

# 岩石力学

## 与测试模拟方法

金爱兵 主编



清华大学出版社  
北京

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩石力学与测试模拟方法/金爱兵主编. —北京:清华大学出版社,2023.9  
ISBN 978-7-302-63797-4

I. ①岩… II. ①金… III. ①岩石力学—测试方法—模拟方法 IV. ①TU45

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 105798 号

责任编辑:秦娜 赵从棉

封面设计:陈国熙

责任校对:欧洋

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:21.5

字 数:523千字

版 次:2023年9月第1版

印 次:2023年9月第1次印刷

定 价:69.80元

---

产品编号:100178-01

岩石力学作为力学的一个分支,是一门研究岩石在内外因素作用下应力、应变、失稳、破坏以及加固处治的学科,涉及采矿、土木、水利、交通、地质、能源、海洋、军事等众多工程应用领域。它经历了初期经验阶段、经验理论阶段、经典理论阶段、现代发展阶段等几个重要的阶段,形成了力学、物理学、系统工程、现代数理科学、现代信息技术等多学科交叉融合的具有较强应用性和实践性的基础性学科。

本书在编写过程中,注重理论知识、试验方法、实例分析三者有机统一,坚持贯彻实时性、完整性、实用性和实践性的原则,比较全面地反映了国内外岩石力学的相关理论、技术、方法和工程实践成果。希望学生能够通过本书的学习,掌握岩石力学中的基本概念、基本理论和各种岩石力学常规试验方法;结合地下及边坡等典型岩石工程,熟悉设计原理、施工方法、现代测试技术以及数值分析方法;了解岩石力学领域的新工艺、新技术、新理论等最新进展;培养分析、判断、解决岩石力学与岩石工程问题的能力,激发和提升学习兴趣和实践能力。本书力求适应新时代国家对人才培养及新工科建设的要求,培养全方位复合型人才。

全书共分为 10 章:第 1 章介绍了岩石力学的发展简史、研究内容与研究方法、岩石力学学科发展;第 2 章详细介绍了岩石基本构成、地质分类、物理性质、强度特性、变形特性、流变特性及影响岩石力学性质的因素;第 3 章介绍了常用岩石强度理论(准则)的适用范围与优缺点以及弹性、塑性、流变等岩石本构关系的使用条件与应用范围;第 4 章介绍了结构面相关概念、岩体变形特征、强度特征,总结了应用广泛的工程岩体分级方法;第 5 章在对地应力基本概念、分布规律及测量原理进行简介的基础上,详细介绍了地应力的直接测量法和间接测量法;第 6 章介绍了岩石地下工程中围岩应力状态、地压计算与控制方法,并讲解了岩石地下工程施工方法及其监测技术;第 7 章在介绍岩石边坡破坏基本概念的基础上,详细介绍了边坡稳定性影响因素及评价指标、稳定性分析方法、边坡防护与监测措施;第 8 章详细介绍了单轴压缩试验、三轴压缩试验、直接剪切试验、巴西劈裂试验、点荷载强度试验等岩石力学常规试验方法;第 9 章详细介绍了 CT 测试技术、声发射测试技术、霍普金森压杆测试技术、数字图像相关测试技术、扫描电镜测试技术等岩石力学现代测试技术;第 10 章介绍了有限差分法、有限元法、离散单元法等岩石工程数值分析方法,并基于实例分别介绍了对应的数值模拟软件。

本书由金爱兵任主编并统稿。赵怡晴教授对本书进行了认真审阅,提出了许多宝贵意见和建议;陈龙、陈帅军、陆通、王杰、姚宝顺、张静辉、张舟、李海、唐坤林、朱东风、苏楠、尹泽松、钟士照、缪俊容、刘美辰、李木芽、韦立昌、李曦豪等研究生为本书的资料收集、编排与校对等工作投入了大量的时间和精力。本书的编写和出版得到北京科技大学教材建设基金

资助,同时,本书编写过程中,参考了大量国内外文献,在此一并表示由衷的感谢!

本书可作为岩土工程、土木工程、采矿工程及相关专业的本科生、研究生教材,也可作为从事岩石力学、岩石工程与测试模拟等技术人员的专业参考书。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请各位读者提出宝贵意见,以便进一步修订及完善!

编者

2023年5月于北京

清华大学出版社

# 目 录

## CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石力学发展简史	1
1.2 岩石力学研究内容和研究方法	5
1.2.1 岩石力学基本研究内容	5
1.2.2 岩石力学主要研究方法	7
1.3 岩石力学发展前景	8
课后习题	9
第 2 章 岩石的物理力学性质	10
2.1 岩石的基本构成和地质分类	10
2.1.1 岩石与岩体	10
2.1.2 岩石的基本构成	11
2.1.3 岩石的地质分类	14
2.2 岩石的物理性质	19
2.2.1 岩石的质量指标	19
2.2.2 岩石的孔隙性	21
2.2.3 岩石的水理特性	23
2.2.4 岩石的抗风化指标	26
2.2.5 岩石的膨胀性	28
2.2.6 岩石的热学特性	29
2.3 岩石强度特性	29
2.3.1 单轴抗压强度	29
2.3.2 点荷载强度	30
2.3.3 三轴抗压强度	31
2.3.4 抗拉强度	31
2.3.5 抗剪强度	34
2.4 岩石变形特性	38
2.4.1 岩石的变形指标及其计算	39
2.4.2 岩石单轴压缩条件下的变形特征	41

2.4.3	循环荷载作用下的变形特征 .....	45
2.4.4	三轴压缩条件下的变形特征 .....	47
2.4.5	岩石的扩容 .....	50
2.5	岩石的流变 .....	51
2.6	影响岩石力学性质的因素 .....	52
2.6.1	矿物成分的影响 .....	52
2.6.2	岩石结构构造的影响 .....	52
2.6.3	水的影响 .....	53
2.6.4	温度的影响 .....	53
2.6.5	风化程度的影响 .....	54
2.6.6	围压与加载速率的影响 .....	54
	课后习题 .....	55
<b>第3章</b>	<b>岩石强度理论与本构关系 .....</b>	<b>56</b>
3.1	岩石强度理论 .....	56
3.1.1	岩石强度理论概念及发展 .....	56
3.1.2	最大正应力理论 .....	57
3.1.3	最大正应变理论 .....	57
3.1.4	最大剪应力理论 .....	57
3.1.5	莫尔-库仑强度理论 .....	58
3.1.6	德鲁克-普拉格强度理论 .....	63
3.1.7	格里菲斯强度理论 .....	63
3.1.8	霍克-布朗强度理论 .....	67
3.2	岩石本构关系 .....	68
3.2.1	平衡方程和几何方程 .....	68
3.2.2	岩石弹性本构关系 .....	71
3.2.3	岩石塑性本构关系 .....	76
3.2.4	岩石流变本构关系 .....	92
	课后习题 .....	102
<b>第4章</b>	<b>岩体的力学性质 .....</b>	<b>103</b>
4.1	结构面 .....	103
4.1.1	结构面类型 .....	103
4.1.2	结构面特征及对岩体性质的影响 .....	106
4.1.3	结构面的力学性质 .....	113
4.2	岩体变形特征 .....	118
4.2.1	岩体变形曲线及其特征 .....	118
4.2.2	岩体各向异性变形特征 .....	120
4.2.3	岩体变形参数估算 .....	121

4.2.4 影响岩体变形性质的因素·····	123
4.3 岩体强度特征·····	124
4.3.1 岩体破坏及其方式·····	124
4.3.2 岩体破坏判据——岩体强度理论·····	126
4.3.3 岩体强度估算·····	128
4.4 岩体分级·····	131
4.4.1 普氏分类法·····	131
4.4.2 岩石质量指标(RQD)分级·····	131
4.4.3 岩体结构类型分级·····	132
4.4.4 岩体地质力学分级·····	132
4.4.5 巴顿岩体质量分级(Q)·····	135
4.4.6 岩体基本质量指标分级·····	136
课后习题·····	140
<b>第5章 地应力测量原理与技术·····</b>	<b>141</b>
5.1 地应力构成及分布规律·····	141
5.1.1 地应力基本概念·····	141
5.1.2 地应力分布规律·····	144
5.2 地应力测量原理·····	147
5.2.1 地应力测量的必要性·····	147
5.2.2 地应力测量的基本原则·····	149
5.3 直接测量方法·····	150
5.3.1 扁千斤顶法·····	150
5.3.2 刚性包体应力计法·····	151
5.3.3 水压致裂法·····	152
5.3.4 声发射法·····	154
5.4 间接测量方法·····	156
5.4.1 全应力解除法(套孔应力解除法)·····	156
5.4.2 地球物理探测法·····	161
5.5 云南建云高速五老峰隧道地应力场测量实例·····	162
5.5.1 工程地质条件·····	162
5.5.2 原位地应力试验选点·····	162
5.5.3 应力测量过程·····	163
5.5.4 应变数据处理·····	165
5.5.5 室内温度标定及温度修正·····	165
5.5.6 右线出口—900m处测点应力计算·····	168
课后习题·····	170
<b>第6章 岩石地下工程·····</b>	<b>171</b>
6.1 地下工程围岩应力状态解析·····	171

6.1.1	围岩二次应力状态的弹性分布	172
6.1.2	围岩二次应力状态的弹塑性分布	178
6.1.3	地下工程围岩稳定性判别	182
6.2	地压计算与控制	183
6.2.1	塑性形变压力计算	183
6.2.2	松动压力计算	184
6.2.3	岩石地下工程压力控制	189
6.3	岩石地下工程施工	190
6.3.1	岩石地下工程施工方法	190
6.3.2	岩石地下施工支护与加固技术	192
6.4	岩石地下工程监测	195
6.4.1	围岩位移与变形观测	196
6.4.2	围岩应力及支架压力监测	200
6.4.3	光电技术在岩石地下工程监测中的应用	203
	课后习题	205
<b>第7章</b>	<b>岩石边坡工程</b>	<b>206</b>
7.1	岩石边坡破坏	206
7.1.1	边坡的概念与分类	206
7.1.2	边坡的变形与破坏	206
7.1.3	边坡破坏后果	208
7.2	边坡稳定性影响因素及评价指标	209
7.2.1	边坡稳定性影响因素	209
7.2.2	边坡稳定性评价指标	211
7.3	边坡稳定性分析方法	212
7.3.1	工程地质类比法	212
7.3.2	图解法	213
7.3.3	极限平衡法	214
7.3.4	数值模拟法	216
7.3.5	敏感性分析法	217
7.3.6	荷载抗力系数设计法	217
7.3.7	边坡稳定性分析方法选用原则	218
7.4	岩石边坡防护与监测	218
7.4.1	边坡防护与加固	218
7.4.2	边坡稳定性监测	220
	课后习题	221
<b>第8章</b>	<b>岩石力学常规试验方法</b>	<b>223</b>
8.1	单轴压缩试验	223

8.1.1	基本原理	223
8.1.2	试验操作方法	225
8.1.3	试验实例	226
8.2	三轴压缩试验	228
8.2.1	基本原理	228
8.2.2	操作方法	230
8.2.3	试验实例	231
8.3	直接剪切试验	232
8.3.1	基本原理	232
8.3.2	操作方法	233
8.3.3	试验实例	235
8.4	巴西圆盘劈裂试验	236
8.4.1	基本原理	236
8.4.2	操作方法	237
8.4.3	试验实例	237
8.5	点荷载强度试验	239
8.5.1	基本原理	239
8.5.2	操作方法	241
8.5.3	试验实例	242
	课后习题	243
<b>第9章</b>	<b>岩石力学现代测试技术</b>	<b>244</b>
9.1	CT测试技术	244
9.1.1	基本原理	244
9.1.2	操作方法	246
9.1.3	测试实例	247
9.2	声发射测试技术	248
9.2.1	基本原理	249
9.2.2	操作方法	252
9.2.3	测试实例	254
9.3	霍普金森压杆测试技术	257
9.3.1	基本原理	258
9.3.2	操作方法	261
9.3.3	测试实例	262
9.4	数字图像相关测试技术	264
9.4.1	基本原理	264
9.4.2	操作方法	265
9.4.3	测试实例	266
9.5	扫描电镜测试技术	268

9.5.1	基本原理	268
9.5.2	操作方法	273
9.5.3	测试实例	274
9.6	其他测试技术	275
9.6.1	X射线衍射技术	275
9.6.2	核磁共振测试技术	278
	课后习题	283
<b>第10章</b>	<b>岩石工程数值分析方法</b>	<b>284</b>
10.1	有限差分法	284
10.1.1	有限差分法及FLAC软件简介	284
10.1.2	基本原理	285
10.1.3	模拟过程	290
10.1.4	隧道分析实例	295
10.2	有限元法	303
10.2.1	有限元法及ANSYS软件简介	303
10.2.2	基本原理	304
10.2.3	模拟过程	309
10.2.4	边坡稳定性分析实例	311
10.3	离散单元法	320
10.3.1	离散单元法及PFC软件简介	320
10.3.2	基本原理	321
10.3.3	模拟过程	323
10.3.4	岩样分析实例	325
	课后习题	332
	参考文献	333

## 1.1 岩石力学发展简史

岩石力学(rock mechanics)是研究岩石或岩体在外界因素(荷载、温度和渗流等)作用下的应力、应变、稳定性和破坏等力学特性的学科,又称岩体力学,是力学的一个分支。它是解决岩石工程(即与岩石有关的工程)技术问题的理论基础。

岩石,狭义上是指小尺度的岩块,广义上则指包含结构面的岩体,如图 1.1.1 所示。岩体不是连续介质,不但有微观的裂隙,而且有层理、片理、节理以及断层等不连续面,常表现出各向异性或非均质性。

岩石力学以解决岩石工程稳定性问题和研究岩石的破坏条件为目的,其研究介质不仅非常复杂,而且存在诸多不确定性因素。岩石力学始终以引用和发展固体力学、土力学、工程地质学等学科的基本理论和研究成果来解决岩石工程中的问题。因此,岩石力学学科的学习经常需要应用数学、固体力学、流体力学、地质学、土力学等学科基础知识,并与这些学科相互交叉。1959 年 12 月法国 Malpasset 坝以及 1963 年 10 月意大利 Vajont 坝的溃坝,都造成了巨大的经济损失和人员伤亡。这两个坝的破坏原因并不是坝体结构强度不够,而是坝基和边坡岩体出现了问题,这两个案例使更多人认识到坝基岩体的稳定与结构物的强度同等重要。因此,岩石力学的研究需要更加系统、严谨。



图 1.1.1 包含结构面的岩体

陈宗基院士认为“岩石力学是研究岩石过去的历史,现在的状况,将来的行为的一门应用性很强的学科”。过去的历史是指岩石的地质成因和演化;现在的状况是工程建造前和建造过程中对岩石前后状况改变的认识;将来的行为是预测工程建成以后可能发生的变化,以便研究预防或加固措施。

岩石力学的发展与人类的生产活动紧密相关。早在远古时代,我们的祖先就在洞穴中繁衍生息,并利用石块制作武器和工具,被称作“石器时代”。公元前 2700 年前后,古埃及人利用巨型岩块修建了金字塔;公元前 6 世纪,古巴比伦人采用砖石修建了“空中花园”;公元

前 613—前 591 年,古代中国人民在安徽淝河上修建了历史上第一座拦河坝;公元前 256—前 251 年,李冰父子在四川岷江主持修建了都江堰水利工程;公元前 254 年左右(秦昭襄王时期)开发出钻探技术;公元前 218 年在广西开凿了沟通长江和珠江水系的灵渠,筑有砌石分水堰;公元前 221—前 206 年在我国北部山区修建万里长城。这些工程的建设虽然没有岩石力学学科的理论指导,但也让人们积累了一定的岩石力学基本知识。

岩石力学是伴随着采矿、土木、水利、交通等岩石工程的建设 and 数学、力学、计算机科学等学科的进步而逐步发展形成的一门学科,按其发展进程可划分为四个阶段。

### 1. 初始阶段(19 世纪末—20 世纪初)

这是岩石力学的萌芽时期,产生了初步理论以解决岩体开挖的力学计算问题。例如,1912 年瑞土地质学家海姆(A. Heim)提出了静水压力理论。他认为地下岩石处于一种静水压力状态,作用在地下岩石工程上的垂直压力和水平压力相等,均等于单位面积上覆岩层的重量,即  $\gamma H$ 。英国科学家、土力学奠基人朗肯(W. J. M. Rankine)和苏联学者金尼克(A. H. Динник)也提出了相似的理论,但他们认为只有垂直压力等于  $\gamma H$ ,而水平压力应为  $\gamma H$  乘一个侧压系数,即  $\lambda \gamma H$ 。这些理论的不同之处在于对地层水平侧压力的计算,海姆认为侧压力系数  $\lambda = 1$ ,朗肯根据松散理论认为  $\lambda = \arctan^2(45^\circ - \varphi/2)$ ,而金尼克根据弹性理论的泊松效应认为  $\lambda = \mu/(1-\mu)$ 。其中, $\gamma$ 、 $\varphi$ 、 $\mu$  分别为上覆岩层容重、内摩擦角和泊松比, $H$  为地下岩石工程所在深度。由于当时的地下岩石工程埋藏深度不大,人们曾一度认为这些理论是正确的。但随着开挖深度的增加,越来越多的人认识到上述理论是不准确的。

### 2. 经验理论阶段(20 世纪初—20 世纪 30 年代)

在经验理论阶段,出现了根据生产经验提出的地压理论,并开始用材料力学和结构力学的方法分析地下工程的支护问题。最有代表性的理论是苏联采矿专家普罗托吉雅柯诺夫(M. M. Прото́дьяконов)提出的自然平衡拱学说,即普氏理论。该理论认为围岩开挖后,其顶部自然塌落形成抛物线形状的冒落拱,作用在支架上的压力等于冒落拱内岩石的重量,仅是上覆岩石重量的一部分。于是,确定支护结构上的荷载大小和分布方式成了地下岩石工程支护设计的前提条件。同时,普罗托吉雅柯诺夫提出了以岩石坚固性系数  $f$ (普氏系数)作为定量指标的岩体分类方法,至今仍被广泛使用。美籍奥地利土力学专家太沙基(K. Terzaghi)也提出相似的理论,只是他认为冒落拱的形状是矩形,不是抛物线形。普氏理论是在当时的支护形式和施工水平上发展起来的。由于当时的掘进和支护所需时间较长,支护不能及时发挥作用,往往致使部分围岩破坏、塌落。但事实上,围岩的塌落并不是形成围岩压力的唯一来源,也不是所有的地下空间都存在塌落拱,围岩和支护之间并不完全是荷载和结构的关系,多数情况下围岩和支护会形成共同承载系统,平衡原岩应力,维持岩石工程的稳定性。因此,靠假定的松散地层压力来进行支护设计是不合实际的。

### 3. 经典理论阶段(20 世纪 30 年代—20 世纪 60 年代)

这是岩石力学学科形成的重要阶段,弹性力学和塑性力学被引入岩石力学,确立了一些经典计算公式,形成围岩和支护共同作用的理论。结构面对岩体力学性质的影响受到重视,岩石力学文献和专著的出版,试验方法的完善,岩体工程技术问题的解决,这些都说明岩石力学发展到该阶段已经成为一门独立的学科。

在经典理论发展阶段,形成了“连续介质理论”和“地质力学理论”两大学派。

### 1) 连续介质理论

连续介质理论以固体力学作为基础,从材料的基本力学性质出发,探究岩体工程的稳定性问题。这是认识方法上的重要进展,抓住了岩体工程计算的本质性问题。早在20世纪30年代,萨文(Р. Н. Савин)就采用无限大平板孔附近应力集中的弹性解析解来计算分析岩体工程围岩应力分布问题。20世纪50年代,鲁滨涅特(К. В. Руллененит)运用连续介质理论出版了求解岩石力学领域问题的系统著作。同期,有学者开始运用弹塑性理论研究围岩的稳定问题,建立了著名的芬纳(R. Fenner)-塔罗勃(J. Talobre)公式和卡斯特纳(H. Kastner)公式;塞拉塔(S. Serata)采用流变模型进行了隧道围岩的黏弹性分析。但是,上述连续介质理论的计算方法只适用于圆形巷道等个别情况,不适用于一般形状的巷道,因为没有现成的弹性或弹塑性理论解析解可供应用。

早期连续介质理论忽视了原岩应力和开挖因素对岩体稳定性的影响。1966年,美国科学院岩石力学委员会对岩石力学给予以下定义:“岩石力学是研究岩石力学性状的一门理论和应用科学,它是力学的一个分支,是探讨岩石对其周围物理环境中力场的反应。”这一定义是从“材料”的概念出发的,带有材料力学或固体力学的烙印。随着岩石力学理论研究和工程实践的不断深入和发展,人们对“岩石”的认识有了突破。首先,不能把“岩石”看作固体力学中的一种材料,所有岩体工程中的“岩石”是一种天然地质体,或者称为岩体,它具有复杂的地质结构和赋存条件,是一种典型的“不连续介质”。其次,岩体中存在的地应力,是由于地质构造和重力作用等形成的内应力。由于岩体工程的开挖引起地应力以变形能的形式释放,正是这种“释放荷载”引起了岩体工程的变形和破坏。而传统连续介质理论采用固体力学或结构力学的外边界加载方式,往往得出与实际不符的结果。多数岩体工程是分多次开挖完成的,由于岩石材料的非线性,其受力后的应力状态与加载途径具有很大的相关性,不同的开挖顺序、步骤,会引起不同的最终力学效应,岩体工程稳定性状态也有差异。因此,忽视施工过程的计算结果,将很难用于指导工程实践。

20世纪60年代,运用早期的有限差分和有限元等数值分析方法,得出了考虑实际开挖空间、岩体结构面以及围岩和支护共同作用的弹性或弹塑性计算解,使运用围岩和支护共同作用原理进行实际岩石工程计算分析和设计变得普遍起来。同时人们还认识到,运用共同作用理论解决实际问题,必须以原岩应力(即地应力)作为前提条件进行理论分析,才能将围岩和支护的共同变形同支护作用力、支护设置时间、支护刚度等关系正确地联系起来。否则,使用假设的外荷载条件计算,就失去了岩体工程的真实性和计算的实际应用价值。这一认识促进了早期地应力测量工作的开展。

此外,传统连续介质理论过于注重对岩石“材料”的研究,追求准确的“本构关系”。由于岩体组成和结构的复杂性和多变性,要想把岩体的材料性质和本构关系完全厘清非常困难。事实上,在岩体工程的计算中存在大量不确定性因素,如岩石的结构、性质、节理、裂隙分布、工程地质条件等,所以传统连续介质理论作为一种固定研究方法不适合于解决岩体工程问题。

### 2) 地质力学理论

地质力学理论注重研究地层结构和力学性质与岩体工程稳定性的关系,它是20世纪20年代由德国地质学家克罗斯(H. Cloos)创立的。该理论反对把岩体视为连续介质,简单地利用固体力学原理分析岩石力学特性;强调要重视对岩体节理、裂隙的研究,重视岩体结

构面对岩体工程稳定性的影响和控制作用。1951年6月,在奥地利成立了以斯梯尼(J. Sith)和米勒(L. Müller)为首的“地质力学研究组”,在萨尔茨堡(Salzburg)举行了第一届地质力学讨论会,形成了重视节理、裂隙为主的“奥地利学派”。

“奥地利学派”的代表人物是米勒(L. Müller),其主要观点为:①对于大多数工程问题,岩体工程性质更多取决于岩体内部地质断裂系统的强度,而非岩石本身强度,所以岩石力学是一种不连续体力学,即裂隙介质力学;②岩体强度是一种残余强度,受岩体中所含弱面强度的制约;③岩体变形和各向异性主要由弱面产生。上述三个观点为岩石力学的发展起到了引导和促进作用,尤其在矿业、水电、交通等工程领域的岩石力学研究中受到格外重视。该理论同时重视岩体工程施工过程中应力、位移和稳定性状态的监测,这是现代信息岩石力学的雏形。

“奥地利学派”重视支护与围岩共同作用,特别重视利用围岩自身的强度维持岩体工程的稳定性。在地下工程施工方法方面,“奥地利学派”成员拉布西维兹(L. V. Rabcewicz)在1934—1953年提出采用喷浆、锚固等技术发挥围岩强度,1957年开始着手研究基于地质力学理论的施工方法,该施工方法于1963年被正式命名为“New Austrian Tunnelling Method (NATM, 新奥法)”。该方法较为符合现代岩石力学工程实际,至今仍被国内外广泛应用。

地质力学理论的缺陷是过于强调节理、裂隙的作用,且过于依赖经验,忽视理论的指导作用。该理论完全反对将岩体视为连续介质,也是不合理的,这种认识阻碍了现代数学力学理论在岩石工程中的应用。虽然岩体中存在各种的节理、裂隙,但从大范围、大尺度看可近似将其视为连续介质。对节理、裂隙的作用,对连续性和不连续性的划分,均需根据工程实际和处理方法而定,没有绝对统一的模式和标准。

#### 4. 近现代发展阶段(20世纪60年代至今)

随着计算机科学的进步,20世纪60年代和70年代开始出现用于岩体工程稳定性计算的数值计算方法,主要是有限元法。20世纪80年代,数值计算方法发展迅速,有限元、边界元及其混合模型得到广泛应用。20世纪90年代以来,岩石力学专家和数学家合作提出一系列新的计算原理和方法,如损伤力学、离散元法、DDA法、流形元法、三维有限差分法等,这些计算原理和方法均在岩石力学研究中发挥了重要作用。

由于岩体结构及赋存状态和条件的复杂性和多变性,岩石力学的研究对象和目标存在着大量不确定性,因此有人在20世纪80年代提出不确定性理论。随着现代计算机科学技术的进步以及现代信息技术的发展,目前,不确定性理论已经被越来越多的人所认识和接受。现代科学技术手段,如模糊数学、人工智能、灰色理论、神经网络、专家系统、工程决策支持系统等,为不确定性分析方法和理论体系的建立提供了必要的技术支持。

系统科学虽然早已受到岩石力学界的关注,但直到20世纪80—90年代才形成一致性概念,并在岩石力学理论和工程应用中引入。用系统概念来表征“岩体”,可使岩体的复杂性得到全面、科学的表述。从系统论来讲,岩体的组成、结构、性能、赋存状态及边界条件构成其力学行为和工程功能的基础,岩石力学研究的目的是认识和控制岩石系统的力学行为和工程功能。系统论强调复杂事物的层次性、多因素性、相互关联性和相互作用性等特征,并认为人类认识是多源知识的综合集成,这为岩石力学理论和岩体工程实践的结合提供了依据。时至今日,岩体工程力学问题开始被当作一种系统工程来解决。

各类岩石力学试验机、测试技术的发明也极大地推动了岩石力学的发展。刚性压力机

的出现使得岩石应力-应变全过程曲线成为可能,而应力解除法可测得深部岩体应力。热-水-力三场耦合真三轴伺服岩石试验机、大型模拟试验台、先进的多点数据采集仪器的出现,为更深刻地揭示岩石的力学特性奠定了坚实基础。随着计算机技术和井下钻孔电视的应用,岩体工程三维信息系统也得到了重视和普遍应用。注浆加固不稳定围岩,回采工作面使用自移式液压支架,以及大断面、大缩量和高支撑力的可缩性金属支架、锚杆和锚索网等多种支护技术的应用,进一步丰富了支护手段。切槽放顶法、硐室与深孔爆破法、急倾斜采空区处理与卸压开采法等发明,有效控制了采空区大面积冒落和采场地压显现。声发射、红外、电磁等预测技术也进入地压监测的实用阶段。

总之,涉及自然和工程行为的岩石力学是一门需要特殊研究方法的复杂学科,不能仅用传统思维或简单的力学方法来研究。随着资源开采深度不断增加、地下空间规模越来越大、越江过海隧道更多更长、大型岩石工程越来越多,这些工程建设,一方面要求更高效地破坏岩石,从而加快工程进度、提高资源与能源回收效率;另一方面又需要更科学地保持岩层稳定性,以确保岩石工程的正常运营。所以说,岩石工程问题是一个综合性的复杂问题,如何建立科学、系统的岩石力学理论体系,仍需进一步深入研究与探索。

## 1.2 岩石力学研究内容和研究方法

岩石力学的研究内容十分广泛,且具有相当大的难度。在传统理论体系基础上,不断从生产实践中总结岩石工程经验,提高理论水平,再回到实践中解决相关岩体工程问题,是岩石力学研究的最基本原则和方法。

岩石力学研究内容包括基本研究和专门研究,基本研究是指一般岩石工程都必须开展的研究;专门研究是指针对特殊岩石或特殊需求,基于先行基本研究而有针对性开展的专题岩石力学研究。岩石力学的研究内容既有理论的,也有实践的,前者主要包括天然岩石和工程岩体的各种特征、性质和规律,后者包括岩石工程各种施工技术、设计方法和测量手段。

### 1.2.1 岩石力学基本研究内容

岩体赋存环境复杂,特别是深部“三高”(高应力、高地温、高渗透压)环境,在工程扰动下,形成了迥异的应力路径,岩体的力学行为呈现非线性、各向异性、尺寸效应、时间效应等极其复杂的特征。因此,必须从固有属性、赋存环境和工程特点三个方面,综合研究岩石的力学性质及变形破坏规律。总体上,岩石力学的研究内容可归纳为以下几方面:

#### 1. 岩石(块)的物理力学性质与力学模型

岩石(块)的物理力学性质与力学模型是评价岩体工程稳定性的基础,研究内容主要包括:①岩石的成分与物理性质;②岩石在各种应力路径作用下的变形和强度特征;③岩石的变形破坏机理、本构关系与强度准则;④岩石的动力学特征及力学模型;⑤岩石的断裂、损伤机制与力学模型。

#### 2. 结构面特征及其力学性质

结构面特征及力学性质是岩体工程稳定性的重要影响因素,研究内容主要包括:①结构面的分类、空间分布规律及其地质概率模型;②结构面在荷载作用下的变形与强度特征;

③结构面的动力学特征及力学模型。

### 3. 岩体的力学性质与模型

岩体的力学性质与模型是岩石工程分析的直接依据,研究内容主要包括:①岩体的构造、地质特征和分类;②影响岩体力学性质的主要因素,岩体分级与力学参数;③岩体变形和强度特征及其原位测试技术与方法;④岩体力学性质的非线性、时间效应等;⑤岩体的强度准则与本构关系;⑥岩体的动力学特征及力学模型;⑦水、气、温度、化学等因素的耦合作用对岩体力学行为的影响;⑧岩体的断裂、损伤机制与模型;⑨岩体中地下水的赋存、运移规律及岩体的水力学特征。

### 4. 岩石力学的工程应用研究

岩石力学学科发展的根本目的是服务实践,大型工程建设均需依靠岩石力学理论作为技术支撑,涉及水电水利、矿业、交通、土木建筑、石油、海洋、核电站、核废料地质处置、地热资源开发和地震预报等行业的应用,主要研究内容集中在以下几个方面:

(1) 工程岩体稳定性分析与致灾机制。包括:原岩应力(地应力)分布规律及其测量理论与方法;各类工程岩体在原岩应力及开挖扰动下的应力、变形规律和破坏特征;岩体工程的稳定性分析与评价方法等。

(2) 岩石工程稳定性维护技术,主要指各种岩体加固技术。由于行业特征、工程规模的差异,不同岩石工程的重要程度及安全要求差别较大,据此采用的工程加固手段及其强度也不尽相同。如大坝的坝基和坝肩不均匀变形和抗滑稳定有严格要求;电站岩质边坡在确保不产生失稳的前提下允许发生一定的变形,而矿山岩质边坡则允许一定程度的失稳破坏;电站地下厂房对围岩变形控制严格,而采矿工程允许井巷发生一定的变形和破坏;非地震区的一般工程主要研究岩石的静态特性,而高烈度地震区、国防工程往往更关注岩石的动力响应。

(3) 岩石工程稳定性监测。根据不同的岩石工程类别和特点,一般主要监测岩体应力、变形和地下水等,而震动、工程环境等为可选监测项目。通过监测数据及其与时间的变化关系,进行反演分析是岩体工程稳定性评价的一项重要内容。

### 5. 试验(实验)技术

在岩石力学室内试验与工程应用中,各项分析数据都离不开试验技术与装备,具体研究内容主要包括:室内岩石和原位岩体的力学试验原理、内容和方法;不同应力路径作用下的物理模拟试验;岩石和岩体物理力学指标的统计和分析方法;试验技术的改进等。

### 6. 新技术、新方法和新理论在岩石力学工程中的应用

开展岩石工程勘测、试验、监测新技术与新方法,以及计算、模拟、评价新理论等方面的研究,应用于岩石工程超前预报、岩体质量分级、动态反馈分析、设计优化、稳定性评价、长期工程安全与风险分析、变形稳定技术标准等方面,是岩石工程应用研究的重点。

在岩石力学工程应用方面,必须始终贯穿以下三个原则:

(1) 研究工作均须在地质分析尤其是在岩体结构分析的基础上进行。

(2) 开展岩石性状的原位试验,并利用试验结果验证或修改理论分析结果和设计方案。

(3) 必要时综合地球物理学、构造地质学、试验技术、计算技术、施工技术 etc 学科进行研究,并与勘测、设计及施工人员密切合作。

## 1.2.2 岩石力学主要研究方法

由于岩石力学是一门交叉科学,研究对象复杂,内容广泛,这就决定了岩石力学研究方法的多样性。根据采用的研究手段或依据的基础理论所属学科领域不同,岩石力学研究方法可概括如下:

### 1. 工程地质研究方法

工程地质研究方法重点研究与岩石、岩体力学性质有关的地质特征。如用岩矿鉴定方法,了解岩体的岩石类型、矿物组成及结构构造特征;用地层学方法、构造地质学方法及工程勘察方法等,了解地应力演化规律、岩体成因及空间分布、岩体中各种结构面的发育情况等;用水文地质学方法了解赋存于岩体中地下水的形成与运移规律,等等。

### 2. 科学试验方法

科学试验是岩石力学发展的基础,它包括实验室岩石力学参数的测定、模型试验、现场岩体的原位试验及监测技术、地应力的测定和岩体构造的测定等。试验结果可为岩体变形和稳定性分析计算提供必要的物理力学参数。同时,还可以用某些试验结果(如模拟试验及原位应力、位移、声发射监测结果等)直接评价岩体的变形和稳定性,以及探讨某些岩石力学理论问题。随着岩石力学的不断发展,其涉及的试验范围也越来越宽,如地质构造的勘测、大地层的力学测定等,可为岩石力学提供必要的研究资料。另外,室内岩石的微观测定也是岩石力学研究的重要手段。现代发展起来的新技术都已广泛应用于岩石力学领域,如遥感技术、激光散斑、三维地震勘测成像、CT成像技术、微震技术,等等。

### 3. 数学力学分析方法

数学力学分析是岩石力学研究中的一个重要环节。它是通过建立工程岩体的力学模型,并利用适当的分析方法,预测工程岩体在各种力场作用下的变形与稳定特性,为岩体工程设计和施工提供定量依据。其中,建立符合实际的力学模型和选择适当的分析方法是数学和力学分析中的关键。目前常用的力学模型有:刚体力学模型、弹性及弹塑性力学模型、流变模型、断裂力学模型、损伤力学模型、渗透网络模型、拓扑模型等。常用的分析方法有:①数值分析方法,包括有限差分法、有限元法、边界元法、离散元法、无界元法、流形元法、不连续变形分析法、块体力学和反演分析法等;②模糊聚类和概率分析,包括随机分析、可靠度分析、灵敏度分析、趋势分析、时间序列分析和灰色系统理论等;③模拟分析,包括光弹应力分析、相似材料模型试验、离心模型试验等,在边坡研究中,还普遍采用极限平衡的分析方法。

### 4. 整体综合分析方法

整体综合分析方法是以整个复杂岩石工程为对象,以系统工程的理念和思路,采用多种手段、多种方法进行综合性分析与研究。这是岩石力学与岩体工程研究中极其重要的一套工作方法。由于岩石力学与工程研究中每一环节都是多因素的,且信息量大,因此必须采用多种方法并考虑多种因素(包括工程方面、地质方面及施工方面等)进行综合分析和评价,注重理论和经验相结合,才能得出符合实际情况的正确结论。只有采用不确定性的研究方法,才能彻底摆脱传统固体力学、结构力学的确定性分析方法的影响,使研究和分析结果更符合

实际,更可靠和实用。现代非线性科学理论、信息科学理论、系统科学理论、模糊数学、人工智能、灰色理论和计算机科学技术的发展,为不确定性分析方法奠定了必要的技术基础。

### 1.3 岩石力学发展前景

纵观近年来的工程实践需求,岩石力学学科及岩石工程的发展趋势如下:

#### 1. 岩石力学理论研究

(1) 多场耦合作用下裂隙岩体的应力-应变关系是一个重要的研究方向。多场耦合研究在解决高寒区岩体工程稳定性评价和安全施工、深部岩体工程支护技术、核废料地下储存技术、石油和天然气地下储存技术等方面具有重要价值。

(2) 动、静状态下微观、细观和宏观等不同尺度三相(多相)介质变形破坏规律研究值得重视,这些研究对岩体工程稳定性评价、合理支护技术的确定以及岩体工程破坏准则的建立具有重要价值。

(3) 从地质演化角度开展岩体工程灾害的中长期预报研究非常重要,这些研究有助于解决岩体工程长期稳定性问题。

(4) 岩石作为天然的地质体,非线性是其基本的性质,开展岩石力学非线性研究对于解决复杂的岩体力学稳定性分析问题具有重要意义。

#### 2. 岩石力学方法研究

(1) 综合集成方法论。以岩石力学、工程地质学和系统科学的结合为中心的岩石工程信息综合集成方法论和相应配套技术研究正不断发展。

(2) 新的数值方法。随着电子计算机科学的迅猛发展,作为岩石力学重要分析手段的数值方法必将大放异彩,功能强、适用性广的数值方法将不断出现。

(3) 岩体统计力学。岩体统计方法仍将受到关注,由于岩体力学性质中的非均匀性和各向异性,统计方法在解决复杂岩体工程稳定性评价方面的研究将得到重视。

(4) 岩体结构精细描述和力学精细分析方法。目前,数值模拟技术在解决岩体力学问题时遇到的主要困难是计算模型与实际有偏差,因此如何精细化描述岩体真实结构亟须研究。

#### 3. 岩石力学应用研究

(1) 新的物理力学试验技术。大型室内和现场物理力学试验是研究岩体力学问题的重要手段,基于各种原理的物理、力学试验新技术将得到充分发展,这些技术具有高精度、高可靠性、自动分析处理和远距离传输试验结果的功能。

(2) 岩体工程监测技术。电子技术的发展还将促使监测朝着范围广、精度高、信息传输远、方便经济的方向发展,如岩体边坡变形远程自动化监测系统、矿山开挖引起的地表变形自动化监测系统等工作急需开展。

(3) 岩体工程地质勘察新技术。随着电子技术的发展,岩石力学所依赖的工程地质勘察技术将有长足进步,各种宏观、细观和微观尺度的多功能勘测技术将被逐步提出,为岩石力学与岩体工程研究服务。如一种高性能遥感式仪器,不仅能测到地表或地表附近的地质结构并判断岩土介质的力学性能,而且还可感应到地表以下相当深度的地下地质结构并提

供相应的岩体力学参数。

(4) 岩体工程加固技术。在加固技术方面,需要研制高强不锈钢预应力锚索,目的是彻底解决目前预应力锚索存在的易发生应力腐蚀等问题。需要研究新的注浆技术,解决弱渗地层难注浆的问题。

(5) 信息系统。岩体工程的信息系统必然包含岩石力学与岩体工程的内容,而岩石力学的发展也极大地促进岩石力学研究信息化和数字化的发展,当前基于互联网的岩体工程安全施工预测预报系统研究十分有必要。

## 课后习题

1. 简述岩石力学的发展简史。
2. 岩石力学各个发展阶段有什么特点?
3. 岩石力学的基本内容是什么? 有哪些研究方法?
4. 什么是岩石力学? 岩石力学的发展方向是什么?

## 岩石的物理力学性质

岩石的物理力学性质是岩体最基本、最重要的性质之一,也是岩石力学学科中研究最早、最完善的内容之一。岩石的物理力学性质是岩石力学研究的基础,它不仅是岩石力学分析的重要依据,其提供的基本参数也是岩石力学工程设计和施工的基础。

岩石的物理力学性质包括物理性质和力学性质。岩石由固体、液体和气体三相介质组成,其物理性质是指因岩石三相组成的相对比例不同所表现出来的物理属性,与工程问题密切相关的主要包括岩石的密度、容重、孔隙率、水理性质、比热容等。岩石的力学性质主要指在载荷作用下的岩石变形特征,包括强度特性参数和变形特性参数。岩石的强度参数包括岩石抗拉、抗压、抗剪以及抗弯等强度,岩石的变形特性参数包括变形模量、弹性模量、切变模量、泊松比等。岩石的物理力学参数通常采用室内试验或现场测试方法确定。

### 2.1 岩石的基本构成和地质分类

#### 2.1.1 岩石与岩体

岩石是自然界中各种矿物的集合体,是天然地质作用的产物,大部分新鲜岩石质地较坚硬致密,孔隙小而少,抗水性强,透水性弱,力学强度高。岩石是构成岩体的基本组成单元。相对于岩体而言,岩石可看成连续的、均质的、各向同性的介质。但实际上岩石中也存在一些如矿物解理、微裂隙、粒间空隙、晶格缺陷、晶格边界等内部缺陷,统称微结构面。因此,自然界中的岩石也是一种受到不同程度损伤的材料。

岩体是由岩石组成,赋存在一定地质环境(应力场、渗流场和地温场)中经受过变形,遭受过破坏,含有诸如节理、裂隙、层理和断层等地质结构面的复杂地质体。岩体要有足够大的体积,且其物理力学性质受不确定的节理、裂隙、断层或层理等结构面(或称弱面、裂隙系统)影响。岩体是在漫长的地质演化过程中形成的,其形成过程中经受了构造变动、风化作用和卸荷作用等各种内外力地质作用的破坏和改造。因此,岩体是具有非均质、非连续、各向异性及不确定性等特征的裂隙体。

岩体的多裂隙性特点决定了岩体与岩石(单一岩块)的工程地质性质有明显的不同。两者最根本的区别就是岩体中的岩石被各种结构面所切割。这些结构面的强度与岩石相比要低很多,并且破坏了岩体的连续完整性。岩体的工程性质首先取决于这些结构面的性质,其次才是组成岩体的岩石性质。此外,在大自然中,多数岩石的强度都很高,能够满足一般工

程建(构)筑物的要求。而岩体的强度,特别是沿软弱结构面方向的强度却往往很低,不能满足建(构)筑物的安全要求。但是,对岩石特征的研究是认识岩体特征的基础。

## 2.1.2 岩石的基本构成

岩石的基本构成是由组成岩石的矿物成分、结构和构造决定的。

### 1. 岩石的主要矿物成分

岩石中主要的造岩矿物有:正长石、斜长石、石英、黑云母、白云母、角闪石、辉石、橄榄石、方解石、白云石、高岭石、赤铁矿等,不同成因的岩石其含量各异。

岩石中的矿物成分会影响岩石的抗风化能力、物理性质和强度特性。岩石中矿物成分的相对稳定性对岩石抗风化能力有显著影响,各矿物的相对稳定性主要与其化学成分、结晶特征及形成条件有关。从化学元素活泼性来看, $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 最易迁移,其次是 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{SiO}_2$ 较为稳定, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 最稳定,而低价铁则易氧化。

基性和超基性岩石主要由易于风化的橄榄石、辉石及基性斜长石组成,所以容易风化。酸性岩石主要由较难风化的石英、钾长石、酸性斜长石及少量暗色矿物(多为黑云母)组成,故其抗风化能力比起同样结构的基性岩要高,中性岩则居两者之间,变质岩的风化性状与岩浆岩类似。沉积岩主要由风化产物组成,大多数为原来岩石中较难风化的碎屑物或在风化和沉积过程中新生成的化学沉积物,因而它们在风化作用中的稳定性一般都较高。矿物成分不是决定岩石风化性状的唯一因素,岩石的性状还取决于岩石的结构和构造特征。

通常可以将造岩矿物分为非常稳定、稳定、较稳定和不稳定四类,并按其稳定性顺序列于表 2.1.1 中。

表 2.1.1 主要造岩矿物抗风化相对稳定性

抗风化稳定性	矿物名称
非常稳定	石英
	锆长石
	白云母
稳定	正长石
	钠长石
较稳定	酸性斜长石
	角闪石
	辉石
	黑云母
不稳定	基性斜长石
	霞石
	橄榄石
	黄铁矿

新鲜岩石的力学性质主要取决于岩石的矿物成分、结构和构造。对于具有结晶联结的岩石,其矿物成分的影响要大一些。应当指出,岩石中矿物的硬度和岩石的强度是两个有联系却不同的概念。例如,即使组成岩石的矿物都是坚硬的,岩石的强度也不一定高,因为矿

物之间的联结可能是弱的。但对于大部分岩石,矿物硬度和岩石强度存在相关性。在许多岩浆岩中,其强度常随暗色矿物(辉石,特别是橄榄石)的增加而增加;在沉积岩中,砂岩的强度常随石英相对含量的增加而增大,石灰岩的强度常随其硅质混合物含量的增加而增大,随黏土质含量的增加而降低;在变质岩中,任何片状的硅酸盐矿物,如云母、绿泥石、滑石、蛇纹石等都会使岩石强度降低,特别是当这些矿物呈平行排列时。

岩石中某些易溶物、黏土矿物、特殊矿物的存在,常使岩石物理力学性质复杂化。一些易溶矿物,如石膏、芒硝、岩盐、钾盐等在水的作用下易被溶蚀,使岩石的孔隙度加大,结构变松,强度降低。一些含芒硝的岩石,当温度降到  $32.5^{\circ}\text{C}$  以下或由干燥变潮湿时,会导致芒硝由液态变固态,由无水变含水,体积增大,引起岩石膨胀。含石膏的岩石,也由于石膏( $\text{CaSO}_4$ )变成水化石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )时体积增大而发生膨胀。

另外,黏土岩石中的蒙脱石遇水膨胀且强度降低,凝灰岩中一些不稳定的物质极易分解成膨润土,遇水也易膨胀和软化,还有某些玻璃质和次生矿物,如沸石等会与磷发生化学反应。

## 2. 常见的岩石结构类型

岩石的结构是指岩石中矿物(及岩屑)相互之间的关系,包括矿物的大小、形状、排列、结构联结特点及岩石中的微结构面(即内部缺陷)。其中,结构的联结特点和岩石中微结构面对岩石工程性质影响最大。

岩石中结构联结的类型主要有两种,分别为结晶联结和胶结联结。

### 1) 结晶联结

岩石中矿物通过结晶相互嵌合在一起,如岩浆岩、大部分变质岩及部分沉积岩的结构联结。这种联结使晶体之间紧密接触,故岩石强度一般较大,但因结构的不同而存在一定差异,如在岩浆岩和变质岩中,等粒结晶结构一般比非等粒结晶结构的强度高,抗风化能力强。在等粒结构中,细粒结晶结构比粗粒的强度高。在斑状结构中,细粒基质比玻璃基质的强度高。总之,晶粒越细,越均匀,玻璃质越少,则强度越高,粗粒斑晶的酸性深成岩强度最低,细粒微晶而无玻璃质的基性喷出岩强度最高。例如,粗粒花岗岩单轴抗压强度一般只有  $120\text{MPa}$ ,而同一成分的细粒花岗岩则可达  $260\text{MPa}$ 。

具有结晶联结的一些变质岩,如石英岩、大理岩等情况与岩浆岩类似。

沉积岩中的化学沉积岩是以可溶性的结晶联结为主,联结强度较大,一般以等粒细晶的岩石强度最高,如成分均一的致密细粒石灰岩抗压强度可达  $260\text{MPa}$ ,但这种联结的缺点是抗水性差,能不同程度地溶于水中,对岩石的可溶性有一定的影响。

固结黏土岩的联结有一部分是再结晶的结晶联结,其强度比其他坚硬岩石要低很多。

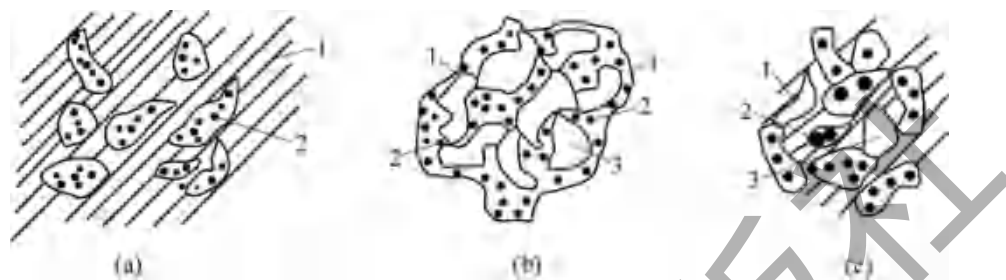
### 2) 胶结联结

胶结联结指矿物与矿物之间通过胶结物联结在一起,例如沉积碎屑岩、部分黏土岩的胶结联结。对于这种联结的岩石,其强度主要取决于胶结物及胶结类型。从胶结物来看,硅质、铁质胶结的岩石强度较高,钙质次之,而泥质胶结强度最低。根据矿物之间及矿物与胶结物之间的关系,胶结类型可分为三种:

(1) 基质胶结类型。矿物彼此不直接接触,完全被胶结物包围,岩石强度基本取决于胶结物的性质,如图 2.1.1(a)所示。

(2) 接触胶结类型。只有矿物接触处才有胶结物胶结,胶结一般很牢固,孔隙率一般较大,故岩石强度低,透水性好,如图 2.1.1(b)所示。

(3) 孔隙胶结类型。胶结物完全或部分充填于矿物间的孔隙中,胶结一般较牢固,岩石强度和透水性主要视胶结物性质和其充填程度而定,如图 2.1.1(c)所示。



1—胶结物质; 2—矿物; 3—未充填孔隙。

图 2.1.1 碎屑岩胶结类型

岩石中的微结构面(或称缺陷),是指存在于矿物颗粒内部或矿物颗粒与矿物集合体之间微小的弱面及空隙,包括矿物的解理、晶格缺陷、晶粒边界、微裂隙、粒间空隙等。

**矿物的解理:**指矿物晶体或晶粒受力后沿一定结晶方向分裂成的光滑平面。它往往平行于晶体中质点排列最紧密的面网,即平行于间距较大的面网。一些主要的造岩矿物,如黑云母、方解石、角闪石等具有极完全或完全解理,正长石、斜长石等具有等解理,它们都是岩石中细微的弱面。

**晶格缺陷:**有由于晶体外原子入侵产生的化学方面的缺陷,也有由于化学比例或原子重新排列而产生的物理方面的缺陷,它与岩石的塑性变形有关。

**晶粒边界:**由于矿物晶体内部各粒子均由各种离子键、原子键、分子键等相联结,矿物晶粒表面电价不平衡使矿物表面具有一定的结合力,但这种结合力一般比矿物内部的键联结力小,因此晶粒边界相对软弱。

**微裂隙:**指发育于矿物颗粒内部及颗粒之间的多呈闭合状态的破裂迹线,这些微裂隙十分细小,肉眼难以观察,一般要在显微镜下观察,故也称显微裂隙。它们的成因,主要与构造应力的作用有关,因此常具有一定方向,有时也由温度变化、风化等作用引起。微裂隙的存在对岩石工程地质性质影响很大。

**粒间空隙:**多在成岩过程中形成,如结晶岩中晶粒之间的小空隙、碎屑岩中由于胶结物未完全充填而留下的空隙。粒间空隙对岩石的透水性和压缩性有较大影响。

由上述可见,岩石中的微结构面一般很小,通常需要在显微镜下才能见到,但它们对岩石工程性质的影响却很大。

一方面,微观结构面的存在将大大降低岩石(特别是脆性岩石)的强度,许多学者已通过试验论证了这一观点。根据格里菲斯强度理论的主要论点:由于岩石中这些缺陷的存在,当其受力时,在微孔隙或微裂隙(缺陷)末端,易造成应力集中,使裂隙可能沿末端继续扩张,

导致岩石在较低的应力作用下破坏。故有人认为缺陷是岩石力学性质的决定性影响因素。另一方面,由于微结构面在岩石中常具有方向性,如节理等,它们的存在常导致岩石的各向异性。

此外,缺陷能增大岩石的变形,在循环加载时引起滞后现象,还能改变岩石的弹性波速、改变岩石的电阻率和热传导率等。但应指出,缺陷对岩石的影响在低围压时是明显的,而在岩石受高围压时,缺陷的影响相对减弱,这是因为在高围压下岩石缺陷被压密闭合。

### 3. 岩石的构造

岩石的构造是指岩石中不同矿物集合体之间或矿物集合体与其他组成部分之间的排列方式及充填方式。一般岩浆岩的颗粒排列无一定的方向,形成块状构造;沉积岩一般呈层理构造、页片状构造;变质岩一般呈板状构造、片理构造、片麻理构造。层理、片理、板理和流面构造等统称为层状构造。宏观上,块状构造的岩石多具有各向同性特征,而层状构造岩石具有各向异性特征。

## 2.1.3 岩石的地质分类

自然界中有各种各样的岩石,根据地质学的岩石成因分类可把岩石分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。岩石学是专门的学科,这里不作详细的探讨,只是简要介绍各类岩石的基本特征。

### 1. 岩浆岩

地壳以下物质成分复杂,但主要是硅酸盐,并含有大量的水汽和各种其他气体。由于放射性元素集中,不断蜕变而释放出大量的热能,使物质处于高温(1000℃以上)、高压(由于上部岩层重力)的过热可塑状态。当地壳变动时,上部岩层压力一旦降低,过热可塑物质就立即转变为高温熔融体,称为岩浆。岩浆的化学成分很复杂,主要有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  等,依其  $\text{SiO}_2$  含量的多少,分为基性岩浆和酸性岩浆。根据酸性,也就是  $\text{SiO}_2$  含量,可以把岩浆岩分成四个大类:超基性岩( $\text{SiO}_2$  含量 $<45\%$ )、基性岩( $\text{SiO}_2$  含量为 $45\%\sim 52\%$ )、中性岩( $\text{SiO}_2$  含量为 $52\%\sim 66\%$ )和酸性岩( $\text{SiO}_2$  含量 $>66\%$ )。基性岩浆的特点是富含钙、镁和铁,而贫钾和钠,黏度较小,流动性较大。酸性岩浆富含钾、钠和硅,而贫镁、铁、钙,黏度大,流动性较小。岩浆内部压力很大,不断向地壳压力低的地方移动,以致冲破地壳深部的岩层,沿着裂缝上升。随着上升高度的增加,温度、压力随之降低。当岩浆的内部压力小于上部岩层压力时,岩浆不再上升,冷凝成岩浆岩。

依冷凝成岩浆岩地质环境的不同,可以将岩浆岩分为三大类,即深成岩、浅成岩和喷出岩(火山岩),每一类中又可根据成分的不同进行细分,见表 2.1.2。它们在结构上有较大的差异,这种差异往往通过岩石的力学性质反映出来。

#### 1) 深成岩

深成岩常形成较大的侵入体,有巨型岩体如岩基、岩盘,它们都在高温、高压状态下形成,在形成过程中由于岩浆有充分的分异作用,常常形成基性岩、超基性岩、中性岩及酸性岩、碱性岩等,彼此往往逐渐过渡,有时也突然变化、互相穿插。在逐渐过渡的大型岩基中,

有时具有环形的岩性岩相带,一般外环偏酸性,内环偏基性,有时在外围还出现基性边缘。根据这种分带性,无论是基性还是中、酸性岩体,岩石种类也比较多,组织结构也有所变化,在侵入岩体的边缘,常有围岩落入火成岩体之中而形成外捕虏体,也有冷却的基性边缘岩石堕入火成岩中形成内捕虏体。它们的分布与火成岩的流动构造(如流线、流层)常一致。围岩在高温高压的作用下,常常形成热力接触变质的混合岩带,接触岩带的规模由侵入体的规模与埋深决定。

表 2.1.2 岩浆岩分类

岩类	产状	岩类细分及其化学成分、矿物成分、特征
深成岩	等粒状,有时为斑状,所有矿物皆能用肉眼鉴别	花岗岩(化学成分含硅、铝为主,酸性,浅色,含石英、云母、角闪石); 正长岩(化学成分含硅、铝为主,酸性,浅色,含黑云母、角闪石、辉石); 闪长岩(化学成分含硅、铝为主,中性,浅色,含角闪石、辉石、黑云母); 辉长岩(化学成分含铁、镁为主,基性,深色,含辉石、角闪石、橄榄石); 橄榄岩、辉岩(化学成分含铁、镁为主,超基性,深色,含橄榄石、辉石)
浅成岩	斑状(斑晶较浅成大且可分辨出矿物名称)	花岗斑岩(化学成分含硅、铝为主,酸性,浅色,含石英、云母、角闪石); 正长斑岩(化学成分含硅、铝为主,酸性,浅色,含黑云母、角闪石、辉石); 玢岩(化学成分含硅、铝为主,中性,浅色,含角闪石、辉石、黑云母); 辉绿岩(化学成分含铁、镁为主,基性,深色,含辉石、角闪石、橄榄石)
喷出岩	玻璃状,有时为细粒斑状矿物,难用肉眼鉴别	流纹岩(化学成分含硅、铝为主,酸性,浅色,含石英、云母、角闪石); 粗面岩(化学成分含硅、铝为主,酸性,浅色,含黑云母、角闪石、辉石); 安山岩(化学成分含硅、铝为主,中性,浅色,含角闪石、辉石、黑云母); 玄武岩(化学成分含铁、镁为主,基性,深色,含辉石、角闪石、橄榄石)

深成岩岩性较均一,变化较小,岩体结构呈典型的块状结构,结构体多为六面体和八面体,但在岩体的边缘部分也常有流线、流面和各种原生节理,结构相对比较复杂。

深成岩颗粒均匀,多为粗-中粒结构,致密坚硬,孔隙很少,力学强度高,透水性较弱,抗水性较强,所以深成岩体的工程地质性质一般比较好。花岗岩、闪长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等均属常见的深成岩体,常被选作大型建筑场地,如举世瞩目的长江三峡大坝的坝基就是坐落在花岗闪长岩体之上。但深成岩体也有不足之处,首先,深成岩体较易风化,风化壳的厚度一般比较厚;其次,当深成岩受同期或后期构造运动影响,断裂破碎剧烈,构造面发育时,其性质会十分复杂,岩体完整性和均一性被破坏,强度降低。此外,深成岩体常被同期或后期小侵入体、岩脉穿插,有时对岩体或先期断裂起胶结作用,有时起进一步的分割作用,必须分别对待,但总体上使岩体更加复杂化,破坏了它的均一性,岩体质量降低。深成岩与周围岩体接触,常形成很厚的接触变质带,这些变质带往往成分复杂,有时易风化,形成软弱岩带或软弱结构面,应予以注意。

## 2) 浅成岩

浅成岩的成分一般与相应的深成岩相似,但其产状和结构都不相同,多为岩床、岩墙、岩脉等小侵入体,岩体均一性差,岩体常呈镶嵌式结构,而岩石多呈斑状结构和均粒-中细粒结构,细粒岩石强度比深成岩高,抗风化能力强,斑状结构岩石的强度和抗风化能力比细粒岩石弱。与其他一些类型的岩体相比,浅成岩岩性较好,在岩石工程中应尽量

加以利用。

花岗斑岩、闪长玢岩和伟晶岩等中酸性浅成岩性质与花岗岩类似,细晶岩强度较高,但由于产出范围较小,岩性变化比较大,岩体均一性较差。

辉绿岩为常见的基性浅成岩体,岩性致密坚硬,强度较高,抗风化能力较强,但岩体均一性较差;煌斑岩常以岩脉产出,含暗色矿物多,是最容易风化且风化程度较深的一种岩体。

### 3) 喷出岩

喷出岩的喷出类型有喷发及溢流,喷发式火山岩有陆地喷发和海底喷发,喷出方式有裂隙性喷发和火山口式喷发,往往间歇性喷发和溢流轮回交替出现。每次喷发的压力和温度不同,所含物质成分不等。无论是喷发式或溢流式,均会导致岩石组织结构及成分有很大差异,岩性岩相变化十分复杂。总之,喷出岩是由火山喷出的熔岩流冷凝而成,由于火山喷发的多期性,火山熔岩和火山碎屑往往交替出现,使喷出岩具有类似层状的构造。

对于喷出岩,由于岩浆喷出后才凝固,所以岩石中含有较多的玻璃及气孔构造、杏仁构造,岩石颗粒很细,多呈致密结构,酸性熔岩在流动过程中形成流纹构造。此外,由于喷出岩是在急骤冷却条件下凝固形成的,其原生节理比较发育。例如,玄武岩的柱状节理、流纹岩的板状节理等。

上述特征都使喷出岩的结构复杂,岩性不均一,各向异性显著,岩体的连续性较差,透水性较强,软弱夹层的弱结构面比较发育,成为控制岩体稳定性的主要因素。

要注意喷出岩中的松散岩层及松软岩层,如凝灰质碎屑岩及黏土岩等,有些岩层常含有大量的蒙脱石、拜来石及伊利石等黏土矿物,这些矿物往往具有不同程度的膨胀性。喷出岩以玄武岩为最常见,其次是安山岩和流纹岩。

## 2. 沉积岩

沉积岩又称水成岩,是由风化剥蚀作用或火山作用形成的物质,在原地或被外力搬运,并在适当的条件下沉积下来,经胶结和成岩作用而形成的。沉积岩的矿物成分主要是黏土矿物、碳酸盐和残余的石英、长石等,具有典型的层理构造,岩性一般具有明显的各向异性。按形成条件及结构特点,沉积岩可分为火山碎屑岩、胶结碎屑岩、黏土岩、化学岩和生物化学岩等,沉积岩的分类见表 2.1.3。

沉积岩的形成过程,不仅有海浸式沉积环境和海退式沉积环境,还有两者结合的沉积环境,并且海浸及海退交替出现。有深水宁静环境,亦有浅水动荡环境。因此,沉积轮回及沉积相的变化有所不同,特别是滨海及湖相沉积,往往受古地形的控制,在岩层的走向、倾向、岩性与岩相上都有变化,再加上水体季节变化以及风浪影响,岩性岩相变化更加显著。陆相滨湖环境的沉积模式更加复杂,往往在一定范围内,砾岩变为砂岩甚至砂质页岩或黏土岩。不仅岩性岩相变化如此,厚度变化也是如此,往往形成大小不一的扁豆体或透镜体。滨海相的沉积模式亦是如此,而深海相沉积则为细粒的碎屑岩沉积及碳酸岩类的化学沉积,该种沉积无论是岩性岩相,还是厚度,在较小的范围内往往变化不大。所以,在岩体结构分析时,对滨海相沉积,特别是河湖相沉积,要做好岩石地层的详细对比。

表 2.1.3 沉积岩分类

岩 类	结 构	岩石分类名称	主要亚类及其组成物质
碎屑岩类	火山碎屑岩	粒径 $>100\text{mm}$	火山集块岩 主要由大于 $100\text{mm}$ 的熔岩碎块、火山灰尘等经压密封胶结而成
		粒径 $2\sim 100\text{mm}$	火山角砾岩 主要由 $2\sim 100\text{mm}$ 的熔岩碎屑、晶屑、玻屑及其他碎屑混入物组成
		粒径 $<2\text{mm}$	凝灰岩 由 $50\%$ 以上粒径小于 $2\text{mm}$ 的火山灰组成,其中有岩屑、晶屑、玻屑等细粒碎屑物质
		砾状结构 粒径 $>2\text{mm}$	砾岩 角砾岩,由带棱角的角砾经胶结而成 砾岩,由浑圆的砾石经胶结而成
	胶结碎屑岩	砂质结构 粒径 $0.05\sim 2.00\text{mm}$	砂岩 石英砂岩,石英含量 $>90\%$ ,长石和岩屑含量 $<10\%$ 长石砂岩,石英含量 $<75\%$ ,长石含量 $>25\%$ ,岩屑含量 $<10\%$ 岩屑砂岩,石英砂岩 $<75\%$ ,长石含量 $<10\%$ ,岩屑含量 $>25\%$
		粉砂结构 粒径 $0.005\sim 0.05\text{mm}$	粉砂岩 主要由石英、长石的粉、黏粒及黏土矿物组成
黏土岩	泥质结构 粒径 $<0.0005\text{mm}$	泥岩 主要由高岭石、微晶高岭石及水云母等黏土矿物组成	
		页岩 黏土质页岩,由黏土矿物组成 碳质页岩,由黏土矿物及有机质组成	
化学岩和生物化学岩	结晶结构及生物结构	石灰岩 石灰岩,方解石含量为 $>90\%$ ,黏土矿物含量 $<10\%$ 泥灰岩,方解石含量为 $50\%\sim 75\%$ ,黏土矿物含量为 $25\%\sim 50\%$	
		白云岩 白云岩,白云石含量为 $90\%\sim 100\%$ ,方解石含量 $<10\%$ 灰质白云岩,白云石含量为 $50\%\sim 75\%$ ,方解石含量为 $25\%\sim 50\%$	

## 1) 火山碎屑岩

火山碎屑岩具有岩浆岩和普通沉积岩的双重特性和过渡关系,包括火山集块岩、火山角砾岩和凝灰岩等。各类火山碎屑岩的性质差别很大,与火山碎屑物、沉积物、熔岩的相对含量、层理和胶结压实程度相关。

大多数凝灰岩和凝灰质岩石结构疏松,极易风化,强度很低,往往具有遇水膨胀的特性。

## 2) 胶结碎屑岩

胶结碎屑岩是沉积物经胶结、成岩固结硬化的岩石,包括各种砾岩、砂岩和粉砂岩。碎屑岩的性质主要取决于胶结物的成分、胶结形式、碎屑物的成分和特点。例如,硅质胶结碎屑岩的岩石强度最高,抗水性强,而钙质胶结、石膏质和泥质胶结的岩石,强度较低,抗水性弱,在水作用下,可被溶解或软化,导致岩石性质变差。此外,基质胶结类型的岩石较坚硬,透水性较弱,而接触胶结类型的岩石强度较低,透水性较强。

### 3) 黏土岩

黏土岩包括两种类型,即页岩(具有明显的页状层理)和泥岩。总的来说,黏土岩的性质较差,特别是红色岩层中的泥岩,厚度薄,抗水性差,强度低,易软化和泥化。

### 4) 化学岩和生物化学岩

化学岩和生物化学岩中最常见的是碳酸盐类岩石,以石灰岩分布最广,多数为石灰岩和白云岩,结构致密、坚硬、强度较高。它们在地下水的作用下能被溶蚀,形成溶蚀裂隙、溶洞、暗河等,成为渗漏或涌水的通道,给工程带来极大的危害。泥灰岩是黏土和石灰岩之间的过渡类型,强度低、遇水易软化,当石灰岩中夹有薄层泥灰岩或黏土岩时,可能产生滑动,对工程极为不利。但石灰岩及黏土岩夹层可以起阻水或隔水作用,对于防止渗漏与涌水又是有利的,因此应结合具体工况进行分析。

## 3. 变质岩

变质岩是岩浆岩或沉积岩经过变质混合作用后形成的。温度方面可分为高温变质、中温变质和低温变质,再加上作用力的不同,又有更多组合的变质混合条件,如高温高压、高温中压等。从变质深浅角度而言,浅变质带的压力小,温度也不特别高,变质作用在定向压力作用下进行,主要是使岩石破碎、固体熔融交替。中变质带的压力和温度中等,无碎屑,片理构造发育。深变质带的温度高,几乎接近岩石熔解点,重力围压较大,可以形成定向压力,片理不太发育,结晶体较大。不同的物理条件使得母岩的矿物组成与组织结构明显不同。所以往往在较小范围内,同一岩层变质岩的内在岩性和岩相变化随矿物组分及组织结构的不同而发生变异。由于与变质作用力有一定关系,变质岩形成了特有的片理、剥理、板理、片麻结构、流劈理、流动扭曲褶皱等,因此变质岩具有极为明显的不均质性和各向异性。

变质岩形成的地质环境,大都是地壳最活跃的部位,因此变质岩类岩石组合特别复杂。岩石种类繁多,如大理岩、蛇纹岩、变质砾岩、石英岩、石英片岩、板岩、片岩、变质的火山岩及混合岩化而形成的片麻岩、麻粒岩、花岗片麻岩等。

变质岩的性质与变质作用的特点及原岩的性质有关,其岩石力学性质差别很大,不能一概而论。大多数常见的变质岩均经过重结晶作用,具有一定的结晶联结,使其结构较紧密,抗水性强,孔隙小,透水性弱,强度较高。如页岩变质为板岩、角岩后其性质有所改变。但也有相反的情况,如变质岩中的片理及片麻理,往往使岩石的联结减弱,力学性质呈现各向异性,强度降低。另外,某些矿物成分的影响,也可使变质岩容易风化。此外,变质岩通常年代较为久远,经受的地质构造变动较多,断裂及风化作用破坏了某些变质岩体的完整性,使岩体呈现不均一性。变质岩的分类见表 2.1.4。

表 2.1.4 变质岩分类

类别	岩石名称	主要矿物	构造		变质作用
区域变质岩	板岩 千枚岩 片岩 片麻岩	肉眼不能辨识 绢云母 石英、云母(绿泥石)等 长石、云母、角闪石等	片理	板状 千枚状 片状 片麻状	区域变质
	大理岩 石英岩 混合岩	方解石、白云石 石英 石英、长石等	块状	糖粒状 致密状	
			片理	条带或片麻状	混合岩化作用

续表

类别	岩石名称	主要矿物	构造		变质作用
接触变质岩	大理岩	方解石、白云石	块状	糖粒状 致密状 斑点或致密状或斑杂状	热力变质
	石英岩	石英			
	角闪岩	长石、石英、角闪石、 红柱石			接触交代
	矽卡岩	石榴子石、透辉石等			
动力变质岩	构造角砾岩	原岩碎块	角砾状		动力变质
	糜棱岩	原岩碎屑	条带或眼球状		

### 1) 区域变质岩

区域变质岩分布范围较广,岩石厚度较大,变质程度较为均一,最常见的有片麻岩、片岩、千枚岩、板岩、石英岩和大理岩。混合岩是介于片麻岩与岩浆岩之间的一种岩石,一般而言,块状岩石性质较好,而层状片状岩石,尤其是千枚岩和片麻岩的性质较差。

### 2) 接触变质岩

接触变质岩体出现在侵入体的周围,其范围和性质取决于侵入体大小、类型和原岩物质。这种岩石主要受重结晶作用,因此其强度一般比原岩高。但由于侵入体的挤压,接触带附近易发生断裂,使岩体透水性增加,抗风化能力降低。

### 3) 动力变质岩

动力变质岩是构造作用形成的断裂带及其附近受影响的岩石,如前所述,该类岩石包括压碎岩、角砾岩、糜棱岩等。动力变质岩的性质取决于破碎物质成分的大小和压密胶结程度。通常,该类岩石胶结较弱,裂隙、孔隙发育,强度低,透水性强,常形成软弱结构面或软弱岩体。

## 2.2 岩石的物理性质

岩石的物理性质是指由岩石固有的矿物成分、结构和构造特征所决定的密度、容重、比重、孔隙率、水理性质、抗风化性、膨胀性等基本属性。

### 2.2.1 岩石的质量指标

#### 1. 岩石的密度

岩石单位体积(包括岩石内孔隙体积)的质量称为岩石密度。根据岩石试样的含水状态不同,可分为天然密度、饱和密度和干密度。天然密度 $\rho$ 是指天然状态下的岩石单位体积的质量;饱和密度 $\rho_{\text{sat}}$ 是指岩石在饱水状态下单位体积的质量;干密度 $\rho_{\text{d}}$ 是指岩石在105~110℃下干燥24h后单位体积的质量。在实际使用中,如未说明含水状态,一般均指岩石的天然密度。各密度表达式如下:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2.1)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}}}{V} \quad (2.2.2)$$

$$\rho_{\text{d}} = \frac{m_{\text{d}}}{V} \quad (2.2.3)$$

式中,  $m$  为岩石试样的天然质量,  $\text{g}$ ;  $m_{\text{sat}}$  为岩石试样的饱和质量,  $\text{g}$ ;  $m_{\text{d}}$  为岩石试样的干质量,  $\text{g}$ ;  $V$  为岩石的总体积,  $\text{cm}^3$ 。

## 2. 岩石的容重

岩石单位体积(包括岩石内孔隙体积)的重量称为岩石容重。根据岩石的含水状况,将容重分为天然容重  $\gamma$ 、水饱和容重  $\gamma_{\text{sat}}$  和干容重  $\gamma_{\text{d}}$ 。天然容重  $\gamma$  是指天然状态下的岩石单位体积的重量; 饱和容重  $\gamma_{\text{sat}}$  是指岩石在饱水状态下单位体积的重量; 干容重  $\gamma_{\text{d}}$  是指岩石在干燥情况下单位体积的重量。在实际使用中,如未说明含水状态,一般均指岩石的天然容重。各容重表达式如下:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.2.4)$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_{\text{sat}}}{V} \quad (2.2.5)$$

$$\gamma_{\text{d}} = \frac{W_{\text{d}}}{V} \quad (2.2.6)$$

式中,  $\gamma$  为天然岩石容重,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $W$  为被测岩样的重量,  $\text{kN}$ ;  $W_{\text{sat}}$  为饱和岩样的重量,  $\text{kN}$ ;  $W_{\text{d}}$  为干燥岩样的重量,  $\text{kN}$ ;  $V$  为被测岩样的体积,  $\text{m}^3$ 。

岩石容重和岩石密度之间存在如下关系:

$$\gamma = \rho g \quad (2.2.7)$$

式中,  $g$  为重力加速度,可取  $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

岩石容重取决于组成岩石的矿物成分、孔隙发育程度及其含水量。岩石容重的大小,在一定程度上可以反映出岩石力学性质的优劣。一般而言,岩石容重越大,其力学性质也越好,反之,则越差。常见岩石的容重见表 2.2.1。

表 2.2.1 常见岩石的容重

岩石名称	容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	岩石名称	容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	岩石名称	容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
花岗岩	23.0~28.0	玢岩	24.0~28.6	玄武岩	25.0~31.0
闪长岩	25.2~29.6	辉绿岩	25.3~29.7	凝灰岩	22.9~25.0
辉长岩	25.5~29.8	粗面岩	23.0~26.7	凝灰角砾岩	22.0~29.0
斑岩	27.0~27.4	安山岩	23.0~26.7	砾岩	24.0~26.6
石英砂岩	26.1~27.0	白云质灰岩	28.0	片岩	29.0~29.2
硅质胶结砂岩	25.0	泥质灰岩	23.0	特别坚硬的石英岩	30.0~33.0
砂岩	22.0~27.1	灰岩	23.0~27.7	片状石英岩	28.0~29.0
坚固的页岩	28.0	新鲜花岗片麻岩	29.0~33.0	大理岩	26.0~27.0
砂质页岩	26.0	角闪片麻岩	27.6~30.5	白云岩	21.0~27.0
页岩	23.0~26.2	混合片麻岩	24.0~26.3	板岩	23.1~27.5
硅质灰岩	28.1~29.0	片麻岩	23.0~30.0	蛇纹岩	26.0