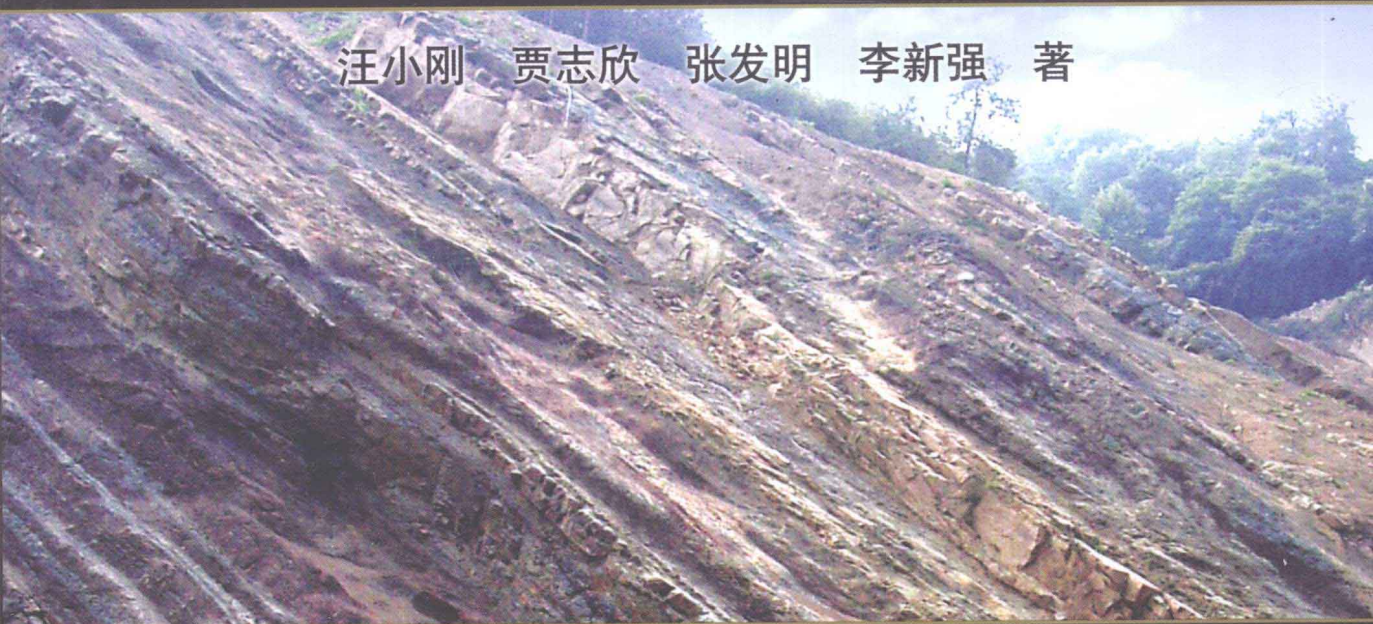


岩体结构面网络模拟 原理及其工程应用

汪小刚 贾志欣 张发明 李新强 著



The Simulation of Rock Joint Network and its Application



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



- 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司
雅砻江水电开发联合研究基金 (50539100)
- “十一五”国家科技支撑计划项目 (2008BAB29B01)
- “十一五”国家科技支撑计划项目 (2008BAB29B03)

资助

岩体结构面网络模拟 原理及其工程应用

◎ 汪小刚 贾志欣 张发明 李新强 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

岩体结构面网络模拟是伴随着近代数理统计理论和现代计算机技术的发展,而逐步发展形成的一门新兴技术,为研究岩体中不确定性结构面复杂的空间分布特征提供了强有力的工具。本书是作者 20 多年来在该研究领域所取得的科研成果的系统总结。书中详细介绍了岩体结构面网络计算机模拟的基本理论,系统论述了网络模拟技术在确定一系列岩体重要物理力学指标中的应用原理,并针对边坡稳定分析中的几个难点问题,着重阐述了应用网络模拟成果来解决这些问题的具体方法。本书在介绍上述理论、原理和方法的同时,还给出了大量工程的具体应用实例。

本书对从事水利、水电、土木、交通和矿山工程等领域的科研、设计和施工人员具有较高的实用价值,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩体结构面网络模拟原理及其工程应用 / 汪小刚等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.12
ISBN 978-7-5084-7184-6

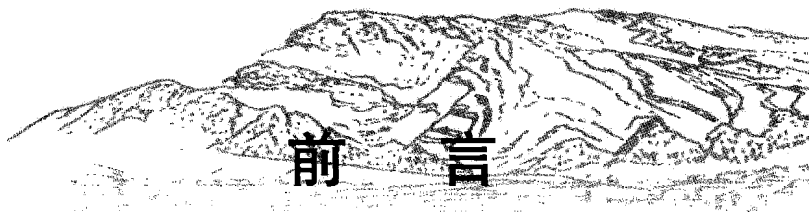
I. ①岩… II. ①汪… III. ①岩体—结构面—三维—计算机模拟 IV. ①P583-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第016686号

书 名	岩体结构面网络模拟原理及其工程应用
作 者	汪小刚 贾志欣 张发明 李新强 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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 26印张 617千字
版 次	2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	88.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



20 世纪 80 年代末，作者及其所在的课题组依托陈祖煜院士主持的水利电力部重点科研项目“漫湾水电站左岸边坡稳定性专题研究”，与中国地质大学（武汉）潘别桐、徐光黎老师合作，在国内率先将岩体结构面网络计算机模拟技术应用到岩质边坡稳定性分析和评价研究工作中，取得了可喜的成果。

此后，在 20 多年的时间里，我们一直致力于这一领域的相关研究工作。结合国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目和数个省部级重点科研项目的实施，围绕我国一系列重大水利水电工程的建设实践，从工程实际应用的需求出发，对这一技术的理论基础，特别是应用原理和应用方法等进行了不断的总结、完善和深入有益的探索，并研制开发了配套齐全的计算机程序和软件，目前已在边坡工程领域逐步形成了一个相对完整、较为成熟的应用体系。突出体现在以下几个方面：

(1) 改进完善了岩体结构面现场量测、统计分析和计算机模拟的相关技术，如结构面分组方法、几何参数的统计分析方法、结构面网络的计算机生成和可视化技术以及模拟网络与实测资料的对比验证方法等，进一步提高了岩体结构面网络模拟的可靠性和可操作性。

(2) 提出了从细观研究向宏观分析过渡的应用研究思路，即：通过网络模拟，在计算机上获得与现场岩体统计相似的大尺度“岩体试样”，进而应用已有的力学理论和数值分析方法，在细观层面上研究工程所关注的各种岩体工程特性指标（如连通率、综合强度和渗透张量等），再将基于大量抽样分析所得到的这些指标的统计结果用到宏观的工程分析中。这一思路为岩体结构面网络计算机模拟技术在实际工程中的应用，提供了现实可行的途径，开辟了更为广阔的天地。

(3) 建立了一个基于网络模拟确定节理岩体连通率的全新方法。该方法突破了传统连通率的概念，把连通率的计算与岩体中两个基本单元（“岩桥”和结构面）的破坏机理以及剪切方向紧密地联系起来，将连通率的求解归结为在结构面网络图中寻找具有最小抗剪能力的岩桥、节理组合破坏路径的问

题,是目前求解岩体结构面连通率最为合理可行的方法。所得连通率不仅物理意义更加明确,而且是一个与剪切方向直接相关的数值,充分反映了岩体各向异性的破坏特征。

(4) 形成了通过细观的裂隙网络渗流分析推求节理岩体宏观渗透张量的数值仿真试验方法,较为合理地解决了岩体渗流分析中的瓶颈问题。该方法以岩体结构面网络模拟为基础,针对内含特定结构面系统的岩体“试件”,利用裂隙岩体渗流分析的原理和方法,在计算机上进行裂隙网络渗流特性的仿真试验,依据仿真试验结果,结合现场试验(抽水或压水试验)的对比修正,求得反映节理岩体各向异性的宏观等效的渗透张量,用于实际工程的渗流分析中。这一思路不仅充分利用了裂隙渗流分析方法可以考虑岩体结构面空间分布特征(随机性、变异性)的优势,而且避免了将裂隙网络渗流分析方法直接应用于实际工程对象时所带来的一系列问题。

(5) 以岩体结构面连通率和岩体渗透张量等工程特性指标为桥梁,将岩体结构面网络模拟分析结果成功地应用到岩质边坡的稳定分析中,构建了一个较为完整的分析体系,包括岩体质量评价、综合强度确定以及滑动、楔体和倾倒等典型边坡失稳模式的稳定分析。该体系既充分利用了传统分析方法所具有的简便易行的特点,同时还可全面考虑天然岩体所固有的不均一性、不连续性、各向异性和不确定性等重要因素,使稳定性分析评价更加符合工程实际。

到目前为止,相关研究成果已在思林、李家峡、龙滩、东风、小湾、洪家渡、恰普其海、锦屏水电站和长江三峡水利枢纽等一系列重大工程中获得了广泛的应用,为工程设计和施工提供了重要的依据。

本书是作者20多年来在岩体结构面网络计算机模拟分析领域所取得的研究成果的系统总结。书中详细介绍了岩体结构面网络计算机模拟分析的相关理论和方法,系统论述了岩体结构面网络计算机模拟在岩质边坡工程中的应用原理,重点阐述了岩体结构面网络计算机模拟分析在确定节理岩体连通率和综合强度、裂隙岩体渗透张量以及进行边坡稳定性分析评价时的具体使用方法,并对所开发的配套计算机程序和软件作了简要的说明。在介绍相关研究成果的同时,书中还给出了大量的工程应用实例。希望本书的出版能为相关领域的广大科研、设计和施工人员提供有价值的参考。

还应指出的是,到目前为止虽然有关岩体结构面网络模拟技术的研究,在理论和应用上都取得了长足的进展,但该技术本身特别是该技术在工程实际应用方面还有很多不尽人意的地方,需要广大工程地质、岩石力学和科研设计人员甚至是数理力学工作者共同努力,通过进一步深入的研究,不断地

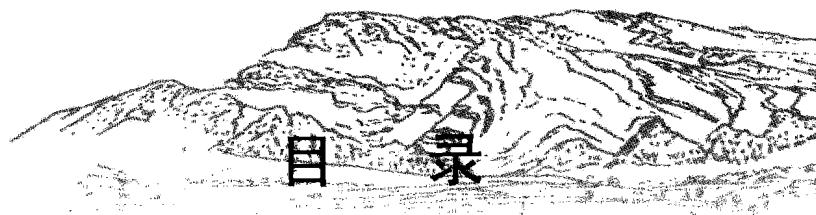
加以改进和完善。

岩体结构面网络模拟技术代表了工程地质从定性描述向定量分析发展的趋势，也反映了近代科学技术对传统学科领域的渗透以及推动作用。可以预见，随着这门学科技术的不断完善和推广应用，必将会进一步促进工程地质和岩石力学的快速发展，并在实际工程中发挥越来越重要的作用。

最后借本书出版之际，对曾参与过相关工作，为本书出版付出辛勤劳动的各位同仁表示衷心的感谢！

作者

2010年10月



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 岩体结构面几何参数统计特性的研究现状	4
1.3 网络模拟在边坡工程中的应用现状	14
1.4 本书主要内容	16
第 2 章 结构面测量统计与概率模型	17
2.1 概率与数理统计理论的相关知识	18
2.2 结构面现场测量方法	25
2.3 实测资料的整理和分析	39
2.4 频率分布直方图的绘制方法	44
2.5 概率分布形式的确定方法	47
2.6 统计特征参数的确定方法	50
2.7 概率模型的拟合性检验	53
2.8 结构面测量统计中有关问题的讨论	59
2.9 结构面几何参数的统计分析程序——PSA 简介	62
2.10 工程实例——昌马水库坝基岩体结构面统计分析	67
第 3 章 岩体结构面网络的计算机模拟	74
3.1 蒙特卡罗法的基本原理	74
3.2 二维岩体结构面网络的计算机模拟	78
3.3 三维岩体结构面网络的计算机模拟	82
3.4 网络模拟效果的检验	95
3.5 结构面网络模拟程序——MESH 简介	99
第 4 章 网络模拟在岩体质量评价中的应用	102
4.1 RMR 岩体分类方法简介	102
4.2 基于网络模拟确定 λ 和 RQD 的方法	103
4.3 应用 RMR 分类指标确定岩体强度的经验方法	115

第 5 章 结构面连通率和综合抗剪强度的确定	126
5.1 结构面与岩桥的强度破坏机制	126
5.2 岩体结构面二维连通率	128
5.3 岩体结构面三维连通率	136
5.4 基于连通率的岩体综合抗剪强度确定方法	153
5.5 结构面连通率计算程序——PERC-2D 简介	156
5.6 三峡工程 1~5 号坝段岩体结构面连通率研究实例	158
5.7 小湾厂房进水口边坡结构面三维连通率研究实例	173
5.8 漫湾电站左岸边坡岩体结构面连通率和综合抗剪强度研究实例	175
第 6 章 网络模拟在边坡稳定分析中的应用	179
6.1 引言	179
6.2 考虑岩体各向异性的滑动稳定分析	180
6.3 随机楔体的稳定分析方法	187
6.4 网络模拟在倾倒破坏稳定分析中的应用	199
第 7 章 网络模拟在岩体渗流分析中的应用	212
7.1 渗透张量及其性质	212
7.2 岩体三维裂隙网络渗流分析方法	215
7.3 与节理岩体等效渗透张量有关的几个问题	225
7.4 节理岩体单元体等效渗透张量的确定方法	228
7.5 工程应用	234
第 8 章 工程应用实例	245
8.1 引言	245
8.2 三峡工程升船机上闸首二维连通率研究	246
8.3 小湾水电站边坡稳定性研究	261
8.4 糯扎渡水电站边坡稳定性分析	286
8.5 锦屏一级水电站边坡稳定性分析	297
8.6 新疆某水利枢纽工程边坡稳定性分析	311
8.7 思林水电站船闸边坡稳定性分析	323
8.8 大柳树水电站边坡稳定性分析	339
8.9 天荒坪上水库边坡稳定性分析	353
8.10 龙滩水电站边坡稳定性分析	362
参考文献	391

第 1 章 绪 论

1.1 引言

在水利水电工程、土木工程、核电工程以及矿产资源开采等相关工程领域，都会遇到岩体这一复杂的载体。岩体中不同地质成因所形成的各种大小不一、形态复杂、分布错综的各类结构面（如断层、层面、破碎带和节理裂隙等）相互交切形成了特定的岩体结构，这些结构面和由这些结构面所控制的岩体结构形态决定了岩体的宏观工程力学特性；如变形、强度和渗流特性等。因此，在研究和处理岩体工程的相关问题时，无不例外地首先要对岩体结构面的空间分布特征进行深入的研究。毋庸置疑，把握岩体结构面的几何与力学特征是工程地质专家、土木和矿产工程师解决岩石力学问题的前提和基础，可以坦言，不把握岩体结构的这一客观形态，就谈不上对岩体工程力学特性的真正的分析与研究。

岩体结构面实际上是不同地质历史时期在岩体中形成的具有一定方向、一定规模、一定形态和特性的地质界面。这些地质界面，可以是无任何充填的岩块间的刚性接触面，如劈理面、节理面、层面、片理面等；亦可以是具有充填物的裂隙面或明显存在上、下两个界面的软弱夹层；还可以是具有一定厚度（宽度）的构造破碎带。目前，对岩体结构面的分布特征通常采用结构面的倾向、倾角、间距、延伸长度（又称迹长）和隙宽等几个主要的几何参数来描述。这些几何参数规定了岩体被这些结构面切割的特征，因而是研究岩体结构及其工程特性的重要参数。传统的工程地质勘探采用地质描述的方法来测量和记录这些结构特征。例如，地质师通常使用“走向北西 $330^{\circ}\sim 350^{\circ}$ ，倾向南西，倾角 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$ ”这类语言来描述某组结构面，采用这种描述方法，由于受到测量精度、测量范围和位置等因素的影响，不同的地质师会给出大体一致但并不完全相同的描述。在实际岩体中，结构面的分布形态、组合关系和力学特性是十分复杂的。当研究某一岩体工程问题时，除了一些规模较大的层面、软弱夹层和断层、断裂外，还包含有成千上万条无法准确测量和定位的节理裂隙面，这些结构面是影响岩体力学特性的重要因素。对于那些规模较大的结构面，由于其在某一工程区内发育的程度有限，可以用传统的确定性方法去研究，而对于那些延伸短、分布广的大量的节理裂隙面，通常称为Ⅳ、Ⅴ级结构面，因其发育的广泛性、分布的不确定性，传统的工程地质方法就显得无能为力了。

现代科学技术的发展，尤其是 19 世纪中叶逐渐形成的概率数理统计理论，为人们研究非确定性的随机现象问题提供了强有力的工具，同样也为深入研究岩体中结构面不连续、不均匀和不确定的分布特征开辟了新的、可行的途径。已有的研究成果表明，结构面在空间的分布具有成组出现的特性，并且服从一定的统计规律。因此，可以根据现场平洞、钻孔及露头面上所获得的、有限的结构面样本资料，借助概率数理统计理论，通过统



计推断,求得统计意义上的估值来全面地表征这种分布特性。当应用这一方法来描述某组节理面的产状时,描述的语言将是“走向的方位角呈正态分布,其均值为 342° ,标准差为 10° ,倾向南西,倾角呈均匀分布,均值为 48.5° ,标准差为 4.1° ”。由于这是通过已经编好的计算机程序分析计算获得的,不同的人使用同样的现场量测资料就会得到完全一致的结果。应当说,建立在数理统计理论基础上的结构面描述方法,无论在理论和应用上都是一个很大的进步。

围绕结构面分布统计特征的研究,英国帝国理工学院的 Hudson 和 Priest 先后发表了一系列论文,对岩体节理面的间距、迹长的概率分布规律进行了详细的分析探讨,并首先倡导了一种基于概率统计原理的野外简易测量方法,称为测线法。1984 年 Kulatilake 和 Wu 又建议了一种通过在野外某一矩形露头面上实测某组结构面与其切割、相交和包容的节理面数目来确定结构面平均迹长的方法,称作统计窗法。这两种方法已成为目前结构面现场调查和测量的主要手段。

在研究岩体结构面统计特征的同时,工程地质和岩石力学领域内逐步形成并建立了一个应用蒙特卡罗原理和计算机模拟技术,在计算机中再现岩体结构面的分布图像,进而推求岩体连通率 k 、岩体质量指标 RQD 和岩体渗透张量等一系列重要物理力学特性指标的新领域——岩体结构面网络计算机模拟。

蒙特卡罗法是第二次世界大战以来发展起来的一种研究随机现象的十分有效的方法和手段,在各个领域内均获得了广泛的应用,其主要功能就是根据随机变量的已知密度函数,利用 $[0, 1]$ 区间内的均匀随机数来获得相应随机变量的样本。该方法将岩体中结构面分布作为一种随机事件来处理,应用蒙特卡罗原理,通过“随机或平行采样”的方法,在计算机中生成与现场岩体具有相同统计规律的结构面网络图像,为从整体上把握岩体的结构特征,并进一步研究岩体力学相关问题打下了坚实的基础。不过应当说明的是,根据上述原理每一次在计算机上生成的网络图像,只是一次随机抽样的结果,并非自然界岩体中结构面网络的真实再现,根据蒙特卡罗原理,需大量地重复抽样,只有在大量抽样基础上所求得的物理力学特性指标的平均值才会趋近于真实岩体的相应量。在实际应用中,可以通过大量的随机抽样,获得某一指标在一定置信水平下的统计结果,这也正是研究岩体特性时所需要的基本量值。倘若只利用某一次抽样生成的网络去直接研究岩体的特性,一定会带来适得其反的应用效果,这也是目前在岩体结构面网络计算机模拟研究中经常会出现的问题,应当引起高度重视。

岩体结构面网络模拟技术在 20 世纪 80 年代前后,受到了工程地质和岩石力学领域研究人员的广泛注意。Priest 和 Samaniego 首先应用这一方法建立了裂隙渗流的二维模型,其后围绕这一问题各国学者做了大量卓有成效的研究工作,在实际工程的应用上取得了良好的效果。

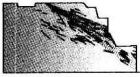
在“七五”期间,中国水利水电科学研究院应用结构面网络模拟技术在漫湾水电工程中有了较成功的实践,网络模拟获得的连通率及抗剪强度参数被应用于漫湾水电站左岸边坡稳定分析研究中。此后该方法在不断改进和完善的基础上,作为一种重要的研究手段,被广泛应用于思林、李家峡、龙滩、东风、小湾水电站和长江三峡永久船闸边坡等工程中,为工程设计和施工提供了重要的依据。结构面网络模拟理论在工程中的详细应用情况



见表 1.1.1。

表 1.1.1 结构面网络模拟理论在工程中的应用

工程名称	工程概况	实测结构面(条)	网络模拟成果	成果应用
漫湾水电站	混凝土重力坝, 坝高 132m。左岸山体岩性为流纹质岩、流质碎屑岩, 节理密集	1314	确定连通率和强度参数	左岸滑坡分析
龙滩水电站	碾压混凝土重力坝, 坝高 192m。岩性以砂岩为主, 砂岩、粉砂岩、泥板岩互层夹少量灰岩的层状岩体	7000	确定连通率、强度参数及地质模型概化	进水口、倾倒蠕变岩体、导流洞进口等边坡倾倒稳定分析
小湾水电站	混凝土双曲拱坝, 坝高 292m。主要岩性为夹有片岩的黑云母花岗岩和角闪斜长片麻岩	18361	确定线连通率、面连通率和强度参数	拱座抗力体和坝肩边坡、厂房进水口边坡、导流洞进出口边坡、左岸下游(四号山梁)边坡、坝基开挖槽边坡及左岸堆积体稳定分析, 随机楔体稳定分析
三峡水利枢纽	混凝土重力坝, 坝高 185m。基岩为闪云斜长花岗岩中间穿插不同岩脉	840	确定连通率和强度参数	1~5 号坝段、升船机上闸首节理岩体连通率及船闸边坡稳定分析
李家峡水电站	混凝土双曲拱坝, 坝高 165m。基岩为前震旦系变质岩, 岩体中结构面发育	6800	确定连通率和强度参数	坝肩边坡、导流洞进出口等边坡稳定分析, 随机楔体稳定分析
思林水电站	碾压混凝土重力坝, 坝高 117m。基岩以碳酸盐沉积岩为主	1200	确定线连通率、面连通率和抗剪强度指标	航运建筑物各段边坡稳定分析, 倾倒边坡稳定分析, 随机楔体稳定分析
恰甫其海水利枢纽	黏土心墙坝, 最大坝高 111m。主要为下石炭统凝灰质砂岩、粉砂岩、凝灰岩与泥晶灰岩, 节理发育	2000	失稳模式判断、确定连通率及强度参数	主要针对左岸山体稳定性进行分析研究
糯扎渡水电站	黏土直心墙堆石坝, 最大坝高 261.5m。左岸 800m 以下、右岸 100m 以下为花岗岩, 上覆三迭系忙怀组沉积岩	8679	失稳模式判断、确定连通率及强度参数	右岸坝肩边坡、左岸溢洪道边坡稳定分析
天荒坪抽水蓄能电站	主、副坝均为土石坝, 主坝在坝轴线处高 73m。主要岩性为流纹质角砾(含砾)熔凝灰岩、层凝灰岩、辉石安山岩	760	确定连通率和强度参数	水库东副坝及进出水口边坡稳定分析
黄登水电站	碾压混凝土重力坝, 最大坝高 204m。坝基为卸荷岩体变质火山岩	6000	确定连通率和强度参数	卸荷岩体工程特征研究
昌马水利枢纽	心墙坝, 最大坝高 54m。奥陶系轻变质火山碎屑岩及灰岩、火成岩(岩脉)	968	失稳模式判断、确定连通率及强度参数, 地质模型概化	右岩边坡稳定分析, 倾倒稳定分析及加固措施优化
锦屏一级水电站	混凝土双曲拱坝, 最大坝高 305m。主要岩性为砂板岩、大理岩	1238	确定连通率及强度参数	左右岸、导流洞等边坡稳定分析
洪家渡水电站	面板堆石坝, 最大坝高 179.5m。岩性以中厚层灰岩、泥质灰岩为主	8000	确定连通率及强度参数	进水口顺向坡二维、三维稳定分析



到目前为止,关于岩体结构面网络模拟技术的研究,无论是在理论还是在应用上都取得了长足的进展。该方法代表了工程地质从定性描述向定量分析发展的趋势,也反映了近代科学技术对传统学科领域的渗透以及发挥的推动作用。可以预见,随着这门科学技术的推广,将会进一步促进工程地质和岩石力学的发展。

1.2 岩体结构面几何参数统计特性的研究现状

如前所述,在岩体工程相关问题的研究中,全面地了解和把握岩体结构面的空间分布特征是开展其他一切工作的前提和基础。对于那些规模较大的结构面,可以采用确定性的方法去研究,而对于那些延伸短、分布广的Ⅳ、Ⅴ级结构面,只能依赖概率论与数理统计的方法。本书所指的网络模拟技术,主要也是针对这些结构面而言的。

目前,源于矿产地质研究的地质统计学已发展成为一套较完整的理论体系,由于它们的种种优点(如实践性强)已被作为一种解决实际问题的重要工具得到了广泛的重视和应用。随机模拟作为地质统计学技术的三大内容(克理金、变差函数、随机模拟)之一,在用于地质现象的非均质性与空间不确定性的分析方面表现出巨大优势而受到极大的关注。对于结构面网络模拟理论与方法的研究,国内外许多学者作出了卓越的贡献,主要表现在以下几个方面。

1.2.1 结构面产状

结构面产状,又称为结构面方位,是指结构面在空间的分布状态,结构面相对于工程结构的方位,在很大程度上决定着是否存在不稳定条件和过度变形的问题。1932年Schmidth提出了用于描述结构面产状的极点投影等密度图法,该方法为研究结构面产状的分布提供了重要手段。

Fisher于1953年进一步发展了基于结构面产状分布平均值的理论,研究了产状数据在半球分布中关于结构面产状平均矢量圆对称分布的特征,即结构面产状的Fisher分布模型;Mardia在其《方向数据的统计》一文中,通过对结构面产状测量数据的统计分析,认为结构面产状确实服从Fisher分布,进一步证实了产状服从Fisher分布模型的结论。

1964年,美国耶鲁大学Bingham博士在其博士论文中详细讨论了结构面产状的分布特征,认为在球面及投影平面上,结构面产状是关于其平均矢量的椭圆对称分布,进而提出了关于产状分布的Bingham模型。

Goodman、陶振宇、潘别桐等的研究表明,在坚硬岩体中,结构面产状的分布服从半球正态分布。

美国麻省理工学院Dershowitz、Einstein、Kohlbeck、Grossman等也相继进行了结构面产状分布模型的研究,他们根据不同的地质现象和结构面所处不同地质环境下测得的结构面产状数据与其分布模型的对比研究表明:没有一种分布模型可以囊括所有地质条件(岩性,构造等)下结构面产状的分布规律。Fisher模型、双变量Fisher模型和Bingham分布模型几乎呈相等的可能性适用于结构面产状的分布。

Dershowitz在其硕士论文中指出,在研究结构面的统计特征时,根据结构面的极点



投影进行分组是其必须的第一步,但分组的结果并非都令人满意。

Einstein 等研究表明:产状的分布形式与结构面分组有关,合理的分组可以得到较为准确的结果。Einstein 根据研究结果,总结出结构面产状的分布形式主要有均匀分布、Fisher 分布、椭圆分布、Bingham 分布、正态分布等五种。

若将结构面产状数据绘制到 Lamber 等面积极点投影图上,具有优势方位的数据会落入一个相对集中的区域,这些优势方位表明了产状的两个要素即倾向和倾角之间存在着相关关系。以上所介绍的双变量随机密度函数如 Bingham 分布、Fisher 分布及双变量正态分布都可以用来描述产状的这种分布特征。

1975 年, Mardia 通过对某一红色页岩中实测结构面倾向和倾角关系的研究,认为倾向 α 和倾角 β 两变量之间有时是相互独立的。因此,结构面产状的密度分布函数 $f(\alpha, \beta)$ 可以描述成 $f(\alpha)$ 和 $f(\beta)$ 的乘积,避免了产状双变量分布研究的复杂性,为结构面网络模拟提供了一种近似简便的方法。

汪小刚、陈祖煜等通过对中国几个大型水利工程的结构面产状的统计,取得了与上述一致的结论,认为结构面产状可以分别用倾向、倾角的分布模型来单独模拟,不仅简化了分析的难度,而且可以取得令人满意的结果。

1.2.2 结构面几何形状

由于受现有勘探方法与手段的限制,表征结构面分布的几何参数资料主要是通过露头、钻孔或平洞等表面测量得到的,而对结构面的真实形状则很难直接观测到,因而对其研究的文献也相对较少。

Bankwitz、Kulander、Barton 等通过对结构面三维形状的观察,得出结构面在空间的形状为椭圆形的结论。Cleary 于 1984 年通过实验室内的水力破裂试验,观察到结构面形状为圆形的现象。

Veneziano 在其“节理岩体中的概率模型”一文中,通过引进一系列呈泊松分布的线段来构成结构面的几何形状,得到的多边形形状在自然界中也可以观察到。

Bertson 对南非 Debeer 矿近 9000 条结构面的调查分析,得出结构面沿走向和倾向方向的延伸性大致相同的结论,为确定结构面的几何形状提供了重要依据。

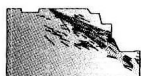
Baecher 等人在研究结构面走向、倾向分布特征后,指出结构面在平面上具有二维的特征,从而提出了 Baecher 圆盘模型的假定, Einstein、Warburton、Long 等都曾把该模型应用到岩石力学的分析中。Dershowitz 等通过现场结构面调查,证实了结构面形状为圆盘的假定。伍法权在其所著的《统计岩体力学原理》一书中,提到可以用断裂力学的理论来解释结构面为薄圆盘的现象。

汪小刚、贾志欣等在进行澜沧江小湾水电站坝基进水口边坡结构面三维网络模拟研究时,采用薄圆盘模型成功地解决了边坡随机楔体的稳定性分析问题。

纵观国内外关于结构面几何形状模型可以概括为以下几种类型:

1. 正交模型

正交模型是最早提出的岩体结构面几何模型,该模型首先由 Irmay (1955)、Childs (1957) 和 Snow (1965) 等人提出。正交结构面几何模型的显著特点在于其假定所有的



结构面均可通过三组无边界的正交结构面来定义，每一条结构面均包含在两个或三个相互正交的平行结构面组内。

正交结构面模型也可以定义为有边界的结构面。Mueller (1963) 介绍了一种这样的模型 (图 1.2.1)，该模型在一个平面上定义有多个共面的结构面。如结构面有边界，就必须定义结构面形状、大小，以及结构面终止 (即结构面边界) 的处理方法。结构面的边界可以假定在平面的交线上 [图 1.2.1 (a)]，也可独立于平面的交线 [图 1.2.1 (b)]。

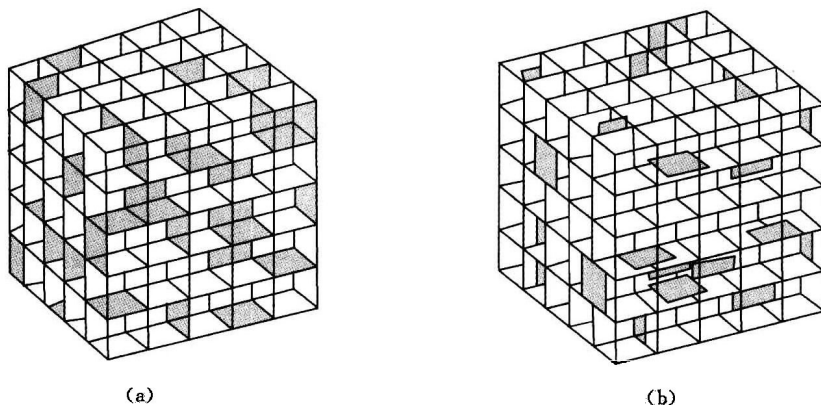


图 1.2.1 正交几何模型有边界结构面的定义
(a) 由平面的交线定义结构面；(b) 结构面的定义与平面的交线无关

2. Baecher 模型

Baecher 模型的基本特点是假定结构面形状为圆盘或椭圆盘 (图 1.2.2)。圆盘模型是应用最广泛的一种模型。当假定结构面为圆盘时，其大小完全由一个参数即半径 R_j 确定。对所有结构面来说，结构面半径 R_j 可以是常数，也可以是由半径分布函数 $f(R_j)$ 确定的随机变量。因为结构面的半径在现场是无法直接量测的，所以其分布形式需根据现场露头面上出露迹线的测量结果通过统计推断获得，同时还应考虑其是否实用方便。

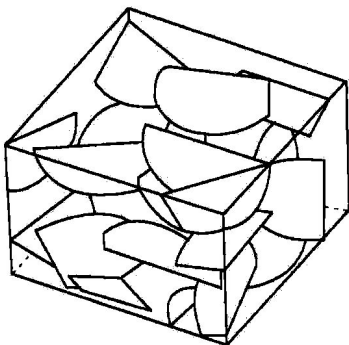


图 1.2.2 Baecher 结构面几何模型

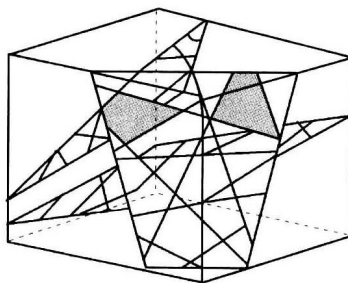


图 1.2.3 Veneziano 结构面几何模型

3. Veneziano 模型

Veneziano 模型由 Veneziano 于 1978 年提出。Veneziano 模型所定义的结构面形状为多边形 (图 1.2.3)，可适用于任意形状的结构面。当多边形为矩形且结构面相互垂直时，



可用正交几何模型来描述。

4. 马赛克模型

1974 年 Ambarcumjan 通过将平面随机分割成互不重叠的凸多边形, 定义了二维马赛克模型。这一定义可进一步推广至三维, 即把空间分割成互不重叠的凸多面体。在这一模型中, 由多面体的面来定义岩体中的结构面 (图 1.2.4)。目前, 马赛克模型还尚未应用到岩石力学的相关研究中。

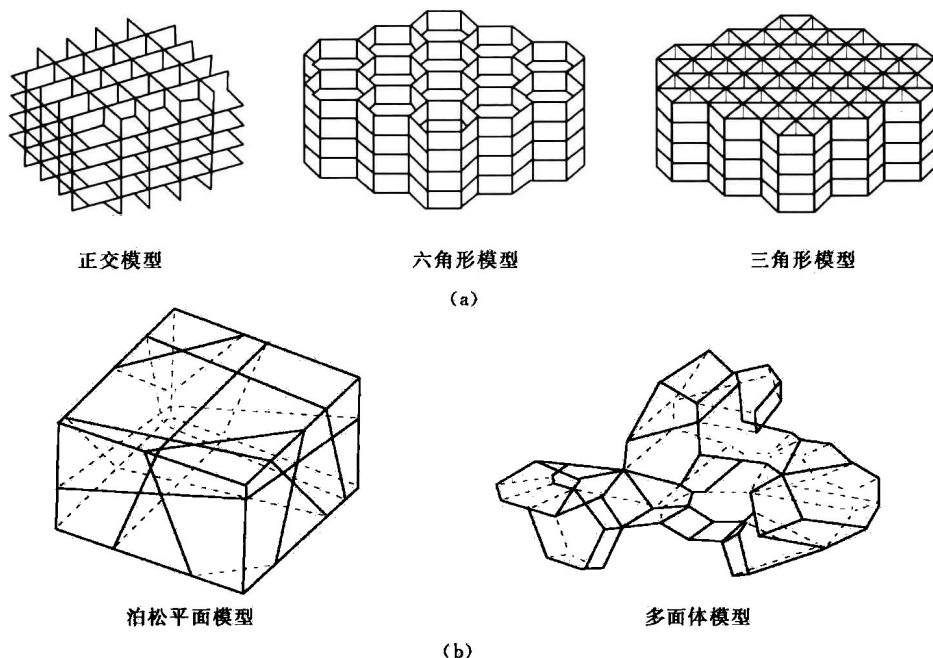
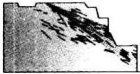


图 1.2.4 三维马赛克结构面几何模型
(a) 规则 (确定性) 马赛克模型; (b) 不规则马赛克模型

1.2.3 结构面延伸范围

结构面的延伸范围 (大小) 在现场很难直接量测, 暴露于自然界露头中的结构面只是实际结构面的一部分。目前, 结构面的延伸范围只能通过在现场露头面或平洞洞壁上出露的结构面迹长来表征。用现场实测的结构面迹长来推求结构面大小及其分布规律是结构面网络模拟的重要过程。在二维网络模拟中结构面大小可用结构面迹长来反映, 而在三维网络模拟中结构面大小则通常采用圆盘的直径来描述。

结构面的迹长可以从数厘米到数千米。Robertson、Calletal 通过对野外实测资料的统计分析结果表明, 结构面迹长呈指数分布。MalMahon, B Bridges, Barton 和 Einstein 等却得到了不同的结论, 他们认为结构面迹长的分布服从对数正态分布。而 Segall 等通过对花岗岩中节理迹长的分布研究, 提出节理迹长的分布服从双线性理论。Dershowitz 在其博士论文中提出并证实节理迹长服从 Gamma 分布, 而且指出, 指数分布只是 Gamma 分布的一种特殊情形, 双线性分布也只是 Gamma 分布的一种近似。



Einstein 等根据对某一工程实测资料的分析, 得到结构面迹长的分布如表 1.2.1 所示。当置信水平为 5% 时, 82% 的结构面迹长服从对数正态分布。

表 1.2.1 结构面迹长分布概型

位 置		指数分布	Gamma 分布	对数分布
A 区	洞顶	×	×	×
	洞底	×	×	×
	边墙	×	×	✓
	边墙	×	×	✓
格林柯 (Greenc) 特林克 (Trench)	A	×	×	✓
	B	×	×	✓
	C	×	×	✓
	T	×	✓	✓
B 区		×	×	✓
布卢希尔斯 (Blue Hills)		×	×	✓
派尔斯 (Pine Hills)		×	×	✓

汪小刚等人根据国内大量工程实例的总结, 认为结构面迹长的分布在不同的工程地质区内会表现出不同的形式, 其中对数正态分布约占 50.0% 左右, 其次为负指数分布约为 27%, 而正态和均匀分布则分别占 11% 左右。

以上各位学者所提出的结构面迹长分布模型, 都有相应的地质背景和实测资料作为依据。

关于结构面迹长的估值方法, 自 1977 年 Cruden 提出用测线法来估计平均迹长以来, 对结构面迹长的研究, 各国学者都进行了不懈的努力。其中 Priest 和 Hudson 提出的基于测线的迹长估计法, 从概率的角度充分考虑了实际露头面尺寸和结构面本身大小对实测迹长的影响, 使得采用测量的迹长样本资料来推求结构面真实的平均迹长有了更为坚实的理论依据, 因而, 在实际工程中获得了广泛的应用。

Kulatilake 是对结构面迹长进行研究的另一位杰出人物, 他提出的用于结构面迹长估计的统计窗法, 至今仍是非常重要也是应用较广的方法之一。如前所述, 结构面迹长的测量主要在天然露头、人工露头和洞洞壁上进行, 由于受到测量范围的局限, 很难测得全部结构面的真实迹长, 统计窗法可在一定程度上消除这种影响。统计窗法的基本思路是: 在所选取的测量平面上预先布置一个矩形的区域 (称做统计窗), 通过研究和记录某一组节理面与矩形区域的相互关系 (主要有包容、相交、切割三种类型), 采用简单计数的方法, 依据三者统计窗内出现的频率 (概率) 来估算结构面的平均迹长。该方法与测线法相比, 不需要知道各类迹长的密度分布形式及其相互间的关系, 十分简便。

在解决岩体工程实际问题时, 人们不仅需要了解结构面在二维平面上迹长的分布, 有时还需要知道其在空间的尺寸和分布特征。对于空间中的圆盘形结构面, 大量研究表明结构面直径的分布无论是指数形式还是对数正态分布形式, 最终都会导出迹长呈对数正态分布的结论, 基于这一结论, Warburton 提出了由迹长分布推算结构面空间尺寸和分布的方法。

综上所述, 现阶段可以利用测线法或统计窗法, 通过在平面内实测得到的结构面迹长来推算结构面的空间尺寸和分布形式。但是这种推算, 是建立在有限的观测资料和相关假



定之上的,要真正解决这一问题,还需要开展大量深入的研究工作。

1.2.4 结构面间距(密度)

结构面间距是指相邻结构面间的垂直距离,是反映岩体完整程度及岩石块体大小的重要指标。结构面间距的倒数称之为密度(线密度)。

1976年英国学者 Priest 和 Hudson 等在《国际岩石力学》杂志上发表了《岩石中的不连续面间距》一文,建立了岩石质量指标与测线长度及结构面线密度的关系,通过大量的结构面实测间距资料的统计分析,提出结构面间距具有负指数分布的统计特征,并于1981年提出了结构面间距测量的精确估值方法即著名的 Priest-Hudson 方法。但是 Priest-Hudson 给出的结构面平均间距的估值方法没有考虑到测线长度对估值结果的影响。Sen Z 和 Kazi 针对测线长度对结构面间距的影响进行了深入的研究,提出了测线长度对间距估值影响的纠偏方法。

关于结构面间距的分布形式, Baecher 和 Veneziano 等认为,在三维结构面网络中,若假定结构面形状为薄圆盘,并将其分布看作是相互独立的随机泊松过程,则间距的分布服从指数分布, Snow、Call 和 Einstein 等通过野外观测均证实了间距服从这一分布规律。而 Steffen 和 Barton 等则提出了结构面间距服从对数正态分布的观点,并用现场实测数据给予了证实。

在网络模拟中,研究结构面间距最直接的目的是为了确定在计算机模拟时单位面积(体积)内生成结构面的数量即密度。结构面的密度可分为线密度、面密度和体积密度三类。线密度定义为结构面平均间距的倒数, Piteau 通过在岩石出露面上布置测线进行结构面间距的测量,并以单位距离内一组平行分布的结构面在法线方向上的个数作为其密度。面密度是指某一出露面上,单位面积内所包含的结构面条数,可通过线密度换算得到。面密度也可以认为是单位面积内结构面迹线中点的个数, Wu T W 等根据统计窗口中迹线与窗口的相互关系,建立起结构面中点的概率分布模型,并据此求出单位面积内结构面迹线中点的数量及结构面平均迹长的无偏估计。体积密度是指单位体积内结构面的个数,通常很难通过野外测量直接获得,一般都由线密度或面密度换算得到。Worburton 提出了单位体积内结构面中心数期望值 λ_v 的计算方法。Hudson 和 Priest 的研究表明,结构面面密度和体积密度服从负指数分布或正态分布。

Kulatilake 和 Wu 在考虑面密度的基础上,将相关理论进一步延伸到三维空间区域内,得到了由面密度计算结构面体积密度的公式:

$$E(\lambda_v) = \frac{E(\lambda_a)}{E(D)E|\sin\theta|} \quad (1.2.1)$$

式中: $E(\lambda_a)$ 为单位面积内某组结构面迹线中点平均个数的校正期望; $E(D)$ 为结构面直径的期望值; $E|\sin\theta|$ 为结构面平均方向与取样面法线方向之间夹角的正弦值的期望; $E(\lambda_v)$ 为某组结构面体积密度的期望值。

日本学者 Masanobu Oda 以结构面被测线交切的个数(线密度)为基础,建立了计算结构面体积密度的计算公式:

$$\lambda_v = \frac{4\lambda_{li}}{\pi E(D^2)E(|n_i|)} \quad (1.2.2)$$