

# 地下结构

上册

孙 钧 侯学渊 主编

科学出版社

# 地 下 结 构

上 册

孙 钧 侯学渊 主编

科 学 出 版 社

1 9 8 7

## 内 容 简 介

地下结构工程是介于结构工程和岩土工程之间的新兴边缘学科。本书将系统介绍现代地下结构计算的基本理论,分上下两册出版。

上册介绍土质和岩石地层中地下结构物的几种常用的计算方法,包括荷载结构法、地层结构法、收敛限制法、地下空间结构计算和有限单元法及其应用。下册介绍地下结构计算理论在地下连续墙、抗爆抗震动力响应等领域的研究与应用,以及地下结构粘弹塑性问题、试验与实测技术和边界单元法。书中还扼要地讨论了地下结构计算理论在近期内的发展。

本书可供在建筑、铁道、公路、水利、矿山、市政建设以及国防和人防等部门从事研究和设计工作的工程技术人员参考,也可用作地下结构专业研究生的教材,以及地下建筑、隧道与地下铁道、水工结构和矿山井巷等专业大专学生的教学参考书。

## 地 下 结 构

### 上 册

孙 钧 侯学渊 主编

责任编辑 杨家福

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1987年2月第一版 开本:850×1168 1/32

1987年2月第一次印刷 印张:16

印数:0001—3,800 字数:421,000

统一书号:15031·779

本社书号:4717·15-10

定 价: 4.50 元

# 前 言

地下结构在各类建筑、交通、水利、矿山、市政建设以及国防和人民防空工程中已得到了广泛的应用。地下结构工程是介于结构工程和岩土工程之间的一门新兴的边缘学科。在我国，隧道和地下结构物设计计算方法的演变已有数十年历史。解放以前，隧道设计一直沿袭以欧洲各国的设计和施工实践为基础的经验类比法。五十年代起，苏联的地下结构计算理论在我国得到了广泛的采用。这些计算理论都是在已知地压荷载的情况下，考虑地层对结构变形的约束抗力，按弹性地基上杆件系统的结构力学原理进行衬砌内力的计算。近二十年来，世界各国地下空间利用技术的飞速进步，诸如新奥法（NATM）等隧道设计、修建方法的出现和以有限元数值计算为代表的电算技术的推广应用，大大促进了隧道和地下结构设计计算理论的发展。以研讨岩土材料的本构关系为基础，人们已建立了许多新的力学模型和弹、塑、粘性的计算方法，并采用以各种相似材料组成的模型进行大型室内模拟试验与台架试验，以及以现场实测和原型观测等手段继续进行分析研究，进一步建立将现场监控量测信息反馈于设计和施工的新技术，及着手研究收敛限制法的计算理论。几十年来，美、苏、日、德各国都已相继有隧道与地下结构计算理论方面的专著问世，各国还就这一领域办了不少专业期刊。

我校（同济大学）地下建筑工程专业始建于五十年代末，曾于1964年结合隧道衬砌计算理论的教学和研究在校内铅印出版过《地下建筑结构设计》一书。该书对那一时期隧道与地下结构的设计计算理论作了较全面的介绍。七十年代以来，我校地下建筑教研室在开展地下空间利用和地下结构新理论的教学、科研和培养研究生等工作的过程中，参加了一系列地下厂房、地下仓库、地下电

站、城市地下铁道、越江隧道以及国防和人防等地下工程的设计和施工实践,进行了多项地下工程的现场量测和室内试验,取得了一些可喜的成果。为了满足社会的需要,较系统地介绍现代地下结构理论的研究成果,反映当前国内外这一领域的学术水平,我们组织教研室的几位同志编写了这本书。全书共十二章,分上、下两册出版。前六章为上册,主要介绍土质和岩石地层内隧道和地下结构的几种常用的计算方法,包括荷载结构法、地层结构法、收敛限制法、地下空间结构计算和有限单元法。后六章为下册,主要介绍地下结构理论在地下连续墙、粘弹塑性计算、抗爆抗震动力响应、边界单元法以及实验和测试技术等各个方面的专门问题。书末还就计算理论研究的发展扼要地进行了讨论。本书包括了近年来我校在地下结构计算理论方面所获得的比较成熟的部分研究成果。

全书由孙钧、侯学渊主编,并经杨林德统一校阅。

由于我们的理论水平和实际经验有限,书中内容难免欠缺不周或谬误疏漏,敬祈读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第一章 绪论	1
§ 1.1 地下空间利用	1
§ 1.2 地下结构的型式	2
§ 1.3 地下结构计算理论的发展和计算方法分类	14
§ 1.4 地下结构设计模型	25
§ 1.5 本书的主要内容	29
参考文献	30
第二章 荷载结构法	32
§ 2.1 地下结构的荷载	33
§ 2.2 围岩压力的确定——围岩分类法	40
§ 2.3 力法计算拱形衬砌	64
§ 2.4 变位法计算直墙拱形衬砌	82
§ 2.5 衬砌边值问题及其数值解	95
§ 2.6 能量法计算拱形衬砌	99
§ 2.7 离壁式直墙拱形衬砌	104
§ 2.8 圆形衬砌结构内力的计算	109
§ 2.9 截面设计计算	117
参考文献	118
第三章 地层结构法	120
§ 3.1 岩土介质的本构关系和线弹性假定	121
§ 3.2 圆形洞室围岩的应力分析	132
§ 3.3 均匀内压圆形水工隧洞的计算	162
§ 3.4 圆形洞室整体式衬砌的计算	169
§ 3.5 装配式圆形衬砌的计算	180
§ 3.6 复变函数法原理与椭圆形洞室的围岩应力分析	197

§ 3.7	直墙拱形洞室的围岩应力分析·····	221
§ 3.8	双孔圆形隧道的计算·····	230
	参考文献·····	245
第四章	收敛限制法·····	246
§ 4.1	岩土介质的理想弹塑性本构关系与库仑-莫尔准则·····	246
§ 4.2	圆形衬砌的弹-塑性计算理论·····	257
§ 4.3	收敛限制法原理·····	273
§ 4.4	确定地层收敛线的方法·····	274
§ 4.5	确定支护限制线的方法·····	284
§ 4.6	设置支护时间和结构刚度的合理选择·····	290
§ 4.7	施工面三维效应·····	291
§ 4.8	设计实例·····	297
§ 4.9	收敛限制法的发展与研究方向·····	303
	参考文献·····	309
第五章	地下空间结构·····	310
§ 5.1	概述·····	310
§ 5.2	矩形隧道空间问题的计算·····	312
§ 5.3	圆形隧道空间轴对称变形问题的计算·····	324
§ 5.4	正交岔洞接头的岔壳计算法·····	333
§ 5.5	中面为非光滑曲面的扁壳·····	349
§ 5.6	地下穹顶直墙结构的计算·····	358
§ 5.7	平接岔洞接头按空间框架的计算·····	384
	参考文献·····	397
第六章	有限单元法·····	398
§ 6.1	概述·····	398
§ 6.2	基本概念·····	399
§ 6.3	土体的非线性本构模型·····	400
§ 6.4	岩体的非线性本构模型·····	428
§ 6.5	混凝土的非线性本构模型·····	438
§ 6.6	有限元非线性分析法·····	444
§ 6.7	节理单元·····	454
§ 6.8	渗流与地层变形的耦合效应·····	464

§ 6.9 正交节理岩体的准平面问题分析.....	468
§ 6.10 初始地应力的反馈方法 .....	475
§ 6.11 有限元法在隧洞结构计算中的应用 .....	482
§ 6.12 计算实例 .....	484
参考文献.....	501

# 第一章 绪 论

## § 1.1 地下空间利用

地下空间利用为各类建筑工程结构物的选址开辟了广阔的前景。当前,地下空间已开始作为一种重要的自然资源加以开发,在国民经济各部门都已有大量使用。

我国人民在地下空间利用方面有着悠久的历史。早在几十万年前,北京猿人已利用周口店天然溶洞作为栖身之处。远在上古时期,我们的祖先就修建了黄土窑洞和地下坟墓。《左传》一书也曾有“隧而相见”“晋侯请隧”等记载。明朝修建的十三陵地下宫殿就是一座用明挖法施工的地下石拱结构。我国杰出的工程师詹天佑于本世纪初主持设计和施工的北京至张家口的铁路线上穿越八达岭的隧道,长达一公里。解放以后,各类地下工程更是得到了大规模的发展。

国外古代最早的地下工程的典型是著名的埃及采矿穴和罗马的下水道。公元前 2180~2160 年,巴比伦城幼发拉底河下修建了人行隧道。公元前 30 年,奈波耳附近建成了道路隧道。1679~1681 年,法国已有规模很大的航运隧道。1826 年,世界上第一条铁路隧道在法国的圣艾丁涅建成。1863 年,英国伦敦修建了第一条地下铁道。1904—1907 年,德国修建了第一座地下水电站。近半个世纪以来,地下空间的利用更加得到了飞速发展。

按照用途不同,地下工程可分为下列八类:

(1) 交通隧道,如铁路隧道、公路隧道、城市地下铁道及水底道路隧道等;

(2) 水工隧洞,如水力发电站的各种输水隧洞,为农业灌溉开凿的输水隧洞以及给水排水隧洞等;

(3) 矿山巷道,如各类矿山的运输巷道及开采井巷等;

(4) 地下仓库,如粮食、油料、酿酒和水果、蔬菜等的储藏库,鱼肉食品的冷藏库,车库以及核废渣封存库等;

(5) 地下工厂,如水力或火力发电站的地下厂房以及各种轻、重工业的地下厂房等;

(6) 地下民用与公共建筑,如地下商店、图书馆、体育馆、展览厅、影剧院、旅馆、餐厅、住宅及其综合建筑体系——城市地下街等;

(7) 人防工程,如人员隐蔽部、指挥所、疏散干道、连接通道、医院、救护站及大楼防空地下室等,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;

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

随着生产和建设事业的发展,地下空间将会得到更多和更新的应用。

## § 1.2 地下结构的型式

### 1.2.1 概述

修建于地下的建筑结构物统称为地下结构。

地下结构与地层接触,两者组成共同的并相互作用的受力变形体系。理论与实践已经证明,各类岩土地层介质都具有一定程度的自支承能力,因而地层能与地下结构一起承受荷载。地下结构的安全首先取决于地下结构周围的地层能否保持持续稳定。地层自支承能力较强时,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,直至必须独立承受全部荷载的作用。显而易见,地下结构的选型必须考虑其周围地层的性质。

地层有岩石与土体之分。一般来说,岩石地层的自支承能力强于土体,故两类地层中地下结构的选型有着明显的差别。

地层性质的差别不仅影响地下结构的选型，而且影响施工方法的选择。因地下结构在施工阶段同样必须安全可靠，故采用不同的施工方法对地下结构的选型也将产生影响。此外，地下结构的选型还与工程的使用要求有关。

以下按岩石与土体两类不同的地层分别讨论地下结构物的合理选型。

### 1.2.2 岩石地下结构的型式

根据成因，岩石一般可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三类。

(1) 岩浆岩是地球内部融熔的岩浆侵入周围岩体或溢出地表时冷凝而成的岩石。花岗岩、流纹岩、闪长岩、辉绿岩和玄武岩等是几种主要的岩浆岩。它们构造简单、岩性均一，力学性质近于各向同性介质。这类岩石的质地大都坚硬致密。

(2) 沉积岩是岩石经受各种形式的侵蚀、搬运、沉积和硬结而形成的新的岩石。砂岩、砾岩、凝灰岩、石灰岩、泥灰岩和白云岩等属于沉积岩。这类岩石的强度变化范围较大，但一般低于岩浆岩。这类岩石属层状构造，故其力学性质一般具有明显的各向异性。

(3) 变质岩是岩石在高温、高压下发生变质作用后生成的新岩石。片麻岩、片岩、板岩、石英岩和大理岩等属于变质岩。由结构致密的原生岩石引生的变质岩(如由砂岩变质而成的石英岩)的强度往往极高，而由强度较低的页岩等变质而成的片岩等强度较低。变质岩常为片状、板状或块状，其力学性质也多具有各向异性的特征。

直接暴露或靠近地表的岩石，常受风化作用的影响，强度下降。

洞室围岩是否稳定不仅取决于岩石强度，而且取决于围岩构造的完整程度。相比之下，围岩构造的完整性对洞室稳定更有较大的影响。围岩构造的完整性与地质构造运动有关。岩体在构造运动中产生褶皱、断裂等构造形迹，因而普遍存在裂隙。裂隙形成软弱结构面，使岩体完整性降低，从而影响洞室围岩的稳定性。设

计算时常将岩体按完整性和强度进行分类，以选择合适的结构型式和确定适当的计算方法。

岩石地下结构常称为衬砌，或称为被覆。常用的衬砌型式有下列九种。

### (1) 半衬砌。

只做拱圈、不做边墙的衬砌称为半衬砌。岩层较坚硬、整体性较好时，可采用半衬砌。图 1-1(a) 为半衬砌示意图，图 1-1(b)，(c) 表示落地拱。计算半衬砌时需要考虑拱支座的弹性地基作用，施工时应保证拱脚岩层的稳定性。

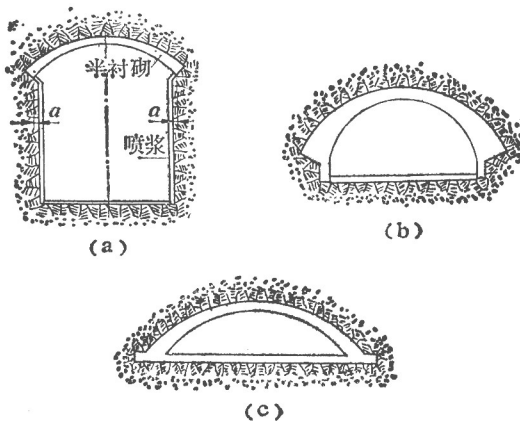


图 1-1

### (2) 厚拱薄墙衬砌。

拱脚较厚、边墙较薄的衬砌称为厚拱薄墙衬砌。对水平压力较小的洞室可采用厚拱薄墙衬砌，如图 1-2 所示。这种衬砌的受力特点是可将拱圈所受的荷载通过扩大的拱脚传给岩层，使边墙受力减小，以节省建筑材料和减少石方开挖量。

### (3) 直墙拱顶衬砌。

直墙拱顶衬砌是最为普遍采用的一种结构型式，由拱圈、竖直边墙和底板(或仰拱)组成，如图 1-3 所示。有一定水平压力的洞室可采用拱顶直墙衬砌。衬砌与围岩间的空隙应密实回填，使衬

砌与围岩能整体受力。



图 1-2

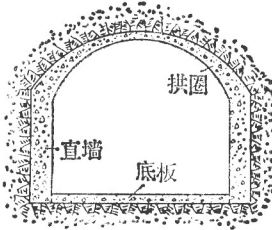


图 1-3

#### (4) 曲墙拱顶衬砌。

曲墙拱顶衬砌由拱圈、曲墙和底板(或仰拱)组成,如图 1-4 所示。围岩具有较大垂直压力和水平压力时,可采用曲墙拱顶衬砌。遇洞室底部地层软弱或为膨胀性地层时,应采用底部结构为仰拱的曲墙拱顶衬砌,将整个衬砌围成封闭式,以加大结构的整体刚度。

#### (5) 离壁式衬砌。

离壁式衬砌一般指拱圈和边墙与岩壁相隔离,其间空隙不做回填,仅拱脚处局部扩大延伸与岩壁顶紧的衬砌,如图 1-5 所示。当围岩基本稳定时可采用离壁式衬砌。毛洞壁面常需喷浆围护,以防止围岩风化剥落。

#### (6) 锚喷支护。

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等在毛洞开挖后及时地对地层进行加固的结构称为锚喷支护,如图 1-6 所示。由于锚喷支护是一种柔性结构,故能更有效地利用围岩的自支承能力维护洞室稳定,其受力性能一般优于整体式衬砌,因而被认为是一种新型的地下结构型式。

#### (7) 装配式衬砌。

由预制构件在洞内拼装而成的衬砌称为装配式衬砌,如图 1-7 所示。采用装配式衬砌可加快施工速度,提高工程质量。

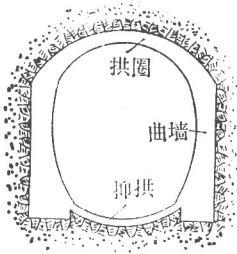


图 1-4

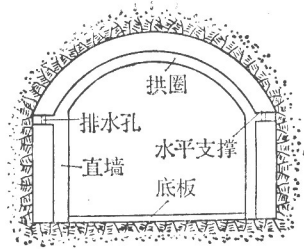


图 1-5

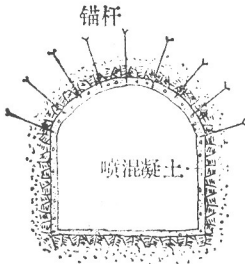
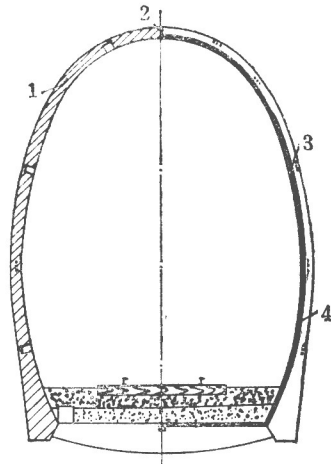


图 1-6



1. 装配螺栓 2. 混凝土嵌块  
3. 吊装孔 4. 企口槽

图 1-7

### (8) 复合式衬砌。

分两次修筑、中间加设薄膜防水层的衬砌称为复合式衬砌,如图 1-8 所示。复合式衬砌的外层常为锚喷支护,内层常为整体式衬砌。

### (9) 地下空间结构。

地下立式油罐和坑道的交岔接头等都属于空间结构。这类油罐一般由球形顶壳、圈梁、圆筒形边墙和圆形底板组成,常称为穹

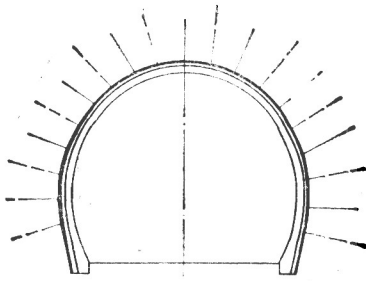


图 1-8

顶直墙结构,如图 1-9 所示。

坑道交岔接头常称为岔洞结构,图 1-10 为这类空间结构的一种型式。

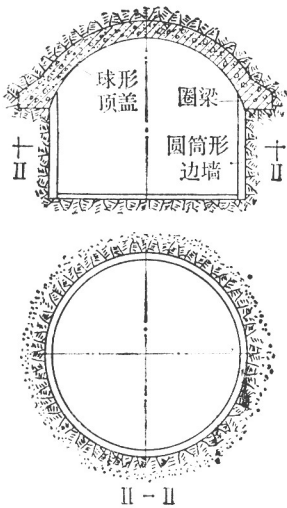


图 1-9

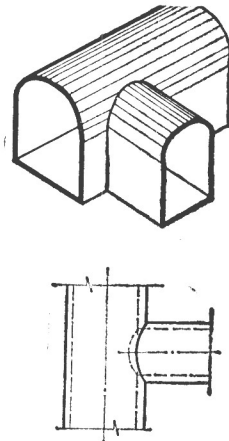


图 1-10

### 1.2.3 土层地下结构的型式

土层矿物颗粒是岩石极度风化的产物,故土质地层的自支承能力一般都大大低于岩层。土层作用在地下结构上的荷载称为土

压力。因为土压力的量值通常大于岩石地层作用在地下结构上的压力,且土壤强度低,较易进入塑性受力状态,故土层中的地下结构通常应具有较高的承载能力,圆形和封闭框架等型式常被优先采用。

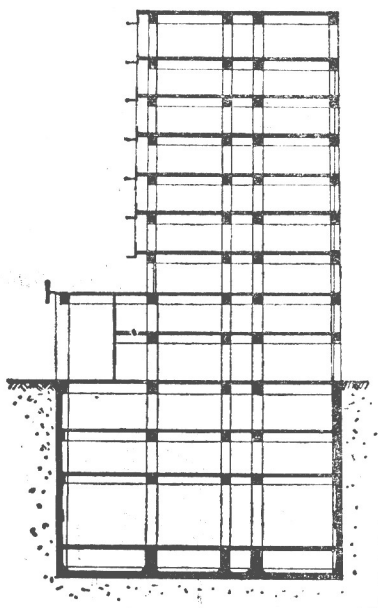


图 1-11

结构布置相协调,其外围结构常用框架结构,内部结构则可用梁板结构或无梁楼盖。对于高层楼房,地下室结构都兼作为箱形基础。地下室结构在施工中需先明挖基坑,基坑四周可采用钢木板桩围护或用地下连续墙构筑,分别如图 1-12、1-13 所示。为了避

土层地下结构的施工方法是多种多样的,它对地下结构的选型会产生很大的影响。此外,土层地下结构的选型将更多地受到使用要求和周围环境的影响。

常用的土层地下结构的型式有以下九种:

#### (1) 地下室结构。

地下室结构又称附建式结构,多数为附属于房屋建筑的地下室,如图 1-11 所示。地下室结构的型式应与上部房屋建筑的结构

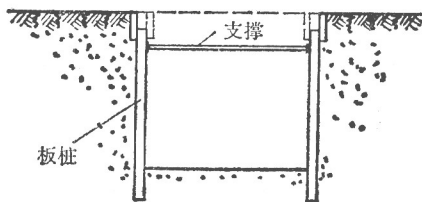


图 1-12

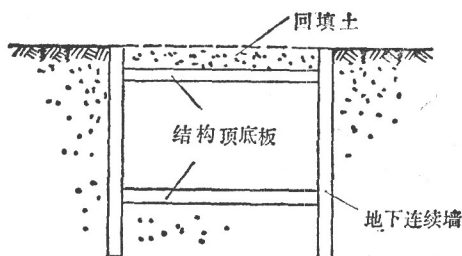


图 1-13

免水平支撑影响内部结构的施工，也可改用土中锚杆维持板桩稳定，如图 1-14 所示。

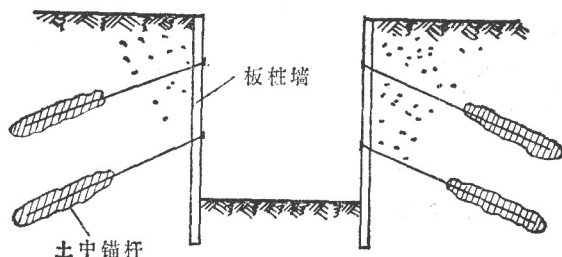


图 1-14

## (2) 浅埋式结构。

浅埋式结构又称单建式结构，如图 1-15 所示。这种结构的平面常呈长方形或条形，其型式常为梁板结构或框架结构，也可做成多跨的连续直墙拱形结构。浅埋结构一般采用明挖法施工。

## (3) 地道式结构。

地道式结构是土层中采用暗挖法施工的直墙或曲墙拱顶结构。土层内地下通道采用地道式结构时的断面型式如图 1-16 所示。

## (4) 沉井式结构。

沉井式结构是以沉井法施工的地下结构。以沉井法建造地下结构时一般先在地面打筑井壁和内墙，形成井筒状的结构物，在井壁的围护下从井内挖土，使沉井在自重作用下逐渐下沉，达到设计