



住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材  
高等学校土木工程专业创新型人才培养规划教材

# 地下结构设计

Civil Engineering

崔振东 主 编  
张忠良 副主编  
刘新宇 主 审

中国建筑工业出版社

高等学校  
住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材  
高等学校土木工程专业创新型人才培养规划教材

# 地下结构设计

崔振东 主 编  
张忠良 副主编  
刘新宇 主 审



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

地下结构设计/崔振东主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 7

高等学校土木工程专业创新型人才培养规划教材

ISBN 978-7-112-20816-6

I. ①地… II. ①崔… III. ①地下工程-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 120976 号

本书参考国内外地下结构方向相关教材和文献, 并结合最新规范、工程案例和数值模拟, 重点突出地下结构设计的基本概念、基本理论和基本方法。内容包括: 绪论, 地下结构的荷载, 弹性地基梁理论, 地下结构的力学计算方法, 地下结构的数值分析方法, 地下结构可靠度理论, 浅埋式地下结构设计, 附建式地下结构设计, 地下连续墙结构设计, 基坑支护结构设计, 盾构法隧道结构设计, 沉井结构设计, 沉管结构设计, 顶管, 管幕及箱涵结构设计, 整体式隧道结构设计, 锚喷支护结构设计, 特殊地下结构设计以及弹性地基梁计算用表等。

本书可作为城市地下空间工程、建筑工程、公路工程、铁路工程、桥梁与隧道工程、水利水电工程等相关专业的高年级本科生及相关专业研究生教材, 也可供相关专业工程技术人员参考。

为更好地支持本课程的教学, 本书作者制作了多媒体教学课件, 有需要的读者可以发送邮件至 [jiangongkejian@163.com](mailto:jiangongkejian@163.com) 索取。

\* \* \*

责任编辑: 仕 帅 吉万旺 王 跃

责任设计: 韩蒙恩

责任校对: 焦 乐 李美娜

住房城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材  
高等学校土木工程专业创新型人才培养规划教材

### 地下结构设计

崔振东 主 编

张忠良 副主编

刘新宇 主 审

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

环球东方 (北京) 印务有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 33 字数: 819 千字

2017 年 8 月第一版 2017 年 8 月第一次印刷

定价: 68.00 元 (赠课件)

ISBN 978-7-112-20816-6

(30467)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 高等学校土木工程专业创新型人才培养规划教材 编委会成员推荐名单

(按姓氏笔画排序)

顾问：王超 王景全 吕志涛 刘德源 孙伟

吴中如 顾金才 钱七虎 唐明述 缪昌文

主任委员：刘伟庆 沈元勤

副主任委员：吕恒林 吴刚 金丰年 高玉峰 高延伟

委员：王跃 王文顺 王德荣 毛小勇 叶继红

吉万旺 刘雁 杨平 肖岩 吴瑾

沈扬 张华 陆春华 陈志龙 周继凯

胡夏闽 夏军武 童小东

## 出版说明

近年来,我国高等教育教学改革不断深入,高校招生人数逐年增加,相应对教材质量和数量的需求也在不断提高和扩大。随着我国建设行业的大发展、大繁荣,高等学校土木工程专业教育也得到迅猛发展。江苏省作为我国土木工程大省、教育大省,无论是开设土木工程专业的高校数量还是人才培养质量,均走在了全国前列。江苏省各高校土木工程专业教育蓬勃发展,涌现出了许多具有鲜明特色的创新型人才培养模式,为培养适应社会需求的合格土木工程专业人才发挥了引领作用。

中国土木工程学会教育工作委员会江苏分会(以下简称江苏分会)是经中国土木工程学会教育工作委员会批准成立的,其宗旨是为了加强江苏省具有土木工程专业的高等院校之间的交流与合作,提高土木工程专业人才培养质量,促进江苏省建设事业的发展。中国建筑工业出版社是住房和城乡建设部直属出版单位,是专门从事住房城乡建设领域的科技专著、教材、技术规范、职业资格考试用书等的专业科技出版社。作为本套教材出版的组织单位,在教材编审委员会人员组成、教材主参编确定、编写大纲审定、编写要求拟定、计划交稿时间以及教材编写的特色和出版后的营销宣传等方面都做了精心组织和专门协调,目的是出精品,体现特色,为全国土木工程专业师生提供一个全新的选择。

经过反复研讨,《高等学校土木工程专业创新型人才培养规划教材》定位为高年级本科生选修课程或研究生通用课程教材。本套教材主要体现创新,充分考虑诸如装配式建筑、新型建筑材料、绿色节能建筑、新型施工工艺、新施工方法、安全管理、BIM技术等,选择18种专业课组织编写相应教材。本套教材主要特点为:在考虑学生前面已学知识的基础上,不对必修课要求掌握的内容过多重复;介绍创新知识时不要求过多、过深、过全;结合案例介绍现代技术;体现建筑行业发展的新要求、新方向和新趋势。为满足多媒体教学需要,我们要求所有教材在出版时均配有多媒体教学课件。

本套《高等学校土木工程专业创新型人才培养规划教材》是中国建筑工业出版社成套出版体现区域特色教材的首次尝试,对行业人才培养具有非常重要的意义。今年正值我国“十三五”规划的开局之年,本套教材有幸入选《住房和城乡建设部土建类专业“十三五”规划教材》。我们也期待能够利用本套教材策划出版的成功经验,在其他专业、在其他地区组织出版体现区域特色的土建类教材。

希望各学校积极选用本套教材,也欢迎广大读者在使用本套教材过程中提出宝贵意见和建议,以便我们在重印再版时得以改进和完善。

中国土木工程学会教育工作委员会江苏分会  
中国建筑工业出版社  
2016年12月

# 前 言

随着我国国民经济的飞速发展，城市地铁、轻轨、高速铁路、高速公路、水电、矿山、市政交通、高层建筑及地下商业建筑等都有了很大的发展。城市地下空间的利用范围相当广泛，包括居住、交通、商业、文化、生产、防灾等各种用途。合理开发利用地下空间，既可以拓展城市空间、节约土地资源，又可以缓解交通拥挤、改善城市环境，亦有利于城市的减灾防灾；既是有效解决城市人口、环境、资源等问题的重要举措，又是实现城市可持续发展的重要途径。

本书共有 17 章，第 1 章到第 6 章，重点介绍了地下结构的基本概念、荷载类型及确定方法、弹性地基梁理论、地下结构的力学计算方法、地下结构的数值分析方法和地下结构可靠度理论；第 7 章到第 17 章分别介绍了浅埋式地下结构设计，附建式地下结构设计，地下连续墙结构设计，基坑支护结构设计，盾构法隧道结构设计，沉井结构设计，沉管结构设计，顶管，管幕及箱涵结构设计，整体式隧道结构设计，锚喷支护结构设计和特殊地下结构设计。

本书适用于城市地下空间工程、建筑工程、公路工程、铁路工程、桥梁与隧道工程、水利水电工程等相关专业的高年级本科生及相关专业研究生教材，也可供相关专业工程技术人员参考。本书由中国矿业大学的崔振东主编，中国矿业大学的张忠良副主编，中国人民解放军理工大学的刘新宇主审。参加编写工作的有华珊珊、樊思成、李丁、姜印熙、杨家强、章皖凯、刘俊麟、郭文灏、何坤等。中国建筑工业出版社的领导、编辑、校审人员为本书的出版付出了辛勤劳动。鉴于此，在本书付梓之日，作者对于为本书编写出版给予支持和帮助的所有同仁表示衷心的感谢。

本书主要参考了国内外地下结构方向相关教材和文献，并结合最新规范、工程案例和数值模拟，重点突出地下结构设计的基本概念、基本理论和基本方法。特别应该强调的是本书是在《地下建筑结构》（中国建筑工业出版社，2005 年）、《岩石地下建筑结构》（中国建筑工业出版社，1979 年）和《土层地下建筑结构》（中国建筑工业出版社，1982 年）这三本教材的基础上编写而成的，在此衷心感谢为上述教材的编写做出贡献的单位与个人。

在本书编写过程中，作者虽然力求突出重点，内容系统而精炼，兼顾科学性和实用性，但因时间和水平有限，书中必然存在一些缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者

2017 年 2 月

# 目 录

第1章 绪论 .....	1	本章小结 .....	47
本章要点及学习目标 .....	1	思考与练习题 .....	47
1.1 概述 .....	1	第3章 弹性地基梁理论 .....	48
1.1.1 地下空间的开发前景 .....	1	本章要点及学习目标 .....	48
1.1.2 地下结构的概念 .....	2	3.1 概述 .....	48
1.2 地下结构的分类和形式 .....	3	3.1.1 弹性地基梁的特点 .....	48
1.2.1 地下结构的分类 .....	3	3.1.2 弹性地基梁的分类 .....	49
1.2.2 地下结构的形式 .....	4	3.2 按温克尔假定计算弹性地基梁 .....	49
1.3 地下结构的特点 .....	9	3.2.1 基本假设 .....	49
1.3.1 地下结构的工程特点 .....	9	3.2.2 按温克尔假定计算弹性地基梁的基本方程 .....	50
1.3.2 地下结构的设计特点 .....	10	3.2.3 按温克尔假定计算短梁 .....	52
1.4 地下结构的设计程序及内容 .....	10	3.2.4 按温克尔假定计算长梁 .....	60
1.4.1 设计程序 .....	10	3.2.5 按温克尔假定计算刚性梁 .....	63
1.4.2 设计内容 .....	11	3.3 按地基为弹性半无限平面体假定计算基础梁 .....	64
1.4.3 计算原则 .....	12	3.3.1 基本假设 .....	64
本章小结 .....	13	3.3.2 基本方程 .....	64
思考与练习题 .....	14	3.3.3 表格的使用 .....	67
第2章 地下结构的荷载 .....	15	本章小结 .....	69
本章要点及学习目标 .....	15	思考与练习题 .....	69
2.1 荷载种类、组合及确定方法 .....	15	第4章 地下结构的力学计算方法 .....	71
2.1.1 荷载种类 .....	15	本章要点及学习目标 .....	71
2.1.2 荷载组合 .....	16	4.1 概述 .....	71
2.1.3 荷载确定方法 .....	16	4.1.1 地下结构的设计方法 .....	71
2.2 岩土体压力的计算 .....	17	4.1.2 地下结构的设计模型 .....	73
2.2.1 土压力的计算 .....	17	4.2 荷载-结构法 .....	75
2.2.2 围岩压力的计算 .....	36	4.2.1 设计原理 .....	75
2.3 初始地应力、释放荷载与开挖效应 .....	43	4.2.2 计算原理 .....	75
2.3.1 初始地应力的确定 .....	44	4.3 地层-结构法 .....	77
2.3.2 释放荷载的计算 .....	44	4.3.1 设计原理 .....	77
2.4 地层弹性抗力 .....	45		
2.5 结构自重及其他荷载 .....	46		

4.3.2 计算初始地应力 .....	78	6.3.1 可靠度分析方法概述 .....	139
4.3.3 本构模型 .....	78	6.3.2 中心点法 .....	140
4.3.4 单元模式 .....	87	6.3.3 验算点法 .....	142
4.3.5 施工过程的模拟 .....	87	6.3.4 JC 法 .....	147
4.4 算例 .....	89	6.3.5 一次渐近积分法 .....	149
本章小结 .....	92	6.3.6 蒙特卡罗法 .....	151
思考与练习题 .....	93	6.3.7 结构体系的可靠度 .....	154
<b>第 5 章 地下结构的数值分析方法</b> .....	94	本章小结 .....	158
本章要点及学习目标 .....	94	思考与练习题 .....	159
5.1 概述 .....	94	<b>第 7 章 浅埋式地下结构设计</b> .....	160
5.1.1 地下结构数值分析方法的概 念 .....	94	本章要点及学习目标 .....	160
5.1.2 地下结构数值分析方法分类 .....	96	7.1 概述 .....	160
5.1.3 弹性力学分析与连续介质数值 分析方法比较 .....	97	7.1.1 直墙拱形结构 .....	160
5.2 地下结构常用数值分析方法与 软件 .....	97	7.1.2 矩形闭合框架 .....	161
5.2.1 有限差分法 .....	98	7.1.3 梁板式结构 .....	162
5.2.2 有限单元法 .....	100	7.2 矩形闭合框架的计算 .....	163
5.2.3 边界单元法 .....	109	7.2.1 荷载计算 .....	163
5.2.4 离散单元法 .....	110	7.2.2 内力计算 .....	165
5.3 数值计算软件应用实例 .....	113	7.2.3 抗浮验算 .....	168
5.3.1 盾构隧道开挖的有限元分析 .....	113	7.3 截面设计 .....	168
5.3.2 盾构隧道在列车荷载作用下的 有限元分析 .....	118	7.4 构造要求 .....	169
5.3.3 土层界面直剪试验离散元 分析 .....	123	7.4.1 配筋形式 .....	169
本章小结 .....	129	7.4.2 混凝土保护层 .....	169
思考与练习题 .....	130	7.4.3 横向受力钢筋 .....	169
<b>第 6 章 地下结构可靠度理论</b> .....	131	7.4.4 分布钢筋 .....	170
本章要点及学习目标 .....	131	7.4.5 箍筋 .....	170
6.1 概述 .....	131	7.4.6 刚性节点构造 .....	171
6.1.1 可靠度理论的发展 .....	131	7.4.7 变形缝的设置及构造 .....	172
6.1.2 地下结构的不确定因素 .....	132	7.5 弹性地基上矩形闭合框架设计 计算 .....	173
6.1.3 地下结构可靠度分析特点 .....	133	7.5.1 框架与荷载对称结构 .....	173
6.2 可靠度分析的基本原理 .....	134	7.5.2 框架与荷载反对称结构 .....	177
6.2.1 基本随机变量 .....	134	7.6 算例 .....	177
6.2.2 结构的极限状态 .....	135	本章小结 .....	184
6.2.3 地下结构的可靠度 .....	136	思考与练习题 .....	184
6.3 可靠度分析的近似方法 .....	139	<b>第 8 章 附建式地下结构设计</b> .....	185
		本章要点及学习目标 .....	185
		8.1 概述 .....	185
		8.1.1 附建式地下结构的特点 .....	186



8.1.2 附建式地下结构的形式	188	9.4.3 荷载及土压力计算	237
8.1.3 附建式地下结构构造	191	9.4.4 基坑底部土体抗隆起稳定性 验算	239
8.2 梁板式结构设计	193	9.4.5 基坑底部抗渗流稳定性验算	240
8.2.1 顶板	193	9.4.6 地下连续墙抗倾覆稳定性 验算	241
8.2.2 侧墙	196	9.4.7 整体圆弧滑动稳定性验算	242
8.2.3 基础	199	9.4.8 支撑轴力及地连墙内力计算	242
8.2.4 承重内墙(柱)	200	本章小结	245
8.2.5 梁板式结构设计算例	201	思考与练习题	245
8.3 装配式结构	206	<b>第10章 基坑支护结构设计</b>	246
8.3.1 装配式结构的概况	206	本章要点及学习目标	246
8.3.2 设计原则	206	10.1 概述	246
8.4 口部结构	208	10.1.1 基坑工程概念及特点	246
8.4.1 室内出入口	208	10.1.2 基坑支护结构的类型及适用	247
8.4.2 室外出入口	209	10.1.3 基坑支护工程设计原则和 内容	248
8.4.3 通风采光洞	209	10.1.4 作用于支护结构上的水平荷载 及土压力	249
8.5 附建式地下结构的研究与 发展	211	10.2 水泥土桩墙	250
8.5.1 待研究的问题	211	10.2.1 概述	250
8.5.2 附建式地下结构发展展望	212	10.2.2 计算	250
本章小结	212	10.2.3 水泥土桩墙构造要求	253
思考与练习题	212	10.3 土钉墙	253
<b>第9章 地下连续墙结构设计</b>	213	10.3.1 概述	253
本章要点及学习目标	213	10.3.2 土钉墙结构尺寸的确定	254
9.1 概述	213	10.3.3 参数设计	254
9.1.1 地下连续墙的施工方法	213	10.3.4 土钉承载力计算	255
9.1.2 地下连续墙的特点及适用 场合	214	10.3.5 稳定性验算	259
9.2 地下连续墙的设计	215	10.4 排桩支护结构	259
9.2.1 横幅设计及稳定性验算	215	10.4.1 概述	259
9.2.2 导墙设计	217	10.4.2 悬臂式支护结构	260
9.2.3 地下连续墙厚度和深度的 设计	217	10.4.3 单层支撑支护结构	262
9.2.4 地下连续墙的静力计算	219	10.4.4 多层支撑支护结构	265
9.3 地下连续墙细部设计	231	10.5 基坑支护稳定性	266
9.3.1 混凝土工程设计	231	10.5.1 概述	266
9.3.2 钢筋工程设计	231	10.5.2 整体稳定性分析	266
9.3.3 地下连续墙接头设计	232	10.5.3 支护结构绕最下层支锚点转动 稳定性分析	267
9.4 地下连续墙设计算例	236	10.5.4 坑底隆起稳定性分析	268
9.4.1 工程概况	236	10.5.5 基坑抗渗流稳定性分析	268
9.4.2 工程地质条件	237		

10.6 基坑现场监测与信息化	
施工	269
10.6.1 监测和预报的作用	269
10.6.2 监测系统设计原则	269
10.6.3 监测内容	270
10.6.4 监测结果的分析和评价	272
10.6.5 报警	272
10.6.6 监测点保护	273
本章小结	273
思考与练习题	274
<b>第11章 盾构法隧道结构设计</b>	275
本章要点及学习目标	275
11.1 概述	275
11.2 盾构法隧道衬砌结构设计	
流程	276
11.2.1 设计原则	276
11.2.2 设计流程	276
11.3 衬砌结构设计	277
11.3.1 衬砌形式与构造	277
11.3.2 装配式钢筋混凝土管片	280
11.3.3 荷载的计算	281
11.3.4 盾构隧道常用的设计模型	284
11.3.5 衬砌结构内力计算方法	286
11.3.6 衬砌断面设计	291
11.4 隧道防水及处理	294
11.4.1 衬砌的抗渗	294
11.4.2 管片制作精度	295
11.4.3 接缝防水的基本技术要求	295
11.4.4 二次衬砌	295
11.5 盾构法隧道结构设计的算例	296
11.6 有限单元法在隧道计算模型中的应用	304
本章小结	309
思考与练习题	309
<b>第12章 沉井结构设计</b>	310
本章要点及学习目标	310
12.1 沉井概述	310
12.1.1 沉井结构的概念、特点及应用	310
12.1.2 沉井结构的分类	311
12.1.3 沉井结构的设计原则	311
12.1.4 沉井结构的施工步骤	311
12.2 沉井的构造	312
12.2.1 井壁	312
12.2.2 刃脚	313
12.2.3 凹槽	313
12.2.4 内隔墙与底梁	314
12.2.5 取土井	314
12.2.6 封底	315
12.2.7 顶板	315
12.3 沉井结构设计计算	315
12.3.1 下沉系数计算	315
12.3.2 沉井底节验算	316
12.3.3 沉井井壁计算	316
12.3.4 沉井刃脚验算	318
12.3.5 沉井封底计算	320
12.3.6 沉井底板计算	321
12.3.7 沉井抗浮稳定验算	322
12.4 沉箱结构	322
12.4.1 沉箱的主体结构组成	324
12.4.2 沉箱结构设计条件与方法	324
12.4.3 沉箱结构设计的注意事项	326
12.5 沉井结构设计算例	329
本章小结	341
思考与练习题	341
<b>第13章 沉管结构设计</b>	343
本章要点及学习目标	343
13.1 概述	343
13.1.1 水底隧道的主要施工方法	344
13.1.2 沉管隧道施工	345
13.1.3 沉管隧道设计	346
13.2 沉管结构设计	347
13.2.1 沉管结构的类型和构造	347
13.2.2 沉管结构荷载	348
13.2.3 沉管结构的浮力设计	350
13.2.4 沉管结构计算	352
13.2.5 预应力的应用	354
13.3 沉管防水措施	355
13.3.1 止水缝带	355
13.3.2 钢壳钢板防水	356

13.3.3 卷材防水和涂料防水 .....	357	15.2 整体式隧道结构的一般技术要求 .....	402
13.4 变形缝与管段接头设计 .....	358	15.2.1 衬砌断面和几何尺寸 .....	402
13.4.1 变形缝的布置和构造 .....	358	15.2.2 衬砌材料的选择 .....	405
13.4.2 管段接头 .....	359	15.2.3 衬砌结构的一般构造要求 .....	407
13.5 沉管基础 .....	360	15.3 整体式隧道结构的计算方法 .....	408
13.5.1 地质条件和沉管基础 .....	360	15.4 半衬砌结构 .....	409
13.5.2 沉管基础处理 .....	361	15.4.1 半衬砌结构的计算简图 .....	410
13.5.3 软弱土层上的沉管基础 .....	363	15.4.2 半衬砌结构的内力计算方法 .....	411
13.6 管段沉设与水下连接 .....	365	15.4.3 拱脚弹性固定系数的确定 .....	414
13.6.1 沉设方法与设备 .....	365	15.4.4 拱圈变位值的计算 .....	415
13.6.2 水下连接 .....	367	15.5 直墙拱形衬砌结构 .....	417
本章小结 .....	368	15.5.1 直墙拱形衬砌结构的计算简图 .....	417
思考与练习题 .....	368	15.5.2 直墙拱的内力计算方法 .....	418
<b>第 14 章 顶管、管幕及箱涵结构设计</b> .....	369	15.5.3 直墙拱结构设计算例 .....	425
本章要点及学习目标 .....	369	15.6 曲墙衬砌结构 .....	441
14.1 顶管结构 .....	369	15.6.1 曲墙拱形衬砌结构的计算简图 .....	441
14.1.1 概述 .....	369	15.6.2 曲墙拱形衬砌结构的内力计算步骤 .....	443
14.1.2 顶管的分类 .....	370	15.7 复合衬砌结构 .....	446
14.1.3 顶管工程的设计计算 .....	370	15.7.1 复合衬砌的构造 .....	446
14.1.4 顶管施工的主要设备 .....	376	15.7.2 复合衬砌结构的计算原理和方法 .....	447
14.1.5 顶管施工的主要技术措施 .....	379	15.8 连拱隧道结构 .....	448
14.1.6 顶管设计算例 .....	382	15.8.1 概述 .....	448
14.2 管幕结构 .....	386	15.8.2 连拱隧道的设计和计算方法 .....	449
14.2.1 管幕法的特点及适用范围 .....	386	本章小结 .....	452
14.2.2 管幕结构的力学分析 .....	387	思考与练习题 .....	453
14.2.3 管幕工法顶进施工 .....	389	<b>第 16 章 锚喷支护结构设计</b> .....	455
14.3 箱涵结构 .....	389	本章要点及学习目标 .....	455
14.3.1 结构形式 .....	389	16.1 概述 .....	455
14.3.2 箱涵结构的设计 .....	389	16.2 围岩分级 .....	456
14.3.3 沉裂缝的位置 .....	395	16.2.1 围岩及其分级依据 .....	456
14.3.4 涵管顶进施工方法 .....	395	16.2.2 围岩分级方法 .....	457
14.3.5 箱涵结构设计算例 .....	396	16.3 锚喷支护设计 .....	458
本章小结 .....	397	16.3.1 按局部作用原理的设计 .....	459
思考与练习题 .....	398	16.3.2 按整体作用原理的设计 .....	461
<b>第 15 章 整体式隧道结构设计</b> .....	399		
本章要点及学习目标 .....	399		
15.1 概述 .....	399		
15.1.1 整体式隧道结构的概念 .....	399		
15.1.2 整体式隧道结构的分类 .....	399		

16.3.3 算例 .....	463	17.3.2 衬砌构造 .....	471
16.4 锚喷支护监控设计 .....	463	17.3.3 计算原理 .....	472
16.4.1 监控设计目的、原理与方法 .....	463	17.4 端墙 .....	473
16.4.2 监控量测内容及手段 .....	464	17.4.1 端墙形式 .....	474
16.5 施工信息的反馈 .....	465	17.4.2 端墙的计算 .....	474
本章小结 .....	466	17.5 岔洞 .....	475
思考与练习题 .....	466	17.5.1 岔洞及接头形式 .....	475
<b>第 17 章 特殊地下结构设计</b> .....	467	17.5.2 岔洞构造 .....	477
本章要点及学习目标 .....	467	17.6 竖井和斜井 .....	478
17.1 概述 .....	467	17.6.1 竖井的构造和计算原理 .....	478
17.2 穹顶直墙结构 .....	467	17.6.2 斜井的构造和计算原理 .....	483
17.2.1 衬砌形式 .....	467	本章小结 .....	485
17.2.2 衬砌构造 .....	468	思考与练习题 .....	485
17.2.3 计算原理 .....	469	<b>附录 弹性地基梁计算用表</b> .....	486
17.3 洞门 .....	469	<b>参考文献</b> .....	512
17.3.1 洞门类型 .....	469		

# 第 1 章 绪 论

## 本章要点及学习目标

本章要点:

- (1) 地下空间的开发前景;
- (2) 地下结构的概念和功能;
- (3) 地下结构的分类、形式和特点;
- (4) 地下结构的设计程序及内容。

学习目标:

- (1) 了解地下空间开发的重要意义;
- (2) 掌握地下结构的概念、功能和形式;
- (3) 熟悉地下结构与地上结构的区别;
- (4) 熟悉地下结构的设计程序及内容。

## 1.1 概述

### 1.1.1 地下空间的开发前景

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,形成不同厚度土层。岩层和土层在自然状态下都是实体,在外部条件下才能形成空间。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。

自从人类出现以来,就从未停止过对地下空间的开发和利用。人类曾利用天然洞穴作为居住处所,后来,随着科技的进步,人类逐渐学会修建并利用地下结构。我国古代修建的陵墓、地下粮仓、地下采矿洞室已具有相当的技术水准与规模,如我国湖北大冶铜绿山保存完好的采矿遗址,是我国古代三千多年前西周时期劳动人民的智慧结晶,其中的竖井、斜井、平巷及其相互贯通具有相当高的建筑水准,反映了我国古代地下工程已居世界领先水平。再如埃及金字塔、古巴比伦幼发拉底河引水隧道,说明古代人类修建地下结构已具备较高的水平。

从 15 世纪开始,欧洲出现文艺复兴,产业革命和科学技术开始走在世界的前列,地

下空间的开发利用进入了新的发展时期。17世纪火药的大范围应用,使人类在坚硬岩层中挖掘隧道成为可能,从而进一步扩大了地下空间的开发应用领域。1613年建成伦敦地下隧道;1681年修建了地中海比斯开湾长170m的连接隧道;1843年伦敦建成越河隧道;1863年伦敦建成世界第一条地下铁道;1871年穿越阿尔卑斯山、连接法国和意大利的全长12.8km的公路隧道开通。到21世纪初,世界上已有50多个国家170多个城市修建了地铁,总线路里程将近1万多千米。我国1987年5月建成的大瑶山铁路隧道,长14295m;日本青函隧道连接北海道与本州岛,全长53850m,穿越津轻海峡,其海底长度达13.3km;英法海峡隧道全长50km,海底长度37km。此外,各类地下电站也迅速增长,全世界的地下水力发电站的数目已超过400座,其发电量达45亿瓦以上。另外,世界各国还修建了大量的地下贮藏库,其建造技术不断革新。

近年来,世界各国日益重视对地下空间的开发和利用,地下工程结构的需求量和建设正在迅猛增长。随着我国基础设施的大规模建设,西部大开发、高速铁路、高速公路、大型水电站、南水北调、西气东输等工程中都有大量的地下工程结构需要建设。除此之外,现代城市建设中的地铁工程、市政工程、过江和穿海隧道工程也在不断增加。因此,在土地资源日益减少和人口增长的双重压力下,大力开发和利用地下空间已成为人类发展的必然选择和重要出路。

地下空间是迄今尚未被充分开发利用的一种自然资源,具有很大的开发潜力。以目前的施工技术和维持人的生存所需花费的代价来看,地下空间的合理开发深度以2km为宜。考虑到在实体岩层中开挖地下空间需要一定的支承条件,即在两个相邻岩洞之间应保留相当于岩洞尺寸1~1.5倍的岩体。以1.5倍计,则在当前和今后一段时间内的技术条件下,在地下2km以内可供合理开发的地下空间资源,总量为 $4.12 \times 10^{17} \text{ m}^3$ 。再考虑到地球表面的80%被海洋、森林、沙漠、江河湖、冰川和永久积雪等占据,全球可供有效利用的地下空间资源应为 $0.824 \times 10^{17} \text{ m}^3$ 。在我国,可耕地、城市和乡村居民点用地的面积约占国土总面积的15%,按照上面的计算方法,2km以内可供有效利用的地下空间资源总量接近 $1.15 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 。折合成建筑面积(以平均层高3m计)约 $3.83 \times 10^{14} \text{ m}^2$ 。不同开发深度可获得的地下空间资源及可提供的建筑面积如表1-1所示。

我国可供有效利用的地下空间资源

表 1-1

开发深度(m)	可供有效利用的地下空间( $\text{m}^3$ )	可提供的建筑面面积( $\text{m}^2$ )
2000	$11.5 \times 10^{14}$	$3.83 \times 10^{14}$
1000	$5.8 \times 10^{14}$	$1.92 \times 10^{14}$
500	$2.9 \times 10^{14}$	$0.96 \times 10^{14}$
100	$0.58 \times 10^{14}$	$0.19 \times 10^{14}$
30	$0.18 \times 10^{14}$	$0.06 \times 10^{14}$

由此可见,可供有效利用的地下空间资源的绝对数量仍十分巨大,开发和利用地下空间资源,将成为解决人类发展与土地资源紧张矛盾的最现实的途径。21世纪将是人类开发利用地下空间的新时代。

### 1.1.2 地下结构的概念

保留上部地层(山体或土层)的前提下,在开挖出能提供某种用途的地下空间内的结

构筑物，统称为地下结构。地下空间的开发和利用，首先要按照要求在地层中开挖洞室，洞室开挖使地层的初始应力状态发生改变，释放荷载，产生变形并随时间的推进逐渐发展，因此洞室开挖后必须沿洞室周边修建永久性支护结构，即衬砌结构。该结构具有承受开挖空间周围地层的压力、结构自重、地震和爆炸等动静荷载的承重作用；同时又具有防止开挖空间周围地层风化、崩塌、防水和防潮等围护作用。为了满足使用要求，在衬砌内部还需修建必要的梁、柱和墙体等内部结构，内部结构的设计和计算与地面结构相似。所以，地下结构包括衬砌结构和内部结构，如图 1-1 所示。

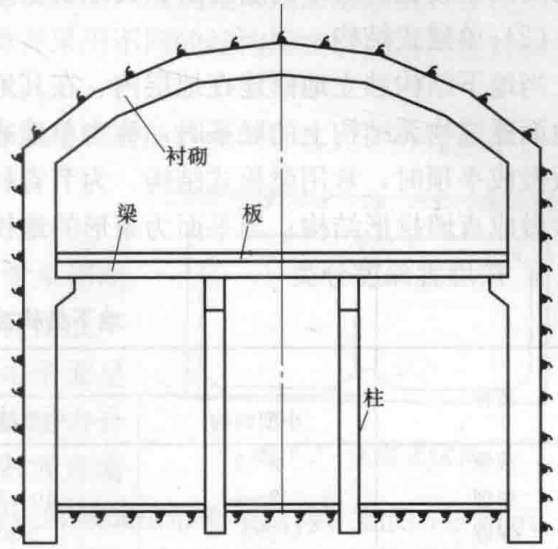


图 1-1 地下结构示意图

## 1.2 地下结构的分类和形式

### 1.2.1 地下结构的分类

#### 1. 按所处的地质条件分类

- ① 岩体地下结构：修建在岩石中的地下工程结构，如：穿山隧道等。
- ② 土体地下结构：修建于土中的地下工程结构，如：城市地铁等。
- ③ 水体地下结构：悬浮于海水中的水下悬浮隧道。

#### 2. 按用途分类

地下结构按用途分类

表 1-2

序号	用途	功能
1	工业民用	地下住宅、工业厂房等
2	商业用途	地下商业城、地下游乐场、图书馆等
3	交通运输	隧道、地铁、地下停车场等
4	水利水电	电站输水隧道、农业给水排水隧道等
5	市政工程	给水、污水、管路、线路、垃圾填埋等
6	地下仓储	食物、地下冷库、石油及核废料存储等
7	人防军事	人防工事、军事指挥所、地下武器库、地下医院等
8	采矿巷道	矿山运输巷道和开采巷道等
9	其他	其他地下特殊建筑

#### 3. 按与地面结构联系情况分类

##### (1) 附建式结构

各种附属于地面建筑的地下室部分，称为附建式地下结构。其结构形式与上部地面建筑布置相协调，其外围结构常用地下连续墙或板桩结构，内部结构则可为框架结构、梁板

结构或无梁楼盖。对于高层楼房,其地下室结构都兼作为箱形基础。

## (2) 单建式结构

当地下结构独立地修建在地层内、在其地面上方无其他的地面建筑物或与其地面上方的地面建筑物无结构上的联系时,称为单建式地下结构。该结构平面成方形或长方形,当顶板做成平顶时,常用梁板式结构。为节省材料,顶部可做成拱形,如地下防空洞或避难所常做成直墙拱形结构;当平面为条形的地铁等大中型结构,常做成矩形框架结构。

## 4. 按埋置深度分类

地下结构按埋深分类

表 1-3

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
中埋	2~4	10~30	10~50	100~1000
深埋	>4	>30	>50	>1000

## 5. 按照支护形式分类

① 防护型支护:以封闭岩面,防止周围岩体质量的进一步恶化或失稳为目的。既不能阻止围岩变形,又不能承受岩体压力,是最轻型的开挖支护形式,通常是采用喷浆、喷射混凝土或局部锚杆来完成的。

② 构造型支护:通常采用喷射混凝土、锚杆和钢筋网、模筑混凝土支护等形式,以满足施工及构造要求,防止局部掉块或崩塌而逐步引起整体失稳。

③ 承载型支护:应满足围岩压力、使用荷载、结构荷载及其他荷载的要求,保证围岩与支护结构的稳定性。

## 6. 按断面形式分类

地下结构根据断面形式可分为以下几种,如图 1-2 所示。

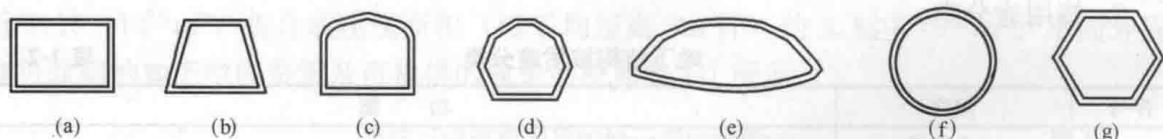


图 1-2 地下结构形式

(a) 矩形; (b) 梯形; (c) 直墙拱形; (d) 曲墙拱形; (e) 仰拱形; (f) 圆形; (g) 多边形

## 1.2.2 地下结构的形式

地下结构的形式主要由使用功能、地质条件和施工技术等因素确定。地下结构形式首先受使用要求制约,当地下结构为空间封闭结构形式、宽度在 10m 内时,通常称为“洞室”;宽度在 10~35m 时,称为“地下厅”;大于 35m 时,称为“地下广场”。当地下结构垂直地层表面时( $\alpha=90^\circ$ ),称为“竖井”;当倾斜角 $\alpha>45^\circ$ 时,称之为“斜井”。当人工建筑处于地表下、结构沿长度方向的尺寸大于宽度和高度并具有联通两点的功能时,可称为“隧道”。地下结构形式首先受使用要求制约,如人行通道,可做成单跨矩形或拱形结



构；地质条件直接关系到围岩压力大小，如地质较差，应优先采用圆形断面；在使用功能和地质条件相同情况下，施工方法不同往往需要采用不同的结构形式。如盾构法衬砌采用装配式，矿山法衬砌多采用现浇或锚喷式。

根据地质情况的差异，地下结构形式可分土层和岩层内的两种形式，分述如下。

### 1. 土层地下结构

#### (1) 浅埋式结构

这类结构的覆土厚度一般仅 5~10m，通常采用明挖填埋法修建，平面成方形或长方形，当顶板做成平顶时，常用梁板式结构。地下指挥所可以采用平面呈条形的单跨或多跨结构。为节省材料及使结构受力合理，顶部可做成拱形；如一般人员掩蔽部常做成直墙拱形结构；如平面为条形的地铁等大中型结构，常做成矩形框架结构，如图 1-3 所示。

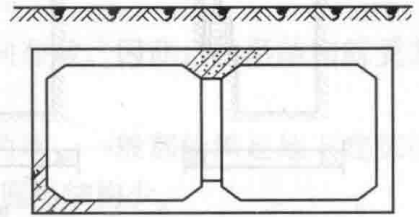


图 1-3 浅埋式结构

#### (2) 附建式结构

这类结构是房屋下面的地下室，一般有承重的外墙、内墙（地下室作为大厅用时则为内柱）和板式或梁板式顶底板结构，如图 1-4 所示。

#### (3) 沉井结构

沉井为一开口的井筒状结构，施工时需要在沉井底部挖土，顶部出土，主要利用结构的自重作用下沉，水平断面一般做成方形，也有圆形，可以单孔也可以多孔，如图 1-5 所示，下沉到位后再做顶底板。

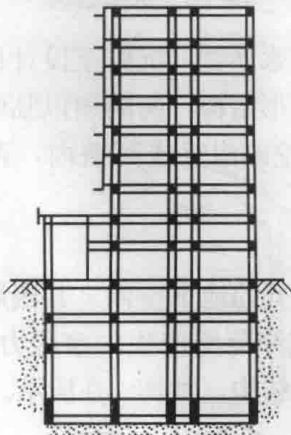


图 1-4 附建式结构

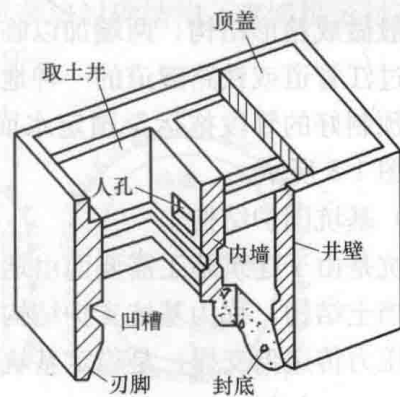


图 1-5 沉井结构

#### (4) 地下连续墙结构

先建造两条连续墙，然后在中间挖土，修建底板、顶板和中间楼层，其施工过程如图 1-6 所示。

#### (5) 地铁盾构结构

盾构推进时，以圆形最适宜，故常采用装配式圆形衬砌，也有做成方形、半圆形、椭圆形、双圆形、三圆形的，适用于在中等埋深以上采用盾构法施工的地下结构中，如图 1-7 所示。

#### (6) 沉管结构