

# 地下工程支护结构

徐干成 白洪才 郑颖人 刘朝 编著



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了地下工程支护结构的基本理论与计算方法,内容包括:围岩压力理论基础知识,支护结构弹塑性解析计算方法和数值计算方法,现代支护结构原理、类型和原则,工程类比、理论分析和现场监控相结合的信息化设计方法以及地下工程中较常采用的半被覆结构、直墙拱结构和油罐结构的设计特点和方法。对于地下工程中较新型的复合式衬砌结构以及锚喷支护结构可靠度设计等内容,本书也作了较详细的介绍。上述这些内容反映了当前地下工程支护结构设计理论与应用的技术水平。

本书可作为高等院校相关专业的教学用书,亦可供从事铁路、交通、水利、矿山、市政、桥梁以及国防工程等行业的科研、设计和施工人员借鉴参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

地下工程支护结构/徐干成等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2001  
ISBN 7-5084 0816-0

I. 地… II. 徐… III. 隧道工程-支撑 IV. U455.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第065468号

书 名	地下工程支护结构
作 者	徐干成 白洪才 郑颖人 刘朝 编著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部) 全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 19.5印张 462千字
版 次	2002年1月第一版 2002年1月北京第一次印刷
印 数	0001—3100册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 序

地下工程支护结构在各类建筑、交通、水利、矿山、市政以及国防和人民防空工程中得到广泛的应用。地下工程支护结构理论的发展已有100多年的历史，在我国也有数十年的历史。地下工程支护结构计算理论可分为已知地压荷载的传统支护计算理论和以岩石力学原理为基础、新奥法(NATM)隧道设计和修建方法以及有限元、边界元等数值分析为代表的现代支护计算理论。此外，在研究岩土材料本构关系和宏观岩体力学参数的基础上，人们还建立了许多新的力学模型和弹、塑、粘性的计算方法，并利用现场实测为手段，研究建立将现场监控量测信息反馈于设计和施工的新技术。

《地下工程支护结构》是编著者为原空军工程学院地下建筑专业本科生和研究生编写的教学用书，现经扩充、修改，并增加了部分地下工程领域设计中的一些较新内容以及作者近年来部分新的研究成果，编纂而成。内容包括：围岩压力理论基础知识，支护结构弹塑性解析计算方法和数值计算方法，工程类比、理论分析和现场监控相结合的信息化设计方法，半被覆结构、直墙拱结构和油罐结构的设计特点和方法，复合式衬砌结构的计算以及锚喷支护结构可靠度计算等内容。上述这些内容反映了地下工程支护结构设计理论与应用的当前技术水平。

书中内容充实，资料丰富，图文并茂，新颖实用；文字简洁朴实，语言流畅，对从事地下工程设计、施工、教学及科研等部门的技术人员是一本具有较高参考价值的科学论著。本书的问世相信对广大土木工程、岩土工程工作者都会有所助益，故乐于为之作序。

中国工程院院士



2001年9月29日于北京

# 前 言

长期以来,各种形式的地下工程(铁路隧道、公路隧道、矿山井巷、水工隧洞、国防和人防工事、市政通道、城市地铁及地下商业建筑等)在国内外得到了广泛的应用,地下工程建设技术已积累了丰富的经验,并取得了长足的进步,特别是新奥法(NATM)的出现,给地下工程带来了重大变革。随着科学技术及工业的发展,地下工程将会有更为广泛的新用途,如地下储气库、地下储水库以及地下核废料密闭储藏库等。

地下工程所处的环境条件与地面工程是全然不同的,但长期以来都是沿用适应于地面工程的理论和方法解决在地下工程中所遇到的各类问题,因而常常不能正确地阐明地下工程中出现的各种力学现象和过程,使地下工程长期处于“经验设计和施工”的局面。这种局面与迅速发展的地下工程的现实极不相称,因此,寻求用于解决地下工程问题的新的理论和方法已成为众所努力的目标。本书正是为了适应上述要求而编写的。

作者原工作单位西安空军工程学院曾于1987年铅印出版过《地下工程支护结构设计》一书,该书主要供洞库建筑专业本科生的教学用书和硕士研究生的教学参考用书。此次空军工程设计研究局组织人员对该书进行了重新编写,增加了部分地下工程领域设计计算中的一些较新内容以及作者近年来部分新的研究成果,力图反映国内外该领域的当前技术水平。

全书共十三章,由徐干成(主编)、白洪才、郑颖人负责。第一、六、八、十一、十二章由徐干成编写,第二、三、五章由郑颖人编写,第四、七、十三章徐干成、郑颖人编写,第九、十章由白洪才编写,刘朝对本书进行了统一校阅。

本书承中国土木工程学会防护工程学会理事长、中国工程院院士钱七虎先生作序,在此谨致谢忱。

由于编者水平所限,不妥错谬之处,敬请读者批评指正。

作 者

2001年8月于北京

# 目 录

## 序 前 言

<b>第一章 概述</b> .....	1
第一节 地下工程支护结构理论的发展与现状 .....	1
第二节 地下工程的受力特点和支护结构的设计方法 .....	3
第三节 地下工程支护结构计算的力学模式 .....	5
<b>第二章 围岩压力理论知识</b> .....	8
第一节 原岩应力 .....	8
第二节 圆形洞室围岩应力与变形的线弹性分析 .....	13
第三节 非圆形洞室的围岩应力 .....	22
第四节 无衬砌洞室的最佳形状 .....	25
第五节 围岩应力的弹塑性分析 .....	27
第六节 围岩塑性位移的计算 .....	33
第七节 围岩压力的分类 .....	35
第八节 变形压力的计算 .....	37
第九节 松动压力的计算 .....	41
<b>第三章 现代支护结构原理、类型与原则</b> .....	46
第一节 现代支护结构原理与类型 .....	46
第二节 锚喷支护的工艺特点和力学特点 .....	52
第三节 锚喷支护的设计与施工原则 .....	55
<b>第四章 锚喷支护工程类比设计</b> .....	62
第一节 工程类比设计的原则与方法 .....	62
第二节 服务于锚喷支护设计的围岩分类技术 .....	63
第三节 锚喷支护的类型及参数表 .....	80
<b>第五章 均质地层中锚喷支护的解析计算与设计</b> .....	87
第一节 轴对称条件下锚喷支护的计算 .....	87
第二节 轴对称条件下锚喷支护计算的图解方法 .....	93
第三节 特软地层中锚喷支护的解析计算 .....	96
第四节 非轴对称情况下锚喷支护的解析计算与设计 .....	98
<b>第六章 地下支护结构分析的数值方法</b> .....	103
第一节 概述 .....	103
第二节 支护结构单元刚度矩阵 .....	108
第三节 岩土材料非线性本构模型简介 .....	120

第四节	非线性问题有限元基本解法 .....	133
第五节	岩体弹塑性有限元分析 .....	138
第六节	地下洞室锚喷支护弹塑性边界元——有限元耦合算法 .....	141
第七节	粘弹性锚喷支护隧道围岩稳定性预测分析 .....	145
<b>第七章</b>	<b>现场量测和监控设计</b> .....	<b>152</b>
第一节	监控设计的原理与方法 .....	152
第二节	现场量测的目的、内容和手段 .....	152
第三节	围岩应力应变和围岩与支护间接触应力量测 .....	155
第四节	位移量测 .....	159
第五节	支护的应力应变变量测 .....	166
第六节	围岩声波测试 .....	169
第七节	现场量测计划和测试的有关规定 .....	174
第八节	量测数据的整理与处理 .....	177
第九节	施工监控及量测数据的分析与应用 .....	183
<b>第八章</b>	<b>弹性地基梁的计算理论</b> .....	<b>188</b>
第一节	概述 .....	188
第二节	弹性地基梁的计算模型 .....	188
第三节	弹性地基梁的挠曲微分方程及其初参数法 .....	189
第四节	弹性地基短梁、长梁及刚性梁 .....	198
<b>第九章</b>	<b>半被覆结构的计算</b> .....	<b>204</b>
第一节	作用在被覆结构上的荷载 .....	204
第二节	半被覆结构的计算简图 .....	209
第三节	半被覆结构的内力计算 .....	210
<b>第十章</b>	<b>直墙拱结构的计算</b> .....	<b>218</b>
第一节	直墙拱结构的计算简图及计算原理 .....	218
第二节	直墙拱结构的内力计算 .....	219
第三节	直墙拱结构的设计计算步骤及实例 .....	228
<b>第十一章</b>	<b>复合式衬砌结构的设计与计算</b> .....	<b>239</b>
第一节	概述 .....	239
第二节	复合式衬砌的设计 .....	241
第三节	复合式衬砌的计算 .....	242
<b>第十二章</b>	<b>地下油罐结构的设计与计算</b> .....	<b>251</b>
第一节	地下油罐设计的基本要求和分类 .....	251
第二节	地下油罐罐壁的计算 .....	252
第三节	地下油罐顶盖的计算 .....	256
第四节	地下油罐环梁的计算 .....	261
第五节	地下油罐底板的计算 .....	264
第六节	分离式地下油罐的内力计算 .....	271



第七节 整体式油罐结构的内力计算 .....	282
<b>第十三章 地下工程支护可靠度设计</b> .....	<b>289</b>
第一节 概述 .....	289
第二节 结构可靠度基本理论 .....	289
第三节 锚喷支护结构荷载效应分析 .....	295
第四节 锚喷支护结构可靠度设计 .....	299
<b>参考文献</b> .....	<b>304</b>

# 第一章 概 述

## 第一节 地下工程支护结构理论的发展与现状

地下工程通常包括在地下开挖的各种隧道与洞室。铁路、公路、矿山、水电、国防、城市地铁及城市建设等许多领域，都有大量的地下工程。随着科学技术及工业的发展，地下工程将会有更为广泛的新用途，如地下储气库、地下储热库、地下储水库以及地下核废料密闭储藏库等。

地下工程所处的环境条件与地面工程是全然不同的，但长期以来都是沿用适应于地面工程的理论和方法来解决在地下工程中所遇到的各类问题，因而常常不能正确地阐明地下工程中出现的各种力学现象和过程，使地下工程长期处于“经验设计”和“经验施工”的局面。这种局面与迅速发展的地下工程的现实极不相称，因此人们都在努力寻求用于解决地下工程问题的新的理论和方法。

地下工程支护结构理论的发展至今已有百余年的历史，它与岩土力学的发展有着密切关系。土力学的发展促使着松散地层围岩稳定和围岩压力理论的发展，而岩石力学的发展促使围岩压力和地下工程支护结构理论的进一步飞跃。随着新型支护结构的出现，岩土力学、测试仪器及计算机技术和数值分析方法的发展，地下工程支护结构理论正在逐渐形成一门完善的学科。

地下工程支护结构理论的一个重要问题是如何确定作用在地下结构上的荷载。因此，支护结构理论的发展离不开围岩压力理论的发展，从这方面，支护结构理论的发展大概可分为三个阶段。

20世纪20年代以前，主要是古典的压力理论阶段。这类理论认为，作用在支护结构上的压力是其上覆岩层的重量 $\gamma H$ （ $\gamma$ 是岩层容重； $H$ 是埋深）。可以作为代表的有海姆（A. Haim）、朗肯（W. J. M. Rankine）和金尼克（А. Н. Диник）理论。其不同之处在于，他们对地层水平压力的侧压系数有不同的理解。海姆认为侧压系数为1，朗肯根据松散体理论认为是 $\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ ，而金尼克根据弹性理论认为是 $\frac{\mu}{1-\mu}$ （ $\mu$ 为岩体的泊松比； $\varphi$ 为岩体的内摩擦角）。由于当时地下工程埋藏深度不大，因而曾一度认为这些理论是正确的。

随着开挖深度的增加，人们越来越多地发现，古典压力理论不符合实际情况，于是又出现了散体压力理论。这类理论认为，当地下工程埋藏深度较大时，作用在支护结构上的压力，不是上覆岩层重量，而只是围岩坍塌拱内的松动岩体重量。可以作为代表的有太沙基（K. Terzaghi）和普氏（М. М. Лротдьяконов）理论。他们的共同观点认为坍塌拱的高度与地下工程跨度和围岩性质有关。不同之处是，前者认为坍塌拱为矩形，后者认为是抛物线形。普氏理论把复杂的岩体之间的联系用一个似摩擦系数描写，显然过于粗糙，在工程实践中也常常出现失败的情况，但由于这个方法比较简单，直到现在普氏理论仍在应用着。



散体压力理论是相应于当时的支护型式和施工水平发展起来的，由于当时的掘进和支护所需的时间较长，支护与围岩不能及时紧密相贴，致使围岩最终往往有一部分破坏、坍塌。但是当时没有认识到围岩的坍塌并不是形成围岩压力的唯一来源，亦即不是所有的地下空间都存在坍塌拱，更没有认识到通过稳定围岩，以充分发挥围岩的自承作用问题。此外，这类理论也没有能科学地确定坍塌拱的高度及其形成过程。

50年代以来，岩石力学开始成为一门独立的学科，围岩弹性、弹塑性及粘弹性解答逐渐出现。如史密德 (H. Schmid) 和温德耳斯 (R. Windels) 按连续介质力学方法计算圆形衬砌的弹性解；徐干成、郑颖人等利用弹性力学获得了在非均压地层压力作用下围岩与支护共同作用的线弹性解；塔罗勃 (J. Talobre) 和卡斯特奈 (H. Kastner) 得出了圆形洞室的弹塑性解；塞拉塔 (S. Serata)、柯蒂斯和樱井春辅采用岩土介质的各种流变模型获得了圆形隧道的粘弹性解。同时，锚杆与喷射混凝土一类新型支护的出现和与此相应的一整套新奥地利隧道设计施工方法的兴起，终于形成了以岩石力学原理为基础的、考虑支护与围岩共同作用的地下工程现代支护理论。

现代支护理论与传统支护理论之间的区别主要表现在以下几方面：

(1) 对围岩和围岩压力的认识方面：传统支护理论认为围岩压力由洞室塌落的围岩“松散压力”造成，而现代支护理论则认为围岩具有自承能力，围岩作用于支护上的压力不是松散压力，而是阻止围岩变形的形变压力。

(2) 在围岩和支护间的相互关系上：传统支护理论把围岩和支护分开考虑，围岩当作荷载，支护作为承载结构，属于“荷载—结构”体系，现代支护理论则将围岩和支护作为一个统一体，二者组成“围岩—支护”体系共同参与工作。

(3) 在支护功能和作用原理上：传统支护只是为了承受荷载，现代支护则是为了及时稳定和加固围岩。

(4) 在设计计算方法上：传统支护主要是确定作用在支护上的荷载，现代支护设计的作用荷载是岩体地应力，围岩和支护共同承载。

(5) 在支护形式和工艺上：锚喷支护的施工方式简单，不需模板，无需回填，在围岩松动之前能及时加固围岩。

现代支护理论的形成与发展，首先是由于锚喷支护等现代支护结构的大量使用，给人们积累了丰富的经验，新奥法 (New Austrian Tunnelling Method) 是典型的代表。尤其是现场监控量测的应用，至20世纪80年代又将现场监控量测与理论分析结合起来，发展成为一种适应地下工程特点和当前技术水平的新的设计方法——现场监控设计方法（也称信息化设计方法）。其次是由于岩石力学理论的发展，60年代中期和70年代末期，以有限元法和边界元法为基础的数值解法开始运用到地下工程中来。70年代后期，在解析方面，国内外学者对轴对称问题获得了比较完善的解答，提出了锚喷支护的一些计算与设计方法，在国外则称为收敛—约束法，或特征曲线法。有限元法、边界元法及离散元法等数值解法迅速发展，模拟围岩弹塑性、粘弹塑性及岩体节理面等大型程序已经很多，这些理论都是以支护与围岩共同作用和需得知地应力及施工条件为前提的，比较能符合地下工程的力学原理。然而，这些计算参数还难以准确获得，如原岩应力、岩体力学参数及施工因素等。另外，对岩土材料的本构模型与围岩的破坏失稳准则人们还认识不足。因此，目前根据共同

作用所得计算结果，一般也只作为设计参考依据。

目前，工程中主要使用的工程类比设计法，也正在向着定量化、精确化和科学化方向发展。

地下工程支护结构理论的另一类内容，是岩体中由于节理裂隙切割而形成的不稳定块体失稳，一般应用工程地质和力学计算相结合的分析方法，即岩石块体极限平衡分析法。这种方法主要是在工程地质的基础上，根据极限平衡理论，研究岩块的形状和大小及其塌落条件，以确定支护的参数。

与此同时，在地下工程支护结构设计中应用可靠性理论，推行概率极限状态设计研究方面也取得了重要进展。采用动态可靠度分析法，即利用现场监测信息，从反馈信息的数据推测地下工程稳定可靠度，从而对支护结构进行优化设计，是改善地下工程支护结构设计的合理途径。考虑各主要影响因素及准则本身的随机性，可将判别方法引入可靠度范畴。在计算分析方法研究方面，随机有限元（包括摄动法、纽曼法、最大熵法和响应面法等）、Monte-Carlo 模拟、随机块体理论和随机边界元法等一系列新的地下工程支护结构理论分析方法近年来都有了较大的发展。

地下工程支护结构理论正在不断发展，各种设计方法都需要不断提高和完善，尤其是能较好地反映地下工程特点的现场监控设计方法，更迫切需要在近期内形成比较完善的量测体系与计算体系。从发展趋势看，新奥法开创的理论—经验—量测三者相结合的“信息化设计”体现了地下工程支护结构设计理论的发展方向。

## 第二节 地下工程的受力特点和支护结构的设计方法

### 一、地下工程的受力特点

地下工程所处的环境和受力条件与地面工程有很大不同，沿用地面工程的设计理论和方法来解决地下工程问题，显然不能正确地说明地下工程中出现的各种力学现象，当然也不可能由此作出合理的支护设计。

地下工程的受力特点大致可归纳成如下几点：

(1) 地下工程是在自然状态下的岩土地质体内开挖的，因而地下工程的这种地质环境对支护结构设计有着决定性意义。地下工程的地质环境包括地质体的形成及其经历，工程地质和水文地质状况，原岩应力场及地质体的物理和力学特性。与地面结构不同，地面结构的荷载比较明确，而且荷载的量级不大。地下工程上的荷载取决于当地的地应力，但地应力不仅很难测准，而且难以进行测试。目前，一般工程都不作地应力量测，这就使地下工程的计算精度受到影响。其次，地面工程中材料的物理力学参数可通过试件测试获得；而地质体力学参数与试件力学参数往往有很大不同，试件力学参数没有代表意义，地质体力学参数一般要通过现场测试，不仅难以进行而且不同地段区别很大，这也使地下工程的计算精度受到影响。因此对地下工程来说，只有正确认识地质环境对支护结构体系的影响，才能正确地进行支护结构的设计。

(2) 地下工程周围的地质体不仅会对支护结构产生荷载，同时它本身又是一种承载体。

作用在地质体上的原岩应力是由地质体本身和支护共同来承载的。作用在支护结构上的压力除与原岩应力有关外，还与地质体强度，采用的施工方法与施工时间，支护的形式与尺寸及洞室形状等因素有关。充分发挥地质体自身的承载力是地下支护结构设计的一个根本出发点。但对地面结构来说不存在这一问题，荷载只由结构来承受。

(3) 作用在支护结构上的荷载受到施工方法和施工时机的影响。某些情况下，即使选用的支护尺寸已经足够大，但由于施作时机和施工方法不当，仍然会遭受破坏。因而地下支护设计的另一特点是将受到施工因素和时间因素的影响。

(4) 与地面结构不同，地下工程支护结构安全与否，既要考虑到支护结构能否承载，又要考虑围岩会不会失稳。这两种原因都能最终导致支护结构破坏。支护结构的承载力可由支护材料强度来判断，但围岩是否失稳至今没有妥善的判断准则，一般都按经验来确定。

(5) 地下工程支护结构设计的关键问题在于充分发挥围岩自承力。要达到这点，就必须要求围岩在一定范围内进入塑性。但当岩土地质体进入塑性后，其本构关系是很复杂的。因此，由于本构模型选用不当亦会影响到计算的精度。可见，在力学模型上，地下工程也要比地面工程复杂。

## 二、支护结构的设计方法

地下工程的受力特点表明，地下工程的计算，无论在原理上或计算参数的选用上都比地面工程复杂得多，尤其是当仿效地面结构，按假设的荷载和岩块试件的力学参数作为计算依据，那是不可能获得精确计算结果的。目前，还没有一种很合理的地下支护结构的计算和设计方法。一般地，地下工程支护结构的设计都是采用以经验为依据的工程类比设计法为主，再辅以量测为手段的现场监控设计法和计算为根据的理论分析设计法。

地下工程支护结构设计是一门经验性很强的学科。长期以来，地下工程都是凭经验进行设计和施工的，这些经验来自大量的工程实践，有一定的科学依据。此外，工程类比设计法本身也在不断地发展，除了日益增多的经验积累之外，还要使经验愈来愈符合理论观点和不断地使经验的处理科学化。如在经验设计法中引用各种量测数据，以及采用统计学、模糊数学和数值分析等现代手段。

近 30 年来，弹塑性力学、流变学及岩土力学等现代力学和计算机技术的发展，克服了理论分析中数学和力学上的障碍，使理论设计法有了极大的进展。然而，计算参数和计算机理方面的一些障碍仍然存在，理论设计法一般还只能作为设计的参考依据。

最近 10 多年来，由于量测技术和计算技术两方面的互相渗透，现场监控设计方法有了很大进展。现场监控量测是将施工前和施工过程中测得的测试数据反馈于设计和施工，以期获得最佳的设计和施工方法。应当指出，地下工程的设计含义还应包括施工方法和施工参数的选择在内。

现场监控设计有测试的科学依据，又能适应多变的地质条件和各种不同的施工方法，同时，它能以现场测试数据反算出比较准确的计算参数，或者直接以测试数据为计算参数对围岩与支护的受力状态作出分析，这就克服了理论算法中计算参数获取的障碍。由此可见，它比理论设计法更能体现地下工程支护结构的特点，比工程类比法有更强的科学依据，这正是监控设计法能够迅速发展的原因。当然，监控设计法也还存在一些问题，除需有较

完备的测试仪器和作较多的量测工作外，量测数据的分析和反馈计算成果的判断，仍然依赖于人们的经验。另外，目前还缺少比较完善的反馈理论和反馈计算方法，所以，现场监控设计法还有待于不断发展和完善。

### 第三节 地下工程支护结构计算的力学模式

按支护结构与围岩相互作用考虑方式的不同，地下工程支护结构计算的力学模式可大致区分为三类：荷载结构模式、支护结构体系与围岩共同作用的计算模式以及经验类比模式。

#### 一、荷载—结构模式

荷载—结构模式认为围岩对支护结构的作用只是产生作用在结构上的荷载（包括主动的围岩压力和被动的弹性抗力），以计算支护结构在荷载作用下产生的内力和变形的的方法称为荷载—结构法。荷载结构模式是仿效地面结构的计算模式，即将荷载作用在结构上，用一般结构力学的方法来进行计算。长期以来，地下支护结构一直沿用这种计算方法，至今仍在使用。传统支护结构原理认为，结构上方的岩层最终要塌落。因此，作用在支护结构上的荷载就是上方塌落岩体的重量。然而，一般情况下岩层由于支护的限制并不会塌落，而是由于围岩向支护方向产生变形而受到支护阻止才使支护产生压力。这种情况下作用在支护结构上的荷载是未知的，应用荷载—结构模式就有困难。所以荷载—结构模式只适用于浅埋情况（图 1-1）及围岩塌落而出现松动压力的情况（图 1-2）。

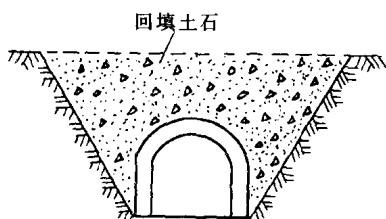


图 1-1 浅埋情况

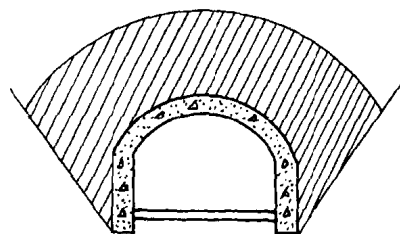


图 1-2 围岩塌落情况

荷载—结构模式还可按荷载不同细分成如下几种模式：

- (1) 主动荷载模式 [图 1-3 (a)]。
- (2) 主动荷载+被动荷载模式 [见图 1-3 (b)]。
- (3) 量测压力模式 [见图 1-3 (c)]。

前两种模式是考虑岩层重量作用在结构上，这种荷载通常是根椐松散压力理论或经验确定的。在没有抗力的土体中采用第一种计算模式，一般情况下采用第二种计算模式。第二种模式考虑了结构与岩体的相互作用，已经局部地体现了地下工程支护结构的受力特点。为了保证地层抗力的存在，应当使地层与结构之间保持紧密接触。

第三种模式是反馈计算中的一种方法，即根据现场实测获得的围岩压力，以此作为荷载对支护结构进行计算，这种荷载已经反映了结构与围岩的共同作用。

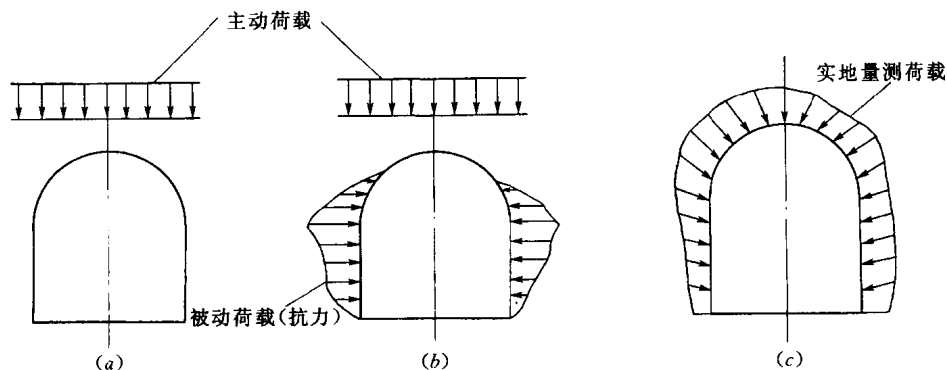


图 1-3 荷载结构模式

## 二、支护结构体系与围岩共同作用的计算模式

这类模式主要用于由于围岩变形而引起的压力（见图 1-4），压力值必须通过支护结构与围岩共同作用而求得，这是反映当前现代支护结构原理的一种计算方法，需采用岩石力学方法进行计算。应当指出，支护结构体系不仅是指衬砌与喷层等结构物，而且包含锚杆、钢筋网及钢拱架等支护在内。

这类模式的计算方法通常有数值解法和解析解法两类。

数值解法是把围岩视作弹塑性体或粘弹塑性体，并与支护一起采用有限元或边界元数值法求解。数值解法可以直接算出围岩与支护的应力和变形状态，以判断围岩是否失稳和支护是否破坏。数值解法往往有多种功能，能考虑岩体中的节理裂隙、层面、地下水渗流及岩体膨胀性等影响，是目前理论算法中的主要方法。监控设计法中的反馈计算方法一般也采用数值解法。

解析解法主要适用于一些简单情况下，以及某些简化情况下的近似计算。目前，国内外这类方法已经很多，一般可概括成如下几种：

(1) 支护结构体系与围岩共同作用的解析解法，如本章第一节所述，这种方法是利用围岩与支护衬砌之间的位移协调条件，得简单洞形（如圆形）条件下围岩与衬砌结构的弹性、弹塑性及粘弹性解。

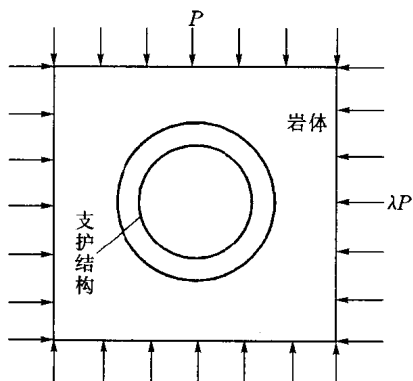


图 1-4 共同作用模式

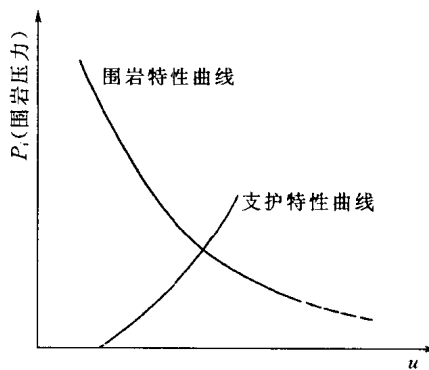


图 1-5 特征曲线法

(2) 收敛—约束法或特征曲线法(图 1-5)。这种方法的原理由弹塑—粘性理论等推导公式后在以洞周位移为横坐标、支护反力为纵坐标的坐标平面内绘出表示围岩受力变形特征的洞周收敛线,并按结构力学原理在同一坐标平面内绘出表示支护结构受力变形特征的支护限制线,得出以上两条曲线的交点,根据交点处表示的支护抗力值进行支护结构设计。

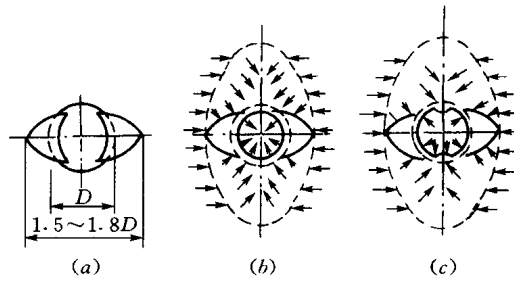


图 1-6 滑移楔体法

(3) 剪切滑移楔体法。这种方法基于 Robcewicz 提出的“剪切破坏理论”。该理论认为,围岩稳定性的丧失,主要发生在洞室与主应力方向垂直的两侧,并形成剪切滑移楔体。由于地下洞室开挖在侧压系数  $\lambda < 1$  ( $\lambda = \sigma_h / \sigma_v$ ,  $\sigma_h$  为水平初始地应力,  $\sigma_v$  为铅垂初始地应力) 的条件下,岩体的破坏过程如图 1-6 所示。首先两侧壁的楔形岩块由于剪切而分离,并向洞内移动 [图 1-6 (a)],而后,上部和下部岩体由于楔形岩块滑移造成跨度加大,上下岩体向洞内挠曲 [图 1-6 (b)],甚至移动 [图 1-6 (c)]。支护结构的设计按照由锚杆、喷射混凝土及钢拱架提供的支护抗力与塑性滑移楔体的滑移力达成平衡这一条件进行。

上述前两种方法其实质基本上是一致的,都是应用围岩与支护体系共同作用原理,按弹性、弹塑性或粘弹性理论求解,其不同点主要在于前者多采用数解法,后者采用图解法。

剪切滑移楔体法只是一种近似的工程计算法,假定条件很多,数学上推演不严格,但它适用于非轴对称情况,而且在某些条件下可得到工程实践和模型试验的验证。如果计算原则与力学分析基本合理,作为近似计算是可行的。

### 三、经验类比模式

对地质条件熟悉、幅员和跨度又都不大的几种常用型式的岩石地下工程支护结构,例如矿山巷道和不受动荷载作用的小跨度支护结构,常根据经验类比法直接选定结构的型式及其断面尺寸,并据以绘制结构施工图。

## 第二章 围岩压力理论知识

### 第一节 原岩应力

地层本身存在着应力场。未受扰动地层内的应力称为原岩应力，亦称地应力或初始应力。

原岩应力产生的原因及其应力状态，目前都不十分清楚。在初期，都是根据某些学者提出的假设来确定。20世纪初，瑞典地质学者海姆(Heim)通过观察大型越岭隧道围岩的工作状态，首先提出原岩应力的概念，认为垂直应力与上覆岩层重量有关，水平应力与垂直应力相等。后来，苏联学者金尼克(A. H. Диник)于1925年，根据弹性理论的分析，提出垂直应力 $\sigma_1 = \gamma H$ ，水平应力 $\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\mu\sigma_1}{1-\mu}$ ， $\gamma$ 、 $\mu$ 、 $H$ 分别代表岩体容重、泊松比和深度。

1958年瑞典人哈斯特(N. Hast)首先在斯勘地那维亚半岛开创了原岩应力的量测。接着许多国家也先后开展了这项工作。原位量测是目前确定原岩应力的较可靠的方法。此外，工程界还常常结合洞壁位移的量测来反演确定地应力，这也是目前确定地应力的常用方法。

#### 一、重力应力和构造应力

目前，一般把原岩应力分为重力应力和构造应力两类。实际的应力等于两类应力场的叠加。严格说来，还有温差应力和渗水应力，但一般不予考虑。

##### 1. 重力应力

通常，把岩体视作均匀、连续且各向同性的弹性体，因而可引用连续介质力学原理来确定岩体的重力应力。

如图2-1所示，在地表以下任一点的深度 $H$ 处，岩体的垂直应力 $\sigma_z$ 为

$$\sigma_z = 10^{-5}\gamma H \text{ (MPa)} \quad (2-1)$$

式中： $\gamma$ 为岩体容重， $\text{kg/m}^3$ ； $H$ 为上覆岩体厚度， $\text{m}$ 。

当埋深较小，且上覆岩层为多层不同岩石时(见图2-2)， $\sigma_z$ 为

$$\sigma_z = 10^{-5}\sum\gamma_i H_i \quad (2-2)$$

式中： $\gamma_i$ 为上覆各层岩体容重； $H_i$ 为上覆各层岩体厚度。

岩体水平应力为

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda\sigma_z \quad (2-3)$$

式中： $\lambda$ 为侧压系数。

在半无限体情况下，没有侧向变形的可能，所以沿任一水平方面，例如 $x$ 方向引起的变形总和等于零，即

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu\frac{\sigma_y}{E} - \mu\frac{\sigma_z}{E} = 0 \quad (2-4)$$

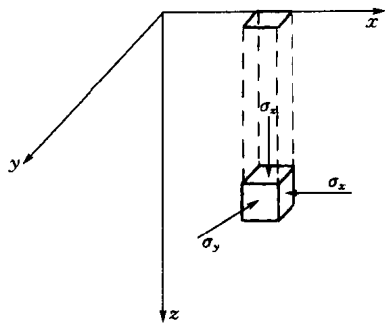


图 2-1 垂直应力计算

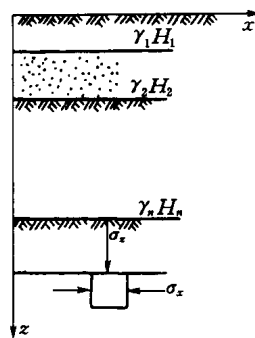


图 2-2 多层岩体垂直应力计算

式中： $E$ 、 $\mu$  分别为岩体的弹性模量和泊松比。

又因为  $\sigma_x = \sigma_y$ ，所以求得

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_z \quad (2-5)$$

式 (2-5) 与式 (2-3) 比较，则得侧压系数  $\lambda$  为

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (2-6)$$

这是金尼克的结论。

岩石的泊松比  $\mu$  通常在 0.10~0.35 之间，坚硬岩石的  $\mu$  值小于松软岩石。按式 (2-6)  $\lambda$  值应在 0.10~0.54 之间，而多数在 0.25~0.43 之间。但从实测地应力证明，按此确定  $\lambda$  值是不符合实际的。

当  $\mu = 0.5$  时，得到  $\lambda = 1$ ，所以海姆观点是金尼克公式的一个特例。但这一观点也不能得到实践的证实。可见，真实地层中的  $\lambda$  值通常要受到构造应力的影响。

## 2. 构造应力

根据近 30 年来实测与理论分析证明，地应力是一个具有相对稳定的非稳定应力场，即岩体的原始应力状态是空间与时间的函数，这是由于地应力受地质构造运动的影响。不过，对于一般工程问题，除少数构造活动以外，时间上的变化可以不予考虑。

地层中由于过去地质构造运动产生的，和现在正在活动与变化的应力，统称为构造应力。构造应力的成因和分类至今没有一个一致的观点。但通常主要分为古构造应力和新构造应力两类。

古构造应力是地质史上由于构造运动残留于岩体内部的应力，也称为构造残余应力。一般认为这是构成构造应力的主要原因。这种构造应力通常与地质的构造形迹相联系，往往在构造形迹附近表现很强烈，因而可引用地质力学的一些原理，根据构造形迹来判断地应力的方向与量级。但是有些地区虽有地质构造形迹，然而构造应力不明显或不存在，这是因为在长期的地质年代中应力已经松弛。

新构造应力是现今正在形成某种构造体系和构造型式的应力，也是导致当今地震和最新地壳变形的应力。

地震本身是新构造运动的一种表现。构造应力场通常与地震活动带密切相关。因而，在



地下工程选点上要尽量避开这些地带。

## 二、地壳浅部原岩应力的变化规律

由于地应力的非均匀性，以及受地质、地形、构造和岩石物理力学性质等方面的影响，使得我们在概括原岩应力状态及其变化规律方面遇到很大困难。不过根据目前实测资料，就工程通常所处的深度范围以内（3000m 以内），可大致归纳出如下几点：

### 1. 地应力是个非稳定应力场

岩体中原岩应力都是随着空间和时间的变化而变化的。地应力的空间变化程度，就小的范围而言，一个矿山或水利枢纽，都可以发现它的大小和轴向从一个地段到另一个地段的变化。一般它的偏差可达到 25%~50%。但就某大地区整体而言，地应力的变化是不大的。兹以华北地区为例，它的地应力场主导方向为北西西到近乎东西向的压应力，但具体地区应力有所变化，如表 2-1 所示。

表 2-1 唐山地震期间地应力变化表

地点	测量时间 (年·月)	最大主应力方向		水平应力 (MPa)		最大剪应力 $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ (MPa)
		地震前	地震后	$\sigma_1$	$\sigma_2$	
唐山凤凰山	1976.10	近东西向	N47°W	2.5	1.7	0.40
三河孤山	1976.10		N69°W	2.1	0.5	0.80
怀柔坟头村	1976.11		N83°W	4.1	1.1	1.50
顺义吴雄寺	1971.6	N75°W		3.1	1.8	0.65
	1973.1	N73°W		2.6	0.4	1.10
	1976.9		N83°W	3.6	1.7	0.95
	1977.7		N75°W	2.7	2.1	0.30
滦县一号孔	1976.8		N84°W	5.8	3.0	1.40
滦县二号孔	1976.9		N89°W	6.6	3.2	1.70

地应力大小和方向在时间上的变化，就人类工程活动所延续的时间而言是缓慢的，可以不予考虑。但在地震活动区，它的变化还是相当大的。兹以 1976 年 7 月 28 日唐山地区 7.8 级地震为例，从表 2-1 中顺义吴雄寺为例，该测点经过了一个应力积累到释放过程：震前的 1971~1973 年， $\tau_{\max}$  由 0.65 积累到 1.10MPa；震后的 1976 年 9 月~1977 年 7 月， $\tau_{\max}$

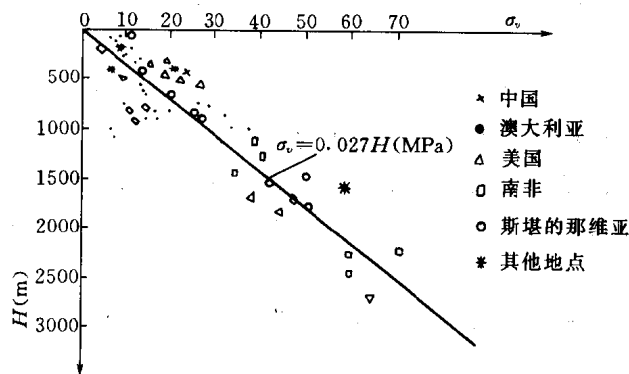


图 2-3  $\sigma_v$  与  $H$  关系

由 0.95 释放到 0.30MPa。主应力方向的变化如表所示，并且都在主震后一年左右，便恢复到震前的状态。

### 2. 实测垂直应力 ( $\sigma_v$ ) 基本等于上覆岩层重量 ( $\gamma H$ )

H.K. 布林总结全世界有关垂直应力  $\sigma_v$  资料证明，在深度为 25~2700m 范围内， $\sigma_v$  呈线性增长，大致相当于按平均容重  $\gamma = 2700\text{kg/m}^3$  计算出来的重力  $\gamma H$ ，见图 2-3。在这种情况下