

DIXIA

GONGCHENG

DONGTAI SHEJI YUANLI

王后裕 陈上明 言志信 编著



地下工程

动态设计原理



化学工业出版社

DIXIA GONGCHENG
DONGTAI SHEJI YUANLI

王后裕 陈上明 言志信 编著

地下工程 动态设计原理



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

地下工程动态设计原理/王后裕, 陈上明, 言志信编
著. —北京: 化学工业出版社, 2008. 1
ISBN 978-7-122-01759-8

I. 地… II. ①王…②陈…③言… III. 地下工程-
建筑设计 IV. TU9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 203182 号

责任编辑: 马燕珠 郭乃铎
责任校对: 顾淑云

文字编辑: 林 媛 糜家铃
装帧设计: 王晓宁

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 24½ 字数 595 千字 2008 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究

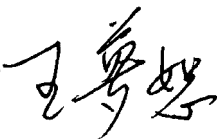
序

地下工程是深埋于岩层或土层下的建筑物，随着施工开挖的推进，地质条件常常发生变化；另外，由于工期、经费、勘测手段等因素的限制，在开挖前不可能将各种地质信息搞得十分清楚。因此，与地面工程不同，地下工程的设计无法在开工前就做到一步到位，往往在勘察、设计、施工等诸环节之间有交叉、反复、变更现象。设计文件中所拟定的断面尺寸、结构形式、支护参数、预留变形量和施工方法等参数均不是一成不变的，需要在开挖过程中重新评估和确认，必要时须做调整或修正。正因为如此，目前在地下工程设计中，广泛采用经验借鉴、理论分析、现场量测、超前预报和反分析计算等相结合的所谓“动态设计法”，本书就是按该原理组织的专业性书籍。

另外，从事地下工程设计除了懂得材料力学、结构力学以及混凝土结构等基本理论之外，还要具备地质力学、岩土力学、计算力学以及地下工程施工工艺等方面的知识。本书在内容上基本涵盖了这些知识点，而且在阐述专业理论的同时，结合了具体的计算实例，便于读者接受。尤其对当今地下工程计算中两个常用的软件（ANSYS 和 FLAC3D）专门结合实例进行了介绍。这不仅对初次步入地下工程领域的新同志有帮助，而且对于不熟悉这类软件的老同志也很有裨益。

本书是工程师与教授的联袂之作，书中图文并茂、实例丰富、通俗易懂，做到了理论和实践的有机结合，它既是学生的读物也是工程师的读物。因此，希望本书的出版能深受读者喜爱。

中国工程院院士



2007 年 11 月 2 日

前言

地下工程设计不同于地面建筑物的设计，它是一个动态过程，是一个信息化过程，设计必须与施工紧密结合。在开挖过程中，必须及时收集现场信息，当围岩地质情况发生变化时，必须及时调整设计方案。在对现场数据资料归纳处理过程中，针对不同的围岩级别还要采取不同的计算方法，如块体平衡计算方法、工程类比法、理论解析法等。因此，与地面建筑物相比，地下工程结构的设计具有动态性、反复性、多样性、经验性和信息化等特点。

随着计算机技术的快速发展，尤其是土木工程中计算分析软件的发展和功能的完善，使得复杂地下工程的精确计算成为可能；同时也给当代工程设计直接带来了高效率，目前设计已基本离不开软件。本书对地下工程常用的计算软件（ANSYS 和 FLAC3D）专门结合实例进行了介绍，使读者能尽快熟悉这些工程软件。

工科大学培养的学生毕业后绝大部分将成为工程师，留在科研单位从事理论研究的也离不开工程实践。对于工程师而言，如何把复杂的理论简单化，如何理解简单经验方法背后的道理，是他们在工程实践中常常面临的问题。本书力求通过丰富的实例，做到理论和实践的有机结合，使之既是学生的也是工程师的读物。但由于作者的水平所限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正，读者建议和意见可发给：luckmanwang@sina.com。

我国著名地下工程专家、中国工程院院士、中铁隧道集团副总工程师王梦恕教授在百忙之中为本书写了序言，空军工程设计研究局有关领导对本书的出版给予了大力支持，田红霞绘制了书中部分插图，在此一并表示最诚挚的感谢。

作者

2007 年 11 月

目 录

第 1 章 概论

1

1.1 地下工程概述	1
1.2 地下工程结构形式	2
1.2.1 喷锚支护结构	3
1.2.2 复合式衬砌结构	3
1.2.3 贴壁式结构	4
1.2.4 离壁式结构	4
1.2.5 穹顶式结构	5
1.3 地下工程有关计算理论的发展过程	5
1.3.1 刚性结构阶段	5
1.3.2 弹性结构阶段	6
1.3.3 连续介质阶段	8
1.3.4 数值模拟阶段	8
1.3.5 可靠度分析阶段	9
1.4 地下结构工作特性及设计方法	9
1.4.1 地下结构工作特性	10
1.4.2 地下结构计算模型	11
1.4.3 地下结构设计方法	13

第 2 章 地下工程动态设计方法

16

2.1 地下工程动态设计法的发展	16
2.1.1 新奥法与地下工程动态设计	16
2.1.2 岩土力学反分析理论的发展	17
2.1.3 地下工程动态设计方法的应用	18
2.2 地下工程动态设计法的主要理论和技术	19
2.2.1 地下工程理论计算与数值计算技术	19
2.2.2 地下工程现场监控量测技术	20
2.2.3 地质超前预报技术	20
2.2.4 地下工程反分析理论	21
2.2.5 地下工程时变力学理论	22
2.3 地下工程动态设计法设计流程	22
2.3.1 工程地质勘察	24
2.3.2 施工前预设计	25
2.3.3 制定实施设计方案	25
2.3.4 现场监控量测	26

2.3.5	量测数据处理	26
2.3.6	信息反馈	26
2.3.7	根据反馈信息修正实施设计方案	27
2.4	地下工程施工前预设计	27
2.4.1	施工前预设计的地位与局限性	27
2.4.2	施工前预设计的方法	28
2.4.3	施工前预设计的内容	29
2.5	地下工程施工中信息反馈设计	36
2.5.1	地下工程施工中信息反馈设计的必要性	36
2.5.2	信息反馈设计的原则与要求	37
2.5.3	修正预设计的条件	38
2.5.4	信息反馈修正设计中有关处理措施	40
2.6	地下工程施工过程的力学特征与分析方法	41
2.6.1	地下工程施工过程的力学特征	41
2.6.2	与地下工程相关的施工过程力学分析原理	42

第3章 地下洞室围岩稳定与力学状态分析

46

3.1	地下洞室围岩稳定概述	46
3.1.1	围岩稳定性的影响因素	46
3.1.2	围岩稳定性的分析方法	48
3.2	岩体结构与岩体结构类型	50
3.2.1	岩体结构	50
3.2.2	岩体结构类型	50
3.3	块状围岩的失稳特点	52
3.3.1	岩体的破坏机制	52
3.3.2	块状岩体的失稳特点	53
3.4	块状围岩不稳定块体的确定	54
3.4.1	赤平极射投影法原理	54
3.4.2	赤平极射投影基本作图方法	55
3.4.3	块状围岩不稳定块体的赤平极射投影确定方法	57
3.5	围岩初始应力场	61
3.5.1	初始应力场的构成	61
3.5.2	初始应力场的变化规律	62
3.5.3	地下工程设计中初始地应力的考虑	66
3.6	洞室开挖后力学状态的弹性分析	67
3.6.1	毛洞室的围岩应力状态	67
3.6.2	毛洞室的围岩位移状态	70
3.6.3	洞室支护后围岩及支护的应力状态	71
3.6.4	非圆形洞室围岩的应力状态	72
3.7	洞室开挖后力学状态的弹塑性分析	74
3.7.1	围岩的弹塑性破坏准则	74
3.7.2	轴对称条件下围岩的应力状态弹塑性分析	75

3.7.3	非轴对称条件下的围岩应力	79
3.7.4	轴对称条件下围岩位移的弹塑性分析	80
3.8	洞室开挖后力学状态的黏弹性分析	82
3.8.1	轴对称问题计算模型	82
3.8.2	轴对称条件下围岩变形的黏弹性分析	82
3.8.3	轴对称条件下支护结构变形的黏弹性分析	83
3.8.4	轴对称条件下支护结构与围岩相互作用力的确定	84
3.9	洞室围岩稳定性评价	86
3.9.1	块体冒落型失稳	86
3.9.2	岩石破坏型失稳	86
3.9.3	塑性变形型失稳	88
3.10	围岩压力理论	88
3.10.1	围岩压力的种类	88
3.10.2	变形压力计算	89
3.10.3	松动压力计算	94

第4章 围岩分级及工程类比法设计

100

4.1	围岩的工程性质	100
4.1.1	岩石的物理性质与水理性质	100
4.1.2	岩石的力学性质	101
4.1.3	岩体的力学性质	104
4.2	围岩分级	108
4.2.1	围岩分级方法的发展与类型	108
4.2.2	围岩的基本分级因素与指标	110
4.2.3	几种地下工程围岩分级方法	114
4.3	地下工程类比法设计	127
4.3.1	类比法设计的步骤与一般原则	128
4.3.2	基于围岩分级的工程类比法设计	130
4.4	模糊数学理论在工程类比中的应用	139
4.4.1	模糊集与模式识别	140
4.4.2	模糊综合评判	143
4.5	国内外部分已建地下工程设计参数汇总	148

第5章 各种形式支护结构的设计计算方法

154

5.1	喷锚支护结构设计计算	154
5.1.1	喷锚支护结构的特点及功能	154
5.1.2	块状围岩的喷锚支护设计	164
5.1.3	软弱围岩的喷锚支护设计	171
5.1.4	整体围岩的喷锚支护设计	177
5.1.5	层状围岩的喷锚支护设计	179
5.2	整体贴壁式衬砌结构设计计算	182

5.2.1	整体贴壁式衬砌上的作用荷载	182
5.2.2	半衬砌计算	185
5.2.3	直墙拱衬砌计算	201
5.2.4	曲墙拱衬砌结构计算	220
5.2.5	衬砌结构截面强度及基岩强度验算	224
5.3	离壁式衬砌结构设计计算	227
5.3.1	离壁式衬砌结构	227
5.3.2	离壁式衬砌结构计算简图	229
5.3.3	离壁式衬砌结构内力计算	230
5.3.4	离壁式衬砌结构计算实例	233
5.4	穹顶式衬砌结构设计计算	237
5.4.1	穹顶式衬砌结构及作用荷载	237
5.4.2	边墙计算	239
5.4.3	穹顶计算	243
5.4.4	支座环计算	249
5.4.5	底板计算	253
5.4.6	穹顶式衬砌结构内力计算	254
5.4.7	整体式穹顶衬砌结构的内力计算实例	257
5.5	复合式衬砌结构设计	263
5.5.1	复合式衬砌一般规定	263
5.5.2	复合式衬砌结构初期支护设计	264
5.5.3	复合式衬砌结构二次衬砌设计	264
5.5.4	二次衬砌施作时间的确定	264
5.5.5	复合式衬砌结构设计实例	265

第6章 地下工程数值分析方法及相关大型软件

267

6.1	地下工程常用数值分析方法	267
6.1.1	杆系结构有限元法	267
6.1.2	实体单元有限元法	267
6.1.3	边界元法	268
6.2	有限元法的一般原理及单元类型	268
6.2.1	有限元法分析问题的基本步骤	268
6.2.2	单元刚度矩阵	270
6.3	非线性有限元及岩土本构模型	277
6.3.1	非线性有限元	277
6.3.2	岩土本构模型	281
6.4	地下工程弹塑性有限元解法及施工过程模拟	288
6.4.1	弹塑性增量理论有限元解法	288
6.4.2	地下工程施工过程模拟	293
6.5	ANSYS 软件应用及实例	295
6.5.1	ANSYS 软件概述	295
6.5.2	ANSYS 进行地下工程分析的相关技术	297

6.5.3	ANSYS 链杆法地下结构分析实例	301
6.5.4	ANSYS 二维地下开挖模拟分析实例	307
6.6	FLAC3D 软件应用及实例	316
6.6.1	FLAC3D 软件概述	316
6.6.2	FLAC3D 进行地下工程分析的相关技术	317
6.6.3	FLAC3D 软件应用实例	320

第7章 现场监控量测与超前预报

330

7.1	地下工程监控量测作用与类型	330
7.1.1	地下工程现场监控量测的必要性与作用	330
7.1.2	现场监控量测按获取信息分类	330
7.1.3	现场监控量测按监控对象分类	331
7.2	位移量测	331
7.2.1	洞室净空相对位移(收敛)量测	331
7.2.2	拱顶下沉量测	333
7.2.3	地表下沉量测	334
7.2.4	围岩内部位移量测	334
7.3	应力量测	336
7.3.1	锚杆轴力量测	336
7.3.2	钢支撑内力量测	337
7.3.3	围岩与支护间接触压力量测	338
7.3.4	喷射混凝土层应力量测	339
7.3.5	二次衬砌应力量测	340
7.4	现场监控量测方案设计	341
7.4.1	确定量测项目	341
7.4.2	选择量测手段和仪表	342
7.4.3	确定量测部位及布置测点	343
7.4.4	观测要求及频度确定	344
7.4.5	量测数据警戒值及围岩稳定性判断准则	345
7.4.6	监控量测管理	347
7.5	监控量测数据处理及工程实例	347
7.5.1	量测数据处理	347
7.5.2	工程实例	350
7.6	地下工程超前预报技术	353
7.6.1	地下工程超前预报方法	353
7.6.2	地质雷达 GPR	354
7.6.3	隧道地震波探测 TSP	359

第8章 地下工程反分析

362

8.1	位移反分析的基本理论	362
8.1.1	位移反分析求解方法	362

8.1.2	线性及非线性问题位移反分析	363
8.1.3	围岩压力的位移反分析	364
8.2	线弹性位移反分析及其应用	364
8.2.1	均匀初始应力场的位移反分析	364
8.2.2	非均匀地应力场的位移反分析	366
8.2.3	围岩压力的位移反分析	367
8.2.4	位移反分析算例	369
8.3	弹塑性位移反分析及其应用	369
8.3.1	弹塑性位移反分析目标函数	369
8.3.2	单参数的位移反分析	370
8.3.3	多参数的位移反分析	372
8.4	利用 ANSYS 软件进行地下工程位移反分析	374
8.4.1	ANSYS 软件的优化设计简介	374
8.4.2	ANSYS 进行地下工程位移反分析的算例	375

参考文献

381

第1章 概 论

1.1 地下工程概述

随着人类社会的不断进步,地下空间的开发与利用得到了前所未有的发展,如城市地铁、城市地下商业街、城市地下综合管线、地下车库、地下过街通道、地下人防国防工程、铁路公路隧道、水电地下厂房、地下储油储气库、地下核废料处理库以及地下开采区等,尽管规模大小不一,但都是主体结构埋藏于地表以下的工程。在工程建设领域中,常将这些相对于地面工程而言,其有效空间部分或全部处于地面以下的建筑物或构筑物统称为地下工程,与地面工程相比,地下工程由于所处外界环境的特殊性,使其在设计、施工、使用维护和建筑功能等方面具有不同特点,这些特点大致可归纳如下。

① 地下工程所承受的荷载条件比地面工程复杂得多,结构体系不同,设计方法也明显不同。按地下工程所处的周围地质环境不同,可分为岩石地下工程和土层地下工程,根据现代围岩级别的划分办法,也可统一将土层地下工程视为特殊类型的岩石地下工程。从围岩级别的多样性来看,直接作用于地下工程的围岩压力呈现出复杂多样的特点,有时,同一条地下工程往往要穿过级别不同的围岩条件;此外,地下围岩不仅是作用于地下结构的外在荷载,也是能约束地下结构变形和位移、参与地下结构共同作用的岩土体,组成一种共同受力的结构体系;同时,不同的施工方法,造成地下结构的受力状态也不同,因此,传统的地面工程设计计算理论不能简单地应用于地下工程的设计计算,地下工程的设计必将随围岩级别的不同而涉及更多的因素。

② 作业环境特殊,施工难度加大。不管是暗挖还是明挖,地下工程施工作业的空间是有限的,而且由于地下水的影响,不仅对施工人员的心理,还是对施工机具的效率都会产生不利影响。当然,随着科学技术的不断发展,目前,地下工程的施工机具得到了显著的改善,各种大型高性能地下工程施工设备层出不穷,如隧道全断面掘进机(TBM)的出现使隧道施工具有连续化、“工厂”化的特点,隧道掘进效率大幅提高。

③ 地下空间相对封闭、潮湿,需要专门的照明、通风、除湿防潮等措施,运行维护费用较高。地下工程多为相对狭长而封闭的空间,洞内几乎见不到阳光,无论白天黑夜都需要人工照明;通风条件也受到限制,不能像地面建筑一样靠门窗自然通风,作为有人聚居的地下空间必须有专门的通风设施;地下水对地下工程施工、使用与维护造成的水患素来是地下工程的症结,地下工程都应考虑必需的、可靠的防排水措施,此外,口部温差造成的水汽结露,也使内部表面易出现凝结水,因此,还要设置必需的除湿防潮设施。

④ 受外界影响小,密闭性稳定,防护抗震能力强。除口部外,地下建筑内部环境温度稳定,受外界影响小,而且具有良好的蓄热性能和密闭性,适宜于建设对环境温度有特殊要求的工程,如地下冷库等;与地面工程相比,地下工程具有良好的抗震性能,适宜于特殊精密仪器厂房建设;同时,地下工程有一定的埋置深度,对防核爆冲击波、毒气沾染等袭击有

一定的防护能力,是人防国防工程的最佳选择。

⑤ 节约用地资源,保护周边环境,提供便利交通,是可持续发展的有效途径。目前大型地下停车场、发达的地铁网络、大型地下交通枢纽、城市地下商业街以及城市地下综合管线等地下工程的大量存在,是衡量一个城市发达程度的重要指标,地下空间资源的合理开发与利用是城市可持续发展的重要途径之一。交通隧道与桥梁是山区高等级公路、高速公路、铁路建设的常见工程项目,有时往往在全部投资中占有相当大的比重,之所以选择隧道与桥梁的方式,主要是它不仅可以节约基本建设投资,而且能缩短交通线路,创造更安全、便捷的交通条件,长期惠及运输业的发展。

尽管上述特点利弊参半,而且一般情况下地下工程建设的前期一次性投入比地面工程大,但当今世界地下工程的建设无论在规模上,还是在技术水平上一直处在不断发展之中。目前,有关地下工程的学术刊物、学会、协会以及网站等行业媒介、机构已门类众多,它们每年都要发布大量的地下工程领域中取得的最新成果以及重要的大型工程等信息,这不仅反映了当前地下工程领域中活跃的研究和建设状况,而且对促进地下工程设计计算理论的发展完善、施工经验的交流具有积极深远的意义。

1.2 地下工程结构形式

一般地面工程的结构体系由地基基础与上部结构组成,上部结构承担风、雪、地震、自重以及使用荷载,再通过基础传给地基。由于只有基础受到地基的约束,上部结构的形式可以随建筑的空间表现而变化多样,如大跨度网架结构、超高层剪力墙、筒体结构、大空间框架结构以及开闭式屋盖等。然而,正如上所述,在由内部结构与围岩共同组成的地下工程结构体系中,地下工程内部结构四周都要受到围岩的约束,它除了要能承担围岩的压力外,还要能对围岩的稳定进行加固的功能,甚至还肩负结构自防水的能力,因此相对而言,地下结构的结构形式比较简单,地下工程的支撑结构也常被称为衬砌、被覆,以区别于地面结构体系。

地下结构断面常采用圆形、曲墙拱、落地拱、直墙圆拱等形式,如图 1-1 所示。这些形式的结构断面一方面符合连续介质力学的应力集中理论,可以有效降低开挖后的围岩应力集中,另一方面也可使抗拉性能较差、抗压性能较好的混凝土、砖、石等结构材料得到合理利用,因为具有一定曲率半径的拱、圆形结构,不管外部荷载分布如何,其内力弯矩都可以得到明显降低。另外,地下结构断面大小也受到围岩地质条件的限制而不能任意扩大,即使是修建在 I、II 级围岩中的地下工程,也会由于施工难度的增大而不能任意把结构断面设计得过大。

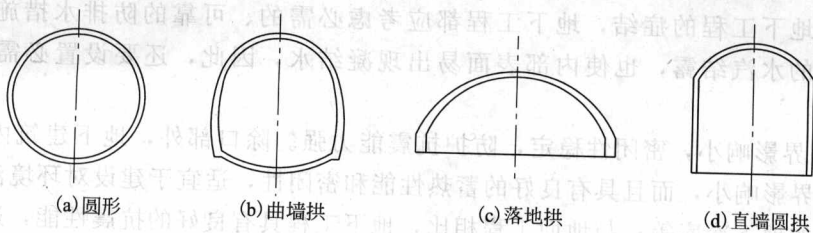


图 1-1 地下结构断面形式

当然,任何结构形式都要与建筑空间的要求相适应,如地下飞机库必须想方设法满足一定的跨度要求,大型地下水电厂房则对侧墙高度有一定的要求以便吊装有关大型设备,而地铁换乘站也可以将结构做成框架形式等,结构形式的选型要符合工程的使用要求。目前,根据地质条件、功能要求、设计计算理论、施工方法以及结构材料等因素的不同,工程中常见的地下结构的结构形式有以下几种。

1.2.1 喷锚支护结构

喷锚支护结构是一种应用比较广泛的新型结构体系,就是采用喷射混凝土加局部锚杆,或钢筋网喷射混凝土加局部锚杆,或钢筋网喷射混凝土与系统锚杆等支护措施作为工程的永久结构体系,如图1-2所示。这种结构体系适用于级别较好的围岩条件中,如山岭交通隧道、采矿巷道、地下水电工程、地下器材库以及地下指挥所等国防工程中均有大量应用。喷锚支护结构是一种柔性支护体系,能很好地发挥围岩的自承能力,如果及时施做可以达到有效限制洞室围岩变形的目的,改善围岩的稳定性。喷锚支护结构除在级别较好的围岩条件中做永久结构外,也大量在级别较差的围岩条件中做临时结构。

1.2.2 复合式衬砌结构

复合式衬砌结构也是一种应用很广泛的新型结构体系,它是以南奥法原理为基础的一种结构体系,当围岩级别不很理想时,洞室开挖后及时采用喷锚支护结构作为初期支护结构,等到围岩与初期支护结构的变形达到初步稳定时,再施作内层刚度较大的结构作为二次衬砌,二次衬砌可根据围岩条件采用现浇混凝土衬砌、现浇钢筋混凝土结构、装配式钢筋混凝土结构或钢筋网喷射混凝土等,两层结构层之间还可设置柔性防水层,如图1-3所示。

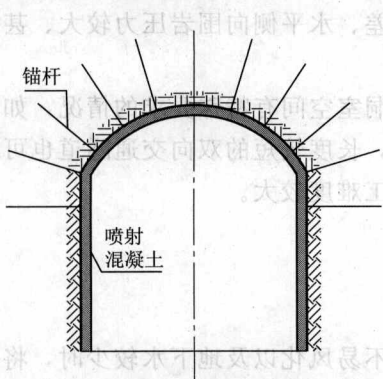


图 1-2 喷锚支护结构

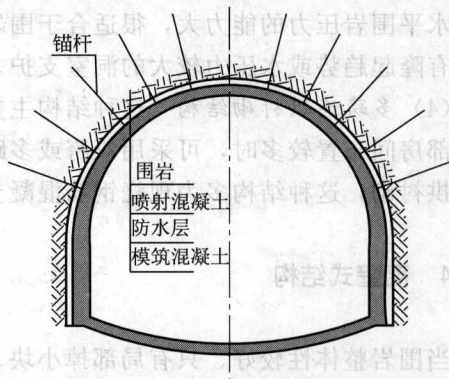


图 1-3 复合式衬砌结构

显而易见,复合式衬砌结构由于采用这种刚柔结合的结构体系,并强调新奥法设计和施工理论的运用,使复合式衬砌结构具有众多优越之处。比如,能充分发挥围岩的自承能力、提高施工安全保障、加快施工速度、缓解围岩变形、减薄二次衬砌荷载与厚度、增强防水抗渗能力、降低工程整体造价、在各类围岩条件中均可适用等,因此在国内外地下工程建设中得到了广泛的应用。

1.2.3 贴壁式结构

贴壁式结构是指紧贴围岩就地浇筑的整体式混凝土或钢筋混凝土结构,或者是将围岩与衬砌间超挖空洞完全回填密实的装配式结构,如图 1-4 所示。这种结构形式在 20 世纪广泛应用,其结构计算只把围岩视为荷载,没考虑围岩的自承能力,但是在计算衬砌的内力时,考虑了围岩的弹性抗力作用,使计算得到的衬砌内力趋于合理。根据围岩级别的情况不同,贴壁式结构有多种不同的形式,如拱形半衬砌或厚拱薄墙衬砌、直墙拱衬砌、曲墙拱衬砌或圆形衬砌、多跨连拱衬砌等。

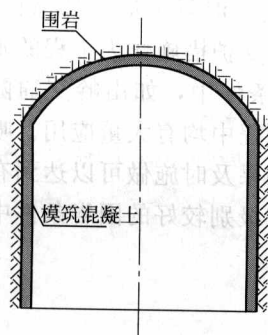


图 1-4 贴壁式结构

(1) 拱形半衬砌或厚拱薄墙衬砌结构 这两种衬砌结构适用于围岩整体性较好、基本无侧向围岩压力、只有拱部个别掉块现象的洞室支护,衬砌计算中一般只考虑拱顶受力,不考虑侧墙的受力。当侧墙较低时,只设置现浇混凝土拱顶,不做侧墙,即半衬砌结构;当侧墙较高时,设置较厚的现浇混凝土拱顶,侧墙则较薄或采用喷锚衬砌,即厚拱薄墙衬砌结构。

(2) 直墙拱衬砌结构 按拱顶的轮廓线不同,可分为直墙半圆拱衬砌、直墙割圆拱衬砌、直墙三心圆拱衬砌、直墙抛物线拱衬砌等,适用于围岩整体性一般、有一定侧向围岩压力的洞室支护。从受力性能分析,直墙抛物线拱衬砌优于直墙圆拱衬砌,但施工放样较难,工程上常采用直墙割圆拱衬砌、直墙三心圆拱衬砌等形式,矢高常取洞室跨度的 $1/3 \sim 1/6$,围岩较稳定时矢高取低值,当洞室跨度较小时也常采用直墙半圆拱衬砌。

(3) 曲墙拱衬砌或圆形衬砌结构 这两种衬砌尽管施工复杂,但结构受力性能好,抗竖向和水平围岩压力的能力大,很适合于围岩稳定性较差、水平侧向围岩压力较大、甚至洞室底部有隆起趋势或水压力较大的洞室支护。

(4) 多跨连拱衬砌结构 这种结构主要是用于对洞室空间有特殊要求的情况,如人防工程口部房间布置较多时,可采用双跨或多跨连拱衬砌,长度较短的双向交通隧道也可采用双跨连拱衬砌,这种结构多为现浇钢筋混凝土结构,施工难度较大。

1.2.4 离壁式结构

当围岩整体性较好、只有局部掉小块、岩质坚硬不易风化以及地下水较少时,将衬砌与围岩洞壁分离开,仅拱脚处与洞壁接触,衬砌只承受自重、使用活载及拱顶个别掉块冲击荷载外,不考虑围岩压力,如图 1-5 所示。显然,这种结构必须确保毛洞的自身长期稳定,如果毛洞的自身稳定不能保证,则先用喷锚衬砌支护围岩,再修建完全隔离的衬砌,即所谓的衬套结构,不论是离壁式还是衬套式,这种衬砌对地下空间的利用率均较低。

离壁式衬砌结构能明显改善地下工程的防水防潮效果,因为衬砌与岩壁之间的空气层不仅能有效隔断有关毛细水的传递路径,而且还能改善衬砌的温度环境,降低衬砌表面凝结水的产生。

1.2.5 穹顶式结构

在几何形态上,这种衬砌是由圆柱形侧墙和扁球形穹顶组成的空间结构,受力性能好,在各类围岩条件下都有应用,衬砌结构既可做成贴壁式又可做成离壁式,如图1-6所示。视围岩条件的不同,贴壁式可仅考虑穹顶,侧墙不做衬砌,离壁式衬砌可按空间薄壳结构计算。穹顶式衬砌结构常用于地下储油库、地下冷藏库、多条通道的交叉部位以及地下回车道等地下工程,工程上穹顶高与跨径比常取 $1/5\sim 1/7$ 。

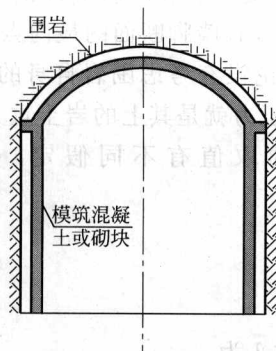


图 1-5 离壁式结构

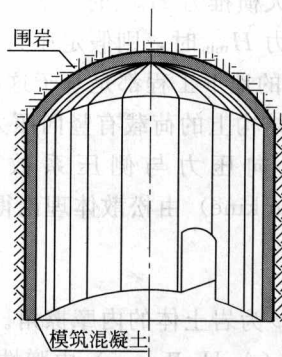


图 1-6 穹顶式结构

现浇贴壁式衬砌穹顶由于施工支模复杂,目前已应用较少,而采用喷锚结构加固穹顶及侧墙围岩,结合预制装配式空间离壁薄壳结构的方案应用较多,可明显加快施工速度降低工程造价。

1.3 地下工程有关计算理论的发展过程

地下工程结构计算理论的发展至今已有上百年的历史,早期的地下结构计算借用地面结构的设计计算方法,由于地下工程所承受的荷载环境比地面工程复杂得多,这种计算方法不能正确反映地下工程结构的受力特点。随着土力学、岩石力学以及岩土工程技术的发展,特别是现代岩石力学的快速发展,使地下工程结构计算理论得到了长足发展。目前,在计算机技术、测试仪器快速发展的支撑下,任何复杂的地下工程以及在各种施工状态下的力学状态,基本上都可以事先通过各种理论方法的计算得到准确的把握或可靠的模拟。

总的来看,地下工程结构计算理论的发展经历了五个阶段,即刚性结构阶段、弹性结构阶段、连续介质阶段、数值模拟阶段和可靠度分析阶段。需要指出的是,这几个阶段的划分不是以某个严格的时间节点为先后界限的。后来发展的计算方法虽然比先前的理论合理,但由于地下工程的复杂性,后来的理论不一定能淘汰先前的理论,相反由于先前的理论计算简单而仍在设计中广泛使用。

1.3.1 刚性结构阶段

刚性结构阶段的地下工程多为厚度较大的砖石拱形结构,在地层压力作用下,结构变形

很小, 因此将这种地下结构近似为不变形的刚性结构, 其计算模式主要是结构力学中的压力线理论。

刚性结构压力线理论的基本假定是: 砖石地下结构可近似为绝对刚体组成的三铰拱静定体系, 在地层压力作用下结构截面上的内力完全按静力平衡条件求出, 此时地下结构的墙底和拱顶分别为铰的位置。以最大横推力 $H_{\max}$ 和最小横推力 $H_{\min}$ 的比值 K 的大小控制结构稳定性, 即要求:

$$K = \frac{H_{\max}}{H_{\min}} > 1.25 \quad (1-1)$$

计算最大横推力 $H_{\max}$ 时, 假定压力线通过拱顶断面的最低点和墙脚断面的最外点; 确定最小横推力 $H_{\min}$ 时, 则假定压力线通过拱顶断面的最高点和墙脚断面的最内点。

19 世纪的地下工程都是基于这种理论建成的, 这种理论没有考虑围岩自身的承载能力, 作用在地下结构上的荷载有竖向压力和水平侧压力, 竖向压力就是其上的岩土重力, 水平侧压力则是竖向压力与侧压系数的乘积, 侧压系数的取值有不同假定, 其中朗肯 (W. J. M. Rankine) 由松散体理论得到的侧压系数 λ 为:

$$\lambda = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1-2)$$

式中, φ 为岩土体的内摩擦角。

金尼克 (А. Н. Диник) 由弹性体理论得到的侧压系数 λ 为:

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (1-3)$$

式中, μ 为岩土体的泊松比。

压力线理论假定缺乏理论依据, 按此设计的截面厚度一般偏大, 浪费材料。

1.3.2 弹性结构阶段

随着混凝土材料的出现, 尤其是 19 世纪后期土木工程中钢筋混凝土结构体系的应用, 不仅结构体系的整体性得到加强, 而且构件尺寸相对于砖石构件显得轻巧、柔性, 显然以前的刚性结构计算方法不适用于采用这种结构材料的地下工程, 出现了按弹性连续拱形框架模型进行内力分析的方法。

在围岩压力的作用下, 地下结构的内力按弹性连续拱形框架模型采用超静定结构力学方法进行计算, 显然其理论依据符合可靠的力学原理, 因此至今仍在地下工程设计中采用。这种计算模式根据考虑围岩对结构变形的约束作用不同又可细分为三个阶段, 即不计围岩抗力阶段、假定弹性抗力阶段和弹性地基梁阶段, 反映了人们对地下结构受力状态认识的逐渐深入过程。

(1) 不计围岩抗力阶段 这一阶段对地下结构进行内力计算时, 仅考虑作用在结构上的围岩压力, 这是一种主动荷载作用, 与地面建筑结构的受力分析完全相同, 不考虑当结构变形时将受到围岩的约束而使结构变形受到限制这一客观情况。

此阶段对结构上的围岩压力有了进一步的认识, 认为围岩压力不能简单地等于上覆围岩重力, 围岩压力仅是围岩松动圈范围内那部分岩土体的重力, 而松动圈范围大小与围岩类型及地下工程跨度等因素相关。按照松动圈形态的不同, 计算围岩压力的方法有普氏