.3m,宽 32.6m,高 87.24m,其跨度和高度均居世界地下水电站之冠。

其五,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利用地下空间。据相关报道,截至 2010 年,上海已结合地铁建设等开发利用地下空间面积约 4000 万 m^2 ,形成超过 10 座以上“地下城”,地下客流已高达每日 800 万人次;而根据规划,到 2020 年,北京将建成 9000 万 m^2 的地下空间,人均达 5 m^2 ;到时武汉也将在 684 km^2 的主城区范围内,建成 2000 万 m^2 地下空间。

最后,为满足军事防护要求、能源储备需求等均开发了大量的地下空间。我国已逐步

开始实施的战略石油储备工程, 仍将需要建设大量的地下油、气储备基地。

可以预见, 随着经济、科技、国防建设的发展, 我国地下空间的开发利用即将进入一个蓬勃发展的新时期。

1.4 地下建筑的结构形式

建造在岩层中和土层中的各种建筑物和构筑物统称为地下建筑。与地面建筑不同的是, 地下建筑修建于地层中, 其围护结构与地层接触, 两者构成共同的相互作用的受力体系。显然地下建筑的结构形式除了应满足使用要求外, 还必须考虑与周围地层的相互作用以及施工方法等因素。

1.4.1 岩石地下建筑结构

岩层中的地下建筑结构通常称为衬砌结构, 常见的有以下几种形式:

1. 半衬砌结构。只做拱圈, 不做边墙的衬砌结构称为半衬砌结构。在岩石较坚硬, 整体性较好的岩层中, 可以采用半衬砌结构。图 1.4.1(a)为半衬砌结构示意图。图 1.4.1(b)为落地拱, 也按半衬砌结构设计。

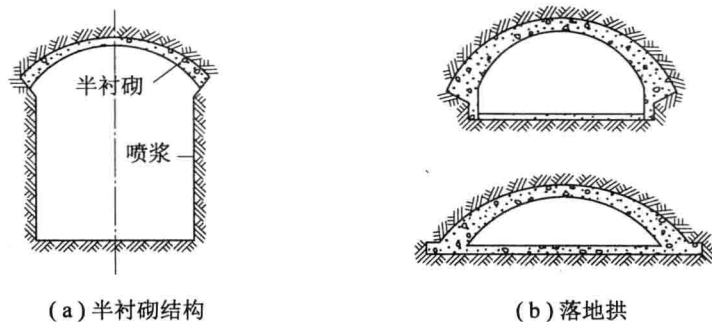


图 1.4.1 半衬砌结构和落地拱示意图

2. 贴壁式衬砌结构。贴壁式衬砌结构是衬砌结构与围岩紧密接触, 常在施工时将衬砌与围岩之间的空隙进行密实回填。根据岩层条件, 可以做成厚拱薄墙衬砌结构、直墙拱形衬砌结构和曲墙拱形衬砌结构等形式, 如图 1.4.2 所示。

3. 离壁式衬砌结构。离壁式衬砌结构的拱圈及边墙都不必与围岩接触紧密, 其间空隙不做回填, 只是在拱脚处局部支撑于岩壁上。在围岩基本稳定时, 可以采用离壁式衬砌结构, 如图 1.4.3 所示。

4. 锚喷支护结构。在岩层地质条件较差的地下工程中开挖地下洞室时, 采用喷混凝土、钢筋网喷混凝土、锚杆喷混凝土或锚杆钢筋网喷混凝土对围岩进行加固的结构, 称为锚喷支护结构, 如图 1.4.4 所示。

由于锚喷支护是一种“柔性”结构, 同时能对围岩即时支护, 故能更有效地利用围岩的“自承”能力维护洞室稳定, 是软岩中地下洞室常见的地下建筑结构形式。

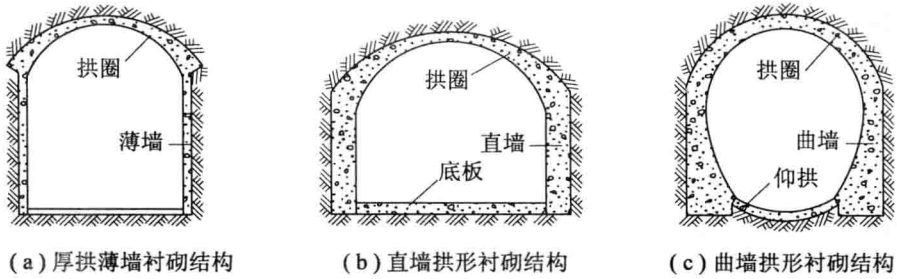


图 1.4.2 贴壁式衬砌结构示意图

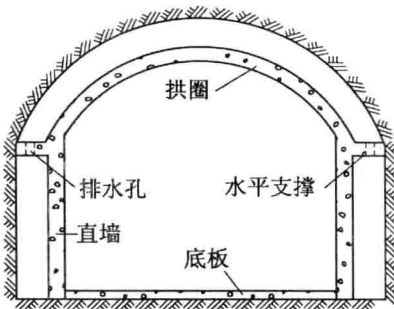


图 1.4.3 离壁式衬砌结构示意图

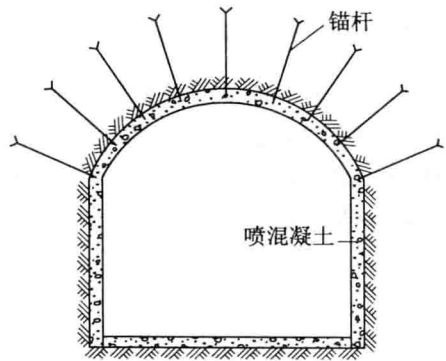


图 1.4.4 喷锚支护结构示意图

5. 穹顶直墙衬砌结构。是一种圆底空间薄壁结构。该结构可以做成顶、墙整体联结的整体式结构，也可以做成顶、墙互不联系的分离式结构。在我国，多采用后者，其基本构造如图 1.4.5 所示。

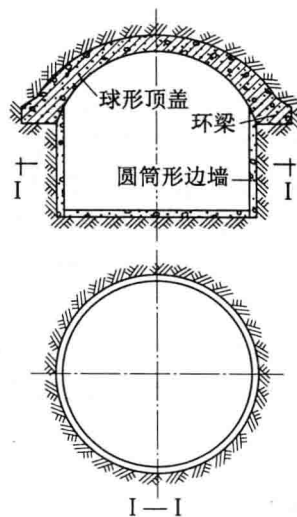


图 1.4.5 分离式穹顶直墙衬砌结构示意图