

岩体结构面三维网络模拟 理论与工程应用

Theory and Engineering Application
of 3-d Network Modeling of Discontinuities
in Rockmass

贾洪彪 唐辉明 刘佑荣 马淑芝 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍岩体结构面三维网络模拟的原理、方法及工程应用。全书共分 8 章。主要内容包括结构面的成因、地质特征和几何描述;结构面发育的随机性特征;结构面采样和概率模型构建方法;结构面三维网络模拟的原理、步骤和方法;结构面三维网络模拟在评价岩体工程性质、搜索洞室可动块体、确定岩质边坡破坏面等方面的应用。

本书可供土木工程、地质工程、岩体力学等学科专业的工程技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩体结构面三维网络模拟理论与工程应用= Theory and Engineering Application of 3-d Network Modeling of Discontinuities in Rockmass/贾洪彪等著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020921-4

I. 岩… II. 贾… III. 岩体- 结构面- 计算机网络- 计算机模拟
IV. P583-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 009753 号

责任编辑:沈建/ 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平/ 封面设计:陈敬

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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 3 月第 一 版 开本: B5(720× 1000)

2008 年 3 月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—2 500 字数: 261 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

岩体结构面网络模拟是利用概率论和统计学原理,采用 Monte Carlo 随机模拟技术,根据结构面样本分布规律在室内模拟岩体内结构面网络数值模型的一种新型技术。该技术自问世就得到广泛关注,并被应用于岩体力学的研究。同时,模拟方法本身也在不断发展与完善,已由早期二维网络模拟发展到目前的三维网络模拟。

目前,岩体结构面三维网络模拟在岩体力学界还存在较大争议。一方面,它在获得岩体结构特征、解决与岩体结构有关的岩体力学问题方面,作用非常大,尤其是对于空间岩体力学问题的解决,更显示出特有的优势。但另一方面,其存在的问题也比较明显。例如,结构面网络数值模型仅是统计意义上的结果,与结构面实际分布缺乏良好的对应;它的工程应用领域还较狭窄。

这些问题的存在不仅影响岩体结构面三维网络模拟的发展与应用,同时也要求开展更进一步的研究。自从中国地质大学潘别桐教授把岩体结构面网络模拟技术引进中国之后,我们与一些兄弟院校、科研单位开展了持续不断的研究,并不断取得新的研究成果。本书重点反映了我们近些年在这方面所取得的研究成果,主要包括以下两个方面的内容:

1) 为提高模拟的可靠性,对模拟方法所进行的改进与完善。例如,提出了实测结构面与模拟结构面的耦合模拟;对结构面规模与密度采用动态校核模拟;对结构面间距按其分布形式进行模拟;采用动态聚类等方法对结构面分组。

2) 为提高模拟的实用性,开展了系统的工程应用。例如,根据结构面三维网络数值模型进行结构体搜索,确定结构体特征;搜索岩质边坡破坏面;搜索地下洞室围岩可动块体;确定岩体裂隙率,评价岩体质量;确定岩体各向异性指数,评价岩体结构的各向异性程度;针对不同水文地质边界条件,建立相应的渗流途径的数值模型。

在研究过程中,得到了中国地质大学杨裕云教授、方云教授、余宏明教授、项伟教授、胡新丽博士、王亮清博士,香港大学孙宁博士,长江勘测技术研究所苏爱军教授级高工、孙云志教授级高工,中交第二航务工程勘察设计院程新生教授级高工,深圳市地质局易顺民研究员等的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢!吉林大学陈剑平教授、王清教授,中国石油大学徐守余教授,武汉理工大学管昌生教授等对与本书内容相关的论文提供了宝贵的指导意见,特此感谢!书中参考了大量的宝贵文献资料,对各位作者表示衷心感谢!

书中不妥之处,敬请指正!

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 岩体结构面网络模拟的研究意义	1
§ 1.2 研究现状与存在的问题	2
1.2.1 研究现状与成果	2
1.2.2 存在的主要问题	6
§ 1.3 本书主要内容	7
第 2 章 结构面与岩体结构	9
§ 2.1 结构面类型	9
2.1.1 结构面的地质成因类型	9
2.1.2 结构面力学成因类型	22
§ 2.2 结构面分布规律	25
2.2.1 结构面分布的等距性	25
2.2.2 结构面分布的韵律性	27
§ 2.3 结构面几何特征	27
2.3.1 结构面形状	28
2.3.2 结构面产状	29
2.3.3 结构面连续性	30
2.3.4 结构面迹线和迹长	30
2.3.5 结构面间距和密度	31
2.3.6 结构面规模	33
2.3.7 结构面壁面形态	34
2.3.8 结构面张开度	35
2.3.9 结构面的充填胶结	36
§ 2.4 岩体的结构特征	37
2.4.1 结构体特征	37
2.4.2 岩体结构类型	38
第 3 章 结构面采样及其概率模型	41
§ 3.1 结构面采样	41
3.1.1 测线法	41

3.1.2	统计窗法·····	45
3.1.3	样本数量和最佳测线长度·····	46
§ 3.2	结构面分组·····	48
3.2.1	结构面分组原则 ·····	48
3.2.2	结构面分组方法 ·····	48
3.2.3	结构面分组实例 ·····	55
§ 3.3	结构面发育的随机性及概率分布·····	60
3.3.1	常用的概率分布 ·····	60
3.3.2	结构面产状的概率分布 ·····	62
3.3.3	结构面规模的概率分布 ·····	62
3.3.4	结构面间距和密度的概率分布 ·····	66
3.3.5	结构面张开度的概率分布·····	70
§ 3.4	结构面概率模型建立方法·····	70
3.4.1	概率分布形式的确定方法·····	70
3.4.2	数字特征值的确定方法 ·····	71
3.4.3	实例 ·····	72
第 4 章	结构面三维网络模拟原理与方法 ·····	76
§ 4.1	概述·····	76
§ 4.2	Monte Carlo 随机模拟原理 ·····	78
4.2.1	标准均匀分布随机数的产生 ·····	78
4.2.2	标准均匀分布随机数检验·····	80
4.2.3	随机变量抽样 ·····	83
§ 4.3	模拟区域和坐标系·····	85
4.3.1	模拟区域·····	85
4.3.2	结构面数量 ·····	86
4.3.3	坐标系 ·····	86
§ 4.4	结构面中心点坐标模拟·····	86
4.4.1	传统方法的缺陷 ·····	87
4.4.2	改进的方法 ·····	87
4.4.3	例证 ·····	90
§ 4.5	结构面产状模拟·····	92
§ 4.6	结构面数量和规模的动态校核·····	93
4.6.1	结构面数量的动态校核 ·····	94
4.6.2	结构面规模的动态校核 ·····	96
§ 4.7	实测结构面与模拟结构面的耦合·····	97

4.7.1 耦合原则·····	97
4.7.2 耦合对采样的要求 ·····	98
4.7.3 耦合方法·····	99
4.7.4 例证 ·····	105
§ 4.8 结构面网络模拟结果的显示 ·····	106
4.8.1 绘制结构面三维网络图 ·····	106
4.8.2 绘制结构面切图 ·····	107
§ 4.9 结构面网络模型的验证和确认 ·····	109
4.9.1 模型的验证 ·····	110
4.9.2 模型的确认 ·····	110
第5章 岩体工程性质评价 ·····	112
§ 5.1 岩体结构特征分析 ·····	112
5.1.1 结构体的形状和规模 ·····	112
5.1.2 确定岩石质量指标 ·····	124
5.1.3 确定岩体体积 RQD ·····	136
5.1.4 确定结构面的密度·····	138
§ 5.2 岩体结构各向异性评价 ·····	139
5.2.1 各向异性指数的定义 ·····	139
5.2.2 各向异性指数的计算 ·····	139
5.2.3 各向异性指数的特征 ·····	140
§ 5.3 岩体渗流特性分析 ·····	142
5.3.1 岩体渗流途径确定·····	142
5.3.2 岩体渗透系数的计算 ·····	145
§ 5.4 岩体质量评价 ·····	145
5.4.1 岩体裂隙率的定义·····	145
5.4.2 岩体裂隙率的确定 ·····	146
5.4.3 岩体裂隙率的应用·····	146
5.4.4 岩体裂隙率与其他指标的比较 ·····	148
第6章 岩体边坡潜在破坏面确定与稳定性评价 ·····	149
§ 6.1 概述 ·····	149
§ 6.2 楔体类型 ·····	149
6.2.1 楔体类型 ·····	149
6.2.2 利用结构面三维网络搜索楔体的可行性分析 ·····	150
§ 6.3 I型楔体的确定 ·····	151
6.3.1 I型楔体的构成条件 ·····	151

6.3.2	I 型楔体的搜索方法	152
6.3.3	楔体稳定性计算方法	161
§ 6.4	II 型楔体的确定	162
6.4.1	II 型楔体的构成条件	162
6.4.2	II 型楔体搜索方法	163
6.4.3	几点讨论	168
第 7 章	地下洞室围岩可动块体搜索与稳定性评价	169
§ 7.1	概述	169
§ 7.2	可动块体搜索方法	170
7.2.1	围岩结构面分类	171
7.2.2	结构面环路筛选	173
7.2.3	可动块体判别	175
7.2.4	可动块体出现概率	181
§ 7.3	可动块体稳定性评价	182
7.3.1	可动块体的稳定性类型	182
7.3.2	可动块体稳定性计算	183
第 8 章	工程应用实例	188
§ 8.1	工程实例一	188
8.1.1	工程地质概况	188
8.1.2	结构面概率模型及三维网络模拟	188
8.1.3	岩体结构参数	193
8.1.4	边坡楔体搜索	194
§ 8.2	工程实例二	197
8.2.1	工程地质概况	197
8.2.2	围岩结构面三维网络模拟	197
8.2.3	可动块体搜索与分析	199
参考文献		202

Contents

Preface

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Significance of the study of network modeling of discontinuities in rockmass	1
§ 1.2	Review of the study of network modeling of discontinuities in rockmass	2
1.2.1	Status quo and study achievements of network modeling of discontinuities	2
1.2.2	Main problems of network modeling of discontinuities	6
§ 1.3	Main contents of this book	7
Chapter 2	Discontinuities and rockmass structure	9
§ 2.1	Types of discontinuities	9
2.1.1	Geological formation types of discontinuities	9
2.1.2	Mechanical formation types of discontinuities	22
§ 2.2	Regularities of discontinuities distribution	25
2.2.1	Equidistantly distribution of discontinuities	25
2.2.2	Rhythmic distribution of discontinuities	27
§ 2.3	Geometrical characters of discontinuities	27
2.3.1	Shape of discontinuities	28
2.3.2	Attitude of discontinuities	29
2.3.3	Continuity of discontinuities	30
2.3.4	Trace and trace length of discontinuities	30
2.3.5	Spacing and density of discontinuities	31
2.3.6	Size of discontinuities	33
2.3.7	Surface form of discontinuities	34
2.3.8	Aperture of discontinuities	35
2.3.9	Filling and cementation of discontinuities	36
§ 2.4	Structural characteristics of rockmass	37
2.4.1	Characters of structural element	37
2.4.2	Structural type of rockmass	38

Chapter3	Sampling of discontinuities and its probability model	41
§ 3.1	Sampling of discontinuities	41
3.1.1	Scanline method	41
3.1.2	Sampling window method	45
3.1.3	Sample's amount and the best length of scanline	46
§ 3.2	Grouping of discontinuities	48
3.2.1	Principle of discontinuities grouping	48
3.2.2	Method of discontinuities grouping	48
3.2.3	Example of discontinuities grouping	55
§ 3.3	Random character and probability distribution of discontinuities	60
3.3.1	Common probability distributions	60
3.3.2	Probability distribution of the attitude of discontinuities	62
3.3.3	Probability distribution of the size of discontinuities	62
3.3.4	Probability distribution of the spacing and density of discontinuities	66
3.3.5	Probability distribution of the aperture of discontinuities	70
§ 3.4	Method to establish probability model of discontinuities	70
3.4.1	Method to confirm the type of probability distribution	70
3.4.2	Method to confirm eigenvalues	71
3.4.3	Example	72
Chapter4	Principle and method of 3-d network modeling of discontinuities	76
§ 4.1	Introduction	76
§ 4.2	Principles of Monte-Carlo stochastic simulation	78
4.2.1	Production of standard uniform random number	78
4.2.2	Test of standard uniform random number	80
4.2.3	Sampling of random variables	83
§ 4.3	Simulation domain and frame of axes	85
4.3.1	Simulation domain	85
4.3.2	The amount of discontinuities	86
4.3.3	Coordinate frame	86
§ 4.4	Simulation for center coordinates of discontinuities	86
4.4.1	Limitation of the traditional method	87
4.4.2	Improved method	87

4.4.3	Case study	90
§ 4.5	Simulation for the attitude of discontinuities	92
§ 4.6	Dynamic check for the amount and size of discontinuities	93
4.6.1	Dynamic check for the amount of discontinuities	94
4.6.2	Dynamic check for the size of discontinuities	96
§ 4.7	Coupling between sample and simulated discontinuities	97
4.7.1	Coupling rules	97
4.7.2	Sampling request for coupling	98
4.7.3	Coupling method	99
4.7.4	Case study	105
§ 4.8	Display of simulation results of discontinuity network	106
4.8.1	Drawing 3-d network diagram of discontinuities	106
4.8.2	Drawing the cross section of discontinuities	107
§ 4.9	Verification and validation of the network model of discontinuities	109
4.9.1	Verification of model	110
4.9.2	Validation of model	110
Chapter5	Evaluation of engineering properties of rockmass	112
§ 5.1	Analysis of structural features of rockmass	112
5.1.1	Shape and size of structural elements	112
5.1.2	Confirming <i>RQD</i>	124
5.1.3	Confirming Volume <i>RQD</i>	136
5.1.4	Confirming the density of discontinuities	138
§ 5.2	Evaluation of rockmass anisotropy	139
5.2.1	Definition of anisotropy index	139
5.2.2	Calculation of anisotropy index	139
5.2.3	Characters of anisotropy index	140
§ 5.3	Analysis of rockmass seepage	142
5.3.1	Searching of rockmass seepage path	142
5.3.2	Calculation of rockmass osmotic coefficient	145
§ 5.4	Evaluation of the rockmass quality	145
5.4.1	Definition of the rockmass cranny ratio	145
5.4.2	Confirmation of the rockmass cranny ratio	146
5.4.3	Application of the rockmass cranny ratio	146
5.4.4	Comparison of rockmass cranny ratio to the other index	148

Chapter6	Detem ination of potential failure plane of rock slope and the stability evaluation	149
§ 6.1	Introduction	149
§ 6.2	Type of wedges	149
6.2.1	Type of wedges	149
6.2.2	Feasibility of searching wedges using 3-d network of discontinuities	150
§ 6.3	Confirming of type- I wedges	151
6.3.1	Constituting condition of type- I wedges	151
6.3.2	Searching method of type- I wedges	152
6.3.3	Calculation method of the stability of the wedge	161
§ 6.4	Confirming of type- II wedge	162
6.4.1	Constituting condition of type- II wedge	162
6.4.2	Searching method of type- II wedge	163
6.4.3	Discussions	168
Chapter7	Detem ination of movable block of underground excavation and the stability evaluation	169
§ 7.1	Introduction	169
§ 7.2	Searching method of the movable block	170
7.2.1	Type of discontinuities in surrounding rock	171
7.2.2	Filter of loop rout of discontinuities	173
7.2.3	Movable block distinguishing	175
7.2.4	Existing probability of the movable block	181
§ 7.3	Stability evaluation of the movable block	182
7.3.1	Type of movable block	182
7.3.2	Stability calculating of the movable block	183
Chapter8	Engineering application	188
§ 8.1	Example 1	188
8.1.1	Summary of the engineering geology	188
8.1.2	Probability model and 3-d network analogy of discontinuities	188
8.1.3	Structures parameters of rockmass	193
8.1.4	Searching the slope for wedges	194
§ 8.2	Example 2	197
8.2.1	Summary of the engineering geology	197
8.2.2	3-d discontinuities network modeling of the surrounding rock	197
8.2.3	Searching and analysis of the movable body	199
References		202

第 1 章 绪 论

§ 1.1 岩体结构面网络模拟的研究意义

岩体是由岩块及分割岩块的结构面(又称不连续面)组成的地质体。结构面在空间的分布状态与组合形式构成了岩体的结构,它是决定岩体工程地质特征和力学性质的关键因素。岩体的变形、破坏特征受到岩体结构特征的制约,岩体的质量也受到岩体结构特征的控制。

岩体因为结构特征还表现出强烈的非均质、不连续、各向异性等特征,用均质、连续、各向同性的力学法则来分析岩体工程问题往往行不通,必须要考虑岩体结构特征的影响。因此,对岩体结构组合条件进行研究,并在岩体工程问题分析中考虑岩体结构的影响,是岩体力学的主要研究课题之一。

在组成岩体的两大基本单元中,岩块和结构面所处的地位不同。从强度上来比较,结构面的强度远小于岩块的强度,为岩体中的薄弱环节,常常是控制岩体强度和变形的关键。从结构上来讲,岩块的形态、规模等特征由结构面所控制,完全取决于结构面的组合、交切与围限的情况。因此,在岩体结构中,结构面占据更为重要的位置,对于岩体结构的研究首先应从结构面的研究开始。

岩体内部发育的结构面,只有少部分能够在岩体天然露头面或人工开挖面(例如边坡坡面、地下洞室洞壁)等部位出露。一般情况下,也只有出露于这些露头面的结构面才能够被直接观测,它们的数量很有限。那些更多数量的结构面分布于岩体内部或被严重覆盖难以直接观测。而且,由于露头面范围有限,并且只能从二维平面上观测结构面,因而导致结构面的某些重要几何参数难以测定。例如,从露头面上仅能测量到结构面的迹长(有些结构面还只能测量到删节迹长),而无法直接测量结构面的规模大小;再例如,从露头面上仅能得到结构面平面上分布的密度,而空间内的分布密度则无法确定。更何况,这些结构面有时发育比较杂乱,规律性不强。因此,期望通过对结构面的观测能够直接确定结构面在岩体内展布的特征是不现实的,这严重制约了对结构面和岩体结构特征的研究。

岩体结构研究的困难与不足影响了整个岩体力学的研究与发展。例如,在对工程岩体稳定性评价时,由于缺乏对岩体结构的深入认识,还多采用一些均质化的评价方法;再例如,在大中型工程建设中,岩体力学性质参数主要根据现场岩体力学试验获得,对于那些结构条件复杂、结构类型多的岩体,有时会以偏概全,不能真实

反映岩体的实际;又例如,一些数值计算方法自身已经形成了比较成熟的算法,但在建立岩体地质力学模型和计算模型的过程中往往要对结构面进行大刀阔斧的简化,与实际地质条件又产生了较大差别,导致计算结果不尽如人意。之所以会出现上述这些问题,其根本原因是人们难以正确认识岩体内结构面在三维空间中展布所形成的复杂网络的几何特性,即对岩体结构把握不足。

孙广忠(1988)认为,岩体力学的全部内容由两大部分组成,即:①将地质模型转化为力学模型;②将力学模型转化为数学语言。前一个转化主要依赖于岩体结构及其力学效应,后一个转化则主要依赖于由岩体结构力学效应定量得到的本构规律和破坏判据。它们都与岩体结构条件有关。因此,不注重岩体结构的研究,认识不到岩体结构在岩体力学研究中的重要意义,用连续介质理论来处理、分析岩体力学问题是脱离实际的,难以解决岩体力学的具体问题。

岩体结构依赖于结构面的分布。大量工程实践和研究表明,岩体内的结构面多为透入性结构面,其分布具有随机性。因此,它们必然具有一定的“统计规律”,可以借助统计学的方法进行研究,特别是对结构面的形态参数(如产状、间距、迹长、密度等)进行概率学的描述和分析,进而研究岩体的工程性质,并用于工程实践。这一方法就是岩体结构面网络模拟。

岩体结构面网络模拟是利用统计学原理,采用 Monte Carlo 随机模拟方法在计算机上模拟岩体内的结构面网络。它是建立在对结构面系统测量基础上的,其模拟结果不仅与结构面的实际分布在统计规律上一致,而且还可以由局部到全体、由表及里,得到岩体整体的结构特征,有助于人们直观了解岩体内结构面的分布规律,掌握人们一般情况下难以观察、测量到的岩体内部的结构特征。它实质上是结构面的分布在二维平面或三维空间内的一种扩展性预测。与地面调查、勘探、模型模拟试验、理论分析等方法相比,结构面网络模拟研究岩体内结构面的分布和岩体结构性质的最有效,它既有高度的抽象,也有坚实的基础,到目前为止,还没有哪种方法比岩体结构面网络模拟能更全面、更有效地认识、展现、反映岩体的结构特征。

因此,岩体结构面网络模拟技术的出现,为岩体结构特征的研究开辟了一条新的途径,对岩体力学的研究起到了一定的促进作用。随着对其不断的完善和改进,特别是在工程应用方面的开发,岩体结构面网络模拟在岩体力学研究中将会发挥更大的作用。

§ 1.2 研究现状与存在的问题

1.2.1 研究现状与成果

1. 研究现状

岩体结构的研究始于 20 世纪 50 年代,以 Muller 等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。各国学者通过总结许多大型工程实践和一系列灾害性岩体失稳事件,逐步认识到了结构面对岩体变形及稳定性所起到的重要作用。60年代谷德振和孙玉科提出了“岩体结构”的概念和岩体结构控制岩体稳定的重要观点。70年代 Goodman、Barton 等人对结构面的力学性质进行了深入研究。80年代孙广忠提出了“岩体结构控制论”,全面系统地研究了岩体结构影响岩体变形与破坏的基本规律,并归纳为以下五点:①岩体是经过变形、遭受过破坏,由一定的岩石成分组成,具有一定的结构和赋存于一定地质环境中的地质体。岩体力学是研究环境应力改变时岩体再变形、再破坏的科学。②岩体在结构面控制下形成有自己独特的不连续结构,岩体结构控制岩体变形、破坏及其力学性质。岩体结构控制作用远远大于岩石材料的作用。③“岩体结构控制论”是岩体力学基础理论,“岩体结构力学效应”是岩体力学的力学基础,岩体结构分析方法是岩体力学研究的基本方法。④岩体赋存于一定的地质环境中。岩体赋存环境条件可改变岩体结构力学效应和岩石力学性能。⑤在岩体结构、岩石及环境应力条件控制下,岩体具有多种力学介质和力学模型,岩体力学是由多种力学介质和多种力学模型构成的力学体系。

岩体结构面网络模拟由英国帝国理工学院 Samaniego 在 1981 年提出。在该方法提出之前,对结构面分布规律和量测方法等内容的探索性研究一直没有间断过。1941 年 Arnold 研究了方向数据球状分布的概率特征,指出结构面产状作为空间数据也具有球状分布;1965 年 Terzaghi 发表了题为“节理勘察误差来源”的论文,对节理的采样误差进行了研究分析;1976 年 Shanley 和 Mahtab 发表了题为“产状组数划分分析”的论文,加强了结构面产状数据的概率统计学研究;同年, Priest 和 Hudson 发表了题为“岩石中的不连续面间距”的论文,建立了 RQD 与测线长度及结构面线密度的关系,并得出结构面间距具负指数分布的统计特征; Priest 和 Hudson 又在 1981 年提出了结构面间距测量的精度估算方法。

在研究中,大家认识到结构面之间既存在相关性又具有各自独立的特性。也就是说,它们既具有随机分布的特征,又具有一定的统计规律。例如,对于同一组结构面,它们的产状并不相同,是分散的,但大多服从正态分布、均匀分布或对数正态分布;结构面在岩体内的分布往往表现出等距性和韵律性,但结构面间距一般多服从负指数分布或对数正态分布;结构面的迹长虽然长短不一,但一般服从负指数分布、对数正态分布或正态分布。

正是由于岩体内结构面分布的随机性、形态的多样性和空间组合的复杂性,仅利用有限几个统计量(均值、方差、矩阵等)还难以全面描述结构面特性。另一方面,也正是由于结构面具备上述特征,才可以将其作为随机对象进行随机模拟。

为了对岩体结构面进行网络模拟,中外学者围绕结构面分布性质、采样方法、

概率模型建立、误差估计等方面的研究开展得越来越丰富、越来越系统。1984 年 Kulatilake 等提出了结构面平均迹长的估算法,1986 年又提出了结构面迹长与规模之间的关系,使根据结构面实测迹长来计算结构面真实大小成为可能;1985 年 Karzulovic 和 Goodman 提出了主要节理频率确定的方法,使依据野外观测数据通过概率统计估计结构面分布频率的方法进一步完善;Mahtab 和 Yegualp 在 1985 年的美国第二十五届岩石力学会议上提出了岩石力学中产状分组数相似性检验方法,用概率统计学结合等面积投影的方法进行岩体均质区划分;Kulatilake 等在 1990 年提出了校正结构面产状采样偏差的矢量方法,分析了不同结构面形态与窗口交切的概率及采样偏差的来源,并提出了对采样频率校正的具体方法。

在国内,结构面网络模拟研究和应用起步较早的是中国地质大学的潘别桐教授,1986 年,他系统介绍了岩体结构面网络模拟的基本原理和方法。其后,徐光黎(1993)、伍法权(1993)、陈剑平等(1995)、汪小刚等(1995)、邬爱清等(1998)、周维垣等(1997)、王英学等(1999)、朱文彬(1998)、陈征宙等(1998)等都陆续开展了研究。

早期的结构面网络模拟研究主要是二维平面网络模拟,很少涉及三维空间网络模拟。这一方面是因为网络模拟方法的研究刚刚起步,另一方面是受制于当时计算机运算能力的限制。20 世纪 80 年代末至 90 年代初,国内外都先后开展了结构面三维网络模拟理论和方法的研究,并在一定程度上开展了三维网络模拟工程应用的研究,用于解决相关的各类岩体力学问题,从而把岩体结构面网络模拟方法推向了一个更高的阶段,成为目前研究的主流方向。

与岩体结构面二维网络模拟,三维网络模拟有着明显的优势,主要有:

1) 很多岩体力学问题为空间课题,例如地下洞室围岩的滑移、垮落,岩质边坡的崩塌等。三维网络模拟可以很好地解决这些空间课题,而二维网络模拟则难以做到。

2) 三维网络模拟涉及结构面规模、体密度等对岩体结构意义十分重要的一些因素,能全面获得结构面在三维空间内的信息。而二维网络模拟得到的仅是平面上结构面迹线的分布,很多更整体的信息无法确定。

3) 根据二维网络模拟,不同方位网络图中同一结构面是不能一一对应的。而三维网络模拟中,每条结构面在空间中是作为一个整体得到的,在不同方位生成的平面网络图中,每一条结构面都是一一对应的,便于问题的分析。

4) 三维网络图具有空间立体感,对岩体工程问题的判断更客观、全面,这是二维网络所难以达到的。

因此,从目前的发展来看,结构面三维网络模拟将会全面取代二维网络模拟,其发展前景更广阔。

2. 主要研究成果

在岩体结构面网络模拟研究中,出现了一系列有标志性的成果。1993年,徐光黎、潘别桐、唐辉明等出版了《岩体结构模型与应用》一书,系统介绍了结构面地质特征及采样、结构面几何特征的概率统计分析、概率模型的构建、岩体结构概率模型的模拟方法等有关内容,对当时的国内外研究成果和进展作了全面介绍。但限于当时的研究程度,主要是针对结构面网络的二维平面模拟。

1993年,伍法权出版了《统计岩体力学原理》,对岩体结构面几何特征的概率分布特征、特别是三维条件下的特征以及一些形态特征参数的估算有比较详细的论述。

1995年,陈剑平、王清、肖淑芳等出版了《随机不连续面三维网络计算机模拟原理》的专著,系统论述了利用计算机实现不连续面三维网络模拟的基本原理,特别是对不连续面均质区划分、不连续面统计、不连续面几何形态的参数校正、模拟方法等作了系统说明。

汪小刚、陈祖煜等也长期致力于岩体结构面网络模拟在水电行业的应用研究,特别是在节理岩体连通率、破裂路径的确定等方面进行了大量的研究。他们对连通率重新进行了定义,将岩体沿某一剪切方向发生剪切破坏所形成的破坏路径中节理面所占的比例定义为连通率;先后研究了采用带宽方法、动态规划方法搜索剪切路径、确定连通率,确定岩体的综合抗剪强度指标。在其2005年出版的《岩质边坡稳定性分析》一书中对此进行了系统论述。

黄润秋、许模、陈剑平等(2004)在《复杂岩体结构精细描述及其工程应用》中对岩体结构面的测网统计法、岩体结构的精细刻画和连通率的等内容作了研究与论述。

此外,周维桓等(1997)提出采用自协调法来模拟岩体三维网络。该方法是按实测迹线平面生成节理网络,然后由统计出的迹线模型和实测迹线模型相对比,并不断修正迹线模型。在计算机三维网络图形上切出截面和钻孔,然后将截面和钻孔展布裂隙和实际相对比。邹爱清等(1998)进行了结构面网络模拟程序的开发并应用于三峡工程,模拟程序可以绘制任意给定开挖面或复杂开挖边界上的岩体节理迹线分布图,可在三维迹线图上搜索出由结构面切割形成的闭合块体区域和可移动块体,并分析其几何特征值。王渭明(1997)把岩体结构面网络模拟用于地下巷道危石的预测和评价,引用块体理论和 Bayes 推测公式建立了巷道围岩中危石的预测模型。柴军瑞等(2000)采用结构面网络模拟技术对裂隙岩体的分维数、渗透系数进行计算。王英学等(1999)在岩体结构面网络模拟地基础上,对块体出现的概率和连通率大小进行计算,确定块度大小的分布规律。张发明等(2002)针对水工建筑物深开挖边坡中常出现的随机楔体,结合网络模拟对三维随机楔体的稳定性及分布规

律进行分析研究,提出了三维随机楔体的稳定性系统分析方法。朱文彬(1998)利用结构面三维网络模拟估算岩体变形参数,建立了包含随机非贯通结构面网络系统的岩体本构关系和岩体弹性变形常数的估算公式。陈征宙等(1998)基于非平稳随机过程理论,模拟了岩体节理间距。庞作会等(1999)利用结构面网络模拟进行有限元计算网格的自动剖分。郝哲等(1999)采用结构面网络模拟对岩体裂隙注浆扩散情况进行研究。卢波等(2002)按“有形即是有限”的分析方法,利用三维网络模拟进行复杂有限块体的自动搜索,不仅对块体定位,而且可以判定其空间几何形态。

总之,这一时期的研究呈现百花齐放的态势,从不同角度、不同应用领域,针对不同工程需求,对岩体结构面网络模拟技术进行了多方位的探索性研究,取得的成绩十分显著。

1.2.2 存在的主要问题

虽然岩体结构面三维网络模拟具有明显的优势,其理论与应用研究也开展得较广泛,并取得了显著的成绩。但还是存在着一些不足,主要表现在以下几方面。

1. 理论研究方面的不足

截至目前,对结构面网络的所谓仿真模拟基本上是“统计上的仿真”,还难以达到“实体仿真”。不仅如此,在模拟过程中一些人为因素的影响还不能忽视,例如:测量误差;分组时对于个别结构面的舍弃;对于一些不具备随机性的结构面按随机结构面处理;对层面的处理和间距的处理等。譬如,结构面间距往往有自己的分布规律,有一定的韵律性,疏密相间,但在模拟时,出于降低模拟难度的考虑,常按均匀分布处理,这就造成了较大的失真。

对结构面空间形态的刻画不准也是导致模拟结果有较大偏差的另一个原因。这既有技术层面的原因(计算机模拟不可能对任何形态的结构面都能真实地刻画出),也有专业方面的原因(每类结构面真正的空间形态是难以完全查清或获知的)。所以为减少模拟的难度,增强可操作性,一般把结构面作为圆形薄板模拟。这样,平面形态上与实际会有所差异,也无法表征结构面的起伏形态、粗糙情况以及隙宽的大小、充填及变化情况,为一些专门领域的研究(例如强度、渗透性等)带来困难。

2. 工程应用方面研究的不足

总体上来讲,目前岩体结构面三维网络模拟研究更多地注重于技术方法本身,对工程应用方面的研究还不够,没有像广大地质工程师想像和期望的那样能够直接将其用于解决复杂的实际岩体工程问题。结构面网络模拟获得的还仅是岩体中结构面网络的几何形态和分布,其应用研究必然要与其他方面相结合,这方面的工

作难度较大,进展也较缓慢。

另外,虽然对岩体结构面网络模拟开展研究的单位和参与的人员都很多,但缺乏比较系统、全面的研究。各家研究进度参差不齐,研究侧重点也不一致,对同样的问题实现的手段也千差万别,这也限制了其应用和推广。

在上述问题中,最大的问题还是如何提高结构面网络模拟的仿真性。由于模拟所得到的结构面网络只是统计意义上的,而结构面具体位置、形态、规模等都与实际存在差异,这成为限制其工程应用的最主要因素。因此,对这一问题的解决也将成为结构面网络模拟技术领域研究的重要内容,是对进一步拓展其工程应用的关键所在。

但是,我们也应该对结构面网络模拟进行客观的评价和认识,它毕竟是建立在概率统计学基础上的技术方法,概率统计学的最大特征就是“不确定性”,这一特征是无法更改的。因此,对岩体结构面网络模拟仿真性的无限追求也是不符合科学实际的,只能在不确定性的前提下,尽可能地提高模拟的仿真性。

总之,截至目前,岩体结构面网络模拟,尤其是结构面三维网络模拟还不很完善,还需要进一步的改进和发展,特别是在模拟结果的仿真和应用上,还存在着不少要改进的方面,来进一步发挥结构面网络模拟的作用。

§ 1.3 本书主要内容

本书是针对目前结构面三维网络模拟所存在的不足,为了进一步提高结构面网络模拟的仿真性、开拓其工程应用而写的。本书在吸纳多方研究成果的基础上,全面阐述了结构面三维网络模拟的基本原理、方法和工程应用,重点介绍了作者在该领域的最新研究成果。全书共分八章,主要包括:

1. 结构面发育特征

这是结构面网络模拟的基础。结构面网络模拟的研究对象是结构面,它们的成因、特征各不相同,规模上也差别巨大,因而其产状、规模、密度等几何参数都不一致,导致岩体具有不同的结构类型和特征。

2. 结构面采样和概率模型的构建

这是进行网络模拟的前提条件。要进行结构面网络模拟,必须对结构面进行系统采样,并构建概率模型。书中介绍了结构面的采样方法以及分组、构建概率模型的方法。

3. 结构面三维网络模拟的基本原理和方法

这是进行结构面网络模拟的核心。本书介绍了结构面三维网络模拟的基本原理和方法,并针对传统方法的不足,对结构面网络模拟技术作了优化和改进,一方面减少人为因素的干扰,提高模拟结果的仿真性;另一方面是力求有利于工程应用。

4. 评价岩体工程性质

这一部分和后面几部分是结构面网络模拟的工程应用。

结构面三维网络模拟可以确定岩体内结构面的分布,当然也可以进一步确定构成岩体的结构体的情况,进而了解岩体的结构条件,对岩体结构进行数字化描述和分析,评价岩体工程性质。

5. 利用结构面三维网络模拟确定岩体边坡破坏面

在坡形确定的情况下,岩体边坡的破坏面主要受控于坡内结构面的发育,它们往往会构成边坡破坏的滑移面和切割面(在这里统一称为破坏面)。因此,确定岩体边坡的破坏面主要以坡体内结构面的分布为基础,这是一个空间问题,可以基于结构面三维网络模拟来确定。

本书主要针对岩体边坡中最常见的楔体滑动进行破坏面搜索方法的研究。对于楔体,根据其构成条件分为Ⅰ型楔体和Ⅱ型楔体。书中分别讨论了两类楔体的构成条件、搜索方法,楔体确定后可以计算楔体体积大小、确定破坏范围和破坏层厚度,结合结构面强度进行楔体稳定性分析。

6. 地下洞室围岩可动块体搜索与稳定性评价

地下洞室开挖后,围岩中的各种可动块体容易向洞内发生变形破坏,根据块体理论可以分析可动块体的稳定性,但关键是要确定出可动块体,要确定它们的位置、分割围限块体的结构面条件、块体的大小以及可能的滑移方向。由于这是一个空间问题,并且主要取决于岩体内结构面的分布、组合特征,因此可以在结构面三维网络模拟基础上搜索地下洞室围岩中的可动块体,并进行稳定性评价。书中对不同类型的可动块体介绍了搜索方法及稳定性评价方法。

第 2 章 结构面与岩体结构

与孔隙介质不同,岩体中发育有结构面。正是由于结构面的存在才使岩体与一般材料(例如金属、混凝土等)在结构性质上有本质差别,表现出明显的非均质、非连续、各向异性和非线性。

结构面是指地质历史发展过程中,在岩体内形成的具有一定延伸方向和长度、厚度相对较小的地质界面或带。它包括物质分异面和不连续面,如层面、不整合面、节理、断层、片理等,国际上多称其为不连续面(discontinuities)。国际岩石力学学会(ISRM)将其定义为发育在岩体中的断层、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。

岩体内结构面数量多,对岩体切割程度较高,不仅破坏了岩体的完整性,而且还直接影响着岩体力学性质和应力分布状态,控制着岩体的破坏方式。

§ 2.1 结构面类型

2.1.1 结构面的地质成因类型

结构面是地质作用的产物,它的地质属性决定了其空间分布上与力学特征上的复杂性。根据结构面的地质成因,可划分为原生结构面、构造结构面和次生结构面三类。它们的基本特征见表 2.1。

1. 原生结构面

原生结构面是指岩体在成岩过程中形成的结构面。因此,其特征与岩体的成因密切相关。原生结构面多具有不同程度的联结力和较高的强度。根据岩石成因类型不同,可以进一步把原生结构面分为沉积结构面、岩浆结构面和变质结构面三类。

(1) 沉积结构面

沉积结构面是沉积岩在沉积和成岩过程中形成的结构面。沉积岩是在常温常压下,由风化作用、生物作用和某些火山作用等产生的物质,经搬运、沉积、成岩等一系列的地质作用而形成的岩石,是陆壳表面分布最广的一种岩石类型,约占陆壳表面积的 75%。发育于其中的沉积结构面包括层面、软弱夹层和不整合面等。

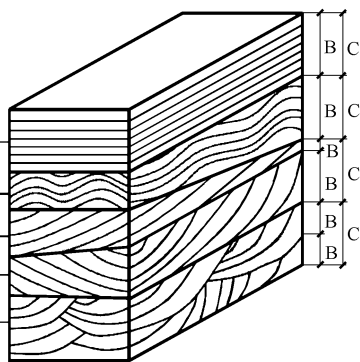
表 2.1 结构面的类型及其特征

Table2.1 Types and characters of discontinuities

成因类型		地质类型	主要特征			工程地质评价
			产 状	分 布	性 质	
原生结构面	沉积结构面	1) 层理层面 2) 软弱夹层 3) 不整合面、假整合面 4) 沉积间断面	一般与岩层产状一致,为层间结构面	海相岩层中此类结构面分布稳定,陆相岩层中呈交错状,易尖灭	层面、软弱夹层等结构面较为平整;不整合面及沉积间断面多由碎屑泥质物构成,且不平整	国内外较大的坝基滑动及滑坡很多由此类结构面所造成的,如奥斯汀、圣·弗朗西斯、马尔帕塞坝的破坏,瓦依昂水库附近的巨大滑坡
	岩浆岩结构面	1) 侵入体与围岩接触面 2) 岩脉岩墙接触面 3) 原生冷凝节理	岩脉受构造结构面控制,而原生节理受岩体接触面控制	接触面延伸较远,比较稳定,而原生节理往往短小密集	与围岩接触面可具熔合及破碎两种不同的特征,原生节理一般为张裂面,较粗糙不平	一般不造成大规模的岩体破坏,但有时与构造断裂配合,也可形成岩体的滑移,如有的坝肩局部滑移
	变质结构面	1) 片理 2) 片岩软弱夹层	产状与岩层或构造方向一致	片理短小,分布极密,片岩软弱夹层延展较远,具固定层次	结构面光滑平直,片理在岩层深部往往闭合成隐蔽结构面,片岩软弱夹层具片状矿物,呈鳞片状	在变质较浅的沉积岩,如千枚岩等路堑边坡常见塌方。片岩夹层有时对工程及地下洞体稳定也有影响
构造结构面		1) 节理(X型节理、张节理) 2) 断层(冲断层、拔断层、横断层) 3) 层间错动 4) 羽状裂隙、劈理	产状与构造线呈一定关系,层间错动与岩层一致	张性断裂较短小,剪切断裂延展较远,压性断裂规模巨大,但有时为横断层切割成不连续状	张性断裂不平整,常具次生充填,呈锯齿状,剪切断裂较平直,具羽状裂隙,压性断层具多种构造岩,成带状分布,往往含断层泥、糜棱岩	对岩体稳定影响很大,在上述许多岩体破坏过程中,大都有构造结构面的配合作用。此外常造成边坡及地下工程的塌方、冒顶
次生结构面		1) 卸荷裂隙 2) 风化裂隙 3) 风化夹层 4) 泥化夹层 5) 次生夹泥层	受地形及原结构面控制	分布上往往呈不连续状、透镜状,延展性差,且主要在地表风化带内发育	一般为泥质物充填,水理性质很差	在天然及人工边坡上造成危害,有时对坝基、坝肩及浅埋隧洞等工程亦有影响,但一般在施工中予以清基处理

1) 层面。层面是最常见的沉积结构面。如图 2.1 所示,沉积岩具有典型的层理结构,它包括细层、层系和层系组等。细层是层理的基本单位,厚度很小,一般为几

毫米至几厘米,成分均一,是在一定条件下同时沉积的;层系是由多个同类型的细层组成,是在相同沉积条件下先后形成的;层系组由若干个相似的层系组成,是在相似的沉积条件下形成的,中间无明显的不连续。层面则是比较明确的岩性分界面,上下岩体往往在空间上不连续。可以通过岩石成分、结构、颜色等的变化来区别层面与其他的结构面,也可以通过波痕、层面暴露标志如泥裂、雨痕等来识别层面。



A—细层; B—层系; C—层系组

图 2.1 沉积岩中的层面

Fig. 2.1 Layers in a sediment rockmass

层面主要反映沉积环境的变化,所以往往是区域性分布的,延伸范围大。如果沉积条件不同,层面的形态则往往差异很大,而且层间充填物的成分亦有明显不同。

2) 软弱夹层。软弱夹层特指岩体中具有一定厚度但其厚度又相对较小的软弱带(层),它与两侧的岩体相比,强度更低、更软弱。因此,软弱夹层在工程岩体稳定性中具有很重要的意义,往往控制着岩体的变形破坏机理及稳定性。

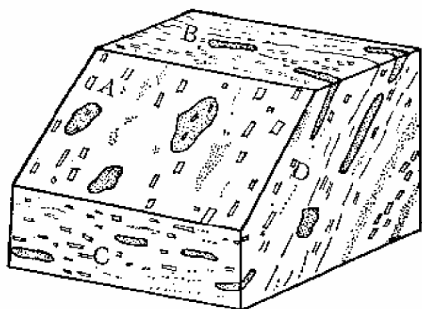
3) 不整合面。沉积岩中的不整合面包括平行不整合面和角度不整合面两类,是由于沉积间断而形成,往往还保留有古风化壳、底砾岩等成分。

总体上讲,沉积结构面的特征与沉积岩的成层性有关,一般延伸较好,常贯穿整个岩体,产状随岩层产状而变化,海相沉积岩中分布稳定而清晰,陆相沉积岩中有时呈透镜状。

(2) 岩浆结构面

岩浆结构面是岩浆侵入及冷凝过程中形成的结构面。岩浆岩包括侵入岩和喷出岩两大类,它们中的原生结构面主要有流面、原生节理面和与围岩或早期岩浆岩之间的接触面等。

1) 流面。流面是指岩浆岩中的片状、板状、柱状等矿物(如云母、角闪石等)以及扁平捕虏体、析离体等在岩浆流动过程中顺流动方向呈平行排列而成的面,如图 2.2 所示。它是由于岩浆流动时不同部位速度存在差异而形成的。



A—平行流面构造的面,含有柱状、针状、片状矿物及包裹体的团块; B—水平面; C—平行流面走向的纵切面; D—垂直流面走向的纵切面

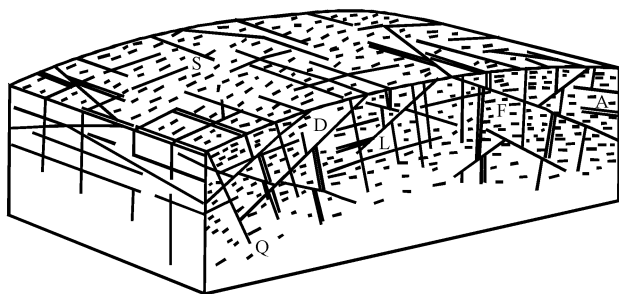
图 2.2 岩浆岩中流面

Fig. 2.2 Flow surface in a magmatic rockmass

岩浆岩中的流面类似于沉积岩中的层理,是岩浆岩中的主要结构面。在

侵入岩中,流面常发育在边缘或顶部,多平行于接触面;在喷出岩中,流面通常在具流纹构造的熔岩中出现,其产状大致反映熔岩流动面的产状。但是流面往往并不代表物质成分的差异或形成时代的差异,一般沿流面也没有明显的开裂现象,因此也被称为“假层理”。

2) 原生节理。原生节理是岩浆晚期冷凝阶段所形成的破裂面。依据原生节理与流面的相互关系,可划分为层节理、横节理、纵节理、斜节理等类型(图 2.3)。



Q—横节理;S—纵节理;L—层节理;D—斜节理;A—细晶岩脉;F—流线

图 2.3 岩浆岩中的原生节理

Fig. 2.3 Primary joints in a magmatic rockmass

层节理(L 节理):节理面平行于流面,一般发育于岩浆岩的顶部,多数产状平缓,多被伟晶岩、细晶岩等岩脉充填。

横节理(Q 节理):节理面垂直于流线,常直而长,倾斜陡峻,裂面粗糙。横节理为较早期发生的节理,多被残余岩浆或后期热液物质所充填。横节理的产状随流线的产状变化而变化。

纵节理(S 节理):节理面平行于流线,垂直于流面,倾斜陡峻,裂面粗糙。常发育在侵入体顶部流线平缓的部位。

斜节理(D 节理):节理面与流线、流面都斜交,往往以共轭剪节理形式出现。这类节理面较光滑,常有擦痕。许多斜节理被热液矿脉、岩脉所充填。常切割早期的横节理、纵节理,形成时期最晚。常发育在侵入体顶部。

在玄武岩中常见一种原生节理——柱状节理。它的节理面总是垂直于熔岩的流动层面,在产状平缓的玄武岩中,若干走向不同的这种节理常将岩石切割成无数个竖立的多边柱状体,如图 2.4 所示。

另外,在侵入岩边缘部位,由于岩浆上侵与围岩间形成的剪切作用,常产生雁列张节理,它们中有些还会发展成逆冲断层。这类节理也是在岩浆岩形成过程中产生的,可看作岩浆岩中的原生节理。

原生节理一般仅发育于同一岩流层内,在后期改造作用下才可能扩张发展并穿越不同的岩流层。

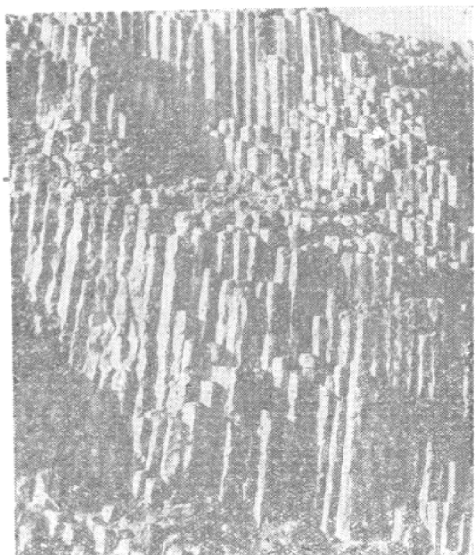


图 2.4 玄武岩中的柱状节理

Fig. 2.4 Columnar joints in a basalt

(3) 变质结构面

变质结构面是变质岩成岩过程中形成的结构面,可分为残留结构面和重结晶结构面两类。

1) 残留结构面。残留结构面是沉积岩经变质后,在层面上绢云母、绿泥石等鳞片状矿物富集并呈定向排列所形成的结构面,如千枚岩的千枚理面和板岩的板理面等。

2) 重结晶结构面。重结晶结构面主要有片理面和片麻理面等,它是岩石在发生深度变质和重结晶作用下,片状矿物和柱状矿物富集并呈定向排列形成的结构面。它改变了原岩的面貌,对岩体的物理力学性质常起控制性作用。

2. 构造结构面

构造结构面是岩体形成后在构造应力作用下形成的各种破裂面,包括断层、节理、劈理和层间错动面等。不同类型的构造结构面,其特征差异很大,即便是同一类型的构造结构面,其特征有时候也有巨大差异。

例如,断层、层间错动等构造结构面的规模一般较大,多数都有厚度不等、性质各异的充填物,并发育有由构造岩组成的构造破碎带,具多期活动特征。而节理、劈理等构造结构面,多数短小而密集,一般无充填或只具薄层充填,主要影响岩体的完整性和力学性质。

构造结构面除被胶结者外,绝大部分都是脱开的。因此这部分构造结构面(带)的工程地质性质很差,其强度接近于岩体的残余强度,常导致工程岩体的滑动破坏。在地下水的作用下,有的已泥化或者已变成软弱夹层。

(1) 断层

断层是地壳岩体中顺破裂面发生明显位移的一种破裂构造。断层是一种面状构造,但大的断层一般不是一个简单的面,而是由一系列破裂面或次级断层组成的带,带内还经常夹杂和伴生有搓碎的岩块、岩片及各种断层岩。断层规模越大,断裂带也就越宽,结构越复杂。

根据断层走向与褶皱轴向或区域构造线之间的几何关系,断层可分为纵断层、横断层和斜断层:断层面与褶皱层面的交线同褶皱轴向一致或断层走向与区域构造线基本一致的断层为纵断层;断层面与褶皱层面的交线同褶皱轴向直交或断层走向与区域构造线基本直交的断层为横断层;断层面与褶皱层面的交线同褶皱轴向斜交或断层走向与区域构造线斜交的断层为斜断层。

根据断层走向与所切岩层走向的方位关系,断层可以分为走向断层、倾向断层、斜向断层和顺层断层:走向断层的走向与岩层走向基本一致;倾向断层的走向与岩层走向基本直交;斜向断层的走向与岩层走向斜交;顺层断层的断层面产状与岩层层面等原生地质界面基本一致。

根据断层两盘的相对运动,可将断层分为正断层、逆断层和平移断层(图 2.5):正断层是断层上盘相对下盘向下滑动的断层;逆断层是断层上盘相对下盘向上滑动的断层;平移断层是断层两盘顺断层面走向相对移动的断层。

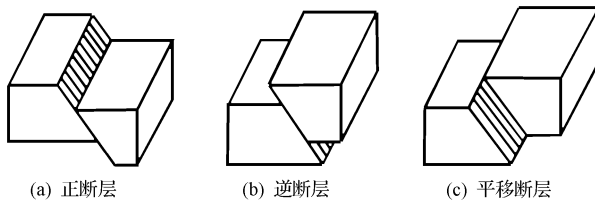


图 2.5 断层的类型

Fig. 2.5 Classification of faults

断层两盘紧邻断层的岩层,由于两盘相对错动对岩层的拖曳,常常发生明显的弧形弯曲,弧形弯曲的突出方向常指示本盘的运动方向,这种弧形弯曲也常称为牵引褶皱(图 2.6)。

在断层两侧,尤其是剪性断层两侧,常常伴生有大量的次级断层和节理,这些派生节理在主断层两侧呈羽状排列,称为羽状节理,如图 2.7 所示。

断层面上还经常出现擦痕和阶步,它们是断层两盘相对错动在断层面上因摩擦等作用而留下的痕迹。擦痕表现为一组比较均匀的平行细纹。是两盘岩石被磨

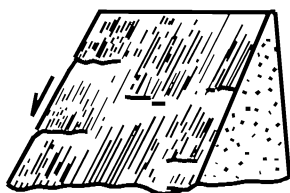


图 2.6 断层带中的牵引褶皱

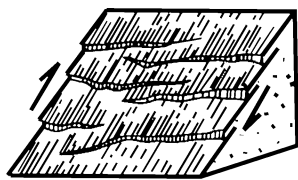
Fig. 2.6 Dragging folds in a fault zone

碎的岩屑和岩粉在断层面上刻划的结果。有时表现为一端粗而深,一端细而浅。由粗而深端向细而浅端一般指示对盘运动方向。在硬而脆的岩石中,擦面常被磨光,有时附以铁质、硅质或碳酸盐质薄膜,以致光滑如镜称为摩擦镜面。

阶步是在断层滑动面上与擦痕直交的微细陡坎。阶步的陡坎面向对盘的运动方向,称为正阶步,如图 2.8(a)所示;有时也出现反阶步,其陡坎面向本盘运动方向,多是次级羽裂横断而形成的,如图 2.8(b)所示。



(a) 正阶步



(b) 反阶步

图 2.8 断层面上的阶步

Fig. 2.8 Steps on fault surface

以上所论述的基本是把断层视为脆性破坏的产物。这种脆性破坏现象主要发生于地壳浅部或表层的脆性变形带内。往地下深处,随着温压状态的改变,岩石韧性也相应增高,即进入深构造层次的准塑性变形带和塑性变形带。当处于塑性形态的岩石破坏时,则形成韧性断层。所以根据岩石破坏的力学性状和物理状态,可将断层分为脆性断层和韧性断层两种基本类型以及介于两者之间的脆韧性断层。脆性断层和韧性断层在岩石破坏性质、断层形态和产状、断层作用速度和断层构造岩上均有明显差异。

断层延伸到深构造层次时,随着岩石性状的变化,断层面逐渐分散以至形成无数密集的前切面。这些前切面共同构成一条前切带,即韧性断层或韧性前切带。因

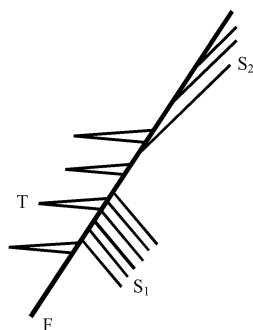
F—主断层;S₁、S₂—剪节理;T—张节理

图 2.7 断层及其羽状节理

Fig. 2.7 Fault and its pinnate joints

此,脆性断层普遍发育于地壳表层,而韧性断层则多产生于地壳一定深度范围内,需要较高的温度和压力。

浅构造层次的脆性断层和深构造层次的韧性断层的错动速率也有明显差异。脆性断层常表现为快速的地震式滑动,韧性断层则为缓慢的非地震式蠕动。

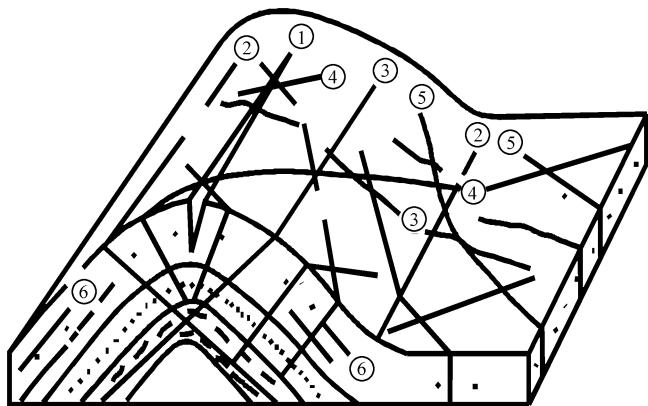
在岩石破坏和构造岩的形成上,脆性断层主要通过破碎作用和研磨作用,而韧性断层主要通过晶格位错和重结晶作用等塑性变形作用。因此,与脆性断层伴生的断层岩一般属碎裂岩系列,与韧性断层伴生的断层岩一般属糜棱岩系列。

(2) 节理

节理是岩石中的裂隙,节理与断层的最大区别在于节理没有明显的位移。

根据节理产状与所在岩层的产状关系可将节理分为走向节理、倾向节理、斜向节理和顺层节理(图 2.9);走向与岩层走向大致平行的节理为走向节理;大致直交的节理为倾向节理;斜交的节理为斜向节理;节理面与岩层面大致平行的节理为顺层节理。

根据节理面与褶皱面的交线同褶皱轴方位之间的关系,可将节理分为纵节理、横节理和斜节理(图 2.9);节理面和褶皱面的交线与褶皱轴向平行的节理为纵节理;直交的节理为横节理;斜交的节理为斜节理。



①、②—走向节理、纵节理;③—倾向节理、横节理;④、⑤—斜向节理、斜节理;⑥—顺层节理

图 2.9 节理的几何分类

Fig. 2.9 Geometrical classification of joints

岩性和层厚对节理的发育有明显影响。一般来讲,韧性岩层中剪节理较张节理发育;在同一应力状态下,韧性岩层中主要发育剪节理,脆性岩层主要发育张节理;韧性岩层中共轭节理的夹角常比脆性岩层中的夹角大。

岩层的厚度往往影响节理发育的间距,岩层越厚节理间距越大。另外,层面的存在会降低岩石的强度,因此岩性相同而层厚不等的岩石,在同样外力作用下,薄

层中的节理间距小,更密集。

岩体经受不同的构造作用,往往会形成不同形态的节理组和节理系。节理组是在一次构造作用的统一应力场中形成的、产状基本一致的、力学性质相同的一群节理;而节理系是指在一次构造作用的统一应力场中形成的两个或两个以上的节理组,如岩体剪切过程中经常出现的“X”型共轭剪节理(图 2.10)。

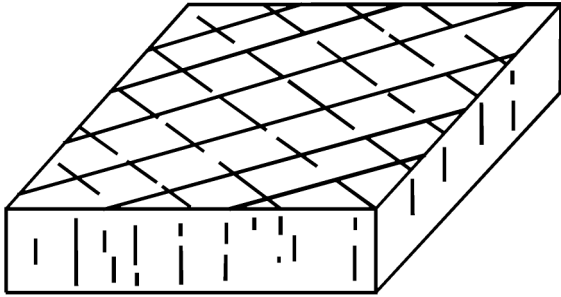


图 2.10 “X”型共轭剪节理系

Fig. 2.10 Conjugate shear joint system in X-type

对岩体中节理的分期有助于反演岩体所经历的构造作用。另外,在弄清构造形式、构造期次的前提下,往往也不难推测出岩体中节理的分组情况以及各组节理的大致形态。

节理的分期是指将一个地区内不同时期形成的节理加以区分,按先后顺序,组合成一定的序列,以便从时间、空间和受力形态上研究该地区节理的发育史和分布产出规律。分期的方法是:

1) 据节理的错开关系将节理的形成早晚时代区分开来。如图 2.11(a)所示,早期节理 1、2 组被后期节理 3 组错开,错开后的 1、2 组节理仍应分别划归为 1 组和 2 组节理。

2) 据节理组间的限制关系确定早晚,如图 2.11(b)所示,3、4 组节理被 1、2 组节理所限制,没有延伸过去,那么 3、4 组节理形成较晚。

3) 如两组节理互相切错,说明它们是同时形成的有共扼关系,如图 2.11(c)所示。

4) 据跟踪利用改造的关系确定早晚。如图 2.11(d)所示,3 组节理追踪 1、2 组节理,且改造 1、2 组节理,使其由剪节理变为张节理,3 组节理为晚期,1、2 组节理为早期。

5) 据与构造层的关系确定早晚。如图 2.11(e)所示,1、2 组节理只分布在较老的二叠系(P)构造层中,3、4 组节理既分布在较老的构造层中,又分布较新的侏罗系(J)构造层中,说明 1、2 组节理早,3、4 组节理晚。

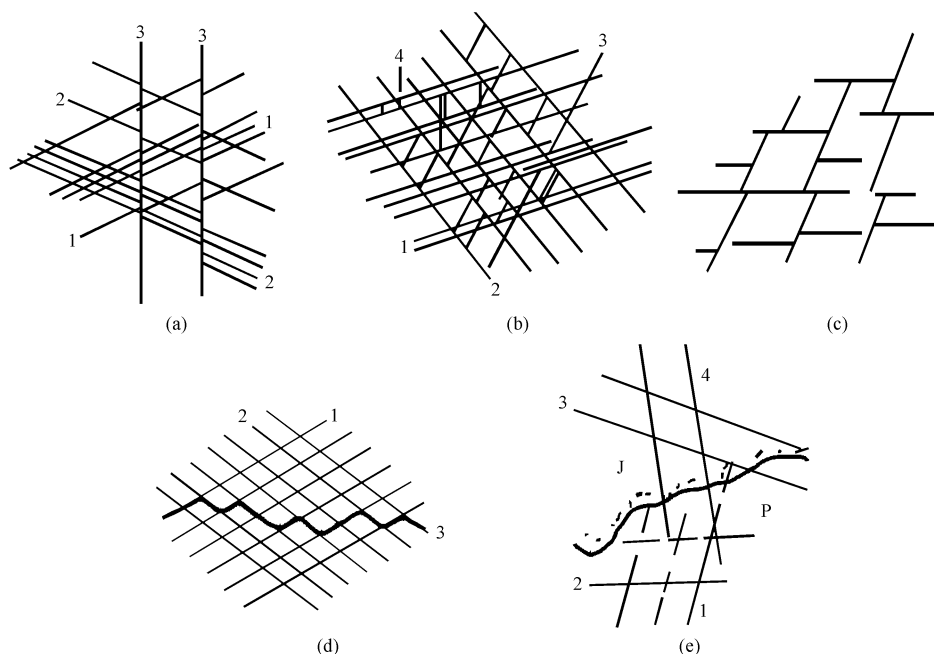


图 2.11 结构面的分期

Fig. 2.11 Periods division of discontinuities

在节理分期的基础上可进行节理配套。节理的配套是将一定构造期的统一应力场中形成的各组节理组合成一定系列。主要依据共轭节理的组合关系进行配套。

一对呈“X”型相交的剪节理[图 2.12(a)],利用节理面上的擦痕或对明显标志的切错来判断,其中一组显示反扭,另一组显示顺扭,则它们具有共轭关系,属于一套节理。

若一对呈“X”型相交的剪节理,其中一组呈左列式排列,另一组呈右列式排列,如图 2.12(b)所示,则表明它们具有共轭关系,属一套节理。

两组呈雁列式排列的张节理[图 2.12(c)],或是同方位的张节理组成两组雁列式排列的节理[图 2.12(d)],它们都是沿共轭剪切带形成的一套节理。

剪节理的尾端往往具有折尾、菱形结环等特点,它代表一对具有共轭关系的剪节理。如图 2.12(e)、(f)所示,一对呈“X”型相交节理互相切割,一组显示反扭切错,另一组显示顺扭切错,它们具有共轭关系。

(3) 劈理

劈理是一种将岩石按一定方向分割成平行密集的薄片或薄板的面状构造。它多发育在强烈变形、轻度变质的岩石里,是一种在露头面上和手标本上(即小型尺度上)所能够看到的透入性面状构造。

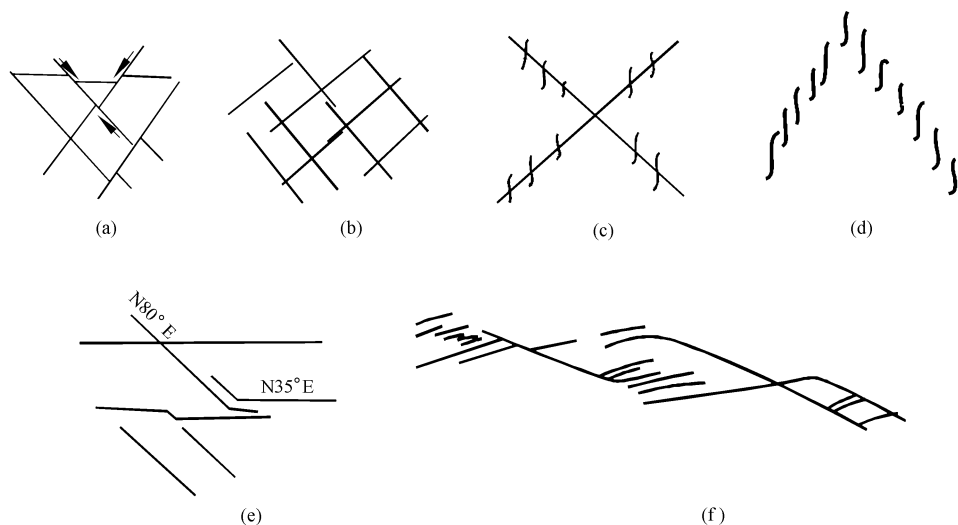


图 2.12 结构面的配套

Fig. 2.12 Sets division of discontinuities

具有劈理的岩石都有一组密集的潜在破裂面——劈理面,其间所夹岩片称为微劈石。在微观尺度上,劈理面并不是一个简单的裂面,而是一条由矿物晶带和裂缝组成的三维空间实体,称为劈理域,它们的矿物多按一定方式重新排布,与两侧定向很差或不定向的微劈石在结构上明显不同。

通常将劈理分为流劈理、破劈理及滑劈理。流劈理是变质岩中最常见的一种次生透入性的面状构造,它是由片状、板状或扁圆状矿物或其集合体的平行排列构成的,具有使岩石分裂成无数薄片的性能[图 2.13(a)]。破劈理是指岩石中一组密集的平行破裂面,一般与岩石中矿物排列方向无关,劈理有时呈微细裂隙,有时还为细脉所填充[图 2.13(b)]。微劈石厚度一般不到一厘米,并以其密集性和平行定向

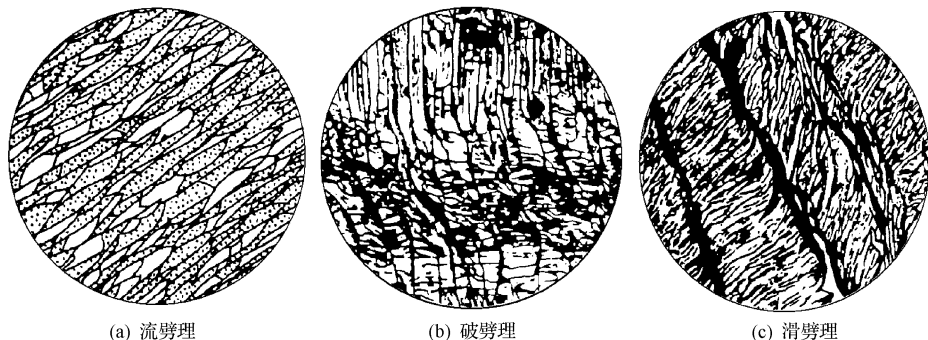


图 2.13 劈理的类型

Fig. 2.13 Types of cleavage