

SHIYONG YANSHI GONGCHENG JISHU

实用 岩石工程技术

(加) Evert Hoek 著

刘丰收 崔志芳 王学潮 李金都 李清波 译



黄河水利出版社

97

1197

实用岩石工程技术

(加) Evert Hoek 著

刘丰收 崔志芳 王学潮 李金都 李清波 译

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书共分 16 章,重点论述了岩石力学和岩石工程中的问题,主要包括:岩石工程的发展,岩石工程设计可接受的风险水平,岩体分类和不连续面的抗剪强度,隧洞中结构面控制的不稳定岩体,阿根廷的一个隧道工程实例,香港的岩石边坡稳定问题,安全系数和破坏概率,岩崩灾害分析,原位应力和重分布应力,岩体的性质,软弱岩石中的隧道和大型地下厂房,岩石锚杆和锚索,喷混凝土支护和岩石中的爆破破坏等。

本书内容丰富,图文并茂,富有实践性,反映了当今国际上代表性的岩石力学和岩石工程水平。可供从事公路工程、铁路工程、水利水电工程、矿山工程、岩土工程、地质工程、土木工程等行业的工程设计、施工、科研人员和有关高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用岩石工程技术/(加)霍克(Evert Hoek)著;刘丰收等译. — 郑州:黄河水利出版社,2002.9

书名原文:Practical Rock Engineering

ISBN 7-80621-617-0

I. 实… II. ①霍…②刘… III. 岩土工程-工程技术 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 085152 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrp@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16.25

字数:375 千字

版次:2002 年 9 月第 1 版

印数:1—1 100

印次:2002 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-617-0/TU·28

定价:40.00 元

著作权合同登记号:图字 16-2002-039

目 录

序

译 序

第一章 岩石工程的发展	(1)
第一节 绪 言	(1)
第二节 岩爆和弹性理论	(4)
第三节 岩体中的不连续结构面	(6)
第四节 工程岩体力学	(6)
第五节 地质资料的收集	(6)
第六节 岩石的实验室试验	(8)
第七节 岩体分类	(8)
第八节 岩体强度	(9)
第九节 原位应力的量测	(10)
第十节 地下水问题	(11)
第十一节 岩石加固	(12)
第十二节 岩石中的开挖方法	(13)
第十三节 分析工具	(15)
第十四节 结 论	(15)
第二章 什么样的岩体工程设计是可接受的	(16)
第一节 绪 言	(16)
第二节 水库区滑坡	(21)
第三节 岩质边坡的变形	(23)
第四节 岩体中的结构破坏	(25)
第五节 软弱岩体中的洞室开挖	(27)
第六节 安全系数	(32)
第七节 概率分析	(34)
第三章 岩体分类	(36)
第一节 绪 言	(36)
第二节 工程岩体分类	(36)
第三节 地质力学分类	(41)
第四节 采矿业对 <i>RMR</i> 分类的修改	(44)
第五节 岩石掘进质量指标—— <i>Q</i> 系统	(45)
第六节 岩体分类系统的运用	(51)

第四章 不连续面的抗剪强度	(53)
第一节 绪 言	(53)
第二节 平面的抗剪强度	(53)
第三节 粗糙面的抗剪强度	(56)
第四节 Barton 抗剪强度估计	(56)
第五节 <i>JRC</i> 的野外估计	(57)
第六节 <i>JCS</i> 的野外评价	(57)
第七节 尺寸对 <i>JRC</i> 和 <i>JCS</i> 的影响	(57)
第八节 有充填物的不连续面的抗剪强度	(57)
第九节 水压力的影响	(62)
第十节 瞬间凝聚力和摩擦力	(62)
第五章 结构面控制的隧洞不稳定体	(64)
第一节 绪 言	(64)
第二节 楔形体的确认	(64)
第三节 控制楔形体破坏的支护	(67)
第四节 开挖顺序	(70)
第五节 概率理论的应用	(71)
第六章 阿根廷的 Rio Grande 工程	(72)
第一节 绪 言	(72)
第二节 尾水洞的支护	(73)
第三节 厂房的支护	(75)
第四节 支护设计和费用的讨论	(77)
第五节 使用 UNWEDGE 程序进行分析	(78)
第七章 香港的一个边坡稳定问题	(81)
第一节 绪 言	(81)
第二节 问题的描述	(81)
第三节 极限平衡模型	(84)
第四节 抗剪强度的估计	(86)
第五节 地震加速度的估计	(87)
第六节 滑动面的剪力分析	(88)
第七节 对秀茂坪边坡短期稳定性的确定	(88)
第八节 长期治理措施的评估	(89)
第九节 长期治理工作的最后决定	(91)
第八章 安全系数和破坏概率	(92)
第一节 绪 言	(92)
第二节 敏感性分析	(92)
第三节 概率论简介	(93)
第四节 失稳概率	(96)

第九章 岩崩危险分析	(99)
第一节 绪 言	(99)
第二节 岩崩机理	(100)
第三节 减轻岩崩危险的可能措施	(102)
第四节 岩崩危害分类系统	(105)
第五节 高速公路上岩崩的危险性分析	(111)
第六节 预测风险与可接受风险对比	(114)
第七节 结 论	(115)
第十章 原位应力和诱发应力	(116)
第一节 绪 言	(116)
第二节 原位应力	(116)
第三节 世界地应力图	(118)
第四节 应力测量方法的应用	(121)
第五节 诱发应力分析	(122)
第六节 应力分析的数值算法	(124)
第七节 二维应变分析的工程实例	(128)
第十一章 岩体性质	(136)
第一节 绪 言	(136)
第二节 广义霍克-布朗(Hoek-Brown)判据	(136)
第三节 完整岩石的性质	(137)
第四节 试样大小的影响	(140)
第五节 地质强度指标	(143)
第六节 摩尔-库仑参数	(146)
第七节 变形模量	(152)
第八节 破坏后特性	(152)
第九节 岩体强度估算的可靠性	(154)
第十节 评价岩体性质的实例	(160)
第十二章 软弱岩石中的隧洞	(170)
第一节 绪 言	(170)
第二节 围绕正在掘进的隧洞的变形	(170)
第三节 隧洞变形分析	(171)
第四节 隧洞变形的无量纲曲线	(173)
第五节 支护能力的估算	(177)
第六节 实际例子	(177)
第十三章 软弱岩石中的大型地下厂房	(185)
第一节 绪 言	(185)
第二节 岩体强度	(185)
第三节 原位应力条件	(187)

第四节	地下工程之间的岩柱的规模	(190)
第五节	在软弱岩石中使用混凝土拱的问题	(192)
第六节	吊车梁	(193)
第七节	洞室形状的选择	(195)
第八节	节理和层面的影响	(197)
第九节	钢筋的设计	(198)
第十节	开挖方法	(207)
第十一节	洞室仪器和监测	(208)
第十二节	结论和总结	(209)
第十四章	岩石锚杆和锚索	(211)
第一节	绪 言	(211)
第二节	张拉岩石锚杆	(211)
第三节	非张拉锚杆	(215)
第四节	荷载与变形特征	(218)
第五节	锚 索	(221)
第十五章	喷混凝土支护	(228)
第一节	绪 言	(228)
第二节	喷混凝土技术	(228)
第三节	喷混凝土的应用	(234)
第四节	喷混凝土支护设计	(236)
第十六章	岩石中的爆破破坏	(239)
第一节	绪 言	(239)
第二节	历史回顾	(239)
第三节	爆破破坏	(240)
第四节	破坏控制	(241)
第五节	爆破设计和控制	(245)
第六节	结 论	(246)
霍克博士简介		(247)
霍克博士写给中国读者的信		(248)

第一章 岩石工程的发展

第一节 绪 言

我们总是把岩石力学想像为现代工程的学科,然而,早在 1773 年,库仑(Coulomb)在巴黎的法国科学院就把从波尔多(Bordeaux)所取得的岩石试验结果对外发表出来(Coulomb,1776;Heyman,1972)。1884 年,法国工程师开始建造巴拿马运河,这项工程由美国陆军工程师团于 1908 年完成。在 1910 年到 1964 年的半个世纪里,沿运河的开挖部分发生了 60 处滑坡,美国陆军工程师团的近期工作表明(Lutton 等,1979),这些滑坡主要由不连续结构面控制,并且现代岩石力学概念完全可用于分析这些破坏。Karl Terzaghi (Terzaghi,1936;Terzaghi 和 Voight,1979)于 1936 年在第一届土力学和基础工程国际会议上的主席发言中谈到巴拿马运河滑坡时说:巴拿马运河深挖边坡灾难的降临给我们敲响了警钟,我们还无法预测人类活动所造成的后果……

1920 年,Josef Stini 开始在维也纳技术学院教授岩土工程地质学,他在 1958 年去世前,发表了 333 篇论文和专著(Muller,1979)。他创办了《地质与工程》杂志,是今天岩石力学的创始人,并且可能是他首先强调了不连续结构面对岩体工程性质影响的重要性。

其他各个领域的著名科学家和工程师在 20 世纪早期对岩石的特性做了一些有益的工作。Von Karman(1911),King(1921),Griggs(1936),Ide(1936)和 Terzaghi(1945)都对岩石材料的破坏做了研究。1921 年,格里菲斯(Griffith)提出他的脆性材料破坏理论,1931 年巴奇(Bucky)开始使用离心机研究模拟重力作用下矿井模型的破坏。

这些人从未把自己归为岩石力学工程师——那时尚未有此类的头衔。但是,正如我们今天所知,他们都对岩石力学的基础工作做了很大贡献。我无意对 1960 年以前出版的有关岩石力学的论文列出冗长的清单,但是,上述例子给出了 1960 年以前岩石力学所取得的重要进展。

20 世纪 60 年代早期,对于世界范围内岩石力学的大发展非常重要。在这一时期很多灾难性破坏的发生清楚地表明:在岩石和土中,我们无法预测人类的活动所造成的后果(Terzaghi 和 Voight,1979)。

1959 年 12 月法国 Malpasset 混凝土拱坝基础失事,洪水使约 450 人遇难。1963 年 10 月意大利 Longarone 镇的 2 500 人由于滑坡产生的波浪越过瓦依昂(Vajont)大坝而丧生(如图 1-1 所示)。这两次灾难对土木工程中的岩石力学具有重要影响。有大量论文讨论了这些破坏的可能机理(Jaeger,1972)。

1960 年,南非 Coalbrook 的一座煤矿塌方,导致 432 人丧生。这次事故引起了人们对岩石力学的广泛研究,并由此使煤柱设计方法前进了一大步(Salamon 和 Munro,1967)。

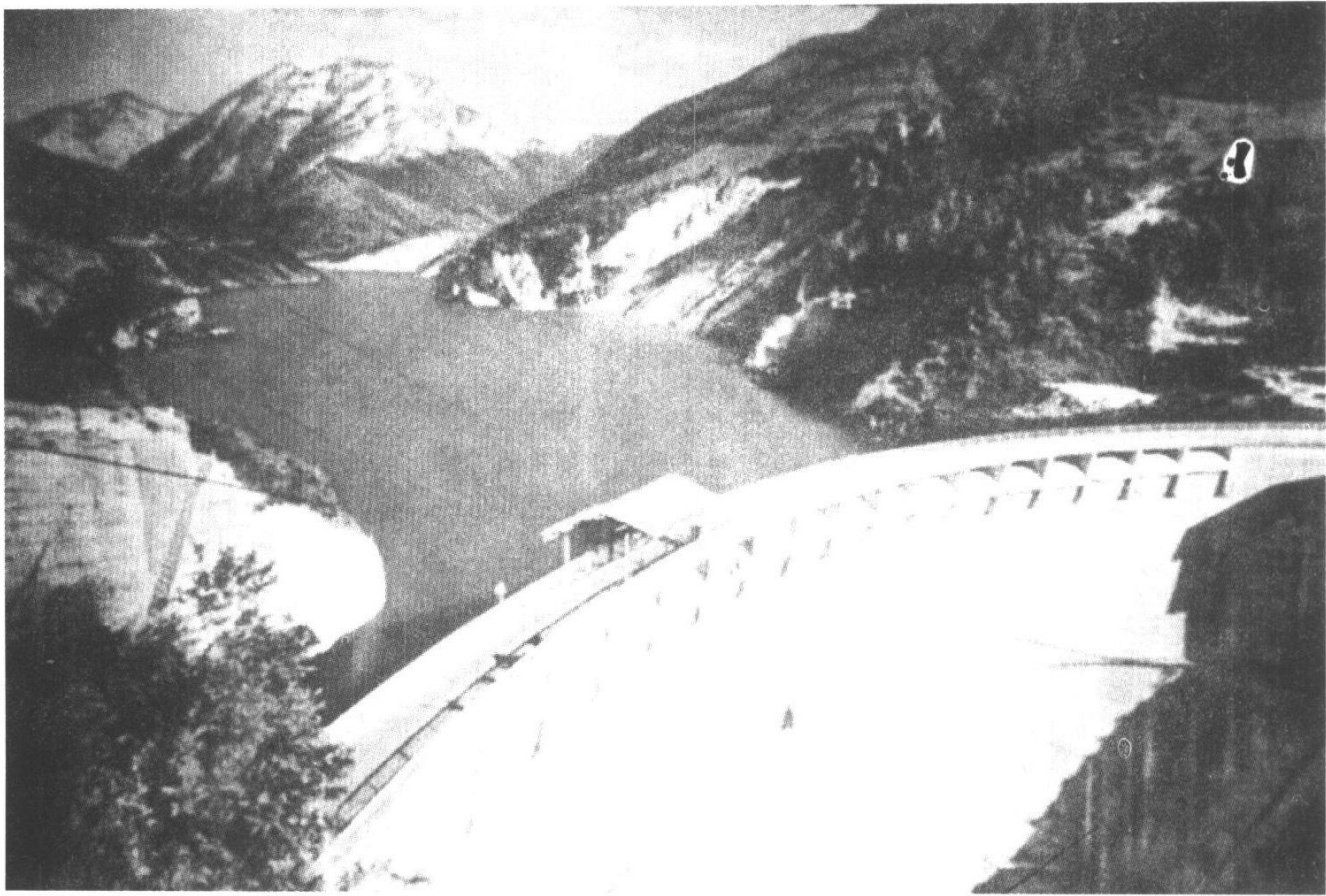


图 1-1(a) 水库蓄水时的瓦依昂 (Vajont) 大坝
(照片的中心是 Toc 山, 在水位线以上的白色不稳定山坡清晰可见)



图 1-1(b) 瓦依昂 (Vajont) 水库蓄水时, Toc 山的坡脚侵入水中并由此而产生了滑坡
(在照片的中间, 滑坡堆积物清晰可见。极高速度的下滑的滑坡物质排开的库水产生了 100 m 高的涌浪, 越过坝顶的防浪墙。从照片前景可见大坝本身未受大的破坏)



图 1-1(c) 1963 年 10 月 Toc 山滑坡前位于瓦依昂大坝下游的 Longarone 镇



图 1-1(d) Toc 山滑坡产生的洪水越过瓦依昂大坝后 Longarone 镇成为废墟

岩石力学作为正式的工程科学并取得自己的地位可追溯到 20 世纪 60 年代早期。我将在本书的以后章节里叙述这些发展。我认为我本人非常幸运地从 1958 年起紧密地参与到这个学科。我同样很幸运地经常应邀旅行,这些旅行使我接触许多与现代岩石力学发展有关的人士。

第二节 岩爆和弹性理论

岩爆是指在地下工程周围产生的应力集中极高时,岩石所发生的爆炸性破坏。坚硬脆性岩石中的深埋矿井对于此问题极为敏感。图 1-2 为地下矿井因岩爆所产生的破坏。位于南非 Witwatersr 地区的深埋金矿,印度的 Kolar 金矿,加拿大以 Sudbury 为中心的镍矿,美国爱德华州 Coeur d' Alene 地区的矿井,以及澳大利亚的 Kalgoorlie 地区的金矿,都属于受到岩爆问题影响的矿井。

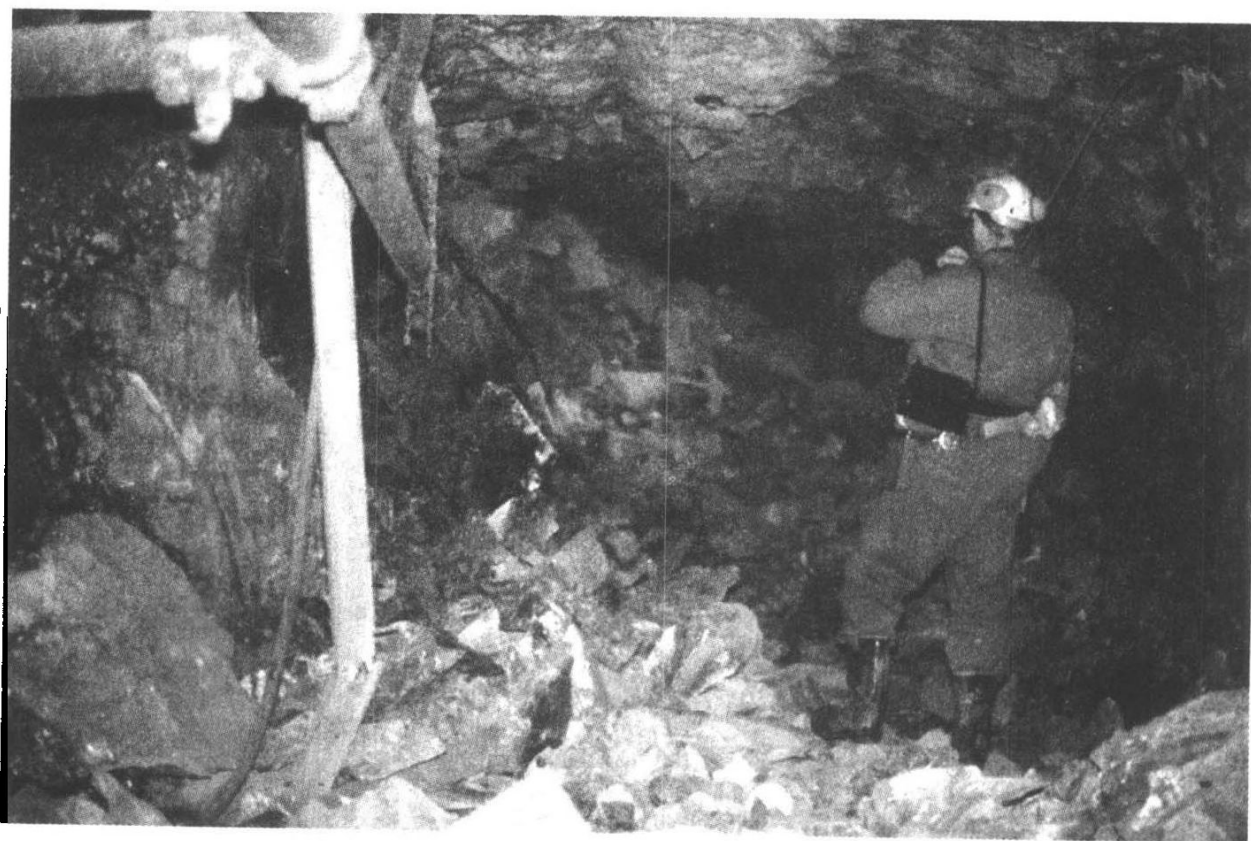


图 1-2 地下矿井中受极高应力作用的脆性岩石产生的岩爆

早在 1935 年, Sudbury 地区的深埋镍矿就已受到岩爆问题的影响, Morrison 1942 年编写了这个问题的报告。Morrison 同样在印度的 Kolar 金矿区对岩爆问题进行了研究,并把这些问题在他的一本名为《地面控制基本原理》的书里进行了论述。

Gane 等于 1946 年报道了对南非金矿岩爆问题的早期研究工作, 库克等对 1966 年以前的岩爆研究做了总结。由库克(1963)所做的岩爆地震定位研究工作使我们对岩爆机理的理解前进了一大步, 并且为微地震监测系统奠定了基础。现在这种系统在矿井岩爆问题上应用非常普遍。

几乎所有岩爆的一个共同特征是它们发生在受高应力作用的脆性岩石中。相应地, 地下采矿开挖所引发的应力是岩爆产生的一个关键因素, 可以采用弹性理论的方法对其进行分析。许多将岩石力学运用于采矿的早期工作集中于岩爆问题, 这些工作主要采用

理论解。在这些工作中,假定岩石是弹性各向同性的,并且不考虑不连续结构面的作用。在 Jaeger 和 Cook 的《岩石力学基础》(1969)一书的第一版中,在 500 页的书中有十几页提到了不连续结构面。这些评论并不意味着对这本好书的批评,但是,它说明了弹性理论在与深埋采矿问题有关的岩石力学方法中所占的主导地位。由 Coates(1966),Obert 和 Duvall (1967)所写的专著同样着重于弹性理论。

强调在研究岩石力学问题中使用弹性理论的做法在英语国家非常普遍,它既有优点也有缺点。其缺点是忽视了结构面的控制作用(如图 1-3 所示);优点是将大量的精力集中于这种方法促使了岩石力学的进步,否则,这些进步可能就不会发生。



图 1-3 在露天矿形成的台阶岩体中由相互交切的结构面控制的楔形体破坏

许多矿井和大的土木工程项目都从早期的弹性理论的应用研究中受益,并且许多地下工程的现代设计方法也起源于这些工作。

第三节 岩体中的不连续结构面

Stini 是欧洲岩石力学的先驱之一,他强调不连续结构面在控制岩体性质方面的重要性(Muller, 1979)。Stini 参加了多种类型的近地表土木工程。他着重于不连续结构面作用的研究一点儿也不令人奇怪,因为很显然,在他的工作中,这是一个主要问题。同样地, Talobre(1957)写的教科书反映了法国人的岩石力学观点,他们认为结构面的作用要比 Coates、Obert 和 Duvall 在教科书中所写的重要得多。

前面提到的 Malpasset 混凝土拱坝失事和瓦依昂灾难是这些研究的主要动力之一。由 Londe 和他在法国的合作者(1967, 1970),以及德国的 Wittke(1965)和 John(1968)所做的杰出工作奠定了三维结构分析的基础。这些方法我们至今仍在使用。图 1-3 是露天矿台阶上被两组相互交切的结构面控制的楔形体破坏。

第四节 工程岩体力学

许多世纪以来,土木和采矿工程师已经在岩石内或岩石表面建造了建筑物,并且很长时间以来,岩石中的工程原理已经得到理解。岩石力学仅仅是这些原理的正式表述,并且只是在过去的几十年里,本学科的理论 and 实践才融合在一起,形成我们现在所熟知的岩石力学。本学科发展中的一个重要事件是弹性理论的运用,它与欧洲的不连续方法在本学科的英文文献中占主导地位。人们逐渐认识到岩石既可以表现为弹性材料,又可以表现为不连续岩体,这种认识导致了本学科更成熟的方法。同时,本学科借用了土力学中处理软岩和粘土的方法,并且认识到诸如岩盐和碳酸钾之类的材料的粘弹性和流变性质的重要性。

应该指出的是,在本综述所提到的 25 年里,苏联、日本和中国在岩石力学方面做了大量的研究。但由于语言的差异,这些研究在英语国家和欧洲岩石力学研究中心几乎无人知晓,并且这些研究在英语国家和欧洲岩石力学研究中心所编制的文献中几乎无一被收入或提及。

第五节 地质资料的收集

任何实用的岩石力学分析的基础都是地质资料。基于这些地质资料,可以确定岩性、不连续结构面和材料的性质。如果所采用的地质资料不合适或不准确,那么最成熟的分析也可能变成无意义的练习。

在过去的 25 年里,收集地质资料的方法并无太大变化,野外测绘和岩芯编录并无可以接受的替代方法。用于编录的仪器有了一些改进,一个典型的例子是图 1-4 中的电子罗盘。地质工程和工程地质以被认可的大学学位课程的形式出现是岩石力学发展的重要一步。这些课程把地质师训练为认识和解释在工程设计中起重要作用的地质资料的专门人员。这些地质工程师使用 Stini 于 1920 年创立的方法,在现代岩石工程中起着越来越重要的作用。



(a)Gekom 小地层罗盘



(b)Cocla 地质地层罗盘



(c)Tectronic 4000 地质资料集收器

图 1-4 由西德 F.W.Breihapt & Sohn 公司制造的地质罗盘

一旦收集到地质资料,用计算机对这些地质资料进行处理,在点绘这些资料和统计显著趋势方面显得非常有用。图 1-5 说明了采用多伦多大学编制的 DIPS 程序绘制的极点密度等值线以及对应的大圆。

几年前,人们已经可以使用诸如钻孔电视之类的地面及钻孔的物探工具和设备,它们的可靠性和实用性随着电子元件和生产技术的改进而得到了提高。然而,现在这些设备的购置费用和运行成本很高,这些因素和从这些设备所取得的资料的解释的不确定性一起,限制了它们在岩石工程中的应用。随着进一步的发展,这些工具的使用可能会变得更加广泛。

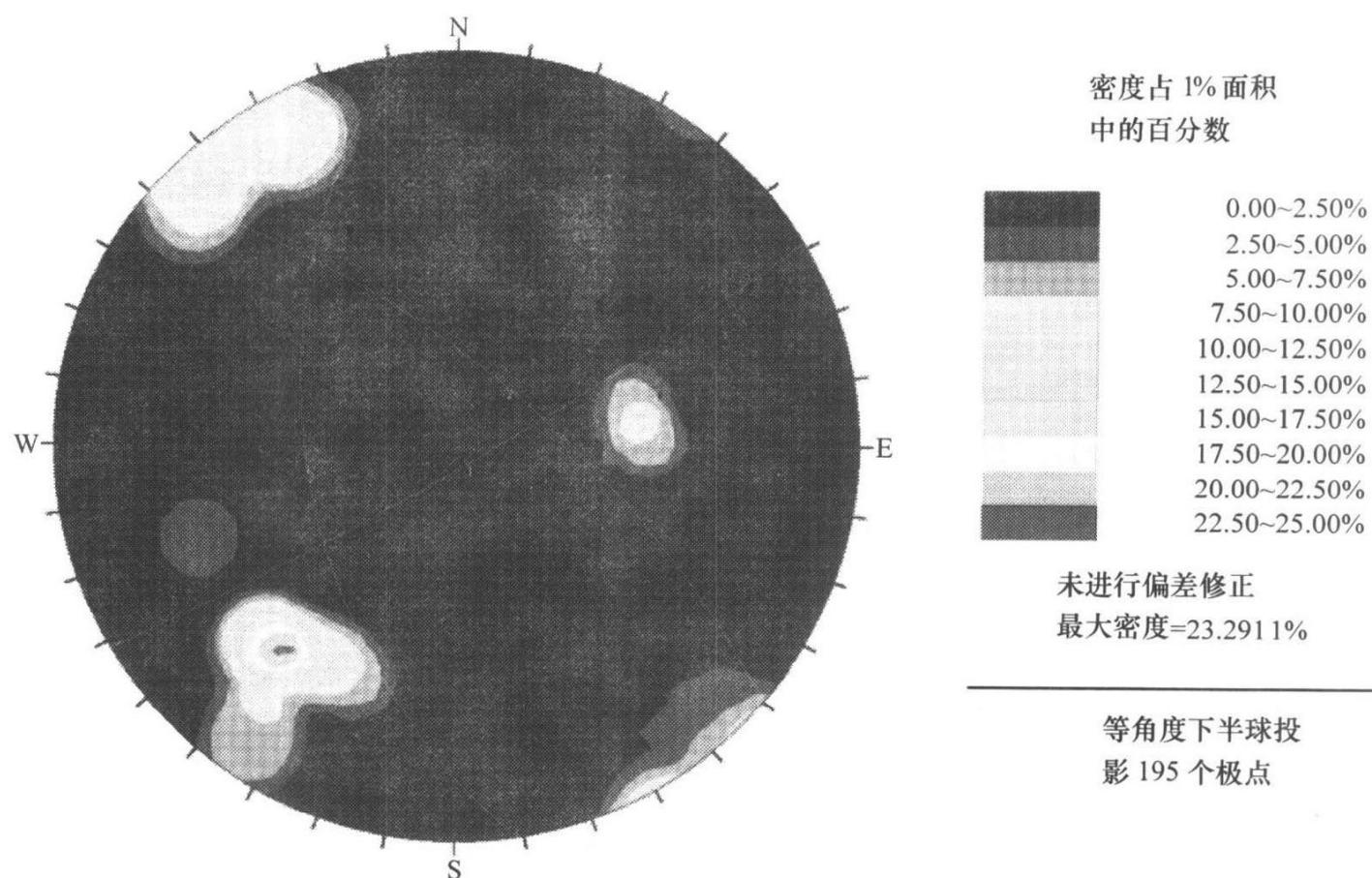


图 1-5 采用 DIPS 程序绘制的结构面特征平面图

第六节 岩石的实验室试验

有一种趋势,总是把岩石力学与岩石试样的实验室试验等同起来,因而,实验室试验在岩石力学中起着不成比例的大的作用。我这样说并不意味着实验室试验不重要,但是,我建议对一个预算分配良好的岩石力学研究项目,分配给室内试验的费用只能在 10% ~ 20% 之间。

过去的 25 年里,从土木工程和力学工程借用了室内试验技术,这些技术大部分没有变化。例外的情况是伺服控制的刚性试验机的发展,它使得我们能够确定岩石的完整的应力应变曲线。这些资料在设计地下工程时尤为重要,因为围绕洞室的破坏岩石的性质对开挖的稳定性具有重要影响。

第七节 岩体分类

岩石试样的实验室试验的主要缺陷是试样尺寸的限制,它代表了所取岩体非常小和高度选择的样品。在某些典型的工程项目中,实验室试验的样品仅代表岩体体积百分之一的一个非常小的部分。除此之外,由于只有在取样和试样制备过程中留存下来的那些样品才能进行试验,这些实验结果代表着一个高度偏移的样品,又怎么能用来估计现场岩体的性质呢?

为了提供一个岩体性质的指南,以便于选择隧洞支护系统,人们提出了许多岩体分类

系统。

这些分类的典型例子是由 Bieniawski(1973)、Barton、Lien 和 Lunde(1974)发表的。这些分类中包括完整岩石材料的强度,结构面的间距、数量和结构面的性质以及地下水的影响、现场应力、主要结构面的倾向和倾角。图 1-6 是由 Barton(1989)绘制的图表,根据 Barton、Lien 和 Lunde(1974)发表的岩石分类,它可以用来选择地下工程支护的不同类型。

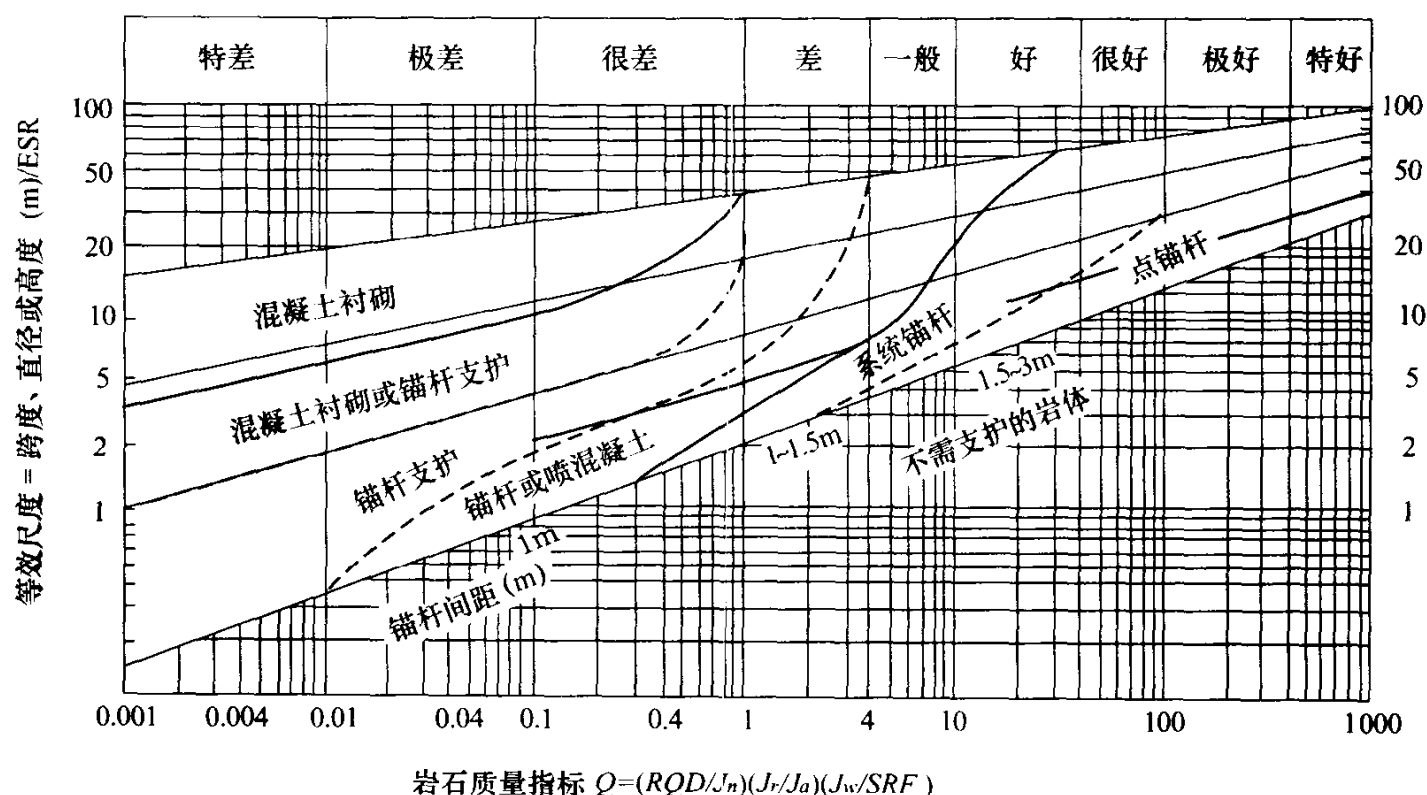


图 1-6 根据 Barton、Lien 和 Lunde(1974)发表的隧道质量指标 Q 初步选择地下开挖支护形式
(开挖支护比 ESR 取决于所设计的地下工程的具体情况; Barton, 1989)

经验证明,这些分类是非常实用的工程工具,它们不仅为隧洞支护设计提供了基础,而且使用户能够非常系统地检查岩体的性质。

第八节 岩体强度

在岩石中设计工程结构的设计师所面临的主要问题之一是估计岩体的强度。岩体通常是由离散块体所形成的相互镶嵌的矩阵所组成。这些岩体可能受到不同程度的风化作用,块体之间的接触面可以从干净新鲜到粘土充填和摩擦镜面之间变化。

一般说来,采用室内试验确定岩体的原位强度是不切合实际的,因而,这些强度必须从地质观察、单个岩块的试验结果以及所取岩样的表面特征来估计。Hoek 和 Brown (1980)对这些问题进行了广泛的研究,他们使用理论结果(Hoek, 1968)和模型研究(Brown, 1970; Ladanyi 和 Archambault, 1970)以及数量有限的强度数据提出了节理化岩体的经验破坏判据。Hoek 也提出了本书前已提及的岩体分类体系,它同样可以用于估计本经验破坏

判据所需要的岩体常数。这个破坏判据在一些工程实例中的应用表明,这些估计对扰动岩体相当好,但是,在紧密镶嵌的未扰动岩体中,如在隧洞掘进中遇到的情况,所估计的强度值是太低了。节理岩体的霍克-布朗(Hoek-Brown)破坏判据和其他的判据需要更多的工作进行改进,这一问题的有关设想将在本书的以后章节里进行讨论。

第九节 原位应力的量测

深埋地下工程的稳定性取决于工程周围的岩体强度和岩体的重分布应力。这些重分布应力是工程的形状和开挖前原位应力的函数。人们发现岩体中的原位应力的大小变化很大,这取决于所测岩体的地质历史(Hoek 和 Brown, 1980)。从理论上预测这些原位应力被认为是不可靠的,因而,对于大型的地下工程设计必须进行原位应力实际测量。图 1-7 是经常可以见到的由于高的原位应力在巨厚层岩石中引起的岩芯饼化现象。

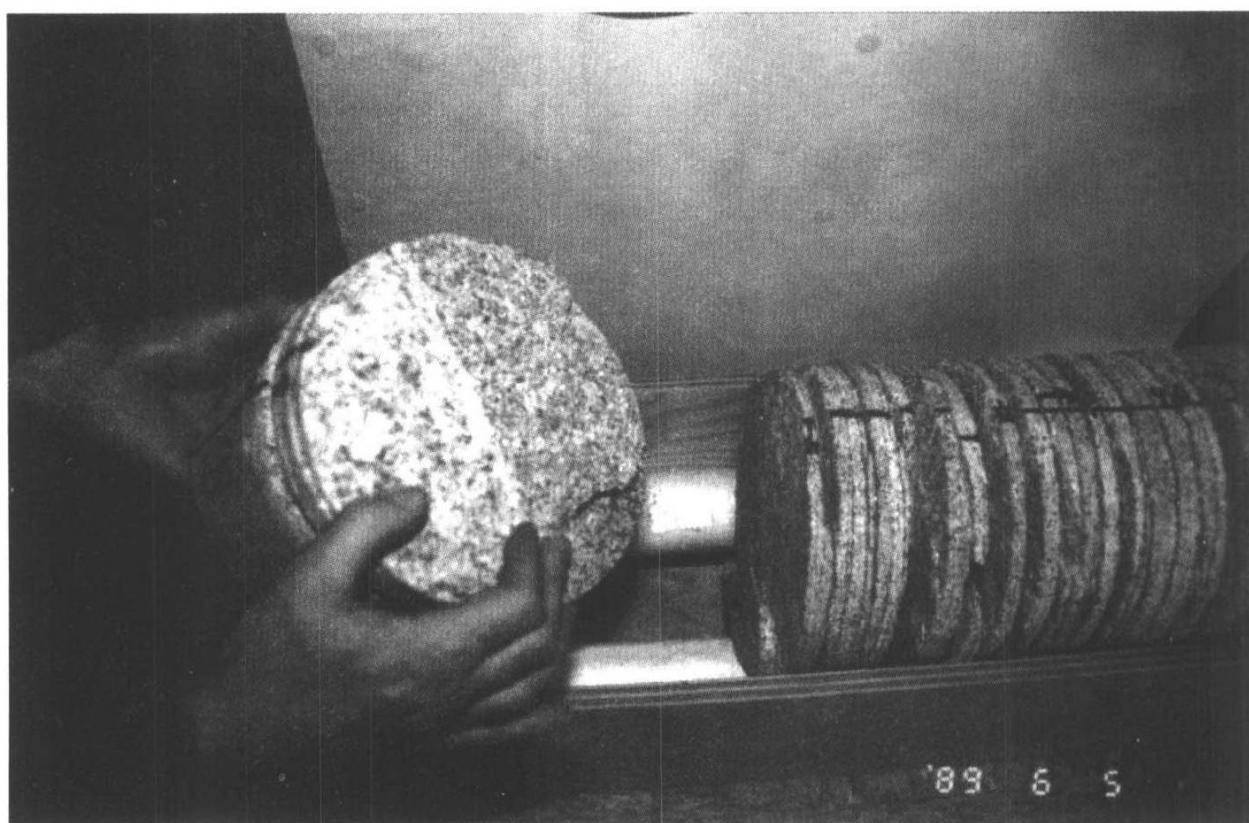


图 1-7 在高的原位应力条件下,直径 150 mm 的花岗岩岩芯的饼化现象

在场址调查的早期,当没有地下通道时,测量原位应力的方法是水压破裂法(Haimson, 1978)。在此方法中,利用水压力使已经存在于岩体中的裂隙张开以估计原位应力水平。一旦有了地下通道,可以使用原位应力测量中的应力解除法(Leeman 和 Hayes, 1966; Worotnicki 和 Walton, 1976)。实践表明,如果在测量过程中足够小心,测量结果通常适用于设计目的。原位应力测量中所使用的设备之一如图 1-8 所示。