

国际力学中心 (CISM) 固体力学教程

第 165 号 教程与讲座

岩石力学

〔西德〕 L·米勒 主编

煤炭工业出版社

中国科学院地质研究所 中国科学院地质研究所

地质研究所 地质研究所

岩石力学

地质研究所 地质研究所

地质研究所 地质研究所

国际力学中心 (CISM) 固体力学教程

第 165 号教程与讲座

岩石力学

〔西德〕 L·米勒 主编

李世平 冯震海 等译

煤炭工业出版社

内 容 简 介

本书是德、奥、美、意、法等国十位知名岩石力学家一九七四年在意大利乌迪内国际力学中心举办的一次岩石力学讲座文献。讲座主持人是卡尔斯鲁厄大学教授、第一届世界岩石力学讨论会主席L·米勒。除导论外，十五讲中有九讲是岩体力学性质，并且重点是节理岩体力学性质。其余几讲涉及边坡稳定、地下巷硐设计、岩体加固以及岩体水力学等。书中主要反映了萨尔茨堡学派的观点。

本书是七十年代初中期国际岩体力学研究的代表作，可供采矿、地质、交通、水电及国防部门工程技术人员与高等院校师生参考。

L·Müller
INTERNATIONAL CENTRE
FOR MECHANICAL SCIENCES
ROCK MECHANICS
Wien-New York Springer-Verlag Udine 1974.

国际力学中心 (CISM) 固体力学教程
第165号教程与讲座

岩石力学

李世平 冯震海 等译

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $10^{1/2}$
字数 277 千字 印数 1—4,600
1981年7月第1版 1981年7月第1次印刷
书号 15035·2406 定价 1.60元

译校者序

本书是德、奥、意、美、法、荷等国十位岩石力学和地质学家1974年在意大利乌迪内由国际力学中心举办的一次岩石力学讲座的文献。讲座主持人L·米勒曾任卡尔斯鲁厄大学教授、国际岩石力学学会第一任主席，是岩石力学“奥地利学派”创始人之一。

除绪论外，十五讲中有九讲内容是节理岩体的力学性质。其余几讲涉及边坡稳定、地下巷洞设计、岩体加固以及岩体水力学等。

1951年，米勒教授、斯坦尼教授等六人创建了岩石力学“奥地利学派”，或称为“萨尔茨堡学派”。这个学派的主要观点包括有：

1. 岩体是各向异性的不连续体，不连续面将岩体分割为岩块；
2. 岩体强度等于残余强度，残余强度取决于岩块啮合（镶嵌）程度；
3. 岩体变形主要是由于岩块移动，而不是岩块基质本身的变形。

这个学派否认小岩块试验，主张唯有通过现场（原位）测定才能获取岩体的真实特性。

本书主要反映了萨尔茨堡学派的观点、主张及其在工种中的应用。

萨尔茨堡学派主张原位测定岩性，这在原则上是正确的。但是，由于原位测定在时间上和经济上的代价高昂，难以大量进行试验，所以迄今对节理岩体所进行的原位试验数量有限，研究程度自然也欠充分。

岩性研究的成熟程度，决定着岩体力学课题得以解决的成熟程度。由于对节理岩体特性试验研究的不足，所以这个学派还没能针对岩体力学各方面的问题形成成熟的计算方法和理论。古德曼提出的节理单元模型，当前在岩体的有限元分析中得到广泛应用。但在工程中能比较具体考虑结构面的影响的仍限于边坡课题。对于地下工程以及其它岩体工程遇到的各项复杂的岩石力学课

题，尚有待进一步去探讨。

本书是七十年代初中期国际岩体力学研究的代表作之一。对我国地质、采矿、交通、水电和国防等部门有关工程技术人员及大专院校师生有参考价值。

原书是英文版本。讲者多数不是英、美人，其文章以英文宣讲发表，存在不少晦涩之处及文字上的明显差误。因其数量较多，没有一一注出。

原书插图附于文章之后。为方便读者，译版已全部插入正文。

本书译者：前言、绪论、第二至六讲为山东矿业学院周文安、李和群、袁传国与洪赓武，第七至十三讲为中国矿业学院李世平，第十四至十六讲为淮南煤炭学院冯震海。分章审校人为山东矿业学院陈子荫，以及冯震海。最后全书由李世平统一校订。

译校者水平有限，错误难免，欢迎指正。

译 者

一九八〇年

前 言

岩石力学是唯有依靠学科间协作才能取得进展的一门科学。在地质学、地球物理学、组构学、材料学、力学、土木工程与采矿工程等领域之间的观点和经验交流中，力学原则起着极其重要的作用。

作为力学的一个分支，岩石力学置身于力学的普遍原理之外是一事无成的。另一方面，它又不能以连续介质力学的现有理论作基础。因为不连续性是岩石力学必须研究的一种主要材料特性。这里需要的是不连续介质力学，但现在这一力学分支仅处在发展阶段，所以看来处处都需要地学与力学之间的通力协作。我们感到非常满意的是这门年轻且还不十分成熟的岩石力学在国际力学中心也得到一次交流讨论机会。正是这样通过相距甚远的地学和力学领域的彼此接近和共同探讨，不连续介质力学的主要问题才有可能得到解决。

我确信，岩石力学领域的所有专家们都会感到高兴并乐于对国际力学中心（CISM）给予他们一次国际性的跨学科的交流讨论机会表示感谢。

L·米勒（L·eopold Müller）

一九七四年十二月

目 录

绪论 (L·米勒)	1
岩块与岩体的技术参数 (L·米勒)	13
地质学在岩石力学中的地位与应用 (L·布罗伊利)	31
论脆性岩石的破裂准则 (F·拉梅尔)	62
岩石的脆性破裂 (F·拉梅尔)	74
节理岩体破坏机理 (H·K·库特)	83
节理岩体有限元分析导论 (R·E·古德曼)	96
岩石各向异性——理论与实验室试验 (G·巴拉)	112
节理岩体的工程特性 (K·W·约翰)	145
岩体分离面的摩擦特性与性状 (N·雷格斯)	159
岩体边坡分析的解析法 (H·K·库特)	167
边坡非纯滑动型破坏的机理 (H·K·库特)	180
边坡稳定分析的图解法 (K·W·约翰)	187
岩体的加固 (P·埃格)	206
地下巷道设计原理 (P·埃格)	242
岩体水力学 (C·路易)	254

绪 论

卡尔斯鲁厄大学
土力学与岩石力学研究所
L·米勒

岩石力学问题的基本情况

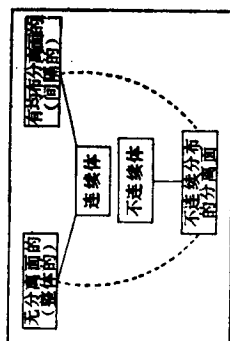
岩石力学只是在最近才形成为一门新的科学领域。这是出自土木和采矿工程师的实际需要，出自使岩石结构物更加经济（减少过分保险的设计）和安全方面的需要。以上的需要已成为促进岩石力学作为独立学科向前发展的原动力。这个学科的范畴包括：“对地质探查作出工程解释；测定力学分析所用的原位岩体的工程性质，以及把这种力学分析联系到与岩体密切相关的问题上去”（约翰1962）。

表1扼要地列出岩石力学要研究的各种课题，以及可能用到岩石力学原理的各类工程结构。

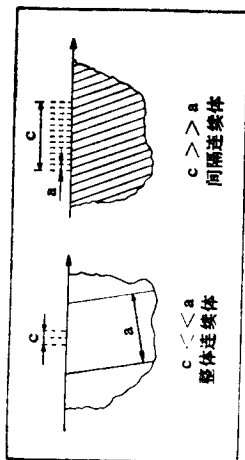
把岩石力学确立为一个专门学科而划出土力学老领域之外的一个主要理由，是因为岩体通常都是不连续的（米勒1961）。因此，岩石力学在大多数情况下，都是涉及对节理岩体的研究，而节理岩体除非在特殊情况下才可以作为各向异性连续介质来处理（见图1-1和表1）。

“奥地利学派”的主要贡献之一，就是认识到原位岩体变形性状和强度方面的不连续性具有头等重要意义。这个学派的基本观点曾由米勒（1958，1959，1962）概括为：

1. 对大多数工程问题来说，岩体的技术性质取决于岩体内的地质分离系统而不是取决于其连续性，因为这是节理介质；
2. 岩体强度等于其残余强度，这种强度同岩体的各向异性



真实岩体在理论上的“整体连续性”
与“间隔连续性”



节理岩体当作连续体处理的相对条件

图 1-1 岩体作为连续体或不连续体处理

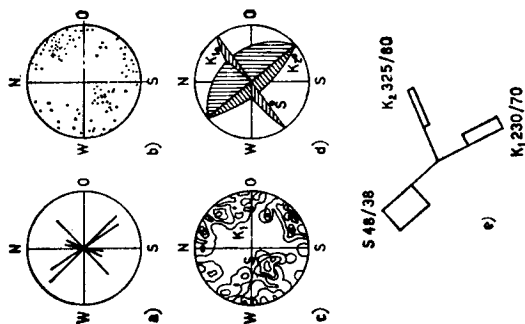


图 1-2 岩体内不连续面的空间分布节理空间分布表示方法:
a) 玫瑰图; b) 节理极点的赤极投影; c) 极点密度图; d) 大圆的赤极
投影; e) 单位矩形表示法 (米勒)

表 1 岩石力学的主要课题与实际应用

序号	类型	特征	被认为 的体系	相适应 的学科	变 形 性 状 D: 变 形 MD: 变形的机理 CV: 特 征 值	强 度 性 状 B: 取 决 于 str: 强 度 syc: 强度和屈服准则 CV: 特 征 值	名 向 异 性	分 离 程 度
1	不破碎 的岩体	无节 理整体 的	整体 连续介 质	连续 介质力 学, 流 变学	D: 弹性的, 塑性的 MD: 破坏, 流动 CV: 真实弹性模量 塑性模量 p 剪切模量 s 泊 松 数 m 粗 糙 度 η 松弛时间 t_r	B: 颗粒结构 str: 拉伸、压缩和剪切真实强度 syc: 破坏理论 固体颗粒的流体力学理论 CV: 抗拉强度 抗压强度 抗剪强度	仅 有颗 粒组 构的 各向 异性	$x = 0$
2	局部节 理化岩体	比较 有规律 分布的 节理	多元 的或不 连续体	地质 力学	D: 弹性的和假塑性体 MD: 破裂, 碎裂流动 CV: 表现的弹性模量 E (变形模量)	B: 1, 3 的过渡情形 str: 残余强度 syc: 现在没有可用的理论 CV: 残余抗拉强度 $\sigma_{t, res}$ 残余抗压强度 $\sigma_{c, res}$ 残余抗剪强度 τ_{res}	由 构造 活动 造成 的各 向异 性	$x > 1$

续表

序 号	类 型	特 征	被 认 为 的 体 系	相 适 应 的 学 科	变 形 性 状 B: 取 决 于 D: 变 形 MD: 变形的机理 CV: 特 征 值	强 度 性 状 str: 强 度 sync: 强度和屈服准则 CV: 特 征 值	各 向 异 性	分 离 程 度
3	节理岩体 (分割成大块) 节理岩体 (分割成小块)	大量的贯通的节理	有秩序排列的多元体	结构和组构分析	B: 节理的类型和程度、节理的静摩擦力 D: 一般的假塑性体 MD: 碎裂(破裂)——流动 CV: 块体间的活动性变形模量	摩擦性质, 节理间距, 节理充填物 str: 岩体摩擦的强度 sync: 现在没有可用的理论 CV: 视在的抗拉强度 $\sigma_{t, app}$ 视在的抗压强度 $\sigma_{c, app}$ 视在的抗剪强度 τ_{app}	由构造活动造成的各向异性	$x = 1$
4	强烈破碎的岩体 糜棱岩	完全成为碎块或成粉状的岩石材料	散体	土力学组构分析	B: 内聚力、摩擦、结构、孔隙体积等 D: 弹性的, 塑性的 MD: 颗粒的不均匀移动 CV: 刚度数值 S, 渗透性 K, 含水量 W, 粗糙度 Y	组构, 孔隙体积等 str: 抗剪强度 sync: 库伦准则等 CV: 内摩擦值 内聚力 P。	尚未研究	

都视组成岩体的单个岩块的镶嵌程度而定；

3. 岩体的变形性和各向异性主要是由于岩体组构中单个块体间移动的结果。

对要建造的岩石结构物，在有关的静力学和动力学分析中，都要考虑到岩体材料的这些独特的性质。

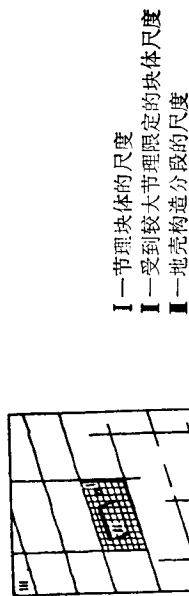
再一个有关的事实是：岩石建筑工程师无法选择他的材料，而必须同通常其性质没有确切定义，其历史复杂而且难于详细解释的材料打交道。事实上，要解决任何一个岩石力学问题都需要知道该特定岩体的现在地质状况及其历史演变，都需要有土木、采矿工程师和工程地质学家的通力协作。

岩体中不连续性的空间排列很少是属于统计学上的各向同性的。几乎在所有情况下，人们都能够看出组构或结构单元某个优先位向如图1-2例子所示。

在均质的小范围内，不连续性的这种优先位向排列的效应可以在岩石和模型材料两方面进行实验来证实。这些实验清楚地表明强度和变形特征都是与方向性函数相关（图1-3）。因此，决不能把岩层单纯看作是承载地基，而必须认识到这些各向异性变形的效应会反过来影响结构本身的应变和应力分布。由于岩体和工程结构之间这种交互作用，所以把它们放在一起作为单一的物理系统来看待。

下面将说明在层理或普通的节理、尺寸非常大的节理、断层或断层破碎带这些地方都会引起岩体的不连续，并且视其尺寸的不同，它们怎样在不同程度上影响岩体的强度和变形性状（见图1-4和图1-5）。

大的变形——在很大程度上是不可逆的——是原位岩体的又一特征（图1-6）。对工程材料来说，破裂或屈服前的应变通常是在千分之几的范围内——例如混凝土压碎时的应变约为0.4%到0.5%。与此相反，在块体模型试验中破坏前产生的应变量达到13%；在（意大利）维乔特峡谷（Vajont valley）发生的大滑坡，当岩体一直触到峡谷对坡上去以后，测得由于压缩而引起的岩体



σ I E_1 V_1 m_1
 II E_2 V_2 m_2
 III E_3 V_3 m_3

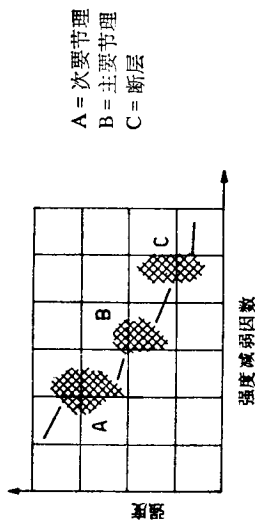


图 1-4 不连续面的尺度对岩体强度性状的影响

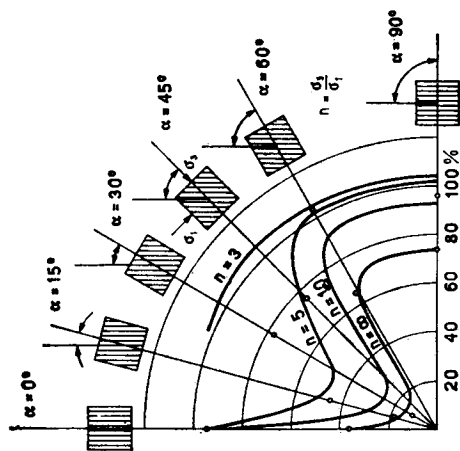


图 1-3 各向异性分布的不连续面对材料强度的影响
 强度的降低是 α 角的函数 (Müller与Pacher, 1965)

要的，例如众所周知，在那里的岩体开挖推进速度对边坡稳定性有相当大的影响。以前时期的变形常常导致岩体内的残余应力，在某些区域则由于当前活动着的构造变形还可能引起大小不明的应力。由于目前还不清楚了解这些过程，所以估计原位岩体内的初始应力还有困难。尽管如此，近来对这些构造和残余应力的影响是看得越来越重要了。这些应力——特点是水平应力分量常大于竖向分量——不仅对地下建筑重要，而且依我看也影响到边坡稳定性。

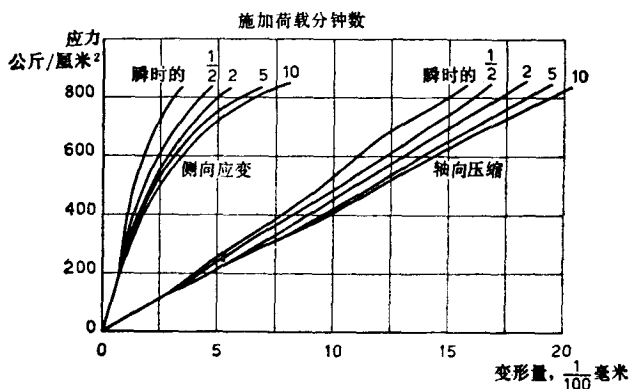


图 1-7 应变率与变形性状的关系 (据Döring T., 1964)

在各种固定加载速度下板岩的应力-应变曲线

举几个在下面数讲中还要更清楚和更详细讨论的例子，主要目的是使对原位岩体变形及强度特征的极端复杂性有个认识，同时用以说明为什么岩石力学必然要发展为一门独立的学科。

土力学和岩石力学在力学性

状分析途径方面的差别

从以上的讨论应该比较清楚地看到：在岩石力学中只是有数个特殊情况才适于使用连续介质力学——也就是土力学的方法（见表 2 举例）。

表 2 岩体的力学性状与节理程度的关系

岩 石 力 学		岩 石 结 构	
1.1 岩石及岩体的类型		2.1 地面结构	
1.2 关于岩石力学性状的基本数据		2.1.1 岩体边坡	
1.3 影响岩体力学性状的因素	1.3.1 岩石性质	2.1.2 建筑物基础	
	1.3.2 岩体的结构 (德文 Gefüge)	2.1.3 水坝基础	
	1.3.3 岩体内含水量	2.2 地下结构	
	1.3.4 岩体应力	2.2.1 巷 道	
	1.3.5 时 间	2.2.2 立 井	
1.4 岩体的重要技术性质	1.4.1 影响岩体强度的性质	2.2.3 岩洞和各种大型的地下洞室	
	1.4.2 影响变形性状的性质		
	1.4.3 岩体的破坏模式		
	1.4.4 鉴定某些工艺 (掘进、支护等) 适用性所用到的性质		
1.5 岩石结构的力学性状的定量预测	1.5.1 力学模型		
	1.5.2 数学模型		
	1.5.3 连续介质和非连续介质的力学方法		
1.6 岩石力学量测技术			

虽然土和岩石两者都是由矿物颗粒和碎片的集合物构成的, 但是对多数岩石来说, 材料颗粒通常粘结得紧密得多。不过主要的更严重的差别是岩体不连续性的存在, 这对岩体的性质有决定性的作用。和土相比, 岩体具有的移动自由度比较少。单个节理块体的移动一般只是平行于各节理组的交线, 而对内部转动的约束则比较大得多。

因为通常土和原位岩体内部都含水, 所以在大多数情况下两者都是三相体系, 而且由于不连续平面的存在, 它支配着流动能力, 引起土和原位岩体间渗透性的强烈差异, 使得原位岩体的渗透性带有方向性。再者, 两种情况下液体对固相的静力和动力作