

工程岩体分类

——采矿、土建及石油工程师与地质学者的通用手册

【美国】Z. T. BIENIAWSKI 著

吴立新 王建锋 刘殿书 王立杰 译

郭文章 张式平 校



中国矿业大学出版社

工程岩体分类

—— 采矿、土建及石油工程师与地质工作者的通用手册

【美】 Z. T. BIENIAWSKI 著

吴立新 王建锋 刘殿书 王立杰 译

郭文章 张式平 校

中国矿业大学出版社

(苏)新登字第 010 号

ENGINEERING
ROCK MASS
CLASSIFICATIONS
A Complete Manual for Engineers and Geologists
in Mining, Civil and Petroleum Engineering

Z. T. BIENIAWSKI
A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION
John Wiley & Sons, Inc.
1989

工程岩体分类

——采矿、土建及石油工程师与地质工作者通用手册

[美] Z. T. Bieniawski

吴立新 王建锋 刘殿书 王立杰 译

郭文章 张式平 校

中国矿业大学出版社 出版发行

新华书店经销

中国矿业大学印刷厂印刷

开本787×1092mm 1/16 印张9.25 数字 210 千字

印数: 1 - 2000册

1993年9月第一版

1993年9月第一次印刷

ISBN 7-81021-991-x

TD. 163

定价: 8.00元

北京中大爆破技术工程公司

简 介

经理：刘殿书 博士

北京中大爆破技术工程公司为中国矿业大学北京研究生部所属全民所有制科技企业。多次承担和参加国内大型爆破工程和重大科研项目，具有雄厚的技术力量、丰富的施工经验以及先进的科研设备和测试仪器，主要从事：

1. 矿山工程、岩石爆破工程的设计、施工、咨询；
2. 城市建筑物、构筑物控制爆破拆除；
3. 爆破现场测试及爆破试验研究；
4. 测试仪器、计算机系统及软件开发。

公司地址：北京市海淀区学院路丁11号

邮政编码：100083

电 话：(01) 2017641-348

译者序

出现于近20年中的岩体分类系统，是本世纪工程领域中最重大的进展之一。在采矿、土建及石油工程领域，世界上一个又一个圆满完成的工程证明了岩体分类系统对于工程设计具有强有力的帮助，而且在安全有效、简捷方便及节省费用方面具有明显的优势。

虽然全世界已不止一千所大学将岩体分类列入其教学计划，但直到Z. T. Bieniawski教授编著的这本《工程岩体分类》出版之前，对工程岩体分类感兴趣者不得不费力查阅散见于大量文献刊物中的资料。《工程岩体分类》集工程岩体分类方法之大成，深入描述了目前应用于工程问题中的各种岩体分类方法和设计步骤。该书既是一本优秀教材，又是一部很好的工作手册，它可以迅速地、有效地提高现场工程师的设计能力。书中附录搜集整理了全世界应用岩体分类的大型工程实例，相当于为岩体分类系统提供了一个完整的数据库。为便于应用，书的最后还提供了一个可在微机上运行的程序。

原书著者Z. T. Bieniawski博士是宾夕法尼亚州立大学矿业工程教授、采矿与矿产资源研究院院长。他曾在波兰格但斯克技术大学及南非智水沙大学、比勒陀利亚大学学习并取得采矿工程博士学位。Bieniawski教授在采矿、隧道以及大型工程的工程地质方面有着丰富的经验并受到普遍尊敬，作为岩体分类的先驱者和国际权威被邀请到世界各地讲学。其前期著作包括《矿业工程中的地层控制》、《采矿与隧道中的岩石力学设计》等。本书是迄今为止岩体分类领域的第一本也是唯一一本权威性著作，其高度的实践性和指导性对采矿、土建、石油与爆破工程领域的学生和专业人员以及从事大型工程设计的地质工作者具有重要价值。

在我国现代化经济建设事业中，矿产资源的有效开发、能源工业的稳步发展及土建工程的成功实施具有重要的战略意义。“岩体力学”学科目前已发展成为采矿、土建及石油工程学科的重要分支。为提高和发展这一学科的科学技术水平，提高工程技术人员的设计能力，我们认为翻译出版这本1989年第1版的英文专著是十分有益的，也是非常必要的。

本书由中国矿业大学北京研究生部吴立新、刘殿书、王立杰及中国地质大学（武汉）王建锋译。第一章、第四章、第九章及附录由吴立新译；第二章、第六章、第十章由王建锋译；第三章、第七章由刘殿书译；第五章、第八章由王立杰译。本书承蒙郭文章博士后、张式平教授作了详细的审校，在此表示深切的谢意！

本书的翻译出版得到了原书著者 Z. T. Bieniawski 教授及原书出版公司John Wiley & Son, Inc. 的同意和版权许可，在此表示感谢！此外，李帮三同志不辞辛苦地为本书的录入排版作了大量的细致的工作，使得本书得以尽早与读者见面，我们表示感谢。

译者

1993年8月于北京

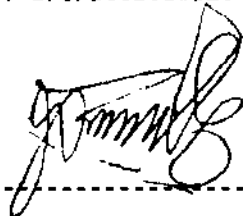
为祝贺本书在中国翻译出版, Z. T. Bieniawski教授特从美国发来传真:

I am very pleased that my book has been translated into the Chinese language. I wish the Chinese readers every success in mastering this important subject and in using rock mass classifications for improved design and construction of their rock engineering projects. I also hope that this book will be used at technical and scientific universities for better education of future generations of civil, mining and petroleum engineers.

Pennsylvania, U. S. A

Professor Z. T. Bieniawski

July 30, 1993



译文如下:

我的书已被译成中文, 对此我感到非常高兴。我祝愿该书的每一位中国读者成功地掌握这门重要学科, 并成功地运用岩体分类来改进其岩石工程项目的设计与建构! 我还希望有关科技大学将使用这本书来更好地培养下一代土建、采矿和石油工程师。

宾夕法尼亚, 美国

Z. T. Bieniawski 教授

1993年7月30日



序

在过去15年中, 岩体分类一直作为土建工程、采矿及地质的强有力设计手段, 并在这方面发表了300篇以上文章。然而, 却没有一本综合性的教材来专门讨论这一课题。本书旨在提供权威性参考, 对该课题做了深入的论述, 整理了广泛而零散的资料。此外, 书中还纳入了一些新的未发表的材料与实例。

在美国及国外, 目前有一千所以上高等院校对地质、地质工程、土建工程、采矿工程及石油工程专业的大学生、研究生讲授岩体分类课程。本书不仅提供了各种不同分类体系的基本原则, 而且评估了它在工业工程中的实际应用。

本书是为工业领域中的工程师和地质学者而编写的, 尤其面向地质技术工程师与工程地质学者以及工程专业大学生与地质专业研究生。

我高兴地记得在过去15年工作过程中激励我考虑岩体分类课题的许多朋友。我衷心感谢萨尔茨堡已故教授Leopold Müller, 在我于1972访问西德卡尔斯鲁希技术大学期间发展地质力学分类并开始本系统研究之时, 他给予了我帮助。我还感谢我的老同事Phillip J. N. Pells博士, 现在澳大利亚悉尼大学土建工程学院工作, 他对于我在岩体分类早期工作方面做出了重要贡献, 在此特别致谢。

许多研究人员及现场工程师也做了重要贡献, 他们修正并改进了我的原始RMR系统(地质力学分类)。人数太多无法一一列出, 书中表3.1对此进行了详尽罗列。尽管如此, 我还是要特别提到我以前的几位博士生, 他们通过做博士论文显著地改进了采矿中岩体分类的技术状态。他们是: David Newman博士, 现任肯塔基大学助理教授; Erdal Unal博士, 现任土耳其中东大学副教授; 以及来自布鲁塞尔的Claudio Faria Santos博士。此外, 我的在读博士生Dwayne C. Kicker通过对岩体分类做一最新调查也做出了贡献, 还有美国工程兵团的Glenn A. Nicholson博士, 他基于岩体分类提出了一种岩体结构的经验关系。

我的朋友, 慕尼黑技术大学的Georg Spaun博士、教授, 他同我进行了许多令人启发的讨论, 并且给我提供了对工程地质及新奥法的敏锐见解。挪威地质技术学院的Nick Barton博士经常同我进行有益的意见交换, 并允许我使用有关Q-系统的图表。最后, 多伦多大学的Evert Hoek教授在过去许多年中考虑革新岩体分类及其在岩石工程设计中的作用方面给予了我启示和鼓励。

我还要对本文手稿准备期间所获得的帮助表示感谢。本书是在宾夕法尼亚州立大学为研究生编排的岩石隧道地质技术课程。我的研究助手Claudio Faria Santos博士为确定岩体比值准备了计算机程序, 并且在RMR实例数据库计算机化方面提供了帮助。我的妻子伊丽莎白仍然记得她在研究生期间所学的图书馆管理知识, 她在对本书及索引进行相互参照方面给予了最有益的帮助。我的秘书, Jessie Fowler打印了本文手稿, 并且愉快地不厌其烦地进行修改。

Z. T. Bieniawski

1989年6月于大学公园, 宾夕法尼亚

目 录

序

第一章 引言	(1)
1.1 分类在工程中的作用	(1)
1.2 岩石分类作为设计手段	(2)
第二章 岩体分类在现场特性判定及工程设计中的作用	(3)
2.1 岩石作为工程材料	(3)
2.2 岩体结构特性	(6)
2.3 现场特性判定步骤	(6)
2.4 输入数据要求: 一种整体方法	(12)
2.5 设计方法论	(14)
第三章 早期岩体分类	(16)
3.1 岩石载荷分类法	(17)
3.2 支撑时间分类	(18)
3.3 岩石质量设计指标(RQD)	(19)
3.4 岩石结构权值原则(RSR)	(22)
第四章 地质力学分类(岩体权值系统)	(26)
4.1 分类步骤	(26)
4.2 应用	(34)
4.3 数据库	(37)
4.4 相关联系	(37)
第五章 Q-系统	(39)
5.1 分类步骤	(39)
5.2 相关联系	(46)
5.3 数据库	(47)
第六章 其他分类	(50)
6.1 NATM分类	(50)
6.2 尺寸-强度分类	(54)
6.3 ISRM分类	(57)
6.4 专门分类法	(58)
第七章 隧道工程中的应用	(59)
7.1 公园河隧道	(59)
7.2 Overvaal铁路隧道	(66)
7.3 由岩石表面出露评估地下条件	(67)

7.4	大型地下洞室	(67)
7.6	无支护开掘的极限跨度及安全系数	(70)
第八章	采矿工程中的应用	(76)
8.1	硬岩开采: 非洲	(75)
8.2	硬岩开采: 美国	(75)
8.3	煤矿开采: 美国	(91)
8.4	煤矿开采: 印度	(94)
第九章	其他应用	(99)
9.1	岩体强度估算	(99)
9.2	岩体模量估算	(103)
9.3	岩石边坡稳定性评估	(104)
9.4	特殊应用	(106)
9.5	促进交流: 统一型分类系统	(111)
第十章	实例数据库	(113)
	RMR实例表	(114)
附录:	岩体权值的确定	(124)
	输出例子	(127)
	微机程序清单	(128)

第一章

引言

分类科学的起源可以追溯到古希腊人的著作中，而分类过程、对相似性的认识以及随即产生的物体群聚则可一直追溯到原始人。

——罗伯特·R. 索开尔

在其分类协会主席的演讲中，索开尔教授不仅对该课题提供了一种历史观点，而且强调分类是大多数学科的一个重要方面，在许多领域中已经独立形成了相似准则和相似方法 (Sokal, 1972)。

分类科学叫分类学 (taxonomy)，主要讨论分类的理论问题，包括分类基础、准则、方法和规则。分类与归类 (classification and identification)，之间的区别应该弄清楚，分类定义为依据物体的联系将其分成数组，而归类则指将附加的或未识别的物体划归或指定到恰当的组别中，而这些组别已为先前的分类所建立。

1.1 分类在工程中的作用

几个世纪以来，分类在工程中起了不可或缺的作用。例如，处于领先地位的船舶分类组织——伦敦Lloyd's注册处，建立于1760年，当时出现了第一个“轮船注册”字样。轮船的特征被列出来，其后带有各种不同的分类符号，每一个符号都代表轮船结构或设备方面不同部分的条件。今天，在一般轮船投保之前，首先要确定轮船结构及维护的严格标准，这些标准是由轮船制造者、海洋工程师和军舰建造师（设计师）共同组成的技术委员会来设定的。通过世界范围的监督机构，对建造及正使用的轮船都进行了分类；尤其，分类协会要检查每一艘大于100吨位的轮船的设计和结构，它提供船只必须满足的细目的最低标准。建立于1867年的美国轮船局、法国核查局以及意大利军舰注册处是Lloyd's轮船注册处之外的其他几个最重要的分类机构。

在岩石工程方面，第一个主要分类系统是40年前为钢支护隧道工程而提出的 (Terzaghi, 1946)。考虑到采矿与土建工程在岩体内开挖中应用的三种设计方法——分析法，观测法和经验法，岩体分类今天已构成最占统治地位的设计方法——经验设计法的一个整体部分。事实上，在许多地下结构与采矿设计中，岩体分类已经提供了唯一的系统设计方法，从而取代了很不可靠的“误差与验证”方法。

然而，现代岩体分类从未打算成为设计问题的最终方案，而仅仅是作为实现这个目标

的一架途径。事实上，大约15年以前，当开始研究今天使用的岩体分类系统的时候，整个世界范围内的隧道工程均被极其有限的现场调查程序和更为有限的设计方法所统治。那时候的任何方法都达不到今天有系统地用于各种工程分支中的工程设计方法的要求。岩体分类的发展，从乱糟糟的现场调查法中创立了某种秩序，并且提供了必不可少的设计手段。它并不打算取代分析研究、野外观测和工程判断。

1.2 岩体分类作为设计手段

实质上，岩体分类并不是要做为工程设计的替代物。它应被明智地应用，并与观测方法和分析研究一起，阐述与设计目标及场址地质条件相符合的总体设计原理。一旦针对具体目标进行正确运用，岩体分类可以提供强有力的设计手段。

因而，岩体分类的目标是：

1. 识别影响岩体行为的最显著参数；
2. 将某一特定的岩体分成具有相似变形特征的若干组，亦即不同质量的岩体等级；
3. 为弄清每种岩体等级的特性提供基础；
4. 将在某个场所遇到的岩石条件及经验与其他场所的相联系；
5. 为工程设计提供定量数据；
6. 为工程师与地质学者之间的交流提供一个共同的基础。

上述条目代表了岩体分类的三大优点：

1. 提高现场调查的质量，因为只要求最少的与分类参数有关的原始数据；
2. 为设计目的提供定量的数据；
3. 使得更好的工程判断与更有效的设计交流成为可能。

第二章

岩体分类在现场特性判定及工程设计中的作用

问题的系统阐述远比其解更为必要；提出新的问题、新的可能性，需要创造性想象，而这才标志科学的真正发展。

——艾尔伯特·爱因斯坦

与其他工程材料不同，岩石给设计者提出了独特的问题。首先，岩石是一种复杂材料，其特性千变万化。在大多数采矿及土木工程条件下，将遇到的不是一种而是许多种岩石类型。更进一步，在某种程度上说加固开挖处的围岩似乎有可能，但对于某一给定方案只有在施工场址可以选择时，才能选择岩石材料。绝大多数情况下，设计工程师与地质学者所面对的岩石是岩块的组合体，它被各种不同类型的非连续面如节理、断层、层面等所分割。这种组合构成岩体。因而，必须考虑未扰动岩石与岩体的工程特性。

2.1 岩石作为工程材料

岩石的力学特征最好用应力—应变关系曲线来表示，图2.1是其中一个例子。

可以看到，最初变形几乎随载荷按比例增大。终于达到一定应力水平时裂隙产生，亦即存在于几乎任何材料中的微裂隙开始扩张。随着变形增大，裂隙扩张是稳定的，也就是说如果应力停止增加，裂隙也停止扩张。继续增大应力到另一水平，称为临界能量释放，此时裂隙扩张是不稳定的，即使应力停止增大，裂隙仍继续扩张。

接着，达到最大承载能力，称作强度破坏，这实质上是岩石材料的强度。在传统的（软）加载压力机上测试时，大多数岩石都表现为剧烈的脆性破坏特性。在这种情况下，伴随裂隙产生，试件崩塌的同时发生强度破坏（或者说岩石试件彻底崩解）。然而，假使测试机的刚度增加，那么随着应变的增大应力降低。这种状态特性由应力—应变曲线上的负坡速表示，此时材料处于破裂状态。这一点很重要，因为它显示出即使是有裂隙的、破坏了的材料仍能承受一定的载荷。开挖时也可能出现类似的情况，即使结构体周围的岩石材料由于应力超过强度而屈服了，结构体并不因此而失稳。因而，结构体周围的岩石可能破坏了但结构体仍然稳定。事实上，破坏的岩石甚至也是可指望的，因为它不会导致突然的剧烈的强度破坏。这种原则在采矿与隧道中的具体应用以及其在考虑岩石支护的重要性，Jaeger和Cook（1979年）对此做了详细论述。

应力—应变曲线是获取岩石材料的抗压抗拉强度、弹性模量及泊松比的原始材料。某些普通岩石类型的性质可以在Lama与Vukoturi（1979）及Kulhawy（1975）的文章中见到。

岩石作

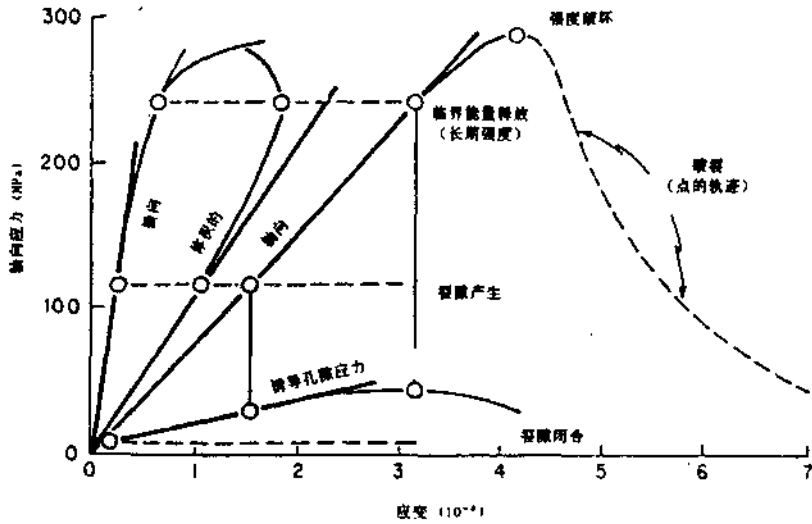


图2.1 单轴压缩时硬岩脆性破坏示意 (按Z. T. Bieniawski, 1967)

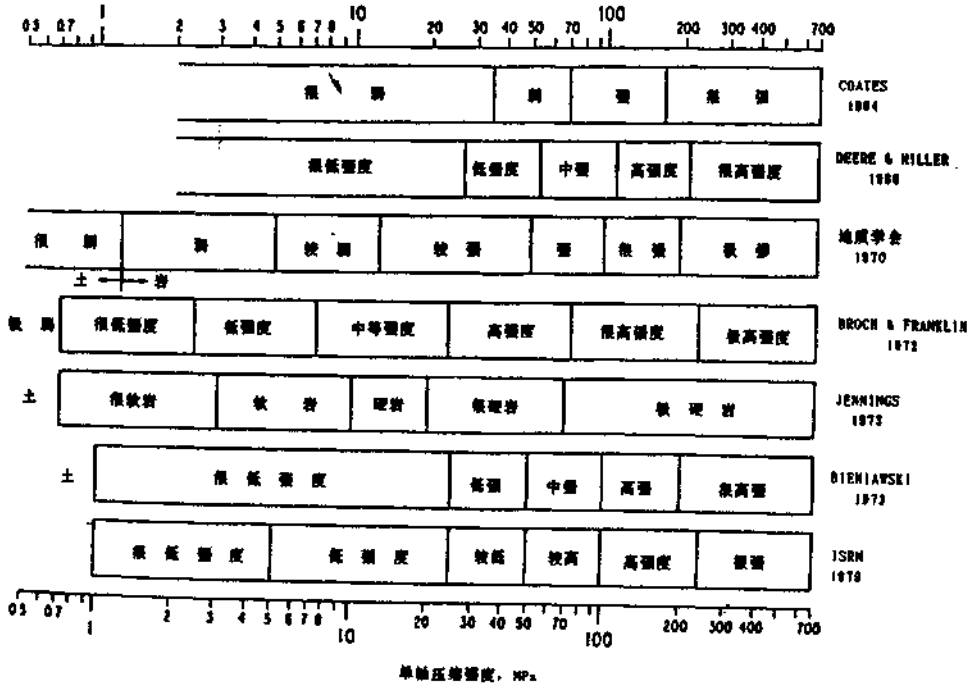


图2.2 未扰动岩石不同强度分类

实验室测试方法已普遍地完善了，而且国际岩石力学学会 (ISRM) 和美国测试与材料学会 (ASTM) 已推荐了测试技术。详细的实验室测试操作步骤可由“ISRM建议方法” (1981b) 或“ASTM标准” (1987) 中获得。

人们已提出了许多关于岩石材料强度与弹性模量的分类。图2.2 比较了未扰动岩石强度分类。图2.3则描绘了由Deere与Miller (1966) 提出的强度—模量分类，其中以灰岩作为例子。这种分类受到广泛的认同，尤其在岩石力学领域更为方便。此后ISRM的岩石分类委员会给原岩强度推荐了不同的数值范围 (ISRM, 1981b)。ISRM划定范围的主要理由在于，Deere—Miller分类中没有包括强度低于25MPa的材料。应该注意到，由此引出这样一个推荐意见，即1MPa的轴单轴压缩强度可用来做为岩石材料的最低强度极限。因此，强度低于1MPa的材料应该认为是土体，并按土力学行为来描述。

未扰动岩石分类的主要局限在于它不能为工程设计目的提供定量的数据。因而，其主要价值就在于未扰动岩石特性讨论时能更好地进行归类 and 表达。

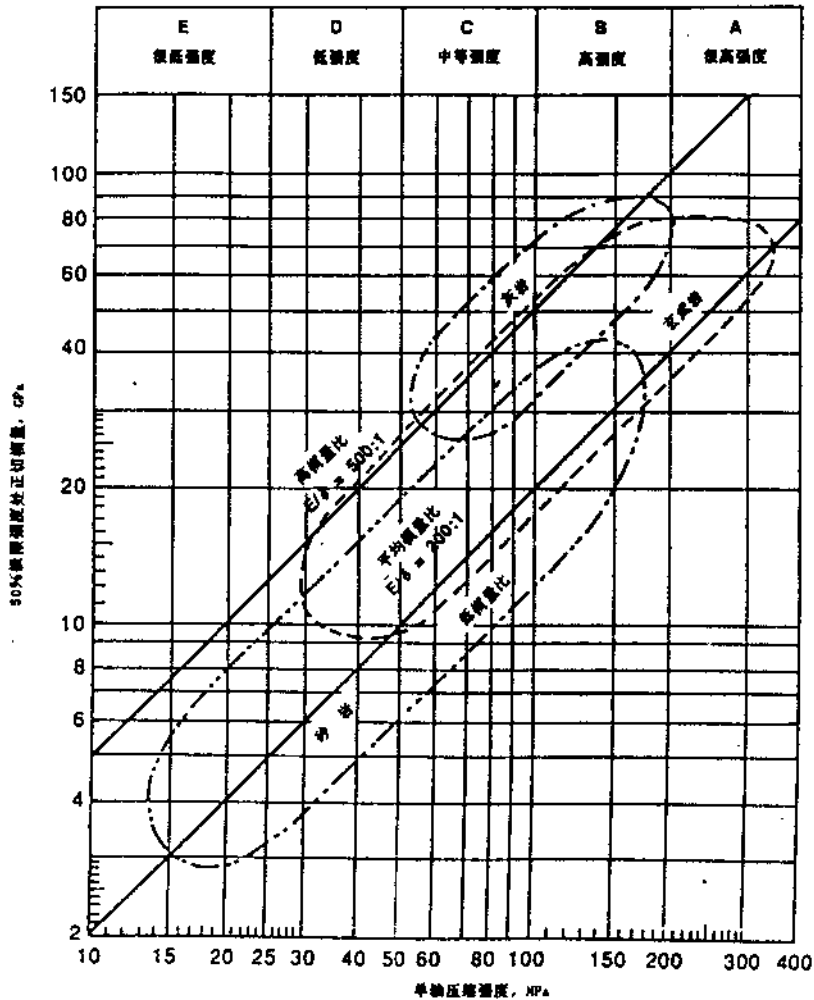


图2.3 三种岩石的强度—变形曲线 (按Deere与Miller, 1966)

2.2 岩体结构特性

当设计工程师及工程地质学者面对岩石之时，他们必须把岩体看作作为一种被各种不同类型的地质不连续面分割的未扰动岩石块体组合。因而，他们就必须同时考虑未扰动岩石材料及不连续面的特性。

问题马上就出来了，即岩石材料如何与岩体相联系。回答这个问题，首先要注意的就是未扰动岩石材料特性的重要性将被岩体内部的不连续面的特性所掩盖。但这并不是说在考虑节理岩体力学特征时可以不考虑未扰动岩石材料的特性。毕竟，当不连续面分布稀疏或未扰动岩石较弱并已变质，未扰动岩石特性就可能强烈地影响岩体的整体力学特征。更进一步地说，一块岩石试样有时也代表岩体的一个小比例模型，因为它们两者都经历了相同的地质年代。但总的来说，不连续面的特性比未扰动岩石材料特性更为重要。

岩石分类的一个重要议题就是选取最主要的参数。显然，对于工程目的，没有哪一个参数或指标可以充分地定量地描述节理岩体。不同参数具有不同的重要性，只有放在一起才能满意地描述一种岩体。

在大多数岩体分类系统中，岩石材料的强度被作为分类参数之一。这是一个必要的参数，因为岩石材料的强度代表岩体的强度极限。岩石材料的单轴压缩强度可在野外通过点载荷强度指标 (Franklin, 1970) 来确定，因此我们并不局限于实验室测试。

最普遍采用的第二个参数是岩石质量指标 (RQD)。这是一个基于取芯过程中统计长度大于100mm的岩芯的数量的指标。RQD值反映钻孔岩芯质量或裂隙密度，它并未考虑节理的紧密度、方向、连续性及充填物的影响。因而，RQD值也不能充分描述岩体。

现行岩体分类中使用的其他参数为：不连续面间距、不连续面条件（粗糙性、连续性、分割性、节理壁的风化性、充填物）、不连续面的方向性、地下水条件（潜流、压力）及原地应力。

对于岩体中不连续面的定量描述，可在ISRM (1981b) 中找到一优秀的讨论。

在露天开采及受结构地质特性控制的近地表井下岩石开采情况下，下述分类参数是重要的：未扰动岩石材料的强度、不连续面间距、不连续面的条件、不连续面的方向性及地下水条件。在岩体特征受应力控制的深部开采情况下，了解未扰动岩石应力场或应力的改变比了解地质参数更为重要。大多数土木工程项目，象隧道及地铁洞室等属于第一类地质控制的岩体结构。

2.3 现场特性判定步骤

《现场综合力学特性判定指南》已由国际工程地质协会 (1981a)、建筑工业研究与信息协会 (Weltman和Head, 1983) 及美国隧道技术国家委员会 (1984) 出版。这本参考指南做出了非常重大的贡献，因为它来自地下设计与结构的三年地下探索的实例研究基础。其目的是要在实践过程中发现改进，从而使得地质技术现场调查程序更为有效。根据87个美国工程项目，该“指南”推荐：

1. 用于地质技术现场探查的经费应占项目总预算的3%；
2. 钻孔探查水平应该是沿隧道轴线每隔1.5英尺打一钻孔；
3. 不仅合同文件中的所有地质报告，而且由隧道设计师编辑的“地质技术设计报告”都应写入计划书中。

表 2.1 汇总了各种现场特性判定活动与工程设计所需要的参数之间的关系。可见测试方法分成野外测试和实验室两类，其目的是建立所需要的反映岩石材料、岩体、原地应力场及其他条件的参数。

表2.1 现场特性判定推荐的岩石力学观察与测试

测 试	特性 / 数据				
	岩石材料	岩 体	原地应力场	变 形 模 量	经验设计数据
实验室测试					
单轴抗压强度测试	材料强度, 各向异性			弹性模量, 泊松比	
三轴压缩测试	岩石材料内摩擦角及粘聚力系数				α_1 参数
密度, 孔隙率, 含水量, 膨胀	密度, 孔隙率, 松驰强度				风化性及膨胀参数
野 外 测 试					
地质测量及总体样本	岩石地层的详细工程地质描述				为工程岩体分类输入数据
点载荷测试	岩块强度指标				
原岩芯圈槽及小平伸千斤顶			应力大小与方向	变形参数	
板承测试及钻孔千斤顶		节理对岩体强度的影响		变形参数	
地震法 / 声法测试	实验室岩石的声速			纵、横波速及动态模量	
收敛性监测及钻孔伸缩计			应力重新分布	掌子面周围与时间有关的岩体移动	
钻孔压力计		槽流, 压力及渗透性			
岩石锚杆拔柱测试					岩石支护数据: 间距、长度等

当计划进行一个现场调研项目时，必须认识到的第一个事实就是并不存在标准现场调研这样的事情 (Hoek, 1982)。对于两级现场特性判定即初查与详查，该论断都适用。

地质调查的适当范畴列于图2.4中。

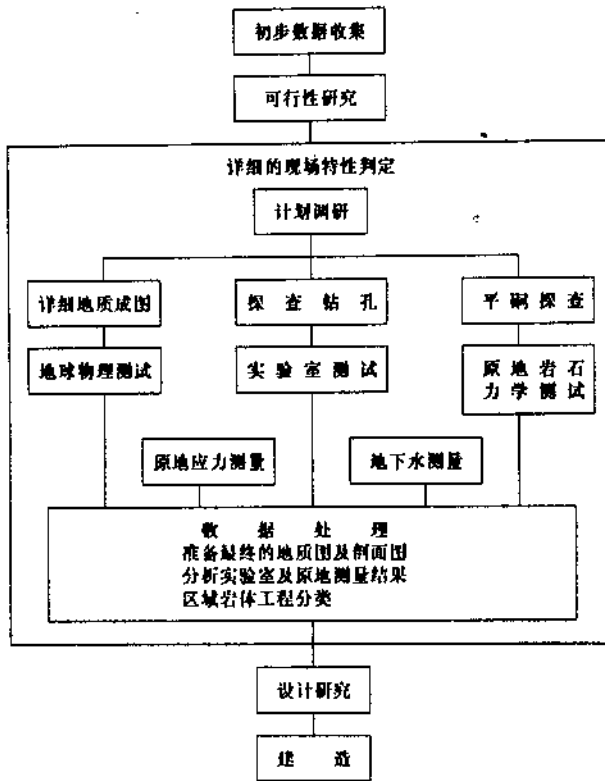


图2.4 现场特性判定程序步骤

初级现场调查的目的是建立项目的可行性。实质上，初级现场评估包括发现、综合并分析如下地质数据：

1. 将遇到的岩石类型；
2. 覆岩深度及特性；
3. 宏观性不连续面，如大断层；
4. 地下水条件；
5. 特殊问题如软弱岩层及膨胀岩。

初级现场评估可以利用许多信息资源，尤其是

1. 可获得的地质图、出版物及可能的地方志；
2. 该区的摄影地质图象（航空与地面摄影照片）。

摄影地质研究具有特殊的重要性，当可获得的信息不充分时，取得新的航空摄影照片更证明是恰当的。摄影地质研究的益处包括提供地形、水系、岩性、地质构造及不连续而方面的信息。

初级现场探查的目的之一就是确定工程附近的区域地质情况。Fisher 与 Banks (1978) 对这方面有充分研究。区域地质历史的报告、地图与出版物的研究，以及对从地方志中获得的进行的研究，此外也可进行一些有限调查。这包括描绘地表露头分布、物探及有限的