

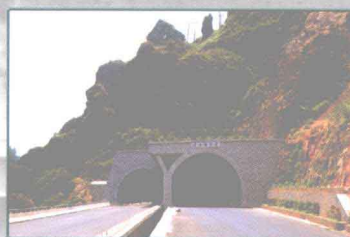
Suidao

Yuzhihu Yuanli yu
Shigong Jishu

隧道

预支护原理与施工技术

● 朱汉华 王迎超 祝江鸿 等 编著



人民交通出版社
China Communications Press

Suidao Yuzhihu Yuanli yu Shigong Jishu
隧道预支护原理与施工技术

朱汉华 王迎超 祝江鸿 等 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书从岩体工程性质和隧道围岩的变形与破坏规律的研究出发,围绕隧道结构设计与施工过程中必须遵循的力学规律,针对隧道灾害的发生机理、隧道设计理论统一性和适用性、隧道受力独立性、隧道支护平衡稳定性、隧道施工方法合理性判别原则、特殊问题的治理措施等问题逐一展开研究,全书系统地阐述了隧道预支护原理及其在各类围岩中的应用,提出了隧道施工方案的合理性判别原则,强调隧道施工技术的核心是基本维持围岩原始状态,以达到充分发挥围岩自承能力的目的。

该书理论联系实践,实用性强,可供从事隧道工程及相邻学科的工程技术人员参考使用,也可作为高等院校隧道工程专业及相关专业本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

隧道预支护原理与施工技术 / 朱汉华等编著. —北京:
人民交通出版社, 2008.9
ISBN 978 - 7 - 114 - 07341 - 0

I . 隧… II . 朱… III . ①隧道—巷道支护—理论②隧道—
巷道支护—施工技术 IV . U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 129591 号

书 名: 隧道预支护原理与施工技术

著 作 者: 朱汉华 王迎超 祝江鸿 等

责任编辑: 曲 乐 周高瞻

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 13

字 数: 325 千

版 次: 2008 年 10 月第 1 版

印 次: 2008 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 07341 - 0

印 数: 0001—3000 册

定 价: 26.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

对于山岭隧道建设而言,通过近两个世纪的探索,形成了多种设计理论和工法,如新奥法、浅埋暗挖法、矿山法等,这些设计理论和工法在隧道建设实践中发挥了十分重要的作用。遵循“实践是认识的源泉”的真理,国内外大量隧道建设实践、技术、设备和工艺的发展促使我们继承和发展这些设计理论和工法。根据实际地质条件,具体情况具体分析,实事求是地解决隧道问题,与时俱进地阐述新的理论和指导新一轮的隧道工程实践。通过反思隧道工程坍塌、失效过程和总结隧道工程成功实践获得如下极为宝贵的经验:隧道结构设计、施工及养护全过程必须符合力学规律(特别是结构强度、稳定、刚度等),这种要求必须贯穿整个设计、施工及养护全过程;合理的施工与养护工艺是保障隧道结构强度、稳定、刚度等的基础,如果某个过程不符合力学规律就容易造成失效事故。反观历史工程实例(如地道战时修建的地道和龙游石窟)可以得出大概结论:虽然古代工匠没有现代力学的系统知识,但是其经典历史工程构思和建造的全过程均符合现代力学原理,合理的施工与养护工艺保证了其经典历史工程千百年大计。因此,山岭隧道建设问题大致分为两大类:

(1)综合运用新奥法、浅埋暗挖法、矿山法等多种设计理论和工法,解决隧道围岩与支护系统共同作用问题,达到稳定平衡状态,确保隧道结构的安全。综观这些设计理论和工法,要想熟练、快速、有效地将其应用于隧道工程实践,就应该解决隧道施工方法合理性判别问题、隧道受力独立性问题、隧道支护平衡稳定性问题、隧道设计理论统一性和适用性问题、隧道合理施工与初期支护顺序问题、隧道量测参数和精度选择问题等。

(2)当隧道沿途经过岩溶区、瓦斯富集地层、软弱破碎围岩等地段时,或处理进出洞口边仰坡时,就会面临一系列特殊问题。本书最后一章结合大量的工程实例,简要分析了隧道在特殊地质段遇到的各种灾害的形成机理,归纳了各种灾害对隧道建设所产生的不良影响,提出了各种灾害的具体防治措施。面对隧道施工中遇到的这些特殊问题,就像工程规划遵循“复杂问题简单化”理念一样,应首先了解其灾害机理,用最简单有效的工程措施去预防它们、治理它们。

本书围绕隧道结构设计、施工及养护全过程必须符合力学规律,回答隧道灾害的发生机理、隧道设计理论统一性和适用性、隧道受力独立性、隧道支护平衡稳定性问题、隧道施工合理方法判别原则、特殊问题的治理措施等问题来展开。通过熟悉这些内容,可以进一步提高设计、施工及养护人员(管理、技术、工人)理解隧道结构符合力学规律、合理工艺保证的重要性,达到熟练、快速、有效应用设计理论和工法,确保隧道工程质量和效益。

首先,这些设计理论和工法都是一种手段,在我国当前的生产力水平条件下,其核心就是“基本维持围岩原始状态”,达到“充分发挥围岩自承作用”的目的,在“保持平衡稳定性”这一点上,各种设计理论和工法是一致的。预支护原理的正确运用是确保隧道围岩稳定的前提,“能量最小原理”与“基本维持围岩原始状态”的提法是相辅相成的,“能量最小原理”是直接判断施工方法优劣的原则,是实现“基本维持围岩原始状态”目标应遵循的技术原则,“保持平衡稳定性”是工程质量的保证。因此,在隧道建设实践中并不介意采用什么理论和工法,关键是施工过程中要遵循“能量最小原理”。按此原理选择合适的工法,达到“基本维持围岩原始状态”,因此,“预支护原理的正确运用”、“能量最小原理”和“基本维持围岩原始状态”是隧道施工合理方

法的判别原则。

其次,连拱隧道、小净距隧道的两个洞体围岩之间存在强烈的相互影响,这导致衬砌受力复杂,稳定性变差。因此,在隧道结构设计与施工技术方面如何采取措施,增强连拱隧道洞体围岩和衬砌受力的独立性,减小相互影响是实现围岩稳定的重要思路。连拱隧道、小净距隧道结构设计细节和合理的施工工艺是保证隧道受力独立性的关键措施,这符合著名的德国桥梁专家莱昂哈特非常注重结构构造的思想,他在《钢筋混凝土及预应力混凝土桥建筑原理》一书中强调“有关桥梁性能好的构造细节较之复杂的计算更为重要”,隧道好的构造细节也是一样。

最后,各种设计理论和工法之间都存在差异。就新奥法而言,在硬岩隧道与软岩隧道应用也有本质区别,特别是各种辅助工法独立于各种理论之外。其实各种设计理论和工法存在统一性和适用性,其核心都是隧道围岩与支护共同作用要达到足够强大并“保持平衡稳定性”,才能使隧道“基本维持围岩原始状态”,从而达到隧道“充分发挥围岩的自承能力”的目的。在此基础上建立隧道预支护原理,统一各种设计理论和工法的核心思想,归纳为四种情况(即围岩自稳好情况的预支护原理应用、深埋围岩自稳差情况的预支护原理应用、浅埋围岩自稳差情况的预支护原理应用、深埋围岩大变形情况的预支护原理应用),明确其统一性和适用性问题,便于人们理解和应用。

隧道施工公共安全问题促进了合理施工与初期支护顺序有关问题的解决;隧道结构衬砌和防水有关问题宜采用浅埋暗挖法的原则。

基于上述理念较好地表达了隧道结构设计、施工及养护整个过程全寿命理念,指出许多设计理论和工法的适用性和一致性,强调了隧道结构设计细节和合理施工工艺的重要性等,最终回归到“复杂问题简单化”理念。正像 Timo Shenko 力学理论一样,简化处理各种复杂边界条件的力学问题,便于提高隧道建造质量,服务社会科学发展。

本书是集体劳动的成果,杨建辉、孙红月、王戌平、金仁祥、符文熹、吴志军、曲晨、王吉民、袁迎捷、吴明、姜纹泉、周红升等,对本书的完成做出了重要贡献。浙江大学尚岳全教授对本书的完成给予了热忱帮助和指导。

本书得以顺利完成,还与相关单位的领导和同事的关心、帮助密不可分,谨致我们的衷心谢意!

总之,许多成果是广大隧道工程建设者在生产实践中创造的,作者根据这些成果加以认定、总结、归纳、提炼,得出上述结论,希望在今后隧道工程建设中发挥有益作用,不当之处,敬请指正!特别指出上述许多问题应该进一步深化,还有许多问题等待解决,我们应该根据隧道工程实践总结提炼出新的规律和理论,以便服务下一轮蓬勃发展的隧道工程建设,这既是我们的责任,也是我们的目标,我们应该共同努力奋斗!

朱汉华、王迎超、祝江鸿 等

2008年8月于杭州

目 录

第 1 章 岩体工程性质	1
1.1 岩石的力学特性	1
1.1.1 岩石的变形性质	1
1.1.2 岩石的强度性质	2
1.2 岩体结构	4
1.2.1 结构面的成因类型	4
1.2.2 结构面特征及其对岩体力学性质的影响	5
1.2.3 软弱夹层	8
1.2.4 结构体特征	8
1.3 岩体力学特性	9
1.3.1 岩体的变形特征	9
1.3.2 岩体的强度特性	10
1.4 岩体工程分类	13
1.4.1 岩体的结构类型划分	13
1.4.2 岩体基本质量指标(BQ)分级	14
1.4.3 《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)分级	15
1.5 地应力分布的基本规律	16
1.6 天然应力场的计算	18
1.6.1 自重应力场	18
1.6.2 构造应力场	19
1.7 小结	19
第 2 章 隧道围岩的变形与破坏	20
2.1 隧道围岩稳定的地质环境	20
2.1.1 内在因素	20
2.1.2 外部因素	22
2.2 隧道围岩失稳实例分析	23
2.2.1 工程地质和水文地质因素	23
2.2.2 设计因素	25
2.2.3 施工因素	26
2.3 隧道围岩变形破坏的基本类型	27
2.3.1 隧道围岩变形破坏的形态	27
2.3.2 隧道围岩破坏的力学机理	28
2.4 洞室围岩稳定的经典历史工程实例	30
2.5 小结	33

第3章 隧道预支护原理	34
3.1 隧道工程技术要点	34
3.2 隧道围岩的平衡稳定问题	36
3.2.1 平衡概念	36
3.2.2 岩体累进性破坏	37
3.2.3 不稳定平衡工程事故分析	39
3.3 隧道预支护原理	41
3.3.1 完整围岩	45
3.3.2 有一定自承能力的围岩	45
3.3.3 破碎围岩或自承能力很差的围岩	46
3.4 小结	47
第4章 自稳性好的围岩预支护原理应用	48
4.1 完整硬质围岩	48
4.2 稳定性一般的Ⅱ级和Ⅲ级硬质岩及稳定性较好的Ⅳ级围岩	49
4.3 岩石锚杆支护作用	51
4.3.1 块状结构岩体	51
4.3.2 层状结构岩体	52
4.4 锚杆和喷射混凝土协调作用	53
4.5 锚喷支护类比设计	54
4.6 小结	55
第5章 浅埋自稳差的围岩预支护原理应用	56
5.1 概述	56
5.2 浅埋暗挖法预支护结构设计	59
5.2.1 计算机模拟开挖分析	59
5.2.2 经验类比法分析	60
5.3 浅埋暗挖法施工	62
5.3.1 施工方案	62
5.3.2 施工方法	63
5.4 浅埋破碎岩体中隧道支护结构的理论计算	70
5.4.1 根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)求解	70
5.4.2 按 Terzaqhi 理论确定围岩作用于衬砌顶部的压力	71
5.4.3 钢拱架受力分析	71
5.5 小结	71
第6章 深埋自稳差围岩的预支护原理应用	73
6.1 概述	73
6.2 支护能量最小原理	74
6.3 下导洞适度超前预支护全断面施工方法	75
6.3.1 下导洞适度超前全断面施工方法的依据	76
6.3.2 破碎围岩预支护应注意的问题	76
6.4 深埋破碎岩体中支护结构的理论计算	76

6.4.1	按普氏理论计算	77
6.4.2	根据统计理论计算	77
6.4.3	围岩压力的确定	77
6.4.4	钢拱架的受力分析和支护形式确定	78
6.5	破碎岩体隧道支护的有限元分析	89
6.5.1	隧道开挖后塑性区的扩展分析	89
6.5.2	松弛区岩体破坏过程的有限元分析	93
6.6	小结	99
第7章	深埋大变形围岩的预支护原理应用	100
7.1	概述	100
7.2	大变形隧道变形特征	100
7.2.1	工程实例	100
7.2.2	变形特征	103
7.3	大变形隧道的分类	104
7.3.1	高地应力大变形隧道	104
7.3.2	膨胀岩大变形隧道	105
7.4	大变形隧道的支护理念 and 支护技术	105
7.4.1	明确大变形的控制性因素	105
7.4.2	重视岩体结构分析	106
7.4.3	正确认识塑性圈的作用	106
7.4.4	合理确定预留变形量	107
7.4.5	分步骤构建支护体系	107
7.4.6	大变形隧道支护技术	107
7.5	支护优化原理	109
7.5.1	优化目标	109
7.5.2	优化机理	110
7.6	小结	110
第8章	隧道施工方案合理性判别原则	112
8.1	围岩破坏与支护的理论分析	112
8.2	判别原则的提出	112
8.2.1	充分发挥围岩的自承能力和基本维持围岩的原始状态	113
8.2.2	预支护原理的正确运用是前提	113
8.2.3	开挖能量最小原理	113
8.3	判别原则的综合运用	115
8.3.1	I级和II级围岩	115
8.3.2	III级和IV级围岩	115
8.3.3	V级围岩	116
8.3.4	VI级围岩	117
8.3.5	施工顺序分析	117
8.4	连拱隧道合理施工顺序	118

8.4.1	双连拱隧道的中墙问题	118
8.4.2	双连拱隧道的偏压问题	118
8.4.3	连拱隧道施工工法	119
8.5	小净距隧道合理施工顺序	121
8.5.1	小净距隧道两洞体相互影响问题	121
8.5.2	小净距隧道仰拱的施工问题	122
8.5.3	小净距隧道施工工法	122
8.5.4	小净距隧道后行洞对先行洞二衬影响的有限元分析	124
8.6	小结	131
第9章	隧道受力独立性	132
9.1	隧道结构受力独立性概念	132
9.2	连拱隧道断面受力独立性设计与施工	132
9.2.1	隧道跨度对围岩稳定作用分析	132
9.2.2	传统断面	133
9.2.3	改进断面	133
9.2.4	优化断面	134
9.3	小净距隧道受力独立性设计与施工	135
9.4	双车道连拱隧道模型合理断面试验研究	136
9.4.1	模型断面设计	136
9.4.2	连拱传统断面、改进断面及合理断面模型试验	137
9.5	小结	139
第10章	隧道围岩稳定与施工安全技术	140
10.1	预支护原理的正确运用是确保隧道围岩稳定的前提	140
10.2	合理的施工过程是确保围岩基本维持原始状态的关键	142
10.2.1	非线性力学行为	142
10.2.2	隧道施工过程的力学描述	142
10.2.3	施工过程的空间效应对围岩稳定性的影响	143
10.2.4	施工过程的时间效应对围岩稳定性的影响	145
10.3	初期支护施工顺序基本认识	148
10.4	软弱破碎围岩隧道施工与支护顺序	150
10.4.1	隧道施工顺序	150
10.4.2	加强支护与合理安排支护顺序	151
10.5	块体坍塌围岩隧道施工与支护顺序	153
10.6	用新奥法思想处理塌方	154
10.7	浅埋小净距隧道开挖顺序研究	155
10.7.1	引言	155
10.7.2	模型建立	155
10.7.3	工况	156
10.7.4	结果分析	156
10.7.5	几点认识	158

10.8 某隧道整体下沉分析及治理建议	158
10.8.1 工程概况	158
10.8.2 隧道施工方案和事故分析	159
10.8.3 现场监控量测及分析	161
10.8.4 处理建议	162
10.8.5 几点认识	162
10.9 小结	163
第 11 章 结构衬砌与防水设计	164
11.1 结构衬砌设计	164
11.1.1 一般性要求	164
11.1.2 初期支护设计	164
11.1.3 二次衬砌设计	165
11.2 结构防水设计	167
11.2.1 历史工程结构防水措施的借鉴	167
11.2.2 防水的原则	169
11.2.3 防水系统	169
11.3 小结	170
第 12 章 隧道特殊问题	172
12.1 隧道边仰坡问题	172
12.1.1 边坡失稳机理与稳定性影响因素	173
12.1.2 仰边坡失稳导致隧道塌方工程实例	174
12.1.3 工程措施	179
12.2 围岩失稳问题	180
12.2.1 塌方	180
12.2.2 掉块	183
12.3 岩爆问题	184
12.3.1 岩爆机理和预测	184
12.3.2 岩爆的防治措施	185
12.4 涌水和突泥问题	187
12.4.1 隧道涌水发生的条件	187
12.4.2 隧道涌水工程实例	188
12.4.3 隧道突泥灾害的发生条件和影响因素	190
12.4.4 隧道突泥事故工程实例	190
12.5 岩溶问题	191
12.6 有害气体问题	192
12.7 小结	193
参考文献	194

第 1 章 岩体工程性质

岩体是岩石和结构面的组合体,它构成了山区越岭隧道的基本建设环境。岩体的工程性质是隧道的开挖与支护方案选择的重要影响因素。

岩石是矿物的集合体,是自然地质作用的产物。岩石颗粒间往往具有较牢固的结晶联结或胶结联结,除少数岩石强度较低、抗变形和抗水性较差外,大多数新鲜岩石质地都比较致密、抗水性强、透水性弱、力学强度高。

岩体是在地质历史过程中形成的,由岩块和结构面组成、具有一定的结构并赋存于一定的天然应力状态和地下水等地质环境中的地质体。研究岩体在外力作用下的力学性质及其稳定性时,必须充分考虑天然应力,特别是构造应力和水的影响。

1.1 岩石的力学特性

岩石在外力作用下所表现的性质称为岩石的力学性质。在外力作用下,岩石首先产生变形,随着外力的不断增加,达到或者超过某一极限值时,便产生破坏。岩石的力学性质主要包括岩石的变形性质、岩石的破坏方式和岩石的强度性质。

1.1.1 岩石的变形性质

1. 单向受压条件下岩石的应力—应变曲线特征

岩石在连续加载条件下的应变,可分为轴向应变(ϵ_L)、横向应变(ϵ_d)和体积应变(ϵ_v)。轴向应变和横向应变可在试验过程中直接量测,体积应变则由 $\epsilon_v = \epsilon_L - 2\epsilon_d$ 计算求得。求得了各级应力下岩石的这三种应变值,就可绘制出相应的应力—应变曲线(图 1.1),通过岩石的应力—应变曲线,可将岩石变形划分成以下不同的阶段。

(1)微裂隙压密阶段:在荷载作用初期,岩石中原有张开性微结构面或微裂隙逐渐闭合,岩石被压密,形成早期的非线性变形。曲线呈上凹型,斜率随应力增加而逐渐增大。

(2)弹性变形至微破裂稳定发展阶段:随着荷载的增加,该阶段的 $\sigma - \epsilon_L$ 曲线呈近似直线关系,而 $\sigma - \epsilon_v$ 曲线开始为直线关系,其变形机理为弹性变形阶段。

(3)裂隙发生和稳定发展阶段:随 σ 增加,曲线逐渐变为曲线关系, b 点的应力称为弹性极限。微破裂稳定发展阶段主要表现为塑性变形,试件内开始出现新的微裂隙,并随应力增加而发展,当荷载保持不变时,微破裂也停止发展。由于微破裂的出现,试件体积压缩速率减缓, $\sigma - \epsilon_v$ 曲线偏离直线向纵轴方向弯曲。这一阶段的上限应力称为屈服极限。

(4)非稳定破裂发展阶段(或称累进性破裂阶段):

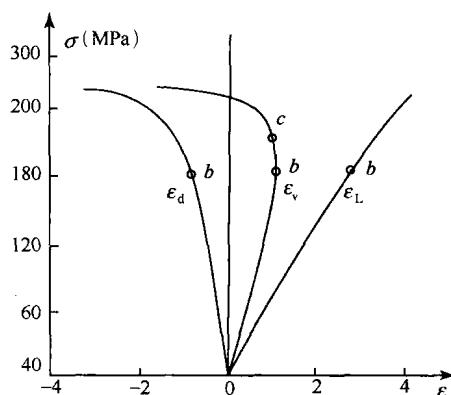


图 1.1 岩石应力—应变全过程曲线

进入本阶段后,微破裂的发展出现了质的变化。由于破裂过程中所造成的局部应力集中效应显著,即使外荷载保持不变,破裂仍会不断发展,并在某些薄弱部位首先破坏,应力重新分布,其结果又引起次薄弱部位的破坏,依次进行下去直至试件完全破坏,试件由体积压缩转为扩容。轴向应变和体积应变速率迅速增大,试件承载力达到最大。本阶段的上限应力称为峰值强度或单轴抗压强度。

(5)破坏后阶段(或称峰值后阶段):岩石承载力达到峰值后,裂隙快速发展,其内部结构完全破坏,岩石分裂成一系列碎块,岩石变形主要表现为沿宏观断裂面的块体滑移,试件承载力随变形增大迅速下降,但并不降到零,说明破裂的岩石仍有一定的承载力,而应力降到某一稳定值,称为残余强度,其值大小等于块体之间的摩擦阻力。

2. 三轴压缩条件下的岩石变形性质

作为建筑物地基或环境的工程岩体,一般处于三向应力状态中。为此研究岩石在三轴压缩条件下的变形与强度性质将具有重要的实际意义。岩体中的三向应力状态可用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 三个主应力表示。

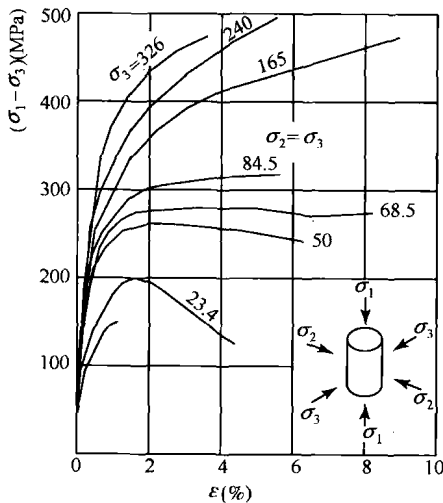


图 1.2 不同围压下大理岩的变形曲线

试验研究表明:有围压作用时,岩石的变形特征与单轴压缩时不尽相同。图 1.2 为大理岩在不同围压下的应力—应变曲线。由图可见,岩石破坏前的应变随围压增大而增加,随围压增大岩石的塑性也不断增大。在围压为零或较低时,岩石呈现出脆性状态;当围压增大至 50MPa 时,显示出由脆性向塑性转化的过渡状态;围压增加到 68.5MPa 时,则呈现出延性流动状态;围压达 165MPa 时,则岩石屈服后的应力值随应变增加稳定增长,出现所谓应变硬化现象。这表明围压是影响岩石力学属性的主要因素之一。通常把岩石由脆性转化为延性的临界围压称为转化压力。

围压对岩石变形模量的影响常因岩性而异。通常对坚硬少裂隙的岩石影响较小,而对软弱多裂隙的岩石影响较大。试验研究表明:某些砂岩的变形模量在屈服前可提高 20%,接近破坏时则降低 20%~40%。但总的来说,随着围压的增加,岩石的变形模量及泊松比都有不同程度地提高。围压影响下的岩石变形模量 E_0 可用下式确定:

$$E_0 = \frac{1}{\epsilon_\alpha} (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) \quad (1.1)$$

式中: ϵ_α ——轴向应变;

σ_1 ——轴向应力;

σ_3 ——围压;

μ ——泊松比。

1.1.2 岩石的强度性质

随着外力的不断增加,达到或超过某一极限值时,岩石便产生破坏,把岩石抵抗外力破坏的能力称为强度。岩石的强度又可分为单轴抗压强度、单轴抗拉强度、抗剪强度和三轴压缩强

度等。

1. 岩石的单轴抗压强度

岩石在单向受力破坏时,单位面积所能承受的最大压应力,称为单轴抗压强度,简称抗压强度。

$$R = P/A \quad (1.2)$$

式中: R ——岩石的单轴抗压强度(MPa);

P ——试件的破坏荷载(N);

A ——试件的横断面积(mm²)。

岩石的抗压强度是反映岩石基本力学性质的重要指标,它在岩体工程分类、建立岩体破坏判据中都是必不可少的。岩石的抗压强度指标受一系列因素的影响,主要包括两个方面:一是岩石本身的因素,如矿物组成、结构构造及含水状态等;二是试验条件,如试件形状、尺寸大小、高径比、加工精度和加荷速度等。

2. 岩石的三轴压缩强度

岩石试件在三向压应力作用下能抵抗的最大主应力,称为岩石的三轴压缩强度。在一定的围压 σ_3 下,对试件进行三轴试验时,则岩石的三轴压缩强度 σ_{1m} (MPa)为:

$$\sigma_{1m} = \frac{P_m}{A} \quad (1.3)$$

式中: P_m ——试件破坏时的轴向荷载(N);

A ——试件的初始横断面积(mm²)。

根据一组试件试验得到的三轴压缩强度(σ_{1m})和相应的围压(σ_3)以及单轴抗拉强度(σ_t),可以在 $\tau\sigma$ 坐标系中绘制出一组破坏应力圆。然后,拟合出这些应力圆的公切线,即得岩石的强度包络线(图 1.3)。包络线与 σ 轴的交点,称为包络线的顶点。除顶点以外,包络线上所有点的切线与 σ 轴的夹角代表相应破坏面的内摩擦角(φ),切线在 τ 轴上的截距代表相应破坏面的内聚力(c)。

试验表明,在围压变化较大的情况下,岩石的强度包络线常为一曲线,即岩石的抗剪强度参数 c 、 φ 值不是常量,均可能随破坏面上正应力的大小而变化。一般来说,应力较低时, φ 值大而 c 值小,应力高时相反。岩石的抗剪强度常随应力增加而增大,但其增加率是随着应力增加而减小的。当围压不太大时,岩石的强度包络线常可近似地视为一直线(图 1.4),据此,可求得岩石的三轴压缩强度 σ_{1m} 与围压 σ_3 及剪切强度参数 c 、 φ 值间的关系。

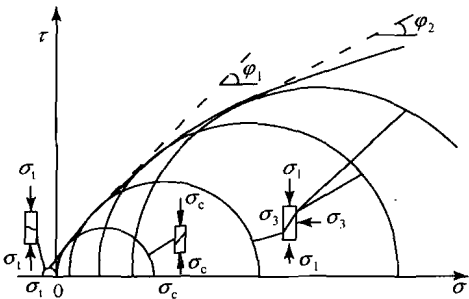


图 1.3 岩块的莫尔强度包络线

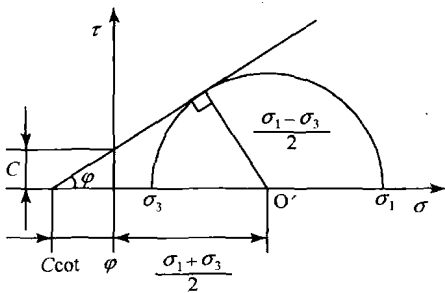


图 1.4 直线型莫尔强度包络线

由图 1.4 有:

$$\sin\varphi = \frac{(\sigma_{1m} - \sigma_3)/2}{(\sigma_{1m} + \sigma_3)/2 + c \cdot \cot\varphi}$$

简化后可得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1m} &= \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_3 + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} \\ \text{或 } \sigma_{1m} &= \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot \tan(45^\circ + \varphi/2) \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

利用(1.4)式,令 $\sigma_3=0$,可得岩石的单轴抗压强度 R 为:

$$R = 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} = 2c \cdot \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (1.5)$$

令 $\sigma_1=0$,可得岩石的单轴抗拉强度 σ_t 为:

$$\sigma_t = 2c \sqrt{\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi}} = 2c \cdot \tan(45^\circ - \varphi/2) \quad (1.6)$$

根据式(1.4)~式(1.6),如果已知任意两个参数,就可以求得另外的参数了。

岩石的三轴压缩强度与岩石本身性质、围压、温度、湿度、孔隙压力及试件高径比等因素有关,特别是矿物成分、结构和微结构面的发育情况及其相对于最大主应力的方向和围压的影响尤为显著。

理论和实验都证明:各种岩石的三轴压缩强度 σ_{1m} 均随围压的增加而增大。但 σ_{1m} 的增加率小于 σ_3 的增加率,即 σ_{1m} 与 σ_3 为非线性关系。在三向不等压条件下,若保持 σ_3 不变时,随 σ_2 的增加, σ_{1m} 也有所增加。说明中间主应力 σ_2 对岩石强度也有一定的影响。除此之外,围压还影响岩块的残余强度。

1.2 岩体结构

岩体在其形成与存在过程中,长期经受到复杂的建造和改造两大地质作用,形成了各种不同类型和规模的地质界面,如断层、节理、层理、片理、裂隙、接触面、软弱夹层等。这些在地质历史过程中形成的具有一定的延伸方向和长度,且厚度较小的地质界面,称为结构面。岩体受结构面的切割,形成一种独特的割裂结构。岩体的力学性质不仅受岩体的岩石类型控制,更主要的是受岩体中结构面的控制,往往表现出非均质、非连续、各向异性等特征。

岩体结构是指岩体中结构面与结构体的排列组合特征。岩体结构应包括两个要素或称结构单元,即结构面和结构体。也就是说,不同的结构面与结构体之间以不同方式排列组合,形成了不同的岩体结构类型。

1.2.1 结构面的成因类型

结构面按成因不同可将其分为原生结构面、构造结构面和次生结构面三类。

1. 原生结构面

这类结构面是岩体在成岩过程中形成的结构面,其特征与岩体成因密切相关。包括沉积结构面、岩浆结构面和变质结构面三类。

沉积结构面是沉积岩在沉积和成岩过程中形成的。它包括层理面、软弱夹层、沉积间断面

和不整合等。沉积结构面的特征与沉积岩的成层性有关,一般延伸性较强,常贯穿整个岩体,产状随岩层产状而变化。例如,沉积结构面在海相沉积岩中分布稳定而清晰,而在陆相沉积岩层中常呈透镜状等。

岩浆结构面是在岩浆侵入及冷凝过程中形成的。它包括岩浆岩体与围岩的接触面、各期岩浆岩之间的接触面、流面、流线和原生冷凝节理等。

变质结构面可分为残留结构面和重结晶结构面。残留结构面是指岩石的变质较轻而保留原岩的结构面。重结晶结构面主要有片理和片麻理面等,它是岩石发生深度变质和重结晶作用,使片状矿物和柱状矿物富集并呈定向排列形成的结构面,它改变了原岩的面貌,对岩体的物理力学性质常起控制性作用。

2. 构造结构面

这类结构面是岩体形成后在构造应力作用下形成的各种破裂面。它包括断层、节理、劈理、层间错动等,多数充填有厚度不等、性质各异的充填物,并发育成由构造岩组成的构造破碎带,具有多期活动特征。在地下水作用下,有的已泥化或者已变成软弱夹层,这部分构造结构面(带)的工程地质性质很差,常导致工程岩体的滑动破坏。

3. 次生结构面

这类结构面是岩体形成后,在外营力作用下形成的。它包括卸荷裂隙、风化裂隙、次生夹泥层和泥化夹层等。

卸荷裂隙是因表部岩体被剥蚀卸荷造成应力释放和调整而形成的,产状与临空面近于平行,并具张性特征。如河谷岸坡内的顺坡向裂隙及谷底的近水平向裂隙等。

风化裂隙一般仅限于地表风化带内,常沿原生结构面和构造结构面叠加发育,使其性质进一步恶化。新生成的风化裂隙,延伸短、方向紊乱、连续性差。

泥化夹层是原生软弱夹层在构造及地下水共同作用下形成的;次生夹泥层则是地下水携带的细颗粒物质及溶解物沉淀在裂隙中形成的。它们的性质一般都很差,属软弱结构面。

1.2.2 结构面特征及其对岩体力学性质的影响

结构面对岩体力学性质的影响主要取决于结构面的发育情况。如岩性完全相同的两种岩体,由于结构面的空间方位、连续性、密度、形态、张开度及其组合关系不同,它们的力学性质会有很大的差异。

1. 结构面的产状

结构面的产状与最大主应力的关系控制着岩体的破坏机理与强度。如图 1.5 所示,当结构面与最大主平面的夹角 β 为锐角时,岩体将沿结构面滑移破坏[图 1.5a)];当 β 为 90° 时,表现为横切结构面,产生剪断岩体破坏[图 1.5b)];当 β 为 0° 时,则表现为平行结构面的劈裂拉张破坏[图 1.5c)]。随着破坏方式的不同,岩体的强度也发生变化。

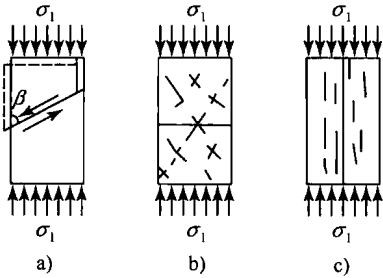


图 1.5 结构面产状对岩体破坏机理的影响

2. 结构面的连续性

结构面的连续性反映结构面的贯通程度,常用线连续性系数、迹长和面连续性系数等表示。

线连续性系数(K_1)是指沿结构面延伸方向上,结构面各段长度之和($\sum a_i$)与测线长度的比值(图 1.6),即:

$$K_1 = \frac{\sum a_i}{\sum a_i + \sum b_i} \quad (1.7)$$

K_1 变化在 0~1 之间, K_1 值越大说明结构面的连续性越好,岩体的工程地质性质越差,当 $K_1=1$ 时,结构面完全贯通。

国际岩石力学学会(ISRM,1978)主张用结构面迹长(在露头中对结构面可追索的长度)来描述和评价结构面连续性,并制定了相应的分级标准(表 1.1)。

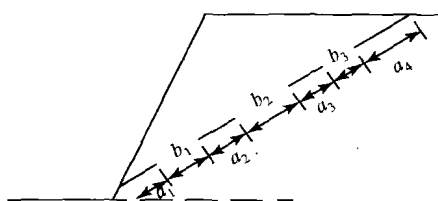


图 1.6 结构面线连续性系数示意

结构面连续性分级 表 1.1

描 述	迹长(m)
很低连续性	<1
低连续性	1~3
中等连续性	3~10
高连续性	10~20
很高连续性	>20

3. 结构面的密度

结构面的密度反映结构面发育的密集程度,常用线密度、面密度和间距等指标表示。

线密度(K_d)是指结构面法线方向单位测线长度上交切结构面的条数(条/m);间距(d)则是指同一组结构面法线方向上两相邻结构面的平均距离;两者互为倒数关系,即

$$K_d = 1/d \quad (1.8)$$

当岩体中包含有多组结构面时,可用叠加方法求得水平测线方向上的结构面密度。

结构面的面密度或称裂隙率(A_d)是指单位测量面积中结构面面积所占的百分率。数值上等于结构面长度(L)与张开度(e)的乘积之和与所量测岩面面积 A 的比:

$$A_d = \frac{\sum (L \cdot e)}{A} \quad (1.9)$$

结构面的密度控制着岩体的完整性和岩块的块度。一般来说,结构面发育越密集,岩体的完整性越差,岩块的块度越小,进而导致岩体的力学性质变差,渗透性随之增强。

4. 结构面的形态

结构面的形态可以从侧壁的起伏形态及其粗糙度两方面进行研究。

据统计,结构面侧壁的起伏形态可分为:平直、波状、锯齿状、台阶状和不规则状等几种(图 1.7)。而侧壁的起伏程度可用起伏角 i 表示。

$$i = \arctan \frac{2\delta}{L} \quad (1.10)$$

式中： δ ——平均起伏差；

L ——平均基线长度。

结构面的粗糙度可用粗糙度系数 JRC 表示，随粗糙度增大，结构面的摩擦角也增大。据巴顿(Barton, 1977)的研究，可将结构面的粗糙度系数划分为如图 1.8 所示的 10 级。在实际工作中，可用纵剖面仪测量出所研究结构面的粗糙剖面，然后与图 1.8 所示的标准剖面进行对比，即可求得结构面的 JRC。

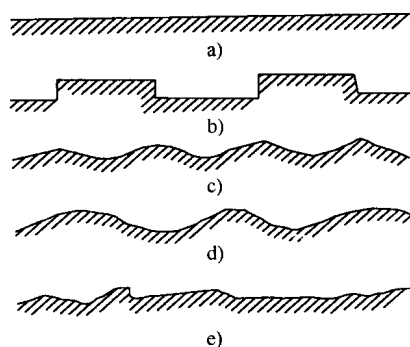


图 1.7 结构面的起伏形态示意图

a)平直;b)台阶状;c)锯齿状;
d)波状;e)不规则状

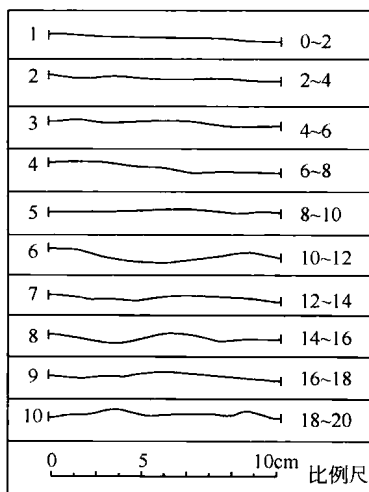


图 1.8 标准粗糙程度剖面的 JRC 值

5. 结构面的张开度与充填胶结特征

结构面两壁面一般不是紧密接触的，而是呈点接触或局部接触，接触点大部分位于起伏或锯齿状的凸起点。这种情况下，由于结构面实际接触面积减小，必然导致其黏聚力降低，进而影响结构面的强度及渗透性。

结构面的张开度(e)是指结构面两壁面间的平均垂直距离(mm)。一般认为 $e < 1\text{mm}$ 为密合的， $e = 1 \sim 5\text{mm}$ 为中等张开的， $e > 5\text{mm}$ 为张开的。

结构面经胶结后，总的来说，其力学性质有所改善。改善的程度因胶结物成分不同而异。以硅质、铁质胶结的强度最高，其胶结物强度往往与岩石强度差别不大，甚至超过岩石强度；而泥质与易溶盐类胶结的结构面强度最低，且抗水性差。

未胶结且具有一定张开度的结构面，往往被外来物质所充填，其力学性质取决于充填成分、充填厚度、含水性及壁岩的性质等。按充填物厚度和连续性考虑，结构面的充填可分为：薄膜充填、断续充填、连续充填和厚层充填等四类。不同的充填类型其结构面的变形与强度性质不同，在实际工作中应注意区别。

6. 结构面的分级

结构面的规模大小不仅影响岩体的力学性质，而且影响工程岩体力学作用及其稳定性。