

高等学校教学参考书

岩石力学基础

北方交通大学	张 清	编
	杜 静	
北京科技大学	于学馥	审

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 9 7 年 · 北 京

高等学校教学参考书

岩石力学基础

北方交通大学	张 清	编
	杜 静	
北京科技大学	于学馥	审

中 国 铁 道 出 版 社

1997年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了岩石力学的内容,强调了地质与岩石力学之间的关系,从微观缺陷、宏观节理裂隙出发,论述了岩石的破坏机理和强度准则。内容主要包括不连续岩体的力学性态和统计、分形特征,岩石试验的尺寸效应与地应力,弹、塑性理论在岩石力学中的应用,岩石时效,断裂力学与损伤力学在岩石力学中的应用,不连续岩体的计算模型和计算方法。

本书为高等学校岩土工程和土建类有关专业高年级学生和研究生教学参考书,也可供交通、水利、矿山及人防等部门的有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学基础/张清,杜静编. —北京:中国铁道出版社,1997. 10
高等学校教学参考书
ISBN 7-113-02659-1

I. 岩… II. ①张…②杜… III. 岩石力学-高等学校-教学参考资料 IV. TU45
中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 24051 号

中国铁道出版社出版发行
(北京市宣武区右安门西街 8 号)
责任编辑 李丽娟 封面设计 赵敬宇
中国铁道出版社印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数 284 千
1997 年 12 月 第 1 版 第 1 次印刷
印数:1—1000 册

ISBN7-113-02659-1/TU · 545 定价:16.80 元

目 录

第一章 结 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.....	1
第二章 不连续岩体的力学性态	4
第一节 结构面的抗剪性能.....	5
第二节 裂隙岩体的力学特性	11
参考文献	17
第三章 不连续岩体的统计特征和分形特征	18
第一节 结构面的方向分布	18
第二节 结构面间距与密度分布	22
第三节 结构面尺度大小和裂隙宽度分布	26
第四节 岩体结构面网络的随机模拟	33
第五节 岩体结构面的分形特征	37
第六节 考虑节理面统计特征和分形特征的剪切强度准则	42
参考文献	45
第四章 岩石试验的尺寸效应与岩体中的地应力	48
第一节 室内试验与原位试验	49
第二节 地 应 力	51
参考文献	54
第五章 岩石的破坏机理与强度准则	55
第一节 岩石的破坏机理	56
第二节 岩石的破坏准则	62
参考文献	70
第六章 弹性理论在岩石力学中的应用	71
第一节 应力与应变	71
第二节 广义虎克定律	76
第三节 孔边应力集中	81
第四节 Griffith 理论的推导	84

第五节 应力偶理论 88

第六节 水对岩石力学性能的影响 94

参考文献 97

第七章 塑性理论在岩石力学中的应用 98

第一节 塑性理论的基本假设 99

第二节 岩石的弹塑性性质 108

参考文献 115

第八章 岩石时效 116

第一节 流变学模型 117

第二节 线粘弹性材料及其应力分析 124

第三节 粘塑性材料 128

第四节 岩体蠕变 133

参考文献 135

第九章 断裂力学与损伤力学在岩石力学中的应用 136

第一节 线弹性断裂力学 136

第二节 断裂力学在岩石力学中的应用——水压致裂法 143

第三节 几何损伤理论 145

参考文献 156

第十章 不连续岩体的计算模型和计算方法 157

第一节 连续介质力学方法 157

第二节 离散元法 164

第三节 刚块—弹簧法 169

第四节 刚体节理元法 174

第五节 关键块体法 176

参考文献 180

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,岩体不但有微观的裂隙,而且有层理、片理、节理以至于断层等不连续面。岩体不是连续介质,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于其上的地质作用。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两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。

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,而是坝基和边坡岩体出了问题,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 for Rock Mechanics,简称 ISRM)。1966 年在里斯本召开了第一届国际岩石力学学术大会,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,新奥法隧道施工就是这个学派取得的成就之一。过去进行岩石工程设计施工时,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。因而,工程地质有从定性描述向定量方向发展的迫切要求。奥地利工程地质学家 J. Stini 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,并做定性的研究,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,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《地质与土木工程》改名为《岩石力学与岩石工程》(Rock Mechanics & Rock Engineering)继续出版。Stini 逝世后,Müller 领导前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。

英国的岩石力学研究工作是和矿业发展密切联系的。结合地下采矿对岩石的破坏和露天开采对边坡的稳定,学者们对岩石力学的发展做出了贡献。如帝国理工学院(Imperial College of Science and Technology)的著名学者 E. Hoek, J. W. Bray, E. T. Brown 以及担任《国际岩石力学与采矿科学》杂志主编的 J. A. Hudson 等。另外,以 Wales 大学 O. C. Zienkiewicz 教授为首的研究小组,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的最早的一部著作,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。法国学者们对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。

前苏联早在 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。前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。其他的东欧国家如波兰和前南斯拉夫,在岩石力学方面都进行了大量的研究工作。此外在瑞典和挪威都进行了岩石力学研究工作。例如挪威的地学研究院(Norwegian Geotechnical Institute,简称 NGI)在岩石节理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是国家土木工程研究所(Laboratorio Nacional de Engenharia Civil,简称 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。

美国早期的岩石力学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 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,最近又新成立了美国岩石力学协会,进一步推动了岩石力学的发展。美国岩石力学研究单位多集中在高等学校和国家试验室。他们从 1956 年起每年举行一次全国岩石力学学术大会,至今没有间断过。

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,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,形成了百花齐放的局面,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 年起就开始举行自己的岩石力学讨论会。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了很大贡献。

此外,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四个学会中的岩石力学工作者们共同组成了一个岩石力学研究会,同年召开了第一次学术会议。1979 年岩石力学研究会改组为岩石力学联合会,在研究岩石力学性能和隧道工程方面取得很多成绩。

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 18 个单位的一百多名科技人员,在陈宗基教授的带领下,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。

以中国科学院地质研究所谷德振教授为首的一些学者,从 60 年代到 70 年代初,形成并提出了“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。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。

1981 年我国成立了岩石力学学会筹备组,随后成立了国际岩石力学学会中国小组,并作为会员国参加了国际岩石力学学会(ISRM)。1985 年中国岩石力学与工程学会正式成立,中科院学部委员陈宗基教授担任第一任理事长。1995 年国际岩石力学第 8 次会议在日本千叶召开。中国岩石力学与工程学会理事长孙钧院士当选为 ISRM 无任所副主席。这说明随着国内岩石力学技术的发展,我国在世界岩石力学界的地位逐步提高。

随着改革开放的深入进行,我国工程建设蓬勃发展,因而对岩石力学提出了很多新课题,宏大的施工现场为岩石力学工作者提供了施展宏图的场所。各种科研成果纷纷涌现,不但在国际学术界为我国争得了荣誉,而且迅速地把科学技术转换成生产力,进一步推动了我国工程建设的向前发展。随着学位制的建立,大批岩石力学和岩石工程的博士和硕士被培养出来。他们学有所长,风华正茂,精力充沛,承担着承上启下,继往开来的任务。随着他们的成长壮大,我国岩石力学的发展必将进入更为繁荣的新阶段。

第二章 不连续岩体的力学性态

岩体与完整的岩石最大的区别是它有各种各样的不连续面(或称结构面)。岩体不是连续介质,岩体的强度和变形,在某些最不利的方位上完全受不连续面特性的控制。因此在实际工作中,弄清楚不连续岩体的力学特性是非常重要的。

岩体的不连续面系指岩体在生成过程中,以及生成后若干地质年代中,受地壳构造作用形成的各种结构面,它包括微裂隙、片理、页理、节理、层面、断层及整个断层带。岩体中一般微观不连续面,可以忽略不计,当做连续介质来研究。若有一定方向的较小裂隙,如结合良好的层理,可以当做各向异性的连续介质。但由于不连续面的存在,不连续面的特性在很大程度上控制岩体特性时,对于这种岩体,我们称之为不连续岩体或裂隙岩体。不连续岩体的力学性能由于有结构面的存在而大大削弱,这要分为两种情况来分析。一种情况是岩体存在几组结构面,或者结构面密度不大,或者结构面没有贯通,或者结构面虽然贯通,但切割成镶嵌的块体,在这些情况下,在某几个方向即最不利方位上的岩体力学性能受到很大削弱,但在某些方向上岩体力学性能却影响较小。对于这种情况,在实际岩石工程中,必须注意到结构物力的作用方向与岩体最不利方向的关系。另外一种情况是岩体受结构面切割已经非常破碎,岩体性能无论在哪个方向上都受到不同程度的、极大的削弱,这时岩体就应该看做是完全碎裂的散体结构来加以处理。

研究不连续岩体首先要研究岩体不连续面的力学特性,即地质上称为结构面的力学特性。研究结构面的力学特性时需要注意:

- (1)结构面胶结或结合情况,如虽有结构面,但胶结良好,结构面上还可以有较高的抗剪强度;
- (2)结构面的充填情况,如果结构面间没有充填,结构面间的抗剪性能受结构面自身特性控制,若结构面间有充填,并有一定厚度,则抗剪性能受充填材料性能控制;
- (3)结构面粗糙度及起伏度的形态特征;
- (4)结构面的贯通性,延展规模;
- (5)结构面的密度;
- (6)结构面空间分布情况,即结构面是如何组合的,如果是贯通切割的,则形成块体的形状等。

目前试验研究不连续岩体的方法大致可分为现场的原位试验研究和试验室的模型试验研究。现场实际岩体是多组结构面互相作用,有的裂隙甚至没有明确的规律性,如果一开始就研究如此复杂的岩体是非常困难的,因此常常把实物抽象成为简单的模型,例如先研究一种结构面的力学特性,进而研究存在多组结构面模型的力学性能。只有对个别单一的现象研究清楚,再进行现场大型试验,与之分析对比,才能较好地分析包括错综复杂地质结构在内的岩体性态。

第一节 结构面的抗剪性能

一、未充填结构面

岩体力学性能受结构面的削弱主要表现在沿结构面方向抗剪能力降低。因此首先讨论结构面上的抗剪性能。

最简单的情况是结构面之间没有充填的情况。结构面不是平滑的,它凹凸不平。结构面受剪切作用的形态可以简化成下列模型来研究。如图 2—1 所示,受剪切的结构面上有突台,设突台斜面 $i=45^\circ$,模型上半部作用有剪力 S 和法向力 N ,模型下半部固定不动,当材料强度较高时,上部模型受剪力作用开始沿突台斜面滑动,除向右移动外还有向上的位移分量,这一位移分量引起岩体的体积膨胀,称之为剪胀(dilatancy)。 S 连续增大,突台根部被剪断,如图 2—1(c) 所示,此时突台不再起作用。如果材料强度较低,在 S 作用下没有明显的剪胀,突台根部即被剪断。从这个简单的试验可以看出:在同样受力状态下,结构面上的粗糙程度(突台)和结构面的强度影响其抗剪性能。此外,如果绘制剪力与法向力关系曲线(图 2—2)时,可以看到它有双直线的特性。 ϕ_r 是残余摩擦角,代表位移后的结构面间的摩擦特性。

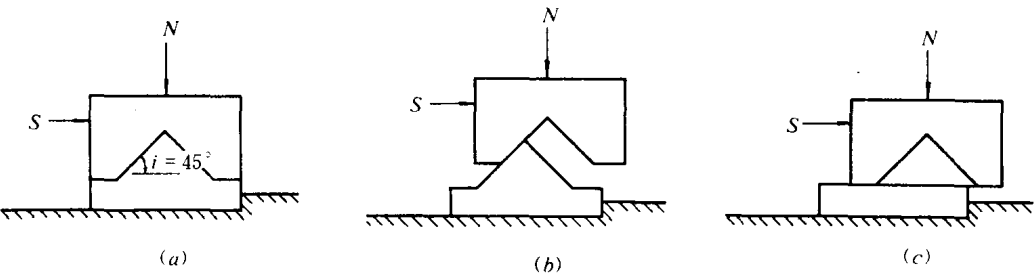


图 2—1

如果考虑到剪胀,我们采用如图 2—3 所示的多突台节理模型。把作用的剪力 S 看成由下列几个分量组成。

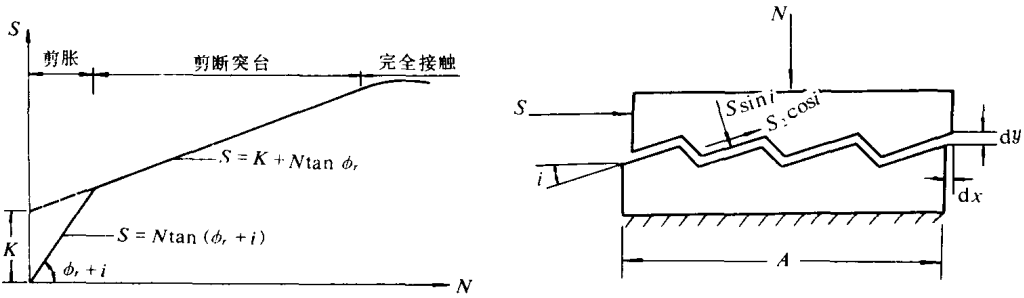


图 2—2

图 2—3

(1) S_1 。用于剪胀作功的力。当剪切位移 dx 时,剪胀使模型上部上升 dy ,此时需作功 Ndy 。故 $S_1 dx = Ndy, S_1 = \frac{Ndy}{dx} = N \tan i = N \dot{V}$, $\dot{V}$ 是破坏时的剪胀率。

(2) S_2 。当有剪力 S 作用时,在突台斜面上作用有 S 的法向分力 $S \sin i$ 。设斜面上有摩擦(摩擦角为 ϕ_μ),当剪切位移时,法向分力产生的摩擦力为 $S \sin i \tan \phi_\mu$ 。在斜面上需有一 S_2 的分力与

之平衡,即 $S_2 \cos i = S \sin i \tan \phi_\mu$, $S_2 = S \tan i \tan \phi_\mu = S \dot{V}$ 。

(3) S_3 。若无剪胀,用于剪切平面上摩擦作功的力, $S_3 = N \tan \phi_\mu$ 。

(4) S_4 。在剪切过程中,剪断突台根部面积的作用力, $S_4 = AK + N \tan \phi$ 。式中 A 是突台在剪切面上的投影面积,这里假定突台根部的破坏,符合库仑准则(见第五章), K 和 ϕ_0 是库仑定律中的粘结力和摩擦参数。

如果突台部分被剪断,这部分面积为 A_s ,设 $a_s = A_s/A$,则滑动部分为 $(1-a_s)$,剪断部分为 a_s ,于是就有

$$S = (S_1 + S_2 + S_3)(1-a_s) + S_4 a_s$$

将有关 S_i 代入上式,得到

$$\tau = \frac{S}{A} = \frac{\sigma_n(1-a_s)(\dot{V} + \tan \phi_\mu) + (\sigma_n \tan \phi_0 + K)a_s}{1 - (1-a_s)\dot{V} \tan \phi_\mu} \quad (2-1)$$

若 $\dot{V} = 0$,上式变成

$$\tau = \sigma_n(1-a_s) \tan \phi_\mu + a_s(\sigma_n \tan \phi_0 + K) \quad (2-2)$$

上式可用于计算咬合良好的剪切面或节理面。如果节理面部分咬合部分张开,实际接触面积要受到削减,如图 2—4 所示。若咬合的程度以 η 表示。则剪力变为 τ/η ,法向应力变为 σ_n/η 。 η 定义为

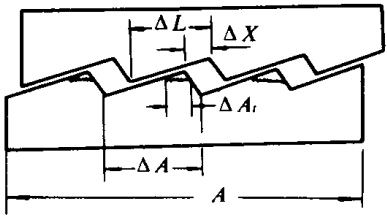


图 2—4

$$\eta = 1 - \frac{\Delta X}{\Delta L}$$

式中 ΔX ——突台张开部分投影长度;

ΔL ——突台总投影长度。

于是式(2—1)变为

$$\tau = \frac{\sigma_n(1-a_s)(\dot{V} + \tan \phi_\mu) + a_s(\sigma_n \tan \phi_0 + K\eta)}{1 - (1-a_s)\dot{V} \tan \phi_\mu} \quad (2-3)$$

使用上面公式时,需要确定 $a_s, \dot{V}, \eta$ 和 ϕ_μ 等数值。 ϕ_μ 值可由岩石平面的摩擦试验求得。若认为突台不会被剪断,则 $a_s \rightarrow 0 (A_s \rightarrow 0), \dot{V} \rightarrow \tan i$,这只是在法向力较小时的情况。若法向力很大,突台从根部全部剪断 $a_s \rightarrow 1, \dot{V} \rightarrow 0$,中间情况是 a_s 值处在 0 到 1 之间, $\dot{V}$ 处于 $1 \rightarrow 0$ 之间。当 $0 < \sigma_n < \sigma_T$ 时,可采用经验值:

$$\left. \begin{aligned} a_s &= 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_1} \\ \dot{V} &= \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^k \tan i \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

式中 σ_T 为达到 $a_s = 1$ 和 $\dot{V} = 0$ 时的法向应力, $k_1 = 3/2, k = 4, \eta$ 通常根据观察估计。

Barton 认为节理面剪切位移的开始与 ϕ_b, d_n 和 S_n 有关(图 2—5)。 ϕ_b 是节理面间的残余摩擦角,一般为 $25^\circ \sim 35^\circ$; d_n 是一个角度分量,它等于达到峰值抗剪强度时的实际剪切路径的斜率(dy/dx), S_n 代表岩石本身(突台)强度。Barton 认为法向力 N 与剪切力 H 的比值表达式可写成

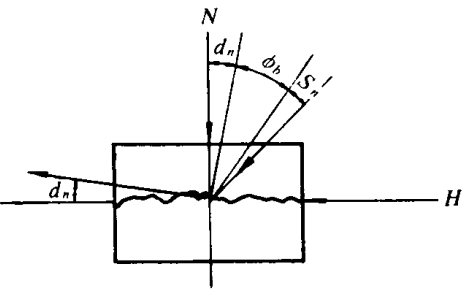


图 2—5

$$H/N=\tan(\phi_0+d_n+S_n)$$

Barton 进行了大量的试验,根据试验资料(法向应力 $\sigma_n=0.72\sim840\text{kPa}$,试件长度 $2\sim30\text{m}$)得出

$$\begin{aligned}\tau/\sigma_n &= \tan(2d_n+30^\circ) \\ d_n &= 10\lg(\sigma_c/\sigma_n)\end{aligned}\tag{2-5}$$

式中 σ_c ——无侧限岩石抗压强度。

从上面两式中消去 d_n ,得出经验公式为

$$\tau/\sigma_n=\tan\left[20\lg\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_n}\right)+30^\circ\right]\tag{2-6}$$

他认为上式只限于非风化、无充填的节理。若岩石试件 σ_c 已知为 100MPa ,进行剪切试验时的法向应力为 $\sigma_n=2\text{MPa}$ ($\sigma_c/\sigma_n=50$) 时,则可得到峰值的 τ/σ_n 近似值为 2.06 。由此,采用不同的 σ_c 值,可以得到峰值抗剪强度的一族曲线及其包络线。Barton 研究了节理面粗糙度的影响,认为在式(2-6)中的常数 20 对应非常粗糙的节理面,而对较光滑的和光滑平坦的节理面,这个常数应分别采用 10 和 5 ,当然这都是经验数据。Barton 定义的粗糙系数为

$$JRC=\frac{\arctan(\tau/\sigma_n)-\phi_0}{\lg\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_n}\right)}$$

式中 τ ——峰值抗剪强度;

σ_n ——法向应力;

ϕ_0 ——残余摩擦角,它处于 $25^\circ\sim35^\circ$ 之间,平均值采用 30° 。

岩石单轴抗压强度 σ_c 以 JCS 代替,并考虑其风化影响,若为风化节理面可以 $\sigma_c/4$ 代入作为 JCS 值。若有水充满节理, σ_n 和 τ 均采用有效应力,这样式(2-6)变成

$$\tau/\sigma_n=\tan\left[(JRC)\cdot\lg\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)+\phi_0\right]\tag{2-7}$$

Barton 随后对 JCS 和 JRC 的求法做了具体的规定。式(2-6)可用于峰值抗剪强度的曲线拟合、峰值抗剪强度试验数据的外推和峰值抗剪强度的计算。

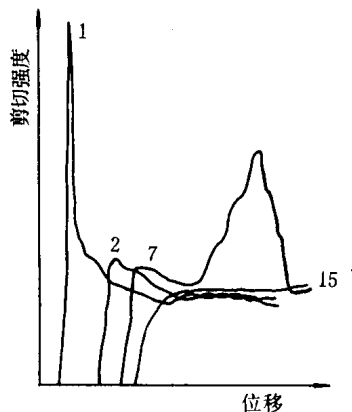


图 2-7

由式(2-7)可见,粗糙系数是决定不连续面抗剪性能的重要因素。当年 Barton 在研究粗糙系数时,只能提出 10 种典型的剖面(图 2-6)。自从 Mandelbrot(1982 年)提出分形几何理论以后,人们试图用它来表征粗糙度,如何以分形几何来表示粗糙度,将在第三章中介绍。

自然界中的节理都是经过位移变形的。人们一开始就注意到抗剪强度是与变形历史有关的,即新鲜节理的抗剪强度大大高于经过剪切位移的抗剪强度。Jaeger 的试验充分说明此点(图 2-7)。当第一次进行新鲜节理抗剪试验时,岩体具有很高的抗剪强度。同一方向重复进行到第 7 次时,还保留峰值与残余值的区别,当进行到第 15 次时,已看不出峰值与残余值的区别。近来又有人注意到节理往复变形的影响。这在构造运动中和岩石工

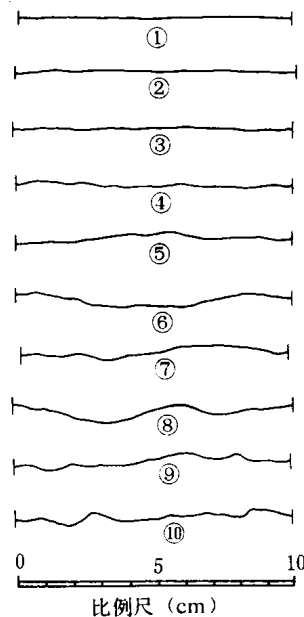


图 2-6

程中能够遇到。T. B. Celestino 和 R. E. Goodman 的试验表现双向剪切的特点(图 2—8)。由 0 开始加载一直到 B 点剪切力改变方向,在 D 点又达到一个较小峰值;继续剪切,强度甚至小于残余平均值,在 E 点达最小值,同时剪胀也接近最低值;继续剪切,在 F 点又达到新的峰值,这是因未破坏的突台又咬合了。作者根据此实验,提出一经验模拟曲线用于有限元中节理分析。

前面介绍的是贯通节理面上的一些特性。通常认为没有贯通的节理,抗剪性能应该较贯通节理为高。但有时也不尽然,因为非贯通节理中,裂隙端部有应力集中,而那些断续的裂隙因未产生位移而没有摩擦阻力,有时非贯通节理的抗剪性可能低于贯通节理。

二、充填的结构面

充填的结构面包括充填的节理和软弱夹层。节理的充填材料各式各样,如节理面的风化或分解物、被水带进的地面土壤、构造运动时产生的碎屑以及岩溶产物等。当充填的结构面厚度小于突台高度时,结构面的抗剪性能与不充填的情况相同。当充填厚度大于突台高度时,抗剪强度才决定于充填材料。

前苏联的 Tulinov 等对充填材料进行过模型试验研究,他们发现充填材料的颗粒直径为 2~30mm 时,抗剪强度随颗粒直径的增大而增大,但直径超过 30mm 以后变化不大。同样为砂充填的坚硬节理面较软节理面的抗剪强度为高。在同样条件下砂岩板中间加填粘土厚 5mm 时,内摩擦因数由未充填时的 0.68 降为 0.56 (湿度为 23%),当含水接近液限最低值时,内摩擦因数降为 0.28,水分进一步增加则变为零。由此可见水分在这里起了重要作用。此外,考虑充填材料的性质,一般认为充填节理抗剪性能的长期强度应较瞬时强度降低 15%~10%。

Ladanyi 和 Archambault 曾研究了填充节理的抗剪性能。他们分别进行了粘土充填节理和砂性土充填节理试验,根据试验结果,他们把分析计算方法分为两类:一类是节理面上的突台不被破坏;另一类是剪切过程中突台被破坏,有关分析中的参数见图 2—9 所示。

假设突台未被剪坏(方法 1),作用在突台斜面上的法向力 σ_i 和切向力 τ_i 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \tau \tan i + \sigma \\ \tau_i &= \tau - \sigma \tan i \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

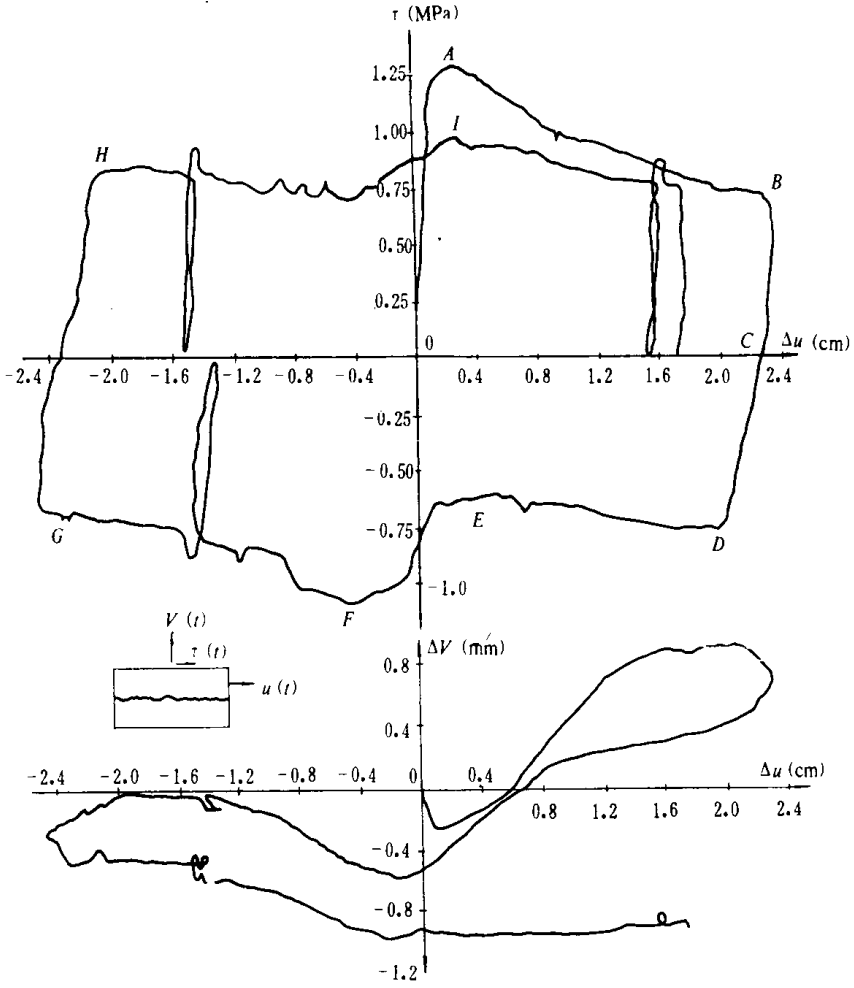


图 2—8

式中 τ, σ ——节理面上的剪应力与法向应力；

i ——突台与水平形成的斜角。

若突台完全咬合的节理，则 $i=i_0$ ， i_0 是突台岩面的斜角(图 2—9)。若突台高度为 a ，充填厚度为 t ， i 在 i_0 和零之间变化。根据试验结果有下列关系：

$$\tan i = m \tan i_0, \quad m = \left[1 - \frac{2}{3} (t/a) \right]^2 \quad (2-9)$$

上述关系只适用于 $t/a \leq 1.5$ ，若 $t/a > 1.5$ 时， $m=0$ 。若充填材料为粘土类土壤时，破坏准则采用 Mohr-Coulomb 准则，即

$$\tau_i = c_u + \sigma_i \tan \phi_u \quad (2-10)$$

加脚标 u 说明用于未排水条件。把式(2—8)代入式(2—10)，则粘土类充填节理剪切强度为

$$\tau = \frac{c_u}{1 - \tan i \tan \phi_u} + \sigma \tan(\phi_u + i) \quad (2-11)$$

若剪切时突台被破坏(方法 2)，其剪切强度按下式计算：

$$S = m(R - C) + c \quad (2-12)$$

式中 R 为无充填节理强度，按式(2—2)计算； C 是充填物强度，按式(2—10)计算； c 为充填材料粘结力。

当充填材料为砂性土时， $c_s=0$ ， $\phi_s > 0$ 。 s 脚标说明砂性材料。此时若突台完好，式(2—11)变成

$$\tau = \sigma \tan(\phi_s + i) \quad (2-13)$$

若突台破坏，式(2—12)仍有效，但式(2—10)需要改为

$$C = \sigma \tan \phi_s \quad (2-14)$$

Ladanyi 等根据 45 组剪切试验的结果，推荐如下：若 $i < 15^\circ$ 且 $\sigma/c < 0.10$ ，对各种充填材料均可采用方法 1；若 $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$ 且 $\sigma/c < 0.5$ 的粘土类材料，建议采用方法 1；若 $i > 30^\circ$ 且 $0.5 \leq \sigma/c \leq 1.0$ ，采用方法 2；若砂性材料， $15^\circ \leq i \leq 45^\circ$ 且 $10 \leq \sigma/c < 1.0$ 则采用方法 2。

泥化夹层是指岩层中原有薄层泥质岩石经构造运动后，在地下水长期作用下形成的疏松完全泥化的夹层。它的存在常是引起隧道及边坡坍塌的原因。泥化夹层的力学性质与其原岩类型密切相关，其厚度通常为 0.1~20cm，泥化夹层的泥化带通常分为粘粒与砾粒，其粒度在 2mm 到 0.002mm 之间。粒度的大小和分布是控制泥化夹层变形和强度的主要因素。其粒度成分在空间分布的不均匀性导致其力学性质的不均匀性。泥化夹层微观结构中通常分为三带。现以砂页岩中的泥化夹层为例，其表面层为非定向带，粘土矿物片状集聚体($d > 2\mu\text{m}$)之间为结构疏松接触，孔隙形状各向同性，孔隙率 50%~65%，含水量 30%~50%，常超过液限含水量；其定向层中矿物集聚体($d > 2\mu\text{m}$)的接触形成了中等密实定向结构，孔隙各向异性，孔隙率 35%~45%，含水量 20%~35%；其非定向层中集聚体($d = 1 \sim 2\mu\text{m}$)的接触组成较密实非定向结构，空隙各向同性，空隙率 35%~50%，含水量 20%~35%。

泥化夹层具有时效作用。变形在定载下随时间增大称为蠕变。它分为初始、等速和加速三阶段(见第八章)。蠕变时泥化夹层微观结构的主要变化是在孔隙和矿物聚集体排列定向性方面。初始阶段主要表现为孔隙减少(例如由 42%→35%)，定向性变化不大，但集聚体之间出现镶嵌挤压现象；等速阶段孔隙继续变小(35%→32%)，约 30%~50%的矿物出现定向排列，孔

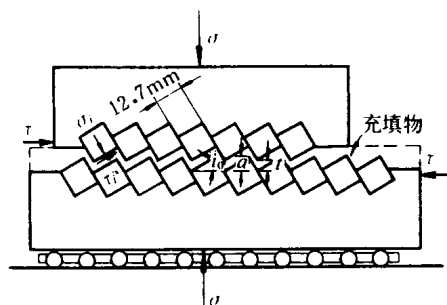


图 2—9

隙被拉长,约为 1.5 : 1;加速阶段孔隙变小(32%→30%),矿物集聚体与空隙定向排列,空隙被拉长,约为 2 : 1。

因为泥化夹层具有时效作用,必须注意其极限长期强度以保证岩体的长期稳定性。根据我国萧淑芳等人的研究,泥化夹层瞬间剪切强度 τ_i 与长期强度 τ_∞ 之比约为 0.67~0.81。此比值随粘粒含量的降低和砾粒含量的增多而增大。这说明在剪切参数中,泥化夹层的强度时效作用主要表现在 c 值的降低而摩擦因数则影响较小。

三、复合面上的滑动——转动摩擦

前面介绍的都是单一结构面上的剪切。自然界中,单一的结构面是不多的,常见的多为复合面结构。复合面结构系指由两组以上的结构面组成的(图 2—10)。图 2—10(a)的结构无论向左或右滑动,都可把平均平面看成结构面,按前述方法处理。对图 2—10(b)结构而言,向右剪切与前相同,向左剪切则会产生块体的转动,或称转动摩擦,如图 2—11 所示。为讨论转动摩擦,我们把它抽象成图 2—12(a)的模型来研究。

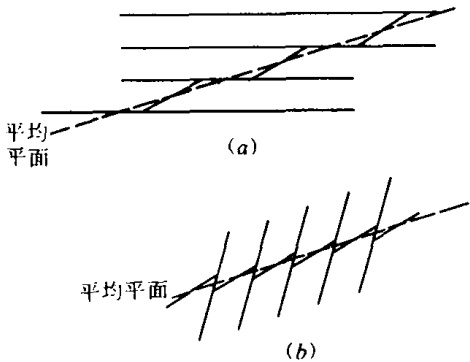


图 2—10

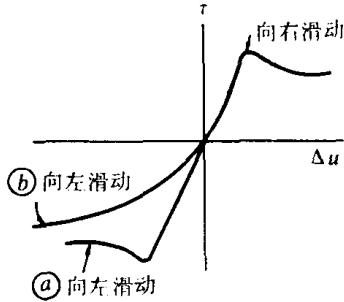


图 2—11

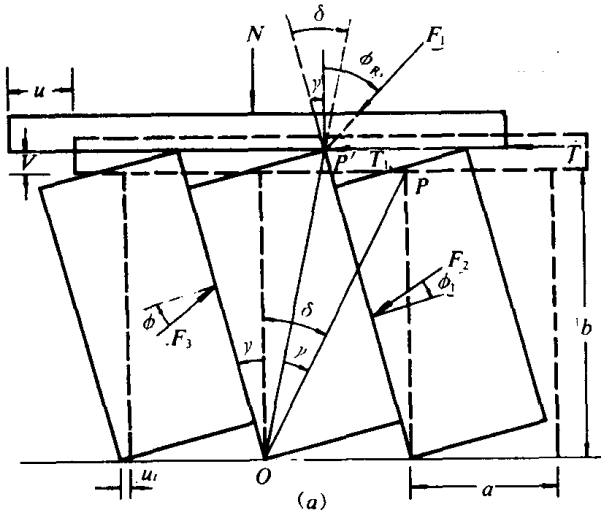
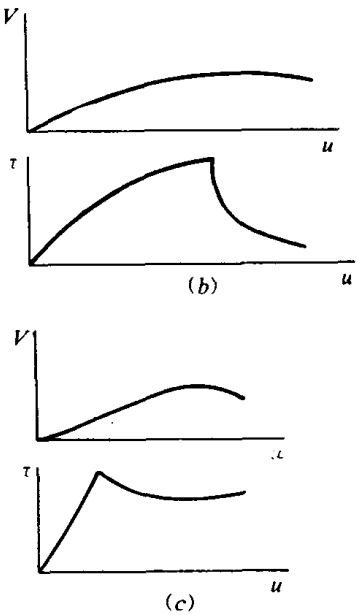


图 2—12

图 2—12(a)中以一组块体之一的 OQPR 为例,当此组块体顶部作用有剪力 T ,使原竖直的



块体绕左下角 O 转动,产生剪切位移 u 以及转角 γ 和剪胀 V , T_1 产生倾覆力矩,块体间竖直面产生的剪切阻力 F_2 、 F_3 和重力组成稳定力矩。对于每一个达到极限状态的 T 值,都有一对应的 γ 值。当 $\gamma=\delta$ 时,这里 $\delta=\arctan\left(\frac{a}{b}\right)$,发生倾覆,剪胀率减缓,然后失稳如图 2—12(b)所示。图 2—12(c)是单一结构面的抗剪性态,可以与图 2—12(b)对照。对这种转动摩擦 Ladanyi 和 Archambault 曾进行过模型试验,认为他们提出的式(2—4)仍然适用,但要调整其中的系数。

四、未贯通节理

有些节理在某些部位并未贯通,如图 2—13 所示,未贯通部分称为岩桥(rock bridge)。两节理可在同一平面内。也可以不在同一平面内。如图 2—14 所示,当在 σ_a 和 τ_a 作用下发生破坏时,均为先在岩桥部分出现拉裂(θ_r 为裂纹与原节理的夹角),然后再贯通。在数值计算中,Reyes 提出采用下列形式表现这种节理的受力状态:

$$\sigma_{ij} = (1 - D)C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

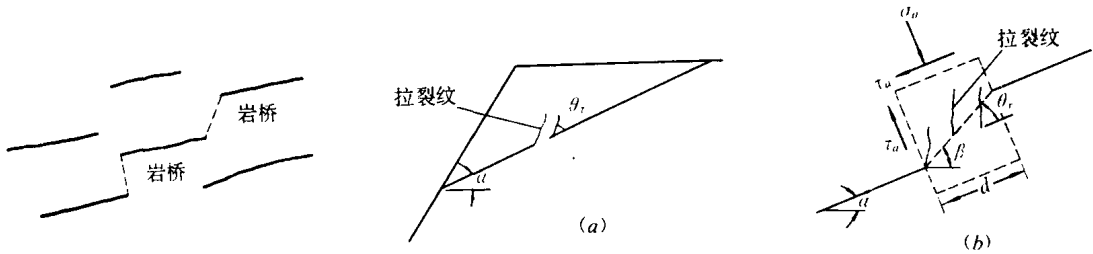


图 2—13

图 2—14

当进行线弹性分析时, C_{ijkl} 是弹性柔性张量, σ_{ij} 与 ε_{kl} 分别为应力和应变张量(参见第五章), D 是一个内状态变量,其数值为 0 到 1。前者代表因节理未贯通而不起作用,后者代表节理已发挥作用,其作用大小受变形控制,即

$$D = \begin{cases} 0, & \varepsilon_{eq} < \varepsilon_0 \\ H(\varepsilon_{eq}), & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{eq} \leq \frac{\varepsilon_0}{A} \\ H\left(\frac{\varepsilon_0}{A}\right), & \frac{\varepsilon_0}{A} \leq \varepsilon_{eq} \end{cases} \quad (2-15)$$

$$H(\varepsilon) = 1 - \exp\left[A\left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)\right] \quad (2-16)$$

式中 ε_{eq} 称为当量应变,其值按下式采用:

$$\varepsilon_{eq} = \begin{cases} \varepsilon_1, & \varepsilon_1 > 0 \\ 0, & \varepsilon_1 \leq 0 \end{cases} \quad (2-17)$$

了解单个结构面上的抗剪特性是了解裂隙岩体的基础。通过前面的介绍,我们可以看到它与岩石本身强度、结构面的粗糙程度、法向应力的多少、变形历史、充填和含水情况都有关系。

第二节 裂隙岩体的力学特性

在上节中,我们着重介绍了岩体中单一结构面上的抗剪性能,但它略去了岩体中各组不同结构面之间的相互作用,以及周围岩石的共同作用。为此,需要进一步研究裂隙岩体在各种受力状态下的力学特性。