

岩石力学原理与方法

陶振宇 著
潘别桐

中国地质大学出版社

岩石力学原理与方法

陶振宇 著
潘别桐

中国地质大学出版社

内 容 提 要

全书共分九章。第一章绪论,主要介绍岩石力学有关基本知识和岩石的工程分类,随后七章分别叙述岩石的结构性与结构面网络;天然岩石中的三维地应力状态;岩石水力学特性及热学特性;岩石的应力-应变关系;岩石的流变特性;岩石的强度特性和岩石的断裂特性。最后一章,叙述岩石工程的监测技术和预测方法。

本书是研究生教材,也可供水利、水电、土木、建筑、铁道、交通、冶金、煤炭、地质、地震、力学等专业的生产、科研和教学单位的有关科技工作人员参考。

岩石力学原理与方法

陶振宇 潘别桐 著

责任编辑 邓祥明 贾晓青

中国地质大学出版社出版

(武汉市喻家山 430074)

中国地质大学出版社印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 印张 12.25 字数 312千字

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数 1—2000册

ISBN 7-5625-0462-8/P·153

定价: 3.80 元

目 录

第一章 绪论	(1)
第1.1节 岩石力学研究 对象	(1)
第1.2节 岩石力学的科学 实验	(3)
第1.3节 岩石力学科学思想的 发展	(8)
第1.4节 岩石的工程 分类	(12)
第二章 岩石的结构性与结构面网络	(16)
第2.1节 概 述	(16)
第2.2节 岩石结构面的摩 擦 角	(17)
第2.3节 岩体中软弱夹层的基本 特 性	(20)
第2.4节 岩体结构面几何参数的统 计 分 析	(23)
第2.5节 结构面网络的计算机模拟 原 理	(32)
第三章 天然岩石中的三维地应力状态	(40)
第3.1节 概 述	(40)
第3.2节 对岩体初始应力状 态 的基本认识	(41)
第3.3节 高地应力区的 岩 体 特 性	(46)
第3.4节 高地应力区岩体的岩 爆 现象	(49)
第3.5节 天然岩 石 的 三 维 地 应 力 状 态	(55)
第四章 岩石水力学及热学特性	(58)
第4.1节 概 述	(58)
第4.2节 岩石中水的 作 用	(58)
第4.3节 室内裂隙岩石的水力 试 验	(60)
第4.4节 岩石的水力模 型	(62)
第4.5节 岩石的 热 学 特 性	(68)
第4.6节 不同温度下的岩石 特 性	(72)
第五章 岩石的应力-应变 关系	(79)
第5.1节 概 述	(79)
第5.2节 刚性试验机及伺服控制试 验 机	(79)
第5.3节 岩石受力过程的 阶 段 性	(83)
第5.4节 循环荷载下岩石的应力-应变关系	(87)
第5.5节 软弱岩石受压时的力学 性 能	(89)
第5.6节 岩石内时本构 方 程	(92)
第六章 岩石的流变特性	(95)
第6.1节 概 述	(95)
第6.2节 岩石的流变试验及 观 测	(96)
第6.3节 岩石的流变方程与模型 理 论	(99)
第七章 岩石的强度特性	(113)

第7.1节 岩石的破坏..... (113)

第7.2节 岩石的强度准则..... (115)

第7.3节 关于岩石强度理论的实验验证..... (128)

第八章 岩石的断裂特性 (140)

第8.1节 概述..... (140)

第8.2节 室内岩石断裂试验..... (145)

第8.3节 岩石断裂韧度 K_{IC} 的现场测定..... (152)

第8.4节 岩石的断裂判据..... (155)

第8.5节 岩石脆性断裂的统计途径..... (156)

第九章 岩石工程的监测技术与预测方法 (164)

第9.1节 概述..... (164)

第9.2节 岩石工程监测的目的、内容与设备选择..... (165)

第9.3节 地下工程的施工监测..... (167)

第9.4节 应用灰色系统理论进行岩石工程预测..... (171)

第9.5节 鲁布革水电站地下厂房开挖释放位移预报..... (178)

第9.6节 岩石力学的耦合分析及水库诱发地震预测方法..... (180)

参考文献 (187)

第一章 绪 论

第1.1节 岩石力学研究对象

1.1.1 岩石力学研究对象

岩石力学是研究地壳岩石在其环境力场改变时,地壳岩石变形、破坏规律和理论及其应用的科学。

大多数岩石是由几种矿物组成的,如玄武岩、花岗岩、辉绿岩、页岩、砂岩、石灰岩、片麻岩和千枚岩等;也有由单一矿物组成的岩石,如石英岩、大理岩等。但是应该注意,矿物的力学性质,并不等同于由该种矿物所组成的岩石的力学性质,即使是由单一矿物所组成的岩石,也是如此。例如,由石英组成的石英岩和由方解石组成的大理岩,但石英与石英岩,方解石与大理岩,两者的性质并不相同。这表明:一方面,由矿物组成的集合体的结构与构造,在力学上起着主要的作用,因此,研究岩石的组织 and 结构的力学效应是十分必要的。尽管目前这方面的研究工作还远未达到令人满意的程度。另一方面,这并不等于说岩石的力学性质与其组成的矿物的性质没有关系。事实上,岩石中的矿物成分,也会对岩石的力学性质产生十分重要的影响,甚至在某些条件下会产生决定性的影响。例如,矿物的性质在一定程度上会影响岩石的强度。例如,粘土矿物、易溶矿物和不稳定矿物会使其组成的岩石产生膨胀、溶蚀和软化等物理的和化学的变化,使岩石的性质复杂起来。

就岩石的工程特性来说,其最明显的特征是岩石的组构的颗粒性及它的裂隙性。许多裂隙是肉眼可见的,而且岩石的微裂隙常常发育于其组成颗粒之间。这些特征导致岩石试件在加载一开始就出现不可恢复的塑性变形,常伴有扩容和粒间摩擦,从而使经典塑性理论在岩石力学中的应用不完全适用。因而研究岩石的本构关系成为岩石力学的重要课题之一。

岩石是一种自然历史的产物,是构成地壳(岩石圈)的物质基础。因此,岩石这一术语,是工程领域和地学领域包括岩石力学和工程地质学领域的一般用语。岩石同时是岩石力学工作者和地质工作者的研究对象,只不过研究目的各有所不同而已。岩石力学或工程地质工作者视岩石为工程建筑物的环境、基础和材料。因此,我们曾经约定:把“岩石”作为一个泛指的名词,即作为地壳岩石的统称,包括“岩块”和“岩体”。所谓“岩块”是指脱离天然状态母岩的块体,如钻取的岩芯、爆破得到的石块、人工凿取的石料等;而“岩体”是指一定范围的天然岩石(地壳岩石圈的自然状态)^[1]。

天然岩石既是一种自然历史的产物,同时也一直处于运动变化过程中。所以,形成天然岩石的基本特性,除了组成物质的差异之外,最根本的还在于地壳岩石在其形成和存在的整个地质历史中,经受各种不均衡的运动的结果。

地壳岩石的运动形态,大体可归纳为三种情况^[2]:

第一是成岩运动。这是指地壳岩石在生成阶段的运动过程。例如火成岩岩浆的侵入,由于多次岩浆侵入以及岩浆分异的熔蚀作用,往往形成岩性复杂、夹有多种岩脉的天然岩体。喷

出岩与下伏岩的接触面常常胶结不良，不同时期的喷出岩之间，常常形成古风化夹层。沉积岩生成时，除形成层理外，经常有软弱夹层存在。变质过程中常常形成矿物晶体的定向排列构造，等等。这些情况，都是岩石在成岩运动过程中形成的非构造特征。

第二是构造运动。从工程观点看，构造运动对地壳岩石的主要影响有三方面：首先，形成断裂（断层、节理等）系统，特别是形成定向断裂系统，可以使本来比较均质同性的岩体带有各向异性的特征；其次，使天然岩体具有高的水平初始应力（地应力），这种应力对于深置地下工程有重要的影响；再次，构造运动造成岩体内部能量的集聚和释放，因而与地震和新构造运动密切相关。

第三是非构造运动。这是指天然岩石形成后，除构造运动外的其它运动过程，主要是由于风化作用、地下水作用、卸荷作用和人类活动（例如爆破、开挖等）所引起的岩体运动。这种运动与工程活动密切相关，因而值得认真注意。

1.1.2 岩石力学的研究途径

岩石力学是一门重要的交叉、边缘学科。它以地壳岩石为对象，运用力学原理和工程技术方法来阐述地壳岩石的物理-力学规律。就其应用的领域来说，岩石力学既服务于工程，又服务于地质；就其在这些领域中的作用来说，它既具有基础理论性质，又具有实践性特点。因为岩石力学能使我们认识地壳岩石的变形、褶皱、断裂以及地震的发生和发展过程。如水利水电建设中的几起重大的事故〔法国的马尔帕塞（Malpasset）拱坝的失事、意大利的瓦依昂（Vajont）滑坡等〕，从反面告诉人们：必须具有对岩体地质因素定量方面的科学实验技术和现代化计算机分析的训练和知识。

大家知道，目前岩石力学理论还不尽完善，不够成熟。在观点上也有许多分歧，例如，奥地利的穆勒（L. Müller）在1980年5月在武汉的讲学中，把岩石力学概括为“岩石干砌体的力学研究”。我们则尝试地把岩石力学基本原理概括为对天然岩体地质条件的力学过程分析。

我们认为：岩石力学研究应该充分注意天然岩石的地质因素，这是构成我们对天然岩石规律性认识的客观物质基础，离开或不注重天然岩体地质条件的任何力学分析，都会导致不真实甚至错误的结论。因此，对岩石的地质条件和状况了解得愈深入、愈全面、愈彻底就会使力学分析的结果愈接近真实情况。

为什么要进行力学分析呢？这是因为，地质因素之所以起作用，就是地质条件本身提供了某种潜在的变形和破坏可能性，要使这种潜在的可能性变为现实，工程荷载及其边界条件是一个决定性因素。工程建设所形成的荷载条件及边界条件，可以使天然岩体的某些局部地层首先破坏，进而发展成为影响全局的失稳。因此，从总体上来讲，岩体的破坏是由地质条件所控制的，但在局部地区或在一定的条件下，力学条件也可以起决定性的影响，并可由此发展成为影响全局的因素。因此，对于某些工程建设，在一定的地质条件下，往往以力学分析为主要手段。例如格里申（М. М. Гришин）等基于室内模型试验结果，建议采用圆弧滑动法来分析具有倾向下游的成层岩基的稳定性（图1.1）；索柯洛夫斯基（В. В. Соколовский）采用极限平衡理

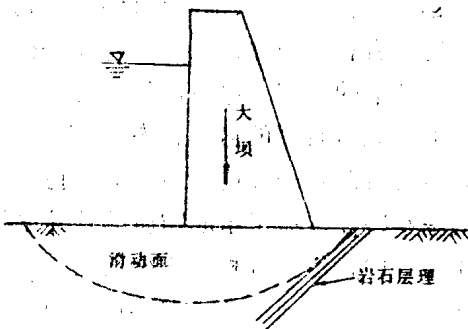


图1.1 倾向下游层状岩石的圆弧滑动分析

论来分析具有水平方向层状介质的稳定性问题（图1.2）〔3〕。有意义的是，这种分析结果已为室内模型实验结果所证实（图1.3）〔4〕。

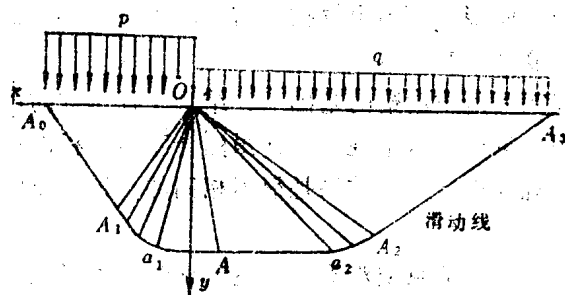


图1.2 水平层状介质的极限平衡理论解的滑动线

A_1OA_1 及 a_1OA_2 两区的滑动线，为由 O 点发出的径向线及对数螺线（图上未表示）所组成；
 a_1OA 及 AOa_2 两区，或者处于特殊极限平衡——水平平行滑动线，或者处于通常的极限平衡——两组平行的滑动线

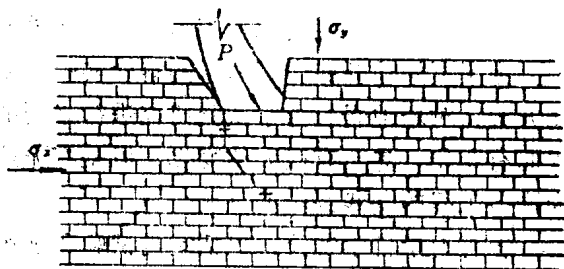


图1.3 水平层状岩石的室内模型试验

应该指出，荷载条件应该包括卸载，即施工、开挖的影响。这一点，长期以来被许多岩石力学工作者所忽视，现在正日益引起人们的注意。事实上，施工程序和方法的不同，对岩体的稳定性的影响也很不同，而且在现在的科学技术条件下，有些情况对其可能的影响，还难于准确估计出来。例如，由于深开挖而引起的卸荷裂隙的情况，就是如此。所以，不只是提作“力学分析”，而提作“力学过程分析”，这样便把施工因素的影响包括进去了。广义地说，力学过程分析，实质上是考虑了荷载历史和应力参数变化的影响问题，这样也就把地壳岩石在地史过程中的各种力学行为包括在内了。

第1.2节 岩石力学的科学实验

1.2.1 概 述

任何岩石力学课题的解决，首先要查明岩石在加、卸荷载下的物理-力学性状及其本构关系，然后才能进行分析计算。因此，岩石性状的研究是非常重要的一环，而且也只有依赖于岩石的科学实验才有可能得出正确的结论。

岩石力学的发展过程中，在工程界，有一个时期很强调现场大型试验，而忽视室内试验，认为后者是“脱离实际”的，不反映天然岩石的真实性状。当然，在一定的条件下，进行现场大型试验，本来也是可行的，但有限度，并非越大越好。因为试体大了，要求试验设备也要大，试验条件会变得更加复杂，试验时间也会拖长，费用会成倍增加。而且拿这样高的代价所得来的个别试点的资料，企图直接运用于工程建设上，恐怕还是有问题的。因为不论现场试验大到什么程度，与实际建筑物的尺寸相比较，无论从荷载条件上、从影响范围上、从荷载历时上，仍然是不可比拟的，而且有的方面还可能有的质的差别。如把水当作静力荷载施加于岩石表面上，而不管水在天然裂隙岩石介质中的作用情况，可能会出现完全不同的情况，就是一个例子。因此，单纯依靠现场大型试验来获得岩石力学的计算参数的办法，不是一个好方法，既不经济，有时也不可能。此外，由于试验设备和条件的限制，有些试验还不能在现场进行，例如一向受拉，一向受压的试验等。因此，必须与室内试验研究配合进行，才能收到最佳效果。至于试验成果的应用，这是一个很复杂的问题，不能简单从事，而需要寻求相应的途径，才能

把试验成果正确地推广应用于工程设计中去。我们认为,正确的技术途径应当是:首先把岩石力学所涉及的各种基本因素,例如,岩石基质(Matrix)、结构面系统、工程结构和施工因素、渗流、地热学状态和地应力场等,各自作为一个单元进行研究;然后探求这些因素之间的相互作用和影响,在此基础上形成相应的力学模型,再与电算技术结合起来。这样就把天然岩石的基本特性与工程因素和加固措施紧密联系起来了。

为了更好地开展岩石力学的科学实验,要在工程地质勘察的基础上,结合工程设计的可能方案,对场地岩石力学试验研究进行必要的规划设计。这个规划设计虽然会随着工程的进程而有变化,甚至有很大的变化,但是有无这种规划设计,其结果是很不相同的。这一点已为许多工程的实践经验所证明。

岩石力学科学实验,包括室内试验和现场试验(包括原型观测)。室内试验,不仅包括岩块试验,也包括相似材料的模型试验等等。岩石科学实验之所以重要,不仅是因为它能够为工程设计和施工提供必不可少的岩石物理-力学性质的第一性资料,而且还能为岩石力学课题的理论分析提供客观的物理基础。反过来说,没有理论研究和分析,岩石的科学实验工作也会停滞不前。现有的岩石力学试验成果都是依靠一定的理论公式来整理资料的,而这些理论公式所依据的条件,常常是把天然岩石理想化了,而这些理想化的条件是否接近天然岩石的实际情况,又需要岩石的科学实验来验证。因此,在工程建设中,如何进行岩石力学试验,是一个很重要的问题。这个问题可以分为两个方面:一是关于岩石力学试验的全局布署。对于一个具体工程地点的岩体地质条件而言,怎样布署试验工作,才能抓住它的关键问题,能在最本质方面反映其实际情况,这就是岩石力学的试验设计问题,目前在这方面探讨较少;二是岩石试验的每一个具体项目如何进行的问题,这常常由岩石试验规程来阐明。事实上,这两方面既有区别又有联系。在这里,我们主要讨论岩石力学的试验设计问题^[5]。

1.2.2 正确的指导思想

本世纪20年代已开始在工程建设中进行岩石力学试验工作,到50年代才逐渐引起人们的重视。例如,1955年第五届国际大坝会议上,在“坝的沉陷和地震对坝的影响”问题的总结报告中,就岩石试验问题,发表了如下见解:

(1) 岩石试验只能得出十分局限的弹性模量值,为了得到较好的结果,必须在许多点运用这个荷载进行试验,因而要消耗大量的资金和时间;

(2) 注意岩石的各向异性性质,试验应当在岩层的垂直和水平方向尽可能大的面积上进行;

(3) 针对这次大坝会议上有人对应用动态模量的适宜性表示怀疑,认为动力和静力的弹性模量都是有用的,它们是互为关联的;

(4) 希望野外试验要用室内试验作补充。

这些意见有一个共同点,就是对一个具体工程的岩石试验工作必需要有一个总的考虑,有一个全局安排和布署。国外水工建设正反两方面的实践经验都证明这一点^[6]。

我们曾指出^[1]:岩石力学试验是一种探索性工作。这种探索性工作之所以必要,是由于目前岩石试验研究和技术还很不完善,需要积累实践经验来逐步改善。因此,每次岩石试验,都要从实际出发,都具有一定的探索性。这是由于每个具体工程的岩体地质条件都是各有特点。所以,“首先要有一个正确的指导思想”。这是因为,对岩石规律性的认识,需要经过一个过程。因此,在进行岩石试验研究时,应该有准备、有计划、有步骤地进行。并且,

“要根据建筑物的等级、地质条件等情况来决定”。

总之，在岩石力学试验中，既要充分反映天然岩石实际状态和性能，又要多快好省地完成试验任务，以适应工程建筑的设计、施工和正常运转的要求。

1.2.3 合理的全局布署

岩石力学试验研究的全局布署，大体包括三个方面的内容：

(1) 关于岩石力学试验研究工作的程序和步骤。我们对于一个工程的地质岩体特性的了解和掌握，需要经过一个过程后才能达到一定的规律性的认识，这是一个认识过程，也是一个实践过程。因此，岩石力学试验工作可以有计划分阶段地进行。就水工建设来说，第一阶段的岩石力学试验研究是与水工枢纽的可行性设计相适应的，就岩石试验研究本身来说，则是预备性试验阶段，其任务有：为水工建筑物的初步设计提供试验数据；为进一步阐明岩石特性作一些探索性工作。就具体工程的岩石力学的试验研究而言，可以说没有一次是完全相同的。这是由于地质岩体条件、工程情况以及对试验的要求往往不尽相同的缘故。所以，每一个具体工程的岩石力学试验研究工作都必须从实际出发。这一阶段工作完成之后，除了得到一批试验数据供初步设计之用外，更重要的是根据具体情况拟出岩石试验研究的工作规程或详尽的试验大纲。这个规程或大纲实际上是这一阶段工作的基本总结。第二阶段的岩石力学试验研究是与水工建筑物的技术设计相适应。就岩石力学试验来说，是基本试验研究阶段，是在前一阶段的工作基础之上进行的。这一阶段的研究是为技术设计提供数据，特别要形成设计计算的力学模型，关于这一点我们将在后面作进一步的说明。这一阶段试验工作有一个重要的特点，就是岩石力学试验研究工作必须结合岩基处理方案，提供处理方案的技术经济效果的详细试验资料。第三阶段的岩石力学试验研究是进行现场观测工作。这个工作一方面是检验岩石试验研究工作成果的正确性；另一方面也是为了保证建筑物的安全。当然，观测工作还有更重要的意义，就是通过现场观测将可能发现某些新的物理现象，为岩石力学的理论和实践提出新的课题。

(2) 关于岩石力学试验研究的主攻方向问题。岩石力学试验都是在工程地质勘探工作的基础上进行的。这就有可能对不同岩性及结构特征的岩体进行服务于工程建设的各种试验研究，即使使岩石力学试验工作具有足够的代表性。为了达到这个目的，试验工作必须与工程场地的整个工程地质勘探工作紧密地结合起来。但是，全局布署的关键，就是一开始便要全力捕捉和狠抓这一工程的岩石力学试验工作的主要矛盾，要明确这个工程的岩石力学试验研究的重点是什么，主攻方向是什么？没有重点，抓不住关键，就没有代表性。不明确这一点，则这个全局布署便没有意义了。但这一点常常容易为人们所忽视，而且在实践过程中也不是一下子就能解决的。重要的是，要注意在实践过程中花大气力去捕捉和抓住主要矛盾，这样，其它问题就能迎刃而解，从而达到经济和合理的目的。例如，我国的一个工程，开始主要是做混凝土与岩体的胶结面抗剪试验工作，经过一段实践以后，才抓住岩体中的软弱夹层，尤其是泥化夹层作为该工程岩石力学试验研究工作的主攻方向，从而大大加快了岩石力学试验工作的进展，使水工设计与施工得以顺利进行。可是，进一步的实践表明，上述主攻方向对于该工程的主体——大坝来说是合适的，但对开挖深度较大的厂房坝段，岩体内的初始应力则是不容忽视的。即对于同一工程的不同部位，也会有不同的重点。必须注意对具体情况作具体分析。

(3) 为岩石力学计算提供一个反映岩体地质具体特点的物理模型。在现阶段，岩石力学

的计算简图，多凭计算者的经验来选定，如何才能与具体工程地点的岩体地质条件相吻合，似乎缺乏更多的研究。应当遵循何种具体途径来解决这个问题，似乎也较少进行讨论。基于实践经验，我们认为，可以采用岩石力学的科学试验途径来探索为岩石力学计算提供一个反映岩体地质具体特点的物理模型及其相应的计算参数。因此，在岩石力学试验研究的全局布署中应该认真地予以考虑。如何具体实施？大体说来，对工程地点的一定范围内的岩体地质情况划分不同工程地质单元，这种划分虽然主要是考虑岩性、产状、结构、构造等地质因素方面，但也应该适当考虑岩石力学计算及试验方面。例如，对于岩性相同、裂隙情况或风化程度相近的岩体条件，可以在考虑比尺效应的情况下，采用一定的试验方法求得其各种力学参数。就长度来说，相应于建筑物尺寸的裂隙、裂纹以及层面、软弱夹层层间错动或岩体中的其它缺陷，这些是力学分析中的重要部位，应该求得岩体中这些部位的有关物理力学特性及其相应的参数。另一种情况是，就单个节理裂隙来说，其长度是有限的，粗看起来，不会成为工程设计上的关键部位，但在一定条件下可扩展成岩体中的重大缺陷；或者这一类裂隙有可能与其它定向裂隙系统组合成某种滑动面，可以采用试验途径予以模拟，为岩石力学计算提供有科学实验根据的计算简图。

总之，为了获得能正确地反映岩体地质特点的物理模型，一种可能的途径是：首先把岩体的各种情况分解为基本单元进行试验，以求得相应的力学特性及其参数；又用试验途径或数学模拟在给定的荷载和边界条件下观察岩体的变形和破坏特征，总结其规律性，以便为工程设计服务。

1.2.4 试验大纲

有一个比较好的全局布署，不等于就能把岩石力学试验工作做好，因为在实施过程中，还会遇到各种各样的问题。重要的是，要使整个试验过程的每一步骤都能落在实处。因此，就要具体拟出一个岩石力学试验大纲。而试验大纲的具体实施，还要依靠更具体的岩石试验规程来阐明。对于一个具体工程来说，在遵循国家颁布的统一的岩石试验规程的同时，应根据工程及岩体地质条件的实际情况作一些具体处理。

问题在于，如何制定岩石力学试验大纲？换言之，应该遵循什么样的基本原则？根据现有的实践经验，大体是：

(1) 要努力对试验成果的可靠性进行鉴定。对岩石试验所获得的大量数据，首先要尽一切可能鉴定其可靠性和有效性。目前，对于这个问题的解决，通常的办法是对每一个具体岩石试验项目，精心组织，认真进行。例如，试验条件的选择、试验设备及仪器的选定、试验成果误差的估计等等，都是采用逐步积累实践经验来摸索解决的途径。通常是按国家的岩石试验规程来进行，使所获得的试验成果具有可比性。其次，要注意采用多种试验途径进行综合研究，使各种途径所得出的成果能够互相比对和验证。这一点是很重要的。前已提及，在岩石力学的发展进程中，在工程界有一个时期很强调现场大型试验，而忽视室内试验。50年代国外曾进行过 40m^2 和 100m^2 面积的抗剪试验，后来便很少有人这样做。事实上，忽视室内试验，则是不对的。例如，高温高压的岩石三轴试验，对研究地震及其预报就很有启示作用；又如，在水工建设中，软弱夹层的危害性是众所周知的，但现在多采用野外试验与室内试验相结合的途径来进行研究，在某些情况，甚至以室内试验为主。又如：静力试验相对地说，较能反映岩体的断裂的影响，但它的速度慢、耗费的资金多，而动力试验则是比较快速的，但反映岩石断裂的影响方面却又不及静力试验。可是两者是有一定的关联性的，如果能够把两者

结合起来, 不仅能互相比较和检验, 而且对加速完成岩石试验工作有利。再次, 大量积累岩石各种特性资料并进行综合分析对比, 对于认识岩石的一般规律性也是重要的途径之一。有了对于岩石的规律性认识, 对于判别岩石试验成果的可靠性方面也是有用的。

(2) 提高完成岩石试验工作的速度。目前, 一般岩石力学试验, 由于试点多、工作量大、工期长、费用高, 使得试验工作常常赶不上设计的需要。在水工建设中, 这个矛盾是很突出的。解决这个问题一个关键, 是实现岩石试验的机械化和自动化, 例如平洞的开挖、试件的制备、荷载施加及测试仪表、试验数据处理等, 要使实验设备既有机械设备, 也有电子设备, 且两者紧密地结合在一起, 组成一个统一的整体, 而以电子计算机为中心的系统。使岩石测试技术现代化, 这是刻不容缓的。另一方面, 也要在试验方法、试验技术方面进行革新。在岩石试验工作中, 它的准备试验的过程与其测试过程相比较是很长的。所以, 如果能够充分利用试洞和试件条件, 相对地说, 也是加速了岩石试验工作的进程, 在这方面, 是很有潜力可挖的。例如用单点法代替多点法的剪力试验, 在国内得到一定程度的推广; 又如作剪力试验之前, 先进行弹性模量的测定, 也有人探索过; 再如平洞洞壁很少为人们所利用(只有应力测量的试洞除外), 看来可以利用洞壁用狭缝法进行弹性模量的测定等; 还有, 目前对钻孔及其岩芯的利用, 太过于单一了, 可以研究和开发其可能包括的多种地质信息, 等等。科学实验的发展是愈来愈细致, 技术也愈复杂, 但当人们对其规律性有所认识之后, 反过来可以用比较简单的科学实验途径来达到一定的目的。地质力学采用泥巴来做模型试验, 对我们是很有启发性的。如果岩石力学试验有一套简单易行的办法, 对于大量的中型水利水电工程是很有用的。现有的岩石力学试验方法, 粗略地说, 有三种类型: 一是为获得岩石的物理-力学特性参数为目的的试验, 例如剪力试验、变形试验等, 这类试验方法最多, 也最常用, 虽然也要求从这种试验中尽可能获得更多的资料, 但一般说来, 这类试验的目标是比较单一的。二是综合性试验, 例如隧洞水压法试验, 由于具有与水工压力隧洞边界条件及受力条件相似性, 而且试验工作量大、费用高、周期长, 已不单纯用作岩体变形参数的测定方法, 而成为研究水工压力隧洞衬砌结构及其与围岩共同工作为主的一种综合性试验方法。三是模拟性试验, 在室内进行相似材料模型试验是众所周知的。但在一定的意义上说, 由于洞室周围的应力图形取决于洞室的形状, 而与洞室的尺寸无关(在岩石线弹性范围时), 所以在勘探平洞中进行的岩石力学试验, 都可以在按相同于预定厂房高宽比开挖的洞室中进行, 虽然这些洞室不能严格地象厂房那样开挖, 但可以认为, 所用的洞室形状对所研究的问题是有较好的近似性。

(3) 要把岩石试验与工程设计参数的取值问题结合起来。就某一个具体工程的岩石力学试验成果来说, 还有一个怎样把试验成果正确而合理地运用到设计中去的问题。岩石力学试验工作一个重要的探索方面, 就是要将岩石试验与工程设计参数的取值问题紧密地联系起来。有人认为: 岩石力学参数的取值问题, 只能依靠实践经验, 岩石力学试验做与不做并无多大的关系。应该指出, 这种意见是错误的, 忽视岩石的科学实验, 那么实践经验从何而来? 对于工程实践经验, 是应该尊重的, 因为这是人们的劳动成果和智慧的结晶, 但也应该采取分析态度, 不能生搬硬套。对这些经验鉴别的依据则是依赖于岩石的科学实验。就岩石试验工作而言, 要善于从岩石试验成果中找出岩石力学参数取值的客观物理依据。在这方面, 我们曾经做过一些尝试⁽²⁾, 虽然是初步的, 但毕竟是向前迈进了一步, 应该坚持下去, 并不断完善。

1.2.5 关于岩石工程设计参数取值问题

岩石工程设计参数的取值方法, 大体可归纳为四种⁽⁷⁾:

(1) 工程类比法 这是一种经验判断方法, 虽然常用, 但却因人而异, 差别极大, 并没有可遵循的科学方法论证和判断它的准确性。这种方法还有一个重要的缺陷, 是这种类比常常只是宏观的, 容易掩盖工程的特点, 因而有可能隐藏着某些危险性。法国的马尔帕塞拱坝的建设是在法国已拥有大量拱坝建设的经验基础上进行的, 然而失事了。这表明, 对任何一个工程, 一定要具体研究其本身的特点, 没有这方面详尽的分析, 其类比的可信程度就值得研究了。

(2) 系数折减法 这是试验得出的参数按不同的影响因素进行折减。这种折减的一个前提是各因素的影响彼此独立而不相互作用。事实并非完全如此。例如水的作用, 不单有软化作用, 还可能有膨胀作用和楔缝作用(承压水使岩石原有裂纹扩展), 水还可以加强流变效应等等。所以采用这一方法应持谨慎态度。

(3) 加权平均或变形一致原则 对于这个方法, 曾经进行过许多讨论。加权平均在本质上讲是一种统计方法, 因此, 一定要在同一母体的基础上来进行。变形一致原则本意是作为加权平均方法的改进, 可是, 在物理方面来说, 两者迥然不同。前者完全不涉及事物的物理方面, 而后者则主要是考虑物理方面, 但是与天然岩石的受力状态又并不一致。因为天然岩石中的弱面在受力时可能首先屈服, 其结果是它本来承受的应力部分地转移到能够承力的岩体上, 从而形成应力集中, 导致岩桥(Rock Bridge)的各个击破而呈现出累进性破坏过程。这种现象在岩石试验及岩石工程的破坏中, 经常可以观察到。

(4) 优定斜率法 所谓优定斜率法, 基本上是试验数据的下限包络线所给出的数据。这与工程界常用的试验数据取小值平均值是很相近的。这个方法的物理概念是明确的。不过, 对于岩石抗剪强度来说, c 与 f 取相同条件下的数值, 不一定是合适的。因为坝基抗滑稳定分析的参数取值, 主要就是直线方程中的 c 与 f 的取值, 这两个参数虽然人们定义为凝聚力 and 摩擦系数, 其实并非相互独立的两个物理参数^[8]。而且 c 、 f 两者的保证率也不一样^[2]。因此, 在这种条件下的 c 、 f 取值还必须与安全系数相配套。

为了更准确地进行岩石工程的参数选择, 根据国内外丰富的实践经验, 基本原则可以概括为^[2]: ①岩石工程的参数取值应该是有原则的, 即它应该最终能保证工程建筑物处于弹性工作状态。②要从两方面着手, 一方面要研究工程建筑物的稳定性分析的原理和方法; 另一方面是如何保证参数的获得具有反映实际情况的坚实基础, 确保参数的获得具有可信性。③由于有些参数的精确值不易确定, 因此应对参数进行敏感性分析, 以便找出对工程关系重大的参数予以更详细的研究。并可选用一定变化范围的参数值来进行工程稳定性分析, 以求最不利情况, 再进一步做工作, 使后续的研究更具有针对性。④在参数选择时, 要把岩石力学已有的研究成果与现场考察的经验判断相结合, 例如爬坡角 i 、节理面的倾角等等, 是很易于在平洞中观察到的, 从而可以判断岩石沿不连续面的摩擦系数。⑤怎样把有代表性的参数化为整个工程场地的情况, 这是目前还没有很好解决的问题, 需要在实践中探索。在这方面, 工程上常用的数值模拟和物理模拟方法目前仍然是一种现实的技术途径。

第1.3节 岩石力学科学思想的发展

岩石力学的形成和发展过程和其它科学技术一样, 一直是紧密地与人类的生产活动相联系的。但是岩石力学这门学科在自己的发展过程中, 却经历了曲折的道路。那么, 为什么岩石力学会因此停滞不前呢? 我们认为, 这主要是(但不是唯一原因)对岩石怎样进行“科学的抽象”这个问题存在着重大的意见分歧。为此, 我们不妨从岩石力学的形成年代谈起^[9]。

目前,国内外的一般看法是,岩石力学是本世纪50年代中才开始形成的。但是,如果不去考虑“岩石力学”这个名词出现的时间,而注意于问题的实质方面,那么便可以把形成岩石力学的年代上推到本世纪20年代末。我们认为,判断一门学科的形成,取决于三个基本条件:①从生产建设中提出了属于本门学科领域的一系列的专门的科学技术问题,要求互相联系地按照统一观点加以解决;②要初步形成一套属于本门学科的基本的科学实验技术;③要有适合于本门学科的基本理论体系。而这些条件,在本世纪20年代末,已经大体上具备了。在那时,已经提出了岩石压力和岩石抗力问题,高坝岩基和岩坡稳定等一系列的岩石力学课题;而且,岩石力学所特有的科学实验技术在那时也都先后出现了,例如,岩石三轴试验、水压法、千斤顶法、天然岩体的应力测量技术和原型观测技术等;此外,虽然对岩体是否属于连续介质还有争论,但实际上已经引入连续介质力学作为解决岩石力学课题的理论基础,也就是说,采用连续介质作为岩石力学的物理模型。但是,由于岩石力学那时还只是处在发展的初期阶段,虽然出版过一些专门性的著作,但是岩石力学的研究领域,主要地还仅局限于岩石压力问题方面,至于岩基和岩坡的稳定性问题等方面,还没有进行深入的研究工作。更为重要的是人们对于节理繁多的天然岩体是否适合作为连续介质有怀疑,阻碍了岩石力学的发展。

岩石力学与土力学的发展相比较是很慢的。土力学刚好也是在本世纪20年代才形成学科的,而且土力学与岩石力学是姊妹学科,有许多相似之处。但是为什么土力学的发展比起岩石力学来要迅速得多呢?我们认为,虽然两门学科都是适应生产建设的需要而产生的,但是它们的进一步的发展情况很不相同。就土力学来说,几乎从一开始便涉及到所有的工程建设部门,例如水利水电建设、建筑工程、铁道及公路建设以及矿山建设等部门,因而其迫切性容易为人们所注意,这是一;其次,从1936年开始的历届国际土力学会议,对于推动土力学的发展,无疑起了相当大作用;第三,土力学从一开始就有人写过一些有影响的比较系统的专门著作,而这些著作的作者一直在土力学这个领域中坚持不懈地进行工作。岩石力学的发展情况便不是这样。首先,在长时期内,主要只围绕矿山建设中的岩石压力问题进行工作,没有或较少扩及到其它重要课题上去。不仅如此,在许多工程建设中广泛流传着一种单纯基于室内岩块试验结果来评价天然岩体的意见:“岩石地基是可靠的”,“万无一失”的。其次,长期以来,岩石力学界没有土力学界那样的国际性组织,经常交流经验,以促进岩石力学的发展。再次,岩石力学在其发展的初期,虽然也出现过一些有价值的著作,但是这些著作的作者,没有进一步从事于岩石力学方面的工作。最后,对于天然岩体的计算模型,长期以来存在着疑问和矛盾,既怀疑连续介质模型的有效性,又没有别的可行的方案,从而影响了岩石力学理论体系的形成和发展,这与土力学从一开始便以连续介质作为自己的计算模型的情况是不同的。

有趣的是,从本世纪50年代开始,岩石力学的发展从总的趋势看,几乎是沿着土力学的发展的步伐走向新的阶段,但是这个新的阶段是由什么因素促成的呢?我们认为,这首先是由于生产实践的需要,工程实践经验的积累,使得岩石力学有可能建立在比较全面的室内和野外试验、原型观测和理论分析相结合的基础上。在这个阶段中,一个突出的特点是岩石力学大大扩大了自己的应用范围。例如,从高坝建设的情况来看,我们曾经粗略地统计过^[1]:1950—1959年这10年间建造的高坝,差不多为过去60年所修建的高坝数量的总和。这样大规模的水利水电建设,必然会对岩石力学的发展起到巨大的推动作用。而1960年前后的某些大坝和水库的失事,更进一步促进水工建设与岩石力学的结合。这一点在50年代以来的多次

国际大坝会议中都有明显的反映。还应该指出,从60年代以来,对岩石破坏和流动的试验及理论研究,已经使岩石力学越出了服务于工程建设的传统领域,而深入到地质领域中去了。所以,室内高温高压围压下的变形和破坏的试验研究起着一定程度的领先作用,也就不足为奇了。其次,1951年在奥地利的萨尔兹堡(Salzburg)举行的岩石力学讨论会,已经发展成为国际岩石力学协会(ISRM)的建立(1962年),并已于1966年在里斯本举行了第一届国际岩石力学会议,以后每4年召开一次,1991年将在德国召开第七届会议,这无疑有助于促进岩石力学的发展。第三,从1957年出版了法国的塔罗勃(J. Talobre)的《岩石力学》专著以来^①,有关岩石力学的著作如雨后春笋,不断涌现。国际岩石力学协会还出版了《岩石力学》杂志(季刊)和《国际岩石力学及矿业科学学报》,并附有岩土力学文摘(International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts)。这对于总结岩石力学的实践经验,交流和活跃岩石力学的学术思想,传播岩石力学知识,都是非常有益的。

前面简要叙述的这些历史经验,对于我们是富有启发性的。但是,我们认为特别值得注意的是:大规模的工程建设迫切需要岩石力学为之服务,这种迫切性有力地促进了岩石力学科学思想的一个明显转变,就是接受连续介质力学作为自己的理论体系,而又不排除对非连续介质(裂隙介质)力学的探索,从而结束了岩石力学在理论体系问题上长期徘徊不定的状态,这是岩石力学能够获得迅速发展的主要原因。

上述关于岩石力学发展原因的分析,归纳起来就是:关键在于对天然岩体进行怎样的“科学抽象”?这就是岩石力学的计算模型问题。

概括地讲,岩石力学中存在着两种对立的计算模型:一是连续介质模型;一是非连续介质模型(裂隙介质模型)。由于工程设计是以连续介质力学为基础的,所以在工程界,便很自然地连续介质力学引用到岩石力学领域中来。在50年代有人写过这方面的专门著作,例如文献^[10]及^[12]。并将连续介质力学运用于:①作为岩石力学科学实验的基本原理;②作为整理岩石力学测试资料的理论公式,以便求得岩石力学的各种参数;③作为求解岩石力学课题的计算模型和方法。这种做法,开始并不是经过周密的科学论证的结果,而是由于生产的迫切需要所造成的,其可能性和合理性如何,则留待工程实践去检验,但是,实践的结果表明,这样做大体上是可行的。

有人企图把本世纪50年代以来岩石力学的发展完全归功于奥地利萨尔兹堡学派。我们认为这是不恰当的。因为岩石力学发展到本世纪50年代,由于多种原因促成它的大发展,是时代必然,不是那一个学派独立完成的。当然这丝毫没有贬低这个学派的作用的意思,只是把它放在应有的位置上去。如果奥地利学派可以叫作“地质学派”的话,那么前述作法也可以叫作“工程学派”^②。从岩石力学目前实际应用的一般情况来看,工程学派的作法较具有普遍性。

为了说明这一点,我们不妨看一看奥地利学派的一些基本观点。这个学派认为:

(1)就大多数工程问题而言,岩体的工程性质取决于岩体内部地质断裂系统的要比取决于岩石本身强度的大得多。所以,岩石力学是一种不连续体力学,即裂隙介质力学;

①据我们所知,首先出版《岩石力学》专著的并不是法国的塔罗勃,而是苏联的П. М. Цимбаревич,其专著名称为:“Механика горных пород”,(岩石力学)Углетехиздат, 1948。不过因为此书局限于矿山方面,没有涉及到土木、水利等许多工程领域,流传不广,影响也小,因而没有能够成为岩石力学发展过程中的里程碑。

②工程学派的一些观点和做法,最先是由法国、葡萄牙等国的水工学界所倡导,所以有人(例如J. C. Jaeger)称之为“法国学派”,但这个名词并未被普遍采用。

(2) 岩体的强度是一种剩余强度。此剩余强度和它的各向异性都代表着岩体的各单元岩块之间的相互联结所制约；

(3) 岩体的变形性质和它的各向异性主要是由岩体结构中的单元岩块间的内部位移造成的。

应该指出，这些概念并不都是新的，过去工程人员之所以顾虑引用弹性理论求解岩石力学课题的有效性，就是由于天然岩体具有裂隙性的缘故。不过，用这样明确的语言表达出来，并进行一系列的工作来寻求其规律性，却是地质学派的显著特点和主要贡献。

值得注意的是，地质学派虽然喊出要建立裂隙介质力学的口号，但在实践中却与工程学派并无多大差别。例如穆勒(L. Müller) 承担的日本黑部川第四坝坝基的岩石力学研究任务，从所发表的文献来看，无论测试方法、设备和成果的整理，并没有显示出裂隙介质力学的明显特征，只不过注意了试件的尺寸效应而已，这一点，工程学派也是注意的。而且，穆勒还利用连续介质力学的成果来说明某些岩石力学问题，例如利用隧洞的弹-塑性解来说明狭窄河谷平行坡面的裂隙发育情况；并在1980年来华讲学中，谈到用光弹性力学方法来研究洞周围岩的应力状态，以作为圈定加固区的作法等，且先不论这种说明的正确性和作法的合理程度如何，但这个事实本身就很清楚地表明，在岩石力学发展的现阶段，恐怕还离不开连续介质力学这个理论体系。

还应该指出，国内外都有人建议发展非连续介质力学，而且，早在本世纪50年代初期，还在一些会议讨论过非连续介质力学问题。在《工程实用岩石力学》一书中的第九章^[12]，专门论述了“岩体问题中的不连续介质力学或碎块体力学”，由此可以更具体地了解不连续介质力学的具体内容。据认为：碎块岩体（裂隙岩体）是一个由微观的、中等的和宏观的多单元（块体）的集合体所组成，每一个单元具有一定的物理形状，如球体、椭球体、正方体等等(图1.4)。由于这种集合体内各单元在相互嵌合中不可避免地存在着缺陷，从而会促使

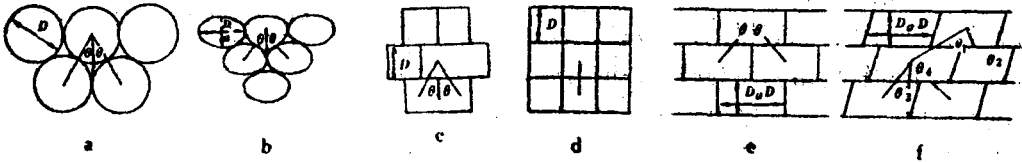


图1.4 一些典型的岩块系

各单元之间产生滑动效应。所以，如果不是在重复荷载的条件下，要想将碎块体模型的变形分析与集合体的性能联系起来是有困难的。

由此可见，岩石力学中的不连续介质模型（碎块体模型）与连续介质模型是从两种完全不同的思路去模拟天然岩体的性状的。后者是从整体着眼，认为，只要岩体在宏观上具有一定的应力-应变关系（例如线性的或非线性的等等），就可以用现有的连续介质力学方法去求解其应力及变形状态；而前者是从内部结构着眼，把岩体简化为某些物理形状的单元的集合体，进而研究这些理想碎块体模型的应力-应变关系，再去求解岩石力学问题。

在我国李四光教授的倡导下，特别是在他的地质力学的启示下，谷德振等也在探索建立“岩体工程地质力学”，与国外的情况不同之点，在于我国的工程地质工作者更着重于野外的地质形迹的调查和研究，并与工程地点的区域构造应力场相联系。

从上述情况可以看出，不连续介质力学还处在发展过程中，还有许多问题需要解决，而

且, 由于电算技术的发展, 连续介质力学也在发生变化。两者相互渗透、相互结合, 可能形成一个新的理论体系。因为, 岩石力学中的连续介质力学方法, 现在普遍的做法是, 采用各种方案来考虑岩体中的不连续面, 进行大量的节理岩石的模型试验和电算分析, 以致可以这样说, 与经典连续介质力学相比较, 现在这种不同程度上考虑岩石中的非连续面存在的情况, 也可以叫作准连续介质力学。

应该指出, 新的学科的发展, 常常是把现有的某些学科中的合理内容改造成为自己的重要组成部分。例如对物体中存在着细微缺陷的研究, 并利用格里菲斯(A. A. Griffith)理论以阐述其宏观特性, 从而探讨岩石的断裂与强度问题, 这再一次证明连续介质模型对于岩石力学是可用的。因此, 可以认为, 岩石力学中不连续介质力学方法与连续介质力学方法之间的分歧, 可能比某些研究者所预想的要小些, 而且各单元的集合体的基本特性一经确定, 就可以转化为连续介质力学问题求解。

70年代初形成一种离散单元法(Discrete Element Method, 简称DEM), 这是一种分析非连续问题的数值计算方法。该方法以分立的块体为出发点, 块体的位移大小不受限制, 甚至位移可以发展到脱离母体而自由倾倒或下落。离散单元法的基本原理是牛顿运动定律结合不同的本构关系, 用动态松弛法或静态松弛法求解。与此同时, 石根华的块体理论(Key Block Theory)^[13]也已发展成为不连续体变形分析方法(Discontinuity Deformation Analysis)。这些情况表明, 岩石力学中不连续介质力学方法和连续介质力学方法正在结合起来。

还应该指出, 不连续介质力学是建立在这样的基本假定上: 岩体的工程性质主要取决于岩体的地质断裂系统。但是岩石的试验研究表明: 这个概念只在一定的应力状态下才是可以接受的。因为, 节理岩石的三轴试验表明: 在低的围压作用下, 虽然可以发生沿裂隙面的滑移破坏, 但也发生轴向(大主应力 σ_1 方向)劈裂破坏, 或者部分通过裂隙面部分通过完整岩石的剪切破坏, 而在高的围压作用下, 其破坏并不受裂隙方向的影响。我们在野外三轴试验中也观察到: 在低的围压作用下, 砂岩并不沿原有的构造裂隙剪破, 而是受作用力的控制, 在被剪破的滑动面上, 很光滑、擦痕累累、清楚可见, 而试件上原有的构造裂隙上却没有这个现象。这是因为地质上的软弱结构面与破坏性的剪应力的分布轨迹不一定是完全重合的缘故。因此, 有一个应力取向问题, 一般来说, 在最大主应力 σ_1 与软弱面的夹角 α 在 30° — 40° 之间时, 最容易发生破坏。

当前岩石力学研究中, 岩石断裂力学与岩石损伤力学的研究获得了很大的发展, 这些研究是立足于连续介质力学, 而又考虑岩体中的裂纹和节理的。因此, 连续介质力学模型并不限制人们采用各种途径考虑岩体中实际存在各式各样的节理情况, 这正是岩石力学重要的研究课题。

第1.4节 岩石的工程分类

在工程实践中, 经常需要进行岩石的工程分类。这是因为, 通过一定的勘测试验, 在逐步认识岩石的基本特性的基础上, 对岩石的性状进行综合分析, 划分等级和一定的类别, 以反映介质力学属性的质的区别和相应的量的概念, 又反映构成这些不同质的各种因素的一定的内在联系。这将有利于对不同类型岩石的工程特性进行深入的研究, 并建立与之相应的计算模型和施工工艺及处理措施, 从而使有关的工程设计和施工更加合理而经济。因此, 对于岩石的工程分类的研究, 在国内外都很引人注目。