

岩石力学基础

张 清 编

中 国 铁 道 出 版 社

岩石力学基础

张 清 编



中 国 铁 道 出 版 社

1986·北京

内 容 简 介

全书共分九章，内容包括岩石力学室内和原位试验、岩石破坏机理和破坏准则、岩石（岩体）的本构关系及其计算模型。

本书可供铁道、交通、水利、矿山和人防等部门有关技术人员、研究生和大学师生学习参考之用。

岩 石 力 学 基 础

张 清 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 刘曼华 封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12 字数：290 千

1986年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3,500 册 定价：2.60 元

前 言

本书是根据作者为岩石工程的研究生和土建类有关专业高年级选修课学生讲授“岩石力学”课程的内容，加以修订和补充而成。

本书编写的目的是帮助读者以原有土建类大学所设课程的知识为基础，尽快地了解 and 掌握岩石力学的发展情况和现代技术水平。为此，本书内容比较系统地介绍了近一、二十年来在岩石的破坏机理和破坏准则、岩石(岩体)的本构关系及其计算模型等方面的主要成就。有关岩石力学试验部分，只介绍了基本内容。在阐述具体的内容时，注意到首先分析岩石(岩体)的实际力学性态，然后说明如何把上述现象加以抽象并建立数学模型以便求解，以期使读者学习前人的成果时，在研究和分析问题的方法上有所收益。

本书曾经西南交通大学高渠清教授、徐文焕副教授和郑鸿泰副教授审阅，提出了不少宝贵意见，特此表示感谢。本书因限于作者水平，一定还存在不少缺点和错误，希广大读者批评指正。

张 清

1984年4月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 岩石力学简介	(1)
第二节 岩石力学在各国的发展简况	(2)
第二章 岩石的室内试验	(5)
第一节 概 述	(5)
第二节 岩石的单轴压力试验	(5)
第三节 岩石抗拉强度试验	(7)
第四节 岩石直剪强度试验	(8)
第五节 三轴压力试验	(9)
第六节 动态测试	(11)
第三章 不连续岩体的力学性态	(14)
第一节 概 述	(14)
第二节 结构面上的抗剪性能	(15)
第三节 裂隙岩体的力学特性	(23)
第四章 岩体的原位试验	(29)
第一节 概 述	(29)
第二节 岩体的变形试验	(29)
第三节 岩体的剪切试验	(34)
第四节 岩体的地应力及其量测	(36)
第五节 原位动态测量	(41)
第六节 用数值分析方法解释原位试验	(42)
第五章 岩石的破坏机理与强度准则	(43)
第一节 概 述	(43)
第二节 岩石的破坏机理	(44)
第三节 岩石的破坏准则	(50)
第六章 弹性理论在岩石力学中的应用	(65)
第一节 概 述	(65)
第二节 应力与应变	(66)
第三节 广义虎克定律	(70)
第四节 孔边应力集中	(75)
第五节 Griffith理论的推导	(78)
第六节 应力偶理论	(83)
第七节 水对岩石力学性能的影响	(90)
第七章 塑性理论在岩石力学中的应用	(94)

第一节 概 述	(94)
第二节 塑性理论的基本假设	(96)
第三节 岩石的弹塑性性质	(105)
第八章 岩石的时效	(121)
第一节 概 述	(121)
第二节 流变学的模型	(122)
第三节 线粘弹性材料及其应力分析	(129)
第四节 粘塑性材料	(134)
第五节 内时理论及其在岩石力学中的应用	(140)
第六节 岩体的蠕变	(154)
第九章 不连续岩体的计算模型和计算方法	(157)
第一节 概 述	(157)
第二节 连续介质力学方法	(157)
第三节 块体力学的方法	(176)

第一章 绪 论

第一节 岩石力学简介

岩石力学是研究岩石或岩体在外力作用下的应力状态、应变状态和破坏条件等力学特性的学科，它是解决岩石工程（即与岩石有关的工程）技术问题的理论基础。岩石属于固体，岩石力学应属于固体力学的范畴。一般从宏观的意义上，把固体看做连续介质。但是，岩石不但有微观的裂隙，而且有层理、片理、节理以至于断层等因地质构造形成的不连续面。岩石不是连续介质，而且常表现为各向异性或非均质；岩石中若含水，它又表现为两相体。从这些方面来看，岩石力学又是固体力学与地质科学的边缘科学。

美国科学院岩石力学委员会1966年曾给岩石力学下过定义，他们认为：“岩石力学是研究岩石力学性能的理论 and 应用的科学，是探讨岩石对其周围物理环境中力场的反应的力学分支”。这个定义含意相当广泛，“对其周围物理环境中力场的反应”的措词说明了这一点。应该注意的是岩石材料全部赋存于地质环境中，这些材料的自然特征决定于其形成的方式和后来作用其上的地质作用。遭受多次应力变动的岩体，其性能决定于完整岩石材料的力学性质以及岩体中地质构造的不连续面的数量和性质。在这两类控制岩石力学特性的因素中，每类因素的相对重要程度主要决定于工程的规模与不连续面数量的关系和二者之间的相对方位关系。在一些情况下，岩体不连续面的影响是非常显著的；在某些情况下，岩体的性能就较多地决定于岩石本身的性质。这些都是岩石力学的特点。

表 1—1

有 关 部 门	研 究 内 容
(1) 地下工程 各种用途的隧道 地下采矿 地下厂房仓库 人防工事 管道工程 原子能废料处理 (2) 地面工程 桥梁基础 高层建筑及重大建筑物的岩石地基 坝 基 铁路、公路的路基与边坡 运 河 露 天 矿 (3) 其它相关部门 构造地质 地 震 石 油 爆破工程	围岩的稳定，支撑的设计，施工方法等； 岩帮的稳定，坑道的位置，支撑方法，开采方法等； 位置的选定，加固方法和施工程序等； 防爆性能，被覆设计等； 渗漏的防止等； 稳定性及回收能力等。 } 地基的稳定与加固等； 地基的稳定与渗漏等； 边坡稳定及支挡结构等； 边坡稳定等； 边坡稳定等；

岩石力学与国民经济很多部门有关。表1—1中概略地介绍了岩石力学涉及的工程部门,从表中可以看到它的应用范围非常广泛。因此,从60年代以来岩石力学的研究获得了迅速的发展。过去对于岩石工程,多半从工程地质角度,做一些定性的描素,常常借用弹性力学或土力学的概念加以处理;或者凭着工程技术人员经验,加以解决,专门的研究工作进行得不多。1959年12月法国马尔帕塞(Malpasset)坝的破坏,以及1963年10月意大利瓦扬(Vajont)坝的失败,都使当地人民生命财产遭到巨大损失。人们发现,这两个坝的破坏并不是坝体结构强度不够,而是坝基岩体出了问题,从而使更多的人体会到坝基岩体的稳定与结构物的强度同等重要。因此有组织地研究岩体力学特性的要求就被提了出来。1964年以葡萄牙的M.Rocha为中心组成了国际岩石力学学会(International Society of Rock Mechanics简称ISRM)。1966年在里斯本召开了第一届国际岩石力学会议,使岩石力学作为一个独立的学科开始了新的阶段。

第二节 岩石力学在各国的发展简况

岩石力学与经济建设很多部门有关,因而各个国家都投入了一定的人力物力进行广泛的研究。在欧洲首先值得介绍的是奥地利岩石力学学派,或称之为Salzburg学派。例如新奥法隧道施工,就是这个学派取得的成就之一。过去进行岩石工程的设计施工需要考虑工程地质条件。工程地质人员所做的地质描述,只能给工程设计人员提供定性的概念,很少能提供用于实际计算的数据。工程地质有从定性描述向定量方向发展的迫切要求。奥地利J.Stini是一个工程地质学家。他一再强调,应该对岩体的结构面,如断层、节理和裂隙等进行观测和考察,研究它们的作用及其对岩体力学性质的影响,要做定性的研究,更要提出定量的数据。1951年他和L.Müller等人一起联合有关学科的学者和工程师,在奥地利的Salzburg发起和举行了以岩体力学为主题的第一次国际岩石力学讨论会,为把工程地质与力学相结合,建立岩石力学这个边缘学科跨出了重要的一步。从那时起直到1975年,共举行了21次讨论会,并创办了“地质与土木工程(Geologie und Bauwesen)”杂志发表他们的研究成果,形成了Salzburg学派。他们反对把岩石当做连续介质,简单地利用固体力学的原理进行岩体力学特性的分析,而是强调必须考虑节理、裂隙、断层等地质结构构造来进行研究,地下水的作用也必须同时考虑。1962年世界各国包括各种不同学派观点的学者和这个组织一起发起成立世界性的组织国际岩石力学学会。“地质与土木工程”也改名为“岩石力学(Rock Mechanics)”继续出版。Stini逝世后,Müller领导联邦德国卡尔斯鲁厄(Karlsruhe)大学的土力学岩石力学研究所,继续坚持他们的研究方向。

在联邦德国除了卡尔斯鲁厄大学外,像亚琛技术大学(Rheinisch—Westfälischen Technischen Hochschule Aachen)和鲁尔大学(Ruhr—Universität, Bochum)的有关研究所,都是岩石力学研究的重要基地。

英国的岩石力学研究工作是同矿业发展密切联系的。结合地下采矿对于岩石的破坏,结合露天开采对边坡的稳定,学者们对岩石力学的发展都做出过成绩。如帝国理工学院(Imperial College of Science and Technology)的著名学者E.Hoek和J.W.Bray等。另外,以Wales大学O.C.Zienkiewicz教授为首的小组,对岩石力学数值方法的发展,作出了重要贡献。

法国J.Talobre 1957年出版的《岩石力学》是企图把地质和力学统一起来最早的一部著

作。随后成立了法国岩石力学委员会 (Comite Francais de Mecanique des Roches) 并有一批如P. Londe等世界知名的学者。最近, 法国学者们对于隧道与地下工程的收敛约束法 (Convergence—confinement method) 的研究做出了重要的贡献。

苏联早在50年代就从事与矿山有关的岩石力学的研究工作。他们早期的工作多借用连续介质力学的理论。苏联的地质界并不重视研究岩石力学。因此工程地质与力学相结合的工作进程迟缓。一直到近年来才开始注意裂隙岩体。以苏联著名岩石力学家K. B. Руппенер为例, 1950年他所著的《岩石力学导论》系利用弹性力学求解岩石力学问题, 1964年发表了利用概率解决岩石强度和变形问题, 直到1975年发表裂隙岩体的变形的专著。这是由连续介质理论走向裂隙岩体理论的过程。苏联除各大学外专门设有矿岩力学与矿岩物理研究所, 其他各加盟共和国的研究院和有关产业部门也非常重视岩石力学研究工作。其他的东欧国家如波兰和南斯拉夫, 在岩石力学方面都进行了大量的研究工作。如南斯拉夫的 Zavodoprivredu Jaroslav cerni研究所早在60年代就进行了大量岩石的量测试验工作。此外在瑞典和挪威都进行岩石力学研究工作。例如挪威的地学研究院 (Norwegian Geotechnical Institute, NGI) 就在岩石力学研究工作中作出了重要贡献。

葡萄牙是研究岩石力学较早的国家之一。代表这个国家研究水平的即其国家土木工程研究所 (Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, LNEC)。第一届国际岩石力学学会主席M. Rocha即是这个机构的创始人。他们在拱基, 地下工程, 特别是试验技术方面的成就, 在国际上具有很高声誉。意大利也是研究岩石力学较多的国家。如其试验模型和结构研究所 (Istituito Sperimentali Modllie Structure, ISMES) 的岩土力学模型试验具有很高技术水平。

美国早期的岩石力学的研究工作都是结合采矿工作进行的。如美国的矿业局 (U.S. Bureau of Mines), 他们的研究目的是企图解决地下开采和露天开挖中的一系列技术问题。其中像L. Obert和W. I. Duvall根据弹性理论对地下坑道的受力分析, 一直是50~60年代地下坑道设计规范的依据。1965年由美国地球物理联合会 (AGU)、矿冶研究所 (AIMMP)、土木学会 (ASCE)、材料学会 (ASTM)、地质学会 (GSA)、矿业学会 (AIME) 等单位联合组成岩石力学学会委员会 (Intersociety Committee for Rock Mechanics, 简称ICRM), 后改称联邦岩石力学委员会 (U.S. National Committee for Rock Mechanics, 简称USNC/RM) 把岩石力学在各个领域中取得的成果进行交流推广, 进一步推动了岩石力学的发展。他们从1956年在科罗拉多矿业学院 (Colorado School of Mines) 举行第一次全美岩石力学学术会议直到1984年在西北大学 (Northwestern Univ. Evanston, IL.) 举行第25次岩石力学会议, 二十多年来基本上每年举行一次, 始终没有间断。美国研究岩石力学的机构据1966年统计就有34所之多, 研究单位多集中在高等学校。

美国研究岩石力学的学术观点是各式各样的, 即有类似于奥地利学派重视节理、裂隙作用从整个岩体出发的依利诺斯大学教授D. U. Deere和加州大学 (伯克莱) 教授R. E. Goodman, 又有从所谓异质体力学 (Mechanics of heterogeneous media) 角度进行岩石力学性质研究的观点, 形成百花齐放的局面, 大大促进了岩石力学的迅速发展。

在北美的加拿大以及澳大利亚都比较重视岩石力学的研究。如加拿大成立有岩石力学委员会 (Canadian National Committee on Rock mechanics), 自1962年开始举行自己的岩石力学讨论会, 到1978年就举行了12次。澳大利亚大学在澳大利亚科学院院士M. S. Paterson领导下, 对于岩石脆性破坏和高温高压下的岩石力学性能等方面做出很大贡献。

此外,在南非由于矿业发达,对岩石力学的研究也很重视,他们的科学与工业研究会(South African Council for Scientific and Industrial Research)组织了大量的岩石力学研究工作。

日本也是重视岩石力学研究的一个国家。1964年由日本的土木学会、矿业学会、土质工学会和材料学会等四个学会中的岩石力学工作者们共同组一个岩石力学研究会,同年召集了第一次学术会议。1979年改组为岩石力学联合会。日本学者在研究岩石的流变性能方面做出很多成绩。印度也进行了不少岩石力学研究工作。它成立有国际岩石力学学会印度国家小组(Indian National Group)结合水工筑坝等工程进行工作。

在我国,解放后随着国民经济建设的发展,陆续建立了一些研究岩石力学的研究机构。如中国科学院岩土力学研究所,地质研究所工程地质室等。一些产业部门的研究院也设立了相应的研究机构,如长江水电科学研究院的岩基室等。特别是随着长江各级水利枢纽的开发,成立了全国岩基组,集中全国有关的18个单位的一百多名科技人员,在陈宗基教授的技术指导下,系统地开展了包括坝基、地下结构、岩质边坡、岩石动力学特性和灌浆处理等方面的试验研究工作,使我国岩石力学的发展进入了新阶段,并获得一系列重大成果。如中国科学院陈宗基教授把流变学引入岩石力学并推广到各向异性岩体,提出了围岩应力场随时间而变动和由于岩体流变回弹,衬砌所受压力随时间增加等概念。后来他又提出岩石扩容的本构方程、长期强度的本构方程,并进一步发展了岩石流变扩容理论等,大大地推动了我国岩石力学的发展。又如以中国科学院地质研究所谷德振教授为首的一些学者,提出了“工程地质力学”的观点。认为岩体与一般岩石的差别在于它是受结构面纵横切割的多裂隙体,岩体内结构面控制着岩体变形、破坏机制及力学法则,因此必须重视结构面力学效应的研究;在研究结构面力学特性时,必须以地质成因为基础对结构面自然特性做细致的研究,掌握结构面的地质特点来指导岩体力学研究工作是岩体基本力学特性研究的基础。在此基础上他们把岩体分为块裂结构、完整结构、碎裂结构和散体结构,按照岩体结构不同类型分别研究其力学特性。

1966年以前只有少数产业部门比较重视岩石力学的研究工作,例如水利部、煤炭部等,随着工程实践所取得的经验和教训,使得更多部门(如建筑、人防、铁路等)的有关技术人员认识到:必须充分了解岩石的力学性质,才能解决好岩石工程的技术问题。因而比较多的部门和单位重视了这方面的工作。特别是1976年以后,许多学术团体恢复活动并新建了一些有关岩石力学的学术组织。1981年成立了中国岩石力学学会筹备组,随后成立国际岩石力学学会中国小组。这些都说明我国岩石力学的研究工作进入了一个新时期。1974年国际岩石力学第4次会议在瑞士Montreux召开,我国首次派出以中国科学院学部委员陈宗基、谷德振为首的代表团参加了会议。我国代表团团长陈宗基教授当选为学会理事。1983年国际岩石力学第5次会议在澳大利亚的Melbourne召开。我国陈宗基教授当选为亚洲区的副主席。这说明随着国内岩石力学科学技术的发展,我国在世界岩石力学界的地位正在逐步提高。

第二章 岩石的室内试验

第一节 概 述

在室内进行岩石试件的试验工作是研究岩石力学的重要手段之一,也是进行岩石工程应该进行的前期工作。室内试验的目的在于了解岩石的性质,除了进行密度、含水率、空隙率、吸水率和渗透性等物理性质试验之外,应着重进行岩石的强度特性和变形特性的试验。

进行岩石工程需要对工程的对象——岩石(包括岩石本身及岩体)有清楚的了解,才能做出经济可行的设计与施工工作。应该进行必要的岩石力学室内和现场试验,取得有关数据。限于岩石力学发展的现阶段,在试验工作上、理论计算上确实还存在着不少问题和困难,把试验工作与理论计算相结合并进行现场监测和信息反馈用以修改设计,是现阶段处理岩石工程较好的方法。

试验标准化是岩石试验的基本准则,国际岩石力学学会已开展了这方面的工作。本章主要介绍室内岩石试件的抗压、抗拉、抗剪等与岩石基本力学性质有关的试验;第四章中介绍现场试验,其中均注意到标准化的要求。

室内进行试验要重视试件的采取和制作,使之具有足够代表性,并保持天然结构状态,尽可能不受扰动;对试件制做要满足精度要求;重视试件的构造描述,如节理裂隙发育程度、分布情况及其方位等;还要注意试件尺寸(形状,大小和高径比等)、测试条件和环境对试验的影响。

第二节 岩石的单轴压力试验

一、刚性试验机

当试件在压机上承受荷载,这一系统可以刚性支座上的两个弹簧 K_m (代表压机)和 K (代表试件)来模拟,见图2-1a所示。在压机加载时, R 点向 R' 点移动,两个弹簧同时受压缩。在试件破坏前,两个弹簧都是线弹性的。达到 F 点试件开始破坏增加变形 Δ_s ,试件的力-变形曲线按 $f(\Delta)$ 变化,试件的承载能力是 P_2 ,若为普通压机弹簧伸长了 Δ_s , K_m 数值小,它作用给试件的力为 P_1 , $P_1 > P_2$,导致试件迅速破坏,得到的力-变形曲线如图2-2a所示。试件并不是没有承载能力,而是压机的能量释放,使其过早破坏。若采用刚性较大的压机,其刚度为 K_m' (图2-1b),则 Δ_s 变形引起作用力减少到 P_3 , $P_3 < P_2$,试件不破坏继续承载,这样就可以得到应力-应变曲线的全过程,这种曲线称全应力-应变曲线图2-2b。

符合压机刚度大于试件刚度的压机称为刚性压机。目前除压机增加刚性以解决上述问题外,还采用伺服控制系统控制压机加压板的位移,位移速度以及荷载和加载速度,也能改进普通压机时的缺点。

二、试件的制备与端部约束条件

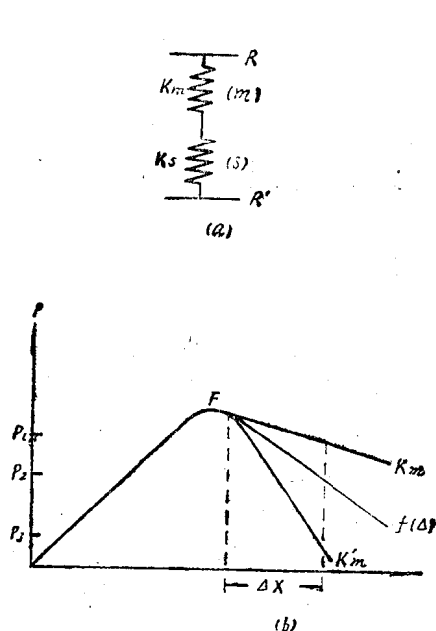


图 2-1

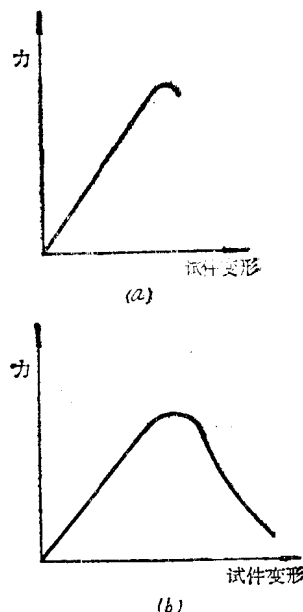


图 2-2

通常抗压试验要求试件为圆柱体，高径比为 2.5；直径约 54mm，直径与岩石最大结晶颗粒直径的比不小于 10:1；试件端部平面磨平到 0.02mm，高度精确到 1mm，并注意原始含水量的保持，因含水量影响试件变形和强度。

试件两端在加载时，若端部变形受到约束，则会影响试件内部应力分布，若试件端部变形受约束，则端部形成径向压力区，试件从端角处拉裂，影响真实抗压强度。如试件两端承压板与试件直径一致，则将改善这种情况。ISRM 建议采用同直径的钢承压板。

三、抗压强度试验的加载及计算

加载系连续加载，以便在 5~15 分钟加载时间内使试件破坏，或使加载速度保持在 0.5~1.0MPa/S。

抗压强度按试件原始横断面面积除以试验时最大轴向压力荷载计算。

四、压力变形量测

若在单轴压力作用下量测试件变形，除满足前述要求外，需量测试件轴向和径向的变形。最好采用连续记录变形的办法。求变形时的加载方式可以采用加载——卸载到零——加载的几个加载循环来完成。

五、变形的计算

$$\text{轴向变形 } \epsilon_s = \frac{\Delta l}{l_0}$$

式中 l_0 为试件原始长度， Δl 为长度的变化。

$$\text{径向应变 } \epsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}$$

式中 d_0 为试件原始直径， Δd 为直径的变化。轴向变形的切线杨氏模量：

$$E_t = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon_s}$$

见图 2—3a, 系采用 $\sigma = 50\% \sigma_u$ (σ_u 为最终压应力值) 处的切线; 平均杨氏模量 E_{av} 系取轴向变形应力应变曲线的直线部分, (2—3 b 图):

$$E_{av} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_a}$$

割线模量通常取 $\sigma = 0$ 到 $\sigma = 50\% \sigma_u$ 之间的割线 (2—3 c 图):

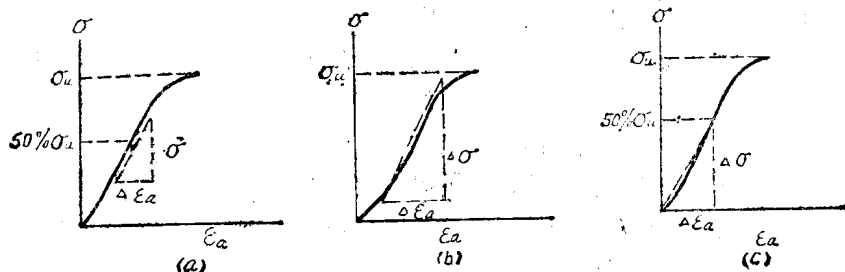


图 2—3

$$E_s = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_a}$$

根据测得的径向变形, 绘制径向变形的应力应变曲线, 泊松比 ν 按下列关系式求得

$$\nu = \frac{\text{轴向应力应变曲线斜率}}{\text{径向应力应变曲线斜率}}$$

取斜率时亦可按上述三种方法, 分别取得切线的, 平均的和割线的波桑比, 其体积应变 ε_v 为:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_d$$

第三节 岩石抗拉强度试验

岩石抗拉试验可分为直接法和间接法两种。

直接法抗拉试验的试件制做和要求基本上与单轴压力试验相同。试件系用粘合剂使之与压机上的帽套粘合以传递拉力。需要特别注意加力设备与帽套、试件等的中心线保持在一条直线上。加载要求同压力试验。拉力强度按原试件截面积除以最大破坏拉力值求得。

间接法又称巴西试验, 其原理及加载示意图见图 2—4。当试件两向受力, 一向为压力, 一向为拉力时, 试件毁于单轴抗拉强度。

制作试件时要求圆柱体表面光滑, 两端平面磨平到 0.25mm, 平行度在 0.25° 以内, 直径约为 54mm, 长度等于试件半径。加载速度建议采用 200N/S。试件抗拉强度 σ_t 按下式计算:

$$\sigma_t = 0.636 P / D t \text{ (MPa)} = \frac{P}{\pi \cdot D/2 \cdot t}$$

式中 P —— 荷载 (N);

D —— 试件直径 (mm);

t —— 试件高度 (mm)。

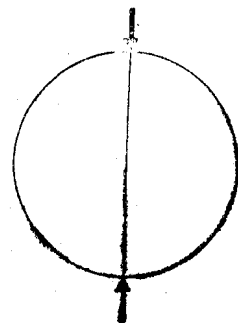


图 2—4

第四节 岩石直剪强度试验

直剪试验可求得岩石试件的直接剪切强度，它们是剪切面上法向应力的函数。试件的制做应使受剪面符合岩石中的薄弱面，如节理面、层理面、片理面或劈理面等的位置。抗剪强度最好在同一试验层上至少进行五次试验，各自在不同的固定法向应力下进行，室内试验与原位试验均应同样要求。试验时孔隙水压条件应与设计实物时一致。

试件应取自选择好的试验层位，并记载其倾角，倾向及其他有关的地质特征。试件应尽量保持其自然含水量。试件试验面最好是方正的，其最小面积不小于 2500mm^2 。

进行剪切之前，试件进行固结，即在本组试验的最大法向应力作用下，允许剪切面附近岩石与充填物内孔隙水压力消散掉。试件安装完毕后，首先把法向荷载加大到本组试验规定的最大值，记录试件的法向位移（固结），当法向位移速度在 10min 内小于 0.05mm 时，认为固结完成。根据时间位移关系绘制固结曲线图（2—5 b 图）。

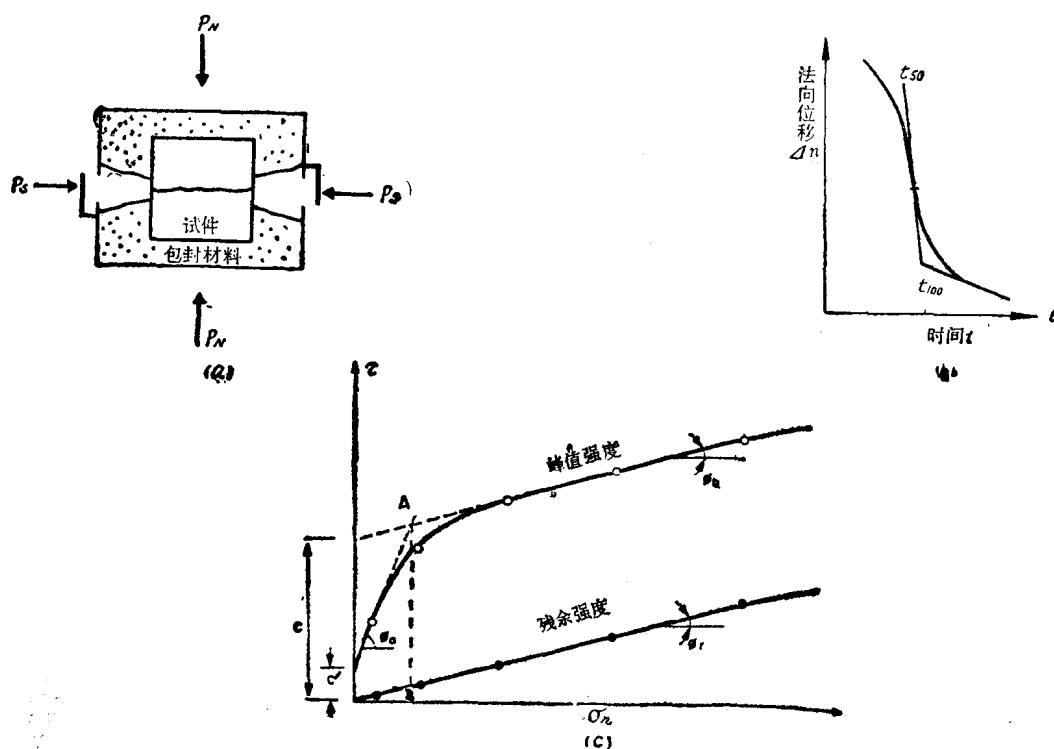


图 2—5

(a) 直剪试验示意图；(b) 固结曲线图；(c) 剪切强度曲线图。

峰值抗剪强度是指完整的剪应力—位移曲线中最大的剪应力。残余抗剪强度相当于剪切位移不断增加时，观测到的抗剪强度不再变化的剪应力。只有剪切位移较试验中的位移大很多，才能得到真正的残余强度。试验所得只是近似值。

剪切可用增量法加载，亦可连续加载，常用后者以便控制剪切位移速度。进行一组试验时，法向力固定不变。取一组读数前，剪切位移速度应在 10min 内少于 0.1mm/min 。为能恰好记载峰值强度，可使剪切位移速度增加。但到达峰值的总时间应超过 $6t_{100}$ ， t_{100} 系根据固结

曲线求得(图2—5b)。若剪切位移1cm时,相邻四个剪应力读数变化不超过5%,可以认为此时剪切强度是残余强度。然后可改变法向力进行另一组试验,但在每次改变试验法向力时,试件按改变后法向力重新进行固结。

试验完成后,应仔细研究剪切面的有关形态,并进行试件光滑面对光滑面的摩擦性能试验。

因测定位移时采用多点量测,计算强度时采用平均位移读数,得出平均剪切位移 Δ_s 与平均法向位移 Δ_n 值。侧向位移应记录以供参考。如侧向位移很大,在计算剪切面积时应予以修正。剪应力与法向应力按下式计算:

$$\text{法向应力 } \sigma_n = \frac{P_n}{A}$$

$$\text{剪应力 } \tau = \frac{P_s}{A}$$

式中 P_s ——总剪力;

P_n ——总法向力;

A ——剪切面积(计及剪切位移予以修正)。

绘制峰值抗剪强度对法向应力及残余抗剪强度对法向应力的关系曲线(图2—5c)。确定 ϕ_a , ϕ_b , ϕ_r , C' 及 C 值。 ϕ_a 称视摩擦角, A' 点是切断突台时的标志, $\phi_a = \phi_u + i$, ϕ_u 是试件光滑面间的摩擦角, i 为突台角度; ϕ_b 为 A' 点以上的视摩擦角, ϕ_r 是残余摩擦角,通常 ϕ_b 等于或稍大于 ϕ_r , C' 是峰值抗剪强度时的粘结力, C 是相当于 ϕ_b 时的粘结力。上述概念参见第三章。

第五节 三轴压力试验

三轴压力试验系指试件处于 σ_1 , σ_2 , σ_3 坐标系的三个方向受力。它通常分为常规三轴试验和真三轴(polyaxial)试验。常规三轴试验指试件受应力 σ_1 , σ_2 , σ_3 作用,其中有两个相等,如 $\sigma_2 = \sigma_3$,或 $\sigma_1 = \sigma_2$ 。真三轴为三个应力各不相等。后者可以研究中间主应力对岩石试件力学性能的影响。

一、常规三轴压力试验

进行常规三轴试验除使用压机外,需要有三轴压力室(图2—6)和加载侧向压力的设备。侧向加载设备通过进油口将液体压入三轴压力室制造围压,承压板加载轴向压力。试件外部包有塑胶套,防止围压液体渗入。

试件制做要求与单轴抗压强度试验的试件要求相同。加载方式首先同时施加轴向荷载和围压,使两者近似相等,达到规定围压值时,维持围压不变,轴向压力再继续连续加载,加载速度要求同单轴抗压强度试验。

三轴试验抗压强度与围岩关系很大。抗压强度随围压的提高而加大。通常脆性材料随围压的提高而变为延性材料(图2—7)。

抗压强度按加载的最大轴向压力除原始试件面积计算。绘制不同围压下的抗压强度曲线(图2—8),并按下式计算Coulomb定律中的 C , ϕ 值:

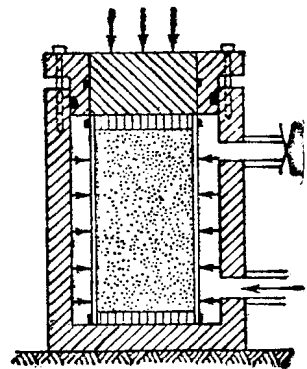


图 2—6

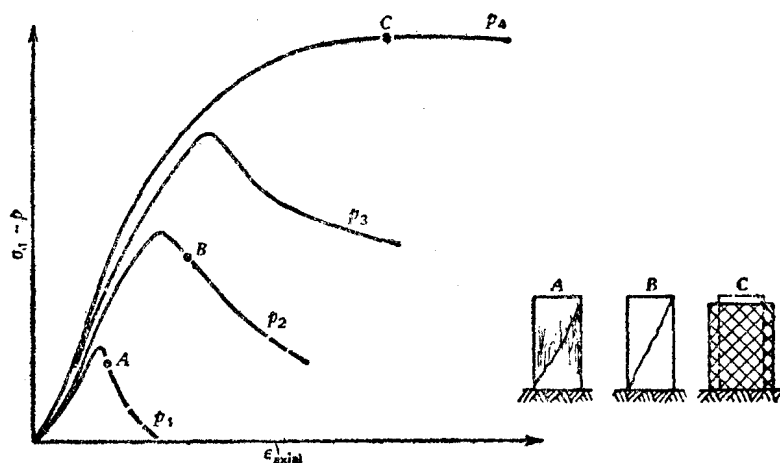


图 2-7

$$\phi = \sin^{-1} \frac{m-1}{m+1}$$

$$C = b \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi}$$

式中 m 、 b 分别为图 2-8 曲线的斜率和截距。

二、真三轴压力试验

真三轴压力试验除轴向加载外，另外两个方向可独立加载 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)。目前尚没有标准设备。图 2-9 是日本东京大学使用过的设备。

轴向压力 σ_1 用 70t 压机加载， σ_2 用 30t 千斤顶推动活塞加载，试件放于压力室内，室内液压为 σ_3 方向加载。操作时，先加载 σ_3 ，再加载 σ_2 ，最后施加轴向压力 σ_1 。

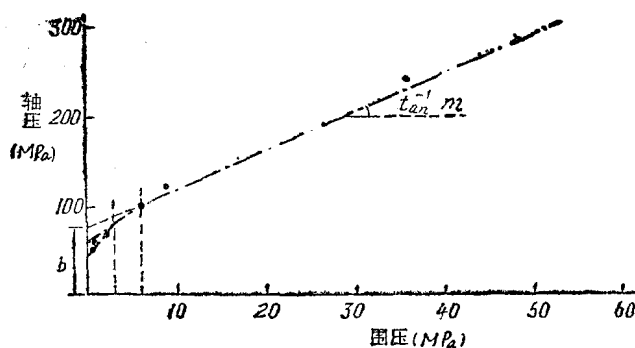


图 2-8

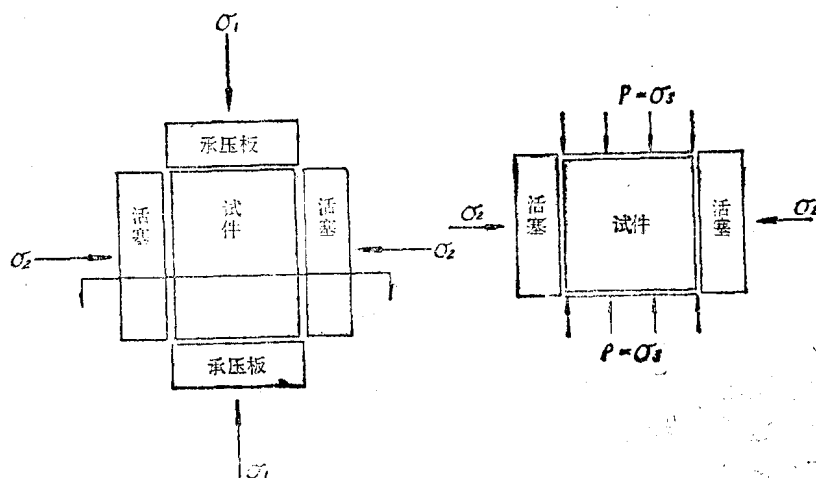


图 2-9

试验结果说明：中间主应力 σ_2 影响试件强度。如图2—10所示的白云岩试验， σ_2 不变时，强度随 σ_3 的提高而增加。

最近国内也进行了真三轴的试验研究工作，并取得可喜的成果*。

第六节 动态测试

动态测试系利用应力波在岩石中的传播来测定岩石的一些力学参数。波动理论告诉我们，波在介质中传播有以下特点：

- 1) 波可以穿透介质，在不同介质中按不同速度传播；
- 2) 在不同介质界面上，波会产生反射；
- 3) 在障碍物相对波长不太长时，波可以发生绕射现象，使波速减慢；
- 4) 波在弹性介质中传播时，其能量随传播距离增大，按一定规律减弱。介质不同，减弱程度不同，气体中减弱最大，液体次之，固体最少；
- 5) 波在弹性介质中传播时，发射频率越高，衰减愈大，相反频率低则衰减减小，传播距离加大。

在动态测试工作中即利用上述特点来研究岩石特性。通常假定岩石是完全弹性介质，波动在岩石内传播符合弹性波的传播规律。利用波动方程特点和弹性波的波形特征揭示岩石内部结构及应力状态。

若在介质面上 S 点给以冲击，在介质中产生两个向下传播的球面波和一个沿表面传播的面波（图2—11）。一个球面波使介质沿波传播方向扰动，另一个则垂直于传播方向扰动。前者是由于拉—压变形（膨胀）而产生的弹性波称为纵波（ P 波），后者由于切变而产生的弹性波称为横波（ S 波）。纵波传播速度较横波快。表面波称为瑞利(Rayleigh)波，它有竖直扰动分量，也有水平扰动分量，传播速度低于纵波和横波。

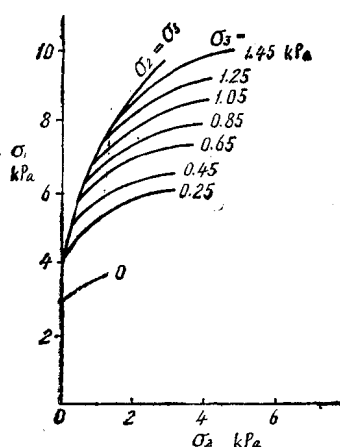


图 2—10

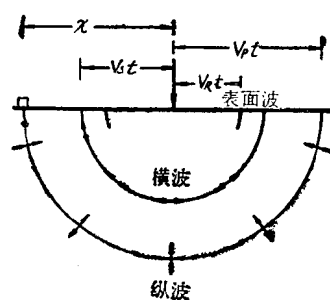


图 2—11

弹性介质中，波的传播速度与弹性常数有关，其关系式为：

* 高渠清，郑鸿泰，周德培：多轴压缩下红砂岩的强度变形和破坏特征。
(岩石力学与工程学报) V.2, N.1, 1983。