

DIXIAJIEGOU  
地下结构

刘新宇 马林建 编著



# 地下结构

刘新宇 马林建 编著



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

地下结构/刘新宇,马林建编著.--上海:同济大学出版社,2016.5

ISBN 978-7-5608-6341-2

I. ①地… II. ①刘…②马… III. ①地下工程-结构设计-研究

IV. ①TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 118771 号

## 地下结构

刘新宇 马林建 编著

策 划: 杨宁霞 季 慧 胡 毅

责任编辑: 季 慧 胡 毅

责任校对: 徐春莲

封面设计: 陈益平

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)

(上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店

排版制作 南京新翰博图文制作有限公司

印 刷 常熟市大宏印刷有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 22.25

字 数 555 000

版 次 2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6341-2

定 价 68.00 元

版权所有 侵权必究 印装问题 负责调换

## 内 容 提 要

---

本书系统介绍了国防工程、人民防空工程和兼顾人防城市地下工程常用结构的静力计算与设计。主要包括:地下结构设计计算基本理论、岩石坑道工程衬砌结构与锚喷支护、土层浅埋单建式结构与附建式结构、盾构法与沉井法结构、明挖工程支护结构、地下结构数值计算和数值模拟,地下结构反分析等。

本书适用于国防、人防建筑结构类专业和土木工程相关专业的本科和研究生教学使用,也可供国防、人防工程和其他相关行业的科研、设计与施工人员参考。

# ■ 前 言 ■

## FOREWORD

地下结构广泛应用于工业、能源、交通、市政等国民经济各个部门,也是国防、人防工程的主要结构形式。本书重点介绍国防、人防工程和兼顾人防城市地下工程常用结构的静力设计原理与方法。

本书共分为4篇16章:

第1篇为地下结构总论,包括1~3章。介绍地下结构类型与特点、设计计算理论方法分类、结构的静力设计以及设计准则、地层工程性质和地层压力理论等。

第2篇为岩石地下结构,包括4~7章。介绍坑道和洞库工程衬砌结构的技术要求、结构荷载计算、衬砌内力计算和截面设计、锚喷支护设计、复合式衬砌设计和现场监控等。

第3篇为土层地下结构,包括8~12章。介绍浅埋单建式结构与附建式结构、盾构法与沉井法地下结构和明挖工程支护结构。

第4篇为地下结构数值计算方法,包括13~16章。介绍衬砌结构内力分析、围岩-结构系统的弹塑性分析、黏弹塑性分析、流变损伤分析和地下结构反分析与应用。这部分内容可供本科高年级或研究生选修。

本书每章后附有思考题或者练习题,部分章节附有课程设计题,书后开列的部分书目可供拓展阅读参考。

地下结构是国防、人防建筑结构类本科专业的主干专业课程之一。本书是在解放军理工大学国防工程学院长期教学实践基础上,根据我国国防、人防工程建设和城市地下空间开发利用的现状和需求,吸收了相关科研、教学、工程和现行技术标准的成果而编写,适用于国防、人防建筑结构类专业和土木工程相关专业的本科或者研究生教学,也可供相关行业科研、设计与施工技术人员参考。

本书由刘新宇编写,马林建参加了第4篇的编写。

感谢同济大学出版社对本书出版发行的大力支持。

对于书中存在的不足之处,敬请读者指正。

作 者

2015年10月

# 目 录

## CONTENTS

### 第 1 篇 地下结构总论

<b>第 1 章</b>	<b>概述</b> .....	3
1.1	地下结构的类型 .....	3
1.2	地下结构设计计算方法及分类 .....	7
1.3	地下结构的静力设计 .....	11
1.4	地下结构的设计准则 .....	15
1.5	地下结构设计程序与设计文件 .....	18
<b>第 2 章</b>	<b>地层的工程性质</b> .....	20
2.1	地层介质的力学性质 .....	20
2.2	地层的初始应力 .....	25
2.3	地层的二次应力 .....	27
2.4	围岩稳定与围岩分级 .....	35
<b>第 3 章</b>	<b>地层压力理论</b> .....	50
3.1	地层压力概念 .....	50
3.2	松动压力计算理论 .....	54
3.3	形变压力计算理论 .....	59

### 第 2 篇 岩石地下结构

<b>第 4 章</b>	<b>坑道工程结构设计</b> .....	67
4.1	一般技术要求 .....	67
4.2	衬砌结构荷载 .....	73
4.3	贴壁式直墙拱形衬砌设计 .....	77
4.4	半衬砌结构设计 .....	86
4.5	离壁式直墙拱形衬砌设计 .....	88

<b>第5章</b>	<b>拱形衬砌结构的内力计算</b> .....	92
5.1	拱圈构件分析 .....	92
5.2	墙、板构件分析 .....	101
5.3	贴壁式直墙拱形衬砌内力计算 .....	116
5.4	半衬砌内力计算 .....	129
5.5	离壁式直墙拱形衬砌内力计算 .....	132
<b>第6章</b>	<b>坑道特殊衬砌结构设计</b> .....	140
6.1	垂直式与倾斜式坑道衬砌 .....	140
6.2	具有起重设备的拱形衬砌 .....	145
6.3	坑道接头衬砌 .....	152
6.4	挡墙衬砌结构 .....	157
<b>第7章</b>	<b>锚喷支护设计</b> .....	160
7.1	类型与作用 .....	160
7.2	一般技术要求 .....	163
7.3	坑道工程锚喷支护设计 .....	166
7.4	复合式衬砌设计 .....	172
7.5	现场监控量测 .....	175
<b>第3篇 土层地下结构</b>		
<b>第8章</b>	<b>单建式结构</b> .....	183
8.1	一般技术要求 .....	183
8.2	矩形闭合框架结构 .....	192
8.3	梁板式结构 .....	194
8.4	板柱结构 .....	204
<b>第9章</b>	<b>附建式结构</b> .....	216
9.1	结构荷载 .....	217
9.2	内力计算和强度验算 .....	220
9.3	地基计算 .....	231
<b>第10章</b>	<b>盾构法圆形管片结构</b> .....	237
10.1	结构类型 .....	237
10.2	一般技术要求 .....	238
10.3	结构荷载 .....	239
10.4	衬砌内力和截面强度 .....	243

<b>第 11 章</b>	<b>沉井法地下结构</b> .....	246
	11.1 结构形式 .....	246
	11.2 结构计算 .....	248
<b>第 12 章</b>	<b>明挖工程支护结构</b> .....	255
	12.1 结构类型 .....	255
	12.2 支护结构设计 .....	258
	12.3 支护与地层的稳定分析 .....	267
	12.4 支护结构兼作主体结构的设计 .....	270
<b>第 4 篇 地下结构数值计算方法</b>		
<b>第 13 章</b>	<b>衬砌内力计算的矩阵位移法</b> .....	275
	13.1 单元分析 .....	276
	13.2 地下结构计算常用单元刚度矩阵 .....	279
	13.3 整体分析 .....	287
<b>第 14 章</b>	<b>地下结构弹塑性分析有限单元法</b> .....	296
	14.1 岩土材料弹塑性本构模型 .....	296
	14.2 线弹性问题有限单元法 .....	300
	14.3 非线性问题有限单元法 .....	306
	14.4 地下结构有限元法数值模拟 .....	308
<b>第 15 章</b>	<b>地下结构流变分析有限单元法</b> .....	320
	15.1 材料流变本构方程 .....	320
	15.2 黏弹性问题有限单元法 .....	323
	15.3 黏塑性问题有限单元法 .....	325
	15.4 流变损伤问题有限单元法 .....	328
<b>第 16 章</b>	<b>地下结构反分析</b> .....	333
	16.1 地下洞室线弹性位移反分析 .....	333
	16.2 地下洞室黏弹性位移反分析 .....	336
	16.3 非线性问题位移反分析的正演法 .....	339
	16.4 反分析方法的应用 .....	340
	<b>参考文献</b> .....	344





# 第 1 篇 地下结构总论

在地层内部修建的各类建筑工程称为地下工程。

地下工程广泛应用于工业、能源、交通、市政等国民经济各个部门,如铁路与公路隧道、城市地下铁道、矿山巷道、水工隧道、市政工程、地下厂房、地下洞库以及城市地下商业建筑、公共建筑或大型综合体工程等。地下工程也是各类国防、人防工程的主要工程形式,如地下指挥工程、通信工程、人员掩蔽工程、物质装备掩蔽工程等各类永备防护工程。

地下结构即地下工程的承重体系,是地下工程安全建造和使用的基本技术保障。

地下结构的类型很多,不同类型地下结构的设计计算方法也不同。但是由于地下结构工作环境均为岩土地层,各种地下结构的工作特性和设计计算原理具有共同之处。作为本书的开篇,结合国防、人防和兼顾人防城市地下工程的特点,简要讨论地下结构类型与特点、设计计算理论方法分类、结构静力分析原理与设计基本准则、地层工程性质和地层压力理论等与地下结构设计相关的共同性问题。



# 第1章 概述

## 1.1 地下结构的类型

地下结构一般由围护结构和内部结构两大部分组成。围护结构指与地层接触或者相邻的外围结构,如工程的顶盖、底板和外墙,其直接承受地层压力或地下水等作用,在坑道工程中也常称为衬砌、被覆或者支护。对于多层或者多跨地下工程,工程内部空间存在楼面、隔墙、柱等结构,统称为内部结构,其承受围护结构传来的荷载和内部空间的各种使用荷载。

按照所处的地层类别,地下结构可分为岩石地下结构和土层地下结构。修建在岩石地层内的结构称为岩石地下结构,修建在土体地层内的结构称为土层地下结构。由于岩石地层和土质地层的工程地质条件和物理力学性质相差较大,地层开挖的施工方法、地层自稳能力和结构受力有着明显的差别,故两类地层中地下结构的结构形式和设计计算方法有着明显的不同。

按照地层开挖的施工方法,地下结构可分为暗挖法结构和明挖法结构。暗挖法结构是在地层内部应用人工、机械挖掘或爆破等方法开挖地层后施作的地下结构,一般应用于结构埋深较大的岩石或者土层地下工程。但随着施工技术的发展,目前暗挖法也已成功应用于浅埋结构。明挖法结构是从地面开挖,并在开挖空间(如基坑)内施作的地下结构,一般应用于结构埋深小、结构平面尺寸较大的地下结构。明挖法结构既包括传统的开敞式基坑,也包括逆作法、沉井法、地下连续墙法等施工方法施作的地下工程。由于暗挖法和明挖法施工方法不同,结构的受力特点有很大差别,相应的结构形式和设计计算方法也不同。

暗挖法结构是国防、人防坑(地)道工程的主要结构形式,明挖法结构在国防、人防工程中也称为掘开式结构,是土层浅埋单建式工程和附建式工程(防空地下室)的主要结构形式。由此,国防、人防工程地下结构常分为坑(地)道结构和掘开式结构两大类型。

对于国防、人防工程地下结构,所承受的荷载按照荷载作用性质可分为动荷载和静荷载两大类。动荷载特指工程战术技术要求规定的战时作用的武器(核武器或常规武器)爆炸荷载,是国防、人防工程结构的特殊荷载。静荷载一般指除动荷载以外的各种荷载,既包括地层压力、结构自重等永久荷载,也包括工程使用过程的各种可变荷载。显然,静荷载是国防、人防工程地下结构的基本作用荷载。国防、人防工程地下结构按照承受荷载的类型习惯上分为静力结构和动力结构两大类,仅承受静荷载的结构称为静力结构,如坑道工程主体的静被覆结构;除了承受静荷载以外,在战时还要承受动荷载的结构称为动力结构,如坑道口部的动被覆段结构和浅埋掘开式结构。

由于地层类别、施工方法以及使用要求多样,地下结构的结构形式很多。对于国防、人防工程地下结构,可以分为以下拱形衬砌结构、锚喷支护结构、平顶梁板柱结构、壳体结构等形式。

### 1.1.1 拱形衬砌结构

地下拱形结构是一种历史悠久的地下结构类型。在人类远古文明时期,拱形地下洞穴就是人类的居所。理论与实践表明,与平顶洞室比较,拱形洞室自稳能力较强,因此,拱形结构是暗挖法结构的主要形式。根据工程的使用要求、结构材料、地质条件和施工方法,拱形结构有以下主要形式。

#### 1. 直墙拱顶衬砌

直墙拱顶衬砌是拱衬砌形结构的基本形式(图 1-1),由拱形顶盖(拱圈)、直边墙(侧墙)构件组成基本承重体系,岩石坑道结构衬砌的水平底板构件一般按照构造要求设置。结构材料可以为砖、石、混凝土砌体、现浇混凝土或者钢筋混凝土。直墙拱顶衬砌是岩石坑道工程的主要结构形式,广泛应用于国防、人防坑道工程。

#### 2. 曲墙拱顶衬砌

曲墙拱顶衬砌(图 1-2)由拱圈顶盖、拱形边墙和反拱底板(仰拱)构件组成承重体系,也称为马蹄形衬砌。结构材料一般为现浇混凝土或者钢筋混凝土,小跨度结构也可以采用料石砌体。一般应用于地层比较软弱破碎,侧向地压较大的岩石坑道工程以及土层地道工程。

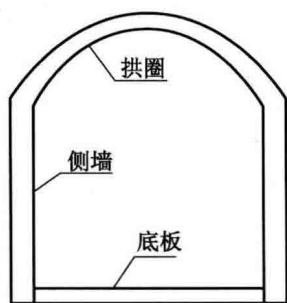


图 1-1 直墙拱顶衬砌

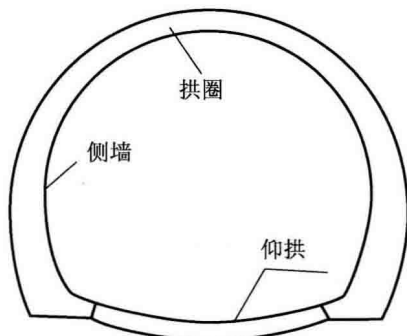


图 1-2 曲墙拱顶衬砌

#### 3. 半衬砌和厚拱薄墙衬砌

半衬砌(图 1-3)和厚拱薄墙衬砌(图 1-4)的承重体系为拱脚直接支承于基岩的拱圈,主要承受垂直方向的地压,要求岩石地层比较坚硬完整,侧向地压较小。厚拱薄墙衬砌结构的边墙一般按照构造要求设置。半衬砌主要用于大跨度、矮边墙的岩石飞机洞库工程,厚拱薄墙衬砌在各种大跨度岩石洞库工程中应用较多。结构材料一般为现浇钢筋混凝土。

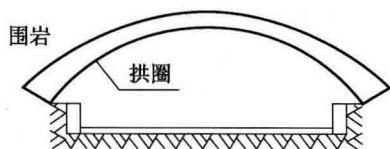


图 1-3 半衬砌

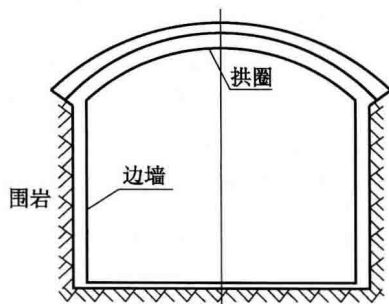


图 1-4 厚拱薄墙衬砌

#### 4. 离壁式衬砌

离壁式衬砌(图 1-5)为由拱圈顶盖、直边墙构件和拱脚水平支撑组成的承重结构,与上述直墙拱顶衬砌相比较,这种衬砌的特点是拱圈、边墙构件均与地层分离,防水、防潮性能好是离壁式衬砌的突出优点,因此在国防、人防岩石坑道工程的主体结构中经常采用。离壁式衬砌要求毛洞稳定性要好,因此一般适合比较坚硬完整的岩石地层,或者地层经过加固、毛洞稳定的情况。拱形顶盖和水平支撑一般为现浇混凝土,直边墙一般为砌体或者现浇混凝土。

#### 5. 圆形衬砌

圆形衬砌的承重结构为圆环形结构,圆环形结构在垂直地压和水平地压较接近时受力状态较好,一般适用于侧向地压比较大的软弱土层。国防、人防工程的竖井、油库、水库等也常采用现浇混凝土圆形结构,城市地铁盾构法施工区间隧道采用装配式圆形管片衬砌结构(图1-6)。

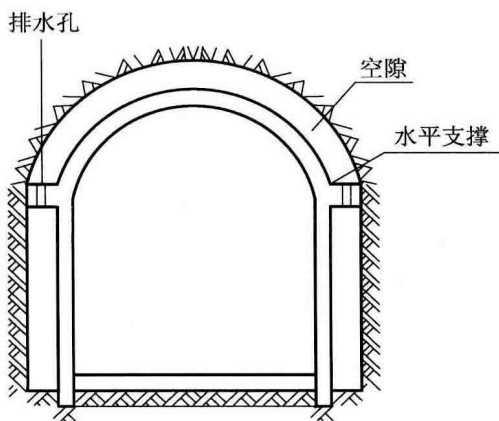


图 1-5 离壁式衬砌



图 1-6 装配式圆形管片结构

### 1.1.2 锚喷支护与复合式衬砌

锚喷支护是锚杆、喷射混凝土、喷网混凝土支护及组合(图 1-7)的统称。锚杆指锚入地层内的受拉杆件(如钢筋),喷射混凝土指用混凝土喷射机械在洞室开挖面上施作的混凝土薄层,如果混凝土薄层内设置钢筋网则称为喷网混凝土。

锚喷支护是 20 世纪出现的岩土工程加固技术和支护技术,在地下结构支护设计与施工中已得到广泛应用。喷射支护在支护原理上不同于一般衬砌结构,衬砌结构被动承受地压,锚喷支护通过对地层加固,充分发挥地层的自承能力,并和地层形成共同承受地压的结构体系,是“新奥法”等隧道工程现代支护概念工程应用的主要支撑技术。当锚喷支护和衬砌结构联合使用时,称为复合式衬砌(图 1-8),其中先期施作的锚喷支护称为初期支护,后期施作的衬砌结构称为二次衬砌。复合式衬砌能够发挥锚喷支护和衬砌结构各自的优点,在软弱、破碎等复杂岩石地层中坑道和洞库工程中广泛应用。

上述各种拱形衬砌结构和锚喷支护结构的设计计算方法可见本书第 2 篇。

### 1.1.3 平顶梁板柱结构

平顶梁板柱结构是梁、板、柱构件组成的结构体系,一般为采用明挖法施工的土层浅埋结构,广泛应用于国防、人防土层浅埋单建式和附建式工程以及各类城市地下工程,如高层建筑地下

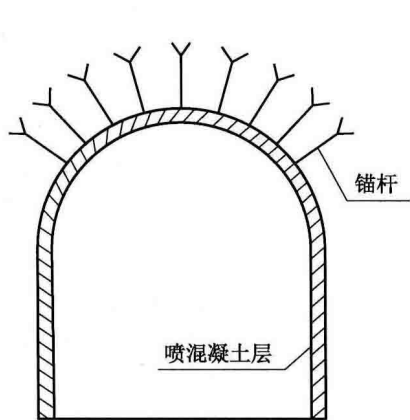


图 1-7 锚喷支护

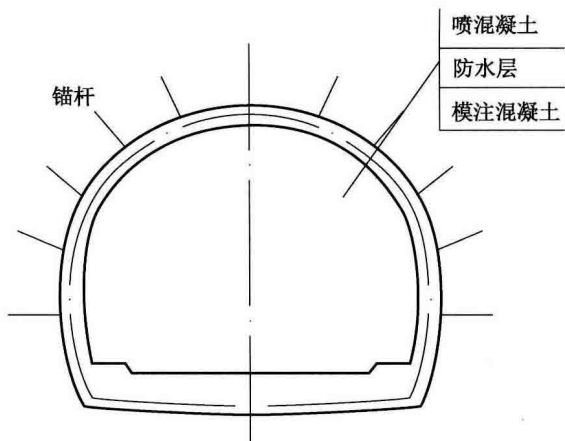


图 1-8 复合式衬砌

室、地铁车站、地下车库、地下商场工程等。由于土层是岩石极度风化的产物，强度低，较易进入塑性受力状态，故土质地层的自承能力一般都大大低于岩层，故土层掘开式梁板柱结构通常具有较高的刚度和承载能力，一般采用整体现浇钢筋混凝土结构。对于掘开式梁板柱结构，在结构设计中除了需要考虑结构上的水、土压力荷载和战时武器作用荷载，结构计算方法与地面钢筋混凝土结构设计相类似，但施工期间的基坑稳定十分重要，需要进行专门的基坑支护设计，往往也是工程施工的技术难点。另外，土层地下结构的施工方法很多，软弱土层也采用逆作法、沉井法、地下连续墙法等特殊的施工方法，结构设计往往需要根据采用的施工方法进行施工过程的结构分析。

土中浅埋掘开式结构形式很多，一般以钢筋混凝土梁、板和柱基本构件组成的平顶结构为主，具体有以下形式。

### 1. 矩形闭合框架结构

矩形闭合框架结构由顶板、底板和墙(柱)构成，是各类地下工程通道、地铁车站等工程的常用结构形式，一般采用明挖法施工。这类结构的特点是纵向长度一般远大于横向尺寸，而且矩形横截面变化不大，因此在结构计算中一般可取纵向单位长度的平面框架结构(图 1-9)，所以称为矩形闭合框架结构。

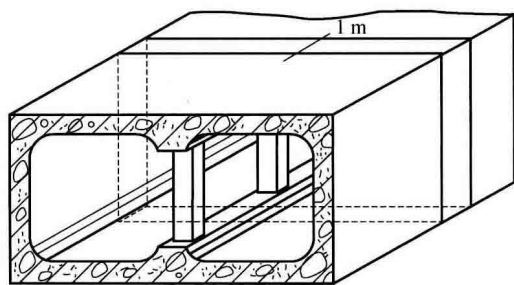


图 1-9 矩形闭合框架结构示意图

矩形闭合框架一般采用整体式钢筋混凝土结构。根据使用要求或者跨度大小可以做成单跨和多跨结构，如国防、人防工程或地铁车站的出、入口通道和城市过街地道等一般为单跨闭合框架，地铁车站为多跨闭合框架。

### 2. 梁板结构

梁板结构类似地面房屋建筑结构，由梁、板、柱基本构件组成承载体系，是浅埋掘开式工程最普遍的结构形式，如地下商场、车库、医院、人员掩蔽部、指挥所等。梁板结构一般采用整体式钢筋混凝土结构。对于地下水位较低地区的简易工程，围护墙和隔墙也可采用砖石墙等砌体。

梁板结构平面布置灵活多变,空间形式复杂,一般不能像矩形闭合框架结构那样取为平面框架结构进行计算,结构计算方法类似地面建筑混合结构,即将结构分解成顶板、底板、柱和墙各独立的构件分别计算。

按照地下结构顶盖、底板梁系布置形式和受力特征的不同,常用梁板结构有主次梁结构和井字梁结构。其中主次梁结构最为常用,内力计算与地面建筑楼面结构相同,即按照荷载传递依次对板、次梁、主梁分别计算。井字梁结构属于空间受力体系,一般用于跨度比较大的顶盖结构,内力计算按照梁系共同受力的空间结构计算。

### 3. 板柱结构

板柱结构是由现浇钢筋混凝土柱和板组成的结构体系(图 1-10)。近年来也有现浇整体空心板、迭合板柱体系。板柱结构的主要特点是净高利用率高,空间分隔灵活,适用于地下车库、贮库、商场、餐厅等建筑,在浅埋掘开式工程中应用较普遍。

上述各种掘开式梁板柱结构的设计计算方法可见本书第 3 篇。

## 1.1.4 壳体结构

地下壳体结构一般指结构分析时不能简化为平面结构的一类地下结构,如坑道相交处的岔洞结构(柱壳相交组合结构),地下储油库的直墙穹顶结构的顶盖(圆球壳)和侧墙(圆柱壳),明挖法施工的地下大跨度结构常采用的圆球扁壳(图 1-11)、椭球扁壳和双曲扁壳等顶盖结构等。地下壳体结构材料为钢筋混凝土,属于空间结构,内力计算需要采用壳体力学方法。

岔洞结构的设计计算方法可见本书第 6 章。各类地下壳体结构计算可以参考钢筋混凝土壳体结构设计等相关技术标准。

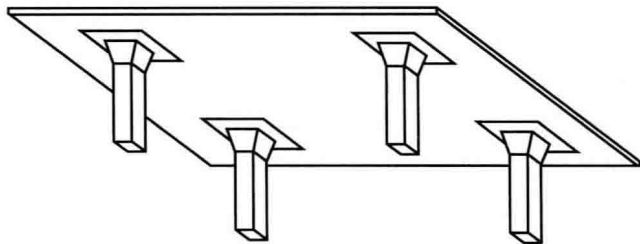


图 1-10 板柱结构

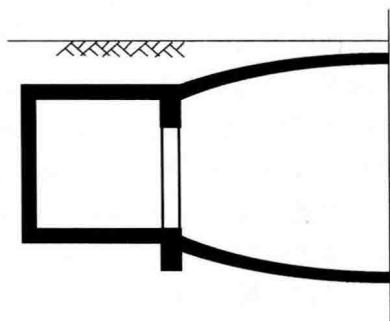


图 1-11 扁壳结构

综上所述,地下结构的类型繁多,与地质条件、施工方法、结构材料、结构受力特点、使用要求以及工程投资等因素有关,结构选型除了要满足工程使用要求外,工程地质条件和施工方法因素一般对地下结构的选型有很大的影响。

## 1.2 地下结构设计计算方法及分类

### 1.2.1 地下结构的工作特性

任何一种建筑结构均要满足在规定作用(或荷载)下的强度和刚度要求。地下结构作为建筑结构的一种类型,和各种地面建筑结构(房屋、桥梁等)一样,在结构设计中都需要进行结构体系

上各种作用(或荷载)、作用(或荷载)效应、构件强度和刚度的分析计算。但是地下结构和地面结构的周围介质条件是不一样的,地面结构周围介质是大气,而地下结构周围介质是岩土,由于结构周围介质的物理力学性质的不同,地下结构的工作特性以及设计计算所要考虑的因素与地面建筑结构是有区别的,主要有以下方面。

### 1. 结构与地层的相互作用

当地下结构与地层接触时,结构与地层的受力存在相互作用。

首先,体现在地层对于结构的荷载作用。结构周围介质将产生作用于结构上的荷载,如地面建筑结构的风、雪荷载,而地下结构则要受到由地层介质产生的地层压力荷载,而地层压力荷载和相应的结构荷载效应两者是相互影响的,即结构变形的大小与地层压力有关,而同时地层压力的大小又和结构变形有关。地层压力荷载的形成机理十分复杂,与地层岩土介质的物理、力学性质、地层开挖施工方法和结构形式、结构刚度等因素相关。在地下结构分析中,地层压力荷载的合理确定仍然是目前尚未完全解决的复杂问题。

另外,结构与地层的相互作用也体现在结构和地层的变形的相互约束作用,在地层压力作用下,结构变形将受到地层的约束作用,这种约束一般可以改善结构内力状态;而同时结构对地层的变形也起到约束作用,这种约束同样可以改善地层应力状态,有利于地层稳定。这也是地下工程为什么要设置人工结构的主要原因。

地下结构与地层的受力相互作用是现代地下结构设计的基本原理之一。由于地下结构与地层的受力存在相互作用,使地下结构受力分析十分复杂。

### 2. 地层的稳定性

地层的稳定性指开挖后的地层不产生影响施工安全、结构安全和使用要求的破坏和变形。与地面建筑结构不同,在地层内部修建地下结构,必须要对地层进行开挖。地下结构安全首先取决于结构周围的地层能否保持持续稳定。各类岩土地层都具有一定程度的自稳能力(或自承能力),即在一定的条件下,地层开挖后能够依靠自身的强度维持稳定状态。当地层自稳能力不足于保持地层持续稳定时,则需要采用合理的人工结构保证地层稳定性。地层自稳能力不同,结构受到的荷载也不同。地层自承能力较强时,地下结构将不受或少受地层压力的荷载作用,否则地下结构将承受较大的荷载,直至独立承受全部荷载的作用。因此,地层开挖的稳定性问题是地下结构的特殊问题,也是地下结构设计、施工的关键问题,地下结构设计不仅仅是衬砌等人工结构物体的结构分析,而且也要包括地层的稳定性分析。

### 3. 施工方法的影响

与地面结构比较,地下结构不仅在施工方法方面有其特点,而且施工方法和施工过程对于结构受力和地层稳定具有较大影响。大量的工程实践和理论研究表明,不同的地层开挖方案或者结构施工方案所形成的地层和结构的受力状态是不同的。因此,地层的稳定性和地下结构受力分析经常需要结合具体的施工方案和施工过程进行。

综上所述,地下结构与地层两者组成相互作用共同受力体系,如何有效地发挥地层的自承能力,考虑地层与结构的相互作用,确定安全经济的结构是地下结构学科的根本问题。

## 1.2.2 地下结构计算理论的发展

地下结构的计算理论形成与发展的根本动力是地下工程实践发展需要,其反映了结构材料、施工技术的发展以及人们对于地下结构工作特性认识深度的发展,也与力学理论、工程结构、计算技术等相关学科发展水平有关。早期地下工程的建设完全依据经验,19世纪初才逐渐形成计



算理论。地下结构计算理论的发展大致可分为以下四个阶段。

### 1. 刚性结构阶段

19 世纪以前的地下建筑物一般为砖石材料砌体结构,结构截面较大。这类结构的抗拉强度很低,整体性较差,结构变形能力较弱,因此计算中将地下结构视为刚性结构,采用基于刚体平衡原理的计算方法。

### 2. 弹性结构阶段

19 世纪后期,混凝土和钢筋混凝土材料出现,并被用于地下结构,地下结构的强度高、整体性好、结构变形能力强。因此,地下结构采用结构力学方法进行内力计算,但是作用在结构上的地层压力仍按照经验方法估算,不考虑结构与地层的相互作用。这种计算方法至今在土层地下结构设计中仍广泛采用。

### 3. 弹性抗力阶段

在地下结构的实践中,人们认识到地下结构在荷载作用下产生的弹性变形将受到地层约束,表现为衬砌会承受与其变形相应的地层的抗力作用,这种抗力在结构分析中称为弹性抗力。由于地层对结构变形约束往往对结构受力是有利的,由此发展了考虑弹性抗力的计算理论,主要有假定抗力法和弹性地基梁法。

假定抗力法首先按照经验方法确定地层压力(称为主动荷载),并根据结构在地层压力作用下可能的变形形式假定弹性抗力(称为被动荷载)的分布形式,然后应用结构力学方法计算出弹性抗力的大小和结构内力。

由于假定抗力法对抗力分布形式的假定带有较大的任意性,人们将衬砌边墙视为支承在地层上的弹性地基梁,研究基于弹性地基梁的衬砌结构计算理论,计算在主动荷载作用下拱圈和边墙的内力。在 20 世纪四五十年代,纳乌莫夫提出侧墙按局部变形弹性地基梁理论计算的地下结构算法。达维多夫提出按共同变形弹性地基梁理论计算整体式地下结构的方法。假定抗力法和基于局部变形理论弹性地基梁方法目前仍在坑道衬砌设计中被广泛应用。

### 4. 结构与地层共同工作阶段

弹性抗力模型阶段的方法仅初步考虑了地层与结构的相互作用,由于人们认识到地下结构与地层是共同工作的受力整体,20 世纪以来,基于连续介质力学理论和非连续介质力学理论的结构与地层共同工作模型及其计算方法也逐渐发展,这类模型能够较细致地考虑地层与结构相互作用机理和地层的工程地质条件、施工方法等复杂因素,进行结构和地层的应力、变形以及破坏状态的分析。结构与地层共同工作模型的计算方法有解析算法和数值算法两大类。20 世纪 60 年代以来,随着计算机技术的应用,以有限单元法为代表的地下结构数值计算方法有了很大的发展,岩土介质材料非线性、几何非线性、不连续特征以及开挖支护施工过程等复杂工程因素可以在计算中得到适当的考虑。因此,目前对于复杂条件下的工程分析经常采用数值算法。

## 1.2.3 地下结构计算理论类型

按结构与地层相互作用考虑方式的不同,地下结构计算方法可大致区分为荷载结构法和地层结构法两大类。

### 1. 荷载结构法

取结构为计算对象,首先确定作用在地下结构上的荷载(包括地层压力荷载),然后应用结构