

高等学校教材

岩石力学

华东水利学院
成都科学技术大学

合编

水利电力出版社

高等学校教材

岩石力学

华东水利学院
成都科学技术大学

合编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书为高等院校水利水电工程建筑专业教材,也可供从事岩石力学工作的水利水电、地下建筑、地质、冶金等工程技术人员以及高等院校有关专业师生参考。

全书共七章,分别介绍岩石的物理性状、岩石的变形特性、岩石的强度特性、岩体中的天然应力、地下洞室围岩的稳定分析、岩坡及坝基稳定分析、有限元在岩石力学中的应用。书末附有习题、试验指导书以及适用于微电脑PC—1500机的岩坡稳定分析程序。

目 录

前言

绪 论	1
第一章 岩石的物理性状	4
第一节 岩体的结构特征	4
第二节 岩石的不连续性、不均匀性及各向异性	5
第三节 岩石的物理性质指标	7
第四节 岩石的工程分类	13
第二章 岩石的变形特性	16
第一节 岩石变形特性的测定	16
第二节 岩体变形特性指标的测定	28
第三章 岩石的强度特性	37
第一节 岩石的强度与试验	37
第二节 岩石的破坏特性	46
第三节 岩石的强度理论	47
第四节 岩石的结构面强度	56
第四章 岩体中的天然应力	60
第一节 概述	60
第二节 研究岩体天然应力的意义	61
第三节 岩体应力的现场量测	63
第五章 地下洞室围岩的稳定分析	71
第一节 概述	71
第二节 洞室围岩应力的计算	74
第三节 松散围岩的山岩压力计算	77
第四节 围岩压力的弹塑性理论计算	91
第五节* 有压隧洞	106
第六节* 喷锚支护原理与新奥法	108
第六章 岩坡及坝基稳定分析	117
第一节 概述	117
第二节 平面滑坡稳定性分析	119
第三节* 空间滑坡	137
第四节 坝基抗滑稳定分析	146
第五节 拱坝坝头稳定性分析	154

第七章 有限单元法在岩石力学中的应用159

 第一节 概述159

 第二节 横观各向同性岩体的分析163

 第三节 软弱夹层的分析方法169

 第四节 岩体中剪切破坏单元的分析175

附录一 习题179

附录二 岩石室内试验指导书184

附录三 “不平衡推力迭代法”电算程序(LSS)198

参考文献203

高等学校教材

岩石力学

华东水利学院 合编
成都科学技术大学

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 13.25印张 295千字

1986年6月第一版 1986年6月北京第一次印刷

印数0001—7620册 定价1.95元

书号 15143·5961

绪 论

一、岩石力学发展简况

众所周知,我国是世界上从事采矿事业的最早国家。远在几千年前,我国已能开采铜、铁、金、煤等矿石;公元前二百多年的战国时代,李冰就和劳动人民一道凿山开渠、修建了位于岷江的都江堰;东汉时期(公元一世纪),我国已有深达数百米的盐井。我国劳动人民在这长期的生产实践中,很早就懂得利用支架、留矿柱和充填等方法来防止矿坑围岩破碎、冒落等地压现象。这些历史资料都充分说明我们祖先在岩石力学领域中所做的工作,一直是处于领先地位的。但由于长期的封建统治,特别是近百年来一直处于半封建半殖民地的社会状况,严重地摧残和束缚着生产力的发展,致使过去积累的实践经验不能及时总结提高,以致岩石力学长期未能形成系统的科学体系。解放后,我国水利事业有了巨大发展。三十年来,全国共建水库就有八万六千多座,水电站装机一千九百万千瓦。在这些水利水电建设过程中,我国广大岩石力学工作者逐步采用岩石力学的现代测试技术量测满足各项水电工程建设中所需的岩石物理、力学参数,并较为成功地应用岩石力学理论和方法解决了水利建设中所涉及的一系列岩石力学问题。例如,结合长江三峡岩基的研究,开展了大规模的室内和现场实验研究工作,成功地解决了像葛洲坝,大冶露天铁矿等一系列大型工程中复杂的岩石力学问题。此外,在理论研究方面,如岩石的流变以及岩体结构方面的研究,不仅起步较早,且在国际上也占有一定地位。

自1978年以来,我国陆续成立了分属各有关学会的岩石力学专业机构,如中国水利学会岩土力学专业委员会,中国力学学会岩土力学专业委员会,中国煤炭学会岩石力学专业委员会等。这些专业机构多次组织了形式多样、内容丰富的岩石力学论文评选会、交流会和讨论会,这对于促进学术交流、活跃学术空气,提高学术水平起到了积极地促进作用。1978年9月,国际岩石力学学会中国小组成立,并代表中国各岩石力学专业组织参加了国际岩石力学第四届大会;1981年8月经中国科协批准,成立了岩石力学与工程学会筹备组,这为今后更好地组织和协调各系统各部门的岩石力学工作者协同攻关岩石力学的重大课题,促进系统之间的经验交流必将发挥重大作用。

此外,国内许多部门相继建立了岩石力学科研机构;创办了具有较高学术水平的期刊杂志,如“岩石力学与工程学报”、“岩土工程学报”、“岩土力学”等;出版了岩石力学方面的若干专著以及较为成熟的教材。这对促进我国岩石力学的科研工作,开展学术讨论与学术交流,介绍国内外先进技术和经验,促进我国岩石力学学科和岩石工程实践的迅速提高和发展,提高我国岩石力学学术水平都将起到积极推动作用。

值得指出的是,水利水电系统从1976年开始,1981年初修订完毕并正式出版的《水利水电工程岩石试验规程》之后,最近又编写了基本上反映了我国(尤其是水利水电部门)的岩石测试仪器设备水平的《水利水电岩石测试仪器系列型谱(送审稿)》。这不仅使我

国岩石力学测试技术在标准化、系列化道路上迈出了可喜的一步，同时对今后逐步统一测试方法、统一测试仪器设备以及为今后工程提出可靠资料无疑是一个有力的保证。

在国外，开始进行岩石力学的起步时间较晚，其发展过程大致可分为三个阶段。岩石力学发展的初期，基本上采用以材料力学、理论力学以及均质弹性理论为基础的计算方法来研究有关岩石力学方面的问题。在此阶段有海姆(Heim, 1878年)，施米特(schmit, 1925年)等人，从各方面为岩石力学积累了一定的实践经验与理论资料。由于当时科学水平以及工程规模的限制，虽然这一阶段所积累的岩石力学资料，仅仅是零星和局部的。但都为今后岩石力学这一新兴的学科的形成提供了“生长点”。

二十世纪四十年代，可以说岩石力学已进入了重要的发展阶段，这是以第二次世界大战后世界各国大量兴建各项建设工程的需要为背景，从而促进岩石力学的各项研究工作的蓬勃发展。在此阶段，多以均质弹塑性理论以及极限平衡理论为主要计算原理，在试验方面则以室内小试块的物理力学试验为主。这一时期的国外学者，如米勒(Müller)、斯体尼(stni)，杰格尔(Jaeger)、塔洛布尔(Talober)等人对于岩石力学开展了许多有益的研究工作，并为岩石力学奠定了一定的基础。

随着生产的不断的发展以及岩石力学方面各项研究工作的深入，人们对于岩石力学中的很多重要课题逐步加深了认识。到了二十世纪六十年代，岩石力学已经形成了一门独立的新兴学科。值得指出的是，法国塔罗布尔于1957年、1958年先后编著的《岩石力学》、《岩石力学在土木工程中的应用》两书，系统地阐述了岩石力学研究的理论、方法和重要意义。这是岩石力学方面较早、较为系统的专著。它对于促使人们认识到岩石力学研究工作的重要性起着巨大的促进作用。

自六十年代以后，岩石力学工作者对于岩块力学性质、岩体力学性质、岩石力学的粘弹性、弹塑性以及粘弹塑性等基础理论、本构关系、实验岩石力学、岩石断裂、以及以电子计算机技术为基础的有限元、边界元等数值方法对岩体力学问题进行分析计算方面的研究都作了深入地探讨，这一切都标志着现阶段的岩石力学已进入了全面而深入的崭新阶段。

二、岩石力学的定义、任务以及在水利水电工程中的应用

岩石力学是研究岩石在特定条件下的运动、变形以及破坏规律的学科。从工程实用性来看，它主要涉及岩体稳定性以及岩体破碎规律的研究。前者包括岩坡稳定、岩基稳定、洞室围岩稳定等问题的研究；后者主要讨论机械破岩、爆破破岩、水力破岩等方面的研究。然而，不论是对岩体稳定性还是对岩体破碎规律方面的研究，都必须建立在对岩体的物理力学性质具有充分而正确地认识的基础上。因此岩体的物理力学性质也是岩石力学中重点探讨的课题之一。

众所周知，水利水电工程属于综合性土木建筑工程，它既包括坝、闸之类挡水建筑物，又包括隧洞、地下厂房等地下建筑物。因此上述有关岩体的稳定问题(坝基、岩坡以及洞室的稳定性)均与水利水电工程密切相关。以坝基为例，如果坝基岩体持力层中存在软弱夹层，这就必然降低岩体强度或产生过大的变形，威胁着坝体的安全。根据国内已建和正在设计的大坝统计资料，由于坝基岩体中存在软弱夹层而需改变设计，降低坝高，增

加工程量或后期需经加固措施者，约占 1/3 左右。国外发生失事和事故的许多工程，大多数也与软弱夹层有关。例如美国奥斯丁重力坝，沿石灰岩内的页岩夹层发生滑移。鉴于上述情况，就迫切需要应用岩石力学原理，对于坝基岩体中软弱夹层的分布情况、力学特性以及演变趋势进行系统的研究，这样才能确保大坝的安全。

又如，水利水电工程中的水库边坡，随着工程运行过程中水库水位的涨落，边坡的自然条件和受力条件也随之改变；当水库水位急剧消落且边坡岩体排水不畅时，岩体中可能出现较大的动水压力，从而造成库岸坍塌。其次，在水的长期浸泡下，边坡岩体的岩性可能发生软化，这都可能对边坡岩体的稳定性产生不利影响。为了保证岩坡的安全，也就必须应用岩石力学原理对岩体稳定性进行必要的分析计算。

此外，岩石力学与国民经济建设有着极为密切的关系。在大型岩石工程中，利用岩石力学原理采取合理的工程措施，将会节约大量建设资金。众所周知，在大型岩坡工程中，坡角仅几度之差，将会影响数万立方米的工程开挖量；在大坝工程中选用的摩擦系数仅发生 0.01 的变化，将影响到数十万立方米的混凝土用量。

综上所述可以看出，岩石力学这一新兴学科对于当前水利水电建筑事业具有何等的重要意义！

按科学性质而言，岩石力学是一门应用性很强的学科。因此岩石力学的形成和发展过程，也必然是岩石力学理论与工程实践相辅相成、互相促进和补充的过程。因此，岩石力学的研究方法必须坚持理论与实际，研究与应用紧密结合的原则。所以在学习本课程时，也必须强调理论与实际的紧密结合，坚持既重视理论又不忽视实际的原则。

第一章 岩石的物理性状

第一节 岩体的结构特征

地质学中通常把构成地壳的材料统称为岩石，而称松软的为土；坚硬的为岩石。前者的物理力学性状属于土力学研究的范畴，而后者的物理力学性状则属于岩石力学研究的范畴。

岩石力学中常用到“岩块”、“岩体”和“岩石”这三个术语。一般认为“岩块”是指从地壳岩层中切取出来的无显著软弱面的岩石小块体，或称为“岩石材料”、“单元岩块”、“完整岩块”和“岩样”等。例如由钻探获得的岩心；用爆破或其它方式获得的岩石碎块、岩样等，通称为“岩块”。“岩体”是指天然埋藏条件下的大范围分布的，由岩块和软弱网络组成的地质体。总之广义的“岩石”则是“岩块”和“岩体的泛称，而狭义的“岩石”则专指“岩块”或岩石材料。

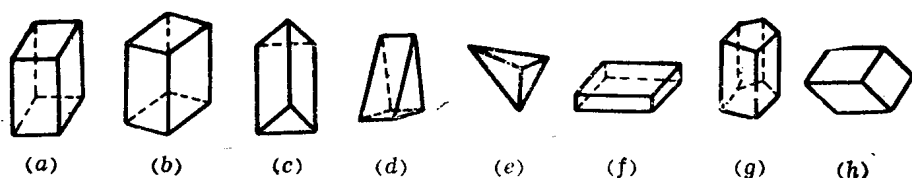


图 1-1 单元结构体的主要形状

(a)长方柱体；(b)菱形柱体；(c)三菱柱体；(d)楔形体；(e)锥形体；(f)板状体；(g)多角柱体，
(h)菱形块体

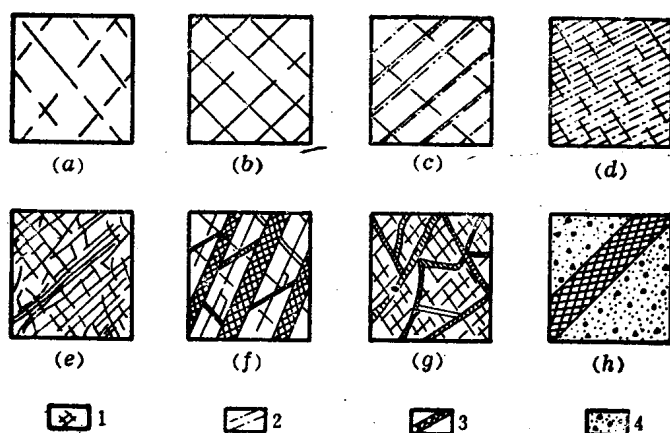


图 1-2 岩体结构型式图示

(a)整体结构；(b)块状结构；(c)层状结构；(d)薄层状结构；(e)镶嵌结构；(f)层状破碎结构，
(g)碎裂结构；(h)散粒结构

1—节理；2—层理；3—断层；4—断层破碎带

天然岩体被结构面切割成结构体。所谓结构面是指切割岩体的各种地质界面，它包括物质分异面和不连续面，诸如层面和断裂等。结构面、特别是软弱结构面，系指将岩体切割成块体而具有低强度和易变特性的各种地质界面，显然对岩体的强度和稳定性将有直接的影响。结构体是指由不同产状的结构面相互切割而成的、大小不一、形态各异的岩石块体，因此，岩体可以看作是无数结构体的组合。

根据岩石成因的不同，可将岩石分成岩浆岩（火成岩）、沉积岩和变质岩三大类，而其中又以沉积岩分布的面积最广，约占地表面积的65%左右。而层状岩体中结构体形式较块状岩体中的结构体的形式为复杂。图1-1所示为单元结构体的主要形状。图1-2为岩体结构型式。表1-1为岩体结构的基本类型。

表 1-1 岩 体 结 构 的 基 本 类 型

岩 体 结 构 类 别		地 质 背 景	结 构 面 特 征	结 构 体 特 征
整体块状结构	整体结构	岩性单一、构造变形轻微的巨厚层沉积岩、变质岩和火山熔岩、火成侵入岩	结构面少，一般不超过三组，延续性极差，多呈闭合状态，无充填或含少量碎屑	巨型块状
	块状结构	岩性较单一，受轻微构造作用的厚层沉积岩和变质岩、火成岩侵入体	结构面一般2~3组，裂隙延续性极差，多呈闭合状态。层面有一定的结合力	块状、菱形块状
层状结构	层状结构	受构造破坏轻或较轻的中厚层(大于30cm)岩体	结构面2~3组，以层面为主，有时也有软弱夹层或层间错动面，其延续性较好，层间结合力较差	块状、柱状、厚板状
	薄层状结构	层厚小于30cm，在构造作用下发生强裂褶曲和层间错动	层理、片理发达，原生软弱夹层、层间错动和小断层不时出现。结构面多为泥膜、碎屑和泥质充填	板状、薄板状
碎裂结构	镶嵌结构	一般发育于脆硬岩层中，结构面组数较多，密度较大	以规模不大的结构面为主，但组数多，密度大，延续性差，闭合无充填或充填少量碎屑	形状不规则，但棱角显著
	层状碎裂结构	受构造裂隙切割的层状岩体	以层面、软弱夹层、层间错动面等为主，构造裂隙甚发达	以碎块状、板状、短柱状为主
	碎裂结构	岩性复杂，构造破碎较强烈，弱风化带	延续性差的结构面，密度大，相互交切	碎屑和大小不等的岩块。形状多种，不规则
散体结构		构造破碎带、强烈的风化带	裂隙和节理很发达，无规则	岩屑、碎片、碎块、岩粉

第二节 岩石的不连续性、不均匀性及各向异性

由于岩体内普遍存在着结构面和软弱结构面等地质特征，致使岩石具有不连续性、不均匀性和各向异性等特点，现分述如下：

一、岩石的裂隙性（图1-3）

通常采用裂隙率作为定量评价岩石被裂隙切割后破碎程度的指标。岩石的裂隙率通常有单向裂隙率和平面裂隙率两种：

1. 单向裂隙率（或称裂隙频率、软弱面线密度）

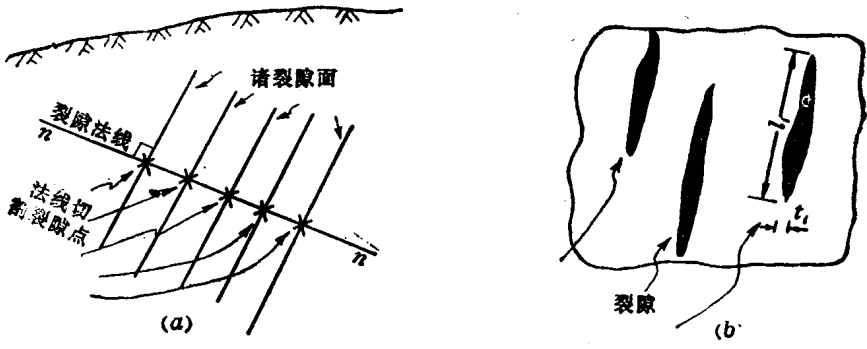


图 1-3 岩石裂隙图

单向裂隙率指沿一组结构面的法线方向上每单位长度（1m）内，法线与结构面的交割数目，以 $k_d \text{m}^{-1}$ 表示。由定义可知，单向裂隙率的倒数即为成组结构面之间的平均间距，如以 d 表示，则有：

$$d = \frac{1}{k_d} \tag{1-1}$$

2. 平面裂隙率

平面裂隙率 k_A 是指岩石单位面积上诸裂隙所占有的面积总和，亦即：

$$k_A = \frac{\sum_1^n l_i \cdot t_i}{A} \tag{1-2}$$

式中 l_i ——第 i 条裂隙面长度（m）；
 t_i ——第 i 条裂隙的宽度（m）；
 A ——被量测的岩石的总面积（ m^2 ）。

由式（1-2）可知，当被量测截面积内不包含裂隙时，即 $\sum_1^n l_i t_i = 0$ ，因此 $k_A = 0$ ；当截面积全部为裂隙充满时，即 $\sum_1^n l_i t_i = A$ 时，则 $k_A = 1$ 。

裂隙率愈大，表明岩石愈破碎、强度愈低、透水性愈大、抗冻性愈差，且易被风化产物所充填，形成软弱结构面，酿成工程的隐患。

二、各向异性

岩体的各向异性是指天然岩体的物理力学性质随空间方位不同而变的特性，具体表现在它的强度及变形特性等各个方面。表1-2可以表明，平行和垂直于岩层方向的力学性质是各不相同的。

由试验可知，即使不具有裂隙和明显层状的岩块试样，也可以具有各向异性的特点。在天然岩体条件下，使岩体具有各向异性的基本原因是由于岩石内普遍存在着层理、

表 1-2

某些岩石室内静力试验结果

岩石种类	$E_{\perp}, E_{\parallel}$	$\mu_{\perp}, \mu_{\parallel}$	$\sigma_{c\perp}, \sigma_{c\parallel}$	$\tau_{f\perp}, \tau_{f\parallel}$
细砂岩	1.01~0.93	0.15~0.52	0.97~0.91	1.21~1.09
中砂岩	0.93~0.80	0.83~1.83	1.26~0.95	1.45~1.28
粗砂岩	0.89~1.08	1.20~0.80	1.20~1.18	0.97
石英砂岩	0.93	1.17	—	—
石灰岩	0.91	0.72	—	—
片麻岩	0.91~0.63	—	—	—
页岩	0.98	1.56	—	—

注 表中 $\perp$ 和 $\parallel$ 指测试时加荷方向与结构面相垂直或相平行。

片理、夹层和定向裂隙（断裂）系统所致。

目前在实际工程中对于成层岩体往往考虑其平行于层理和垂直于层理方向的差异性。而对于不具有层理的岩体，例如完整的花岗岩等，则在试验时往往假定它是各向同性体，而不考虑其各向异性的差别。

三、不均匀性

不均匀性是指天然岩体的物理、力学性质随空间位置不同而变的特性。

分析现场岩体试验资料时可采用综合性的统计特征——偏差系数 $V(\%)$ 来估算岩体的不均匀性，即

$$V(\%) = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \quad (1-3)$$

式中 $\bar{x}$ ——各观测值 x_i 的算术平均值，

σ ——标准差估计量，为各个测量值 x_i 的误差平方和的 $\frac{1}{N-1}$ 的平方根，

即，

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-4)$$

式中 N ——试验观测的次数

试验表明，岩石的不均匀性也还具有各向异性的特征，即同一岩石的偏差系数有随方向而异的趋向，这对于成层岩体特别明显。

第三节 岩石的物理性质指标

本节着重介绍水利水电工程建筑方面最常用到的一些岩石的物理性质指标，即容重、比重、孔隙率以及岩石的水理性指标和有关的热学性指标。

为了测定上述诸项指标，一般都采用钻探的方法获取岩心作室内试验；或直接从天然和人工露头处（探井、探洞）采取岩样进行试验。选取岩样时必须从地质方面考虑其代表性，并尽可能保持其天然结构。最好是用同一岩样逐次地测定岩石的各项物理性质指标，

现将各物理性指标分述如下:

一、容重

容重是岩石单位体积(包括岩石内孔隙体积在内)的重量。岩石容重的表达式为:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-5)$$

式中 γ ——岩石容重;

W ——被测定岩样的重量;

V ——被测定岩样的体积。

岩石容重取决于组成岩石的矿物成分、孔隙以及含水的多寡。当其它条件相同时,岩石的容重在一定程度上与其埋藏深度有关。一般而言,靠近地表的岩石容重往往较小,而深层的岩石则具有较大的容重。

岩石容重的大小,在一定程度上反映出岩石的力学性质的优劣。通常岩石容重愈大,其力学性质愈好;反之,愈差。

岩石力学计算中常需用到容重这一指标,通常以 γ 表示天然容重,以 γ_d 和 γ_m 分别表示烘干容重和饱和容重。

从式(1-5)可知,测定容重的关键在于测定岩样的体积和重量。《水利水电工程岩石试验规程》试行本(以下简称《规程》)规定,根据岩石类型和试样形态,可分别采用下述方法测定:

(1) 凡能制备成规则试样的岩石宜采用量积法测定岩石容重。

用量积法测定岩石容重时,需测定规则试样的平均断面积 A 、平均高度 h 以及试样的烘干重量 g_s ,然后由下式计算干容重 γ_d :

$$\gamma_d = \frac{g_s}{A \cdot h} \quad (1-6)$$

(2) 除遇水崩解、溶解和干缩湿胀性岩石外,可采用水中称重法测量容重。水中称重法是根据阿基米德原理,首先确定出不规则试样的体积,然后再按式(1-5)计算出天然容重 γ 。此法一般用测定岩石吸水率和饱和吸水率的同一试样进行测定。

(3) 不能用量积法或水中称重法测定的岩石,可采用蜡封法测定容重。用这种方法测定容重,需将烘干岩样浸于蜡液中,待全部浸没后,立即取出冷却,并称出蜡封岩样的重量 g_1 ,然后将蜡封岩样在水中称重,其重以 g_2 表示,若石蜡的容重为 γ_n ,则岩石的烘干容重 γ_d 可按下式计算:

$$\gamma_d = \frac{g_s}{g_1 - g_2 - \frac{g_1 - g_s}{\gamma_n}} \quad (1-7)$$

式中 g_s ——岩样的烘干重量。

(4) 天然容重 γ ,则可根据已测定的烘干容重 γ_d ,按下式估算得出:

$$\gamma = \gamma_d(1 + 0.01\omega) \quad (1-8)$$

式中 ω ——岩石的天然含水量(%)。

二、比重

岩石的干重量除以岩石的实体体积（不包括孔隙体积）的单位干容重，与4℃时水的容重 γ_w 之比，即为岩石的比重 Δ_s ，因此岩石比重可由下式计算：

$$\Delta_s = \frac{g_s}{V_s \cdot \gamma_{w(4^\circ\text{C})}} \quad (1-9)$$

式中 V_s ——岩样的实体体积，可按容重测定法中相应的方法测定（ m^3 ）；

g_s ——与前同。

此外，岩石的比重在试验室中还可采用与土工试验类似的比重瓶法进行测定，这种比重瓶测定法关键是需将岩石研磨成粉末，烘干后用比重瓶测定岩石比重。对于无裂隙或只有微开裂隙的岩石试样，国内也有人建议用水中称重法推算出岩样的实体体积 V_s ，再由式（1-9）确定比重 Δ_s 值。

岩石的比重，在数值上等于其密度，它取决于成岩矿物的比重。成岩矿物的比重愈大，则岩石的比重愈大。反之，则愈小。岩石的一般比重约在2.7左右。

三、孔隙率

孔隙率 n （%）是指岩石内孔隙体积与总体积（包括孔隙体积在内）之比，其值可按下式计算：

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 (\%) \quad (1-10)$$

$$= \left(1 - \frac{\gamma_d}{\Delta_s \cdot \gamma_{w(4^\circ\text{C})}} \right) \times 100 (\%) \quad (1-11)$$

式中 n ——总孔隙率，为粒间孔隙率 n_p 与裂隙孔隙率 n_f 之和，以百分数表示；

V_v ——试样孔隙体积，包括裂隙体积在内（ m^3 ）；

V ——试样总体积（包括孔隙、裂隙体积在内）（ m^3 ）。

从式（1-10）和（1-11）可知，如果实验室内能测定出 V_v 和 V ，则可由式（1-10）直接算出孔隙率 n 。如果实验室内已测定出岩样的干容重 γ_d 和比重 Δ_s ，则可利用式（1-11）间接求得孔隙率 n 。

孔隙率直接反映出岩石中孔隙和裂隙所占体积的百分比，所以孔隙率也是衡量岩石工程质量的重要物理性指标之一。显然，孔隙率愈大，空隙和细微裂隙也就愈多，岩石的力学性能就愈低。

当然岩石的孔隙性也可用孔隙比 ε 表示：

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-12)$$

$$= \frac{n}{1 - n} \quad (1-13)$$

四、水理性指标

岩体遇水作用后，会引起某些物理、化学和力学等性质的改变，水对岩石的这种作用特性，称为岩石的水理性。

1. 天然含水量 w （%）

天然含水量是天然状态下，岩石的含水重量 g_w 与岩石干重 g_s 比值的百分率，即

$$w(\%) = \frac{g_w}{g_s} \times 100 \quad (1-14)$$

2. 吸水率 $w_a(\%)$

吸水率是岩样在大气压力和室温条件下, 吸入水的重量与其烘干重量 g_s 之比的百分率, 即

$$w_a(\%) = \frac{g_o - g_s}{g_s} \times 100 \quad (1-15)$$

式中 g_o ——烘干岩样浸水48h后的湿重(N);

其余符号与前同。

吸水率 w_a 的大小, 取决于岩石所含孔隙数量多寡和细微裂隙的连通情况。孔隙愈大、愈多、孔隙和细微裂隙连通情况愈好, 则岩石的吸水率愈大, 因而岩石质量愈差。

3. 饱和吸水率 $w_{sa}(\%)$

饱和吸水率亦称饱水率, 是岩样在强制状态(真空、煮沸或高压)下, 岩样的最大吸入水的重量与岩样的烘干重量 g_s 比值的百分率, 即

$$w_{sa}(\%) = \frac{g_p - g_s}{g_s} \times 100 \quad (1-16)$$

式中 g_p ——岩样饱和后的重量(N);

g_s ——与前同。

在高压条件下, 通常认为水能进入岩样中所有敞开的裂隙和孔隙中去, 国外采用高压设备, 有的已达15MPa。但由于高压设备较为复杂, 因此实验室常用真空抽气法或煮沸法使岩样饱和。饱水率对于岩石的抗冻性具有较大的影响。饱水率愈大, 表明岩石中含水愈多。因此, 在冻结成冰的过程中就会对岩石内的孔隙、裂隙等结构产生较大的附加压力, 从而引起岩石的破坏。

4. 饱水系数 $K_w(\%)$

饱水系数是指岩石吸水率与饱水率比值的百分率, 即

$$K_w(\%) = \frac{w_a}{w_{sa}} \times 100 \quad (1-17)$$

试验证明, 当 $K_w < 91\%$ 时, 可免遭冰冻破坏。

5. 抗冻系数 C_f

岩石经过反复冻结与融解, 会使强度降低, 甚至引起破坏。岩石在反复冻融过程中所以产生破坏, 其主要原因是因岩石中所含各种矿物的膨胀系数不同, 当温度变化时, 由于胀、缩不匀而导致岩石结构的破坏; 引起岩石破坏的另一原因是, 因岩石中水分结冰所形成的膨胀压力所致。

岩石的抗冻性, 可通过抗冻系数表示。所谓抗冻系数 C_f 是指岩样在 $\pm 25^\circ\text{C}$ 的温度区间内, 反复降温、冻结、融解、升温, 然后测定其抗压强度的下降值 $(\sigma_o - \sigma_{of})$, 以此强度下降值与冻融试验前的抗压强度 σ_o 之比的百分率作为抗冻系数 C_f , 亦即

$$C_f = \frac{\sigma_o - \sigma_{of}}{\sigma_o} \times 100(\%) \quad (1-18)$$

式中 σ_c ——冻融试验前的抗压强度 (MPa) ;
 σ_{cf} ——冻融试验后的抗压强度 (MPa) .

6. 软化系数 η_c

软化系数是岩样饱水状态的抗压强度与干燥状态抗压强度之比值。各类岩石的软化系数约在0.45~0.9之间 (表1-3) .

表 1-3 某些岩石的软化系数 η_c 的试验值

岩 石 种 类	η_c	岩 石 种 类	η_c
花 岗 岩	0.80~0.98	砂 岩	0.60~0.97
闪 长 岩	0.70~0.90	泥 岩	0.10~0.50
辉 长 岩	0.65~0.92	页 岩	0.55~0.70
辉 绿 岩	0.92	片 麻 岩	0.70~0.96
玄 武 岩	0.70~0.95	片 岩	0.50~0.95
凝 灰 岩	0.65~0.88	石 英 岩	0.80~0.98
白 云 岩	0.83	板 岩	0.68~0.85
石 灰 岩	0.68~0.94	千 枚 岩	0.76~0.95

$$\eta_c = \frac{(\sigma_c)_{\text{饱水}}}{(\sigma_c)_{\text{干燥}}}$$

(1-19)

式中 $(\sigma_c)_{\text{饱水}}$ ——岩样在饱水状态下的抗压强度 (MPa) ;
 $(\sigma_c)_{\text{干燥}}$ ——岩样在干燥状态下的抗压强度 (MPa) .

由式 (1-19) 可见, 软化系数总是小于 1 的数值, 最多等于 1。岩体含水以后强度降低的机理是多方面的, 如水分子不仅吸附在岩体表面, 且能挤入宽度小于分子直径的细微裂纹中去, 甚至能进入矿物晶体的解理面中, 这种水的所谓“楔劈作用”的结果, 势必对裂纹两壁施加一定的压力而造成岩体强度下降; 又如岩体裂隙壁上的水膜将使岩体受到剪切位移时能增加其润滑作用而降低了摩擦角; 再如重力水对结构面内充填物将产生机械和化学潜蚀, 从而扩大了岩体的孔隙体积, 这也将使强度降低; 尤其是温度变化范围涉及冰点时, 岩石中的液态水将结成冰、或是冰融解为水, 这种裂隙水的冻融作用交替反复, 必将使岩石结构遭受破坏而导致岩石强度的降低。

7. 渗透系数K和吕容系数Lu

受承压水作用的岩体, 在裂隙、节理等结构面内将引起渗流, 其渗透性的大小, 以渗透系数K (m/s, 或cm/s) 或吕容 (Lugeon) 系数Lu (指在直径为46~76mm, 长为1m的钻孔内, 以压强为980665Pa (约为1MPa) 的压力水试验, 历时10min的平均渗水量为1L/min时的渗透性) 表示。吕容系数与渗透系数之间约有 $1Lu = 1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 的关系。

渗透系数K的室内测定法, 宜采用径向渗透试验: 将具有一定壁厚的圆筒状岩样置于压力水中 (图1-4a), 则水经试样外壁径向渗入试样内孔, 此时岩样处于受压状态, 测定渗入内孔的流量Q; 相反, 如将压力水注入内孔, 使水由内向外渗出 (图1-4b), 此时岩样则处于受拉状态, 同样需要测定注入内孔的补给压力水流量Q。以上这两种径向试验的渗透系数K值均可按下式计算: