

复杂岩体结构精细描述 及其工程应用

黄润秋 许 模 陈剑平 著
胡卸文 范留明



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书在充分掌握第一手资料的基础上,结合现代数理分析手段,立足于复杂岩体结构的精细描述,提出适用于工程的复杂岩体结构面描述体系,并进一步讨论其工程应用。

全书共分12章。第1章至第6章主要论述岩体结构的形成机理分析,岩体结构面分级及调查技术,层间结构面分析,层内结构面工程特性研究,岩体结构的分析方法;第7章至第12章介绍了基体结构面调查与描述的普遍测网法,侧裂面调查与描述,基体结构面二维、三维连通率研究,信息复杂岩体信息系统和三维可视化模型。

本书可供土木工程、地质工程、岩石力学等专业的科技人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂岩体结构精细描述及其工程应用/黄润秋等著. —北京:科学出版社, 2004

ISBN 7-03-012507-X

I. 复… II. 黄… III. ①岩体-结构-描述②岩土工程-应用
IV. P583

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第113535号

责任编辑:童安齐 匡 敏 / 责任校对:朱光光

责任印制:吕春珉 / 封面设计:张 放

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2004年6月第一次印刷 印张:25 3/4

印数:1—2 000 字数:590 000

定价:52.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

大型土木工程建设通常将岩体作为建筑物的地基和建筑物的环境。由于不同建造的岩体在漫长的地质历史时期曾经历过多期的地质构造运动,以及浅表生地质作用的改造,岩体中广泛存在规模不等、产状不同、性质各异各类不连续面,或称之为结构面。正是由于这些结构面的存在,岩体具有显著的结构特性,其主要特点是复杂性、非连续性、各向异性,以及力学响应的非线性特性,这些结构特性构成岩体中的薄弱部位,成为控制岩体稳定性的重要因素之一。

自20世纪50年代以来,各国学者通过许多大型工程实践和一系列灾害性的岩体失稳事件逐步总结和认识到了岩体中的结构面对岩体变形及稳定性所起到的重要作用,因此,几十年来对岩体结构一直在进行研究。国际岩石力学学会也曾对岩体结构的实验室试验和野外试验以及现场描述推荐过一些定量的指标体系。各国学者也曾在结构面的几何特性、力学特性、结构面的网络模拟方面做过大量的研究,取得了许多有意义的成果。但由于不同地区、不同建造和改造的岩体,其结构特征不同,因此,准确认识和描述岩体的结构和结构面仍然是一个难度很大的课题,也是工程地质和岩石力学领域的前沿和热点课题。

成都理工大学黄润秋教授及其领导的课题组长期从事水电工程重大工程地质问题研究。他们在国家杰出青年科学基金资助的基础上,结合长江三峡、金沙江溪洛渡、澜沧江小湾、黄河拉西瓦、雅砻江锦屏等大型水电工程建设,选择“复杂岩体结构精细描述及其工程应用”这一热点问题作为攻关课题,历经近十年,在大量扎实的野外工作基础上,全面系统地总结了复杂岩体结构的精细描述与定量评价的方法,撰写成这本系统专著。

本书系统地阐述了复杂岩体结构的形成机理、岩体结构面的分级调查技术与相应的指标体系,以及岩体中断续结构面(基体裂隙)参数的调查测量与评价方法。特别是针对玄武岩体中发育的大型缓倾层间、层内错动型结构面,提出了其结构面分类体系及工程应用的评价方法。在基体结构面参数的概率模型估计,尤其是迹长和连通率这两个重要参数的估计方面取得了具有重要创新意义的成果,提出了基于结构面与测网交切关系的结构面迹长与连通率

的概率估计模型,并创造性地将三维网络模拟用于结构面空间面连通率的确定。另外,本书在岩体结构信息系统的建立和三维可视化技术与实现方面也取得了突出的成绩。

总之,本书建立了一套较为完整的、有较强针对性和适用性的复杂岩体结构精细描述的理论和方法,并在工程实践中得到了成功的应用。本书在学术上有重要创新,在应用上有新的突破,具有重要的学术价值和显著的工程实际意义,是工程地质和岩石力学领域一部优秀的学术专著。相信本书的出版,对提高我国乃至国际上在更大范围内对复杂岩体结构的认识水平和工程岩体的稳定性评价将产生深远的学术影响和重要的工程意义。

中国工程院院士 王恩敬

2003年11月8日于清华园

前 言

岩体,是由岩块和分割它们的不连续面或结构面组成的地质体,结构面在空间的分布与产出状态构成了岩体的结构。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,同时也构成了各类岩体工程地质问题的重要控制因素。因此,对岩体结构的研究及其性状的准确描述一直是工程地质和岩体力学领域的热点和难点课题。

近 20 年来,人们对岩体结构的研究倾注了极大的热情,并取得了一系列令人振奋的成就。但是,一方面,由于天然露头或人工开挖面的局限性,人们很难对岩体结构的几何特征进行系统而确定性的测量,导致对其性状的准确描述极为困难;另一方面,随着西部大开发的实施,在诸如大型水电站建设中遇到的岩石高边坡稳定性问题,坝基、坝肩稳定性问题和大跨度地下洞室群围岩稳定性问题等,都要求工程技术人员对复杂的岩体结构条件有充分的把握和准确的认识。因此,发展岩体结构研究的理论与方法,就具有重要的学术价值和迫切的工程实际意义。

本书的内容是作者所在的科研群体近十几年来对岩体结构长期研究成果的总结,其间,得到了国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金的资助。这些研究成果是以长江三峡工程、金沙江溪洛渡水电站、黄河拉西瓦水电站、澜沧江小湾水电站等重大工程为依托而取得的。作者通过长期深入实际的工作,获取了丰富的第一手资料,提出了复杂岩体结构精细描述的观念,力图从细观层次上刻画岩体结构面的具体特征和工程性状。进而,在前人工作的基础上,针对岩体结构研究中的难点问题,特别是结构面系统的成因,各类结构面描述指标体系,非夹泥型结构面的描述与性状调查,随机结构面的调查,结构面的迹长、连通率的概率模型,结构面三维网络模拟及面连通率问题等,结合实际工程,开展了一系列旨在实现结构面精细描述的研究工作。

本书的主要内容分为以下几个部分:第一部分是岩体结构面的形成机理分析,以及结构面的分级与调查技术;第二部分主要涉及大型非夹泥型软弱结构面(层间、层内错动带)的调查及工程特性研究;第三部分是随机结构面的调查技术和参数分析方法;第四部分则主要针对随机结构面的迹长、连通率等重要几何特性,介绍了参数估计的概率模型和数值模拟方法;第五部分则主要涉及岩体结构的三维可视化模型研究。

全书共分 12 章,其中第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 7 章、第 8 章由黄润秋撰写,第 3 章由许模、黄润秋撰写,第 5 章由胡卸文撰写,第 6 章由许模、陈剑平撰写,第 9 章、第 10 章由范留明、黄润秋撰写,第 11 章、第 12 章由陈剑平撰写。在本书撰写过程中,柴贺军、黄地龙也参加了部分工作。全书由黄润秋、陈剑平统稿。

复杂岩体结构的准确描述是一个难度很大的研究课题,许多问题目前还难以统一认识。本书所阐述的内容和表述的观点只是作者十几年来对岩体结构研究的体会,我们希望对这方面的工作有一定的推动;但由于作者水平有限,书中难免存在错漏和不足之处,恳请读者批评指正。

在本书完成之际,作者对国家电力公司成都勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院及长江水利委员会综合勘测局等单位对本项研究所提供的长期支持与帮助表示衷心的感谢,尤其感谢国家电力公司成都勘测设计研究院刘克远勘测大师、宋胜武副院长、李文纲副总工程师、杨建宏副总工程师、杨健处长、龚满福副处长、崔长武队长,长江水利委员会综合勘测局陈德基勘测大师、满作武院长,国家电力公司昆明勘测设计研究院陆宏副总工程师、方占奎教授级高工、叶永年队长,国家电力公司西北勘测设计研究院刘钊教授级高工、万宗礼副总工程师等。十余年来,他们对作者的研究工作给予了始终如一的支持。

同时也感谢为本项研究做出过贡献的历届研究生,他们是:林峰博士、黄国明博士、柴贺军博士、周志东博士、唐胜传博士、王良奎博士、卢波博士、宋肖冰硕士、阮沈勇硕士等。他们参与了本项研究的大量野外调查、资料收集、数据处理和分析工作。

感谢张倬元教授、王士天教授对本项研究给予的指导和帮助。

最后,作者对王思敬院士为本书作序,并给予高度评价表示衷心的感谢!

黄润秋

2003年12月18日

目 录

序

前言

1 概论	1
1.1 引言	1
1.2 随机结构面国内外研究现状	2
1.2.1 结构面几何特性研究	2
1.2.2 结构面力学特性的研究	7
1.2.3 随机结构面网络模拟研究	8
1.3 软弱结构面国内外研究现状	9
1.3.1 软弱结构面的定义	10
1.3.2 软弱结构面的分类	10
1.3.3 软弱结构面的物理力学性质	11
1.3.4 软弱结构面的强度参数取值	11
1.4 本书的主要研究内容及成果	12
2 岩体结构的形成机理分析	15
2.1 岩体结构的原生建造	15
2.1.1 侵入岩地区岩体结构的原生建造	15
2.1.2 喷出岩地区岩体结构的原生建造	16
2.1.3 沉积岩地区岩体结构的原生建造	19
2.1.4 变质岩软弱岩带的岩相分析	20
2.2 岩体结构的构造改造	21
2.2.1 黄河龙-拉地区岩体结构构造成因分析	22
2.2.2 金沙江溪洛渡地区岩体结构构造成因分析	23
2.2.3 长江三峡工程地下厂房区岩体结构构造成因分析	33
2.3 岩体结构的表生改造	37
2.3.1 河谷应力场特征及其发育的基本规律	38
2.3.2 边坡卸荷带的形成及其分布规律	41
2.3.3 缓倾角结构面表生改造机制分析	52
3 岩体结构面分级及调查	56
3.1 岩体结构面工程地质分级	56
3.1.1 岩体结构面的工程地质分级原则	56
3.1.2 金沙江溪洛渡水电工程坝区岩体结构面的工程地质分级	57
3.1.3 长江三峡水电工程地下厂房区结构面的工程地质分级	59
3.1.4 澜沧江小湾水电工程坝区岩体结构面的工程地质分级	65

3.2	结构面描述体系	67
3.2.1	I、II级结构面描述体系	67
3.2.2	III级结构面(基体裂隙)描述体系	72
3.3	岩体结构面调查方法	74
3.3.1	I、II级结构面调查	75
3.3.2	III级(基体裂隙)结构面调查	77
3.4	结构面调查数据的管理与分析	81
3.4.1	数据管理与分析的通用方法	81
3.4.2	数据管理与分析的专用方法——“ROCKS”简介	83
4	层间结构面分析	86
4.1	概述	86
4.2	层间结构面发育的基本特征	95
4.2.1	层间结构面产状及其变化	95
4.2.2	层间结构面发育的构造模式	95
4.2.3	层间结构面的地貌显现规律	96
4.2.4	层间结构面起伏变化规律	97
4.2.5	层间结构面错动强度的宏观变化规律	97
4.3	各层间结构面特征分析	98
4.3.1	层间结构面 C_1	98
4.3.2	层间结构面 C_2	100
4.3.3	层间结构面 C_3	100
4.3.4	层间结构面 C_4	103
4.3.5	层间结构面 C_5	103
4.3.6	层间结构面 C_6	106
4.3.7	层间结构面 C_7	108
4.3.8	层间结构面 C_8	108
4.3.9	层间结构面 C_9	111
4.3.10	层间结构面 C_{10}	112
4.3.11	层间结构面 C_{11}	113
4.4	层内结构面分类及性状总结	113
5	层内结构面分析	117
5.1	概述	117
5.2	层内结构面的发育模式	117
5.3	层内结构面发育的基本规律	119
5.4	层内结构面综合分类	144
5.4.1	分类体系	144
5.4.2	各类层内结构面特征简述	146
5.4.3	坝区层内结构面总体发育统计分析	148

5.5	坝区可能构成控制性底滑面的层内结构面提取	151
5.5.1	坝区重要层内结构面的提取	151
5.5.2	坝肩抗力体及拱间槽部位可能成为控制性底滑面的层内结构面提取	167
5.6	坝区与层间、层内结构面有关的工程地质问题	169
5.6.1	变形稳定性	169
5.6.2	渗透变形和渗漏问题	169
5.6.3	坝肩岩体抗滑稳定性	170
6	基体结构面的分析方法	173
6.1	概述	173
6.2	岩体结构的统计模型	174
6.2.1	统计模型的基本原理	174
6.2.2	岩体结构特征的统计分析	176
6.3	岩体结构的概率模型	180
6.3.1	迹长估计	180
6.3.2	基于测网的平均迹长估计	182
6.3.3	节理直径分布及其大小估计	184
6.3.4	结构面的连通率估计	187
6.4	岩体结构的网络模拟	192
6.4.1	结构面网络模拟的基本原理	192
6.4.2	二维结构面网络模拟	193
6.4.3	三维结构面网络模拟	197
6.5	岩体结构的分形描述	205
6.5.1	节理岩体分维计算及其影响因素	205
6.5.2	结构面几何参数的分维	206
7	基体结构面调查与描述的普遍测网法	209
7.1	概述	209
7.2	基体裂隙的普遍测网法研究	210
7.2.1	普遍测网法的现场调查	210
7.2.2	普遍测网法的数据管理及数据处理技术	214
7.2.3	数据处理结果总览	219
7.2.4	基体裂隙参数分析	234
8	作为高拱坝侧裂面的基体结构面调查与分析	252
8.1	工程勘探布置概况	252
8.2	坝肩侧裂面普遍调查	255
8.2.1	侧裂面普遍调查方法	255
8.2.2	坝肩侧裂面优势方位分析	255
8.3	侧裂面专题调查	258
8.4	侧裂面全迹长调查	259
8.5	侧裂面调查成果的二维可视化	260

8.5.1	基本原理	260
8.5.2	构图方法	261
8.5.3	可视化成图过程	262
8.5.4	侧裂面可视化图	263
8.6	侧裂面基本地质特征及密度分区	268
8.7	侧裂面发育的空间特征	284
8.7.1	侧裂面发育的分层特征	284
8.7.2	侧裂面发育的部位特征	285
8.8	侧裂面发育状况分区	286
8.8.1	概述	286
8.8.2	侧裂面高程密度分区的方法	286
8.8.3	侧裂面高程密度分区结果分析	290
9	基体结构面迹长研究	291
9.1	基体结构面迹长研究	291
9.1.1	基体结构面全迹长调查	291
9.1.2	结构面迹长概率模型	295
9.1.3	广义 H-H 迹长估计模型的推广算法及 H-H2 迹长估计公式	295
9.1.4	迹长估计模型的适用性分析	297
9.2	基体结构面迹长综合取值及其成果分析	298
9.2.1	基体结构面迹长估计的综合取值	298
9.2.2	迹长估计方法的可靠性检验	301
9.2.3	迹长估计成果分析	302
10	基体结构面二维连通率研究	306
10.1	基体结构面二维连通率概率模型	306
10.2	坝肩抗力体基体结构面连通率概率模型估计	310
10.3	基体结构面连通率的二维网络计算	314
10.3.1	2-D 结构面网络模拟方法	314
10.3.2	二维结构面网络模拟过程	315
10.4	基于 2-D 结构面网络模拟的连通率计算	317
10.5	基体结构面 Monte-Carlo 网络模拟及其连通率计算	317
11	基体结构面三维连通率研究	322
11.1	概述	322
11.2	岩体结构面三维网络模拟	323
11.2.1	左岸坝肩抗力体基体结构面主要特征	324
11.2.2	右岸坝肩抗力体基体结构面主要特征	326
11.3	岩体结构面三维网络数值模型的检验	329
11.4	坝肩抗力体基体结构面三维连通率	331
11.4.1	坝肩抗力体小模型基体结构面三维连通率	333
11.4.2	坝肩抗力体大模型基体结构面三维连通率	341

11.5	坝肩抗力体基体结构面三维连通率综合分析·····	351
11.5.1	坝肩抗力体基体结构面三维连通率概率分布特征·····	351
11.5.2	坝肩抗力体基体结构面三维连通率综合取值·····	357
11.6	考虑节理为薄椭圆盘时基体结构面的三维连通率计算·····	361
11.7	小结·····	364
12	复杂岩体结构信息系统和三维可视化模型·····	366
12.1	概述·····	366
12.2	系统的一般特征·····	366
12.2.1	软件开发平台·····	366
12.2.2	软件的基本结构·····	366
12.3	岩体结构信息管理系统·····	367
12.3.1	数据库表的建造·····	368
12.3.2	数据库管理模块的建造·····	371
12.4	I、II级结构面的三维可视化模型及其构图系统·····	374
12.4.1	可视化地质模型构图系统类结构·····	374
12.4.2	二维可视化地质模型构图技术·····	375
12.4.3	三维可视化地质模型构图·····	379
12.5	基体结构面可视化研究·····	384
12.5.1	基体结构面的二维显示·····	384
12.5.2	结构面三维图形显示·····	385
12.5.3	空间复杂块体的搜索与显示·····	389
	参考文献·····	394

1 概 论

1.1 引 言

岩体,是由岩块和围限它们的不连续面组成的地质体;不连续面,也被称为结构面(以下统称结构面),在空间的分布与产出状态构成了岩体的结构。早在 20 世纪 50 年代,结构面对岩体力学特性和工程稳定性的控制作用就被以 L. Muller 等为代表的奥地利学派所认识,并认为这是构成岩体和岩块力学与工程特性差异的根本所在,由此而开始了以结构面和岩体结构研究为中心的岩体力学时代。国际岩石力学学会将岩体中的断层、软弱层面、大多数节理、软弱片理和软弱带等各种力学成因的破裂面和破裂带定义为结构面(Discontinuity),谷德振、孙广忠教授等进一步认为结构面是由一定的地质实体抽象出来的概念,它在横向延展上具有面的几何特征,而在垂向上则常充填有一定的物质、具有一定的厚度。20 世纪 80 年代孙广忠教授进一步提出了“岩体结构控制论”,并全面、系统地以此为指导研究了岩体变形与破坏的基本规律。

结构面首先是一类地质形迹,结构面的地质属性决定了它在空间上分布与力学特征上的复杂性。因而,当岩体工程涉及复杂岩体结构时,也就面临着复杂的工程地质问题。

一方面,由于天然露头或人工开挖面的限制,人们很难对岩体内结构面的几何参数进行系统而确定性的测量,对岩体中结构面特征的完备描述是困难的,有时甚至是不可能的。岩体中存在形态、大小、间距、密度和方向各异的结构面,特别是它们相互交切,形成结构面网络系统,使岩体具有结构性和不确定性的特点,成为岩体结构研究的难点之一。即便是用目前使用的测网法来测量节理,如何结合一个地区结构面发育的具体状态,合理地布置测网和选择测网的尺寸也是一个有待探索的问题。因此,发展新的研究方法成为岩体结构研究领域的前沿和热点课题。

另一方面,岩体结构面几何形态的不确定性导致了岩体力学行为的不确定性,从而使得岩体力学问题定量化程度不高或定量成果可信度偏低。就目前数值模拟技术来说,不论是有限元、边界元、离散元,还是它们的耦合计算,以及它们与模糊数学、概率统计、分形几何或与损伤力学、断裂力学的结合等等,其计算结果的可靠性均取决于岩体结构模型的正确与否以及结构面参数的选取,而岩体结构描述和岩体力学参数选取一直是岩体力学研究领域的难点。

近年来随着我国经济建设的快速发展,尤其是西部大开发战略的实施,大型能源、交通、水利水电等基础设施的建设正在掀起一个新的高潮,特别是水利水电工程建设的规模和水平也正在向大型、超大型发展,如三峡水电站工程、金沙江溪洛渡水电站工程、黄河拉西瓦水电站工程、澜沧江小湾水电站工程、糯扎渡水电站工程以及雅砻江锦屏水电站工程等都正在兴建和拟建之中。这些大型土木工程建设通常将岩体作为建筑物的地基和建筑物的环境。由于不同建造的岩体在漫长的地质历史时期曾遭受过多期的构造运动,以及浅

表生地质作用的改造,使得岩体中广泛存在规模不等、产状不同、性质各异各类不连续面或称之为结构面。正是由于这些结构面的存在,使得岩体具有显著的结构特性,其具有复杂性、非连续性、各向异性,以及力学响应的非线性等特性,从而构成岩体中的薄弱部位,成为控制岩体稳定性的重要因素之一。

自 20 世纪 50 年代以来,各国学者通过总结许多大型工程实践和一系列灾害性的岩体失稳事件,逐步认识到了岩体中的结构面对岩体变形及稳定性所起到的重要作用。因此,对岩体结构的研究已经走过了几十年的历程,国际岩石力学学会也曾对岩体结构的实验室和野外试验以及现场描述推荐过一些定量的指标体系。各国学者也曾在结构面的几何特性、力学特性、结构面的网络模拟方面做过大量的研究,取得了许多有意义的成果。但由于不同地区、不同建造和改造的岩体,其结构特征不同,因此,准确认识和描述岩体的结构和结构面仍然是一个难度很大的课题,也是工程地质和岩石力学领域的前沿和热点课题。

1.2 随机结构面国内外研究现状

岩体结构的研究始于 20 世纪 50 年代,以 L. Muller 为代表的奥地利学派最早认识到结构面对岩体力学特性和工程稳定性起控制作用,并认为这是构成岩体和岩块力学与工程特性差异的根本原因,从此开辟了结构面研究的先河。60 年代谷德振、孙玉科提出了“岩体结构”概念和岩体结构控制岩体稳定的重要观点。80 年代孙广忠提出了“岩体结构控制论”,全面、系统地研究了结构面影响岩体变形与破坏的基本规律。

在对岩体结构面的研究中,其研究内容大致可以分为三个方面:结构面几何特性、结构面力学特性和结构面网络模拟。

1.2.1 结构面几何特性研究

1978 年,国际岩石力学学会实验室和野外试验标准化专门委员会提出了“对岩体中结构面定量描述的推荐方法”,其中规定了对结构面的 10 个描述指标,包括结构面产状(Orientation)、间距(Spacing)(或密集程度)、延续性(Persistence)、粗糙程度(Roughness)、起伏度(Aperture)、侧壁抗压强度、充填情况、渗流、组数和块体大小等。自 70 年代以来,Hudson 等人用概率统计方法对结构面的几何特征进行了定量描述。

1. 结构面的产状研究

1941 年美国麻省理工学院博士 K. J. Arnord 在其博士论文“球状概率分布”中研究了方向数据球状分布的特点,为后来结构面产状研究奠定了坚实的数学基础。1964 年耶鲁大学博士 C. Bingham 的博士学位论文题为“在投影面和球面上的分布”,导致了后来人们对结构面产状的研究。

结构面优势组数的划分是一个传统的问题,通常将结构面产状投影到吴氏网上,并采用极点等密度图来进行结构面优势组数的划分。因为结构面产状极点在投影图上的分布通常是随机的,用肉眼的方法一般不容易划分,所以为了克服这方面的不足,采用了 R. J. Shanley 和 M. A. Mahtab(1976)的基于施密特上半球投影图的概率统计和设立目

标函数划分的优势组数的原理进行结构面优势组数的划分。在编制相应的计算机程序进行优势组数的划分的同时,还可以将各组结构面所对应的数据自动划分成独立的数据文件,以备下一步计算机模拟时使用。

Gaziev 和 Tiden 通过统计方法研究发现,结构面的倾向和倾角服从正态分布,而 Miller 和 Borgmanr 则认为模拟结构面产状时应设计为正态或指数分布。

2. 结构面迹长的研究

人们通常很难获得二维无限空间中真实的迹长,这是由于结构面迹长的取样具有偏差,首先必须对这种取样偏差进行校正,以获得二维无限空间真实的迹长值。校正偏差的方法主要是采用建立在概率统计基础上的端点估值器方法,国内外学者 P. H. S. W. Kulatilake 和 T. H. Wu(1984)、L. Zhang 和 H. H. Einstein (1998)、M. Mauldon (1998)、黄润秋和黄国明(1997)、陈剑平(1996,2001)进行了这方面的研究,并且取得了较好的效果。

在获得结构面统计均值的同时,还必须获得观测迹长的最佳概率分布密度函数。获取迹长最佳概率分布密度函数可采用陈剑平(1996)的 χ^2 检验法和 K-S 检验法。

迹长是反映结构面大小的重要参数,因为根据迹长概率分布函数可以计算结构面大小。1986 年美国亚利桑那大学 P. H. S. W. Kulatilake 研究了窗口内出露的可见迹长与真实三维空间结构面大小的相互关系,并将这种关系以概率密度函数形式表示出来。

Cruden(1977)、Priest 和 Hudson(1981)提出了以下结构面平均迹长估计公式:

$$l = - \frac{c}{\ln\left(1 - \frac{r}{n}\right)} \quad (1.1)$$

式中: l 为结构面平均迹长; c 为测线到平行于测线的删截线之间的距离; n 为与测线相交的迹线总数。定义半迹线长度为迹线与测线的交点至迹线端点的距离(向删截线方向),则 r 就是与测线相交的迹线中,半迹线长度小于 c 的迹线条数。上式成立的前提是假设迹长服从负指数分布,但是众多学者认为迹长服从对数正态分布。

Laslett(1982)基于极大似然原理,推导了由窗口数据估计结构面平均迹长的极大似然公式为

$$l = \frac{\sum_{i=1}^n X_i + \sum_{j=1}^m Y_j + \sum_{k=1}^p Z_k}{n + m/2} \quad (1.2)$$

式中: X_i 为第 i 条两端可见结构面的可见迹长; Y_j 为第 j 条一端可见结构面的可见迹长; Z_k 为第 k 条两端均不可见结构面的可见迹长; n 为两端可见的结构面个数; m 为一端可见的结构面个数; p 为两端均不可见的结构面个数。

Laslett 极大似然迹长估计没有考虑到测量窗口尺度对迹长估计的影响,Kulatilake 提出的平均迹长计算公式,弥补了这一缺陷,即

$$l = \frac{wh(1 + R_0 - R_2)}{(1 - R_0 + R_2)(wb + hA)} \quad (1.3)$$

其中

$$A = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta_A f(\theta, \alpha) d\theta d\alpha = E(\cos \theta_A)$$

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta_A f(\theta, \alpha) d\theta d\alpha = E(\sin \theta_A)$$

式中: R_0 、 R_2 分别是窗口内两端均不可见迹线和两端均可见迹线占迹线总数的百分比。由于很难获得由倾向和倾角两个独立变量定义的结构面二维概率密度函数, 所以这种方法在应用上受到一定的限制。

1997 年黄润秋、黄国明建立了结构面迹长与测量窗口尺度之间的关系, 推导了裂隙中点服从均匀分布条件下的迹长估算公式:

$$l = \frac{n_1 + 2n_0}{2N} \frac{\pi w h}{w + h} \quad (1.4)$$

式中: L 为窗口中结构面平均迹长; n_1 为一端可见的结构面条数; n_0 为两端均不可见的结构面条数; N 为总的结构面数, $N = n_1 + n_2 + n_0$ (n_2 为两端可见的结构面条数); h 为窗口高度; w 为窗口长度。

在不超过测量窗口对结构面迹长控制能力的范围内, 上式估计结果与实际较为一致。

3. 结构面大小的研究

迹长和大小都是反映结构面几何特征的重要参数, 但是两者概念不同。结构面的实际形态和大小到目前为止尚无法获得, 在随机结构面三维计算机网络模拟中, 结构面被认为是一种薄圆盘, 其大小由圆盘直径 D 表征。尽管如此, 值得指出的是, 圆盘不足以代表结构面的真实几何形态, 圆盘直径 D 只是表征结构面大小的一个测度。

岩体结构面三维空间的几何形态与迹长是两个不同的概念, 结构面的实际形态和大小到目前为止尚无法获得, Robertson (1970) 经过对南非铁矿近 9000 条结构面的现场调查, 得出结构面的空间长度在其走向与倾向方向上基本相当的结论, 这就为岩体结构面三维网络数值模拟过程中将结构面在三维空间的形态视为一种薄的圆盘找到了证据。在获取结构面迹长的基础上, 还要设法获取结构面圆盘直径的大小。Kulatilake (1986) 建立了二维迹长与三维圆盘直径之间的关系, 该方法通过概率统计方法与数值积分方法, 求算三维空间圆盘的平均直径及其概率分布, 取得了很好的效果。数值积分解采用如下的离散形式来获取数值解:

$$P\left(\frac{x_{j-1} + x_j}{2}, I\right) = \sum_{i=j+1}^n \frac{1}{C} [(D_i^2 - x_{j-1}^2)^{0.5} - (D_i^2 - x_j^2)^{0.5}] \\ \cdot P(D_i) + \frac{1}{C} [(D_j)^2 - x_{j-1}^2]^{0.5} P(D_j) \quad (1.5)$$

其中

$$D_j = \frac{x_{j-1} + x_j}{2} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中: x_j 为迹长; D_j 为相应的圆盘直径; P 为对应区间的概率。当取适当的 C 值使得方程 $\sum_{i=1}^n P(D_i) = 1$ 成立时, 即可获得不同圆盘所对应的概率。

几何上假设每个节理是一个由其中心位置、直径和产状定义的圆盘, 观测到的迹长分

布是圆盘与空间开挖面交切线的集合,圆盘直径完全确定了节理大小,它被看做是一个具有给定大小分布和有界期望值的随机变量。

Warburton 提出了迹长和节理直径分布之间的函数关系:

$$f(L) = \frac{4L^2}{\pi\mu_2} \int_L^\infty \frac{g(D)dD}{\sqrt{D^2 - L^2}} \quad (1.6)$$

式中: D 为节理直径; L 为节理迹长; $g(D)$ 为三维节理直径分布; $f(L)$ 为二维节理迹长分布; μ_2 为节理直径分布的二阶矩, 其中

$$\mu_2 = \frac{1}{D_2 - D_1} \int_{D_1}^{D_2} (\xi - \mu_D)^2 d\xi \quad (1.7)$$

式中: D_1 、 D_2 分别表示节理直径最小值和最大值。据此可推导出结构面平均迹长 μ_L 与平均直径 μ_D 的关系。例如, 如果 $g(D)$ 服从负指数分布, 则

$$\mu_D = \frac{\mu_L}{8} \quad (1.8)$$

在通常情况下, $g(D)$ 是未知的, 而且无法由 $f(L)$ 直接求得, 所以 $g(D)$ 需通过数值计算获得。

此外, 袁绍国、王震(1999)基于概率理论研究了节理迹长与节理真实长度尺寸之间的统计关系。

4. 结构面连通率的研究

连通率是反映裂隙在岩体中的贯通程度大小的一项指标。线连通率定义为

$$k = \frac{l}{l+i} \quad (1.9)$$

一般情况下, 裂隙的迹长 l 和岩桥长度 i 均是未知的, 上式除了具有理论上的意义外, 实际应用价值并不大。对于全迹长, 通常利用投影方法来计算连通率。有关基于统计和概率理论的连通率算法的报道不多, 其主要原因在于岩桥长度 i 难以估计。

1997 年黄润秋和黄国明在迹长估算基础上建立了连通率与测量窗口之间的近似关系表达式如下:

$$k = \frac{n_1 + 2n_0}{2N + n_2} \quad (1.10)$$

上式成立的前提条件是裂隙中点在空间上均匀分布。实践证明, 当岩桥长度 i 超过窗口的控制能力时, 将会产生较大的计算误差。

5. 结构面间距(密度)的研究

首先对结构面的间距进行模拟, 现场结构面间距的测量是一件繁杂的工作。这里舍去了现场测量间距的工作, 而是在现场获取每一个结构面迹线的端点坐标的基础上, 采用计算机程序来自动生成测线, 从而测量每一条测线上的结构面间距。同时, 进一步采用 χ^2 和 $K-S$ 检验方法进行结构间距的概率密度函数最佳拟合。

由于窗口内布置测线的长度有限, 与理论上无限长的测线的期望值存在着偏差, 其偏差校正是采用求取期望值的方法, 对于间距呈负指数分布的情形, 可以用 Priest 和

Hudson 提出的模型进行校正,公式如下:

$$E(x) = \frac{1}{\lambda(1 - e^{-\lambda L})} [1 - (1 + \lambda L)e^{-\lambda L}] \quad (1.11)$$

式中: $E(x)$ 为间距期望值; L 为测线长度; $1/\lambda$ 为平均间距。

上述仅是在二维露头上的结构面间距测量偏差的校正,结构面三维网络的数值模拟要求获得三维空间中的真实间距,要获得这一真实间距,就要将二维间距校正到三维空间,考虑每一组结构面平均方向矢量与测线间的空间夹角,采用投影的方法来获得三维间距。当然,在这一过程中还需要进行适当的取舍,将那些误差很大的测线所得的结果舍去,而保留测线与结构面平均矢量方向之间夹角足够大的间距校正值。最后采用 Oda 提出的张量法进行结构面空间密度的求算。

1976 年 S. D. Priest 和 J. A. Hudson 建立了由 Deer 提出的岩体质量指标与测线法测线长度及结构面线密度的关系,1981 年他们又提出了结构面间距测量的精度估计方法,并研究了结构面间距的可能分布形式。国内外众多学者的研究表明,结构面间距分布形式主要有两种:以 E. Ranalli(1980)、D. T. Snow 和 R. D. Call 等(1976)、S. D. Priest 和 J. A. Hudson(1976)、C. H. Becher(1978)、P. F. Wallis 和 M. S. King 等(1980)为代表的学者的统计结果多为负指数分布;以 Steffen 等(1976)、M. C. Bridges(1976)、D. M. Cruden 等为代表的学者的统计结果多为对数正态分布。

自 20 世纪 60 年代以来,各国学者采用概率论和统计学方法从各个角度研究了结构面的密度,Skempton(1969)、Fockes 和 Denness 等人(1969)用单位体积结构面的个数来表示结构面密度;Piteau(1970)用单位距离内的一组平行分布结构面在其法向上的数量表示结构面密度;Deere 等(1967)建议利用测线法测量岩体表面结构面密度。多数学者认为,结构面的空间密度应该是单位体积中某组结构面在其法向平均矢量方向上圆盘中心点的个数。

计算结构面空间密度的方法主要有: Priest-Hudson 法、Z. Sen 和 A. Kazi 法、Kayzulovic-Goodman 法、Kulatilake - Wu 法和裂隙张量法。国内金曲生、范建军、王思敬等(1998)根据结构面与测量窗口的交接关系,提出了一种计算结构面密度的新算法。但是由于求取结构面空间密度比较困难,所以各种计算结果都只是一种近似解。

6. 结构面产状测量偏差的校正

在结构面窗口测量取样过程中存在着产状取样偏差,偏差主要来源于以下两个方面: ①结构面相对于取样域(窗口)的产状。R. D. Terzaghi(1965)曾经指出了这一误差的存在,当结构面与取样窗口的夹角 $\alpha=0^\circ$ 时,结构面与取样窗口相交的概率为零,而当 $\alpha=90^\circ$ 时,相交的概率最大。在露头或钻孔中获取产状样本的个数可以由下式来表示: $N_s = \frac{l \sin \alpha}{d}$ (式中 N_s 是取样个数, l 是取样窗口的长度, d 是结构面的间距)。②结构面的大小、形态和测量窗口的形态、大小。前两者也都会影响产状取样的概率。当窗口一定时,显然较大的结构面有较大的被取样的概率,较小的结构面有较小的被取样的概率。

对由上述两种原因导致的产状取样偏差必须予以校正,校正是通过分配以不同权重的办法来实现的。通过前面的工作,我们已经获得了各组结构面在空间中的平均直径,这