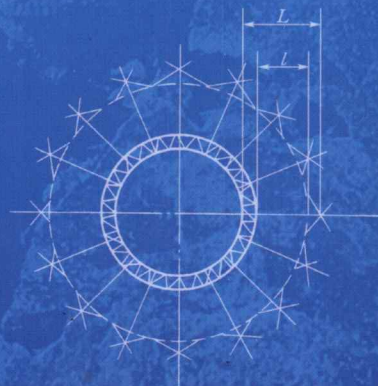




土木工程类“十二五”规划重点出版项目

地下工程 支护结构与设计



徐干成 郑颖人 乔春生 刘保国 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



土木工程类“十二五”规划重点出版项目

地下工程支护结构与设计

徐干成 郑颖人 乔春生 刘保国 编著



中国水利水电出版社
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设计和计算方法,内容包括:岩体力学性质及力学参数预测,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,地下工程施工变形预测的人工智能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

地下工程支护结构与设计 / 徐干成等编著. -- 北京
: 中国水利水电出版社, 2013. 1
土木工程类“十二五”规划重点出版项目
ISBN 978-7-5170-0435-6

I. ①地… II. ①徐… III. ①地下工程—支护工程—
结构设计 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第303294号

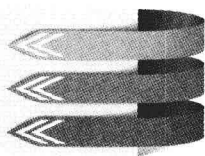
书 名	土木工程类“十二五”规划重点出版项目 地下工程支护结构与设计
作 者	徐干成 郑颖人 乔春生 刘保国 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 28印张 664千字
版 次	2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	52.00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

Foreword



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、黏性的计算方法，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。

本书《地下工程支护结构与设计》是编著者在 2002 年编著出版的《地下工程支护结构》一书基础上，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：岩体力学性质及力学参数预测，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、地下工程施工变形预测的人工智能方法，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设计等内容。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。

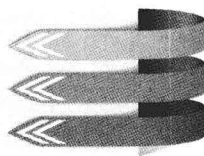
本书内容充实、资料丰富、图文并茂、新颖实用，文字简洁朴实，语言流畅，对从事地下工程设计、施工、教学及科研等工作的技术人员是一本具有较高参考价值的科学论著。本书的问世相信对广大土木工程、岩土工程工作者都会有所助益，故乐于为之作序。

中国工程院院士

2012 年 8 月 16 日于北京

前 言

Preface



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共同目标。本书正是为了适应上述要求而编写的。

作者曾于2002年编著出版了《地下工程支护结构》一书,该书分别于2003年和2008年两次重印出版。此次在作者工作单位空军工程设计研究局的大力支持下,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。

全书共十五章,由徐干成(主编)、郑颖人负责。第一、七、十、十一、十二、十三、十四章由徐干成编写,第三、四、六章由郑颖人编写,第二、九章由乔春生编写,第五章由徐干成、乔春生编写,第八章由刘保国、徐干成编写,第十五章由郑颖人、徐干成编写。

本书的编著得到了王后裕、朱建德、李成学、颀旭虎、贾治勇、杨进勇等同志的帮助,在此一并致谢。

本书承中国岩石力学与工程学会理事长、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,书中不妥和谬误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012年9月10日于北京

目 录

序

前言

第一章 概述	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
第二章 岩体力学性质及力学参数预测	8
第一节 概述	8
第二节 岩体结构	8
第三节 结构面的力学性质	14
第四节 岩体的变形特性	25
第五节 岩体的强度	29
第六节 岩体变形模量预测的经验方法	46
第三章 围岩压力理论知识	49
第一节 原岩应力	49
第二节 圆形洞室围岩应力与变形的线弹性分析	55
第三节 非圆形洞室的围岩应力	63
第四节 无衬砌洞室的最佳形状	66
第五节 围岩应力的弹塑性分析	69
第六节 围岩塑性位移的计算	75
第七节 围岩压力的分类	77
第八节 变形压力的计算	79
第九节 松动压力的计算	83
第四章 现代支护结构原理、类型与原则	88
第一节 现代支护结构原理与类型	88
第二节 锚喷支护的工艺特点和力学特点	94
第三节 锚喷支护的设计与施工原则	97
第五章 锚喷支护工程类比设计	104
第一节 工程类比设计的原则与方法	104
第二节 锚喷支护设计的围岩分级技术	105

第三节	锚喷支护的类型及参数表	147
第六章	均质地层中锚喷支护的解析计算与设计	158
第一节	轴对称条件下锚喷支护的计算	158
第二节	轴对称条件下锚喷支护计算的图解方法	165
第三节	特软地层中锚喷支护的解析计算	167
第四节	非轴对称情况下锚喷支护的解析计算与设计	170
第七章	地下工程支护结构分析的数值方法	175
第一节	概述	175
第二节	支护结构单元刚度矩阵	181
第三节	岩土材料非线性本构模型简介	193
第四节	非线性问题有限元基本解法	206
第五节	岩体弹塑性有限元分析	211
第六节	地下洞室锚喷支护弹塑性边界元——有限元耦合计算法	215
第七节	黏弹性锚喷支护洞室围岩稳定性预测分析	219
第八章	现场量测和监控设计	226
第一节	监控设计的原理与方法	226
第二节	现场量测的目的、内容和手段	227
第三节	围岩应力应变量测	229
第四节	位移量测	233
第五节	支护结构的应力应变量测	242
第六节	围岩声波测试	248
第七节	现场量测计划和测试的有关规定	252
第八节	量测数据的整理与处理	256
第九节	施工监控及量测数据的分析与应用	270
第九章	地下工程施工变形预测的人工智能方法	275
第一节	地下工程施工变形预测方法综述	275
第二节	支持向量机回归算法	279
第三节	地下工程施工变形预测的支持向量机算法	289
第四节	进化—自适应神经模糊推理系统算法	295
第五节	地下工程施工变形预测的进化—自适应神经模糊推理系统	303
第十章	弹性地基梁的计算理论	311
第一节	概述	311
第二节	弹性地基梁的计算模型	311
第三节	弹性地基梁的挠曲微分方程及其初参数法	313
第四节	弹性地基短梁、长梁及刚性梁	322

第十一章	半被覆结构的计算	329
第一节	作用在被覆结构上的荷载	329
第二节	半被覆结构的计算简图	335
第三节	半被覆结构的内力计算	336
第十二章	直墙拱结构的计算	345
第一节	直墙拱结构的计算简图及计算原理	345
第二节	直墙拱结构的内力计算	346
第三节	直墙拱结构的设计计算步骤及实例	355
第十三章	复合式衬砌结构的设计与计算	368
第一节	概述	368
第二节	复合式衬砌的设计	370
第三节	复合式衬砌的计算	372
第十四章	地下油罐结构的设计与计算	381
第一节	地下油罐设计的基本要求和分类	381
第二节	地下油罐罐壁的计算	383
第三节	地下油罐顶盖的计算	387
第四节	地下油罐环梁的计算	391
第五节	地下油罐底板的计算	395
第六节	分离式地下油罐的内力计算	402
第七节	整体式油罐结构的内力计算	414
第十五章	地下工程支护结构可靠度设计	421
第一节	概述	421
第二节	结构可靠度基本理论	422
第三节	锚喷支护结构荷载效应分析	427
第四节	锚喷支护结构可靠度设计	432
	参考文献	437

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 γH （ γ 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（A. H. 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 $\tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ ，而金尼克根据弹性理论认为是 $\frac{\mu}{1-\mu}$ （ μ 为岩体的泊松比； φ 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（M. M. Протдъяконов）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惟一来源,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、弹塑性及黏弹性解答逐渐出现。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黏弹性解。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的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、黏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以下几点:

(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。因而地下支护结构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。要达到这一点，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 40 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 20 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，这就克服了理论计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）。

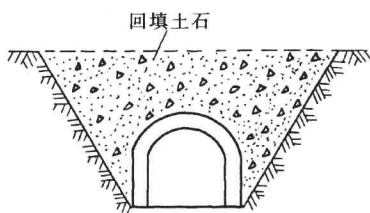


图 1-1 浅埋情况

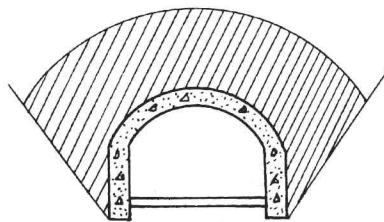


图 1-2 围岩塌落情况

荷载—结构模式还可按荷载不同细分成以下几种模式：

- (1) 主动荷载模式 [见图 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，这种荷载通常是根据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

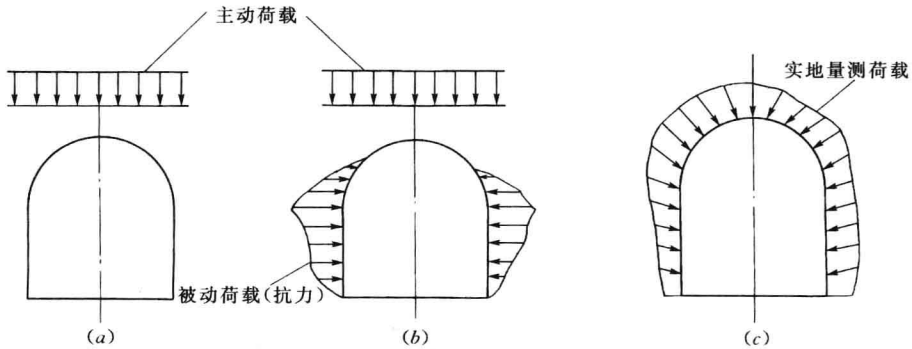


图 1-3 荷载结构模式

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。

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。

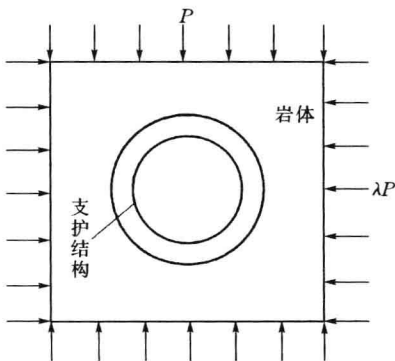


图 1-4 共同作用模式

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黏弹塑性体，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，一般可概括成以下几种：

(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，获得简单洞形（如圆形）条件下围岩与衬砌结构的弹性、弹塑性及黏弹性解。

(2) 收敛—约束法或特征曲线法（图 1-5）。这种方法的原理是按弹塑—黏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。

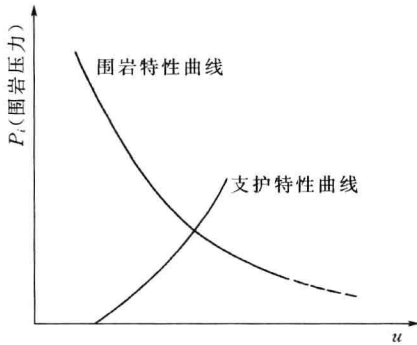


图 1-5 特征曲线法

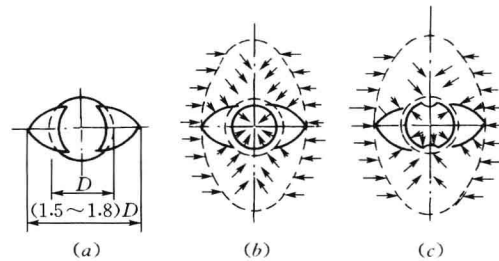


图 1-6 滑移楔体法

(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。地下洞室开挖在侧压系数 $\lambda < 1$ ($\lambda = \sigma_h / \sigma_v$, σ_h 为水平初始地应力, σ_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、弹塑性或黏弹性理论求解，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 岩体力学性质及力学参数预测

第一节 概 述

岩体是地质体的一部分，其中存在着断层、节理、层面等各种不连续面（或称结构面），岩体在这些不连续面的切割下，形成一定的岩体结构并赋存于一定的地质环境之中，因此，岩体在力作用下的变形与强度特征要比岩石材料复杂得多。岩体的力学性质一方面取决于它的受力条件，另一方面则受岩体本身特征及赋存条件的影响，其影响主要包括：①组成岩体的岩石材料性质的影响；②结构面力学性质的影响；③岩体内结构面的发育组合情况——岩体结构类型的影响；④赋存环境的影响，特别是水和地应力的影响。其中，结构面的影响是使岩体力学性质不同于完整岩石材料力学性质的最主要原因。

岩体中的一般微观不连续面可以忽略不计，当作连续介质来研究。若有一定方向的较小裂隙，如结合良好的层理，可以当作各向异性的连续介质。若由于不连续面的存在，不连续面的特性在很大程度上控制岩体特性时，对于这种岩体，我们称之为不连续岩体或裂隙岩体。不连续岩体的力学性能由于有结构面的存在而大大削弱，这要分为两种情况来分析。一种情况是岩体中存在几组结构面，或者结构面密度不大，或者结构面没有贯通，或者结构面虽然贯通，但切割成镶嵌的块体，在这些情况下，在某几个方向，即最不利方位上的岩体力学性能受到很大削弱，但在某些方向上岩体力学性能却影响较小。对于这种情况，在实际岩石工程中，必须注意到结构物力的作用方向与岩体最不利方向的关系。另外一种情况是岩体受结构面切割已经非常破碎，岩体性能无论在哪个方向上都受到不同程度的、极大的削弱，这时就应该将岩体看作是完全碎裂的散体结构来加以处理。

第二节 岩 体 结 构

在工程分析中，岩石常被作为线弹性、均质和各向同性的介质处理，但是这种特定的性状对于认识岩体内部应力、应变的真实性是有限度的。

岩石的物理力学性质随结构的取向不同而产生的方向性特点，称为各向异性。岩石的各向异性是岩石的结构性的反映。岩石具有两种结构性：一是微观结构性，即岩石内部的结构性，它是以组成岩石的矿物结晶程度、颗粒大小、形状和胶结方式为特征的；二是宏观结构性，即岩体的结构性，它是以岩体中存在的各种不连续面为特征的。岩体中不连续面的普遍存在，使岩体具有明显的不连续性或多裂隙性。岩石的不均匀性、各向异性和不连续性，使其具有与一般材料完全不同的性质。这就导致对它进行力学分析时，要比一般材料来得困难。目前要完全考虑这些性质进行分析还缺少成熟的方法，因此在一般情况



下，仍然假定岩体为线弹性的、均质的和各向同性的介质。

岩体是指一定范围内的天然岩石。岩体经受过各种不同构造运动的改造和风化次生作用的演化，所以在岩体中存在着各种不同的地质界面，这种地质界面称为结构面，例如层理面、节理面、裂隙和断层等。由这些结构面所切割和包围的岩块体，称为结构体。因此岩体就是由结构面和结构体两种单元所组成的地质体。国内工程地质界称之为岩体结构。它是一个复杂的地质体。岩体的力学性质是结构面和结构体这两个基本单元体力学性质的综合性质，通常由工程现场岩体的力学试验而获得。

岩体是岩块单元的集合体。这些单元体以结构面为边界，并有规律地按照某一种排列方式组成一个整体，为了便于反映岩体被结构面切割的程度和概括这些单元体组合的规律，人为地提出了“岩体结构”的概念，以区别于只具有微观不连续的岩石，例如层状结构是指在工程范围内一组弱面明显发育的岩体。同时，将结构面组合起来切割而成的单元体称为结构体。岩体结构由结构面和结构体两个单元组成。也就是说，岩体结构是指岩体中结构面和结构体形态和组合的特征。

图 2-1 表示了岩体结构与其组成部分（结构面和结构体）的相互关系。

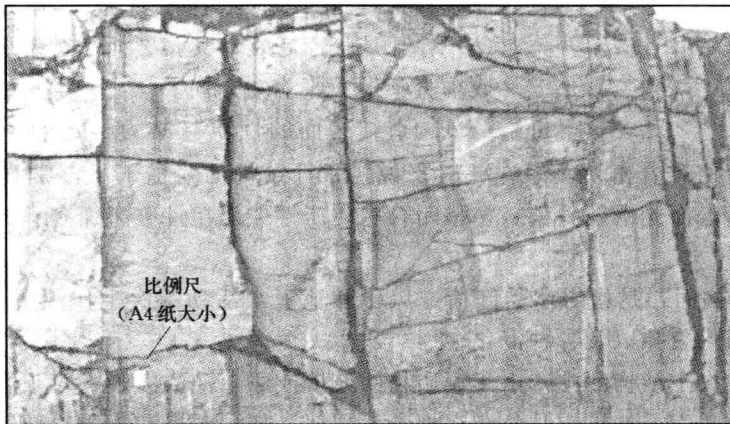


图 2-1 岩石与岩体结构示意图

一、结构面的类型与自然特性

1. 结构面的类型

结构面按其成因可分为原生结构面、构造结构面及次生结构面三种。下面简要地介绍各种结构面的形成和分布规律。

(1) 原生结构面：是指在成岩过程中形成的结构面。它包括沉积结构面、火成结构面和变质结构面。

沉积结构面：沉积结构面是沉积岩层在沉积成岩过程中形成的，如层理、不整合面、软弱夹层或古风化夹层等。沉积结构面是岩层的结合面，有平整光滑面，也有起伏粗糙面，这类结构面都连续分布并能延伸很远。

变质结构面：受变质作用而形成的结构面，有片理和各种片状岩石的夹层，如滑石片