

岩石力学的理论与实践

陶振宇 主编

水利出版社



岩石力学的理论与实践

陶 振 宇 主 编

水 利 出 版 社

内 容 提 要

本书由四篇共21章组成。第一篇总论,概述了我国岩石力学研究的主要进展;第二篇岩石的基本特性及其测试技术,分别论述了地质因素,岩体工程分级,应力测试,室内和现场岩石的强度、变形特性及其测试技术(包括岩块、岩体和软弱夹层;静力法及动力法;模型试验和微观结构研究);第三篇岩石力学的理论研究与分析计算,分别论述了岩体的破坏机制、岩石断裂力学、有限单元法、岩石的动力特性以及地学中和水诱发地震中的有关岩石力学问题;第四篇岩体的稳定分析及其加固措施,分别论述了岩坡、坝基及地下洞室围岩的稳定性,以及岩体的工程加固问题。

本书可供从事水利、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工程技术人员、科学工作者和高等院校及中等专业学校师生阅读参考。

岩石力学的理论与实践

陶振宇 主编

*

水利出版社出版

(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

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 26 $\frac{1}{2}$ 印张 592千字

1981年3月第一版 1981年3月北京第一次印刷

印数 0001—4230册 定价 3.25元

书号 15047·4103



前 言

我国幅员广阔，地质构造复杂，工程建设规模巨大。建国三十年来在岩石力学研究方面做了很多工作，积累了大量资料，取得了丰富的经验。在不断解决工程问题中抽象出共性并不断加以实践，初步提出了我们自己的岩石力学理论，推动着这门年轻学科的发展。岩石力学从五十年代起，逐渐成长为一门新兴的独立边缘学科，日益受到人们的重视。国外经验说明，岩石力学在工程建设中是很重要的；国内近三十年的工程建设历史也说明，要想搞好与岩体有关的工程建设，不重视岩石力学的研究是不行的。现在，我国要实现四个现代化，在水利、水电、土木、建筑、铁道、交通、国防、冶金、煤炭、地质等方面的工作中，均不能离开岩石力学这门学科。

最近几年，从事岩石力学及其相邻学科的工作者，在相互交流的过程中，普遍感到：我国岩石力学现在已呈现一派蓬勃发展之势，但要使这种喜人的形势不断发展，显然有待于从事有关岩石力学工作的同志们的辛勤劳动。因此，很需要把国内岩石力学的实践经验和理论探讨加以总结，借以认识我们的现状，这将有利于向国际先进水平奋进，我们组织编写这本书，便是这种想法的具体尝试。

本书在内容的组织上，力求包括我国岩石力学的主要方面；在体系上，各章之间虽有一定的内在联系，但本身又是独立的；在指导思想上，以总结我国岩石力学的实践经验为主，结合介绍国外的一些最新动态，对于国内尚少研究的领域，尤其是如此。本书初稿是经过各章作者相互校核的，其中两章应作者和编者之请，分别由钱寿易同志（第十五章）和石根华同志（第十八章）审阅过，在此表示深切的谢意。因有的章、节与初稿相比较有很大的变化，本书可以说是在以个人为主的写作方式的基础上进行个人与集体相结合的结晶。读者将会发现，各位作者的观点未必一致，有些见解也不一定是成熟的。但这不影响大局，且将有助于相互促进和共同提高；而且，科学技术的发展总是有一个由不成熟到成熟的过程。

组织编写这样的书，对我们是头一次，毫无经验。在内容的组织和体系的安排上，虽然也与有些同志交换过看法，但大体是编者的个人意见居多，不代表参加写作同志的看法，这是需要申明的。总之，本书的缺点和问题可能不少。但究竟怎样，只有请读者来评论了。有关本书的任何批评意见，我们都竭诚欢迎。

还要说明的是，本书在编写过程中，除参考了有关文献外，还参考了许多单位和岩石力学工作者个人的技术资料与研究成果，并引用了其中部分内容和数据，从而提供了充分论据，丰富了本书内容，鉴于这些资料没有正式刊印出版，书中未能一一注明出处，请鉴谅。

编者对武汉水利电力学院领导给予的关怀和鼓励，表示衷心地感谢。

陶振宇

一九七九年九月十一日

武昌 珞珈山

目 录

前 言

第一篇 总论 (1)

第一章 我国岩石力学研究的进展陶振宇 (1)

一、历史的简单回顾 (1)

二、岩石试验方面的进展 (2)

三、对岩石力学中若干理论问题的探索 (12)

四、简短的结论 (21)

第二篇 岩石的基本特性及其测试技术 (22)

第二章 岩石力学中的地质因素李智毅、潘别桐 (22)

一、岩体的岩石矿物学特性 (22)

二、岩体结构特点 (23)

三、岩体天然应力 (29)

四、风化作用 (33)

五、水对岩体性状的影响 (35)

第三章 岩体工程分级杨子文 (38)

一、概述 (38)

二、影响岩体工程性质的主要因素 (40)

三、岩体质量指标及其表达式 (49)

四、岩体质量指标的实用意义 (51)

五、应用举例 (53)

第四章 室内岩块试验研究袁澄文 (55)

一、概述 (55)

二、岩块的空隙性和水理性 (55)

三、岩块单轴压缩试验 (60)

四、岩块抗拉试验 (63)

五、岩块性质的相关性 (66)

第五章 软弱夹层的特性及其研究途径王幼麟 (71)

一、概述 (71)

二、泥化夹层的基本性质 (71)

三、泥化夹层在渗水作用下的演变趋势 (80)

四、软弱夹层特性的研究途径 (84)

第六章 岩石三维特性及其测试技术刘宝琛、崔志莲、张金铸 (86)

一、岩石三维力学试验的意义和目的 (86)

二、岩石三维力学试验技术 (88)

三、岩石三维应力试验弹性参数的计算	(90)
四、常规三轴应力试验的某些结果	(95)
五、真三轴应力试验的某些结果	(99)
第七章 岩体应力及其测试技术	刘永燮 (105)
一、概述	(105)
二、岩体应力状态	(105)
三、岩体应力测试技术	(111)
四、岩体初始应力一般规律性的探讨	(118)
第八章 岩体性态的弹性波测试技术	陈成宗 (121)
一、概述	(121)
二、波动传播	(121)
三、岩体特性与弹性波的传播	(122)
四、岩体弹性参数与强度的量测	(127)
五、工程岩体状态的量测	(132)
六、现场岩体的评价	(136)
第九章 岩体变形特性及其试验研究	吴玉山 (138)
一、概述	(138)
二、岩体变形特性	(138)
三、变形试验研究中的几个问题	(145)
第十章 现场岩体抗剪试验的原理与方法	傅冰骏 (153)
一、概述	(153)
二、试验方案布置与成果计算	(153)
三、影响抗剪强度各主要因素的初步探讨	(159)
四、抗剪试验资料的整理	(167)
第十一章 岩石力学的模型试验	吴沛震、严克强、田裕甲 (171)
一、概述	(171)
二、坝基的岩石力学模型试验	(171)
三、洞室的岩石力学模型试验	(182)
第三篇 岩石力学的理论研究与分析计算	(193)
第十二章 岩体破坏机制及强度研究	孙广忠 (193)
一、岩体结构及岩体力学介质特征	(193)
二、块裂介质岩体的破坏机制及强度分析	(197)
三、连续介质岩体破坏机制及其强度分析	(203)
四、碎裂介质岩体破坏机制及强度分析	(208)
第十三章 岩石断裂力学及其应用	周群力 (213)
一、概述	(213)
二、线弹性断裂力学基本观点	(214)
三、岩石断裂力学试验研究的部分成果	(216)
四、断裂判据	(219)

五、应用断裂力学观点探讨岩体力学有关问题	(220)
六、岩石断裂力学主要研究途径	(230)
第十四章 有限单元法及其在岩体力学中的应用	葛修润 (231)
一、概述	(231)
二、单元体的形状函数和刚度矩阵	(231)
三、层状岩体与各向异性	(237)
四、材料非线性问题	(239)
五、节理面、软弱夹层等的模拟与非线性分析	(247)
第十五章 岩石动力特性	王武陵、朱瑞庚、王靖涛、冯遗兴 (257)
一、概述	(257)
二、岩石与岩体的基本动力特性	(258)
三、岩石动力试验技术与方法	(265)
四、应力波在岩石介质中的传播	(270)
第十六章 地学中的岩石力学研究	王仁、黄杰藩 (277)
一、概述	(277)
二、地质环境因素对岩石力学性质的影响	(277)
三、应变率和时间因素的影响	(280)
四、断层形成时的应力状态	(285)
五、岩石的微破裂、扩容和地震前兆的两种扩容模型	(288)
六、岩石的摩擦和粘滑	(292)
七、构造(地)应力场的分析	(295)
第十七章 水诱发地震与岩石力学	邹学恭 (298)
一、水诱发地震	(298)
二、水诱发地震的特点	(310)
三、水库地震成因及其诱发机制	(313)
四、水诱发地震中有关岩石力学问题	(316)
第四篇 岩体的稳定分析及其加固措施	(321)
第十八章 岩质边坡的稳定分析	吕祖珩 (321)
一、概述	(321)
二、赤平投影的基本方法	(322)
三、边坡稳定分析	(331)
四、适用范围	(341)
第十九章 混凝土重力坝坝基岩体抗滑稳定分析	王宏硕、陆述远 (343)
一、概述	(343)
二、沿坝基面的平面抗滑稳定分析	(343)
三、沿坝基内岩体软弱结构面的深部抗滑稳定分析	(356)
第二十章 地下洞室的围岩稳定性	朱维申 (362)
一、概述	(362)
二、影响地下岩洞稳定性的因素	(362)

三、洞室围岩稳定分析的有关概念	(364)
四、大型岩洞稳定研究的方法	(366)
五、岩洞稳定有限元分析实例	(368)
六、计算模拟研究及有关实用结论	(372)
七、软弱岩层中的围岩压力问题	(374)
第二十一章 岩体的工程加固	严克强 (383)
一、概述	(383)
二、喷锚加固	(384)
三、岩体的预应力锚固	(393)
四、存在的问题	(396)
参考文献	(397)

第一篇 总 论

第一章 我国岩石力学研究的进展

陶 振 宇

(武汉水利电力学院)

岩石力学是研究地壳岩石在各种条件下的运动、变形和破坏规律的学科。从其科学思想体系,研究对象,服务领域,以及在工程技术上的广泛应用性的情况来看,人们把它分别作为力学、地学和技术学科的分支是不足为奇的,但从总体来看,岩石力学基本上是属于力学分支学科。

这种情况突出地说明:岩石力学带有边缘学科性质,既具有基础性研究的内容,又带有强烈的实践性特点。

在我国,虽然大量的普遍的岩石力学研究,是与重大工程建设项目紧密地联系在一起,但也在地质领域中得到了发展。这与李四光教授的倡导是分不开的,他把“岩石力学与构造应力场的分析”,作为《地质力学的理论与实践》一套丛书中的一篇。而新丰江水库地震的研究,更促进了我国对于震源介质(岩石)特性的探索,虽然目前仅仅是开始。

因此,要对内容如此广泛的岩石力学在我国的发展情况作一个全面的综述,实在是超出了笔者的能力。因此,只能就岩石力学的若干主要问题,并着重与工程建设相联系的方面作一简单的概括。

一、 历史的简单回顾

解放前,我国虽然拥有极其丰富的水利水电资源和矿产资源,由于人民被压在三座大山之下,没有可能进行有效的开发和利用;铁道及其他工程建设也很不发达。工农业生产落后,为之服务的岩石力学当然不可能发展起来。只是到了解放后,由于大规模的工程建设需要,才促使我国岩石力学从无到有,从小到大地发展起来。

我国岩石力学的发展,从解放后便开始了草创阶段,是与水利水电工程,矿山及煤田开发,土木建筑及铁道工程,以及国防建设等一系列工程建设相联系的。由于生产斗争和科学实验的需要,陆续建立了岩石力学的专门研究机构,例如中国科学院武汉岩体土力学研究所,长江水利水电科学研究院岩基研究室,冶金部矿冶研究所压力室岩石力学组,北京水利水电科学研究院土工研究所岩石力学组等,还有许多生产单位,也都进行过岩石力学的试验研究工作;在有关的高等学校中,也开展了一些岩石力学的研究工作,并将岩石力学内容纳入了有关的教学计划和教材中去。所有这些岩石力学方面的生产实践、科学实验、理论分析和教学工作,都大大地促进了我国岩石力学的发展。1966年3月在武汉召开了第一届

全国岩、土力学测试技术学术会议，在会议期间还举办了岩、土力学测试仪器设备展览会。这次会议展示了当时我国岩、土力学的测试学术水平。我们将这次会议以前发表的岩石力学的有关文献，按年代先后作了一个初步的可能是很不完备的辑集，以见概貌^[1~48]。

七十年代以来，我国岩石力学的发展进入了一个新的阶段。这个阶段的显著特点，一是从事岩石力学工作的人员大为增加，开展了多方面的试验和理论研究，因为岩石力学研究已经成为许多大型工程建设不可缺少的重要组成部分。二是国内岩石力学学术交流的风气正在逐步形成，例如国家建委召开过岩石地下建筑方面的有关学术会议，在岩石力学的理论与实践方面，有过许多总结和探索；水利水电部门在葛洲坝工地，曾举行过几次大型的岩基试验、地质、设计等几个方面的综合性讨论会，对于岩石力学研究与水工设计相结合有良好的促进作用；中国金属学会召开了第一届矿山岩体力学会议（1979年5月）；中国煤炭学会也召开了岩石力学学术会议（1978年11月）等等，还开展了国际学术交流活动。这些会议和活动对于我国岩石力学的发展，无疑起了很大的促进作用。三是岩石力学工作者已经初步组织起来了，或者组织了情报网（例如水利水电部门）；或者建立了与岩石力学有关的专业委员会或学科组（例如煤炭学会、水利学会、力学学会、地质学会、金属学会、土木工程学会等）；或者用集体的力量修订有关的岩石试验规程（例如水利水电、地质、冶金等部门）；并出版或计划出版岩石力学有关的专业性刊物。四是探索岩石力学的新领域，例如岩石断裂力学，为地震预报服务的岩石力学研究等，都得到了初步的开展，同时开始了向岩石力学科学实验的现代化进军。

因此，尽管我们与国际先进水平相比还有较大差距，但我们相信，一定能够加快速度，迎头赶上岩石力学的世界先进水平。

二、 岩石试验方面的进展

我国岩石力学的试验研究，从总的方面讲，无论从试验设备、试验技术和方法等，与国外的同类项目是相近的，但在我国的长期实践过程中，也凝结了我们自己的经验和劳动成果，因而有所改进、创新、提高和发展。现将岩石试验方面的一些进展，简述于下。

（一）岩石的三轴试验

我国进行室内岩石三轴试验开始于1958年建立的三峡岩基组（这个组的主要组成部分后来发展成为中国科学院武汉岩体土力学研究所及长江水利水电科学研究院岩基研究室）。当时在陈宗基教授的领导下设计研制成功我国第一台岩石三轴仪（1959年），垂直压力为200吨，围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = 2000$ 公斤/厘米²。在此基础上，长江水利水电科学研究院于1964年与长春材料试验机械厂协作，研制了长江-500型三轴仪。试件尺寸最大为 $\phi 9 \times 20$ 厘米的圆柱体，垂直总荷载达500吨，围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = 1500$ 公斤/厘米²。目前，长江-500型是我国较通用的岩石三轴试验的主要设备。

后来，中国科学院地球物理研究所和冶金部矿冶研究所又对长江-500型作了进一步的研究。后者对其测试系统的自动记录方面作了改进和革新，效果良好。

1977年，三三〇工程局试验室研制成功我国第一台真三轴仪（ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0$ ），其

最大试件尺寸为10×10×23厘米，垂直总荷载为200吨，侧压力为55吨，从而便于研究中主应力的影响^[49]。

中国科学院武汉岩体土力学研究所与有关单位协作，于1978年研制成功侧压力为1.2万巴^①的三轴试验筒体，中国科学院地球物理研究所正在设计高温、高静围压的三轴试验仪，这些工作的完成将为我国深部岩石特性的研究创造有利条件。

在现场条件下，我国也进行了不少三轴试验。长江水利水电科学研究院岩基室于1965年在四川某水利工地对砂岩进行了真三轴现场试验。其后有几个单位进行过这方面的工作，各单位进行的现场三轴试验的试件尺寸如表1-1所示。可以看出，还没有形成统一规格的试件尺寸。这里有一个原因，是有的单位希望用不同试件尺寸来探讨裂隙岩体及其力学性能之间的关系。这种现场三轴试验，对于了解完整岩石与具有一定节理裂隙岩石之间的变形和强度特性的差异，是有益的。

表 1-1 现场岩体三轴试验的试件尺寸

序号	岩 石	试 验 条 件	试 件 尺 寸 (厘米)	试 验 单 位	工作年份	附 注
1	长石砂岩	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$		长江水利水电科学研究院岩基研究室	1965	试验时 $\sigma_3 = 0$
2	粘土质粉砂岩	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	35×35×72	长江水利水电科学研究院岩基研究室、中国科学院武汉岩体土力学研究所、武汉水利电力学院等	1970~1971	
	细砂岩	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	35×35×72		1971~1972	
	粘土质粉砂岩	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	30×30×60		1971~1972	
3	石灰岩	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$	50×50×60	中国科学院武汉岩体土力学研究所	1974	
4	中细粒砂岩	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	100×100×150	长江水利水电科学研究院岩基研究室等	1978	
5	石灰岩	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	30×30×30	中国科学院地质研究所五室岩体力学组	1978	
			40×40×40			
			60×60×60			
			70×70×70			
6	花岗岩	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	30×30×60	广东水利水电科学研究所	1978	

(二) 岩石的变形试验

我国在岩石变形试验方法上，在现场试验方面进行过许多探索。最常用的是承压板法（千斤顶法）变形试验，已成为我国一种常规的比较标准化的试验。其次是环形法变形试验，这种方法特别适用于水工压力隧洞的情况。所谓环形法，是指在洞内水压力作用下，测定洞室围岩的变形。因施加水压力的方式不同而分为水压法、双筒法（橡皮囊法）和钢枕法（用12个或16个钢枕组成正多边形，也有叫做径向千斤顶法的）。六十年代，我国多用水压法和双筒法，目前多用钢枕法。环形法的优点是受荷面积大，能反映压力隧洞围岩的

① 1巴=1.017公斤/厘米²。

工作条件，特别便于了解围岩的各向异性情况。但此法工作量大，技术复杂，且又具有与压力隧洞相似的荷载条件和边界条件的特点，类似模型试验，所以现在一般不把它单纯作为岩石变形试验方法，而发展成为研究水工压力隧洞的结构与围岩相互作用及结构计算的一种综合性的试验研究方法，受到水工设计方面的重视。

再次是狭缝法（刻槽法）变形试验。这是我国近十余年来注意探索的一种方法。与承压板法相比较，后者设备比较笨重，安装又不甚方便，且承压板边缘产生应力集中现象；而前者的设备轻便，安装简单，又能适应各种不同方向加压，两者形成鲜明的对比。特别是如果采用切石机切槽，并采用很薄的钢枕的话（目前国外已是这样做了，国内也在试验阶段），则这个优点更为明显。据了解，国外采用这种测试方法的也比承压板法的少得多，国内对此法也有些不同看法。在这里无妨将我们在某工地的一些实践经验作简单的介绍，或可供今后进一步探索的参考。初步实践经验表明：

（1）在测点与钢枕距离相等时，在中心线所测得的变形值最大。偏离中心线其变形值会变小，偏离愈大，差别也愈大。试验表明，在中心线附近（约在钢枕长度的中间三分之一的范围内），这个差别是不大的。

（2）测点距钢枕愈近，其变形值也愈大，愈远则愈小。这是符合一般的应力分布规律的。随着应力的增大，最大影响距离一般为1.5~2.0倍钢枕长度。但在与钢枕的距离 $y = (0.3 \sim 0.4) l$ （ l 为钢枕长度）的范围内，其变形值相差不大。

（3）测点埋深的影响。当埋深为3或5厘米时，两者相差不大。一般说来，深埋的测点，变形要大一些，但这时测杆要求具有足够的刚度，否则测量结果不佳。

考虑到上述情况，将测点安装在钢枕中心线附近（钢枕长度中间三分之一的范围内），且距钢枕的距离 $y \leq \frac{1}{3} l$ （ l 为钢枕长度），则所得到的变形值将是比较稳定的，与承压板法的试验结果将是可比较的。

（三）岩石的流变试验

我国进行的流变试验有两种，其一是研究恒定荷载作用下的流变特性，主要是在室内进行；其二是研究软弱夹层的长期强度，主要是在现场进行。后者比前者要多，这一点刚好与国外目前的情况是相反的。

1964年，长沙矿冶研究所对几种岩石进行了梁式试件的弯曲流变试验。但此后十余年没有这方面的研究报导，直到1978年中国科学院武汉岩体土力学研究所才使用他们于1965年研制成功的岩石扭转仪进行砂岩的流变试验。此外，国内还开展了软弱夹层的室内直剪流变试验（土工方法）。为了探讨喷锚结构（支护）的机理，目前多有从岩石的流变性方面来进行的，所以近年来巷道围岩随时间的变形过程的观测和室内岩石流变性的研究，引起了人们的兴趣。

在我国，进行长期强度的研究颇多。也是在1964年，中国科学院湖北岩体土力学研究所在大冶对软弱夹层进行了国内首次现场剪力流变试验。这个方法在三三〇工地得到了发展，进行了混凝土/粘土质粉砂岩和软弱夹层的多组剪切流变试验^[50]。这种试验的特点在于加有稳压装置，使应力一经施加以后，就能保持基本稳定不变，以便进行长时间的流

变变形的观测。但因为试验周期长，因此，除少数重要工程进行了这种试验外，对于一般工程，则不易推广。故常用一般快剪试验结果乘以经验折减系数的办法来考虑时间因素的影响（顺便指出，一般都把时间作为一个影响因素来考虑，但实际上时间是岩石受力变形过程中的一个基本参量）。国内若干工程的不同软弱夹层的经验折减系数平均约为 0.78（表 1-2）。对于不同的岩石类型，这个系数显然是不同的。而且这些流变试验，历时长短也不一，最长的为 2~3 个月。如果试验历时再长一些，这个折减系数还可能有所降低。看来，现场剪力流变试验还可以用另外的方式进行，即在相应于或略大于长期强度的应力作用下，历时很长，以观测其流变变形发展到流变破坏的全过程，但目前国内尚没有做过这样的现场试验。在国外，这种现场剪力流变试验虽也有所报导，但似不多见。

表 1-2 快剪强度与流变强度的比较

工程名称	岩层情况	主要 矿 物	阳离子交换量		摩擦系数 f		折减系数 ($f_{\text{流变}}/f_{\text{快剪}}$)	试 验 单 位	年 份
			原样	< 2 微米	快剪	流变剪			
三三〇工程	混凝土/粘土质粉砂岩				1.11	0.87	0.78	中国科学院湖北岩体土力学研究所、长江水利水电科学研究院岩基室、武汉水利电力学院等	1971~1972
	308号泥化夹层（灰白色）	蒙脱石	47.8	88.6	0.194	0.158	0.81		
	308号泥化夹层（紫红色）	蒙脱石	67.8	118.0	0.220	0.176	0.79		
	202号泥化夹层	伊利石	—	44.9	0.245	0.192	0.78		
大冶铁矿	大理岩层间软弱夹层	绿泥石	<10.0	—	0.530	0.420	0.79	中国科学院湖北岩体土力学研究所	1964
抚顺煤矿	软弱泥灰岩	蒙脱石	62.3	—	0.23	0.18	0.78	中国科学院湖北岩体土力学研究所	1965
金牛山水库	泥化夹层（上部为红色粘土，下部为黄色糜棱岩泥）	—	—	—	0.22	0.16	0.73	中国科学院地质研究所五室	1978
海南岛铁矿	绢云母片岩	绢云母	—	—	—	—	0.75	马鞍山矿山研究院等	1979
平 均							0.78		

（四）剪力试验的单点法

现有的岩石剪力试验，至少要四、五个试点，有时甚至更多的试点，才能得到较为满意的结果。由于试点多，工作量大，工期长，费用大，使得岩石试验工作常常赶不上设计工作的需要，这个矛盾在水工建设中是很突出的。因此，曾经探索过现场岩石剪力试验的单点（试件）法，就是用一个试点求得所需要的抗剪强度参数。

在国内，早在1960年长办三峡岩基组就曾作过单点法的初步尝试，但没有成果报导。认真探索这个问题，从而使这个方法得到初步肯定和一定程度推广的，是1970年冬到1971

年春在三三〇工地由几个单位协作进行工作的结果^[50]。

目前,国内常用的单点法有两种,其一是非破坏性单点法,只在最后一级法向应力(一般是最大一级法向应力,因为通常的法向应力施加程序是由小至大)作用下才使试件破坏。这种方法多应用于混凝土/岩体,或岩体本身的抗剪断试验。这种方法因开始卸荷点的不同,而分为近似比例极限单点法和临近破坏极限单点法。一般认为,前者较适用于脆性的坚硬岩石,后者较适用于塑性的软弱岩石。其二是单点摩擦试验(抗剪试验),这种方法较适合于软弱结构面的剪力试验。除了这两种基本方案外,也可以采用混合法,即这两种方案相结合的办法。总之,这个方法还处在逐步完善和发展之中。

在国外,最先报导这种方法的,似乎是1969年林克(Link.H.)的文章,他报导的是临近破坏极限单点法^[51];1970年乌霍夫(Ухов,С.Б)等人报导了另一种单点法^[52],国内已有较详细的介绍(参见水利部和电力工业部颁发的《岩石试验规程》,即将出版)。此外,这个方法也可应用于三轴试验,有人提出的复合破坏状态和应变控制三轴试验,就是三轴试验的单点法,并且都是临近破坏极限的单点法^[53]。

这些情况表明,无论国内和国外,都力求用最小的工作量来达到最大的效果。这就是说,努力使岩石试验多快好省地完成。这种趋势是值得我们注意的。

(五) 岩体中软弱夹层的研究

水工建设中的岩石力学试验,软弱夹层的研究占有重要的地位。因为它常常是工程中的隐患和建筑物稳定的控制因素。我国对这方面的注意是比较早的,1955年对上犹江坝基的泥化板岩的研究,就是一例。此后不断地对软弱夹层进行过研究。七十年代以来,更进行了大量的工作,积累了比较丰富的实践经验。

岩体中软弱夹层的研究,包括:

第一,是对软弱夹层的工程分类及其空间分布规律的查明。这一般由工程地质勘探来完成。由于软弱夹层研究工作的需要,我国大力发展和应用声波探测技术,钻孔电视,无线电波透视等物探技术,来查明软弱夹层的情况,取得了一定的成效。

第二,探索对软弱夹层的有效研究方法。因为夹层的种类繁多,特点也各不相同,例如有的极为破碎,有的岩性变化大,有的风化迅速,并且含水量高,有的夹层极薄,甚至只有一层光滑泥化薄膜,其颗粒的排列具有高度定向性,抗剪强度几乎近于零,等等。因此,用常规方法来研究它的力学特性是困难的。根据国内近十年来的研究,逐步形成野外与室内试验结合,大、中、小试件结合的试验系列,较能收到预期的效果而又能多快好省地完成试验研究工作。

第三,是研究软弱夹层在工程建成后形成的新的工作条件(例如在长期渗压水作用)下的可能出现的变异性及其对工程的影响问题,为此,需要研究其微观结构、矿物成分与水的作用问题。在这方面,中国科学院地质研究所、武汉岩体土力学研究所和长江水利水电科学研究院等单位进行过许多工作^[54]。

与软弱夹层的试验研究有联系的,还有如何用有限元法来考虑软弱夹层的计算模型问题,如何进行带有特定的软弱夹层的稳定性分析问题,如何结合软弱夹层进行室内模型试验问题,都在探索和研究之中,其中有的并取得了成果^[55]。

（六）坝基岩体的抗力试验

在水工建设中，有时为了了解大坝下游岩体抵抗水平推力的能力，也可以进行现场岩体抗力试验。一般说来，进行这种试验是由于有缓倾角的软弱夹层的存在，主要依靠大坝下游岩体抵抗深层滑动力以保证安全。

这种试验，近于剪力试验，不同之处仅在于下游端不与母岩割断；又由于试件底部是缓倾角软弱夹层，强度很低，其受力过程颇类似于平卧的单轴抗压强度试验，不同之处在于底部略有摩擦阻力而已。

长江水利水电科学研究院等单位曾在某工地的基坑内进行过这种大型岩体抗力试验^①。共两个试件，试件尺寸：一为长11.65米，宽1.70米，高2.35米，其靠近推力这一端的顶面的一定长度上施加了高度达2.31米的混凝土预制块砌体（相应的压应力为0.5公斤/厘米²）；一为长9.54米，宽1.70米，高2.30米，其顶面上没有荷载。试件底部为软弱夹层，延伸广，强度低（ $\tau = 0.20\sigma + 0.05$ 公斤/厘米²）。试验结果表明，试体顶面形成X型裂隙；而侧面则先沿底部滑动，而后向上挤出，特别是其上有局部压重的情况，更是如此。

这种试验，在国外仅见于第八届国际大坝会议（1964年）文献中的西班牙的梅基南萨（Mequinenza）坝基的一例，但那是在试洞内进行的。这种试验的工作量大，费用高，时间长，似难普遍推行，不如进行室内模型试验更为合适，也可以用有限元法或其他方法进行研究。

（七）室内模型试验

室内岩体模型试验，是按相似律进行的模拟试验，既可用于地表工程，也可用于地下工程；既可将上部结构作荷载以研究岩体的性状，也可以把上部结构与基础结合在一起进行研究。虽然一般都把这种试验列为岩石力学试验的一部分^[44, 56, 57]，但国内外进行这方面工作的，许多都是结构试验研究单位。我国进行这方面工作的也很多，并且也很有成效，说明这种方法在工程上的广泛实用性。

从国内对岩石介质的模型试验研究情况看，可以分为两种：即光弹性模型试验和相似材料模型试验。又有整体模型（空间问题）试验和断面模型（平面问题）试验之别。

光弹性模型试验主要用于研究弹性阶段的应力状况。但在岩石力学中的光弹试验，主要用于三维应力分析；在平面问题中，现在已较少应用，只在某些情况下采用。这可能有两个原因，其一是由于有限元法的发展；其二，更重要的是在岩石力学中的稳定分析比应力分析更重要，这与工程设计采用极限设计原则有关，而光弹试验一般不能应用于岩体的破坏阶段。因此在岩石力学中，由于相似材料模型试验可以研究岩体的破坏情况，便更为人们所重视。

相似材料的整体模型试验，主要用于拱坝与岩基的相互作用，带有结构设计的综合试验研究的性质，其目的在于对设计方案进行验证，以考察其安全程度。这种方法虽然工作

① 长江水利水电科学研究院岩基一队等，大型岩体力学试验分析，《长江水利水电科研成果选编》，第1期，1974年12月。

量大, 技术复杂, 但对于某些地质条件复杂的岩基上的拱坝设计, 却具有特殊的重要性。某些国家如意大利过去主要依靠这种模型试验来进行拱坝设计, 瓦依昂 (Vajont) 拱坝经过灾害性的滑坡的考验, 证明其结构设计是充分可靠的。相似材料的断面模型试验, 可用于地表工程和地下工程的破坏试验, 常常为建立理论分析提供必要的物理基础。从发展情况来看, 模型试验是一种物理模拟, 如能与数学模拟相结合, 则更相得益彰, 但国内在这方面还处于探索阶段。

(八) 岩体应力测量技术

目前, 国内的应力测量采用的方法, 一是表面应力测量, 二是钻孔应力测量。水力破裂法则尚未被引进。我国六十年代, 多用表面应力测量, 对钻孔应力测量也有初步探索; 七十年代以来, 钻孔应力测量有了很大的发展。

我国在岩体应力测量方面的进展是^[58, 59]: 试制了大量的各种应力测量所需要的测量元件 (表1-3), 编制了应力测量结果直接处理数据的电算程序 (冶金部矿冶研究所, 长江水利水电科学研究院等); 在有限元法中, 已较普遍地考虑了实测应力成果; 在工程上的轴线选定和采取的技术措施方面 (例如为预防大的水平初始应力而预留变形缝等) 都

表 1-3 我国岩体应力测试元件概况

序号	测量元件名称及型号	用途	研制单位
1	钢弦应变计	用于岩体表面应力解除和应力恢复法	原水利电力部以礼河工程局岩石力学试验组(1963)
2	36-2型钢环式孔径变形计	(1)求测岩体的表面应力大小及方向 (2)用三孔交汇测求岩体三向应力大小及方向	中国科学院湖北岩体土力学研究所(1966)
3	光弹应变计(冻结式及非冻结式)	用于表面及钻孔内测量岩体应力	(1)冶金部矿冶研究所(1966) (2)原水利电力部昆明水电勘测设计院(1971)
4	玻璃圆柱式光弹应力计	(1)用于表面及钻孔内测量岩体应力 (2)用于长期观测, 监视岩体应力变化	冶金部长沙矿山研究院(1970)
5	73-1型压磁式孔径应变计	(1)测求岩体的平面应力大小及方向 (2)用三孔交汇测求岩体三向应力大小及方向 (3)用于长期观测, 监视岩体初始应力的变化	国家地震局地震地质大队与地质力学研究所(1973)
6	φ36毫米孔底应变计 (或称“门塞”)	(1)已知某主应力方向, 测求平面应力大小及方向 (2)用三孔交汇测求岩体三向应力大小及方向 (3)用于孔壁表面应力测量	(1)冶金部矿冶研究所(1973) (2)长江水利水电科学研究院岩基室(1977)
7	φ36毫米及φ46毫米橡皮叉式孔壁三向应变计	单钻孔测量岩体三向应力大小及方向	(1)冶金部矿冶研究所(φ36毫米)(1975) (2)长江水利水电科学研究院岩基室(φ46毫米)(1978)

应用了实测应力成果；在地学领域里，正在努力探索地应力测量结果与震源应力场的关系，以寻求预测预报地震的可能途径。

(九) 岩体声波测试技术与声发射技术

我国开展岩石动力测试工作，早在五十年代中期便开始了。最早采用的是地震法。近几年来，地震法常与声波法配合使用，收到很好的效果。在这里我们主要介绍声波测试技术的情况。

在六十年代初，声波测试技术在我国已有少数单位应用过，但没有得到充分的注意。近几年来，这方面获得了很大发展，为此召开过多次经验交流会。据不完全统计，研制声波测试仪器和使用的单位已有许多个，所用仪器由原来的一种发展到几种（表1-4），配套设备和换能器的种类也增加到几十件，并且在仪器的多道化、轻便化和数字化等方面都有许多改进。

表 1-4 我国 声 波 测 试 仪 器 概 况

类 型		仪 器 型 号 及 名 称	使用的器件种类	研 制 单 位	研究时间
示 波 显 示 型		SYC-1岩石声波参数测定仪	晶 体 管	河北水文地质四大队等	1972
		SYC-1A岩石声波参数测定仪	晶 体 管	河北水文地质四大队	1973
		SYC-1B岩石声波参数测定仪	晶 体 管		
		低频超声声速衰减仪	晶体管(部分集成电路)	同济大学声学研究室	1976
		YST-1岩体声波特性测试仪	晶 体 管	长春无线电一厂	1976
数 字 显 示 型	单 用 途	SSY数字岩石声波参数测定仪	晶体管(部分集成电路)	河北水文地质四大队	1974
	多 用 途	SSY数字岩石声波参数测定仪	集成电路(部分晶体管)	河北水文地质四大队	1976
结 合 显 示 型	双 通 道	SYC-2岩石声波参数测定仪	晶体管(部分MOS集成电路)	湘潭市无线电厂	1976
	四 通 道	四线声波仪	晶 体 管	水利电力部第四工程局 科研所物探队	1976

声波测试技术是利用声波在岩体中的传播特性的参数，如纵、横波速、波的振幅衰减和波的频谱特性等，来判断岩体结构和特性。目前国内主要应用的是波速，对振幅和频谱的测试及应用还在探索中。这种方法主要应用于：岩石物理力学参数的测试，例如岩石的动弹性模量和泊松比；利用声波参数结合地质因素对岩体进行工程地质分类，以评价地下工程围岩的稳定性；利用声波测井，进行工程地质分层，查明裂隙位置，确定风化层厚度，探测地下洞室围岩扰动区范围，为工程设计开挖及处理提供依据；用于对工程岩体施工及加固措施的质量检查，等等。

在岩石力学试验中，采用声波测试技术，虽然因速度快，效果好而为人们所乐用，但有一个问题：为什么采用连续介质的各向同性的弹性理论公式整理资料所得出的参数，竟然符合非连续（裂隙）介质的各向异性岩体的情况？事实上，岩体中的纵、横波速可能受方向，传播距离，传感器的直径等许多因素的影响，不过目前在这方面没有进行更多的研