

高等学校教学用书

应用岩石力学

东北大学 李兆权 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

冶金工业出版社

高等学校教学用书

应用岩石力学

东北大学 李兆权 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

高等学校教学用书

应用岩石力学

东北大学 李兆权 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

航空工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 10.75 字数 254 千字

1994 年 4 月第一版 1994 年 4 月第一次印刷

印数 00,001~1400 册

ISBN 7-5024-1412-6

TD·218 (课) 定价 5.20 元

序

岩石力学是地学的基础学科之一。近三十年来,由于大规模工业及国防建设的需要,各类岩石工程日益增多,促使岩石力学研究迅速发展,面貌日新月异,文献浩如瀚海。然而,多数有关岩石力学的教材和参考书,偏重于介绍基础理论和计算方法,有类似的体系,工程应用内容显得单薄。

长期以来,深感需要一本较全面结合实际,并从应用角度来考察岩石力学诸问题的教材。因此,作者花费了很大精力编写的《应用岩石力学》的问世,是令人鼓舞的。

本书选材针对性强,组织编排新颖,在有限的学时内,把与岩石工程稳定性有关的重要的理论与实际知识介绍给读者。例如,塌方是地下工程中经常碰到的围岩破坏现象。本书在分析这个问题时,不是孤立地论述塌方,而是把它融汇到学科本身的体系之中,从第一章至第七章都含有与塌方有关的问题,如塌方地质背景、与塌方相关的因素、塌方规模预测、塌方预报与防治等等,使学生在原有岩石力学基础知识的基础上,去理解,去深化,扩大知识面,提高解决实际问题的能力。全书章节之间衔接紧密,前后呼应,可读性强。

本书的另一个特点是内容充实,取材新颖。书中有首次向读者推出的工程岩体分级标准(国家标准)及其应用实例。在“围岩状态及其检测”、“工程岩体可靠性分析与预测”、“地下工程地质灾害预报与防治”、“爆破震动作用下巷道稳定性”、“软岩地压与支护”及“采场地压控制”等章节中,力图包容岩石力学领域的新见解和新材料,其中不乏尚未在学术界披露的材料和科研成果。尽管某些观点与细节仍值得讨论与商榷,但这类问题如此醒目地做为教材的重要内容介绍给读者,应当说是一种创新,而值得欢迎。

通观全书,内容较丰富,论述通俗易懂,联系岩石工程(特别是采矿工程)实践比较紧密,既阐明了一些公认的基本理论,也吸收了不少新素材,基本上形成了一个与应用密切相连的好体系。它既可做为高校有关专业选读此课程的教材,也值得广大从事岩土工程工作的科技工作者或工程师们一读。

林韵梅

1993年5月

前 言

随着我国社会主义建设蓬勃发展,大量岩石工程的建设与开发,促进了岩石力学在矿山、水工、铁路、建筑和国防等部门日益广泛应用与深入研究。近十几年,已是硕果累累。

在理论研究方面,计算技术发展迅速,有限元、边界元、离散元等数值分析法已成为岩石力学问题研究的有力手段。岩石损伤力学、分析岩石力学、内蕴时间理论、流变学等新领域,从不同角度探索岩体本构关系并取得新进展。与工程实际结合紧密的反分析法、可靠性分析法、软岩巷道支护理论的产生与应用,为各类岩石工程开发奠定了理论基础。我国科技工作者在岩石力学理论研究的某些方面,已处于国际前列。

在工程实践方面,露天矿边坡稳定性控制与加固技术已日趋成熟。在葛洲坝、二滩等大型水电站建设中,岩石力学的试验与分析研究,提供了可靠的设计参数和评价依据。适用于各类岩石工程的“工程岩体分级标准”的编制是无先例之举。针对软岩巷道的支护研究成果及所积累的成功经验,保证了煤矿生产持续增长。在玉石洼铁矿、张家洼铁矿的采矿技术攻关中,岩石力学的现场研究起到很大作用。处在复杂地质条件下的长隧道施工中的地质灾害预报与防治也有成功的经验。如此种种的岩石力学与工程结合,为工程实际解决了难题,有力地促进工程建设顺利发展,同时也为理论研究开创出广阔的前景。

理论与实践的成果使岩石力学显示出其应用性强的特点,表明这一学科正处于发展的势头,也为岩石力学课程教学提供了宝贵素材。

在岩石力学教学实践中,深感存在有理论与实际结合不够紧密的弊端,迫切需要系统地介绍岩石力学应用方面的教材,使学生利用已学过的岩石力学理论和方法,在解决实际问题时,思路开阔,分析能力得到提高。就采矿工程专业本科生而言,他们毕业后大多数人将到生产第一线去发挥才干。在未来的实际工作中,他们将碰到工程围岩变形与破坏、工程布置与维护方法以及合理开采矿床等一系列与岩石力学有关的技术问题。为了从理论与实际结合上分析这些问题,为了使学多掌握一些解决问题的方法,我们曾编写《应用岩石力学》讲义,在本校的采矿专业高年级学生中选修用。几年的教学实践证明,这本针对性强、理论联系实际紧密的教材是必要的,使用是成功的。本书就是在此基础上重新修改而成。

本书着重介绍与岩石工程稳定性有关的问题及其最新研究成果,这些问题主要有:

1. “工程岩体分级标准”及其在矿山中应用;
2. 岩体初始应力估计方法、构造应力和高应力对岩石工程稳定性影响;
3. 工程岩体稳定性可靠性指标与可靠性分析的概念;
4. 预测原理和方法,围岩状态参数预测;
5. 爆破动载作用下巷道稳定性;
6. 软岩巷道地压与支护选择,等等。

选材上突出了与实际联系紧密的内容,又注意与已学过的岩石力学理论的衔接与延伸;编排上注重保持学科本身的科学性与系统性;阐述力求简明,概念清楚,舍弃繁琐公式的推导,着眼于实际应用。

全书共分十章,前七章取材广泛,适用于各类地下岩土工程专业;后三章涉及矿山工

目 录

第一章 岩石和岩体的工程特性	1
第一节 岩石力学性质及其离散性.....	1
第二节 岩石点荷载强度与应用.....	4
第三节 岩体力学性质与工程特征.....	6
第四节 岩体强度工程计算法	12
复习思考题	14
第二章 岩体结构及其完整性	15
第一节 岩体结构分类	15
第二节 结构面的表观	18
第三节 岩体结构的现场调查方法	22
第四节 岩体的完整性	25
第五节 软弱结构面性质	27
复习思考题	30
第三章 岩体中的初始应力与工程稳定性	31
第一节 初始应力场	31
第二节 初始应力场估计方法	34
第三节 初始应力与工程稳定性	42
复习思考题	47
第四章 工程岩体稳定性分级	48
第一节 工程岩体稳定性分级的意义和种类	48
第二节 工程岩体分级标准	49
第三节 工程岩体分级标准在矿山中应用	53
第四节 数值分类学在工程岩体分级中的应用	58
复习思考题	60
第五章 围岩状态及其检测	61
第一节 围岩中的应力	61
第二节 围岩应力检测	66
第三节 围岩变形（或位移）	68
第四节 围岩破坏区检测	71
第五节 围岩的自稳能力	74
复习思考题	76
第六章 工程岩体稳定性可靠性分析与预测	77
第一节 可靠性分析法	77
第二节 预测原理和方法	80
第三节 预测方法应用	85
复习思考题	95

第七章 地下工程地质灾害预报与防治 96

第一节 地质灾害类型与预报方法 96

第二节 塌方防治 97

第三节 涌水、突水防治 98

第四节 岩爆防治 99

复习思考题 102

第八章 爆破震动作用下巷道稳定性 103

第一节 爆炸产生的应力波 103

第二节 在爆炸震动作用下巷道的应力状态 105

第三节 爆破震动作用下围岩变形和破坏 109

第四节 爆破震动效应的现场研究 111

第五节 回采进路测震实例 113

第六节 动、静载作用下巷道稳定性评价与支护选择 117

复习思考题 121

第九章 软岩地压与支护 122

第一节 软岩地压显现特点 122

第二节 软岩巷道维护方法 126

第三节 软岩中围岩特性曲线 133

第四节 软岩巷道支护的监控设计法 136

复习思考题 139

第十章 采场地压控制 140

第一节 空场法采场地压 140

第二节 崩落法采场地压 146

第三节 充填法采场地压 159

复习思考题 163

参考文献 164

第一章 岩石和岩体的工程特性

岩石和岩体是岩石力学的研究对象，也是岩石工程的对象。从工程应用角度去认识它们所表现出的性质不确定性、各向异性和易受环境因素影响等特性，寻求简便的工程计算方法，对解决岩石工程的实际问题来说，是必要的。本章将介绍这些问题，做为工程应用的基础。

第一节 岩石力学性质及其离散性

一、岩石的力学指标和影响因素

在工程界，在进行岩石工程设计或稳定性分析时，最常使用的岩石性质指标有：单轴抗压强度 R_c 、抗拉强度 R_t 、抗剪强度 R_s （或岩石内摩擦角 ϕ 、内聚力 C ）、岩石弹性模量 E 和泊松比 μ 等等。这些指标都是通过测试获得的。

实验证实，岩石各种力学指标的测试数据往往比较分散。如果用统计方法来说明，岩石力学指标的偏差系数 C_v 通常为 15~30%，有的甚至更高。这种情况是因岩石力学性质受多种因素影响。这些影响因素主要有以下几方面。

1. 岩石本身方面

组成岩石矿物成分、结构与构造等等都要影响岩石的性质。一般来说，矿物成分强度高、颗粒均匀、组织致密、胶结好以及含微裂隙和孔隙少的岩石，其强度大、弹性模量高，属于质量好的。

在此类因素中，岩石的孔隙度、裂隙（或层理）对岩石强度有决定性影响。例如，含微斜长石花岗岩，如果其孔隙度和裂隙由 0.6% 增加到 1%，单轴抗压强度 R_c 由 240MPa 降到 180MPa；孔隙度增到 3% 时， R_c 下降到 110MPa，相应的内摩擦角 ϕ 由 60° 减到 41°，内聚力 C 值由 1.3MPa 降到 0.1MPa。

实验结果证明，岩石抗压强度与孔隙度之间有图 1-1 所示的关系。

当孔隙度 $n \leq 20\%$ 时，岩石抗压强度 R_c 与 n 之间，有

$$R_c = R_{c0}(1 - a'n)^2 \quad (1-1)$$

式中 a' —— 孔隙空间形状系数，在 1.5~4 之间；

R_{c0} —— 岩石中矿物相的强度。

2. 环境因素方面

岩石生成条件，以及湿度、温度及风化等大气环境条件等，均将影响到岩石性质。在高温高压条件下生成的岩石，比较致密，强度高。

水对岩石性质有显著作用。水分子浸入，可改变岩石物态，削弱颗粒间联结力，致使岩石强度降低，岩石变形能力增加。例如，浸水后的大理岩变形增大 1 倍，粘土质砂岩变形增大 2 倍。

实验证实，石英岩饱水状态时的弹性模量比干燥状态时下降 30~40%。此外，水还

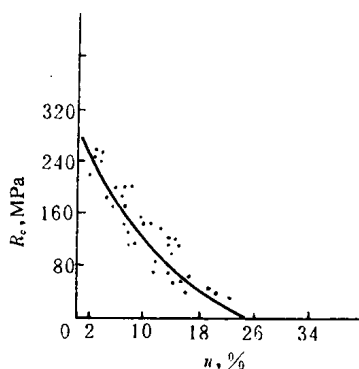


图 1-1 岩石抗压强度 R_c 与孔隙度 n 的关系

会使岩石蠕变性增加，岩石硬度、脆性降低。如果水与组成矿物发生化学反应，则岩石性质会更恶化，可引起岩石膨胀、崩解等现象。

风化作用对岩石也有明显影响。风化可破坏原有岩石的组织结构，致密的变成疏松的，岩石的力学性质发生很大变化。例如，未风化的花岗岩，其抗压强度在 100MPa 以上，全风化花岗岩抗压强度降至 4MPa 以下。

岩石风化程度可分成五级，即未风化、微风化、弱风化、强风化和全风化。其级是如何划分的，在工程地质中有介绍。

岩石风化程度还可以用风化程度系数 K_y 来表示，它说明风化作用使岩石强度被削弱的程度。

$$K_y = \frac{R_{cd}}{R_{cf}} \tag{1-2}$$

式中 R_{cd} ——干燥风化岩石的抗压强度；
 R_{cf} ——干燥未风化岩石的抗压强度。

3. 试验技术方面

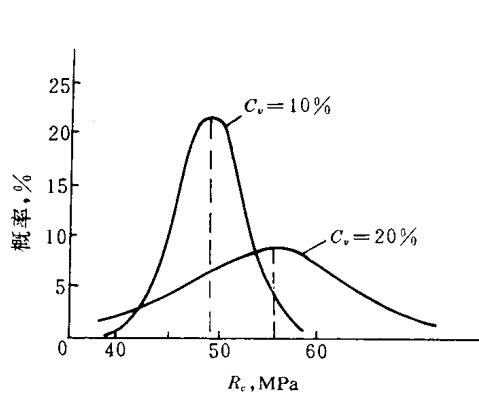


图 1-2 不同岩石强度试验的分布及离散性

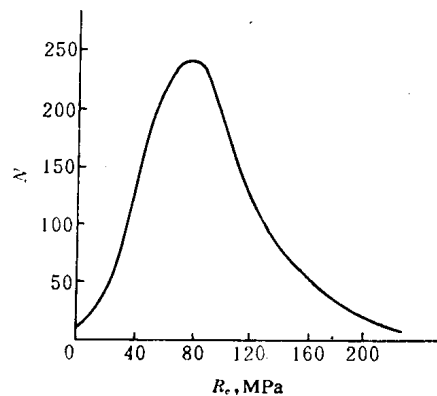


图 1-3 阿尔泰金属矿区抗压强度分布曲线

试验中，试件形状和尺寸、试件加工质量、试件端面与试验机压头接触情况以及加载速率等都影响到试验结果。这方面的因素是可控制的，国家已有岩石试验规程可遵循。

由上述可知，同种岩石其性质有差别就不足为奇了。岩石性质的离散性也是客观存在的属性。问题是如何减少力学指标的离散性，以及在实际应用中如何正确地反映出来。

测试数据的离散性用数理统计中的偏差系数来描述。偏差系数 $C_v = (\sigma/\bar{X}) \times 100\%$ ，(σ ——均方差， $\bar{X}$ ——算术平均值)，表明测试数据与平均值的相对误差。

图 1-2 中，表示两种岩石单轴抗压强度试验结果的分布情况。第一种岩石的抗压强度平均值 $\bar{R}_c = 47\text{MPa}$ ， $C_v = 10\%$ ；第二种岩石的 $\bar{R}_c = 56\text{MPa}$ ， $C_v = 20\%$ 。后者的平均强度比前者高，但出现破坏的概率分布较宽，也就是岩石发生破坏的可能性大。例如，当应力为 33MPa 时，第一种岩石的破坏概率为 0.1%，而第二种岩石的破坏概率为 2% 左右。因此，在使用岩石性质测试结果时，不仅要看其平均值的高低，而且要了解数据的离散程度如何。有的可靠性分析法，已全面考虑了岩石的这种属性，把离散系数纳入到误差估计之中。

二、岩石性质指标的分布特性

为了便于工程管理或进行岩体分级，了解一个地区或一个矿山中矿、岩力学性质的分

布特征是很必要的。可用横坐标表示岩石的某一力学参数，纵坐标表示该物理量的试件数目，构成直方图（或频率分布曲线），来展示该物理量的分布状况。例如，图 1-3 是阿尔泰金属矿区岩石抗压强度的分布曲线，它说明该地区多数岩石处在 40~120MPa 之间。

东北大学岩石分级科研组，依据大量的岩石物理力学性质试验数据，探讨了它们的分布特性。图 1-4 是岩石点荷载强度 I_s 的样本直方图和分布曲线。

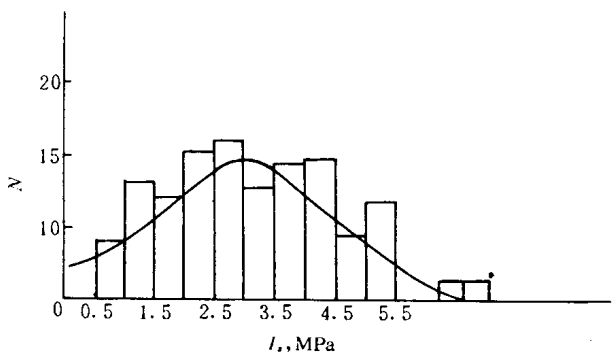


图 1-4 岩石点荷载强度的样本分布

经统计检验该曲线属于正态分布的韦泊分布。由此得出岩石点荷载强度 I_s 和单轴抗压强度 R_c 的概率密度函数 $P(x)$ 和分布函数 $F(x)$ 分别是

$$\left. \begin{aligned} P_{I_s}(x) &= 0.009x^{1.9}e^{-0.003x^{2.9}} \\ P_{R_c}(x) &= 0.00012x^{1.2}e^{-0.0006x^{2.1}} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{I_s}(x) &= 1 - e^{-0.003x^{2.9}} \\ F_{R_c}(x) &= 1 - e^{-0.0006x^{2.1}} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

对岩石性质的总体分布研究，为在以后的岩体分级中选用多元回归分析和判别分析等数学手段，奠定了基础。例如，使用多元回归时要求样本总体符合正态分布；在采用判别分析时，如果样本分布特征不一样，采用的运算公式也不同。

三、岩石力学性质的相关性

从对岩石试验结果的分析中可以发现，岩石力学指标之间存在某种程度上的相关性。例如，抗压强度高的岩石，其抗拉强度也高，岩石的 C 、 ϕ 及弹性模量也都大，这反映了岩石性质中的内在规律性。研究和认识这种规律是有实际意义的：其一，可以根据已知物理参数去估计其它参数，用易量测的力学指标去推断难测的，以满足工程应用的需要；其二，可以检验试验资料的可靠性。

岩石性质的相关性表现在两方面：理论上和统计上的相关性。

1. 理论上的相关性

按照莫尔—库伦强度理论，岩石的三轴抗压强度 R_c^* 和 R_c 、 C 、 ϕ 等力学参数之间有下列关系

$$R_c^* = R_c + k\sigma_3 \quad (1-5)$$

式中 σ_3 ——围岩；

$$K = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \frac{R_c}{R_t} \quad (1-6)$$

而且，抗压强度 R_c 和抗拉强度 R_t 分别为

$$R_c = \frac{2cc\cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad (1-7)$$

$$R_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (1-8)$$

在低围压下 ($\sigma_3 < \frac{1}{2} R_c$)，利用上述关系，由 R_c 和 R_t 就可以推断出不同围压下的岩石三轴抗压强度。在围压较高时，因强度曲线斜率减小，系数 K 要取小值。

Z·T·Bieniawski 提出确定岩石三轴强度的另一种方法，即

$$\frac{R_c^*}{R_c} = A \left(\frac{\sigma_3}{R_c} \right)^m + 1 \quad (1-9)$$

式中 A 、 m ——与岩石有关的常数，通过试验确定；一般情况下，

$m = 0.75$ ， $A = (3 \sim 5)$ ，而且，岩石愈硬， A 值愈大；

R_c^* ——岩石三轴抗压强度。

2. 统计上的相关性

对岩石各种力学指标的试验数据统计分析，并用相关系数来评价力学指标之间相关程度，可以发现有下列关系

$$R_c = (10 \sim 20) R_t \quad (1-10)$$

依据实验资料得到岩石单轴抗压强度与弹性模量之间有

$$R_c = 3.75 \times 10^{-3} E \quad (1-11)$$

此外，岩石中弹性纵波速度与抗压强度和抗拉强度之间也存在广义的相关性。

统计中的岩石相关性，不能理解为一个参数与另一个参数之间有因果关系。当两个本不相关的量都取决于第三个因素的参数时，也表现出相关性。有的物理参数还具有多重相关性。

依据岩石组成与物理参数之间相关性研究得知：

(1) 两个物理参数与岩石组成矿物和岩石结构存在相同依赖关系时，它们之间才有紧密的相互关系；

(2) 如果两个物理参数与岩石组成矿物和岩石结构存在不同依赖关系，则只能表示一个参数随另一个参数的变化范围；

(3) 如果岩石组成矿物近似一致，而岩石结构有显著变化时，则物理参数之间的相互关系随意性较大。

第二节 岩石点荷载强度与应用

点荷载强度试验是一种利用便携式小型设备，在现场测定岩石或其它材料强度的试验方法。

一、岩石点荷载试验类型与发展状况

从本世纪 70 年代起，岩石点荷载试验以其简便、易掌握、成本低等优越性，得到广泛应用。根据试件形状和加载方向，岩石点荷载强度试验有四种类型，如图 1-5 所示。

(1) 岩芯径向试验。试件尺寸 $\phi 50 \sim 70 \text{mm}$ ，长度 $L = (1 \sim 1.5) D$ (D 加荷点间距)，沿岩芯径向加载。

(2) 岩芯轴向试验。试件 $\phi 50 \sim 70 \text{mm}$ ，长度 $L = (0.3 \sim 1.0) D$ ，沿轴向加载。

(3) 规则块体（方块）试验。试件宽 $b = 50 \sim 70 \text{mm}$ ，厚度与宽度之比 $t/b = 1$ ，长度 $L = b$ ，加载沿厚度方向进行。

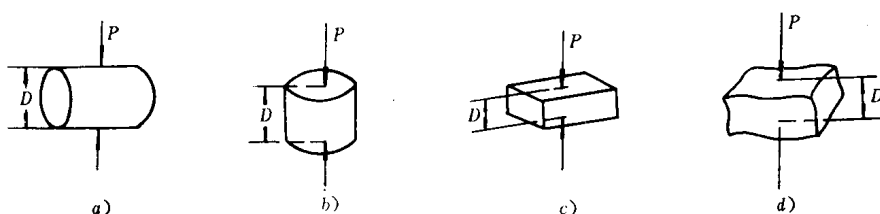


图 1-5 岩石点荷载试验类型

a) 岩芯径向试验; b) 岩芯轴向试验; c) 规则岩块试验; d) 不规则岩块试验

(4) 不规则块体试验。试件尺寸要求与规则试块相同, 只是形状是非规整的, 随意采取的, 但两个相对的受载面应大致平行。不规则块体的试件无需加工, 又可在一定程度上保持其天然含水状态, 更适合于现场用。

自点荷载试验方法问世以来, 国内外对试验原理, 试验技术(设备、试件形状尺寸效应等)和试验数据处理方法问题都进行了广泛地研究。国际上已有试验方法规定, 推荐使用。我国成都地质学院、铁道部第二勘测设计院等单位也做了大量研究工作, 取得新成果。目前, 在适用于大尺寸试件的设备, 在软岩中应用点荷载试验等方面, 尚需进一步研究。

二、ISRM 法

ISRM 法是国际岩石力学学会试验方法委员会推荐的“测定点荷载强度建议方法”(1985 年修订)的简称。

在由前述四种试验方法取得试验数据之后, 按 ISRM 法确定岩石点荷载强度指数的步骤如下。

1. 计算各试件未修正的点荷载强度指数 I_{ch}

$$I_{ch} = \frac{P}{D_e^2} \quad (1-12)$$

式中 P ——破坏荷载;

D_e ——等价直径。

对于岩芯径向试验, $D_e^2 = D^2$ 。

对于岩芯轴向、规则块体和不规则块体试验, 有

$$D_e^2 = \frac{4A}{\pi}, A = WD \quad (1-13)$$

式中 A ——通过加荷器接触点的最小横截面积;

W ——横截面的平均宽度。

2. 尺寸修正

试验证实, I_{ch} 值不但与试样形状有关, 而且是试件尺寸 D_e (或 D) 的函数。为了便于比较, 获得一致性的点荷载强度指数, 必须进行尺寸修正。以岩芯直径 $D=50\text{mm}$ 为标准, 修正后的点荷载强度指数用 $I_{s(50)}$ 表示, 则

$$I_{s(50)} = FI_{ch} \quad (1-14)$$

式中 F ——尺寸修正系数, 由修正曲线或下式确定

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45} \quad (1-15)$$

也可近似表示为

$$F = \sqrt{\frac{D_c}{50}} \quad (1-16)$$

注意，式 1-15 和式 1-16 式中的 D_c 单位均为 mm。

3. 平均值的计算

一组岩石的点荷载强度指标，依据各个试件的 $I_{s(50)}$ ，用切尾平均法确定。当一组岩石试件数 $n > 10$ 时，去掉两个最高值和两个最低值，余下的各试件 $I_{s(50)}$ 的算术平均值就是该种岩石的点荷载强度指标。如果试件数 $n < 10$ ，则去掉一个最高值和一个最低值，再求余下试件的 $I_{s(50)}$ 平均值即可。

三、点荷载试验结果应用

1. 估算岩石强度

大量的试验证实，岩石点荷载强度与岩石抗压强度和抗拉强度之间有良好的相关性。*ISRM* 法给出了下列关系

$$R_c = (20 \sim 25) I_{s(50)} \quad (1-17)$$

$$R_t = 1.25 I_{s(50)} \quad (1-18)$$

我国铁道部第二勘测设计院根据 743 组不同强度的岩石点荷载试验，认为岩石点荷载强度指数与岩石单轴抗压强度之间符合幂函数的相关关系，即

$$R_c = 22.819 I_{s(50)}^{0.745}, \text{ 相关系数 } r = 0.90 \quad (1-19)$$

在“工程岩体分级标准”的制定中，在试验方法事先没有协调的情况下，从 103 个岩石工程所给出的 R_c 和 $I_{s(50)}$ 数据的回归中得到下列关系

$$R_c = 15.8 + 12.27 I_{s(50)}, r = 0.706 \quad (1-20)$$

说明在这种情况下，岩石的 R_c 和 $I_{s(50)}$ 之间仍然存在良好相关性。正因为如此，用 $I_{s(50)}$ 来估计岩石强度有广泛的实验基础，是可行的。

2. 用于岩石强度或岩体稳定性分级

由于点荷载试验方法简便，很适合于以分级（或分类）为目的的研究，所以很多岩石分级方法都采用点荷载强度做为分级指标之一。

3. 其它方面应用

岩石点荷载试验还用于岩石风化程度的划分，用于岩溶、地貌、第四纪地质等方面的研究。

第三节 岩体力学性质与工程特征

岩体是在漫长的地质历史和环境形成的。岩石与岩体本质上是一个东西，要说有区别的话，就在于岩体中存在产状、性质、组成体系各异的结构面。因此，岩体表现出与岩块不同的力学性质。一般来说，岩体比岩块易变形、强度低。本节将从工程需要出发，着重探讨岩体流变性、长期强度及各向异性等问题。

一、岩体流变

在岩石工程中，岩体随着时间的迁移，表现出蠕变、松弛等流变现象是比较普遍的，特别是软弱岩体更加突出。岩体流变与岩块流变的不同点就在于结构面参与流变过程。因此，把表示岩块流变特征的力学模型（如开尔文模型、伯格斯模型，等等）直接用于说明岩体

流变特性，显然是不合适的。目前，岩体流变模型正在研究，而比较多的是通过岩体试验，探讨岩体流变参数和特性。这类试验有现场承压板流变试验、孔洞试验、三轴蠕变试验以及岩体抗剪流变试验等。

1. 承压板法

采用现场测试岩体变形模量相同的方法做岩体蠕变试验，目的是得到表征岩体蠕变参数。此类试验装置中，为保持载荷长期稳定，在加压的液压系统中要设置稳压器。载荷分级逐渐施加。在每一分级载荷保持恒定的条件下，观测承压板下岩体的纵向变形，绘制出变形与时间关系的蠕变曲线。

图 1-6 是在二辉橄榄岩中进行蠕变试验时得到的现场蠕变试验曲线。

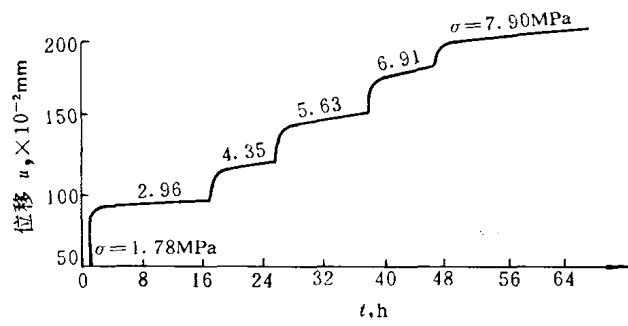


图 1-6 现场蠕变试验曲线

在假设该岩体的蠕变模型为“中村体”的情况下，承压板下岩体垂直位移（纵向变形）的蠕变方程式为

$$W = \frac{mbQ(K_{t1} + K_{t2})}{4K_{t1}K_{t2}} + \frac{3mQb(K_{t1} + K_{t2})}{4[3X(K_{t1} + K_{t2} + K_{t1}K_{t2})]} - \frac{mQb}{4K_{t1}}e^{-K_{t1}\frac{t}{\eta_1}} - \dots \quad (1-21)$$

- 式中
- b —— 方形承压板边长；
 - Q —— 作用的垂直应力；
 - K_{t1} 、 K_{t2} —— 弹性系数；
 - η_1 —— 粘滞性系数；
 - m —— 与板形状和刚度有关的系数；
 - $X = \frac{E}{3(1-2\mu)}$ ；
 - E —— 岩体变形模量；
 - μ —— 岩体泊松比；
 - t —— 时间。

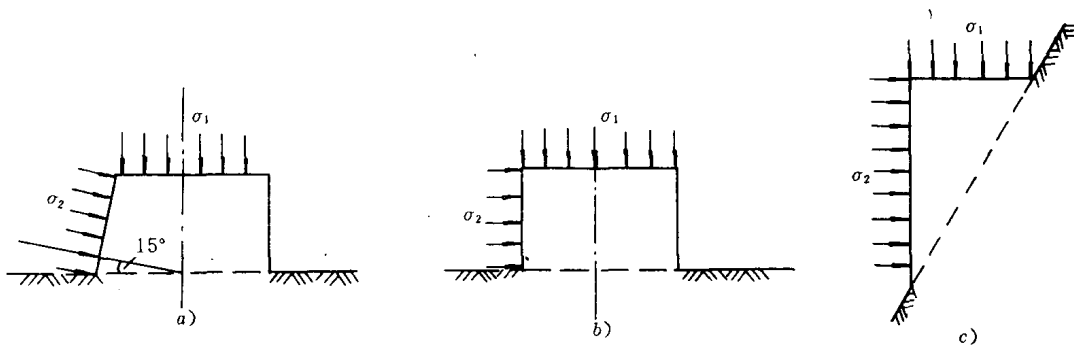


图 1-7 岩体剪切流变试验

a) 斜推法；b) 平推法；c) 斜面剪切法

在 $t \rightarrow 0$ 和 $t \rightarrow \infty$ 时，从试验蠕变曲线上截取各级应力增量 ΔQ ，相应的位移增量 ΔW 及时间增量 Δt ，用式 1-21 求得与此岩体有关的蠕变特征参数 K_{t1} 、 K_{t2} 和 η_1 的值。

2. 剪切流变试验

对岩体或沿岩体结构面进行剪切流变试验的目的是确定岩体的流变特征和长期强度。

试验在专门洞室中进行。试验岩体有图 1-7 所示的三种形式。剪切面为水平时，采用斜推法或平推法（图 1-7a、b）；剪切面为倾斜时，用图 1-7c) 的加载方法。

作用在试体上的垂直荷载和水平荷载的加压系统中都有稳压装置，使千斤顶（或油压枕）有恒定出力。

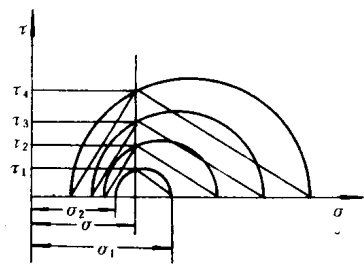


图 1-8 陡倾剪切面荷载施加方法

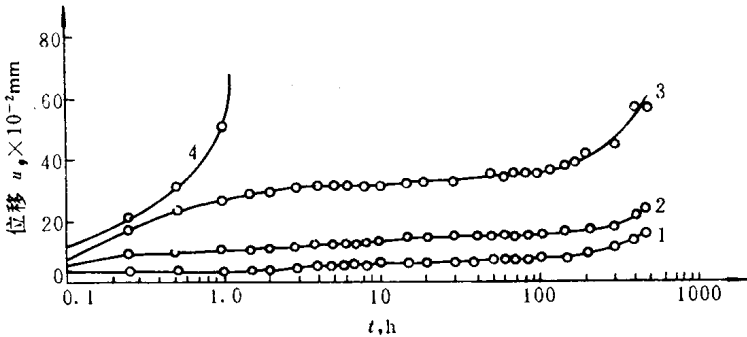


图 1-9 大理岩剪切流变试验

1— $\tau=0.68$, $\sigma=2.19\text{MPa}$; 2— $\tau=1.11$, $\sigma=2.18\text{MPa}$;
3— $\tau=1.90$, $\sigma=2.17\text{MPa}$; 4— $\tau=1.98$, $\sigma=2.15\text{MPa}$ 。

在斜推法与平推法试验中，垂直荷载保持常数，水平荷载分级施加，每级观测时间 1~10 天不等。

在剪切面为陡倾的情况下，为保持剪切面上正应力 σ 为常数，而剪应力 τ 是等量增加的，所以试体上的垂直应力 σ_1 和水平应力 σ_2 应按图 1-8 所示的方法进行加载，使 σ_1 和 σ_2 有一定对应的关系。

图 1-9 为大理岩含陡倾结构面时做剪切流变试验得到的流变曲线。可以看出，不同应力水平下的流变曲线虽不尽相同，但都经历三个阶段：

- 第一阶段 初期流变速度随时间递减，称减速流变阶段；
- 第二阶段 在经历第一阶段之后，流变速度保持常量，称等速流变阶段。
- 第三阶段 经过等速流变之后，流变速度增加，出现加速流变，试体最终被剪断，称为加速流变阶段。

岩体流变过程的不同阶段，反映岩体中结构体和结构面经历复杂的力学过程。

3. 岩体的长期强度

岩体剪切流变试验及岩体三轴压缩试验得到的流变曲线都有相似的特征，即岩体在荷载大、加载快时，进入加速流变(或破坏)的时间短；相反，荷载小、加载慢时，进入加速流变时间长。岩体经历流变到达加速流变段所对应的起始应力，称为岩体的长期强度。作用在岩体上的应力低于长期强度时，岩体只发生流变变形，不会破坏；高于长期强度，则岩体经历流变后发生破坏。显然长期强度是岩体的重要力学参数，是大型永久性岩石工程设计所必不可少的。

岩体长期强度目前只能依赖于岩体试验获得。岩石和岩体的力学试验证实，岩石或岩体的长期强度与它们的瞬时强度有一定关系。表 1-1 列出了某些岩石的长期抗压强度

表 1-1 某些岩石的长期强度

岩石名称	R_{∞} (MPa)	R_c (MPa)	R_{∞}/R_c
石灰岩	28	38	0.74
砂岩	49	76	0.64
粘土页岩	15~18	30~40	0.5~0.65

R_{∞} 与瞬时抗压强度 R_c 。

从我国大冶铁矿、抚顺煤矿和 330 工程提供的资料中得知，岩体结构面的长期抗剪强度，为结构面快剪试验时抗剪强度的 0.8 左右。

因此，有根据地说，岩体长期强度 $R_m^{\infty} = (0.6 \sim 0.8) R_m^0$ ，(R_m^0 ——岩体瞬时强度)。

二、岩体的各向异性

岩体性质的各向异性是岩体主要特征之一。从微观上说，岩石的组织结构是非均匀的，就像花岗岩这样的岩石也表现出各向异性，只不过各向异性程度较小，在工程中视为各向同性材料。从宏观上看，岩体中结构面的组合、交切，导致岩体各向异性，在层状岩体中尤为突出。在这种情况下，再把本是各向异性的岩石视为各向同性，必然造成重大误差。研究岩体各向异性的方法是试验。

1. 岩体各向异性性质

在单向应力状态下，岩体中只有一组结构面时，结构面产状与岩体抗压强度的关系，如图 1-10 所示。可以看出，结构面倾角为 0° （载荷垂直结构面）时，岩体抗压强度最大；倾角为 $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ （ ϕ ——结构面内摩擦角）时，岩体强度最低。

在载荷平行层理时，抗拉强度最大，载荷垂直层理时抗拉强度最小。此外，岩体的变形模量也表现出明显的各向异性。

当岩体中存在两组结构面时，岩体强度不是两组结构面力学效应之和，而是受强度最低一组的控制。

若岩体内有多组结构面时，岩体强度的各向异性程度显著降低，趋于各向均匀，只不过此时的岩体强度更低些。

在三向应力状态下，在低围压时，岩体强度的各向异性也较突出。随着围压增加，这种结构面产状的力学效应逐渐减弱。在高围压条件下，无论结构面产状如何，岩体强度值趋于单一。有的研究者认为，围压达到单轴抗压强度的 $\frac{1}{2}$ 左右，各向异性就消失了。

由上述可知，岩体的各向异性不仅取决于结构面产状，还与应力状态，应力值大小以及结构面组数有关。因此，在分析各向异性影响时，不能离开具体条件。同一种岩体，在不同环境中各向异性表现是不一样的。

2. 各向异性指标

通常，用各向异性系数 n_{aH} 来表示岩体的各向异性

$$n_{aH} = \frac{R_{\perp}}{R_{\parallel}} \quad (1-22)$$

式中 n_{aH} ——各向异性系数；

$R_{\perp}$ ——载荷垂直层理时的强度；

$R_{\parallel}$ ——载荷平行层理时的强度。

n_{aH} 可能 >1 ，也可能 <1 ，这取决于岩体强度类型，是拉伸还是受压。

用式 1-22 表示各向异性未免太简单了。实际上，工程岩体中各点强度是不一样的。下面将给出各向异性系数的普遍形式。

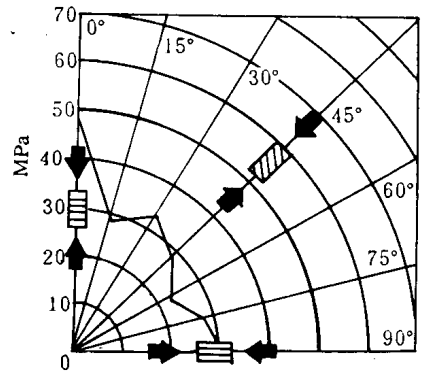


图 1-10 岩体强度随岩层倾角变化