

岩石力学原理及其应用〔英〕

R.E.古德曼 著 王鸿儒 王宏硕 等译

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是美国加利福尼亚大学土木系本科生和低年级研究生使用的教材。内容包括三部分：第一部分综述工程应用中岩石分类的特性指标、岩体强度和变形特性、岩体中的软弱面和初应力状态等岩石特性以及岩石力学的基本理论；第二部分论述岩石力学在地下洞室、岩坡及地基工程中的应用；第三部分为五个附录，即：二维和三维应力的计算，应变的测量方法，岩石和矿物的鉴别，主要方程式的推导以及赤平极射投影法的应用。最后还附有习题解答。

本书可供土建、铁道及水利水电大专院校的师生使用，也可供有关的教学、科研、设计和施工人员参考。

R.E. Goodman

Introduction to Rock Mechanics

John Wiley & Sons 1980

岩石力学原理及其应用〔英〕

R.E. 古德曼著

王鸿儒 王宏硕 等译

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市地质局印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 23.25印张 52.5千字

1990年5月第一版 1990年5月北京第一次印刷

印数 0001—1430册

ISBN 7-120-01008-5/TV·327

定价 14.90元

译 者 的 话

本书是美国加州大学伯克利分校地质工程学教授R.E.古德曼继《不连续岩体中的地质工程方法》之后,又一本具有代表性的著作,是供该校本科生和低年级研究生使用的教材。书中前六章综述了岩石力学的基本理论、岩石的特性指标和测试技术等。后三章分别论述了岩石力学在地下洞室、岩坡及地基工程中的应用,后面还补充了五个重要的附录。除第一章外,每章都附有习题,最后并附有习题解答。作者特别指出,这里绝大部分的习题,不仅为了训练应用本教材中的公式进行数字运算,而且试图探索一些新的内容,并通过它介绍一些新的思路。本书强调理论与应用相结合,内容丰富,结构新颖,文字深入浅出,既可供我国土建、铁道及水利水电院校的师生和研究生使用,也可供有关的教学、科研、设计和施工人员参考。

本书是在武汉水利电力学院王鸿儒教授和王宏硕教授主持下集体翻译的。其中各章的译者是:第一章王鸿儒;第二章丁德平;第三章李步娟和廖孟扬;序言、第四章、习题解答廖孟扬;第五章朱诗鳌;第六章吴沛寰;第七章陈介贤;第八章王宏硕;第九章陆述远;附录陈介贤、李步娟和丁德平。全稿由王鸿儒和王宏硕在廖孟扬、陈介贤协助下校订。

由于时间有限,难免有不当之处,欢迎广大读者批评指正。

译 者

1989年3月

序 言

岩石力学是一门应用于地质学、地球物理学、采矿学、采油学和土木工程学的真正的边缘学科。它同能源的利用和开发、交通建设、水资源和防护措施、地震预报以及许多非常重要的其它领域都有关系。本书阐述这门学科最直接应用于土木工程的一些专门问题。土木工程系的高年级大学生和低年级研究生，会在本书中获得与所学专业的主要内容有关的、经过精选的基本概念、方法和应用。例如，如何估算防止隧洞中泥岩挤出所需要的支撑力，如何估算通过节理岩体的岩石切坡的最佳角度，以及如何决定插进岩体的墩柱的承载力。其它系科的学生也会感到这本书有用，因为本书完全按教科书的要求组织内容，其主要目的是为了解决实际问题提供基本知识和基本方法。一些优秀的参考书虽已较好地概括了这门学科的基本原理，但不足的是，它们将岩石力学原理应用于实践方面的阐述还过于简略。

本书由三部分内容组成。第一部分包括前面的六章，介绍描述岩石性质的各种方法。它包括岩石在工程上分类的特性指标，岩体强度和变形特性，节理的性能特点，以及表征初应力状态的方法。虽然省略了现代断裂力学的方法，但对各向异性和随时间而变化的问题还给予了一定的重视。第二部分由第七、八和九章组成，论述了岩石力学在地面与地下开挖和地基中的专门应用。第三部分是几个附录，其中一个附录是公式的推导。在正文各章中，为了突出公式的应用而把这些推导省略了。另一个附录是全面地论述二维和三维应力，以及应变的测量方法。第三个附录是鉴别岩石和矿物的一种简易图表。设想读者已具有地质学方面的初步知识，故使用了岩石力学和矿物学的一些专用术语，提供了一张岩石力学在很多方面都能应用的命名图表。第三部分还包括了全部习题的解答，并选定了一些习题，详细地阐述其解题的方法。每章之后的习题，以及题解部分中给出的解答，都是本书的重要组成部分。习题中的绝大部分，不仅为了训练应用本教材中的公式进行数字运算，而且试图探索新的内容。作者很喜欢在实用领域中学习新的内容。因此，就采用了这种方法来介绍一些新的思路。

虽然本书大部分是介绍在杂志上和会刊中已经登载了的一些成果，但书中也引用了不少未发表的材料，以使本书内容更加完善。所有这些未发表的材料，都在附录中进行了详尽的说明。

本书是供加利福尼亚大学伯克利分校土木工程系大学生和低年级研究生使用的三个学分的教材。重点放在问题的论述上，对方程式的推导只用了很少的篇幅。附录一、附录二以及有关随时间而变化的全部内容，均在正文中从略。在另一门后续课程中，方程式的推导可在课堂上进行。此外，还可用作者1976年的著作《不连续岩体中的地质工程方法》(西

方出版社)和选定的参考书补充本书的内容。

作者对皇家学院 (Imperial College) 的约翰·布雷博士 (John Bray) 深表感谢, 因为他允许作者自由地引用他的很有启发性和鼓舞性的论文。还有不少人慷慨地提供了一些照片和其它插图(以下是作者向有关学者致谢的话, 从略——译者注)。

理查德 E. 古德曼
(Richard E. Goodman)

符号和记号

各种符号均在其出现时加以定义。矢量用黑体字表示，例如 B 。带黑体的小写字母通常用来表示单位矢量。本书不使用求和的记号。全书都使用矩阵记号，一维和二维的数组用 $()$ ，有时，列矢量用 $\{ \}$ 。记号 $B(u)$ 表示 B 是 u 的函数。量纲有时在括号中列出，例如，用 $F =$ 力， $L =$ 长度， $T =$ 时间，则应力的单位为 (FL^{-2}) 。一个字母或符号上面加一个圆点（例如 $\dot{\sigma}$ ），通常是表示对时间的导数。现将常用的一些符号列在下面：

\hat{D}_i	平行于结构面倾向的单位矢量	u, v	平行于 x, y 轴的位移；以坐标轴的正方向为正值
Δd	隧洞或钻孔直径的增量	u_r, v_θ	平行于 r, θ 方向的位移
dev	标志偏应力分量的脚码	Δu	沿节理的剪切位移；也用来示径向变形
E	杨氏模量 (FL^{-2})	Δw	横过节理的法向位移
g	重力加速度	V_l, V_t	杆件的纵向和横向应力波速度
G	剪切模量；有时也表示比重	V_p, V_s	无限介质中的压力波和剪切波速度
GPa	10^3 MPa	$\Delta V/V$	体积应变
i	节理面上凸起的前边的坡角	w	按干重计算的含水量
I_1, I_2, I_3	应力不变量	w_L, w_P	液限和塑限
\hat{l}_{ij}	与 i 平面和 j 平面交线平行的单位矢量	W	重量矢量
k	各种不同场合应用时，各有其不同的定义，如渗透系数 (LT^{-1}) 和刚度系数	x, y, z	右旋的笛卡尔坐标
K	有多种多样的应用，如容积模量，费希尔 (Fisher) 分布参数，渗透系数 (L^2) ， $\sigma_h/\sigma_v, \sigma_3/\sigma_1$	Z	地表面以下的深度
l, m, n	一条直线的方向余弦	γ	单位体积的重量 (FL^{-3})
\ln	自然对数	γ_w	水容重
MPa	兆帕 (MN/m^2) ； $1 \text{ MPa} \sim 145 \text{ psi}$	ϵ, γ	正应变和切应变
n, s, t	与岩层 (st 平面) 垂直和平行的坐标	η	粘滞系数 $(FL^{-2}T)$
n	孔隙率	λ	拉密常数；也用来表示波长
\hat{N}_i	与岩层或一组节理垂直的单位矢量	μ	摩擦系数 $(= \tan \phi)$ ；也同 η 一样用来表示粘滞系数
p, p_w	压力，水压力	ν	泊松比
p_1, p_2	次主应力	ρ	质量密度 $(FL^{-4}T^2)$
P	力；在第九章也用来表示线性荷载 (FL^{-1})	σ	正应力
q_f	承载力 (FL^{-2})	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力； $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (以压应力为正)
q_u	无侧限抗压强度	$\sigma_{t, B}$	巴西法 (劈裂法) 的抗拉强度值
RMR	根据岩土力学分类法而定的岩体的评分值	σ_r, σ_θ	径向的和切向的正应力
S	在给定的一组节理中两个节理之间的间距	σ'	有效应力
S_i	根据莫尔-库伦关系得到的抗剪强度的截距 (“凝聚力”)	τ	剪应力
S_j	某一个节理的抗剪强度的截距	τ_p, τ_r	峰值抗剪强度和残余抗剪强度
T_{MR}	弯曲抗拉强度值 (“断裂模量”)	ϕ	摩擦角；因场合不同分别用来表示内摩擦角和外摩擦角
T_0	抗拉强度值；除另有说明外，都指单轴抗拉强度	ϕ_n	光滑表面 ($i = 0$) 滑动的摩擦角
		ϕ_j	节理面的摩擦角
		ψ	σ_1 的方向和节理面之间的角度
		\bar{w}	支承板的平均位移

目 录

译者的话

序言

符号和记号

第一章	引言.....	(1)
第二章	岩石的分类和特性指标.....	(13)
第三章	岩体强度和破坏准则.....	(38)
第四章	岩体中的初应力及其测定.....	(74)
第五章	岩体中的软弱面.....	(103)
第六章	岩体的变形特性.....	(131)
第七章	岩石力学在地下洞室工程中的应用.....	(162)
第八章	岩石力学在岩坡工程中的应用.....	(195)
第九章	岩石力学在地基工程中的应用.....	(220)
附录一	应力.....	(258)
附录二	应变和应变片花.....	(273)
附录三	岩石和矿物的鉴别.....	(276)
附录四	方程式的推导.....	(282)
附录五	赤平极射投影法的应用.....	(317)
习题解答	(333)
保角赤平投影网	(362)

第一章 引言

虽然一直到1960年左右,才认为值得把岩石力学作为一门专门学科,列入工科教学计划中进行讲授,但岩石力学的一些知识,对于土木工程师来说确实是极为重要的。这一认识是一系列有关岩石的工程实践所产生的必然结果。这些工程实践包括:复杂的地下设施,溢洪道的深挖方,以及巨大的露天矿坑等。岩石力学研究岩体的性质和工程设计中与岩体有关的设计所需要的专门方法。岩石和土壤类似,与其它工程材料有显著的区别,因而有关岩体的“设计”过程是很独特的。例如钢筋混凝土结构的设计,工程师首先计算外荷载,然后根据所要求的强度选择材料(采取措施以保证其强度),同时相应地确定出结构的几何尺寸。然而,在岩体结构中,作用荷载往往比初应力重分布所引起的力还难于确定。此外,由于地下洞室一类的岩体结构有许多可能的破坏模式,材料“强度”的确定既需要量测,也需要判断。还有最后一点,即结构的几何尺寸至少在一定程度上由地质构造来规定,而不能完全由设计者自由选择。由于这些原因,岩石力学包含着其它应用力学领域并不考虑的若干方面—比材料性质的控制更重要的地质位置的选择,初应力的量测,以及用图解和模型研究的方法,对多种破坏模式进行分析计算等。因此,岩石力学的内容是与地质学和地质工程学密切相关的。

1-1 岩石力学的应用范围

人类与岩石的密切关系可以追溯到史前时代。箭头、一般用具、器皿、城堡、房屋以及隧洞等,或者用岩石制成,或者建于岩体之中。建筑和雕刻,如埃及的阿波·西姆拜尔(Abu Simbel)寺和金字塔,是选择、开采、切割和加工岩石的精湛技术的见证。在18及19世纪里,为了矿室通风、排水、给水、运河与铁路运输而开凿了许多大型隧洞。

在本世纪里,虽然工程师们已转向使用其它材料,而卢西摩尔(Rushmore)山上的巨型雕刻(图1-1)则向世界揭示,精选的花岗石将和伟大人物的形象一样永世长存。在当代,尽管材料工程师们能够制造合金和塑料以迎合人们喜爱新奇的心情和满足特殊的需要,但岩体工程仍在工业生产中和工程师头脑中占有一定的地位,因为在结构工程、运输工程、防御工程以及能源工程中,有关岩石性能和作用的问题都是很突出的。

表1-1是各类工程中涉及岩石力学较多的一些工程项目。从工程师所从事的规划、设计和施工的业务中,选入表内的有9类,它们都是与岩石力学有密切关系的,即:地质隐患的定量估计;岩石材料的选择与制备;岩石可控性、可钻性的评定,切削、钻孔机具的设计;建筑物型式的选择及布置;岩体变形分析;岩体稳定分析;爆破过程的监视与控制;支护系统设计,以及水压破裂法。从事这些工程实践的方式,随工程性质不同而稍有差异。

表 1-1

应用岩石力学的若干领域表

设计项目	地质隐患评价	材料选择	可控性可钻性评定	工程型式选择及布置
地表建筑物	住宅区	(2) 滑坡、断层		
	桥、高层建筑物、地表电厂	(2) 滑坡、断层	(2) 装修用石料、混凝土骨料	(1) 墩柱式基础的钻井 (2) 稳定的建筑物位置的选定
	坝	(1) 库岸滑坡、断层	(1) 堆石、抛石、混凝土骨料	(1) 拱坝、重力坝与土石坝的选择
运输线路	公路、铁路	(1) 滑坡	(2) 堤、路基、混凝土骨料、抛石	(1) 挖坡的方向与坡度
	运河、渠道、管道	(1) 滑坡	(2) 堤、路基、混凝土骨料、抛石	(1) 挖坡的方向与坡度
	高压输水管道	(1) 滑坡		(1) 地面高压输水管与衬砌或不衬砌隧洞的比较
其它用途地表开挖	采石场及矿坑	(2) 滑坡		(1) 铁石迷岩沉积及其它坚硬岩石 (1) 边坡、输送设备、建筑物
	溢洪道	(1) 滑坡		(2) 河岸式与隧洞式的比较；边坡
干燥岩层的地下开挖	易塌矿井	(1) 断层、气爆	(2) 柔性支承	(1) 长壁式、鼯鼠式切割机的选择 (1) 总体布置
	稳定矿井	(1) 断层、岩爆		(1) 采矿机具的选择 (1) 采矿计划的选择
	隧洞	(1) 断层、岩爆		(1) 鼯鼠式切割机的设计 (1) 形状、尺寸
	地下洞室	(1) 断层、岩爆		(2) 挖方费用的估算 (1) 方位
	防御工事	(1) 断层、岩爆		(1) 深度的选定
能源开发	石油	(2) 断层、岩爆		(1) 提高速率
	地热	(2) 断层、岩爆		(1) 高温和浓盐化作用
	核电站	(1) 断层、滑坡	(2) 混凝土骨料	(2) 不透水芯体
	核废物处理	(1) 断层	(1) 选择作为核废物绝缘的最好岩石	(1) 可修补性、稳定性
	储能洞穴包括油、水、气、液化天然气等	(1) 断层	(2) 特殊衬砌	(1) 防漏帷幕
溶解法采矿				

注 (1) 有密切关系；(2) 有一定关系。

(涉及岩石力学知识较多的领域)

变形分析	稳定分析	爆破监护	支护系统设计	水压破裂法
(2) 页岩回弹				
(2) 张拉预应力的反作用、沉降、工程性质	(2) 如果位于陡边坡边缘或老矿坑之上	(1) 已有建筑物附近的控制	(1) 临时开挖的锚固	
(1) 垂直的及水平的	(1) 坝头、坝基	(1) 坝头平坝、截水槽、采石场	(1) 坝头、坝基、水库边坡	可能用于截水槽
(2) 页岩回弹、城市的陡切坡	(1) 路堑边坡	(1) 范围控制	(2) 城市的陡切坡	
(2) 页岩回弹、城市的陡切坡	(1) 路堑边坡	(1) 范围控制	(2) 城市的陡切坡	
(1) 隧洞式高压输水道				
(2) 论证监测方案	(1) 岩坡	(1) 保护坑内和邻近的建筑物	(2) 保护建筑物及门框	
(2) 论证监测方案	(1) 岩坡	(1) 保护坑内和邻近的建筑物	(2) 用于隧洞、溢洪道	
(1) 论证监测方案	(1) 防止气爆、矿石溶解分析	(1) 防止过早起爆	(1) 牵引道	(2) 溶解采矿
(1) 论证监测方案	(1) 交通隧洞、矿房等	(1) 控制范围、振动	(1) 岩石锚杆、喷混凝土	
(1) 论证监测方案	(1) 顶板、墙、反拱	(1) 控制范围、振动	(1) 选择临时及永久支护	
(1) 论证监测方案、细部设计	(1) 顶板、柱、反拱	(1) 控制范围、振动	(1) 岩石锚杆或喷混凝土	
(1) 论证监测方案、细部设计	(1) 在爆破荷载作用下	(1) 控制范围、振动	(1) 岩石锚杆或喷混凝土	
	(1) 页岩、蒸发岩中的深孔、套管深度			(1) 改善渗透性
	(1) 套管深度			(1) 干热岩层的开发
(2) 监测岩坡	(1) 岩坡、废物处理		(1) 岩坡及芯体竖井	
(1) 论证监测方案	(1) +200℃的作用	(1) 控制范围、振动	(1) 废物罐回填	(1) 中等埋深的贮料库
(1) 设计及监测方案	(1) +200℃或-200℃的作用	(1) 控制范围、振动的	(1) 长久的设计寿命	
(1) 监测地表的沉降	(1) 地表沉降			(1) 新技术

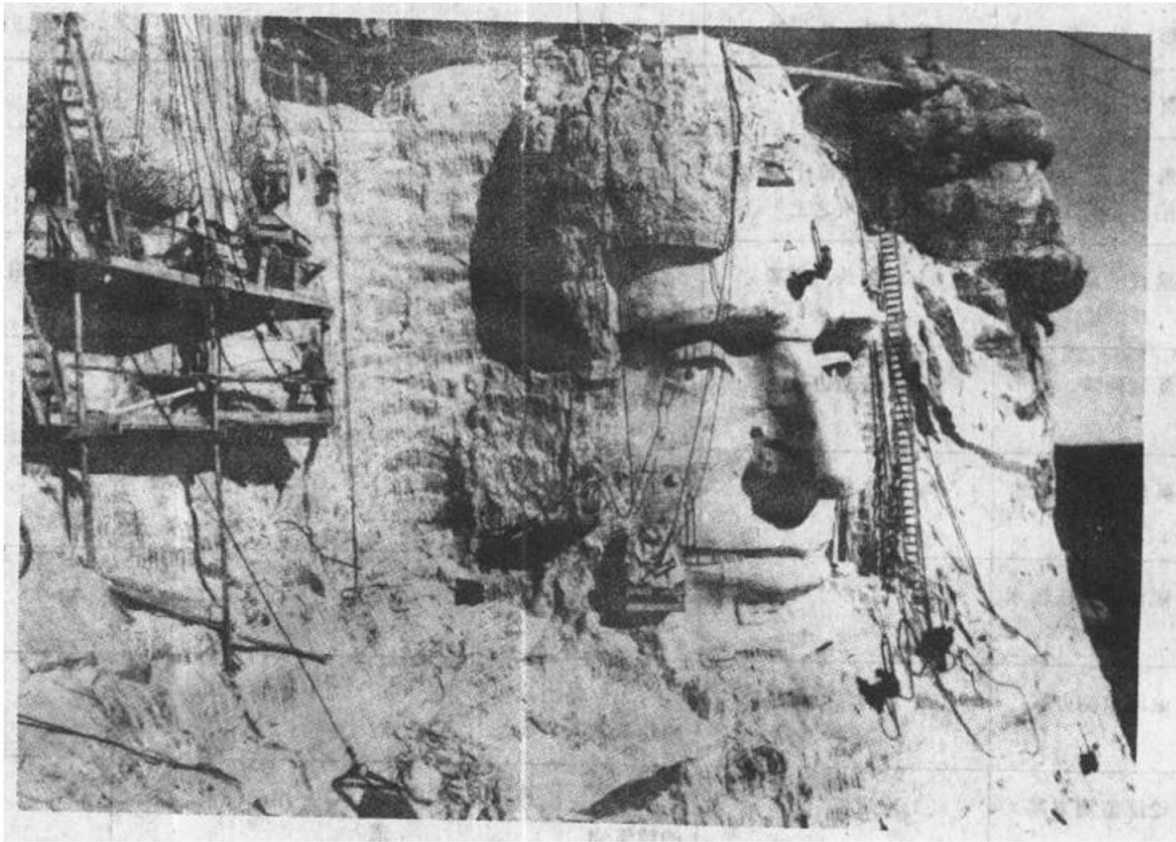


图 1-1 卢西摩尔山中的罗斯福及林肯雕像

G. 博格勒姆 (Borglum) 选择了这个位置, 并仔细地调整了雕像的方位以适应岩体的缺陷。风化的岩石用控制爆破炸掉, 孔距和装药量随着临近最后表面而逐渐减小, 最后几英寸是用密集的钻孔和凿子削去的 [查利斯·德默莱 (Charles d'Emery) 摄影。经 L. 博格勒姆 (Borglum) 和 K. C. 登·都文 (Den Dooven) 同意复制。录自《卢西摩尔山风光的故事》, K.C. 出版社, 1978]

位于地表的建筑物设计, 除非建筑物很大或者很特殊, 或者岩石性质特异, 不然, 通常都不需要研究岩石的性能。当然, 工程师总会密切注意地质的隐患, 如可能影响建筑物选址的活断层或滑坡。工程地质学家有责任揭露潜在的隐患, 而岩石力学则有助于减少这种危险。例如, 在里约热内卢, 花岗岩的剥离层曾对陡岩脚下的建筑物造成威胁。这时, 就可以请岩石工程师来设计一个锚杆系统, 或者进行一次控制爆破以作为补救措施。对于私人住宅之类的轻型建筑物, 只用岩石力学的知识便可帮助人们认清页岩地基可能存在的膨胀性。而对于高大的楼房、大型桥梁和工厂等, 则有可能还需要进行在荷载作用下岩体的弹性试验和滞后沉陷试验。在喀斯特灰岩或深部已采空的煤层上, 则可能要进行大量的试验研究和采用专门设计的基础, 以保证建筑物的稳定性。

高层建筑与岩石力学密切相关的另一个方面是爆破的控制, 要使振动不致危害邻近的建筑物或扰动附近的住宅 (图 1-2)。在城市中, 新楼房的基础可能非常靠近老的建筑物。还有, 临时开挖也可能需要锚固系统, 以防止滑坡或岩块松动。

最苛求于岩石力学的地面建筑物是大坝。特别是拱坝和支墩坝, 它作用在岩基或坝头的应力很大, 同时还承受水压力及其它水的作用。除了必须注意地基内的活断层外, 还要仔细地评价可能产生的滑坡对水库造成的威胁。意大利瓦央 (Vajont) 坝失事的严重灾难至今仍记忆犹新。在这次事故中, 巨大的滑坡体使库水漫过高大的瓦央拱坝, 致使下游两

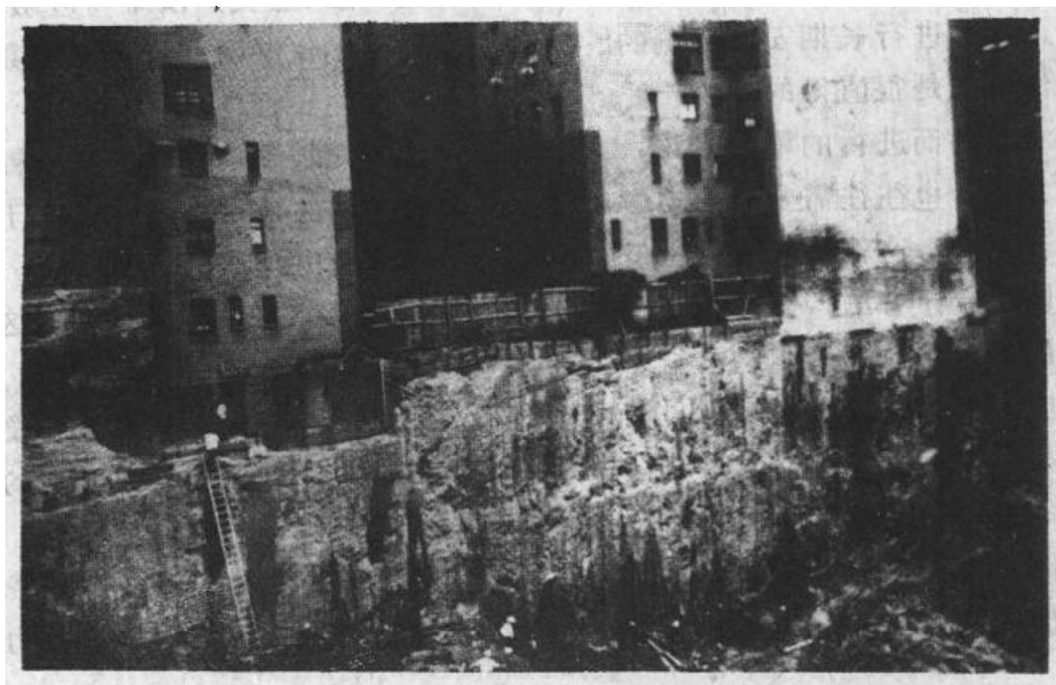


图 1-2 在非常靠近已有建筑物的地方进行岩石开挖是城市建设中常遇到的问题

[A.J.小亨德朗 (Hendron, Jr.)提供照片, 曼哈顿 (Manhattan) 片岩, 亨特 (Hunter) 学院, 纽约]

千多人丧生。岩石力学还可应用在材料的选择上,例如选择保护堤坡免遭波浪冲蚀的抛石、混凝土骨料、各种反滤层材料和填筑石料等。岩石试验可以用来确定这些材料的耐久性和强度特性。由于不同的坝型在岩体上产生的应力状态很不相同,岩石力学便有助于选定适合于坝址的坝型。因此,岩体变形和岩体稳定的分析就成为工程设计研究的重要组成部分。

对于混凝土坝,通过室内和现场试验所确定的坝基与坝头岩体的变形特性值,可在混凝土坝应力的模型研究或数值分析中综合运用。所有坝体下面的大小楔形岩体的安全性都要通过静力计算来确定。必要时,需要使用锚索或锚杆等支护设备,以便对基岩或坝与基岩的接触面施加预应力。

为了清理岩石而进行的爆破,必须保证清理后岩石的整体性,并限制邻近建筑物所受的振动在容许的范围之内。大古里 (Grand Coulee) 第三发电厂厂址上,在没有任何可能降低库水位的情况下,为了开挖发电厂引水渠,在紧靠大古里坝的地方进行了爆破。还采用保留花岗岩部分岩体的办法以形成一道岩石“围堰”,一直等到几年后厂房开挖完成时才将它挖除。它是在围堰附近上下游爆破区内采用控制爆破来完成的。

运输工程也在许多方面有赖于岩石力学。铁路、公路、运河、管道和压力钢管的路堑边坡设计中,可能要对断裂的岩体进行试验和分析。如果根据岩石力学的研究,通过调整求得合适的线路方位,很可能节省大量造价,当然这并不总是切实可行的。是否应把这些线路设在地下,在一定程度上取决于对岩石情况的判断,以及隧洞与明挖费用的比较。如果能把压力钢管埋设在隧洞里,让一部分应力由岩石来承担,则可以节省钢材;在这种情况下,可通过岩石试验测定设计上所需要的岩石特性。有时,压力管道可以不要衬砌;这时,需要进行岩石的应力测量,以保证不致因渗漏而发生危险。在市区内,由于地价高昂,

地面的运输线可能要采用近于直立的边坡,这就需要人工支护以维持边坡的长期稳定。为了建立一个用来进行长期安全监测的、能够说明问题的仪器网,进行一定数量的岩石测试和分析工作可能是很值得的。

为了其它目的而进行的地面开挖,在爆破控制、开挖坡度、安全台阶位置的选择以及支护措施等方面,也往往需要岩石力学的知识。露天矿坑的是否合理,取决于运用是否方便和开挖是否经济,这就要求进行大量的研究工作以选择出合适的开挖坡度。目前正在发展一种多变量的统计方法,使矿业规划人员能最有效地确定开采费用。由于这类矿坑不允许采用过大的安全系数,只能通过岩体应力、应变的监测来维护它们的安全。矿坑内通常不用人工支护,因为它的费用过高。但在发电厂厂址以及有粉碎机械或输送设备的地方,有时也需要采用岩石锚杆、挡土墙结构、排水设备和其它措施。水库溢洪道的开挖有可能达到很可观的规模,因而需要重视岩石力学的问题(图1-3)。对于这类开挖,其价值远高于它们的造价,因为它们不幸的破坏会导致大坝的漫顶;大型溢洪道的开挖费用,很可能与大坝的造价匹敌。因此,这种开挖本身就应该看作是一种工程结构。岩石力学的研究,

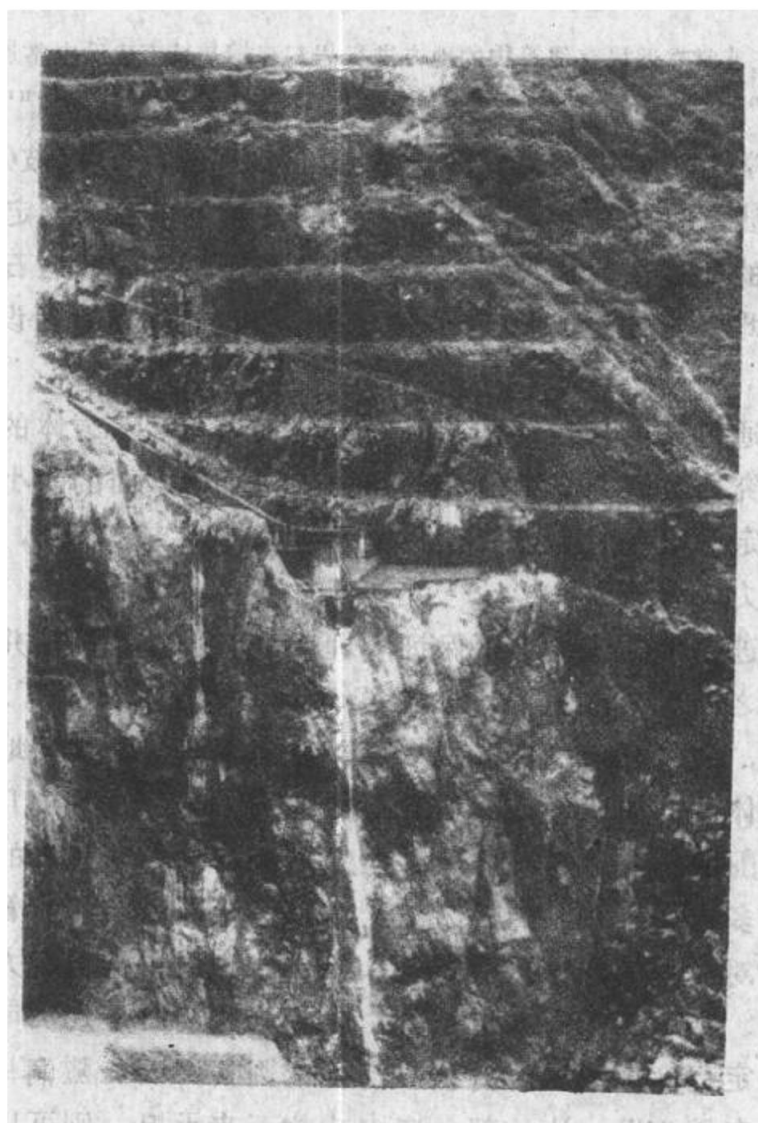


图 1-3 哥伦比亚奇沃 (Chivor) 堆石坝河岸溢洪道的挑流坎
注意左下角的道路和交通隧洞,以及挑流坎下的排水隧洞〔英格特克 (Ingetec) 公司的工程师提供的照片〕

会有助于决定选用溢洪道方案，还是选用泄洪洞方案。

地下开挖在很多方面需要依靠岩石力学知识。在采矿中，切削机和钻机必须根据相应的试验室试验所测得的岩石状况来进行设计。使用鼯鼠式或另一些掘进机开凿隧洞时，也应该这样设计。采矿的一个重大决策是在开采矿石时，究竟是力图维持洞室的形状不变，还是允许岩体适当变形。这时，岩体状况及应力条件在制定正确决策中是最为重要的。在稳定法采矿中，矿柱、矿室及其它组成部分的尺寸，是通过数值分析、理论计算和进行全面的岩体试验等岩石力学的研究来确定的。在非稳定法采矿的情况下，牵引道和“牵引点”则是根据废岩混入矿石最少和取得最优效率的原则来布置的。

地下洞室目前除了用于运输与采矿以外，还另有一些用途，其中有些用途需要新的资料数据和专门技术。在地下洞室内存贮液化天然气，要求测定在极端低温条件下的性能和进行岩体热传导方面的分析。在地下洞室内存贮油和气（图1-4），需要有一个能防止渗漏的地下环境。任何一个大型地下洞室，不管它的特殊要求如何，都应当在没有支护的情况下能保持基本稳定，这取决于岩体的应力状态，以及不连续面的情况和性质。在山区，地下水电厂较地面电厂有较多的优点。地下水电厂有很大的地下厂房（例如，跨度达25m的）

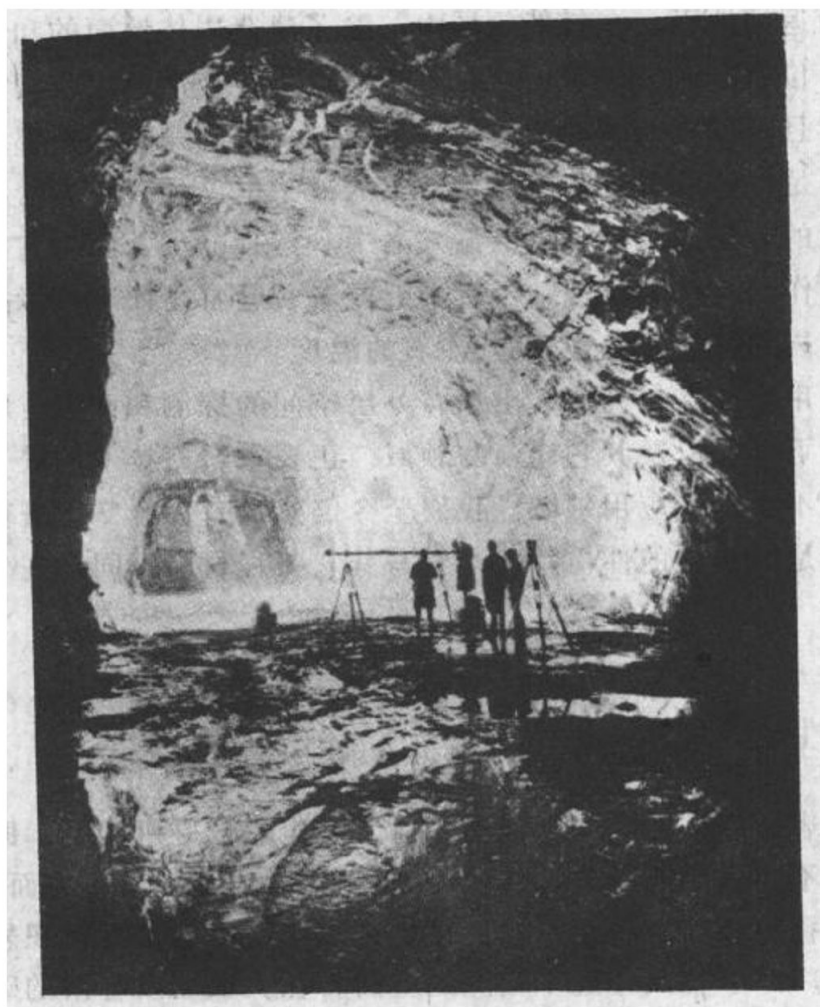


图 1-4 挪威存贮石油产品的一个地下洞室
一个存贮设施包括许多个这样的洞室 [T. 布里克 (Brekke) 提供照片]

和其它许多洞室，它是复杂的空间布置（参看图7-1）。这些洞室的方位和布置，几乎都需要根据岩石力学及地质学来研究决定。爆破、支护设计以及这类目的其它工程问题，也都与岩体状况有密切关系。因此，岩石力学可以说是一种基本工具。军事方面对地下洞室的兴趣在于建立不可摧毁的军事设施。由于这些洞室必须在地壳巨大震动力的作用下能保持安全，所以岩石动力学在这类工程的设计中占有重要地位。军事方面已进行过多次专门的原型破坏试验，提高了对岩体性能以及岩体与建筑物相互作用的认识。

岩石力学在能源开发领域（除前面提到的水电工程以外）中也是很重要的。在采油工程中，钻头的设计与岩性有关；钻头磨损是采油成本的一个重要组成部分。岩石力学可用来解决深孔钻探和深层采油所发生的问题。在页岩、盐岩以及另一些岩层中，由于岩体的流动和钻孔的迅速闭合，限制了钻孔的深度。在盐湖城建成了实验室〔德拉·特克（Terra Tek）钻孔实验室〕，可进行深达2万英尺、地温高达650°F的原型尺寸钻孔的模拟试验。石油工业最先应用水压破裂法以增加油层的采油率。目前，水压破裂法已成为一种标准的油层作业方法。水压破裂法也正在作为干、热岩层中进行地热交换、产生地热能的一种机理来进行研究。按照洛斯·阿拉莫斯（Los Alamos）科学实验室的计划，在野外原型试验研究项目中，水压破裂使冷水循环到热岩层内，热水通过与破裂面顶层相交的第二个钻孔而返回地面。在核能领域内，除了建造岩体地面的和（或）地下的设施问题，以及由特许单位精心预防，以保证在营造地址不存在活断层或其它地质隐患等问题以外，还存在有剧毒且时效很长的大量放射性废物的处理问题，这些都成为这种工业的一种负担。目前的办法是把这些废物密封在不锈钢的罐子里，埋置在岩盐沉积物或花岗石、玄武岩以及其它类型的岩层内专门挖掘的洞穴之中。选择盐层是因为它相当高的导热性和一般不透水性的共同作用，使盐层往往没有裂缝或者裂缝都是闭合的缘故。在埋置了装有核废物的罐子以后，岩层可能会出现200℃左右的温度。

岩石力学的新用途正在以高速度出现。外层空间的探测和开发、地震预报、溶解法采矿、压缩空气的地下存贮以及其它崭新的领域，正要求岩石技术的进一步发展。但是，即使对于上述某些并不特殊的应用领域，我们至今仍然没有完全掌握进行合理设计所需要的岩石力学知识。这是因岩体的性质特殊，它与其它工程材料不同，在处理上也更为困难之故。

1-2 岩体性质

当试图用公式表达固体的力学性能时，通常假定它们是理想的，即均质的、连续的、各向同性的（性质不随方向而异）、线性的和弹性的。岩体在许多方面可能都不是理想的。首先，由于通常有孔隙和裂隙存在，它们很少是真正连续的。在沉积岩的颗粒之间可以找到相互连通的孔隙，即一些尺寸近于相等的空洞。在火成岩及可溶的碳酸岩中也可以找到其它来源的孤立的晶洞。由于岩体存贮及输送液体的能力在很大程度上取决于这些孔隙的性质。人们，主要是采油工程人员，已经发展了一种专门理论，用来研究多孔岩石的变形、应力和其中的水压力。微裂隙是一种微小的平面裂缝，通常存在于经受过内应力的坚硬岩

石之中,它们表现为晶体内的和晶体表面的裂缝。一块裂了缝的岩石好像是一块已经加载到出现裂缝的样品(指已受到破坏的样品)。对于岩石来说,裂隙网的性质几乎与其矿物组成同样重要,甚至更具有决定性的意义。裂隙和孔隙,集合在一起就会有如下的作用:造成荷载与变形的非线性关系,特别是在低应力的情况下;降低抗拉强度(尤其是裂隙);使应力与材料性质有关;使试验结果多变而分散;还可能在岩性的测试中导致有缩尺影响。

大多数岩体非理想的一个方面是有宏观不连续面的存在。规则裂缝与断裂通常存在于地面下较浅处,但有时也延伸至几千米深处。节理、层面、小断层以及其它重复出现的平面断裂,会从根本上改变现场岩体的性能,使之与未扰动试样在实验基础上所作出的估计不同,虽然试样也可能包含有裂隙。不连续岩体力学对于从事地面建筑、地表开挖、地下浅层开挖的工程师们特别重要。1959年马尔巴赛(Malpasset)拱坝基岩内部的破坏,就是由于被断层和节理切割成的一块岩体移动的结果(图1-5)。



图 1-5 马尔巴赛拱坝失事后左坝头一瞥
不连续面切割成的楔形体的移动导致混凝土拱的破坏,其中一个不连续面形成坝头新露出的岩面

岩体中单一的断裂会减少抗拉强度,使垂直于断裂面方向的抗拉强度接近于零。同时也限制了平行于断裂面方向的抗剪强度。如果节理分布不是杂乱无章的(尽管实际上很少有这种情况),其结果必然使岩体强度以及所有其它性质都具有明显的各向异性。例如,

荷载斜交于层面时的地基强度可能要比荷载垂直或平行于层面时的强度小一半以上。许多岩石,即使不存在不连续结构,但由于矿物颗粒的排列于某一方向偏多或者有偏重于某一方向的应力史,也往往是各向异性的。层理和片理使片岩、板岩和其它变质岩类在其变形、强度及其它性质上表现出很强的方向性。层面使页岩、薄层砂岩、石灰岩及其它沉积岩类呈现高度的各向异性。即使是表面上看出完全没有层面结构的岩石样品,如厚层砂岩和石灰岩,但由于它们从泥沙质逐渐转变为岩石时经受过不相等的主应力作用,所以也会具有方向性。还有最后一点,即任何具有不同初应力的裂隙岩石,因为它的性质在很大程度上受到横过裂隙的应力状态的影响,都将是各向异性的:当裂隙闭合时,它们是某种性质的材料;而当裂隙张开或错动时又成为另外一种性质的材料。

在以下各章里,我们讨论的是“岩石力学”,但由于“岩石”一词包括了性质非常不同的各种石料,如果要使它具有普遍的应用价值,就需要在各种不同性质石料的广阔范围内进行讨论。花岗岩在围压达几百兆帕(MPa)^①作用下,性脆而具有弹性。碳酸岩类在一般的压力下即呈塑性,并像粘土一样地流动。致密页岩和脆性砂岩在水中浸没时强度降低。石膏和岩盐在较低的围压下就具有塑性的倾向,而且有高度的可溶性。

尽管岩石作为一种工程材料具有以上的各种问题,但是只要有目的地进行测试、计算和观测,其结果仍然可作为工程决策的依据。这些问题也就是我们所要研究的主题。

参考文献

1 文献

KWIC Index of Rock Mechanics Literature published before 1969, in two volumes, E. Hoek (ed.). Produced by Rock Mechanics Information Service, Imperial College, London. Published by AIME, 345 E. 47th Street, New York, NY 10017. A companion volume, Part 2, carrying the bibliography forward from 1969 to 1976 was published by Pergamon Press Ltd, Oxford (1979); J. P. Jenkins and E. T. Brown (eds.).

Geomechanics Abstracts: see *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. These are key-worded abstracts of articles published worldwide, issued and bound with the journal.

Attewell, P. B. and Farmer, I. W. (1976) *Principles of Engineering Geology*, Chapman and Hall, London.

Coates, R. E. (1970) *Rock Mechanics Principles*, Mines Branch Monograph 874, revised, Canadian Department of Energy, Mines, and Resources, Ottawa.

Goodman, R. E. (1976) *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*, West Publishing Co., St. Paul, Minn.

Hoek, E. and Bray J. (1978) *Rock Slope Engineering*, Second Edition, Institute of Mining and Metallurgy, London.

Jaeger, C. (1972) *Rock Mechanics and Engineering*, Cambridge University Press, London.

^① 1 MPa 等于 145 psi (磅/英寸²)