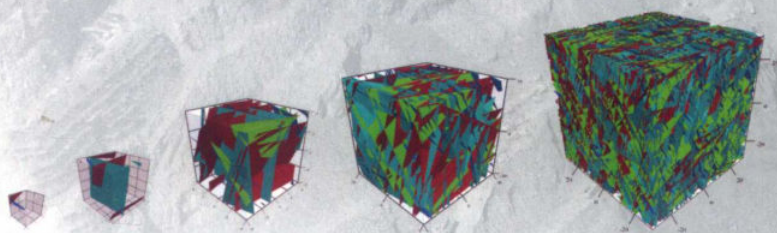


岩土多场多尺度力学丛书

岩体力学特性尺寸效应与 工程实践

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

张春生 侯 靖 褚卫江 著
刘 宁 崔 臻 张传庆



科学出版社

岩土多场多尺度力学丛书

岩体力学特性尺寸效应 与工程实践

张春生 侯 靖 褚卫江 著
刘 宁 崔 臻 张传庆

贵州师范学院内部使用

科学出版社

北 京

内 容 简 介

岩体的尺寸效应是岩体力学中的经典问题。岩体的尺寸效应直接关系着岩体宏观力学参数的选取,在岩土工程设计中具有重要的作用。本书以杨房沟、丹巴、白鹤滩三个水电工程建设中遇到的三类型岩体的尺寸效应问题为支撑,详细阐述工程岩体力学特性尺寸效应问题分析方法、岩体结构面分布特征采集技术、三维结构面网络模拟技术、基于离散元合成岩体技术、岩体力学参数尺寸效应数值试验等,并结合杨房沟水电站裂隙花岗岩、丹巴水电站石英云母片岩、白鹤滩水电站层间错动带的尺寸效应问题进行实例分析和工程应用,经实践总结得出裂隙岩体力学参数、含硬质条带层状岩体力学参数和长大软弱结构面强度尺寸效应确定的标准化工作流程。本书可为我国复杂岩体工程安全建设、深部资源安全开采提供有力的技术保障和工程经验借鉴。

本书内容丰富,理论与实践相结合,可为工程岩体宏观力学参数选取提供启示和借鉴,可供水电工程、地质工程、采矿工程、交通工程等相关专业的科研人员、工程技术人员和研究生借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩体力学特性尺寸效应与工程实践/张春生等著.—北京:科学出版社,2019.10
(岩土多场多尺度力学丛书)

ISBN 978-7-03-062487-1

I. ① 岩… II. ① 张… III. ① 岩石力学-研究 IV. ① TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 218028 号

责任编辑:孙寓明 / 责任校对:刘 畅
责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉精一佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:B5(720×1000)

2019 年 10 月第 一 版 印张:17 1/2

2019 年 10 月第一次印刷 字数:351 000

定价:208.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“岩土多场多尺度力学丛书”编委会

名誉主编：陈祖煜 何满潮 赖远明

主 编：邵建富 周 辉

副 主 编：朱其志 陈卫忠

编 委：（按姓氏笔画排序）

马国伟	井兰如	韦昌富	田 斌	冯夏庭	朱合华
刘继山	刘德富	杜修力	李世海	李术才	李海波
杨 强	吴 伟	吴智深	张东晓	张春生	周创兵
周锦添	侯正猛	姚 军	姚仰平	徐卫亚	殷建华
唐春安	唐辉明	盛 谦	崔玉军	梁 冰	蒋宇静
蒋明镜	蔡 明	潘一山			

“岩土多场多尺度力学丛书”序

为了适应我国社会、经济与科技的快速发展,深部石油、煤炭和天然气等资源的开采,水电工程 300 m 级高坝、深埋隧洞的建设,高放核废料的深地处置、高能物理的深部探测等一系列关乎国计民生、经济命脉和科技制高点的重大基础设施建设正紧锣密鼓地开展。随着埋深的增大,岩土工程建设中的多场(地应力、动载、渗流、温度、化学条件等)耦合效应与多尺度(微观、细观、宏观及工程尺度)特性更加突出和复杂。例如,天然岩体是完整岩石与不同尺度的节理/裂隙等不连续系统组成的复合介质,具有非均匀性、非连续性、非弹性等特性,其力学行为具有显著的多尺度特性。岩石的微观结构、微裂纹之间的相互作用、孔隙和矿物夹杂均影响着岩石细观裂隙系统的演化,而裂隙的扩展和贯通与宏观上岩石的损伤和破坏密切相关,也决定了工程尺度上的岩体稳定性与结构安全性。因此,研究岩土多尺度力学特性不仅对岩土工程建设至关重要,同时可以促进岩土力学研究向理论化与定量化方向发展。近年来,岩土微观与细观实验技术与几何描述方法、细观力学损伤模拟方法、从细观到宏观的损伤模拟方法等细-宏观等效研究方法已基本确立了细观到宏观尺度上的沟通桥梁。但这还不够,建立微观-细观-宏观-工程尺度上系统的分析方法才能全面地处理好工程建设中复杂的岩土力学问题。大型岩土工程建设还普遍涉及复杂赋存环境下岩土体的应力和变形、地下水和其他流体在岩土介质中的运动、地温及化学效应直接或间接的相互作用及相互影响。以岩土渗流与变形耦合作用为例,渗流是导致岩土介质及工程构筑物发生变形和破坏的重要诱因,国内外因渗控系统失效导致的水库渗漏、大坝失稳与溃决、隧洞突涌水等工程事故屡见不鲜。渗透特性具有非均匀性、各向异性、多尺度特性和演化特性等基本特征,揭示岩土体渗流特性的时空演化规律是岩土体渗流分析的基础,也是岩土工程渗流控制的关键问题。因此,对于处于复杂地质条件和工程环境中的岩土体,揭示其多场耦合条件下多尺度变形破坏机理、流体运移特征、结构稳定性状态及其演化规律是保证岩土工程安全建设与运行的重中之重。

近年来,岩土多场多尺度力学研究领域成果丰富,汇聚了 973、863、国家自然科学基金项目以及其他重大科技项目的科研成果,试验和理论研究成果也被进一步广泛应用于重大水利水电工程、核废料处置工程及其他工程领域中,取得了

显著的社会效益和经济效益。在此过程中，我们也欣喜地看到，岩土多尺度、多场耦合理论体系在与工程地质、固体力学、流体力学、化学与环境、工程技术、计算机技术、材料科学、测绘与遥感技术、理论物理学等多学科不断融合的基础上日趋完善。更振奋人心的是，越来越多的中青年学者不断投身其中，推动该研究领域呈现出生机勃勃的发展态势。“岩土多场多尺度力学丛书”旨在推介和出版上述领域的相关科研成果，推进岩土多场多尺度力学理论体系不断发展和完善，值得期待！

“岩土多场多尺度力学丛书”涉及近年来在该领域取得的创新性研究成果，包括岩土力学多场多尺度耦合基础理论、多场多尺度岩土力学数值计算方法及工程应用、岩土材料微观细观宏观多尺度物理力学性能研究、岩土材料在多场耦合条件下的理论模型、岩土工程多场耦合计算分析研究、多场耦合环境下岩土力学试验技术与方法研究、复杂岩土工程在多场耦合条件下的变形机制分析以及多尺度、多场耦合环境下的灾害机制分析等方面的内容。

相信在“岩土多场多尺度力学丛书”的各位编委和全体作者的共同努力下，这套丛书能够不断推动岩土力学多场耦合和多尺度分析理论和方法的完善，全面、系统地为我国重大岩土工程解决“疑难杂症”。



2018年11月

前 言

我国西部建设持续推进，遇到的工程建设问题越来越复杂，从工程建设的经济性和安全性上考虑，往往需要对这些工程设计方案进行深入分析。合理的岩体参数取值是工程设计方案调整和论证的前提和保证。对于地质条件复杂的工程，岩体参数取值往往与岩体的各向异性特征和尺寸效应有关，超出了规范范畴，需要设立专题进行研究。杨房沟水电站坝址的地质条件为侵入沉积岩的花岗岩岩体，受后期构造运动和河谷下切作用的影响，节理非常发育，在工程设计和稳定性分析时，需要同时考虑岩体力学特性的区域不均匀性、各向异性和尺寸效应。丹巴水电站的石英云母片岩的片理面发育，还普遍发育大小不一的硬质石英脉，岩体的力学特性同时具有各向异性和尺寸效应，宏观力学参数的确定对工程设计方案选择的影响重大。白鹤滩水电站作为世界在建的最大水电站，其工程规模的复杂性、潜在问题的多样性可想而知，层间错动带强度特征和参数取值是其基础性问题之一，其典型特征是同时存在硬质的起伏体和软弱充填物，尺寸效应明显，层间错动带的真实力学参数的把握对工程设计和施工期的优化有着极其重要的意义。由此可见，岩体尺寸效应不单是一个理论问题或岩体力学领域的学术问题，更是在设计优化特定工程方案时，需要深入研究的技术问题。

岩体的尺寸效应是岩体力学中的经典问题。20 世纪 60 年代，国际岩石力学学会成立时，首届国际岩石力学学会主席 Müller 指出岩体的尺寸效应研究的重大意义和巨大难度。随后的半个世纪中，岩体的尺寸效应研究一直是岩体力学和岩石工程的热点和难点。不同的历史时期，对岩体尺寸效应的认识和研究方法是不同的，总体上，近年来随着测试方法、分析方法的发展，对该问题的研究深度也随之加深。针对杨房沟、丹巴、白鹤滩三个水电工程所呈现出的三类典型的岩体尺寸效应问题（杨房沟水电站裂隙花岗岩、丹巴水电站石英云母片岩、白鹤滩水电站层间错动带），中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司组织专门的技术人才，联合多家科研院所，通过现场调研、室内试验、现场试验、现场监测、数值计算等分析手段，对该问题进行了深入研究，正确认识了三类完全不同的尺寸效应问题，形成了不同岩体尺寸效应问题的整套科研工作流程和工程应用技术。本书详细阐述了三类典型的岩体尺寸效应问题及研究方法，岩体结构面分布特征数字近景摄影采集应用分析技术，三维结构面网络生成、重构与检验技术，基于离

散元和颗粒流算法、非贯通圆盘节理的合成岩体技术,岩体力学参数尺寸效应的数值试验方法等系统性研究成果及实例分析和工程应用,这三个水电工程中所面临的尺寸效应问题具有代表性,可以为我国今后类似工程的设计施工提供重要的技术支撑,为卸荷岩体控制的边坡稳定性分析与设计、含硬质条带的软岩洞室分析与设计、层间错动带影响的地下硐室的稳定分析提供技术途径。

本书得到了国家自然科学基金雅砻江联合研究基金重点项目“深部断层活化规律与洞室群稳定性和环境安全评价”(U1865203)、国家自然科学基金面上项目“蠕滑-强震耦合条件下跨活断裂输水隧洞的破坏机理与适应性措施研究”(51779253)、湖北省自然科学基金项目“双重介质模型假定下岩体结构效应对等效力学参数的影响机理研究”(2017CFB725)、浙江省“万人计划”青年拔尖人才项目、中国科学院青年创新促进会等的资助。此外,浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所等单位对相关成果的研究提供了支持和帮助,在此表示衷心感谢!

参与本书写作的还有苏锋博士、陈平志高级工程师、卢景景助理研究员、程光坦博士。此外,在本书的撰写过程中得到有关专家的指导和帮助,引用了多位学者的文献资料,在此对上述做出贡献的专家表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请专家、学者不吝批评和赐教。

作 者

2019年8月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 岩体力学参数的结构效应和尺寸效应	2
1.2.2 岩体结构面研究成果综述	5
1.2.3 层状岩体研究成果综述	16
1.3 本书主要内容	21
1.3.1 主要研究内容	21
1.3.2 代表性工程概况	22
第2章 岩体力学特性尺寸效应	25
2.1 概述	25
2.1.1 岩体结构	25
2.1.2 岩体尺寸效应	28
2.1.3 岩体表征单元体 REV	31
2.2 工程岩体尺寸效应问题	32
2.2.1 裂隙网络导致的岩体尺寸效应问题	32
2.2.2 硬质条带导致的层状岩体尺寸效应问题	32
2.2.3 长大结构面尺寸效应问题	37
2.3 岩体力学特性尺寸效应研究方法	38
第3章 岩体结构面分布特征采集技术	40
3.1 数字近景摄影测量技术	40
3.1.1 基本原理	40
3.1.2 拍摄准备工作	43



3.1.3 成果解译	48
3.2 岩体结构面分布特征采集工程实例	50
3.2.1 杨房沟水电站花岗岩结构面现场采集	50
3.2.2 丹巴坝址石英脉展布特征现场采集	59
3.2.3 白鹤滩层间错动带起伏特征现场采集	64
3.3 结构面精细分布描述与统计分析	70
3.3.1 石英脉分布特征统计	70
3.3.2 层间错动带起伏度测量与 JRC 统计	74
第 4 章 岩体三维结构面网络模拟技术	77
4.1 岩体三维结构面网络生成理论	77
4.1.1 岩体结构均质区划分	77
4.1.2 结构面中心点密度	78
4.1.3 结构面产状	80
4.1.4 结构面平均迹长	81
4.1.5 结构面直(半)径	84
4.2 三维结构面网络重构与检验	85
4.2.1 结构面网络重构流程	85
4.2.2 随机变量抽样	86
4.2.3 结构面重构模型检验	88
4.3 杨房沟水电站坝址区岩体三维结构面网络重构与检验	89
4.3.1 岩体均质区划分与地质资料整理	89
4.3.2 优势结构面分组与结构面网络参数	91
4.3.3 坝址区域三维结构面网络重构与检验	96
第 5 章 基于离散元的 SRM 技术	103
5.1 有限尺寸岩体节理网络抽样原则	103
5.1.1 相同中心点、不同尺寸	104
5.1.2 相同尺寸、不同中心点	105
5.2 基于三维离散元(3DEC)和非贯通圆盘节理的 SRM 技术	106

5.2.1	SRM 技术原理	107
5.2.2	非贯通圆盘节理离散元模型的建立	107
5.2.3	基于离散元的 SRM 技术的验证	110
5.2.4	三维离散元数值模拟力学试验	116
5.2.5	结构面网络表征参数的影响	120
5.3	基于 PFC 方法的合成岩体技术	127
5.3.1	PFC 方法简介	127
5.3.2	石英云母片岩数值模拟	129
5.3.3	层间错动带数值模拟	134
第 6 章	岩体力学参数尺寸效应数值试验	147
6.1	杨房沟水电站花岗岩尺寸效应数值试验	147
6.1.1	结构参数效应	147
6.1.2	力学参数尺寸效应	149
6.1.3	确定 REV 尺寸	153
6.2	含石英脉的石英云母片尺寸效应数值试验	154
6.2.1	石英云母片岩尺寸效应分析	154
6.2.2	石英脉对各向异性尺寸效应分析	160
6.3	层间错动带尺寸效应数值试验	165
6.3.1	层间错动带尺寸效应分析	165
6.3.2	尺寸效应结果验证	169
6.4	岩体力学参数尺寸效应确定标准工作流程	176
6.4.1	裂隙岩体力学参数尺寸效应确定标准工作流程	176
6.4.2	含硬质条带层状岩体力学参数尺寸效应确定标准工作流程	178
6.4.3	长大软弱结构面强度参数尺寸效应确定标准化工作流程	178
第 7 章	岩体力学特性尺寸效应工程应用	180
7.1	杨房沟水电站左岸边坡稳定性分析	180
7.2	丹巴水电站调压室布置方案比选	183
7.2.1	概述	183



7.2.2	地应力场与岩体力学参数	184
7.2.3	不考虑尺寸效应的分析结果	186
7.2.4	考虑尺寸效应的分析结果	198
7.2.5	综合分析	223
7.3	白鹤滩水电站层间错动带工程影响分析	225
7.3.1	概述	225
7.3.2	右岸尾水管检修闸门室岩梁方案	225
7.3.3	岩壁吊车梁稳定性分析	227
7.3.4	岩梁浇筑时机分析	243
参考文献		254

第1章 绪 论

1.1 概 述

随着我国“一带一路”、“十三五”规划、节能环保等政策的实施和推进,水利水电、交通道路、矿山开采、核废料和废弃物处置等众多大型工程项目不断立项动工,这些工程项目的地质环境大多为复杂岩体,且规模宏大。在水利水电领域,出现了多个高难度的跨流域长距离的调水工程,多处西部复杂山区,地质构造复杂,工程建设难度巨大,如新疆北疆供水二期工程,隧洞长 516.2km,单洞最长 283.3km,为世界上最长的输水隧洞。在交通工程领域,铁路或公路工程多集中在我国西部,大多需要穿越高山峡谷等地形复杂的地区,如川藏线铁路,途经全球地质活动最剧烈的区域,被称为世界最险铁路,这也是人类迄今面临挑战最大的铁路建设工程。在矿山开采领域,随着浅部资源的减少,矿山开采正逐年向地球深部延伸,由此带来了深部复杂的地质环境、巷道如何支护、如何绿色安全高效开采等新的挑战。在核废料处置领域,由于核废料的放射性危害,通常是将包装好的核废料埋藏在距地表 500~1000m 的岩体中,工程庞大且复杂。在这些工程中,合理确定岩体力学特性是进行工程设计、变形计算、稳定性评价等环节的前提和保证。因此,为了保证复杂岩体工程的安全建设,正确认识工程岩体力学特性是至关重要的。

岩体是复杂的地质体,经历过多次地质构造运动,具有一定的岩石成分和结构,赋存于一定的地质环境中。国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM)将岩体中存在的断层、软弱层面、节理、软弱片理和软弱带等各种力学作用形成的破裂面和破裂带定义为结构面。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(称为结构体)。岩体就是由许多结构面和岩块组成的岩体结构。这些岩体,尤其是与人类工程密切相关的地壳表层岩体,其物理力学特性在很大程度上受形成和改造岩体的各种地质活动过程所控制,往往表现出非均匀、非连续、各向异性和多相性特征^[1-2]。工程岩体这种与其他材料的差异性,使得室内岩块试验获得的相关参数,甚至现场试验的结果也难以代表几十米乃至百米以上的工程岩体的力学性质。为了对工程岩体进行的各种计算分析更加符合工程实际,需要得到代表大范围岩体力学性

质的力学参数,即所谓的岩体宏观力学参数^[3]。岩体宏观力学参数的研究就是对一定范围和尺度的岩体在一定荷载作用下力学性质的研究,是岩体力学最基本,也是最困难的研究课题之一。

岩体的力学特性远比一般材料复杂,其力学参数,如强度、弹性模量(E)、黏聚力(c)、内摩擦角(φ)等,并不是岩体的特有属性,这些力学参数不仅受到岩块力学特性和结构面几何形态、力学特性的综合影响,还与岩体所对应的工程项目规模,即尺度因素密切相关。因此对岩体力学参数的确定方法和影响因素进行系统研究,具有重要的现实意义和工程应用价值。

1.2 研究现状

岩体宏观力学参数的取值受岩体结构的影响,岩体中结构面的展布及其组合特征决定了岩体的工程地质性质和力学性状。岩体的力学效应是岩体力学理论研究的中心内容。20世纪50年代,以Müller为代表的奥地利学派认为^[4],结构面是构成岩体和岩体力学与工程特性差异的根本所在,由此开始了以岩体结构面和岩体结构研究为中心的岩体力学时代。随后,谷德振^[5]、孙玉科等^[6]提出了“岩体结构”概念,并认为岩体结构控制岩体的变形和强度。经过长期实践研究,孙广忠^[7]于1984年进一步提出:“岩体结构控制论”是岩体工程地质力学和岩体力学的基础理论,认为岩体内的结构面及岩体结构控制着岩体的变形特性、破坏机制和力学法则,从而建立了完整的岩体结构力学体系。

岩体结构对岩体力学性质的直接影响以岩体的结构效应体现出来;而岩体尺寸效应则是岩体力学参数确定过程中,岩体结构带来的问题所在。因此可以认为传统上的岩体力学特性3S(structure, stress, scale)效应中的结构效应、尺寸效应其实是岩体结构影响不同角度的体现。

何满潮等^[8]以某一工程岩体为例,证明岩体结构类型随工程尺寸的变化而不同,清楚地表明在地质条件的客观基础上,只有当工程尺寸一定时,岩体结构才是确定的。所以在更高层次上可以认为,岩体尺寸效应是不同工程规模、尺度下的结构效应的具体体现,在这个层次上,尺度效应包含了结构效应。

1.2.1 岩体力学参数的结构效应和尺寸效应

1. 结构效应

在岩体力学参数的结构效应方面,Singh等^[9]对一组连续节理、一组非连续节

理的正交节理岩体的结构关系做了研究,导出了柔度矩阵;Morland^[10]对不规则节理岩体的三维本构关系进行了探讨;科茨^[11]以节理刚度系数为基本参数,给出了平行等间距正交节理岩体的变形参数;Amadei等^[12]研究了裂隙岩体的三维本构关系;Gerrard^[13]运用能量等效法,建立了含有一组、两组及三组正交节理岩体的弹性模型,并在允许节理有一定厚度的情况下,运用正交层理论推导了节理岩体的变形参数;Yoshinaka等^[14]在考虑节理刚度系数的基础上,推导了规则节理岩体的本构关系;Chang等^[15]对规则节理岩体的三维本构关系进行了研究。上述研究的对象为含有三组或三组以内正交节理岩体,这些研究表明节理岩体的变形模量具有明显的各向异性特征,岩体变形模量受岩体结构和结构面刚度的共同影响。Li^[16]提出了一种新颖的图表,来描述节理岩体变形模量的各向异性特征;Chang等^[17]提出了滑移线概念;Huang等^[18]在此基础上对含有三组非正交节理岩体的力学特性进行了研究,得到了岩体变形模量的显式表达形式,并经试验验证。

应用数值分析方法研究岩体力学参数的结构效应是一个新的研究方向。董学晟等^[3]、周火明等^[19]、盛谦等^[20]借助岩体力学理论与计算机方法,在地质调查的基础上,对三峡工程船闸区典型地段的岩体进行了计算机模拟试验,研究了节理对宏观力学参数的影响及宏观力学参数的结构效应;Min等^[21]采用离散单元法研究了裂隙岩体力学参数的结构效应;Sitharama等^[22]引入节理因子,用有限元方法得到了等效模型;Mahous等^[23]用代表体元方法,根据能量均匀化技术分析了单向节理非线性性质和双向正交节理的相互作用;赵吉东等^[24]建立基于等效柔度张量及特定破坏准则等效体力学参数预测的方法,对节理岩体的等效力学参数进行了计算机模拟和预测;李世海等^[25]采用三维离散元方法模拟了含节理岩块的单轴受压试验,定量地说明了岩体的各向异性。相比于解析公式及经验方法来说,数值分析方法具有可以模拟任意形状及分布特征的结构面的能力。宁宇等^[26]、朱道建等^[27-28]将Voronoi方法引入3DEC(3-Dimension Distinct Element Code)中研究了柱状节理岩体力学参数的结构效应;晏长根等^[29]在FLAC(Fast Lagrangian Analysis Code)中实现了随机节理岩体的模拟,对其变形与强度参数的结构效应进行了研究。可见,随着计算机数值方法的发展成熟,数值分析已成为岩体变形参数结构效应研究的一个有力工具。

2. 尺寸效应

岩体力学的尺寸效应是岩体力学和岩体工程中的经典难题之一。20世纪60年代,国际岩石力学学会成立时,首届国际岩石力学学会主席Müller即指出该问题研究的重大意义和巨大难度。为此国际岩石力学学会专门成立了尺寸效应委员会,并在1990年和1993年召开了两次专门的国际会议^[30]。

对该问题的研究一般从三个方向进行:理论研究、试验和数值方法。

在计算机相对不发达的早期,国内外学者包括 Weibull、Brown、普罗多耶诺夫、孙广忠等进行了广泛的理论研究,以建立岩体力学参数与岩体尺寸之间的经验关系式。Weibull 在研究材料性质尺寸效应时,提出了强度与尺寸的关系;Brown 提出了修正的 Weibull 法则,周创兵等^[31]在此基础上建立了与岩体弹性参数有关的岩体表征单元体积的数学描述。尤明庆等^[32]根据串联、并联模型原理进行定性分析,揭示了岩石强度的尺寸效应根源于材料的非均质性。吕兆兴等^[33]研究发现非均质参数对岩石材料单轴抗压强度的尺寸效应起着决定性的作用。周国林等^[34]建立了考虑岩石材料不均匀性及破坏局部化特性准则,以用于定量描述岩石强度的尺寸效应。金龙等^[35]提出了基于岩石材料破裂耗能的破裂分维空间概念,并应用于岩石材料强度尺寸效应定量关系和机理的研究。王利等^[36]研究表明岩体强度的初始损伤及其演化存在一定的尺度效应。杨友卿^[37]将损伤力学与分形几何理论结合起来,定量分析了岩石强度的尺寸效应。何满潮等^[38]通过建立工程岩体的连续性模型,研究了工程岩体力学参数的尺寸效应。李宏等^[39]探讨了荷载作用下岩石的统计尺寸效应和结构尺寸效应。王家来等^[40]通过建立单轴压缩情况下含裂纹岩石试件的功能平衡方程,运用概率统计的方法,推导了岩体弹性模量尺度效应的表达式,揭示了岩体弹性模量尺度效应的内部结构本质。

通过试验方式来研究岩体力学参数的尺寸效应是最直接、最有效的方法之一。Bieniawski^[41]、Mogi^[42]、Pratt 等^[43]通过不同尺度的试验研究了不同类型岩石的力学参数尺寸效应。徐高巍^[44]在岩体力学参数数据系统的支持下,对尺寸效应拟合关系式做了对比分析。刘宝琛等^[45]在 7 种岩石的力学试验基础上,研究了岩石抗压强度的尺寸效应。杨圣奇等^[46]在伺服试验机上对同直径不同长度的大理岩样进行单轴压缩试验的尺寸效应研究,得出试验设备和加载系统的进步并不能满足加载尺寸的无限制的增大,当试验尺寸超过 1 m 后,加载系统的造价难以被工程接受。目前的技术手段也无法建造数十米尺寸的加载系统,因此岩体尺寸的试验研究虽然是直接研究方法,但对于大尺寸加载试验而言实际可行性几乎不存在。

随着计算机技术的不断发展,应用数值方法进行岩体尺寸效应的研究应该是目前技术水平下最为确实可行的方案。王学滨等^[47]利用快速拉格朗日方法及剪切应变梯度塑性理论,揭示了变形局部化塑性软化区是尺寸效应的原因。李世海等^[25]通过三维离散元方法研究了节理岩块单轴受压试验的尺寸效应。杨圣奇等^[48]应用真实破裂过程分析(realistic failure process analysis, RFPA),研究了围压对岩石材料强度尺寸效应的影响。宁宇等^[26]、朱道建等^[27-28]将 Voronoi 方法引入 3DEC 中研究了柱状节理岩体力学参数的尺寸效应。晏长根等^[29]在 FLAC 中实现了随机节理岩体的模拟,研究了岩体变形与强度参数的尺寸效应。周火明等^[49]通过现场

试验和数值模拟相结合的途径,研究了不同加载尺寸对层状复合岩体变形参数的影响,表明岩体变形模量随加载面直径增大而减小,关系为 $E = 7.989D^{-0.552}$ 。周火明^[19]、郭志华^[50]在综合考虑室内试验、现场试验、工程岩体分级、数值模拟、实测位移反分析成果的基础上,研究了岩石力学参数的尺寸效应,是一种面向工程应用的研究方法。数值研究方法在2010年以后随着合成岩体(synthetic rock mass, SRM)技术^[51]的推出发生了飞跃性的进展,但当前应用实例及经验较少。

1.2.2 岩体结构面研究成果综述

结构面是造成岩体力学特性尺寸效应的关键因素,且在岩体中普遍存在,正确描述结构面的形貌特征和认识其力学特性至关重要。

1. 岩体结构面形貌测量方法

采集岩体结构面表面几何形貌信息的方式有多种,可以从不同角度对结构面形貌测量方法进行分类。根据采集系统的工作原理,可分为机械式测量与光学式测量两种;根据采集系统与结构面表面的接触特点,可分为接触式测量与非接触式测量两种;根据采集系统的适用场所,可分为室内测量与室外测量两种。本节根据接触关系的分类,归纳总结了目前国内外研究学者所采用的结构面表面几何形貌特征的采集方法。

1) 接触式测量法

接触式测量法的工作流程是首先调整单根或多根测量探针,使其与结构面表面进行紧密接触;其次逐点读取数据,获得二维或三维坐标数据。Fecker等^[52]首先使用地质罗盘和测斜仪两种仪器,测量了岩体结构面表面几何形态;Barton等^[53]、Weissbach^[54]、Stipmson^[55]、吉锋等^[56]、Kim等^[57]使用单排针状轮廓尺,对岩体结构面二维剖面线进行了测量,获取了结构面二维轮廓线数据。单排针状轮廓尺(图1.1)可以测量结构面表面的二维剖面形态,夹具中间分布有多根并列的金属或塑料探针,在金属加工、木材加工、建筑设计等领域率先使用,该仪器成本比较低,而且操作简单,因此得到广大岩土工作者的青睐。杜时贵^[58]、Aydan等^[59-60]、尹红梅等^[61]发明了便携式单针简易纵剖面仪,该仪器只采用一根探针,操作更方便、现场更实用,如图1.2所示。随着计算机的高速发展及机械加工制作能力的提升,夏才初等^[62]、Develi等^[63]研制了单针自动式轮廓仪,该仪器可以进行计算机自动控制,实现数据自动采集,现场使用更方便,使工作效率有了较大提升,如图1.3所示。