

资助 国家自然科学基金重点项目 (编号: 41230637)  
国家自然科学基金青年基金项目 (编号: 41302231)  
中央高校基本科研业务费专项资金项目 (摇篮计划) (编号: CUGL140408)

RESEARCH ON MECHANICAL PARAMETERS  
AND STABILITY OF JOINTED ROCK MASS

# 裂隙岩体力学参数 及稳定性研究

吴琼 唐辉明 王亮清 雷国平 方堃 等著



中国地质大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

国家自然科学基金重点项目(编号:41230637)

国家自然科学基金青年基金项目(编号:41302231)

资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目(摇篮计划)(编号:CUGL140408)

# 裂隙岩体力学参数及稳定性研究

RESEARCH ON MECHANICAL PARAMETERS AND STABILITY OF JOINTED ROCK MASS

吴琼 唐辉明 王亮清 雷国平 方堃 等著



中国地质大学出版社  
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体力学参数及稳定性研究/吴琼,唐辉明,王亮清,雷国平,方堃等著. —武汉:中国地质大学出版社,2016. 11

ISBN 978-7-5625-3925-4

I. ①裂…

II. ①吴…②唐…③王…④雷…⑤方…

III. ①裂隙-岩石力学-研究

IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 262044 号

裂隙岩体力学参数及稳定性研究

吴琼 唐辉明 王亮清 雷国平 方堃 等著

责任编辑:徐润英

责任校对:代 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮编:430074

电 话:(027)67883511 传真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:220 千字 印张:8.5

版次:2016 年 11 月第 1 版

印次:2016 年 11 月第 1 次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3925-4

定价:55.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

# 前言

裂隙岩体力学参数是一切岩石相关理论研究的基础,同时也是岩石工程分析、评价和设计时必须考虑的重要因素。因此,正确认识裂隙岩体的力学性质,进而合理研究裂隙岩体稳定性具有重要的理论及现实意义。

岩体结构模型是裂隙岩体力学参数研究的基础。岩体中的结构面具有随机性、形态多样性和空间组合复杂性的特点,由于目前测量手段的限制,对岩体中真实存在的结构面进行三维精确描述是很难实现的。结构面网络模拟是一种研究岩体结构的有效手段,它基于蒙特卡罗模拟法,根据现场有限天然露头或人工开挖面上实测结构面几何参数的概率分布模型来推求服从这些分布规律的岩体内部结构面分布情况。国内外很多学者对结构面网络模拟进行了研究,但对模拟成果的工程应用研究不足,由于结构面网络模拟本身蕴含着“概率等效”的思想,因此,利用结构面网络模拟成果研究岩体宏观力学参数,进而与工程岩体稳定性评价相结合,是将结构面网络模拟成果应用于工程实际的有效途径。

目前岩石力学数值计算方法可分为连续介质法、非连续介质法和连续/非连续介质混合法。连续介质法将岩体等效为连续介质,将岩体简化成数学意义上的连续体来进行分析。非连续介质法将岩体视为岩石和结构面的集合体,这种方法对于岩体的描述比较真实,能够模拟出岩体中局部的应力变形情况。离散单元法是对裂隙岩体进行应力变形分析的一种强有力的数值计算方法,由于考虑了岩石块体和结构面之间的相互作用,离散单元法可以有效地计算复杂裂隙岩体在不同应力和位移边界条件下的力学行为,目前已成为解决岩体力学问题的一个重要手段。因此,本书在三维岩体结构模型和结构面力学特征研究的基础上,基于离散单元法研究裂隙岩体力学参数,探讨了基于等效连续及非连续方法的裂隙岩体稳定性评价方法,具有重要的理论研究意义与工程应用价值。

本书共分为6章,第1章由吴琼撰写,第2章由吴琼、唐辉明、王亮清撰写,第3章由方堃、吴琼、姜耀飞、刘超远、徐艳君、王晓晗撰写,第4章由吴琼、雷国平、唐辉明撰写,第5章由唐辉明、吴琼、王亮清撰写,第6章由吴琼撰写,最后由吴琼统稿。

国际著名岩石力学专家——美国亚利桑那大学 Kulatilake 教授在岩体结构及力学性质研究方面给予了指导,在此表示衷心的感谢。

在本书的撰写过程中得到了相关单位、专家和研究成员的大力支持,姜耀飞、徐艳君、王晓晗等参与了大量图件和文字的整理工作,在此一并表示感谢。

由于作者学识水平所限,书中的错误、缺点在所难免,敬请广大读者批评指正。

著者

2016年9月

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第1章 绪 论                        | (1)  |
| § 1.1 研究背景与意义                  | (1)  |
| § 1.2 国内外研究进展                  | (2)  |
| 1.2.1 裂隙岩体结构模型研究               | (2)  |
| 1.2.2 结构面力学特性研究                | (3)  |
| 1.2.3 裂隙岩体力学参数研究               | (4)  |
| 1.2.4 裂隙岩体稳定性研究                | (7)  |
| § 1.3 主要研究内容                   | (8)  |
| 第2章 裂隙岩体三维结构模型研究               | (10) |
| § 2.1 概 述                      | (10) |
| § 2.2 三维结构面网络建模流程              | (11) |
| 2.2.1 研究区工程地质条件调查和结构面数据采集      | (12) |
| 2.2.2 岩体结构统计均质区的划分             | (12) |
| 2.2.3 结构面优势组的划分和结构面产状模型的建立     | (13) |
| 2.2.4 结构面迹长和三维尺寸模型的建立          | (13) |
| 2.2.5 结构面间距模型的建立和结构面密度的求解      | (13) |
| 2.2.6 初始三维结构面网络模型的建立           | (13) |
| 2.2.7 基于实测数据对结构面网络模型进行验证和调整    | (14) |
| § 2.3 结构面张量理论                  | (14) |
| § 2.4 工程实例                     | (15) |
| 2.4.1 工程地质概况                   | (15) |
| 2.4.2 三维结构面网络模型的建立和验证          | (17) |
| 2.4.3 结构面张量研究                  | (29) |
| 第3章 结构面力学特性研究                  | (32) |
| § 3.1 概 述                      | (32) |
| § 3.2 基于 PFC 颗粒流数值试验的结构面力学特性研究 | (32) |
| 3.2.1 数值试验模型的建立及边界条件           | (32) |
| 3.2.2 同性结构面剪切力学特性              | (35) |
| 3.2.3 异性结构面剪切力学特性              | (37) |
| 3.2.4 异性结构面剪切破坏过程研究            | (42) |
| § 3.3 基于相似材料模型试验的结构面力学特性研究     | (44) |
| 3.3.1 相似材料配比及试样制备              | (44) |
| 3.3.2 结构面相似材料模型试验装置改进          | (48) |
| 3.3.3 相似材料力学测试信息管理系统           | (55) |

|        |                         |       |
|--------|-------------------------|-------|
| 3.3.4  | 结构面相似材料直剪试验及结果分析        | (58)  |
| 第4章    | 裂隙岩体力学参数研究              | (63)  |
| §4.1   | 概述                      | (63)  |
| §4.2   | 离散元数值试验研究中的几个关键问题       | (63)  |
| 4.2.1  | 非贯通节理模型的建立              | (64)  |
| 4.2.2  | 一种非连续/等效连续混合研究方法        | (66)  |
| 4.2.3  | 结构面变形本构模型及其 FISH 语言开发   | (68)  |
| 4.2.4  | 三维离散元数值试验设计方案           | (70)  |
| 4.2.5  | 边界应力对裂隙岩体力学性质的影响        | (71)  |
| §4.3   | 数值试验旋转模型的建立             | (74)  |
| 4.3.1  | 旋转角度的选取                 | (74)  |
| 4.3.2  | 旋转后模型中结构面网络的确定          | (75)  |
| 4.3.3  | 旋转后边界应力的求解              | (75)  |
| §4.4   | 工程实例                    | (76)  |
| 4.4.1  | 不同尺寸不同位置岩体模型的建立         | (76)  |
| 4.4.2  | 模型边界条件                  | (77)  |
| 4.4.3  | 岩块和结构面的本构模型             | (77)  |
| 4.4.4  | 岩体力学参数的三维离散元数值试验结果      | (81)  |
| 4.4.5  | 岩体力学参数随尺寸的变化规律及 REV 的确定 | (86)  |
| 4.4.6  | 岩体力学参数与结构面张量的关系         | (90)  |
| 4.4.7  | 表征单元体结构面系统空间各向异性特征      | (92)  |
| 4.4.8  | 表征单元体力学参数空间各向异性特征       | (92)  |
| 4.4.9  | 表征单元体力学参数空间张量           | (95)  |
| 4.4.10 | 表征单元体本构模型               | (97)  |
| 第5章    | 裂隙岩体稳定性研究               | (98)  |
| §5.1   | 概述                      | (98)  |
| §5.2   | 等效连续介质法                 | (98)  |
| §5.3   | 非连续介质法                  | (100) |
| §5.4   | 工程实例                    | (101) |
| 5.4.1  | 基于等效连续介质法的裂隙岩体稳定性分析     | (101) |
| 5.4.2  | 基于非连续介质法的裂隙岩体稳定性分析      | (109) |
| 5.4.3  | 等效连续介质法和非连续介质法计算结果对比    | (113) |
| 第6章    | 结论与展望                   | (116) |
| §6.1   | 结论                      | (116) |
| §6.2   | 展望                      | (117) |
| 参考文献   |                         | (119) |

# 第1章 绪论

## § 1.1 研究背景与意义

岩体是在地质历史时期形成的具有一定组分和结构的地质体。由于经受过复杂的地质作用,岩体中分布着各种结构面,如断层、节理、裂隙等,这些结构面彼此组合将岩体切割成形态不一、大小不等和成分各异的岩块。由于岩体结构的复杂性,人们始终无法完全了解复杂岩体的力学性质。裂隙岩体力学参数是一切岩石相关理论研究的基础,同时也是岩石工程分析、评价和设计时必须要考虑的重要因素。因此,正确认识裂隙岩体的力学性质,进而合理研究裂隙岩体稳定性具有重要的理论及现实意义。

岩体结构模型是裂隙岩体力学参数研究的基础。岩体中的结构面具有随机性、形态多样性和空间组合复杂性的特点,由于目前人类测量手段的限制,对岩体中真实存在的结构面进行精确描述是不可能实现的。结构面网络模拟是一种研究岩体结构的有效手段,它基于蒙特卡罗模拟法,根据现场有限天然露头或人工开挖面上实测结构面几何参数的概率分布模型来推求服从这些分布规律的岩体内部结构面分布情况。国内外很多学者对结构面网络模拟进行了研究,但对模拟成果的准确性和模拟成果的工程应用研究不足,少数学者基于结构面网络模型确定岩质边坡潜在破坏面或可动块体,但是网络模拟法所建立的岩体结构面与实际结构面并不是一一对应的,这种“不确定性”使得类似的工程应用效果欠佳。由于结构面网络模拟本身蕴含着“概率等效”的思想,因此,利用结构面网络模拟成果研究岩体宏观力学参数,进而与工程岩体稳定性评价相结合,是将结构面网络模拟成果应用于工程实际的有效途径。

目前岩石力学数值计算方法可分为连续介质法、非连续介质法和连续/非连续介质混合法。连续介质法将岩体等效为连续介质,将岩体简化成数学意义上的连续体来进行分析,包括有限元法、有限差分法和边界元法。非连续介质法将岩体视为岩石和结构面的集合体,这种方法对于岩体的描述比较真实,能够模拟出岩体中局部的应力变形情况,主要包括离散单元法、不连续变形分析法(DDA)和数值流形元法(NMM)。由Cundall(1971)提出并由Lemos等(1985)、Cundall(1988)、Hart等(1988)改进的离散单元法是对裂隙岩体进行应力变形分析的一种强有力的数值计算方法。这种方法将岩体视为一系列刚性或者可变形块体的组合,结构面被看作块体之间的独立边界。离散单元法不仅在块体内部运用了连续理论,也应用力的准则来计算块体之间的作用力以及位移法则来计算每个块体在不平衡力作用下的运动规律。由于考虑了岩石块体和结构面之间的相互作用,离散单元法可以有效地计算复杂裂隙岩体在不同应力和位移边界条件下的力学行为。同时,该方法是一种显式求解方法,在不增加计算次数的情况下可以进行岩块和结构面的大尺度位移、大角度旋转以及复杂本构关系的计算。由于能够充分考虑岩体中结构面的力学行为,离散单元法已成为解决岩体力学问题的一个重要手段。

因此,在三维岩体结构模型和结构面力学特征研究的基础上,基于离散单元法研究裂隙

岩体力学参数,探讨基于等效连续及非连续方法的裂隙岩体稳定性评价方法,具有重要的理论研究意义与工程应用价值。

## § 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 裂隙岩体结构模型研究

20 世纪 70 年代,国际岩石力学协会提出了要对岩体中的结构面进行定量描述, Priest 和 Hudson (1976)、Baecher (1977) 等通过研究发现,岩体中结构面的采样参数具有一定的统计特征,自此学者们开始利用统计学观点进行结构面网络建模的研究。国外 Veneziano (1978)、Long 等 (1982)、Robinson (1983)、Kulatilake 等 (1984, 1985, 1986, 1988, 1990)、Andersson 等 (1984)、Billaux 等 (1987)、Dershowit & Einstein (1988)、Sahimi (1993)、Xu & Dowd (2010) 先后对结构面网络模拟进行了研究并将其应用于岩石力学领域;国内潘别桐和熊承仁等 (1989)、徐光黎和潘别桐等 (1993)、陈剑平 (1995, 2001)、贾洪彪和唐辉明等 (2002, 2008)、张发明等 (2004)、汪远年等 (2004)、章广成 (2008)、吴月秀 (2010) 等分别从二维或三维角度对结构面网络模拟的研究方法进行了探讨。

不同区域的岩体结构可能会有很大差异, Kulatilake 等 (1996, 1997) 认为在进行结构面网络模拟之前,首先要进行统计均质区的划分。从严格意义上来说,若两个区域被判定为同一个统计均质区,两个区域的结构面应当具有相似产状、间距、尺寸分布形式以及相似的形状、粗糙度、节理密度和本构参数。但由于研究条件的限制,目前在划分统计均质区时仅考虑节理组数、各组节理的产状分布以及通过观察得到的现场节理条件。Kulatilake 等 (1996, 1997) 利用修正的 Miller 法、等面积坐标图法以及盒子分形维数法对三峡大坝永久船闸附近隧道沿线的岩体进行了统计均质区的划分并对各个统计均质区岩体中节理的几何参数进行统计分析。国内范留明等 (2003) 根据结构面发育的特点以及工程实际需要,提出了一种基于结构面密度的岩体结构均质区划分方法 (密度分区方法),并将其应用于西南某大型水电站工程中。由于野外露头的限制和实际岩体结构的复杂性,统计均质区的划分常常被人们忽视,但岩体结构统计均质区的准确划分是保证结构面网络模拟成果准确有效的基础,应得到研究学者的重视。

在进行结构面产状建模之前,首先要对产状数据进行采样误差的修正。Terzaghi (1965)、Wathugala 等 (1990) 对一维和二维条件下节理产状误差的校正方法进行了研究。在坚硬的岩石中,结构面通常成组出现并沿特定的方向伸展,结构面优势组可通过等面积图或统计方法进行划分。结构面产状概率模型的建立是结构面网络模拟的重要环节,国外学者大多将倾向和倾角视为二元变量,对其概率分布形式进行研究,归纳起来主要有以下几种分布类型:①双变量正态分布。McMahon (1971, 1974)、Maranhgo (1974)、Zanbak (1977) 通过研究发现,在大多数情况下结构面的倾向和倾角服从双变量正态分布;Gaziev & Tiden (1979) 利用双变量的正态分布函数对结构面产状数据进行拟合;Miller & Borgman (1985) 认为结构面产状应符合双变量正态分布。②Fisher 分布。Watson & Irving (1957) 考虑到结构面倾向与倾角为两个独立的变量,将 Fisher 分布作为结构面产状的概率分布类型。③Bingham 分布。Shanley & Mahtab (1976) 利用 Bingham 分布对结构面产状

数据进行拟合。以上方法考虑了节理倾向和倾角的联合分布,均假设倾向与倾角之间的相关系数为零。而实际结构面倾向与倾角之间应该存在着某种相关关系,但由于计算的复杂性,现有成果大多在简化的假设条件下开展。

结构面尺寸是结构面的重要几何参数之一。Robertson (1970) 通过研究发现,结构面在走向上与倾向上的长度大致相同。后来学者们开始用泊松面和圆盘对结构面的形状进行描述 (Beacher 等, 1977; Bridges, 1976)。在二维露头上观察到的结构面迹长是结构面三维尺寸的反映,结构面平均迹长的估算方法一直是岩石力学界研究的热点。Cruden (1977)、Baecher & Lanney (1978)、Priest & Hudson (1981)、Zhang & Liao (1990) 对基于测线法的平均迹长估算方法进行了研究; Paul (1981) 假设结构面迹线中心点服从均匀分布,利用采矿运输通道侧壁的节理数据推导出了结构面平均迹长的估算公式,该公式校正了采样误差的影响,但假设同一组结构面相互平行; Kulatilake & Wu (1984) 对 Paul 的方法进行了改进,推导出了结构面产状符合一定概率密度函数情况下矩形窗口中平均迹长的估算公式; Mauldon (1998) 提出了任意多边形窗口中平均迹长的估算方法,并以特例形式给出了矩形窗口和圆形窗口中平均迹长的估算公式; Zhang & Einstein (1998) 也推导出了圆形窗口中平均迹长的估算公式。然而,基于圆形窗口的结构面平均迹长估算方法存在以下不足之处: ①假设每条节理迹线在露头上出现的概率一致,这种假设只适用于节理产状完全一致的情况,与实际情况有一定出入; ②仅适用于露头为平面的情况,无法进行曲面露头上平均迹长的估算。Song (2006) 将 Mauldon 基于圆形窗口的平均迹长估算公式扩展到非平面情况; Wu 等 (2011) 利用汶川兴文坪地区一个人工露头的节理数据对平均迹长估算方法开展了对比研究。另外还有一些国内的其他学者对平均迹长的估算方法进行了有益的探讨,如伍法权 (1993)、黄国明和黄润秋 (1999)、陈剑平等 (2001)、黄润秋和范留明 (2003)、王贵宾等 (2006)、吴琼和唐辉明等 (2008)。

结构面平均间距和线密度是基于结构面与测线相交的位置进行估算的。在实际测量中,测线的长度是有限的,但无偏估算应该基于无限长的测线。Sen & Kazi (1984) 提出了结构面间距测量误差的修正方法。Karzulovic & Goodman (1985) 提出了根据节理间距估算结构面法向线密度的公式。目前估算结构面面密度的方法主要有两种:一种是基于矩形窗口的估算方法;另一种是基于圆形窗口的估算方法。Wu 等 (2011) 利用汶川兴文坪的节理数据对两种方法进行了对比分析,结果表明基于矩形窗口的估算方法精度更高。体密度是三维结构面网络模拟中直接利用的一个重要参数,它与线密度 (或面密度)、结构面直径和结构面产状有关。结构面位置由其中心点坐标确定。研究表明,圆盘的中心点服从三维泊松分布,且该分布是均匀各向同性的,因此可认为结构面中心点在研究区域内呈均匀分布。

### 1.2.2 结构面力学特性研究

裂隙岩体中的结构面对岩体的变形破坏起着关键性的控制作用。国内外学者对于岩体结构面剪切力学特性的研究从未间断过,而这些研究主要集中于两侧壁岩岩性相同的同性结构面。国外 Barton (1973)、Patton (1973)、Ladanyi & Archambault (1977)、Desai 等 (1984)、Goodman (1989)、Saeb (1990)、Desai & Ma (1992)、Haberfield & Johnston (1994)、Maksimovic (1996)、Indraratna & Haque (2000)、Grasselli & Egger (2003)、Vallier (2010) 先后开展了结构面剪切性质研究,并提出了相应的抗剪强度准则。国内潘别桐 (1989) 讨论了各种

荷载条件下结构面的变形特性、变形曲线分析表达式、变形参数及其在岩体稳定和渗流分析中的应用；王建峰和李智毅等（1993）对 7 组具不同岩性、不同粗糙度及起伏度的红层样品进行了试验，探讨了在试验过程中所揭示的强度周期性变化现象；杜守继等（2006）基于不规则人工岩石节理剪切试验，分析了岩石节理剪切变形特性及与变形历史的依存关系；杜时贵等（2010）基于相似材料模型试验法对岩体结构面抗剪强度机制开展了研究。结果表明，利用模拟结构面代替原岩结构面进行直剪试验，模拟结构面表面的磨损程度、粗糙度系数衰减规律及破坏形式均与原岩结构面相似，且模拟结构面抗剪强度直剪试验结果与理论计算值相差不大；朱小明、李海波等（2011）利用高强石膏材料浇筑含不同一阶和二阶起伏度的岩体节理模拟试件，通过开展不同一阶和二阶起伏度及不同法向应力条件下的剪切试验，对其剪切强度特性进行了研究；曹平、范祥等（2011）采用试验方法研究了岩石节理抗剪强度与表面形貌之间的关系；史玲和蔡美峰（2012）通过建立楔形物理模型，研究了岩石节理在固定法向压力条件下的剪切特性；张清照等（2012）基于规则锯齿形结构面剪切试验，对规则锯齿形结构面的力学特性进行了基础性研究，提出了结构面剪切刚度计算模型以及结构面爬坡角与粗糙度系数之间的经验关系。

另外，一些学者相继开展了结构面本构模型的研究。国外 Goodman（1968）考虑结构面切向和法向应力的耦合作用，基于线弹性理论提出了岩体结构面的 Goodman 单元；Desai（1984）在 Goodman 单元模型基础上提出了循环荷载作用下的接触面非线性模型；Clough（1971）根据直剪试验结果，采用类似 Duncan - Chang 模型方法提出了剪应力与剪切变形的双曲线模型。随后 Haberfield & Johnston（1994）、Grasselli & Egger（2003）、Goh 等（2011）先后开展了结构面剪切性质研究，提出了不同类型的结构面本构模型。国内殷有泉和张宏（1981）在塑性力学的理论框架内建立了节理的本构关系；Fan & Yin（1988）进一步引入水和温度对节理性质的影响；殷有泉（1994）在弹塑性损伤的理论框架内，讨论了节理等地质间断面的本构模型，该模型能够反映节理面的损伤弱化、扩容和弹性刚度劣化等复杂特性；赵坚（1998）考虑节理表面粗糙度和吻合度的影响，提出了岩石节理剪切强度的 JRC - JMC 模型；许宏发和金丰年（2000）提出了一种岩体节理剪切变形的幂函数模型，并对模型中参数的影响因素进行了分析；唐志成和夏才初等（2011）提出节理的硬化 - 软化全剪切本构模型，采用单个函数反映节理剪切位移曲线的变化特征，同时采用分段函数考虑剪胀特征，对节理的剪胀现象进行了分析；徐磊和任青文（2011）针对在经典连续介质力学理论框架内建立岩体结构面本构模型的缺点，基于岩体结构面的实际受力变形特性，采用直接法建立了一种新型岩体结构面本构模型。

### 1.2.3 裂隙岩体力学参数研究

裂隙岩体力学参数的合理确定对于保证岩石工程的安全以及相关设计的经济合理起着至关重要的作用。裂隙岩体力学参数与很多因素有关，如岩块和结构面的力学性质、结构面的几何分布情况、岩体的现场应力条件、水文地质条件等。目前，裂隙岩体力学参数的确定方法主要有试验法、经验关系法、解析法和数值试验法。

#### 1.2.3.1 试验法

试验法包括室内试验法和原位试验法。室内试验法可用于确定含有微节理的小尺寸试件

的力学参数, 由于这些试件不能包含现场实际存在的结构面组合, 因而其试验结果往往与实际岩体力学参数有较大差异。原位试验法可进行大尺寸岩体试验, Bieniawski (1978) 和 Heuze (1980) 基于原位试验法对岩体强度和变形参数进行了研究。结果表明, 岩体力学参数存在尺寸效应, 这种尺寸效应依赖于测试岩体中的结构面分布情况, 但在早期的研究中, 没有在试验前测量试样岩体的结构面几何分布特征, 因而只能从定性的角度分析岩体力学参数与岩体尺寸的关系。为了更加准确地研究裂隙岩体力学参数的变化规律, 应利用一系列不同尺寸并包含不同节理组合的试样开展力学试验, 但是这种类型的试验无法在室内完成, 而原位试验又耗时耗力且费用昂贵。因此, 很多学者在室内进行相似材料模型试验 (John, 1970; Brown, 1970; Ladanyi & Archambault, 1970; Einstein & Hirschfeld, 1973; Chappel, 1974; Heuze, 1980; Jing 等, 1992; 朱维申和何满超, 1995; Yang 等, 1998; McDermott 等, 2003), 研究裂隙岩体的力学性质, 这种方法能够很好地控制岩体结构, 进而得到岩体力学参数与岩体结构之间的关系。

### 1.2.3.2 经验关系法

经验关系法是通过建立岩体力学参数与岩体分类指标之间的经验关系来估算岩体强度和变形参数。很多学者对裂隙岩体强度参数的经验估算法进行了研究。如 Hoek & Brown (1980, 1983) 提出了 Hoek-Brown 经验强度准则, 并给出了经验参数  $m$ 、 $s$  的取值方法, 1988 年又通过研究提出了修正后的  $m$ 、 $s$  值; Priest & Brown (1983) 首次建立 RMR 指标与岩体经验参数  $m$ 、 $s$  的统计关系; Hoek (1988) 对其略作修改, 得到了目前广为应用的经验公式; Bieniawski (1976) 将 RMR 值与  $Q$  值联系起来, 通过建立两者的经验关系得到用  $Q$  指标估计经验参数  $m$ 、 $s$  的方法; Palmstrom (1996) 提出基于 RMI 的岩体分类方法, 定义了节理状态参数  $JP$ , 并分别给出了扰动岩体和未扰动岩体的经验参数  $m$ 、 $s$  与节理状态参数  $JP$  的关系表达式; 宋建波 (2002) 在其专著中分析了经验参数  $m$ 、 $s$  对岩体强度的影响; Cai 等 (2004) 提出了利用 GSI 指标估算岩体强度参数的方法, 并于 2007 年将上述方法扩展到残余强度参数的估算中; Dinc 等 (2010) 提出了一种考虑岩块性质对岩体强度折减系数影响的岩体强度参数经验估算法。同样裂隙岩体变形参数的经验估算法研究也得到了学者们的关注。如: Bieniawski (1973) 建立了岩体分类指标与岩体变形参数的经验关系; Hoek (1980)、Nicholson & Bieniawski (1990)、Mitri 等 (1994) 先后对岩体变形模量与 RMR 分类指标之间的经验关系进行了研究; Palmstrom (1996) 提出了基于 RMI 指标估算岩体变形模量的表达式; Hoek & Brown (1997) 基于 GSI 指标提出了适用于单轴抗压强度不大于 100MPa 的岩体变形模量估算公式; Barton (2002) 将单轴抗压强度引入岩体变形模量的估算公式; Kayabasi 等 (2003) 推导了利用岩块弹性模量 ( $E_i$ )、RQD 和风化系数 (WD) 三个参数估算岩体变形模量的经验公式, 随后 Gokceoglu 等 (2003) 引入单轴抗压强度对该公式进行修正, 得到了改进的裂隙岩体变形模量估算公式; 李同录等 (2004) 从损伤力学角度出发, 建立了裂隙岩体等效变形参数与几何损伤参数之间的关系; Zhang 和 Einstein (2004) 提出了通过 RQD 与岩块弹性模量估算岩体变形模量的方法。经验方法是在工程实际中确定岩体力学参数最为常用的方法, 它能综合考虑影响裂隙岩体强度及变形性质的各种因素, 是在长期工程实践的基础上逐渐总结积累所取得的经验成果。

### 1.2.3.3 解析法

解析法将裂隙岩体视为岩块和结构面的组合,并假设裂隙岩体的力学行为是岩块和结构面两个部分力学行为的叠加,在此基础上推导出岩体的整体强度或变形参数的数学表达式。解析法的研究一直受到学者们的关注,国外 Salmon (1968)、Singh (1973)、Morland (1976)、Amadei & Goodman (1981)、Gerrard (1982)、Fossum (1985)、Hu & Huang (1993) 对基于解析法的岩体力学参数确定方法进行了探讨。国内徐光黎 (1991) 根据等效应变原理,利用解析法建立节理应力应变本构方程,推导出岩体变形模量随空间方位变化的预测方程;朱维申和王平 (1992) 将工程范围的规则裂隙岩体看作是由各向同性的岩石单元与等效各向异性的节理岩石单元构成的统一体,在深入分析节理岩石单元的变形与强度特性的基础上,详细推导了等效变形与等效强度的基本公式,提出了一种等效连续模型;张志强 (2009) 基于变形等效原理和裂隙岩体细观变形特征,分别推导出含单组和多组非贯通裂隙岩体的变形参数表达式,研究了岩体变形模量、泊松比、剪切模量等变形参数随岩体裂隙连通率、裂隙倾角、裂隙厚度率的变化规律。

### 1.2.3.4 数值试验法

数值试验法是近年来发展起来的确定裂隙岩体力学参数的一种有效途径。该方法的基本思路为:首先建立岩体结构模型,在考虑岩块和结构面本构模型的基础上,利用数值方法在模型上施加荷载来模拟力学试验的过程,以此来确定裂隙岩体的力学参数。数值试验法的优点在于:①允许在岩体中按照实际结构面的分布情况建立岩体结构模型;②能够考虑节理之间以及节理与岩块之间的相互作用;③可以方便地模拟原位试验无法达到的大尺度岩体试验,与现场原位试验相比具有方便高效、经济实用的优点。周维垣和杨延毅 (1992) 基于节理裂隙的野外勘探资料建立岩体的损伤断裂模型,并利用二维有限元方法模拟力学试验,获得应力-应变全过程曲线和岩体变形模量及抗剪强度参数;朱维申和王平 (1992) 以规则裂隙岩体为研究对象,提出了一种等效连续模型,通过非线性有限元数值试验法完成了裂隙岩体力学特性的模拟;李建林 (1997) 利用三维有限元法进行数值试验,研究了三峡工程永久船闸高边坡岩体在卸荷应力状态下的宏观力学参数;何满潮等 (2001) 根据室内完整岩块试验参数,结合野外工程岩体结构特点进行计算机数值模拟试验,进而确定工程岩体的力学参数;陈伟忠等 (2008) 根据锦屏二级水电站大理岩裂隙统计分布规律及岩块和结构面的力学特征试验成果,确定岩块和结构面的本构模型,利用数值试验法研究了岩体的宏观力学参数;范雷 (2009) 在其博士论文中利用二维离散元 UDEC 进行数值试验,分别研究了层状岩体结构、双组贯通裂隙岩体结构和耦合随机分布三种类型的裂隙砂岩岩体的力学参数;胡波 (2010) 在其博士论文中分别采用“基于现场地质测绘的离散元”和“基于高清晰数码成像识别技术的 RFPA”两种岩体数值试验方法,对锦屏一级水电站和白鹤滩水电站坝址区岩体的数值试验参数进行了研究。离散单元法是一种非连续介质数值方法,它能考虑岩石块体和结构面之间的相互作用,非常适合用来计算复杂裂隙岩体的力学行为,目前较为成熟的离散元商业软件有 UDEC 和 3DEC, UDEC 和 3DEC 中节理建模的条件是将岩体模型划分为若干二维多边形或者三维多面体,对于贯通节理而言,这一条件很容易满足,而非贯通节理的建模却很难实现。因此,非贯通节理的建模问题成为人们应用 UDEC 和 3DEC 解决岩石力

学问题的“瓶颈”。有些学者利用 UDEC 进行岩体力学参数的数值试验研究,但研究仅限于含有贯通节理的岩体,然而非贯通节理在自然界是广泛存在的。为了解决这一问题,引入“假想结构面”的概念,“假想结构面”是由 Kulatilake 等(1992)提出的,是力学性质与完整岩块的力学性质一致的结构面。在 UDEC 或 3DEC 中设置“假想结构面”,可以保证将岩体模型划分为若干二维多边形或三维多面体,可解决非贯通节理的建模问题。本书后文将采用该方法建立岩体结构模型并基于三维离散元方法开展裂隙岩体力学参数研究。

#### 1.2.4 裂隙岩体稳定性研究

裂隙岩体中包含着各类结构面,这些结构面的性质对裂隙岩体的稳定性具有重要影响。数值模拟方法被广泛应用于裂隙岩体稳定性研究之中,目前岩石力学数值计算方法可分为连续介质法、非连续介质法和连续/非连续介质混合法。

##### 1.2.4.1 连续介质法

连续介质法将岩体等效为连续介质,将岩体简化成数学意义上的连续体来进行分析,包括有限元法、有限差分法和边界元法。有限元法(FEM)是一种将连续体离散化为若干个有限大小的单元体的集合,以求解连续体力学问题的数值方法。有限元法发展至今已非常成熟,是目前岩石力学中应用最为广泛的数值方法,为了弥补其在模拟岩体非连续结构面方面的不足,一些学者提出了专门模拟岩体结构面的特殊单元对其进行完善;有限差分法(FDM)是力学中将求解微分方程问题转化为求解差分方程的一种数值解法,有隐式和显式两种,目前被广为采用的是显式有限差分法,如 ITASCA 公司开发的 FLAC 软件就是基于显式有限差分法,在岩土工程界得到了广泛的应用;边界元法(BEM)是将力学中的微分方程的定解问题化为边界积分方程的定解问题,再通过边界的离散化与待定函数的分片插值求解的数值方法,在岩体力学工程问题中,边界元法非常适合模拟无限大区域,也是分析裂纹扩展最有效的方法。

##### 1.2.4.2 非连续介质法

非连续介质法将岩体视为岩石和结构面的集合体,这种方法对于岩体的描述比较真实,能够模拟出岩体中局部的应力变形情况,主要包括离散单元法、不连续变形分析法(DDA)和数值流形元法(NMM)。由 Cundall(1971)提出并由 Lemos 等(1985)、Cundall(1988)、Hart 等(1988)改进的离散单元法是适合进行裂隙岩体应力变形分析的数值计算方法。由于能够充分考虑岩体中结构面的力学行为,离散单元法已成为解决岩体力学问题的一个重要手段,目前已经形成了一些比较成熟的商业软件,如 UDEC 和 3DEC。不连续变形分析法是石根华和 Goodman(1989)基于岩体介质非连续性理论提出的一种数值分析方法,它可以计算结构面的位错、滑移、开裂和旋转等大位移的静力和动力问题,不连续变形分析法的提出在世界岩石力学界引起了强烈反响。数值流形元法是石根华于 1995 年提出的,是一种包含有限元和解析法的高层次数值方法,在这种统一计算形式中,有限元法和不连续变形分析法是其中的两个特例,数值流形元法适合对岩体进行大变形分析,但由于对任意形状的覆盖,权函数的选取及解析积分的求解还存在一定的困难,因此还未得到广泛应用。

### 1.2.4.3 连续/非连续介质混合法

由于连续介质法和非连续介质法各有优缺点,两种方法并没有哪一种有绝对的优势,因此,在解决实际岩体工程问题时有时采用连续/非连续介质混合法,即混合使用连续介质法和非连续介质法。目前已有学者提出了一些混合模型,如 DEM/BEM 混合模型 (Lorig & Brady, 1982、1984、1986)、DEM/DFN 混合模型 (Wei & Hudson, 1998)、DEM/FEM 混合模型 (Pan & Reed, 1991)、BEM/FEM 混合模型 (Pottler & Swoboda, 1986)。这种方法能够使连续介质法和非连续介质法互为补充,更加准确地刻画裂隙岩体的力学行为。

## § 1.3 主要研究内容

本研究内容主要包括以下四个方面:

(1) 裂隙岩体结构模型研究。开展了裂隙岩体三维结构建模方法研究,介绍了三维结构面网络模拟的基本流程及结构面张量基本理论。在此基础上,研究了贵州省鱼简河水库坝址区岩体三维结构面网络模型的建立方法,并基于实测数据对岩体结构模型进行了验证;在已建立的岩体结构模型的基础上,计算了不同位置不同尺寸岩体的结构面张量参数,并对结构面张量参数的尺寸效应进行了分析。

(2) 结构面力学特征研究。分别基于 PFC 数值试验及相似材料模型试验开展了结构面力学特征研究。基于 PFC 数值试验分别研究了同性结构面和异性结构面的剪切应力应变关系,重点探讨了异性结构面剪切特征的影响因素(法向应力、表面形态、壁岩组合)及其作用规律,研究了异性结构面的剪切破坏过程。以水泥、石膏、微硅粉、标准砂、水等混合而成的材料开展结构面相似材料模型试验,结合力学性质测试结果确定了相似材料配比,开展了异性结构面力学特性及破坏机理的研究。同时,进行了相似材料模型试验装置的改进,研发了不同表面形态结构面制样模具、结构面试样浇筑中的防沉降装置和直剪试验中多试样浇筑模具,开发了相似材料力学测试信息管理系统。

(3) 裂隙岩体力学参数研究。对基于三维离散元仿真试验的裂隙岩体力学参数尺寸效应及空间各向异性特征研究方法进行探讨,解决了复杂裂隙岩体三维离散元仿真试验中的几个关键问题,包括非贯通节理的建模问题、结构面本构模型和复杂裂隙岩体模型的建立及计算问题。以贵州省鱼简河水库坝址区裂隙岩体为例,系统开展了裂隙岩体力学参数研究,包括:①基于三维离散元仿真试验,得到了研究区裂隙岩体抗压强度折减系数、变形模量折减系数、剪切模量折减系数、体积模量折减系数以及泊松比随岩体尺寸的变化规律,确定表征单元体尺寸约为 18m;②利用结构面张量综合描述裂隙岩体中结构面系统的几何分布特征,分别建立了研究区裂隙岩体抗压强度折减系数、变形模量折减系数、剪切模量折减系数、体积模量折减系数与结构面张量参数之间的关系表达式;③基于结构面张量探讨了研究区裂隙岩体表征单元体结构面几何分布的空间各向异性,采用模型旋转的方法,得到了三维空间任意 45°方向上研究区裂隙岩体表征单元体力学参数的变化规律,确定了各力学参数的空间张量及其主值和主方向,分别绘制了研究区裂隙岩体表征单元体抗压强度、变形模量及剪切模量的三维椭球体;④建立了研究区裂隙岩体的正交各向异性本构模型。

(4) 裂隙岩体稳定性研究。分别基于等效连续介质法和非连续介质法开展了贵州省鱼简

河水库坝址区裂隙岩体稳定性研究。在等效连续介质方法中,基于 REV 力学参数空间张量研究贵州省鱼简河水库导流洞出口段的稳定性,考虑水平应力系数对稳定性分析结果的敏感性,得到不同水平应力系数下不同截面处导流洞围岩的弹性变形特征。同时,基于非连续介质法,探讨贵州省鱼简河水库导流洞出口段的稳定性,对比验证了基于连续介质法的 REV 工程应用效果。两种方法所得的导流洞围岩最大位移数值较为接近,说明基于 REV 的等效连续介质法是合理的。与等效连续介质法不同的是,非连续介质法所得的导流洞围岩位移分布不规则,明显受到结构面空间分布特征的影响。两种方法的计算结果表明,导流洞围岩变形量很小(小于 2.5mm),且不存在塑性破坏区,说明导流洞围岩较为稳定,与实际工程情况一致。

## 第2章 裂隙岩体三维结构模型研究

### § 2.1 概 述

岩体结构模型是裂隙岩体力学参数研究的基础。由于现有测量手段的限制,对岩体中真实结构面进行精确描述是很难实现的。结构面网络模拟基于蒙特卡罗模拟法,该方法根据现场有限天然露头或人工开挖面上实测的结构面几何参数的概率分布规律来推求岩体内部结构面的分布情况,是目前研究复杂裂隙岩体中结构面几何分布特征最为有效的手段。由于结构面网络模拟涉及众多环节,每个环节的统计分析和模型建立都将影响最终的模拟成果,而现有研究对结构面网络模拟准确性论证研究不足,所建立岩体结构模型的可靠性难以得到保障。

目前,国内外有些学者对结构面网络模拟的成果持怀疑态度,他们认为天然结构面的分布及类型纷繁复杂,结构面网络模拟很难精确刻画实际结构面的真实分布形式。但是,由于野外岩体露头的尺寸以及目前人类测量手段的限制,对岩体内结构面的几何参数进行系统而确定性的测量是很困难的,这就使得对岩体中真实存在的结构面进行完备描述是不可能实现的。结构面网络模拟是目前研究复杂裂隙岩体结构较为有效的手段,它根据有限天然露头或人工开挖面上结构面的几何参数来推求岩体内部的结构面参数,因而所生成的节理网络系统中结构面的大小和位置与实际结构面并不是一一对应的,而是具有相似的统计分布规律,基于该结构面系统开展研究所得到的岩体力学性质与实际岩体力学性质应该是相似的。因此,结构面网络模拟的过程包含着一种“等效”和“近似”的思想。目前结构面网络模拟中存在的问题是,大多数学者采用纯数学和统计的方法进行岩体结构研究,对结构面网络模拟的适用条件分析不足,模拟过程与工程地质条件的结合不够紧密。实际岩体中结构面的发育规律与现场的工程地质条件密不可分,从工程地质角度对结构面网络模拟在不同工程应用中的适宜性进行评价,将结构面网络模拟的过程与岩体的构造发育历史相结合,对保证结构面网络模拟成果能够较为准确地刻画实际岩体结构面的分布规律具有重要意义。下面分别从结构面类型、基岩类型和区域构造应力历史三个方面浅述结构面网络模拟的适用条件以及在使用过程中应注意的问题。

(1) 结构面类型。根据1979年谷德振对结构面进行的五级划分,各级结构面对岩体力学性质及稳定性所起的作用不同,其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级结构面为区域性断裂,直接影响区域山体或工程岩体的稳定性,一般作为岩体力学的边界考虑,这类结构面规模大、数量少,在工程实践或科学研究中应按确定性结构面单独考虑;Ⅴ级结构面延展微小且连续性差,主要影响岩块的强度和变形性质,对岩体不产生直接影响或控制作用,这类结构面的影响已通过岩块的力学试验反映到岩石的力学性质之中,故在结构面网络模拟过程中不予考虑;Ⅳ级结构面延伸在数米范围内,直接反映岩体的完整性,控制着岩体的强度和变形特征,这类结构面发育数量巨大,同一期次形成的同一组结构面的几何参数在一定范围内具有随机分布特征,

适合用结构面网络模拟的方法进行统计建模。另外,结构面按成因类型可分为原生结构面、构造结构面和次生结构面。其中构造结构面数量最多,是岩体内结构面的主要构成部分,构造结构面是受地壳构造运动的影响而产生的,其产状反映了构造应力的作用,同一时期的同一组结构面明显围绕某一中心分布,具有明确的统计意义和明确的概率分布特征,最适合采用结构面网络模拟的方法进行描述;原生结构面是指在岩体形成过程中产生的结构面和构造面,一般延伸性很强,其特性随岩石性质、岩层厚度、水文地质条件以及风化条件的变化而有所不同,但其规模一般较大,与其他类型的结构面有明显差异,在结构面网络模拟过程中,应视具体情况将其单独作为一个结构面组或按确定性结构面考虑。次生结构面是指在地表条件下,由于外营力(如风化、地下水、卸荷、人工爆破等)的作用,在岩体中产生的结构面在所有结构面中数量较少,多为张裂隙,结构面不平坦,产状不规则,大多不连续。由于其延展性较小,对岩体性质的影响较小,大多数情况下其尺寸小于删除尺寸,因此在现场结构面测量中常不予统计。

(2) 基岩类型。一般来说,在硬质岩(如花岗岩、灰岩、砂岩等)中,结构面延伸性强,发育较规律,且结构面往往对岩体的稳定性起控制作用,因此硬质岩适合采用结构面网络模拟手段进行岩体结构研究;在软质岩中,结构面的延伸性差,其发育易受到很多其他因素的干扰,发育规律不明显,岩体结构面的几何分布规律往往不是控制其稳定性的主要因素,而且在现场结构面的统计测量中误差较大,直接影响结构面网络模拟的精度,因此,需谨慎选用结构面网络模拟的方式开展岩体结构研究。

(3) 区域构造应力历史。如前所述,岩体中尤其是硬质岩体中,构造结构面发育最为广泛,是岩体稳定性的控制因素。而构造结构面的发育分布规律直接受到区域构造应力历史的影响,结构面分组是结构面网络模拟的基础,而岩体中分布的结构面组数直接由区域构造发育的期次决定,在目前结构面网络模拟的研究中,人们大多采用统计学的手段进行结构面分组,这种方法容易受到结构面测量误差和其他因素的干扰。若首先对该区域的构造发育历史及方向进行研究,再结合统计学手段对结构面优势组进行划分,可以提高结构面分组的准确度,进而更加合理地对各组结构面进行统计分析和模拟。

因此,结构面网络模拟是一种基于“等效”和“均化”思想复杂裂隙岩体结构面几何分布的研究手段,但由于自然界的结构面千变万化、纷繁复杂,并且其发育分布规律与工程地质条件密不可分,因此,在应用结构面网络模拟手段研究岩体结构时应与具体的工程地质条件相结合,将工程地质的观点融入到结构面网络模拟手段中去,这样才能提高结构面网络模拟精度,减小模拟成果与实际结构面发育分布规律的差异。

## § 2.2 三维结构面网络建模流程

三维结构面网络建模的前期工作包括岩体结构统计均质区的划分、结构面产状模型的建立、结构面尺寸模型的建立、结构面间距模型的建立以及结构面密度的求解,这些都是三维结构面网络模拟过程中的重要环节,是结构面网络模型建立的基础,本节将简要介绍基于上述信息建立三维结构面网络模型的流程。在本研究中结构面网络模拟成果要与3DEC数值试验相结合,进而开展裂隙岩体力学参数研究。受目前研究手段的限制,假设结构面为平直闭合的圆盘,着重探讨结构面的几何分布特征及其对裂隙岩体力学性质的影响。图2-1为三