

三维应力环境下 节理岩体真三轴

试验研究

刘海宁 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

责任编辑 凌永玉

销售分类：水利工程

ISBN 978-7-5170-0744-9



9 787517 007449 >

定价：48.00 元

华北水利水电学院高层次人才科研启动项目 (200833)
水利部公益性行业科研专项经费项目资助 (201301034)
国家自然科学基金 (51109082)

三维应力环境下 节理岩体真三轴 试验研究

刘海宁 著

内 容 提 要

本书是一部关于三维地应力环境下节理岩体变形特性与强度特性研究的专著。全书以实际工程中复杂的高地应力环境为研究背景,以节理岩体为研究对象,基于模型试验的相似原理,开展了基于相似材料的真三轴模型试验研究,研究了节理岩体在三维应力环境下节理连通率、节理条数、节理组数间的夹角大小、岩体节理与三维应力的空间组合关系等对节理岩体变形特性与强度特性的影响;并基于此对岩体强度准则进行了修正并对节理岩体强度变形机制做了探讨。

本书可供水利水电工程、地质工程、土木工程及相关领域的专家、学者、工程师以及科研人员参考使用,也可供高等院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

三维应力环境下节理岩体真三轴试验研究 / 刘海宁
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 4
ISBN 978-7-5170-0744-9

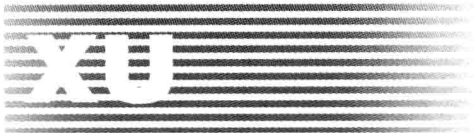
I. ①三… II. ①刘… III. ①节理岩体—三轴试验—
研究 IV. ①P583

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第068086号

书 名	三维应力环境下节理岩体真三轴试验研究
作 者	刘海宁 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10印张 240千字 2插页
版 次	2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



序

在国民经济建设中,由于岩体工程破坏导致的重大人员伤亡、巨大经济损失和工程建设受阻的事件屡屡发生,引起了人们的高度关注,面对巨大的损失人们不得不开始反思。研究表明,很多岩体工程的失稳破坏或变形过大造成功能丧失都与设计过程中岩体的力学参数选择不当有关。

在岩石力学领域所进行的实验研究中,绝大多数都是单轴试验或常规三轴试验,真三轴加载试验较少。由于地应力分布情况极其复杂,在某些极限情况下,三向应力的差异可能很大,因此简单的加载条件不能代替实际复杂的地应力条件。已有的岩土体真三轴试验结果表明,岩土体各向异性弹性参数与岩土体的受力状态有很大关系,在不同的应力条件下,变形表现出强烈的各向异性,甚至出现泊松比为负值、大于0.5或大于1的极端情况。而现阶段对岩体在复杂应力环境下的研究还不多,随着岩石力学的发展,在条件允许的情况下,开展岩石力学的真三轴试验研究,弄清复杂应力环境下岩石的力学行为,获取更加真实的强度变形参数,将为岩石力学的发展及相关工程问题的解决打下基础。

这些无不说明了岩体的力学参数研究的重要性和紧迫性。论题选择对断续节理岩体进行参数取值研究,有着重大的理论意义和现实价值。《三维应力环境下节理岩体真三轴试验研究》的重要贡献就是从真三轴试验角度出发,对节理岩体的力学特性进行了试验研究,在此基础上对岩体强度准则进行了修正。

作者从以下几个方面进行了相关研究:在对现场岩体地质勘查资料和Ⅳ类与Ⅴ类岩体中的断续节理现场精细描述的基础上,借助于统计分析方法,进行了岩体结构的概化,得到简化岩体模型,从而可以使模型在真三轴仪器中进行断续节理岩体强度试验和变形试验,试验考虑了中间主应力效应、断续节理的各向异性效应和尺寸效应等的影响。开展的真三轴试验研究,实现了复杂应力环境下对岩体变形与强度特性的研究,具有环境应力逼真,不连续面空间组合多样等特点,从而能够提供相应组合的参数,对Hoek-Brown经验准则进行进一步的修正,修正形式考虑了中间主应力效应的影响,并结合

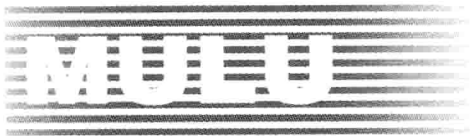
多方面试验资料对修正公式进行了正确性的验证；描述了修正后的 Hoek-Brown 经验准则在主应力空间中的屈服面形状，讨论了屈服面角点存在的原因。基于单弱面理论，对各向异性断续节理岩体建立了三维的强度公式，并在考虑中间主应力效应的情况下对其强度公式进行了修正，认为各向异性节理岩体的强度是受连通率、节理夹角、节理面的内摩擦角和黏聚力、岩块的内摩擦角和黏聚力等因素的综合影响。研究成果在工程实际中进行应用，效果较好。

本书对涉及的很多新的试验技术方法和理论提出了自己的见解，在岩石力学试验和岩体的力学特性研究方面达到了较高的水平，具有较大的启发意义。相信本书会对岩石力学试验与岩土体力学特性研究的发展起到很好的推动作用。本书可供岩石力学界相关人员参考。

中国工程院院士

王恩歌

2013 年 3 月 8 日



目 录

序

1 绪论	1
1.1 选题依据及研究意义	1
1.2 岩体强度理论的国内外研究现状	4
1.3 中间主应力效应的国内外研究现状	7
1.4 数值计算方法研究现状	10
1.5 研究内容和技术路线	11
2 断续节理岩体的真三轴试验	13
2.1 岩石真三轴试验仪器的新发展	13
2.2 中间主应力效应	16
2.3 岩体结构精细描述方法	17
2.4 真三轴模型试验方法	28
2.5 真三轴试验的典型试验结果	32
2.6 真三轴数字试验	38
小结	41
3 断续节理岩体真三轴强度变形的影响因素	42
3.1 连通率对试样极限强度的影响	42
3.2 中间主应力对试样强度的影响	45
3.3 裂隙密度对试样强度的影响	46
3.4 主应力与裂隙网络的位置关系对试样极限强度的影响	49
3.5 节理夹角对试样极限强度的影响	50
3.6 应力路径对试样极限强度的影响	51
3.7 加载方式对试样极限强度的影响	52
3.8 真三轴试验的变形模量计算	53
3.9 真三轴试验的割线模量关联性分析	56
3.10 真三轴试验的变形模量特性分析	57
小结	59

4 断续节理岩体 Hoek-Brown 三维经验强度准则的修正	60
4.1 Hoek-Brown 经验准则发展历程	60
4.2 现有的 Hoek-Brown 经验准则的三维修正形式	64
4.3 中间主应力效应的再认识	65
4.4 Hoek-Brown 强度准则的三维修正	66
4.5 三维修正形式的主应力空间表示	69
4.6 Hoek-Brown 强度准则修正形式的验证	71
4.7 断续节理岩体真三轴强度经验公式	73
4.8 中间主应力对各向异性岩体强度的影响	73
4.9 非贯通节理面的破坏准则	74
4.10 中间主应力对非贯通节理岩体破坏准则的影响	75
小结	77
5 真三轴试验在锦屏一级水电站坝基岩体中的应用	79
5.1 锦屏一级水电站坝址区工程地质概况	79
5.2 岩体物理力学特性	85
5.3 PD37 的节理精细描述	86
5.4 条纹状大理岩三轴强度和变形试验	88
5.5 室内真三轴大理岩强度试验推测	89
5.6 真三轴大理岩体强度特性推测	91
5.7 真三轴大理岩体变形特性推测	93
5.8 Hoek-Brown 三维修正经验公式的工程应用	94
小结	96
6 柱状节理模型真三轴试验力学特性分析	97
6.1 白鹤滩水电站工程地质条件简述	97
6.2 柱状节理玄武岩精细结构调查	106
6.3 柱状节理玄武岩体室内模型的简化	110
6.4 真三轴物理模型试验	112
6.5 真三轴物理模型试验的典型试验结果	114
6.6 中间主应力效应对岩体强度变形特性的影响	117
6.7 各向异性效应对岩体强度变形特性的影响	118
6.8 应力路径效应对岩体强度变形特性的影响	120
6.9 尺寸效应对岩体强度变形特性的影响	122
小结	124
7 总结与展望	126
7.1 总结	126

7.2 展望	128
附件 1 试样编号说明	129
附件 2 完整试样的试验结果	130
附件 3 两组完全贯通节理试样的试验结果	140
参考文献	146



绪论

1.1 选题依据及研究意义

近年来各种自然灾害频繁发生：1998年暴发全国范围的大洪水；2000年沙尘暴多次袭击北京，甚至波及南方各省区，黄河断流，大面积干旱，全国严重缺水；此外沙漠日益进逼首都、每年沙漠化的面积等于一个县；2003年世界范围的气候异常，物种灭绝加速……环境保护和生态平衡问题日益严重地影响到整个社会的各个行业。另外，规模宏大的基础建设在全国范围，特别是我国广大的西部地区展开，岩石工程的数量和规模都空前的增大，这些大型工程引起了环境的改变。如何在修建工程兴利的同时，利用岩石力学为环境保护和生态平衡服务，避免或者尽量减少对森林、植被、土壤的破坏，维护国家和人民的长远利益是时代向岩石力学研究提出来的一个新课题。

目前，国内外岩体工程发展迅速，越来越多的能源、交通、矿山、水利和国防工程建设在岩石地区，其工程设计、施工、稳定性评价和岩体加固等都直接依赖于节理岩体的强度、变形及裂隙的扩展等特性。遍布于岩体中的节理根据其发育程度以及对岩体强度的控制作用，通常被划分为贯通节理、遍布节理、断续节理和隐藏节理。如果岩体中某组节理断续发育或者与其结构体相互切割时并未将岩体完全隔离，则称该组节理面为断续节理面。由于岩体的强度和变形以及破坏形式往往受断续节理组控制，所以从工程角度称这样的岩体为断续节理岩体，这种岩体在工程中是很常见的。而大量的岩土工程实践表明，岩土工程的失稳破坏与其内部的节理裂隙的扩展、贯通及渗流密切相关，如法国的马尔帕塞大坝溃坝破坏（1959）、意大利的瓦伊昂边坡失稳（1963）和中国的长江三峡链子崖滑坡等。中国大型水利枢纽典型滑坡见图1-1。

通过分析上面提到的大量岩土工程事故问题和现有的岩石力学研究热点，可以得出除了大型断层外，Ⅳ级和Ⅴ级结构面在工程区域中是普遍存在的，对岩体稳定性具有直接影响，而岩体中普遍存在的断续节理对于岩体稳定性同样起着重要作用。而岩体赋存于一定的地质环境，经受了不同时期、不同规模和不同性质的构造运动的改造，同时还经受了外营力次生的改造演化；在人类工程活动影响下还可能进一步的改造和演化，在如此复杂的应力环境下，断续节理岩体的力学特性研究值得深入开展。

1999年和2003年召开的国际岩石力学会议都将节理岩体强度与变形分析、节理裂隙破坏机理的实验室试验和数值模拟方法研究作为会议的重要议题。国内外关于节理裂隙对岩体性质影响的研究越来越深入和细致。在岩石力学研究越来越向精细化发展的过程中，更值得深入开展岩石力学精细结构研究；断续节理岩体强度与变形分析等岩石力学细节问题研究已经成为这个学科发展的新方向。

需要特别注意的是，在岩石力学领域所进行的实验研究中，绝大多数都是单轴试验或



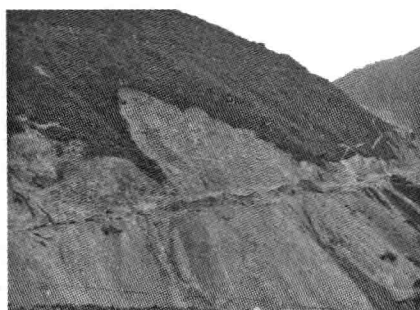
(a) 长江三峡链子崖滑坡



(b) 小浪底 1号、2号滑坡



(c) 小湾 6号滑坡



(d) 三峡库区千蒋平滑坡

图 1-1 中国大型水利枢纽典型滑坡

常规三轴试验, 而真三轴加载试验较少。由于地应力分布情况极其复杂, 在某些极限情况下, 三向应力的差异可能很大, 因此简单的加载条件不能代替实际复杂的地应力条件。已有的岩土体真三轴试验结果表明, 岩土体各向异性弹性参数与岩土体的受力状态有很大关系, 在不同的应力条件下, 变形表现出强烈的各向异性, 甚至出现泊松比为负值、大于 0.5 或大于 1 的极端情况。而现阶段对岩体在复杂应力环境下的研究还不多, 随着岩石力学的发展, 在条件允许的情况下, 开展岩石力学的真三轴试验研究, 弄清复杂应力环境下岩石的力学行为, 获取更加真实的强度变形参数, 为岩石力学的发展及相关工程问题的解决打下基础。

分析断续节理岩体的强度特性及其时效变形机制, 可以合理地预测节理面的扩展及贯通破坏模式, 从而评价工程岩体的稳定性。如水利大坝基础的稳定性评价 (以三峡大坝为例, 见图 1-2)、核废料地下储存的安全可靠性评价 (以 Asse II 地下核废料堆放盐穴为例, 见图 1-3)、节理岩体边坡的稳定性分析 (以小湾 700m 高边坡为例, 见图 1-4)、地下洞室围岩稳定性分析 (以二滩地下厂房为例, 见图 1-5)、岩质基础的承载力评估 (以锦屏电站为例, 见图 1-6) 等。

以大型水利水电工程——锦屏一级水电站和白鹤滩水电站坝基岩体为研究对象, 以现场岩体精细结构描述和相关工程地质条件为资料基础, 借助室内真三轴岩石力学物理模型试验和数值试验对断续节理岩体在复杂应力环境下的强度变形与破坏模式及其相关因素进



图 1-2 三峡坝址全貌

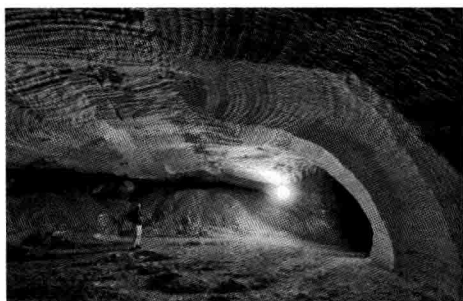


图 1-3 Asse II 地下核废料堆放场盐穴



图 1-4 小湾 700m 高边坡

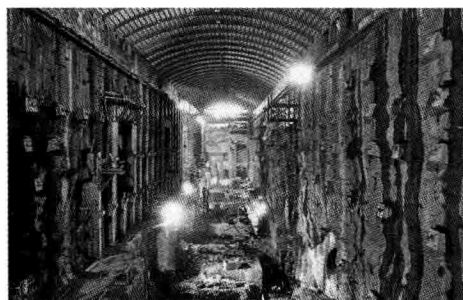


图 1-5 二滩地下厂房

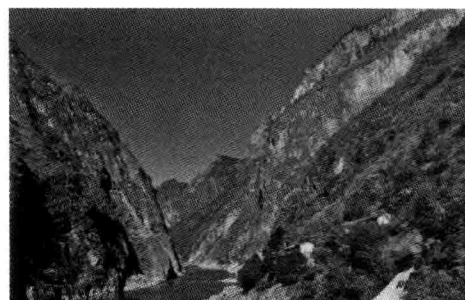


图 1-6 锦屏电站

行了分析研究,在此基础上修正岩体经验强度准则 Hoek-Brown 公式并借助已有的资料进行了修正公式的正确性的验证;在单弱面理论的基础上,建立了复杂应力环境下各向异性岩体的强度修正公式,并对中间主应力效应进行了评价分析,从而实现了研究坝基裂隙岩体在复杂地应力条件下开挖和受荷过程中,断续节理岩体的变形、强度和破坏特性,为相关问题的理论研究和工程分析提供参考。



1.2 岩体强度理论的国内外研究现状

节理岩体包含了从微观到细观再到宏观的各种尺度的缺陷,而且岩体从原始状态直到最终被破坏的整个变形过程中,同时存在分布缺陷和奇异缺陷以及两者之间的相互影响、相互作用和相互转化。工程中往往要从宏观的角度进行简化的近似分析。宏观的剪切破坏是岩体破坏的主要形式。如果岩体内存在贯通节理,其强度的薄弱环节是节理面的剪切滑移,岩体结构效应有时可归纳为对节理面的强度特性的研究。对于断续节理岩体,由于岩桥的存在使其受力及破坏特征都发生了质的变化,节理端部高度的应力集中,将导致脆性断裂破坏。整体的破坏特征表现为原生节理和节理端部扩展岩桥断面所组成的复合破裂面。节理面使岩体强度削弱,岩桥则对强度作出贡献。对于由节理面和岩桥组成的岩体的强度特性的研究来说,进行现场的大型试验有困难,所以对一般的岩体工程难以从定量上考虑岩体断续节理面对强度的影响。同时,由于节理裂隙的随机分布,实际工程中无法给出岩桥的确切位置与尺寸,但可以通过大量的模型试验和统计分析方法给出断续节理岩体的总体强度和变形规律。其中如何根据模型试验的结果建立一种复杂应力环境下客观地评价岩桥演化、扩展、贯通破坏机理的断续节理岩体的力学模型是正确认识断续节理岩体强度的一个关键问题。

岩石强度理论研究发展主要经历了经典岩石强度理论、岩石断裂力学的强度理论和节理岩体损伤力学强度理论三个阶段。

1.2.1 经典岩石强度理论

在古典强度理论的发展过程中,唯象的试验研究是主要手段,经验主义主导着研究思路,因此古典强度理论仅适用于简单应力状态。随着实验测试手段和数学分析方法的发展,提出了各种广义强度理论,其目的在于建立复杂应力状态下固体材料屈服破坏的临界准则。俞茂宏等对各种强度理论进行了归纳,将其分为三大系列:单剪强度理论、双剪强度理论、三剪强度理论(八面体切应力强度理论)。继五大古典强度理论之后蓬勃发展起来的各种广义强度理论充分利用了现代数学、力学的研究成果,克服了古典理论唯象性的缺陷,将理性分析推导与实验经验相结合,较好地解决了强度理论的计算问题,较之古典理论与实验数据的吻合性更好。从1773年提出的Coulomb准则到后来的Mohr准则,以及1952年提出的Drucker-Prager准则和后来修正的各种广义三剪准则,乃至1985年提出的广义双剪准则,这些准则基本都可以用20世纪90年代初提出的统一强度理论来表示,它们具有一致的力学模型和数学表述,基本都是在连续介质固体力学框架内,通过一定的弹塑性分析,结合试验归纳得到的经验准则。

这些准则是古典固体强度理论和广义固体强度理论在岩石材料方面的应用和推广,可称之为经典强度理论。历经数百年的发展,经典岩石强度理论已经能够反映岩石的强度特性,是相关工程设计中分析计算的重要依据,在计算机仿真和非线性有限元分析中具有重要作用。但是,由于经典岩石强度理论采用了连续介质的假定,与岩石材料的实际不符,因此经典理论未能解决岩石强度的离散性、随机性等问题,也没有回答岩石强度特性与岩石组织结构之间的关系问题。因此迫切需要从岩石的结构出发,采用新的研究手段,发展



经典岩石强度理论。

1.2.2 岩石断裂力学的强度理论

断裂力学方法不再把材料看成是完整的均质体,而是包含众多裂隙的复合结构体。围绕岩石中裂纹扩展规律以及岩石断裂机理,在理论及实验方面都进行了大量研究。断裂力学着眼于宏观裂纹尖端附近的应力、应变、位移及能量释放率等,该方法可以追踪岩体中节理裂隙的起裂、扩展到相互贯通使岩体局部破坏的过程,从而揭示岩体失稳的渐进破坏机制。断裂力学的研究已经取得了显著进展。岩石断裂力学的强度理论有:

(1) Griffith 最大拉应力理论。1921 年 Griffith 提出了裂纹及其在材料中萌生和扩展的概念,解释了许多材料低应力脆断的原因,为深入研究岩石的断裂破坏机理指出了一条重要途径,并于 1924 年给出了基于理想脆性假定的二维准则。不同于经典岩石强度理论,Griffith 理论及其修正和推广是基于岩石内存在有微裂纹而建立的,这就为岩石强度特性的研究开启了一个全新的领域,即断裂强度理论研究。实际上,Griffith 理论用于表示岩石材料损伤增长的初始条件更为恰当。

(2) 断裂韧性理论。断裂韧性试验测试技术的发展,使得以断裂韧性为判据的强度理论逐步发展起来。根据线弹性断裂力学 (LEFM) 理论,有两种方法用于研究裂纹前端不发生大范围屈服时的裂纹扩展规律。第一种方法最早由 Griffith 提出,即分析裂纹的能量平衡;第二种方法最早由 Irwin 提出,即求解裂纹尖端应力场。这些经验方程的提出有助于判断复合裂纹的扩展,给出相应的强度准则。裂纹间的相互作用和联合将产生局部弱化并最终导致岩石的整体断裂破坏,对有关的经验模型、统计模型、数值模型也加以探讨后发现真正解决多裂纹的耦合作用还很困难。许多学者对此进行了研究,得出一些有意义的结论,但目前的有效解决途径还主要限于数值模拟。在实际应用中,由于岩石中裂纹扩展方式的复杂性,岩石在外载作用下的应力强度因子 K 或裂纹能量释放率 G 的计算比较困难,许多情况下需要借助有限元、边界元等各种数值计算方法,而且岩石断裂韧性 K_{IC} 或 G_c 的测定也比较复杂,因此岩石断裂韧性强度理论在工程应用方面还面临着一些困难。这些困难的解决有赖于相关数值计算软件的发展以及岩石断裂韧性测试技术的发展。

(3) 分形统计强度理论。为了描述岩石强度的离散性与尺度效应,谢和平 (1996) 引进了分形的方法,分形统计强度理论综合反映了裂纹尺度分布、方位分布和裂纹表面不规则程度对岩石强度的影响,使岩石强度得到了更深入细致的表述。谢和平研究了岩石材料损伤演化过程中的分形几何特征,得出了裂纹尖端损伤演化过程中分形维数变化的关系曲线。分维越大,材料损伤越严重,将分维与岩石损伤演化程度联系起来,有可能建立分维表达的本构方程。

人们已经将分形理论引入到了岩石力学中,但主要是寻找分维和材料特征参数之间的表征联系并建立相应的拟合公式。目前,对岩体中不连续面的几何特征和力学性质的描述十分粗糙;在动力学意义上,依靠分形概念对系统行为的理解仍然获益不多;一个粗略的统计数据往往不能满足人们的需要。可见,分形理论在岩石力学中的应用还处于开始阶段。

运用断裂力学分析岩石的断裂强度可以比较实际的评价岩石的开裂和破坏。断裂力学



的出现让人们认识到裂纹在材料破裂中的重要作用,但是并没有突破岩石材料细观上均匀性这一假设。断裂力学认为,裂纹尖端趋于无穷小,因此在裂纹尖端产生无穷大的应力。为了解决裂纹尖端应力场的奇异性,断裂力学采用了应力强度因子来描述裂纹尖端的应力场强度。实际上,满足完全均质的实际材料是不存在的,对于岩石材料尤其如此。岩石内部分布的大量杂乱无章的各种微缺陷使得岩石本身是一种非均质体,并且构成岩石的各种矿物和晶粒等都是有一定尺寸的。因此,岩石内部由于各种因素产生的裂纹尖端也不是趋于无穷小,在裂纹尖端也不可能有无穷大的应力。很多学者认为在岩石裂纹尖端存在一个断裂过程区,使人们进一步认识到基于金属材料发展起来的宏观断裂力学不一定适合于岩石以及混凝土类的脆性材料的裂纹扩展研究。目前采用断裂力学研究岩石破裂还存在一定的局限性,主要体现在以下几个方面:①裂纹的几何形状一般局限于宏观的椭圆形,实际中岩石往往存在许多细小的微裂纹,裂纹本身是三维的,即使是穿透裂纹,在内部发生扩展之后,也无法当作二维裂纹进行处理;②断裂力学的研究对象为只包含宏观裂纹的材料,对不含宏观裂纹的材料无法判断其破坏,无法考虑微缺陷对材料损伤破裂的影响;③只注重研究裂纹的起始和扩展条件,而对裂纹的贯通以及裂纹在扩展中的相互作用研究不够。大量的岩石力学工作中都假设裂纹扩展为二维问题,然而裂纹不仅仅是在一个平面上扩展,其扩展和相互作用都是空间三维的。

1.2.3 节理岩体损伤力学强度理论

节理岩体损伤力学是损伤力学理论与岩石力学、工程地质学之间的交叉学科,它把岩体内部的节理裂隙看作是岩体内部的初始损伤,通过所谓“损伤变量”的内部状态变量来描述受损材料的力学行为,从而研究其裂隙产生、演化、体积元破坏,直至断裂的全过程。

(1) 岩石宏观损伤力学。许多学者围绕岩石的损伤进行了大量研究,建立了各种能够适用于岩石的宏观损伤模型,例如 Kawamoto、Ichikawa 和 Kyoya 的节理岩体损伤模型,朱维申的裂隙岩体弹塑性损伤断裂模型,周维垣的节理岩体弹脆性损伤模型,谢和平的岩石损伤模型等。这些模型的共同特点是:根据热力学理论和弹塑性理论对其损伤过程进行唯象分析,通过定义特定的损伤变量,建立损伤演化方程,再基于等效原理(应变等效、应力等效或能量等效)建立损伤本构方程。借此建立的本构方程包含了损伤变量,可以反映损伤对岩石变形特性的影响,至于损伤的变化特性则可通过损伤演化方程加以描述。因此,损伤变量的定义是宏观损伤模型的关键问题。

(2) 岩石断裂损伤过程区。断裂力学主要研究的是裂纹尖端的应力奇异性,进而给出裂纹扩展的临界条件,建立断裂判据。而实际上,岩石中并不存在严格意义上的应力奇异性,为此许多学者提出了断裂过程区的概念,也称为断裂损伤过程区。所谓断裂损伤过程区,是指由于损伤及不均匀性,在宏观裂缝尖端存在一个卸载的应变软化区,并不存在线弹性断裂力学提出的应力奇异场。目前有关断裂过程区研究的模型主要有 Hillerborg 虚拟裂纹模型、Bazant 钝化带模型、Shah 等效裂缝长度模型等。这些模型的相同点是假设在裂纹的尖端过程区内为一应变软化区,存在损伤。断裂损伤过程区概念的提出已被许多学者接受,并应用于岩石损伤断裂的研究。岩石断裂损伤过程区揭示了岩石损伤断裂的特点,这实际上是将损伤力学应用于裂尖的一个微区来修正断裂理论。在



断裂损伤过程区内的损伤机制,以及由此产生的屏蔽作用机理还须通过进一步的细观损伤理论加以研究。至于断裂理论没有很好解决的裂纹间相互作用的问题,也必须通过细观损伤模型加以探讨。

(3) 岩石细观损伤力学。细观损伤力学作为宏观损伤力学的必要补充,是当前损伤理论研究的热点。不同于唯象的宏观损伤力学模型,细观损伤模型从材料的具体细观结构出发,考察具体的损伤形式(如微裂纹、微孔洞、相界面等),定义具有真实物理背景的损伤变量,并最终借助某种平均化的方法将细观 RVE 模型的演化规律推广到整体宏观演化规律。对岩石而言,RVE 的建立还存在较大困难,进一步的损伤变量定义十分困难。尽管如此,仍有不少学者对此进行了各种探讨,并取得了一些初步的成果。Krajcinovic 和 Sumarac 等考虑了简单载荷条件下的细观损伤机制;Horii 和 Nemat-Nasser 针对微裂纹可以发生闭合、摩擦滑移、沿晶界扩展、弯折扩展等进行了试验和理论研究;Bazant 系统论述了岩石中分布微裂纹造成的有限元网格敏感性、应变局部化等问题,强调了微裂纹群的演化特征对宏观性质的影响;余寿文和冯西桥等针对微裂纹的相互作用提出了微裂纹扩展区模型,根据微裂纹取向分成不同集合,进而通过集合运算来处理损伤过程中不同种类裂纹的增减;柯孚久、白以龙和夏蒙芬以微裂纹密度函数描述理想微裂纹系统并对其演化规律进行了考察,得出了很多有益的结论。

损伤力学为研究岩石和裂隙岩体材料的结构性本构模型提供了有利的工具与方法。实际上,只要引入合适的损伤变量,就可以建立起具有弱化性质的本构关系。作为损伤材料而进行研究的节理岩体在工程中是广泛存在的,采用连续介质力学方法,适当地考虑节理面的力学效应,正是损伤力学研究问题的方法,它必将为节理岩体在岩体工程问题的研究中提供切实可行的研究途径,损伤力学这门学科在岩石力学中的应用将具有广阔的前景。

1.3 中间主应力效应的国内外研究现状

岩石力学的发展过程是试验和理论相互验证、补充和促进的过程,因此从试验和理论两个方面来分析中间主应力效应的相关研究更能反映其发展的现状,并能发现存在的问题,以便更好地进行下一步的工作。

1.3.1 国内外真三轴试验研究的历史回顾与现状

在 20 世纪 50 年代以后 Nadai、Drucker、Prager、Murrell、Hardin、Wiebols 和 Cook 等人开始研究考虑第二主应力情况下岩体的强度。Hoskins (1969) 的试验显示 σ_2 对岩石强度有显著影响。1971 年 Mogi 设计了一个高压真三轴仪器,并在几种岩石真三轴试验结果的基础上首次推导出完整真三轴强度准则。在这个开创性试验的基础上,Takahashi 和 Koide、Michdilis、Smart、Wawersik 等人在各自的实验室改进了 Mogi 的真三轴设备,并用改进的设备研究第二主应力对岩体强度的影响程度。Wisconsin 大学的实验人员进一步改进了 Mogi 的真三轴设备,他们考虑的情况更加复杂,并应用这个设备对高强的结晶岩石进行了相关试验,在不同加载模式和岩石类型的影响下,试验结果揭示了三个不同的压缩破坏模式,即微裂隙发育区域引起的剪切破坏、沿 σ_1 方向的劈裂和非膨胀剪切破坏。1999 年 B. G. D. SMART 等人首次设计了适用于圆柱试样的真三轴压力室,他用



24 根可以施加不同压力的管线来替代常规三轴的液体施加径向压力, 轴向仍然采用刚性加载。这确实是真三轴压力室设计上的一个创新, 而且它可以和常规三轴试验结果有效结合, 并且不用考虑不同试样尺寸带来的试验结果的不确定性。2000 年 B. Haimson 和 C. Chang 设计了一种 σ_3 用液压控制, σ_2 和 σ_1 采用刚性控制的高压压力室, 垂直方向加载, 可以测量应力和应变, 仪器采用伺服控制, 试样的最大尺寸达到了 $19\text{mm} \times 19\text{mm} \times 38\text{mm}$ 。他们对 Westerly 的花岗岩进行了一系列的试验, 并提出了真三轴岩体强度准则。

国内在 20 世纪 80 年代以前, 真三轴试验研究几乎等于空白, 现在国内对岩体真三轴试验的研究也比较少, 1985 年和 1987 年许东俊相继对岩石强度和变形随中主应力的变化进行了真三轴试验研究, 他认为在某一恒定 σ_3 下, σ_2 由 $\sigma_2 = \sigma_3$ 增加到 $\sigma_2 = \sigma_1$ 时, 强度有一个逐渐增大到最大值后又逐渐下降的过程, $\sigma_2 = \sigma_1 > \sigma_3$ 时的试样强度略高于 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 时的强度, 岩石越致密坚硬, 强度的围压和中主应力效应越大, 强度的围压效应越大的岩石其中主应力效应越大, 但中主应力效应远小于围压效应。1993 年, 高延法等对红砂岩进行了真三轴试验研究, 他认为各种岩石都存在中间主应力效应, 中间主应力的介入一般可使岩石的极限强度增大 30%, 其影响程度与小主应力的大小有关, 他推荐了分别适用于软弱岩类和坚硬岩类的三参数双剪应力和八面体剪应力强度准则。1995 年, 李广平等提出了真三轴受力条件下的岩石微观损伤力学模型, 建立了岩石损伤演化方程, 给出了损伤柔度的求解公式。数值分析表明, 中间主应力对岩石应力应变关系有明显的影响, 一般表现为随中间主应力的增加, 大主应力方向的变形减小, 小主应力方向的变形增大; 反之当大主应力很大时, 较大的中间主应力反而使大主应力方向变形增加, 小主应力方向变形减小。2001 年, 曾开华进行了水力劈裂的真三轴试验研究, 通过对中间主应力对水力劈裂的影响研究, 得出了中间主应力和小主应力对劈裂压力的影响规律, 提出了考虑中间主应力的水力劈裂计算分析方法。

近几年来, 我国岩石 (体) 真三轴仪器的研发和真三轴试验成果相继出现, 2003 年张坤勇等曾对国内真三轴的研发和应用做了总结和分析; 2004 年陈从新等研发的真三轴应力岩石裂隙渗流试验变形测量装置获得国家专利; 同年姜耀东等研发了一种新型的真三轴巷道模型试验台; 2005 年孙晓明研制的真三轴软硬非线性力学试验系统获得成功; 2005 年周云东等对真三轴试验中初始各向异性的消除进行了研究; 2006 年陈景涛等开展了高应力下岩石的真三轴试验研究; 2007 年高延法的专利真三轴压力箱获得批准; 2008 年邵生俊等申请了国家专利“一种三向独立加载压力室结构的真三轴仪”; 2008 年向天兵等对硬岩在开挖和支护应力路径下的破坏过程进行了真三轴和声发射试验研究; 2009 年石露等对真三轴试验中的端部摩擦效应进行了分析研究; 2009 年苏道刚、秦妖平、李小春、周辉、殷宗泽、杨光友等分别在真三轴仪的压缩装置、密封装置等方面获得了国家专利; 2009 年向天兵等对三向应力状态下单结构面岩石试样的破坏机制进行了研究并开展了相关的真三轴试验工作。2010 年朱维申等研制了真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统并开展了相应的研究工作; 2010 年刘自由等应用数值计算方法对层状岩体的三维应力作用下的强度变形特性进行了分析研究; 殷建华等研发了一种新型岩土力学真三轴仪加载装置——刚性滑板加柔性面的混合边界加载装置。孟庆敏等利用大尺寸真三轴模拟