

369

水工建设中的 岩石力学问题

水利电力出版社

437

水工建设中的岩石力学问题

陶 振 宇

水 利 电 力 出 版 社

内 容 提 要

本书主要是以我国水工建设中的实践经验为基础,来叙述水工建设中岩石力学的若干问题。书中分别讨论了岩石的物理性状,岩体中软弱夹层的基本特性,岩体的初始应力(天然岩体的内应力),岩石的变形及强度特性,水的作用和温度的影响,岩体的稳定性,以及岩石压力和岩石抗力等问题。

本书可供水利水电工程建设者及有关高等院校师生阅读参考。

水工建设中的岩石力学问题

*

水利电力出版社出版
(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

长春新华印刷厂排版
长春市印刷厂印刷

*

1976年8月长春第一版

1976年8月长春第一次印刷

印数 00000—10290 册 每册 1.10 元

书号 15143·3203

毛主席语录

人的正确思想是从那里来的？是从天上掉下来的吗？不是。是自己头脑里固有的吗？不是。人的正确思想，只能从社会实践中来，只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

ABE 9/11

前 言

遵照毛主席关于“教育要革命”的教导，广大师生批判修正主义，批判资产阶级，实行多种形式开门办学，到工农群众中去，实行教学、科学研究、生产劳动三结合。因而使我有更多的机会参加生产实践中的岩石力学科学试验工作，并深刻地体会到：建国以来，特别是在伟大的无产阶级文化大革命和批林批孔运动的推动下，在贯彻执行毛主席的无产阶级革命路线和落实“备战、备荒、为人民”，“深挖洞、广积粮、不称霸”的指示过程中，我国岩石力学获得了很大的发展，积累了丰富的实践经验。因此，在这个基础上，我们才有可能对岩石力学进行新的探索和总结。

本书在编写过程中，承原水利电力部科学研究所水利室土工组和南京水利科学研究所土工组的有关同志，对编写提纲提出了许多宝贵意见；1973年冬写成初稿后，先后承长江水利水电科学研究院岩基室、长春地质学院、原水利电力部科学研究所水利室和我院土力学与地质教研室等单位的有关同志认真审阅提出了修改意见；在整个编写过程中，始终得到我院党委、工宣队的热情关怀，特别是有关工地、长江流域规划办公室、中国科学院湖北岩体土力学研究所等单位的领导和同志们给予大力帮助和支持，使我有在我国水工建设的比较广泛的实践经验的基础上进行本书的编写。在这里，谨向所有这些单位和同志们，表示我衷心的感谢。

由于水平所限，书中肯定会有许多不妥甚至错误之处，敬请读者惠予批评指正。

武汉水利电力学院 陶振宇

一九七五年一月二十五日

目 录

前 言

第一章 绪论	1
§1-1 岩石的基本概念	1
§1-2 岩石力学的任务	4
§1-3 岩石力学的方法	7
第二章 岩石的物理性状	10
§2-1 概述	10
§2-2 岩石的不均匀性	11
§2-3 岩石的各向异性	13
§2-4 岩石的裂隙性	17
§2-5 岩石裂隙的定量评价方法	23
§2-6 关于岩石力学的计算模型	26
第三章 岩体中软弱夹层的基本特性	29
§3-1 概述	29
§3-2 软弱夹层的基本特性	30
§3-3 软弱夹层的研究方法	36
第四章 岩体的初始应力	38
§4-1 概述	38
§4-2 关于岩体初始应力状态	38
§4-3 岩爆现象	43
§4-4 关于岩体试验的一个问题	45
第五章 岩石的变形特性	47
§5-1 概述	47
§5-2 岩石的应力-应变关系	48
§5-3 岩石的流变性	61
§5-4 坝基岩体的变位	68
§5-5 岩体静力和动力模量的关系	72

第六章 岩石的强度特性	74
§6-1 概述	74
§6-2 联合强度理论	75
§6-3 各向受压时的强度条件	79
§6-4 脆性破坏强度理论	82
§6-5 岩石破坏机理的探讨	83
§6-6 岩体剪力试验的一个可能的单点法	85
第七章 水的作用和温度的影响	88
§7-1 概述	88
§7-2 岩石的水理性	89
§7-3 裂隙水压力的作用	93
§7-4 水对岩石的溶蚀作用	96
§7-5 温度的影响	98
第八章 岩体的稳定性	101
§8-1 概述	101
§8-2 坝基岩体的稳定性	101
§8-3 岩坡的稳定性	113
§8-4 关于地质力学方法的应用	118
§8-5 岩体稳定分析中的力学参数的取值问题	121
§8-6 水库地震	127
第九章 岩石压力和岩石抗力	134
§9-1 概述	134
§9-2 岩石压力	134
§9-3 岩石抗力	141
§9-4 喷锚结构	148
§9-5 关于隧洞围岩深层固结灌浆问题	155
参考文献	158

第一章 绪 论

§1-1 岩石的基本概念

在水利、水电工程建设中，有的建筑物置于岩体上，例如大坝；有的建筑物置于岩体内部，例如隧洞、地下水电站厂房等。因此，就需要研究岩石的物理力学特性及其对水工建筑物的相互作用问题。

岩石是由比较稳定的一种或几种矿物所组成的物体。矿物本身也是一种天然存在的自然体，具有均一的或近平均一的物理的和化学的性质。矿物可以分为许多化学元素。大多数矿物都是晶体，即具有规则的几何外形，并且以组成矿物的原子的有规律的排列为特征。矿物在地壳中通常都不是彼此孤立地存在着，而是按照一定的规律组成集合体——这就是岩石。有的岩石是由一种矿物组成的，如石英岩、大理岩等；有的是由几种矿物组成的，如玄武岩、花岗岩、辉绿岩等。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，例如石英岩是由石英所组成的，但两者的性质并不是一样的。

按照成因，岩石可分为三大类，即岩浆岩、沉积岩和变质岩。

几乎所有的岩浆岩以及某些变质岩，是由结晶结构的矿物颗粒所组成。虽然有的岩石是由规则形状的矿物晶体所组成，但一般说来，许多岩石结构中的矿物晶体却并不完全，通常称之为半结晶。非结晶的岩石也有，例如火山玻璃，但是数量不多，在岩石总量中不占什么地位。

沉积岩是由形状不定，颗粒大小不均匀的矿物和岩石碎屑胶结而成的。其颗粒之间的各种胶结物质，有的是胶结强度大的硅质和钙质物质；有的则是胶结强度弱的粘土质和泥质物质。胶结强度不同，对岩石的力学性质有着重要的影响。

所有岩石，都有其构造和结构上的特点。岩浆岩具有块状构造；沉积岩具有层状构造；而变质岩具有片状构造或块状构造。要注意的是，片麻岩的片理与沉积岩的层理是不同的：其一，它们各自具有为某些岩石所独有的特性，片理是变质结晶岩石所特有，而层理则只存在于沉积岩之中；其二，它们的形成条件也不同。层理是由各层岩石成分不同所造成的，或者是形成岩层的沉积作用的间断所造成的；而片理则是由构成岩石的矿物成平行条状的排列所造成的。矿物成分一致的片岩，如绿泥石片岩，板岩等，它们所表现的那种极薄的片理就叫做叶理。岩石的内部结构，对岩浆岩来说，有结晶粒状结构，结晶斑状结构，斑状结构及玻璃状结构等。沉积岩的内部结构多是粒状的，其特点是孔隙性，层理性和颗粒之间的胶结强度不同。变质岩结构的最重要特征是片理。

应该指出：形成天然岩体的基本特性，从根本上说来，就是由于地壳岩体在其形成和

存在的整个地质历史中，经受着各种不均衡运动的结果。当然有组成岩体物质的质的差别，忽视这一点是片面的和错误的。但是，“运动是物质的存在方式”^①。这种不同质的岩体组成，在岩体形成和存在的整个地质历史时期的运动过程中，必然会发生这样或那样的变异，更不用说岩体运动带给岩体内部结构及产状条件的决定性的影响了。

地壳岩体的运动形态，概括地讲，可以分为三种。

(1)成岩运动。这是指地壳岩体在生成阶段的运动过程。例如火成岩岩浆侵入岩体由于多次岩浆侵入或岩浆分异，往往形成岩性复杂，夹有多种岩脉的天然岩体；浅成岩在结构上常具有分带性。喷出岩与下伏岩层的接触面胶结不良，不同时期喷出岩间常常产生古风化夹层。沉积岩生成时产生层理性，常有软弱夹层。变质岩形成矿物晶体的定向排列结构。在成岩运动过程中，还可以产生各种形态的原生裂隙。凡此种种，都是地壳岩体在其成岩运动中所形成的非均质性特征。

(2)构造运动。从工程观点看来，构造运动给予地壳岩体的基本影响有三：首先，是形成断裂（断层，裂隙等）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来各向异性的特征；其次，是使岩体具有高的水平初始应力的重要原因，这特别对于深置的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，因而和地震及新构造运动有密切的关系。

(3)非构造运动。这是指除构造运动以外，在岩体形成后的其他运动，主要是由于风化作用，地下水作用，卸荷作用以及人工作用（如爆破，开挖等）所引起的岩体运动。从地壳岩体运动的全体看来，它远不及前面两种运动影响范围之广大，因此，可以说是局部性的。但对于工程建设的影响来说，它们也是很直接和密切的，因此，在一定的条件下，不一定要比其他运动给以较少的注意。

基于上述，可以认为：

(1)岩体的基本物理特性，最主要的是：岩体的非均质性；岩体的断裂系统（裂隙性）；岩体的初始应力（天然内应力）。在工程荷载作用和所给定的边界条件下，这些特性便表现为岩体各种形态的物理-力学性状，并贯穿于作用过程的始终。

(2)岩体异于自重应力场的天然内应力的存在，是岩体区别于近代沉积物——土体的最基本的特征之一，并表现为岩体的某些特殊的物理现象（例如深置巷道开挖时出现的“岩爆”现象等）。虽然许多问题还不太清楚，例如鲍辛格尔(I. Bauschinger)效应^②是否存在？岩体内能的集聚和释放过程是怎样的？等等。但是，天然内应力的存在，会对岩体特性以重大的影响，则是肯定的。

(3)岩体既是断裂的，又是连续的，是断裂与连续的统一体。可以叫做裂隙介质或准连续介质。因此，岩体的物理-力学性质，例如岩体的强度、变形及其各向异性等等，

① 恩格斯《反杜林论》56页，人民出版社出版，1970年12月第一版，北京第一次印刷。

② 鲍辛格尔效应是：先加的一种符号的塑性变形，会使材料对随后加上的另一种符号的塑性变形的抵抗能力变弱。这表明，在复杂加荷情况下，特别是有中间卸荷时，发生显著的各向异性影响。

从根本上说来,是取决于岩体本身存在的断裂系统(当然,这不是唯一的因素)。因此,我们所要研究的,不单纯是研究断裂系统本身,更重要的,是要研究工程建设的荷载及边界条件下对具有天然内应力的岩体的断裂系统的作用,和后者对前者的反作用。还应该指出:当岩体集聚的内应力超过岩体本身的强度时,便会形成新的断裂或使原有断裂进一步发展,而断裂的发展或新的断裂的形成,又会促使内应力的重新分布和集聚(此外还有热能的消散和集聚问题)。因此,岩体的裂隙性和具有初始应力的性质之间,又是有关联的。

(4)由于岩体运动的不均衡性,所以岩体必然是非均质的。岩体的非均质性是绝对的,无条件的,而其均质性则是相对的,有条件的。为了工程的目的,必须正确地划分出“工程地质单元”。必须在工程地质研究的基础上,用岩石科学实验方法和理论分析的方法相结合,来探索岩体性质的规律性,以服务于工程建设的目的。岩石科学实验途径是发展岩石力学的基础,必须始终抓住这一关键。因为岩石性质很复杂,随时都可以找到某些个别例子和材料,来证实某种观点和意见。因此,需要大量积累科学实验的,丰富的综合材料来发展岩石力学。当然,这并不排除根据一定材料作出工作假设,又检验于实践的可能性。恩格斯说:“只要自然科学在思维着,它的发展形式就是假说”[●]。这对于发展岩石力学是完全正确的。

从以上简略的叙述中可以看出,在岩石力学中引用地质学中的对岩石按成因分类,是需要的,但从工程的观点看来,又是不够的。因为工程建设者最感兴趣的是建筑地段的岩体的物理-力学性状和工程建成以后可能的变化及其防治措施。

因此,对岩石进行工程分类,便成为岩石力学的一个重要课题,到目前为止,这还是一个没有很好解决的课题。在岩石力学中,现在有一些根据岩体的某些特点而对岩石进行分类,例如,有的把岩石分为塑性岩石和脆性岩石;有的把岩石分为坚硬岩石,半坚硬岩石和软弱岩石;有的分为微裂隙岩石,中等裂隙岩石和强裂隙岩石;还有的分为新鲜岩石,弱风化岩石,中等风化岩石和强风化岩石,等等。由于这些分类缺乏明确的标准,常常因人而有差异,给岩石试验资料的统一整理造成很大的困难。

就岩石的工程分类原则来说,首先,要注意岩石的组成和岩性方面,这是岩石坚硬性的内因;其次是岩石的完整性,同样的坚硬岩石,由于其完整性不同,其工程特性也会不同;再次,是岩石的可变性(变异性)问题,在水工建设中,特别突出的是水对岩石的软化、泥化、溶蚀等作用。考虑到这些情况,可以用饱水抗压强度 $[\sigma]$ 来衡量其坚硬性和可变性,而采用野外静力变形模量(E_s)和野外动力弹性模量(E_d)之比值 $E_s/E_d = \beta$ 来衡量其完整性,在求 E_s 时,应该取加水浸泡岩体的条件下的试验结果。这样便有表1-1的岩石工程分类。

例如,我国某工程的石英细砂岩,其饱水单轴抗压强度 $[\sigma] = 1200$ 公斤/厘米²,野外静力试验(千斤顶法)求得 $E_s = 28.4 \times 10^4$ 公斤/厘米²,野外动力法(地震法)求得 $E_d = 40 \times 10^4$ 公斤/厘米², $\beta = E_s/E_d = 0.71$,由表1-1可定为BL类。又如某工程的花岗岩,

● 见恩格斯《自然辩证法》第218页,人民出版社出版,1971年8月第一版,北京第一次印刷。

表1-1

岩石的工程分类

坚 硬 性 [σ]公斤/厘米 ²	完 整 性 $E_s/E_d=\beta$				
	>0.9	0.7~0.9	0.5~0.7	0.3~0.5	<0.3
>2000	AK	AL	AM	AN	AP
1000~2000	BK	BL	BM	BN	BP
500~1000	CK	CL	CM	CN	CP
100~500	DK	DL	DM	DN	DP
<100	EK	EL	EM	EN	EP

[σ] = 800公斤/厘米², $E_s = 7.1 \times 10^4$ 公斤/厘米², $E_d = 14.5 \times 10^4$ 公斤/厘米², $\beta = 0.49$, 故为CN类, 这表明此种花岗岩的裂隙是比较发育的。

应该指出, 这个分类表仅仅是初步的, 需要实践经验的检验。

构成地壳的主要岩石, 就全体而论, 是岩浆岩和变质岩, 沉积岩占的比重很少。但是, 这并不意味着在岩石力学中可以给予沉积岩以较少的注意, 这是因为, 沉积岩总是覆盖在地壳的最表面。据估计, 地壳表面为沉积岩所覆盖的面积约占75%, 因此, 在工程建设实践中遇到沉积岩的机会, 并不比别的岩石要少些。

§1-2 岩石力学的任务

按照现在的一般见解, 可以把地壳材料分为两大类, 即: 松散的和坚硬的。前者有一个专门的名词——土; 后者便常常简称为岩石(天然岩体)。因此, 为了工程建设而研究地壳材料的科学便分为两组, 即以土为研究对象的《土质学》和《土力学》, 及以坚硬岩石(天然岩体)为研究对象的《工程地质学》和《岩石力学》。

这两组学科是既有区别又相互联系的。但是, 由于人们对土力学比较熟悉些, 常常把岩石力学当作土力学的外延学科, 即是说, 忽略了它们的差别性。因此, 在这里作一些简单的说明。由于土与岩石的工程用途是相同的: 同是作为建筑材料, 工程建筑物的地基以及作为隧洞及巷道、矿井的围岩, 所以这两组学科的基本任务是相同的, 其研究方法也有所近似。但是由于研究对象具有不同的特点, 因此, 两者又是有区别的。

首先, 土是天然岩体的风化产物, 其特点是松散性; 天然岩体则相反, 与土相比较, 它的特点是具有一定的整体性。因此, 土是松散介质(松散体); 岩体是裂隙介质(裂隙体), 具有相对的整体性。所以, 在工程上, 常常根据土的颗粒组成对土进行分类; 而岩体则根据其裂隙发育程度或风化程度来分类。由于裂隙及风化情况的不同, 天然岩体的整体性变化范围极大。在天然埋藏条件下, 可以看到岩体向土的变化及其过渡情况, 因此, 土与岩石两者又具有相对的意义。还要指出, 如同颗粒大小对土的性质具有重要影响一样, 岩体裂隙割裂的块体情况对天然岩体的工程性质也具有重要的影响。

其次, 土是地质年代最近期的地壳表面的沉积物。土的初始应力状态, 就是自重应力。天然岩体则不同。在岩体形成后存在的整个历史中, 经受着各种地质构造运动, 现在

还受着新构造运动的影响。所以天然岩体中的初始应力状态，虽然与岩体自重有关，但并不一定是简单的自重应力，因此，有时甚至观测到：某些天然岩体的水平方向的初始应力，比其垂直方向的大。这是一般近代沉积物——土体中所没有的现象[●]。而且，过大的初始应力状态，甚至引起“岩爆”或者叫做“岩石冲击”现象，即破碎的岩片从岩体挖空后的洞壁上放射出来，这对于深埋隧洞及矿山巷道的工作条件，是很不利的。

因此，为适应工程建设的需要而逐渐形成了一门新的技术科学——岩石力学，它是研究岩石在荷载作用下的变形和破坏规律的科学。换言之，岩石力学是研究岩石的力学现象及其发生和发展过程的物理实质。利用对岩石的这些规律性的认识，来为矿山建设，钻探工程，铁道及桥梁建设，以及水利水电建设等生产实践活动服务，而在这些工程建设实践过程中，又给岩石力学的原理以检验，并提出新的课题，从而进一步推动岩石力学的发展。

毛主席在《矛盾论》中教导我们：“科学研究的区分，就是根据科学对象所具有的特殊矛盾性。因此，对于某一现象的领域所特有的某一种矛盾的研究，就构成某一门科学的对象。”对于岩石力学来说，我们所研究的特殊矛盾是什么呢？对于这个问题，可能有不同的观点。可以认为^[1]：岩石力学所研究的特殊矛盾，是工程建筑物荷载给予建筑地点岩体结构及构造体系的作用，和后者对前者的反作用。

水工建设中的岩石力学问题，主要就是研究在荷载作用下岩体的变形、强度及稳定性等问题。应该指出，现代水工建设的发展趋势，向岩石力学提出了迫切需要解决的许多课题。这个发展趋势，表现为如下一些特点：

(1) 国外土石坝的数量，近年来不断增加。据统计，1930年高于20米的坝中，混凝土坝和土石坝数量的比例是65:35；到1958年，这个比例刚好反过来了，变成34:66。许多国家主要修建土石坝，而且有的坝高达到300米，例如苏联的鲁列克(Гурьев)坝。从1966年到1968年对63个国家新建坝的统计，总计925座坝中，土石坝为700座，占75.5%。其中，美国新建坝共370座，土石坝占90%。因此，在某些资本主义国家中，甚至提出混凝土坝如何才能具有与土石坝的竞争能力问题。这一特点，初看起来，似乎对岩石力学没有提出什么要求。事实上，修建土石坝通常总是与混凝土坝方案作比较，所以许多坝的岩石力学研究任务并没有减少，而且还提出了如何多快好省地完成岩石力学研究工作的要求。

(2) 世界各国坝工建设中，特别是高坝建设中，修建在岩基上的混凝土坝占的比重还相当大。并且，坝高增加了，数量增多了，逐步向轻型发展，主要是双曲拱坝逐渐增多，这是由于混凝土工艺水平，模型试验和电子计算技术的提高，^②进行了大规模的岩石力学现场试验，对薄拱坝及其基础的性状有了更进一步了解的缘故。

(3) 地下建筑日益增多，且规模越来越大。拿地下水电站来说，在第二次世界大战以前，总共不过40余座，且多集中在北欧(瑞典和挪威)及阿尔卑斯山区(意大利和瑞

● 在超压密土体中，也可以发生侧压力系数大于1的情况。但超压密土体实际上也可看作处于成岩过程中。

士),而目前已增加到 300 余座,分布地区也广泛得多。地下水电站的主要优点,不仅在于防空要求,而且在于能在最低水位时正常发电。最近几年来,国外修建的大型水电站,约有一半是把机房放在地下,一般机房跨度15~30米,高25~45米,体积 25000~240000 立方米。如果以瑞典(这是一个水利资源丰富,地下建筑发达的国家)为例,从本世纪初期至五十年代的隧洞建设情况如表 1-2 所示,可见一般。

表1-2 瑞典隧洞建设断面积的发展情况

编 号	工 程 名 称	竣 工 时 间	隧洞断面积 (平方米)	附 注
1	—	1911年	30	
2	波里尤斯 (Porjus)	1915年	50	
3	克朗格德 (Kangede)	1937年	116	
4	赫雅尔达 (Hjälta)	1949年	135	
5	契特福尔森 (Kitforsen)	1953年	205	
6	哈尔塞列 (Harrsele)	1958年	250	
7	斯托诺福斯 (Stornerrfors)	1959年	360	

(4) 水工建设中的安全性与经济性问题的关系,常常与岩石力学问题有密切关系。许多工程实践表明:岩体地质条件不良,往往成为水工建筑物丧失稳定性的基本原因之一,最显著的例子,如法国马尔帕塞坝的失事和瓦依昂水库的滑坡。当论及岩石力学与水工建设的关系时,常常着重谈的一个方面,就是水工建筑物的安全性方面。但这个问题,还可以从另一侧面,即水工建筑物的经济性这个方面来说明。例如,我国新安江水电站大坝设计的计算表明:当摩擦系数相差0.01时,估计在坝体混凝土及基础处理等方面的工程投资,相差约 100 万元之巨。再如,地下水电站的布置,可以有不同的方案:即首部式布置,尾部式布置,以及介于这两者之间的中间类型。这些布置方案,除了水工结构要求和地形、地质条件等外,最重要的区别是它们具有不同的经济性,并且与岩石力学的研究具有重要关系。例如葡萄牙在五十年代建成的两个地下式水电站:萨兰曼 (Salamonde, 于 1953 年建成) 和卡尼萨达 (Canicada, 于 1955 年建成)。可以看出,尾水隧洞的造价要低得多 (表 1-3)^[22],即

$$\text{萨兰曼水电站: } \frac{0.0645}{0.0280} = 2.3$$

$$\text{卡尼萨达水电站: } \frac{0.0888}{0.0402} = 2.2$$

就是说,以每米-千瓦为单位计算,压力隧洞的造价为尾水隧洞造价的 2.2~2.3 倍。这里有一个压力隧洞的荷载分配问题,如果荷载主要由岩体承担,则其造价将大为降低。

综上所述,岩石力学的具体任务,可以大致归纳如下:

- 1) 静荷载作用下岩石的变形规律及其机理的研究;
- 2) 岩石的强度理论及其机理的研究;
- 3) 关于岩体稳定性 (岩基, 岩坡及岩体挖空情况的稳定性) 的研究;

表1-3

萨兰曼水电站与卡尼萨达水电站的造价比较表

项 目	造 价 (10 ³ 新法郎)	长 度 (米)	装 机 容 量 (千瓦)	单 位 造 价 (新法郎/米-千瓦)
1. 压力隧洞(包括钢衬斜井)				
萨 兰 曼	586	216	42000	0.0645
卡 尼 萨 达	1343	255	60000	0.0888
2. 尾 水 隧 洞				
萨 兰 曼	2166	1860	42000	0.0280
卡 尼 萨 达	18138	7500	60000	0.0402

4) 岩体中的应力状态及岩体与工程建筑物(例如隧洞衬砌及围岩)的相互作用的研
究;

5) 岩石的动力特性及岩体爆破和地震工程中的岩石力学问题;

6) 室内岩石试验技术、试验仪器及装置,以及模型试验理论的研究;

7) 关于岩体的现场观测技术,原型观测及其设备的研究;

8) 关于加固岩体的工程措施与处理技术的研究;

9) 岩体的物理状态(裂隙性,风化性,透水性等)的研究;

10) 高温及高静围压力下岩石特性的研究。

在本书中,不可能全面论述这些岩石力学课题,我们将主要讨论水工建设中的若干岩石力学问题,并且是以我国水工建设的实践经验为基础。

§1-3 岩石力学的方法

为了完成岩石力学的基本任务,应该采用什么方法呢?岩石力学的方法就是:科学实验方法和理论分析方法,两者是互相联系又互相区别的,而以前者为基础。

岩石力学中的科学实验,可以分为两类。一类是我们通常所说的岩石室内及野外试验工作。这一类科学实验的特点在于:试验是在人们所控制的一定条件下进行的。特别是室内试验,有时为了突出某些因素的影响和作用,甚至人为地排除那些次要的因素。另一类是原型观测。它与前者不同之处在于:它的工作对象是原型实物。因此,工作条件要比前一类科学实验复杂得多。对于原型观测,目前还开展得很不够。但是,这项工作具有不为室内及野外试验所能代替的特点,因此,就其所获得的效果和作用来说,是必要的和有益的。

岩石力学中科学实验的目的,归纳起来有三个:

(1) 确定岩石的物理-力学参数。这是岩石试验中最大量最普遍的工作。这项工作,主要为工程的设计和施工提供所需要的岩石物理-力学方面的数据,而在这些科学实验所积累起来的大量的资料的基础上发展理论研究。

(2) 在岩石力学的科学实验中,有一类工作是以发展一种新的研究工具或新的实验技术为直接目的。即使是一般的物理-力学参数的确定,也经常要求改进试验的仪器、设

备和装置，并完善现有的试验技术。例如把活塞式千斤顶改为压力枕，不仅改善了与岩体试件的接触条件和试验工作条件，而且要轻便得多。一个 300 吨的活塞式千斤顶，其自重便达半吨多，而传压面积为 50×70 厘米，出力可达 600 吨的压力枕，自重仅 10 多公斤。

还应该指出，往往由于新的研究工具或新的实验技术的采用，而发现新的物理现象，甚至开创一个新的工作领域。例如岩石的三轴试验技术的发展，就是一个例子。大家知道，由于意大利卡拉拿 (Karrana) 大理岩 (这是一种著名的纯大理岩) 的三轴试验结果，使人们过去认定的关于脆性岩石和塑性岩石的传统概念得到了纠正。因为，该试验结果表明，在简单应力状态下呈脆性破坏的大理岩，在复杂应力状态下却表现为塑性流动。

(3) 岩石的科学实验 (包括室内与野外试验，模型试验与原型观测等) 为岩石力学的概念和理论的形成和发展，提供了坚实的物质基础。一方面，岩石力学中的概念和理论的产生，总是以科学实验中所发现的一定的事实为根据的；另一方面，在得到了概念和理论以后，需要生产实践与进一步的科学实验的检验，只有在这些检验中证明其为正确时，才能认为它们是成立的。关于岩石强度理论，就是一个例子。目前工程界采用的库伦 (C.A. Coulomb) 强度理论，是基于一定的试验成果得出的，但进一步的科学实验表明，这个理论是有条件的。

岩石力学的科学实验工作是重要的，这是岩石力学中破先验论，立唯物论的基础。但也要重视岩石力学中的经过事实检验的正确理论对于科学实验和生产斗争的指导作用，忽视这个方面，是错误的。

岩石力学的理论研究，也有几种情况：

(1) 岩石力学中有些理论，是有其科学实验根据的，并且也在实践中受到一定的检验。但是由于该理论所使用的范围与其赖以建立的科学实验的基础不相适应，因而造成理论与实际的不一致。对于这些理论，应该总结生产实践经验，更确切地规定其适应范围。例如，我国工程界常用的普氏 (М.М. Прогодьяконов) 理论，就是如此。普氏理论的最基本的假定是，可以把裂隙岩体当作松散介质来看待。普氏自己用砂作过试验，得到了平衡拱的概念。但是把只有经过砂土的模型试验证明的平衡拱理论，推广到所有具有裂隙的坚硬岩体中去，得出不同岩体的坚固系数 $f_{kp} = 0.3 \sim 20$ 。因此，该理论的条件性更大了。正因为如此，多年以来，人们对于坚固系数 f_{kp} 有过种种讨论，提出了各种各样的建议。其实， f_{kp} 值的数据的得出，与其说是理论上的，不如说是经验性的。因此，有时甚至与实际情况完全相反，也就不足为奇了。

(2) 岩石力学中现在广泛采用弹性理论，因此，关于弹性理论的适用性问题，便为人们所注意了。这是一个很重要的问题。大家知道，现在岩石试验中的初始应力测量，以及研究变形的动力法和静力法试验等等，都是按照弹性理论公式来整理资料的。工程建筑物与岩基的接触应力，隧洞围岩的应力状态都是借助于弹性理论来求解的。由于电子计算机的应用，在五十年代中期逐渐发展起来的有限单元法，在岩石力学中也获得了广泛的应用，但其基础仍然是弹性理论和塑性理论，因此，关于它们在岩石力学中的适用性，仍然需要进行进一步的工作。

(3)岩石力学中有些问题，目前还没有普遍性的理论，而目前还只能凭实践中得到的具体经验来处理。例如，在野外岩体试验时，多是在平洞中进行的，那末，平洞的试验条件如开挖的爆破作用，裂隙效应等对成果具有怎样的影响？又如，野外岩体试验的尺寸与实际工程建筑面积相比较总是很小的，拿这样的小面积的试验结果，如何应用到实际建筑的大面积上去？等等，现有的办法，主要是依靠逐渐积累起来的经验办事。在这些方面，很需要发展一些理论分析方法，以促进实践经验的提高和发展。

第二章 岩石的物理性状

§2-1 概 述

岩石是一种自然历史物体，是进行水工建设和其他工程建设的基础和围岩，因此，它在天然产状条件下的物理性状，对工程建设有直接的影响。岩石物理性状是多方面的，在这里主要讨论岩体的非均匀性，各向异性和裂隙（断裂）性等问题。

在现阶段，工程上常常根据实际情况划分出不同的工程地质单元，每一工程地质单元的岩体被认为是均质的。事实上，只不过是岩性差异在一定的范围以内而已。

这便提出一个问题，即如何估计岩体的非均质性问题。这个问题，就目前的研究情况来说，已经查明：不仅具有裂隙的岩体，而且不具有裂隙的岩块，都显示出非均质性这种特征。经过近几年来地球物理学和地质学相结合的研究，已经知道地球不仅可沿着垂直方向分成若干壳层，而且这些壳层沿着横向还可划分为若干板块。它们的厚度，化学成分和物理化学性质都不尽相同，因此，地壳岩体无论从整体或局部来看，都不能认为它是均质的。这个认识很重要。因此通常所说的均质岩体，只是就其大体而言，而且只是为了工程的目的。我们必须注意：岩石的非均质性是无条件的，绝对的，而其具有均质性的特点，则是有条件的、相对的。

有两种情况。其一，是岩石的均匀性，即在岩体中的任何空间位置的点，具有相同的物理-力学性质；其二，是各向异性，即岩体的性质随着岩体的结构的取向，而具有方向性的特点。在本章中，就是从这两方面进行一些探讨。

在荷载作用下岩石所表现出来的工程特性，例如强度、变形性质及它们的各向异性等等，主要是岩石的结构性的反映。

岩石具有两种结构性。一是微观的结构性，也可以叫做岩石的内部结构性，是以岩石内部结晶的不完全性（岩浆岩、变质岩）和颗粒间的胶结情况不均匀性（沉积岩）为特点的；二是宏观的结构性，也可以叫做岩石的外部结构性，是以岩石的断裂即岩石的裂隙性为特点的。岩石的结构性是与岩石的成因类型和形成条件以及它的存在的整个历史环境和条件密切相关的。

拿岩浆岩来说，这类岩石是由各种晶体（即由矿物）组成的混合体，它们在三度空间的排列是不规则的，无秩序的；晶体之间的联结有强有弱；并且具有这样或那样的缺陷。这些就是它的内部结构性的特征。这些情况当然会给岩石的物理-力学性质带来影响，但是就大多数工程问题而言，岩石的工程性质，取决于岩体地质断裂系统的要比取决于岩体本身（包含有内部结构性在内）的大得多。所以，关于岩石的内部结构性，在岩石力学中很少进行研究。在本章中，也主要只研究岩石的裂隙性问题。