

国家自然科学基金资助项目

统计岩体力学原理

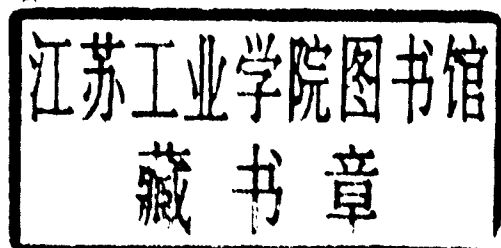
伍法权 著

中国地质大学出版社

• 国家自然科学基金资助项目 •

统计岩体力学原理

伍法权 著



中国地质大学出版社

• (鄂)新登字第 12 号 •

内容简介

本书系统地阐述了统计岩体力学理论,包括岩体结构的统计理论、岩体的应力-应变关系理论与等效应力理论、岩体的强度理论与破坏概率理论、岩体水力学理论和水岩耦合模型以及统计岩体力学的若干应用。

本书可供从事岩体工程、水利水电、采矿与矿井建设、铁路、国防等部门的技术人员和科研人员使用,也可作为有关专业研究生教学参考书。

© 统计岩体力学原理

伍法权 著

出版发行 中国地质大学出版社 (武汉市·喻家山·邮政编码 430074)

责任编辑 贾晓青 责任校对 徐润英

印 刷 同济医科大学印刷厂

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 230 千字

1993 年 5 月第 1 版 1993 年 5 月第 1 次印刷 印数 1—500 册

ISBN 7-5625-0795-3/P·279 定价 9.50 元

前 言

岩体力学是一门年轻的学科。曾经有人说岩体力学还不是一门科学，因为它并没有自己的理论。这种说法虽不免失之偏颇，但也告诉我们，岩体力学的理论研究是一件十分紧迫的任务。

事实上，岩体力学从形成到发展的几十年中，先驱们进行艰苦的理论探索的不乏其人。但是岩体作为一种地质体，不仅有其复杂的建造与改造成因历史，更有由此决定的复杂的物质分布与结构特征，用某种简单的理论模型概括其几何与物理性质，的确是一件不容易的事情。

在岩体力学经历了岩块力学、结构面力学两个阶段不能尽如人意之后，近十年来，岩体力学家们开始把注意力集中于对岩体结构的整体几何性质的研究，并将其用于岩体工程性质即力学性质和水力学性质等多方面的研究。应当看到，这是一个历史性的进步，它表明这门学科进入了真正意义上的岩体力学阶段。

我们认为，岩体的结构性质是岩体各种工程性质的基础。岩体结构特征具有确定性的一面，同时更具有随机性的一面。从某种程度上说，岩体中地质结构面构成的网络实际上是一种随机网络。这种岩体结构的随机性决定了岩体的力学、水力学等多方面的工程性质必然具有随机性。因此，岩体力学应该是一种统计力学。另一方面，岩体中结构面大多是有限尺度的不连续面，对外力作用的力学响应规律服从断裂力学理论。因此，岩体的力学性质从本质上是一种裂纹群体的统计断裂力学行为。而地下水在岩体中的运移主要是沿裂隙网络进行的，因而岩体的水力学应是随机裂隙网络的水力学。

多年来，笔者正是基于这一认识，在系统总结前人成果的基础上，对岩体几何结构的统计性质、极值性质、连通性质、多裂隙随机不连续面系统的统计断裂力学行为，包括变形与强度行为、岩体破坏的可靠性与破坏概率、裂隙随机网络水力学习性以及“水岩耦合”作用等作了系统的探讨，逐步形成了一套“统计岩体力学”理论体系。

在系统理论研究的同时，笔者竭力追求理论为生产实际服务，在实用中检验、修正与完善自己的理论。1986—1988年，笔者在中国地质大学（武汉）晏同珍教授指导下开始把岩体结构面网络统计研究方法用于三峡库区云阳城近区层状岩体节理研究，并对运用断裂力学方法确定岩坡破坏面位置作了初步尝试。1988—1989年，笔者作为主要研究人员，对我国连云港市将军崖古岩画文物保护区岩体稳定性作了系统研究，运用自己提出的“统计岩体力学”本构模型、强度理论及破坏概率理论对该区岩体稳定性进行了有限元计算分析，所得结论已受到检验。1989—1992年，笔者在中国科学院地质研究所攻读博士学位，在王思敬教授、许兵教授、杜永廉高级工程师指导下从事统计岩体力学理论研究，同时期与西南交通大学合作完成了题为“非贯通裂隙岩体强度特性及破坏机制研究”的国家自然科学基金课题研究，使理论得到系统化。1991年作者主持完成了“大渡河瀑布沟电站坝前古拉裂体稳定性研究”工作，系统地运用了统计岩体力学的力学与水力学理论进行稳定性计算、岩体力学与水力学参数的求取及岩体分类等。1992年笔者主持湖北省十堰市东山苑住宅小区岩坡与岩基稳定性研究，并着手统计岩体力学理论的通用软件开发研究。

本书力图系统总结笔者这几年来的研究心得,并与已有前人研究成果汇成一体,形成一套“统计岩体力学”的理论体系。本书涉及理论成果包括:

(1) 岩体结构的统计理论 笔者总结和发展了岩体结构面形状、迹长、间距、隙宽、粗糙度及其统计分布的统一表述方法和各种理论校正方法,提出了结构面的线、面、体密度及其相互关系和几种结构面要素的极值分布、结构面连通率,讨论了岩体结构统一表述的几种方法,基本上形成了一套有关岩体结构的完整的统计理论。

(2) 裂隙岩体的应力-应变理论 基于断裂力学的能量原理及能量可加性原理、岩体结构的统计理论,导出了裂隙岩体的等效连续介质各向异性本构方程的张量形式,证明了岩体中等效应力的对称性,并讨论了岩体弹性柔度张量的性质及弹性模量、泊松比的求取方法。

(3) 裂隙岩体的强度理论与破坏概率理论 我们认为,岩体的强度是结构面网络与岩块强度的一种协同行为。文中论证了岩块与结构面破坏均是在岩体中等应力条件下发生的,运用 Weibull 弱环思想和断裂力学应变能释放率理论建立了岩体中各组结构面及结构面网络的破坏判据,提出了岩块破坏判据,并应用可靠性理论提出了岩体的破坏概率理论。最后将岩体强度判据表述成常用的主应力形式和库仑形式。

(4) 裂隙岩体的水力学理论 已有裂隙岩体水力学模型较多是在认定裂隙为无穷延伸的前提下导出的。我们应用了岩体结构面网络理论成果,根据连通裂隙率,重新定义了裂隙岩体的渗透张量,并对裂隙岩体水力学代表体积单元及尺寸效应、水岩耦合问题作出了理论表述。

(5) 统计岩体力学应用问题 本书仅以平面应变问题为例导出了裂隙岩体刚度矩阵,并讨论了统计岩体力学有限元法计算步骤与程序方法。对于另一个实用性课题——岩体工程分类提出了若干方法,而岩体工程参数求取问题则在上述各部分内容分别作出了讨论。

应当指出,统计岩体力学作为一门学科才刚刚兴起,还有大量的理论问题有待于深入探索,应用领域也有待逐步开拓。笔者即将出版《统计岩体力学方法》一书,将对统计岩体力学应用方法作系统介绍。

本书编写过程中得到能源部水利部成都勘测设计院地质处副处长宋胜武同志的大力协助,中国地质大学水文地质工程地质系研究生吕杰堂同志协助完成了外文部分的翻译工作,在此作者深表谢忱。

笔者还要特别感谢妻子张小玉女士,在作者多年的研究工作中她不仅承担了繁重的事务,还直接参与了本书绘图工作,为作者顺利完成本书给予了极大的帮助。

由于本人水平有限,书中不妥之处一定不少,恳请指正。

作 者

1993 年 5 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 统计岩体力学的研究现状	(1)
第二节 统计岩体力学的思想方法	(9)
第三节 统计岩体力学的基本理论	(10)
第二章 力学基础概要	(13)
第一节 应力理论	(13)
第二节 应变理论	(16)
第三节 线弹性本构理论	(17)
第四节 线弹性力学变分原理	(22)
第五节 线弹性断裂力学理论	(24)
第六节 脆性断裂的 Weibull 统计理论	(27)
第三章 岩体结构的统计理论	(30)
第一节 结构面的产状	(30)
第二节 结构面的迹长与半径	(35)
第三节 结构面的间距与密度	(40)
第四节 结构面的粗糙度	(44)
第五节 结构面的隙宽	(45)
第六节 岩体结构的统计描述	(50)
第七节 岩体结构的分形描述	(59)
第四章 均质裂隙岩体的应力-应变关系	(64)
第一节 结构面上的应力	(64)
第二节 裂隙岩体的应力-应变关系	(65)
第三节 等效应力	(68)
第四节 关于物理性质张量 C_{ijkl} 的讨论	(70)
第五节 裂隙岩体本构关系的损伤理论	(74)
第六节 裂隙岩体本构关系的结构张量法	(76)
第五章 均质裂隙岩体的强度理论	(80)
第一节 结构面上的等效应力	(80)
第二节 结构面网络的破坏判据及破坏概率	(81)
第三节 岩体中岩块的破坏判据与破坏概率	(85)
第四节 岩体的强度判据与破坏概率	(88)
第五节 岩体强度的主应力形式	(88)
第六节 岩体抗剪强度的库仑判据	(89)
第六章 岩体水力学理论	(92)

第一节	经典的单裂隙水力特征	(92)
第二节	岩体的渗透张量	(95)
第三节	岩体渗透性能的尺寸效应	(97)
第四节	渗流场与应力场的耦合作用	(99)
第五节	Oda 渗透张量法	(101)
第七章	统计岩体力学应用	(104)
第一节	统计岩体力学有限元法	(104)
第二节	岩体工程分类	(107)
主要参考文献		(111)
英文摘要		(112)

PRINCIPLES OF STATISTICAL MECHANICS OF ROCK MASSES

Contents

Chapter 1	Introduction	(1)
1.1	Background	(1)
1.2	Methodology	(9)
1.3	Basic theories	(10)
Chapter 2	Mechanical Basis	(13)
2.1	Stress	(13)
2.2	Strain	(16)
2.3	Linear elastical constitutive theory	(17)
2.4	Principle of variation	(22)
2.5	Linear elastical fracture mechanics	(24)
2.6	Weibull theory on brittle failure	(27)
Chapter 3	Statistical Theories on Rock Mass Structure	(30)
3.1	Attitude of discontinuity	(30)
3.2	Trace length and radius of discontinuity	(35)
3.3	Spacing and density of discontinuities	(40)
3.4	Roughness of discontinuity	(44)
3.5	Aperture of discontinuity	(45)
3.6	Statistical description of rock mass structure	(50)
3.7	Fractal description of rock mass structure	(59)
Chapter 4	stress-strain Relationship of Rock Mass	(64)
4.1	Stress on discontinuity	(64)
4.2	Stress-strain relationship of rock mass	(65)
4.3	Equivalent stress	(68)
4.4	Discussion on tensor C_{ijx}	(70)
4.5	Damage model	(74)
4.6	Fabric tensor model	(76)
Chapter 5	Strength Theory of Rock Mass	(80)
5.1	Equivalent stress on discontinuity	(80)
5.2	Failure criterion and failure probability of discontinuity	(81)
5.3	Failure criterion and failure probability of rock blocks in rock mass	(85)
5.4	failure criterion and failure probability of rock mass	(88)

5. 5	principal stress criterion of rock mass strength	(88)
5. 6	Coulomb criterion of rock mass	(89)
Chapter 6	hydraulic Theory of Rock mass	(92)
6. 1	Hydraulic character of a single crack	(92)
6. 2	permeability tensor of rock mass	(95)
6. 3	Size effect of permeability	(97)
6. 4	Coupled stress and fluid flow	(99)
6. 5	Oda permeability tensor	(101)
Chapter 7	Applications	(104)
7. 1	Finite element method	(104)
7. 2	Rock mass classification	(107)
References		(111)
Summary		(112)

第一章 绪 论

岩体力学是岩体工程地质学的一门基础理论学科。它运用数学与力学理论工具,把岩体工程地质问题的分析引向定量化和理论化。因此,岩体力学的发展制约着工程地质学理论化的发展进程。

岩体力学的基本理论课题概括起来可以分为四个方面:岩体的变形理论、强度理论、岩体水力学理论与岩体应力。前三方面研究岩体自身的基本性质,工程应用中称为岩体的工程性质,后一方面则研究岩体的环境条件。

关于岩体工程性质的研究是困扰了岩体力学理论界和应用界几十年的一个热门课题,也是始终制约着工程岩体变形与稳定性计算评价及其可靠性的一个关键课题。多少年来,众多的学者从不同角度进行了艰苦的探索。

岩体工程性质研究的根本困难在于岩体结构的表述与岩体中结构面,尤其是结构面网络的力学效应、水力学效应的理论描述,而前者又是后者的基础。事实上,单一结构面的几何形态决定了岩体结构面力学效应的作用方式,而结构面网络的几何特征决定了结构面的群体力学效应和网络水力学效应。

大量研究表明,岩体中结构面的分布具有统计的确定性特征,或者说是具有表观随机性掩盖下的潜藏确定性特征。例如人们所熟知的结构面产状分布,具有随机性是显然的,但我们又总可以通过统计分析方法找出几个“优势产状”,这些优势产状正是受其形成时应力状态决定的最可能破裂方向。近些年对岩体结构面规模、间距、隙宽以及结构面表面形态研究结果也表明,这些尺度参数无一不具有某种确定的概率分布形式。岩体结构的这种性质必然导致岩体力学性质和水力学性质的统计确定性。因此,岩体力学应当是一种统计力学理论。

我们知道,在地表附近的低围压和常温条件下岩体的变形与强度主要取决于岩体中结构面。近一二十年来,岩石力学家和工程地质学家已逐步认识到,岩体结构面的变形与破坏本质上是一种断裂力学行为。沿各结构面的拉压变形及剪切变形构成了岩体宏观变形的主体部分;而结构面变形将在结构面边缘引起应力集中,导致裂纹扩展连迤直至岩体整体破坏。

综合这两方面,我们有理由认为,岩体力学应当是一门岩体的统计断裂力学,或者称为统计岩体力学。

统计岩体力学作为一门学科的提出还是近年来的事(伍法权,1991、1992)。但对其各个方面分门别类的研究工作则早已开始。本章将首先介绍这一领域中理论与应用研究概况。然后阐明统计岩体力学的思想方法,最后提出这一学科的理论框架。

第一节 统计岩体力学的研究现状

统计岩体力学是在系统总结了前人研究成果,吸取多门学科的思想方法而发展起来的。统计岩体力学理论赖以建立和发展的研究基础包括岩体结构面的几何形态与力学性质的观测与

实验研究、岩体结构面网络统计理论与方法、断裂力学与岩石断裂力学的实验研究、脆性断裂的统计理论、岩体水力学理论、连续介质力学与损伤理论、概率论与可靠性理论以及已有的岩石力学实验与岩体力学经验理论等。

一、结构面几何形态研究

结构面几何形态研究是岩体力学性质和水力学性质研究的基础。然而，结构面形态又是一个十分复杂的研究课题。

较早注意到结构面几何形态对力学性质影响并作出研究的是 Patton (1966)。他把结构面的起伏理想化为形态规则的起伏角 i ，并通过力学实验和理论分析将其计入结构面摩擦角。

在深入考察结构面几何形态后人们发现结构面起伏状况可以用节理粗糙度系数 JRC (Joint Roughness Coefficient) 统一描述。Barton (1977) 提出了用于确定 JRC 的 10 条标准剖面，并经国际岩石力学学会 (ISRM) 推荐而被广泛采用。注意到结构面观察与采样点的代表性及结构面形态在力学意义上的尺寸效应，Barton 等人 (1985) 又提出了 JRC 的尺寸效应校正式

$$JRC = JRC_0 \left(\frac{L}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} \quad (1-1)$$

式中： L_0 和 JRC_0 为采样尺寸与 JRC 值； L 和 JRC 为结构面实际尺寸和 JRC 的校正值。

但是，结构面形态是千变万化的，很难用 10 条剖面完全表述，也无法用一个简单的数学关系式准确表达。因此，实际工作中多对具体结构面采用抽样实测方法，先后发展了一些机械式、光电式和激光式测量方法 (Patton, 1966; Fecher, Renger, 1977)。

Turk 和 Dearman (1985) 用实际测量得到的结构面曲线迹长 L_t 和直线迹长 L_d 按下式计算结构面起伏角 i

$$\cos i = \frac{L_d}{L_t} \quad (1-2)$$

这种方法所得到的实际上是综合考虑了结构面各级起伏粗糙度后的综合值，称为上限起伏角。由 i 值可以求取 JRC 值。

与此类似，王岐 (1986) 提出了用伸长率 R 确定 JRC 的方法

$$R = \frac{L_t - L_d}{L_d} \times 100\% \quad (1-3)$$

通过与 Barton 标准剖面对比得出

$$JRC = \frac{\lg R}{\lg 1.0910216} \quad (1-4)$$

Barton、Choubey 和 Bandis 对长 0.1m 的 200 多组结构面测量得到如下关系

$$JRC = (450 + 50 \lg L) \frac{a}{L} \quad (1-5)$$

其中， L 为直线迹长； a 为剖面最大起伏度。

Turk 等 (1987)、James (1987)、谢和平 (1992)、王建锋 (1992) 等用分维理论对确定 JRC 参数作了有益的工作，并得到如下经验关系式

$$JRC = a + bD \quad (1-6)$$

$$JRC = a(D-1)^b \quad (1-7)$$

式中： D 为结构面形态分维数，一般有 $D=1-1.03$ ； a 、 b 为常数。

由上述可见,关于结构面几何形态的研究最终都归结为求取参数 JRC , 而 JRC 的物理意义在于它对结构面强度的力学效应。

二、结构面力学性质的研究

结构面是岩体结构的基本单元,岩体结构的力学效应与水力学效应是以单个结构面的行为为基础的。

事实上,早在 40 年代工程地质学家就认识到结构面力学效应的存在。Terzaghi (1946) 在《隧洞地质入门》一书中就考虑了软弱面对岩体稳定性的影响,并提出了隧洞围岩稳定性分类。

此后,岩石力学界对结构面的地质特征、力学习性等逐步开展了研究。1974 年, Müller 编辑出版了《岩石力学》,提出了关于岩体中结构面地质特征及工程意义的一系列观点,这是对当时的研究工作,特别是奥地利学派工作的一个总结。

70 年代以来, Goodman (1974, 1976)、Bandis 等 (1983) 和 Barton 等 (1985) 通过大量实验室研究,获得了有关结构面法向压缩变形、剪切变形以及剪切强度等多方面的成果。

1. 结构面的变形性质

Goodman (1974) 根据大量实验资料,提出了结构面法向闭合变形的如下经验关系

$$\sigma = \frac{\Delta t}{t_0 - \Delta t} \sigma_i + \sigma_i \quad (1-8)$$

式中: σ 为结构面的法向应力; σ_i 为就位应力; Δt 为闭合量; t_0 为最大闭合差。

Bandis 等 (1983) 的经验方程为

$$\sigma = \frac{\Delta t}{a - b \cdot \Delta t} \quad (1-9)$$

其中, a 、 b 为常数。显然,当 $\sigma \rightarrow \infty$ 时, $\frac{a}{b} \rightarrow \Delta t = t_0$; 当 $\sigma \rightarrow 0$ 时, $\Delta t \rightarrow 0$ 有 $a = \frac{1}{K_{ni}}$, K_{ni} 为结构面初始法向刚度。结构面法向刚度为

$$K_n = \frac{\partial \sigma}{\partial \Delta t} = \frac{1}{a \left(1 - \frac{b}{a} \Delta t\right)^2} = \frac{K_{ni}}{\left(1 - \frac{\Delta t}{t_0}\right)^2} \quad (1-10)$$

并提出了式中 t_0 和 K_{ni} 的确定方法。

孙广忠 (1983, 1988) 将结构面法向闭合变形曲线用指数函数表示为

$$t = t_0 (1 - e^{-\frac{\sigma}{K_n}}) \quad (1-11)$$

式中: K_n 称为法向压缩刚度。

对于结构面的剪切变形, Kulhaway (1975) 提出了如下经验方程

$$\tau = \frac{\Delta S}{m + n \Delta S} \quad (1-12)$$

其中, ΔS 为剪切位移; m 为初始剪切刚度 K_{ni} 的倒数; n 为 τ_{max} 的倒数。

Barton 和 Chouby (1980) 给出了剪切刚度 K_s 的尺寸效应经验公式

$$K_s = \frac{100}{L} \sigma \operatorname{tg} (JRC \log \frac{JCS}{\sigma} + \varphi) \quad (1-13)$$

式中: L 为受剪切结构面的长度; JRC 为结构面粗糙度系数; JCS 为结构面壁面抗压强度; φ 为结构面剩余摩擦角。

2. 结构面的抗剪强度

平直光滑结构面抗剪强度满足如下简单关系式

$$\tau = \sigma \tan \varphi_0 \quad (1-14)$$

其中, φ_0 为结构面摩擦角, 其近于磨光平面上的值。

Patton (1966) 用石膏模型实验研究了起伏角 i 为规则形状时结构面摩擦角 φ , 得到 $\varphi = \varphi_0 + i$, 于是有

$$\tau = \sigma \tan(\varphi_0 + i) \quad (1-15)$$

Barton (1977, 1985) 根据对结构面粗糙度 JRC 的研究和实验分析, 得出粗糙结构面抗剪强度经验公式

$$\tau = \sigma \tan(JRC \lg \frac{JCS}{\sigma} + \varphi_0) \quad (1-16)$$

并与式 (1-1) 同时提出了节理壁面抗压强度参数的尺寸效应修正公式

$$JCS = JCS_0 \left(\frac{L}{L_0} \right)^{-0.03/JRC_0} \quad (1-17)$$

式中各代号意义同前。

三、岩体结构性质的统计研究

岩体结构性质是岩体最基本的性质。人们曾经采用多种方法描述岩体结构。较早的方法是运用走向或倾向玫瑰花图、赤平投影图等, 但这些方法只能描述结构面的空间角度关系和分布图式。70 年代以来, 人们陆续开始对结构面的空间尺度分布进行研究, 逐步形成了一套整体描述岩体结构的几何统计方法。这一套统计方法中, 结构面产状及其分组仍沿用了赤平极射投影方法。结构面分组后, 将各组结构面的倾向与倾角分别作出分布直方图, 并拟合成概率密度函数。大量研究表明, 倾向与倾角一般服从对数正态分布 (潘别桐, 1989)。

结构面的平面形态是岩体结构面网络的基本要素。Snow (1970)、Bridges (1976) 和 Barton (1978) 将结构面形态视为圆形或椭圆形。事实上, 结构面平面形态在均质结晶岩体中为近似圆形, 而在层状介质中则为长方形。结构面形态在小范围内可认为是随机分布的 (Priest 和 Samaniego, 1983)。

结构面间距反映了岩体的完整性, 是岩体质量评价的基本内容之一。Barton (1974) 和 Bieniawski (1974) 用隐含结构面平均间距的岩体质量指标 RQD 进行了岩体分类。Priest 和 Hudson (1976, 1979, 1981) 及 Wallis 和 King (1980) 通过大量实测资料证明, 结构面间距 x 服从负指数分布

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (1-18)$$

并讨论了参数 λ 估计精度随样本量大小的变化特征, 认为置信水平为 80% 和 90% 条件下样本容量分别不得小于 $n=41$ 和 271。

按岩体质量指标 RQD 的经典定义, Priest 和 Hudson (1976) 由式 (1-18) 得到

$$RQD = \lambda \int_{0.1}^{\infty} x f(x) dx \times 100\% = (1 + 0.1\lambda) e^{-0.1\lambda} \times 100\% \quad (1-19)$$

式中: λ 为结构面线密度 (其单位为条/米, 即条/m)。

Sen 和 Kazi (1984) 讨论了测线长度 L 对平均结构面间距 ($1/\lambda$) 估计误差的影响, 得出了间距的实测均值 $E(x)$ 与理论均值 $1/\lambda$ 的关系为

$$E(x) = \frac{1}{\lambda (1 - e^{-\lambda L})} [1 - (1 + \lambda L) e^{-\lambda L}] \quad (1-20)$$

Hudson 和 Priest (1983) 提出了含多组结构面岩体中结构面实测线密度 λ_i 的计算方法

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cos \theta_{ij} \quad (1-21)$$

其中, λ_i 为第 i 组结构面法线密度; θ_{ij} 为该组面法线与测线夹角; 并求出了 λ 的最大值及其产状值。

结构面组的另一空间尺度指标是结构面的规模, 通常用结构面与露头面交线长即迹长表征。Cruden (1977) 和 Baecher 等 (1977, 1978) 提出了利用露头面测量结构面迹长的测线测量法。Priest 和 Hudson (1981) 发展了利用有限露头面上半迹长和截尾半迹长测量数据推断结构面全迹长及其分布的几何概率计算方法。大量实测资料表明, 结构面迹长服从负指数分布、对数正态分布。

Kulatilake 和 Wu (1984) 提出了估计结构面平均迹长的统计窗测量方法。这种方法不需要知道被测结构面迹长的分布函数。

结构面的张开度 (隙宽) 与岩体水力学性质有着密切联系。岩体水力学家对结构面张开度进行了较多的研究。Snow 等人 (1970) 的资料表明, 结构面张开度服从正态分布, 熊承仁等 (1987) 实测结果表明张开度服从负指数分布。

在上述有关岩体结构面网络统计性质研究的基础上, Samaniego (1981) 发展了岩体结构平面网络随机模拟技术。这一技术的基本原理是依据结构面产状、迹长、间距等参数的实测分布, 运用蒙特卡洛方法进行随机采样, 统计恢复岩体结构模式。为了确定采样点的面积密度, 导出了某组结构面中心点的面积密度 N 与其法线密度 λ 的关系

$$N = \lambda \mu \quad (1-22)$$

式中: μ 为该组结构面平均迹长的倒数。

Priest 和 Hudson (1983) 在岩体结构面网络模拟图的基础上, 运用“树形结构分层搜索”方法, 抽取出二维结构面连通网络图。由此, 可以对结构面网络进行水力传导性计算 (潘别桐, 1987)。

熊承仁、潘别桐 (1987) 应用式 (1-21) 和 (1-19) 对上述二维网络模拟图作出了不同方向上的 RQD 分布图, 由此可以直观找出 RQD 的最大值和最小值及其产状。这对于地下洞室等工程轴线方向选择具有重要的实用价值。

1985 年以来, 日本学者 Oda 则从另一个角度探索了岩体结构的表述方法。他从纯几何角度定义了岩体的结构张量 (Oda, 1983, 1984)

$$F = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^\infty \int_\Omega R^3 n n \cdots n E(n, R) d\Omega dR \quad (1-23)$$

这个结构张量包含了结构面的体积密度 ρ 、结构面产状 n 和半径 R 及其联合分布密度 $E(n, R)$ 。稍后 (1985), 他引入了张开度的参量, 重新定义了结构张量, 并用于岩体水力传导性研究。目前, 结构张量法已成为岩体力学理论研究中一种重要方法。

近年来, 随着分形理论向地质学领域的渗透, 学者们也尝试着用分形理论来拟合岩体结构的某些特征。

日本学者大野博之、小岛圭二 (1990) 从不同观测尺度 ($>1\text{cm}$, 3cm , 10cm , 2m , 15m , 8m) 得到破裂长度 a 和破裂宽度 w 的超越概率分别为分维分布

$$P(a) \propto a^{-D_a} \quad (1-24)$$

$$P(w) \propto w^{-D_w} \quad (1-25)$$

皇甫岗等 (1991) 对我国滇西北地区断层及水系分布进行了考察, 认为各方向断裂系都

具有自相似性,而断层系的发育演化是一个降维过程,即由具有复杂几何结构的次级断裂组向单一连续型大断裂过渡。分维数越高,则断层系发育程度越低。

Pointe (1988) 分别对节理网络模拟结果和实际岩体结构进行了分维测量,研究了岩体结构和连通性的分维特征。

四、岩石断裂力学研究

从力学机制角度讲,岩体中结构面的形成、连通与岩体强度的丧失,都是一种断裂力学行为。因此,近一二十年来,断裂力学理论及实验方法在岩石力学领域内得到广泛应用。

70年代末80年代初,研究者们就开始把断裂力学引入岩石力学领域。这一时期大量工作是引用二维金属材料断裂力学的若干概念和结论来分析和说明含裂纹岩石的强度行为,并对混凝土和岩石预制裂纹试件进行了大量的实验研究,以了解这类材料的断裂性态曲线和Ⅰ型断裂韧度指标 K_{Ic} (黄建安、王思敬等, 1985; 夏熙伦等, 1985), 一部分学者应用断裂力学能量方法和应力腐蚀等概念来讨论地震震源机制模型,并用于地震三要素预测 (陈颙, 1983)。周群力还提出了复杂应力状态下岩体的断裂判据

$$\begin{aligned}\lambda_{12}\Sigma K_1 + |\Sigma K_1| &= K_{Ic} \\ \lambda_{13}\Sigma K_1 + |\Sigma K_1| &= K_{Ic}\end{aligned}\quad (1-26)$$

稍后,学者们开始着手地质结构面成因的断裂力学机制研究,对节理面的几何形态、节理系的形成、节理扩展的动力学以及节理扩展轨迹等方面的研究都已逐步展开 (Pollard, 1988; 唐辉明, 1991)。这些研究有可能将岩石断裂力学从理论和实验室研究引向对地质体的原型研究。

五、岩石断裂统计理论研究

作为脆性材料断裂的统计理论与方法是 Weibull (1939) 在研究玻璃、陶瓷等材料受拉条件下强度性能时提出的。他认为,在拉应力 σ 作用下,体积为 V , 含微裂纹的试件破坏概率为

$$P_f(\sigma, V, A) = 1 - \exp\left\{-k \int_V \int_A \sigma^m dV dA\right\} \quad (1-27)$$

式中: A 为微裂纹法矢产状角度域; k 、 m 为常数。

这一理论对于通常受压的岩石材料是不合适的。Jayatilake 和 Trustrum (1947) 提出了受压状态下脆性破坏的统计模型。王宏、陶振宇 (1988、1989) 应用 Markov 假设导出了裂纹密度函数形式,进而得到了破坏概率表达式,并讨论了裂纹尺寸分布对岩石强度的影响。

脆性断裂统计理论的根本意义在于它的思想方法方面的独到之处,即 Weibull (1939) 所提出的最薄弱环节思想。

六、岩体本构模型与强度理论研究

岩体的本构模型与强度理论是岩体力学的核心课题。70年代以前,岩体的变形与强度分析实际上是借用连续介质力学的理论模型完成的,人们常常是把岩体当作岩块或经过经验弱化后的岩块来处理的。70年代后期至80年代,重视了地质结构面的力学效应,发展了诸如赤平投影 (孙玉科、古迅, 1980)、块体理论 (石根华, 1985) 等多种方法。但这一时期所做的工作主要是探讨了结构面控制下岩体的强度问题,而且把岩石块体当作刚体来分析。对于岩体本构理论,主要是运用相似元件组合方法提出了一些理论模型,并以大型原位试验和模型

实验数据求取参数并验证模型 (孙广忠, 1983、1988)。

80 年代以来, 岩体本构关系与强度理论的研究有了较大的发展, 研究大致分为四种途径:

一部分学者将岩体中结构面视作无限大平面, 将结构面的力学效应叠加在连续岩块之上而导出本构关系。Gerrard (1982) 导出含三组正交节理岩体的应力-应变关系, 并对这种理想情形下岩体的弹性参数作了讨论。Yoshinaka 等 (1983, 1986) 对含贯通裂隙岩体的弹性模量与剪切模量作出了各向异性曲线。Fossum (1985) 研究了裂隙方位随机分布的情形, 并讨论了变形参数随节理间距的弱化问题。Wei 和 Hudson (1986) 则计入了裂隙刚度的力学效应。伍法权 (1988) 讨论了含方向任意分布的多组节理岩体的弹性参数随节理间距、节理刚度等参数的弱化关系。

另一部分学者则以 Oda 岩体结构张量为基础导出岩体本构关系。Oda (1983, 1984, 1985, 1988) 认为对于张应力条件有

$$\begin{aligned}\epsilon_{ij} &= C_{oijkl} \sigma_{kl} + C_{cijkl} \sigma_{kl} \\ C_{cijkl} &= \frac{1}{4D} (\delta_{il} F_{jk} + \delta_{jl} F_{ik} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{ik} F_{jl}) \\ D &= \frac{3\pi}{8} E\end{aligned}\quad (1-28)$$

对于受压条件下本构方程形式与上同, 但

$$C_{cijkl} = \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g}\right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{il} F_{jk} + \delta_{jl} F_{ik}) \quad (1-29)$$

上列式中 C_o 与 C_c 分别表示岩块部分和结构面系统引起的弹性柔度张量; $\bar{h}$ 与 $\bar{g}$ 为含节理刚度的参数。

Cowin (1985) 也给出了 Oda 结构张量与弹性张量的一个代数关系式。

第三种途径是“损伤力学”方法。

损伤力学是自原苏联塑性力学家 Kachanov (1958) 在研究金属蠕变断裂时提出“连续性因子”与“有效应力”的概念后逐步发展起来的一门连续介质力学。它把介质中存在的不连续面及其网络视为微观损伤, 并认为在受拉张开时, 微损伤不能传递应力, 这部分应力将在连续部分平均分配, 形成大于名义应力的有效应力, 从而导致大于名义应力作用下的应变, 这种较大的应变称为等效连续介质的“等效应变”。随着损伤的扩展, 材料的力学性质将不断弱化, 直至破坏。

Kawamoto (1985) 首先将二阶损伤张量引入岩石力学, 提出了应用于节理岩体的损伤力学模型。周维垣等 (1986) 运用这一理论发展了损伤断裂力学模型, 并用于坝基岩体渐进破坏可靠度分析。但岩体的损伤模型与实际情况尚有一些差距, 比如将宏观节理概化为微损伤是否合理, 压剪应力条件下有效应力如何表述等, 有待于进一步研究。

第四种途径即所谓“岩体统计断裂力学”或“统计岩体力学”方法。伍法权 (1990, 1992) 把岩体结构面网络统计理论、断裂力学能量原理、统计断裂力学思想和连续介质力学方法结合起来, 运用能量可加原理, 把岩块和结构面网络的力学响应叠加起来, 发展了节理岩体的本构理论、强度理论和破坏概率理论。后续章节我们将对此作出详细讨论。

对于岩体强度, 一种非常有生命力的研究方法是经验方法。Hoek (1980, 1990) 通过总结大量岩块、岩体的实验数据, 提出如下岩体强度的经验判据

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (1-30)$$

式中： m 、 s 为反映岩体性质的综合指标，可查分类表获得； σ_c 为岩块单轴抗压强度。由上式可导出岩体的单轴抗压强度、单轴抗拉强度和抗剪强度。由于这一判据与岩体分类联系起来，目前已获得广泛应用。但应注意，上式仍是一个各向同性判据。

孙广忠（1983，1988）以岩体原位试验为基础，给出了如下反映岩体结构效应的强度判据

$$\sigma = \sigma_m + AN^{-\alpha} \quad (1-31)$$

式中： A 、 α 为常数； N 为试件中所含结构体数。

七、岩体水力学理论研究

岩体水力学性质是岩体力学性质的一个基本方面。许多工程岩体失稳破坏实际上是由于岩体的渗流及渗流压力引起的。

岩体水力学研究始于原苏联学者 Володько（1941）和 Ломизе（1951），但更多的研究是在60年代以后。

单裂纹水力学是岩体水力学分析的基础，众多的学者对此作出了理论分析和实验研究，并得出了单裂纹水力传导系数表达式和水流立方定理（Помизе，1951），即

$$K = \frac{ge^2}{12\nu} \quad (1-31)$$

$$q = \frac{ge^2}{12\nu} J \quad (1-32)$$

Witherspoon（1981）在详细研究了裂隙粗造度对水流影响后提出了等效隙宽概念，并给出下式

$$\bar{e}^3 = \int_0^{e_0} e^3 n(e) de / \int_0^{e_0} n(e) de \quad (1-33)$$

式中： e 、 e_0 和 $\bar{e}$ 分别为隙宽、最大隙宽和等效隙宽； $n(e)$ 为隙宽频率分布函数。

水流实际上是在裂隙网络中运移的。对裂隙网络水力学目前有两种考虑方法。

一是把裂隙系统假定为由几组产状与间距固定、无限延伸的结构面构成的网络，按叠加方法，可得裂隙网络岩体渗透张量为

$$K_{ij} = \frac{g}{12\nu} \sum \lambda e^3 (\delta_{ij} - n_i n_j) \quad (1-34)$$

式中： λ 和 n 分别为裂隙线密度与法矢方向余弦。

另一种方法是考虑由有限延伸裂隙构成的连通网络。Witherspoon（1981）和 Long（1982）利用计算机生成裂隙网络，求出不同方向上的导水系数，再换成 K_{ij} 。Oda（1985，1986）用统计理论求取 K_{ij} ，并提出

$$K_{ij} = \lambda (P_M \delta_{ij} - P_{ij})$$

$$P_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^m \int_0^m \int_0^\pi r^3 \bar{e}^3 n_i n_j E(n, r, \bar{e}) d\Omega dr d\bar{e} \quad (1-35)$$

式中： λ 为比例参数。

将上述方法求得的 K_{ij} 代入达西公式及水流连续性方程，即可求解渗流场。

岩体中的裂隙渗流与应力之间的耦合作用对工程具有重要意义。不少学者对这一耦合作用作过研究。Louis（1974）在试验基础上提出了裂隙岩体渗透系数与环境压力之间的关系式为