

345

高等学校教学参考书

岩石的 工程 性质

汪 浩 译

中国矿业大学出版社

ngineering
Behaviour

103435

TU44
#63

高等学校教学参考书

岩石的工程性质

〔英〕I. W. 法默 著

汪浩 译 朱效嘉 校

中国矿业学院出版社

*Engineering Behaviour
of Rocks*

I. W. FARMER

LONDON NEW YORK
CHAPMAN AND HALL

1983

岩石的工程性质

(英) I. W. 法默 著

汪浩 译 朱效嘉 校

中国矿业学院出版社 出版

江苏省新华书店发行 中国矿业学院印刷厂印刷

开本850×1168毫米1/32 印张6.625字数164千字

1988年7月第一版 1988年7月第一次印刷

印数：1—3000册

ISBN 7-81021-039-4

TD·23

定价：1.10元

内 容 提 要

本书是一本综合论述岩石工程性质的专著。内容包括岩石的工程特性描述、应力—应变关系、岩石的变形、破坏、屈服和时效特征，以及岩体中的不连续面和岩体的性质。

本书的特点是作者严格根据实验资料，对岩石的工程特性进行综合描述。书中列举了大量有价值的图表、资料 and 作者本人的分析、研究成果。在内容的编排上有新颖独到之处。全书篇幅不大，简单明了、相当全面地介绍并解释了岩石的变形、破坏和屈服过程；以及岩石的微观和宏观力学机理。本书在岩石的时效和破坏后性态的研究，在用土力学屈服准则处理岩石力学问题、用岩体质量综合评述指导工程实践等方面反映了国际最新技术和水平，值得国内借鉴。由于作者十分重视这些知识在设计和实践中的应用，因此本书不仅是采矿工程、地下建筑、岩土工程、水电工程、铁路建全、地质工程等专业师生和研究生的教学参考书，而且对于在上述工程领域中从事科研，设计和施工的工程技术人员也很有参考价值。

责任编辑：吴秀文

译者序

“岩石工程性质”(Engineering Behaviour of Rocks)是1983年国外新版(第二版)的一本综合论述岩石工程性质的专著。本书自第一版(1979)出版后一直受到普遍的欢迎。

作者 Ian. W. Farmer 博士原为英国纽卡斯尔大学教授,现为美国里桑那大学采矿与地质工程系教授,国际“采矿工程”杂志主编。Farmer 教授在岩石力学、土力学和采矿工程方面都具有丰富的理论和实践经验,他是“工程地质原理”的作者之一,还著有“煤矿地下结构”等。对于他在本书翻译过程中给予热情帮助和指导深表感谢。

本书由朱效嘉副教授审校,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。译者同时感谢所有对本书的翻译工作给予帮助和鼓励的师长和同事,并希望本书的出版能有助于国内同行在岩石力学方面的研究。

请读者对译本不妥之处予以指正,不胜感谢!

译者 1987.6

前 言

本书第一版的书名为《岩石工程特性》，出版后得到了较好的评价。这次再版，书名改为《岩石的工程性质》，其任务与第一版是一致的，但除了一至二章之外，内容都作了很大的变动。本版的主要特点是严格根据实验资料来描述岩石的力学性质，并用以解释岩石是如何变形、破坏和屈服的，同时还对如何在设计中运用这些知识进行了阐述。书中的后面几章虽然考虑了影响岩体性质的岩石不连续性，但重点仍是介绍作为材料的岩石的性质。

本版能在第一版的基础上得到改进是和许多专家的建议分不开的。这里我想特别感谢 Petter Attewell 和 Roy Scott，同时也感谢 Tony Price 和 Mike Gibert，感谢他们为我提供了纽卡斯尔大学的一些试验资料。

I.W.法默

1982年9月于纽卡斯尔

目 录

第一章 岩石的工程特性描述	1
第一节 岩石试验	3
第二节 单轴或无侧压强度	6
第三节 现场和实验室试验	14
第四节 孔隙率和渗透率	18
第五节 岩石的不连续性	24
第二章 应力与应变	32
第一节 一点的应力	32
第二节 孔隙压力与有效应力	36
第三节 一点的应变状态	41
第四节 应力与应变的表示方法	42
第五节 应力与应变的关系	46
第六节 原岩应力	50
第七节 原岩应力的量测	53
第三章 岩石的变形	58
第一节 岩石压缩试验	58
第二节 岩石压缩变形	63
第三节 微裂机理	68
第四节 岩石的宏观裂隙	73
第五节 岩石变形的全过程曲线	75
第四章 岩石的强度和屈服	79
第一节 岩石强度准则	79
第二节 屈服准则	83
第三节 临界状态概念	87
第四节 三轴试验	92

第五节	轴向应变与体积应变	95
第六节	岩石的 Hvorslev(伏斯列夫)屈服面	111
第五章	时间效应	117
第一节	蠕变应变	117
第二节	蠕变本构模型	123
第三节	时效变形	125
第四节	时效引起的强度降低	129
第五节	循环加载	135
第六节	快速加载	137
第六章	岩体中的不连续面	141
第一节	不连续面的测量	142
第二节	不连续面定向资料	146
第三节	含有不连续面岩石的抗剪强度	148
第四节	不连续面的抗剪强度	157
第五节	岩石不连续面强度的临界状态模型	163
第六节	不连续面抗剪强度的量测	164
第七章	岩体的性质	166
第一节	不连续面频度	166
第二节	岩体分级系统	170
第三节	岩体强度准则	182
第四节	岩体强度的关联因素	184
参考文献		189

第一章 岩石的工程特性描述

地质学家将自然界的地表岩土材料统称为岩石。而工程师则将它们区分为岩石和土壤。工程师特别注意区分在开凿地下结构时岩石和土壤对力的不同反应。研究土壤对力的反应的科学称为土力学，研究岩石对力的反应的科学称为岩石力学。

岩石和土都是由矿物和有机质颗粒组成，前者的颗粒是粘结或胶结在一起的。在无侧压的情况下，岩石的剪切变形必须首先克服初始屈服阻力。同样情况下的土却不具有这种“真的”抗剪阻力，只要有一个非常小的能量作用，就能使它破坏。

土的力学性质往往和它的矿物组分密切相关。尽管地壳表面约有 2000 种矿物存在，但整个岩石体积约 99% 是由硅酸盐类组成。在基本硅酸盐结构中，可以认为只有“石英”这种矿物对地质环境中岩石的风化作用有较大的抵抗能力。其他大多数矿物，如火成岩的原生矿物在风化过程中则因化学变化而形成粘土矿物。它们主要是含水硅酸铝，是由云母和长石蚀变而生成的。

因此可以简单地将风化过程的最终产物——沉积物看作是由两种主要物质组成，即石英和粘土矿物。石英颗粒往往是块状和大小相等的，通常大于粉砂粒径（大于 0.06mm），例如粉砂、砂或砾石就主要是由石英颗粒组成的沉积物。粘土矿物颗粒一般很小（小于 0.002mm），呈扁平小片状，这种矿物占很大比例的沉积物称为粘土。

由于沉积岩包括了软弱岩石，所以在工程上应给予足够的重视。尽管在沉积过程中，诸如重新结晶、置换、微溶和变异等也可能发生，但它们主要是由沉积物的压缩和胶结形成的。这些过程通常称为“成岩作用”。它们是由于温度和压力的变化在新的沉积物之下形成了沉积岩层。Krumbein（克鲁宾，1942）总结由成岩作用导致的主要变化如下：

a、颗粒的大小——特别是细颗粒沉积物，可能由于重新结晶、胶结或变质而增大。

b、颗粒的形状——可能通过溶解和重新结晶而逐渐变圆。

c、颗粒的排列方向——在压缩和重新结晶的过程中可能产生变化。通常它取决于颗粒的形状和水的含量。

d、孔隙率和渗透率——通常由于压密、胶结、溶解和重新结晶而减小。

e、结构——随材料从自由流动的沉积物变成脆性固体的过程而变化。

沉积物的矿物成分也可能在成岩过程中发生变化，但一般可以认为沉积岩的矿物成分和原始的沉积物是很相近的。因而页岩和泥岩的主要成分是粘土矿物，而砂岩、粗砂岩通常由石英颗粒经碳酸盐或粘土矿物成分胶结而成。根据沉积情况的不同，砂岩也会含有很多粘土矿物，而页岩也会有很高的石英成分。

专门名词的正确定义是十分重要的。对于土和岩石来说，会由于“材料”本身和由其组成的“集合体”的概念不同而产生混淆。“材料”的形式即通常在实验室见到的某种土或岩石，它们或者是由分散的颗粒组成（如土），或者是由内部颗粒粘结在一起而形成的整体试样（如岩石）。这就是作为“材料”而言的土和岩石的基本不同之处。虽然吸引力和其他力可使土的试样结合在一起，但它仍然是一种“散体”。而岩石中的颗粒则是胶结或粘结在一起的，换言之，岩石具有真正的凝聚力而不是仅仅具有视凝聚力。

岩石和土的“集合体”形式和它们的“材料”形式是根本不同的。“土体”往往是层状的，它们的力学反应和渗水能力随不同的土层而变化。“土体”的性质是可以由实验室的试验结果细心进行推断的（参看 Rowe（罗欧），1968）。在一定条件下，土体还可以作为连续介质来考虑。岩体通常也是层状的，但重要的是它被裂隙和节理所分割。这就意味着岩体对力的反应有时取决于裂隙体的不连续性质，而不决定于材料本身的特性。

因此岩石力学就应该同时在整体岩块和不连续岩体中研究岩

石的变形和破坏。然而在习惯上或一般情况下,岩石的工程性质往往是根据它们作为材料所起的作用来描述的。因此,首先考虑某些岩石的简单受力试验将十分有用,因为这可以用来说明和比较它们的工程反应。

第一节 岩石试验

因为本书第一版所用的书名是“岩石的工程特性”,所以审度“特性”这个词的使用是十分重要的。《牛津简明英语字典》解释“特性”这个词为:“一个人或一件事的独特品质或特性”。因此,“岩石的特性”应当是指它自身的物理组成或试验状态下的力学反应。但是应该注意到:实验室试验条件下得到的岩石特性是和试验条件有关的,例如用一个圆柱形试件进行无侧压单轴抗压试验,在高径比为 0.3 和高径比为 3 这两种情况下,所得到的结果是不同的(图 1-1)。

所以,岩石的基本力学性质不能用某种岩石的材料特性常数来表示。许多形式的标准试验提供了岩石特性的有用指标,以便与在相似条件下试验的其它岩石进行比较。尽管有些包括矿物的组分和物相关系的基本物理性质,没有多大工程意义,但也可作为材料的特性常数来考虑。

确定试验的项目和试验方法必须适宜。在现有的许多试验方法中,美国材料试验学会(ASTM)的方法是最完整的。最近,国际岩石力学学会(ISRM)又制定了一系列“建议方法”(Brown(布朗),1981)对 ASTM 试验方法进行了补充。为统一起见,将推荐的试验项目列于表 1-1 中。

对后面阐述的一些实验室试验的特殊方法和现场测定方法,本书不准备过于详尽地研究。就实验室试验而论,试验的主要目的有三个:

- (a) 提供岩石物理特性和力学反应基本数据。
- (b) 提供特定岩石与其他岩石相比较的指标,以便对岩石进

行分级或描述。

(c) 提供进行岩石结构设计所需的资料。

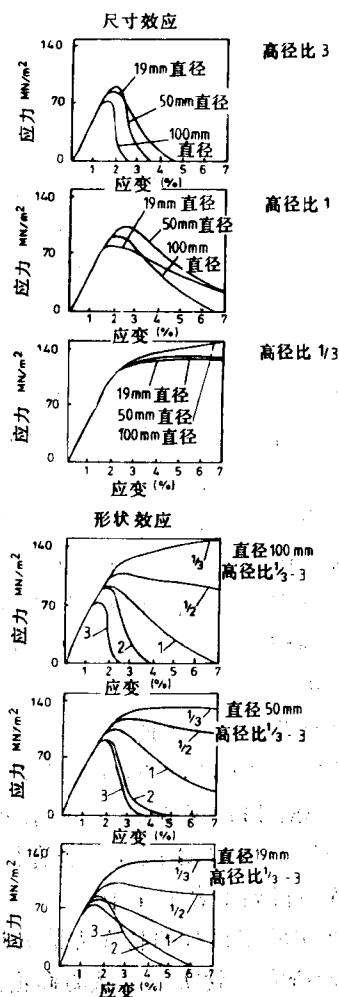


图 1-1 Georgia Cherokee 大理石在应变速率为 10^{-3} s^{-1} 时的单轴抗压试验中，由高径比 (L/D) 表示的试件形状和由圆柱形试件直径表示的试件直径对变形特征的影响 (Hudson (赫德森) 等人, (1971))

表 1-1 岩石试验项目(Brown,1981)

1. 实验室试验

(a) 分级

- (i) 密度、湿度、孔隙率、吸水率
- (ii) 单轴抗拉和单轴抗压强度以及变形特征
- (iii) 各向异性指数
- (iv) 硬度、耐磨性、磨耗性
- (v) 饱水性
- (vi) 膨胀和崩解耐久性
- (vii) 声速
- (viii) 微观岩相描述

(b) 工程设计

- (i) 三轴抗压强度和变形特征
- (ii) 直剪试验
- (iii) 时间效应和塑性流动特性

2. 现场调查和试验

(a) 特征描述

- (i) 不连续面的方向、间距、粗糙度、几何形状等
- (ii) 岩芯采取率, RQD, 裂隙频度
- (iii) 原岩声速
- (iv) 地球物理钻孔测井

(b) 工程设计

- (i) 平板和钻孔可变形性试验
- (ii) 直剪试验
- (iii) 现场饱水能力测量
- (iv) 原岩应力确定
- (v) 地下结构物开挖后围岩移动监测
- (vi) 原岩单轴、双轴和三轴抗压强度

Brown 所介绍的某些试验, 使用过于复杂, 而设计岩石中的结构经常更多的是依靠现场测量和试验的结果, 而不是根据实验室试验资料。目前越来越强调大量采用快速现场试验来提供岩石受力反应的指标, 而不是用特定试验来提供详细数据。

在表 1-1 列出的实验室试验中, 测定物理特性的有关方法 (1

(a) (i) 和 (v)) 将在后面讨论。在余下的试验中, 最重要的是描述强度和变形的试验。这里首先应当指出所有表 1-1 列出的试验都是标准试验, 没有一个是为了提供受力情况下材料基本力学反应和变形机理的数据而专门设计的。满足这些要求的试验将在下一章介绍。这一章主要介绍标准试验和从中获得的指标数据, 特别是:

(a) 单轴强度 σ_{cf} ——当试件单向受力, 对圆柱形试件即为轴向受力时, 试件所能承受的最大应力。

(b) 单轴变形模量 E ——即在特定的应力水平下, 材料单向受力时的正应力与正应变之比。因为岩土材料的应力-应变曲线呈线性的极少, 所以采用的标准值通常是应力等于 $0.5\sigma_{cf}$ 时曲线的切线斜率。

(c) 柏松比 ν ——单轴受力情况下横向和纵向应变之比。

(d) 三轴抗压强度 σ_{lf} ——当岩石试件受到最小或中间主应力的侧压作用时, 试件在最大主应力方向所能承受的最大压应力。

(e) 参数 c 和 φ ——分别为粘结力和内摩擦系数。它们是在不同侧压下通过一系列三轴试验来测定的。这将在第三章中介绍。

第二节 单轴或无侧压强度

就象混凝土设计中的主要判据是立方体强度一样, 在岩石力学中最常用的力学性质指标是无侧压强度。Hawkes(霍克斯, 1970)和 Mellor (梅勒, 1970) 及 Hawkes 等人 (1973) 在单轴强度及其试验上做了大量的工作。特别有用的是他们指出了试验过程或试件本身对试验结果的不规则性所产生的影响, 其中尤其以试件的状态和试件尺寸的大小更为重要。

对于单轴抗压强度试验, ASTM 规范 D2938 要求试件是正圆柱体, 并且有不小于 NX(54mm)岩芯尺寸的直径, 其高径比

为 2~2.5。当必须试验小直径岩芯时,其试件直径至少应该为矿物最大粒径的 10 倍,而 Hawkes 和 Mellor (1970) 建议应为最大粒径的 20 倍。试件的边缘应当光滑,避免突变。试件的两端面应当完全平行且垂直纵轴,并需研磨平整。规范所允许的误差为:

(a) 不规则度——在整个试件的长度方向上所有表面的平直度在 0.127mm 以内。

(b) 端面研磨——端面平整度在 0.025mm 以内,垂直纵轴的偏差在 0.25° 以内。

(c) 高度——用千分卡在试件高度方向按等距布置测量 5 次,其误差不大于 0.051mm。

试件的湿度通常应保持现场条件。

试件的形状最好选用圆柱体而不是方形柱体,以避免“边缘”效应。然而完全避免边缘效应也是不可能的。特别是在单轴试验中更是这样。Balla (巴拉, 1960) 研究了高径比为 2 的圆柱形试件的整个端面约束的影响。利用他的实验结果, Hawkes 和 Mellor (1970) 指出: 当试件在 σ_1 / σ_3 比值较高的情况下, 可以观察到在试件的拐角和中心存在高偏应力区域, 这些将在第三章解释岩石破坏机理时加以讨论(图 3-2)。由于“边缘”效应影响试验结果, 因而本文认为考虑这一因素是十分重要的。Obert(奥伯特, 1946)等的经验公式考虑了“边缘”效应的影响:

$$\sigma_{cf} = \sigma_{cl}(0.8 + 0.2D / L) \quad (1-1)$$

这里 σ_{cl} 是高径比为 1 时测得的圆柱形试件的单轴抗压强度, 而 σ_{cf} 是所要求的抗压强度。

这个公式意味着岩石抗压试验中存在着实验误差。因此欲求极限抗压强度, 试件的高径比应当大于 2——最理想是在 2.5~3 之间, 图 1-2 是 Hawkes 和 Mellor 所收集的资料。

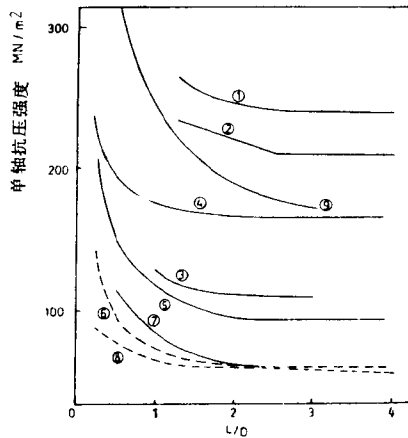


图 1-2 不同的高径比(L/D)对单轴抗压强度的影响,花岗岩(1),白云岩(2),粗面岩(3),砂岩和粉砂岩(4~8),饱水花岗岩(9), (Hawkes 和 Mellor, 1970)

单轴试验可以采用许多方法来进行。根据作用力方向的不同,可以分别测定抗压、抗拉和抗剪强度。实验室直剪试验可参照 ISRM 现场试验的有关方法进行 (Brown 1981), 它是以实验室常规剪切盒试验为基础的。更精确的数据可以从三轴试验中得到 (见第四章)。但对于整体岩石来说, 剪切试验就显得不那么必要了。拉伸试验不像压缩试验那样可重复进行, 因此用得也比较少 (Hawkes 等, 1973), 而下节介绍的点荷试验则不在此例。一般地说, 有两种拉伸试验可供选择。一种是直接轴向拉伸, 将试件加工成哑铃状的圆柱体以减少端头效应。试件可用树脂胶固定在管状终端件内, 这种终端件在固定时可自由调节, 以确保受力方向垂直于试件轴向; 另一种是间接拉伸试验, 试件是扁的圆柱体。试验时沿径向加载, 就能在上、下加载点之间的直径上产生很高的拉应力。

从标准化角度出发, 建议使用 ASTM 单轴抗压强度试验。在合适的试验机上, 加工好的试件应在小于 $700\text{kNm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的速率下加载至破坏。此时, 试件的单轴抗压强度就是试件在试验过

程中承担的最大荷载除以横截面积。其结果应精确到 0.1MNm^{-2} ，试验报告应包括下列内容：

- a. 岩石的岩性描述。
- b. 岩样来源：包括地理位置、深度、方向、取样和试验日期以及保存环境。
- c. 试件的直径和高度。
- d. 试验时的湿度和饱水度。
- e. 加载或变形速率。
- f. 破坏形式。
- g. 密度、孔隙率和其他有关的物理参数。

单轴抗压强度虽然不是一个材料常数，但它是一个有用的且被广泛应用的岩石性质指标。因为岩石的性质变化太大，所以把它们的岩性或地质描述和其强度联系起来十分困难。Coates (考茨, 1964)、Deere (迪尔) 和 Miller (米勒, 1966) 以及其他人都提出了许多分级方法来区分软岩和硬岩。从理论上说，这些分级方法是遵循对数函数分布规律的。而 Attewell (阿特维尔) 和 Farmer (法默, 1976) 从以前的研究成果出发提出了一个简单的分级方法，见表 1-2。

表 1-2 以单轴抗压强度为依据的岩石分级方法
(Attewell 和 Farmer, 1976)

强度分级	强度范围, MNm^{-2}	典型的岩石类型
最低	10~20	风化和非致密沉积岩
低	20~40	弱粘结沉积岩, 片岩
中等	40~80	坚固沉积岩, 某些低密度粗粒火成岩
高	80~160	坚固火成岩, 某些变质岩和细粒砂岩
最高	160~320	石英岩, 致密细粒火成岩

表 1-2 提到的岩石种类并不遵循地质分级的传统分类方法或习惯上的地质专用名词。原因很明显，因为影响岩石试验强度