

非线性工程地质学导引

AN INTRODUCTION TO NONLINEAR
ENGINEERING GEOLOGY

秦四清 张倬元 王士天 黄润秋 著

非线性工程地质学导引

秦四清 张倬元 等 著

西南

版社

5
63

西南交通大学出版社

目 录

导 言	(1)
第一章 节理岩体的非确定性结构与强度特征	(5)
第一节 非确定性是岩体结构几何及力学特征的本质属性	(5)
第二节 工程地质条件及岩体结构特征研究的一般方法	(5)
第三节 节理岩体的分维特征及其工程地质意义	(11)
第四节 非确定性岩石力学参数取值方法	(30)
第五节 岩体质量分级的非确定性动态方法	(34)
第二章 高边坡应力场特征的系统分析原理	(38)
第一节 研究区现今区域构造应力场特征	(38)
第二节 岩饼特征描述及地应力的估测	(39)
第三节 室内地应力测试原理与方法	(43)
第四节 高边坡应力场特征的数值模拟研究	(51)
第三章 岩体突变失稳理论	(57)
第一节 强度判据与刚度判据	(57)
第二节 顺层斜坡失稳的尖点突变模型	(58)
第三节 层状岩体失稳的尖点突变模型	(65)
第四节 斜坡平面滑动失稳的尖点突变模型	(67)
第五节 水库地震的突变理论分析	(70)
第六节 狭窄煤柱冲击地压失稳的尖点突变模型	(77)
第七节 岩体统一失稳理论探讨	(81)
第四章 滑坡灾害非线性动力学预报理论	(83)
第一节 滑坡预报的新思维	(83)
第二节 滑坡孕育的自组织过程	(87)
第三节 滑坡前兆突变异常识别方法	(90)
第四节 灰色一模糊尖点突变预测模型	(95)
第五节 滑坡孕育过程的混沌特征与可预报时间尺度	(101)
第六节 滑坡孕育过程的非线性动力学模型	(106)
第七节 时间序列预报理论	(115)
第八节 改进的 SAITO 预测方法	(116)
第九节 滑坡灾害时间预报系统 LTFS	(117)
第十节 基于非线性科学的防灾对策	(118)
附 录	(119)
A 新三论简介	(119)
B 滑坡灾害预报系统 LTFS 源程序	(123)
C 非线性科学名词汉英对照	(151)
参考文献	(155)

CONTENTS

Introduction	(1)
Chapter 1 Indeterminate Structure and Strength Characteristics of Jointed Rockmasses	(5)
1.1 The essence of geometric and mechanical characteristics of jointed rockmasses ——— indetermination	(5)
1.2 The general approach of research on engineering geological conditions and rockmass structure characteristics	(5)
1.3 Fractal dimension characteristics of jointed rockmasses and their engineering geological significances	(11)
1.4 The indeterminate method for selecting rock mechanics parameters	(30)
1.5 The indeterminately dynamic approach to classification of rockmass quality	(34)
Chapter 2 Systematic Principles of Analysis on Stress Field Characteristics of High Slopes	(38)
2.1 Modern tectonic stress field characteristics of research region	(38)
2.2 A description of core disk characteristics and evaluation of geostresses	(39)
2.3 Principles and methods to measure geostresses in the laboratory	(43)
2.4 A numerical simulation study on stress field characteristics of high slopes	(51)
Chapter 3 The Theory of Losing Stability for Rockmass Catastrophe	(57)
3.1 Strength criteria and stiffness criteria	(57)
3.2 A cusp catastrophe model of losing stability of consequent slopes	(58)
3.3 A cusp catastrophe model of losing stability of layer rockmasses	(65)
3.4 A cusp catastrophe model of losing stability of plane sliding slopes	(67)
3.5 Analysis on reservoir – induced earthquake by the catastrophe theory	(70)
3.6 A cusp catastrophe model of losing stability of narrow coal pillar outbursts	(77)
3.7 A discussion on the united theory of losing stability of rockmasses	(81)
Chapter 4 The Nonlinear Dynamics Forecasting Theory of landslide Disasters	(83)
4.1 New thoughts about landslide prediction	(83)
4.2 Self – organization processes of landslide evolution	(87)
4.3 Identification approaches to abrupt abnormalities of landslide forerunners	(90)
4.4 A grey – fuzzy cusp catastrophe forecasting model	(95)
4.5 Chaotic characteristics of evolution process of landslides and predictable time scale	(101)
4.6 A nonlinear dynamics model of evolution processes of landslides	(106)
4.7 The forecasting theory by time series analysis	(115)
4.8 A improved SAITO forecasting method	(116)
4.9 The time forecasting system LTFS for landslide disasters	(117)
4.10 Measurements to prevent disasters based on the nonlinear science	(118)
Appendices	(119)
A An Introduction to the new – three theory	(119)
B Forecasting system LTFS programme for landslide disaster	(123)
C A contrast of nonlinear science terms between Chinese and English	(151)
References	(155)

导 言

历经几十年发展,工程地质学已成为一门在人类工程活动中起举足轻重作用的独立学科。工程建设的需要、计算机技术的引进、测试手段及方法的更新、数力理论的广泛应用,使工程地质学已取得长足进展。一些高坝大库的成功修建、新滩滑坡的及时预报、岩体结构工程地质力学理论的创立、岩体变形破坏地质模式的分类等,都是工程地质学已取得重大进展的标志。

但也应清醒认识到,工程地质学仍是一门年轻学科,人类对地质体的认识还很肤浅,解决实际问题很大程度上是靠各种经验,还没有真正适合岩、土体特点的工程地质理论体系。如在岩体稳定性评价上,虽经详细工程地质勘查、大量试验测试、数值模拟及物理模拟分析,但最终形成的结论却很脆弱,经常见到“可能……”、“不能排除……”等字眼。理论分析未能起到指导作用,导致了不惜巨额经费治理以求保证稳定性的盲目现象。要根本解决这些问题,需要发展新理论、新方法,需要工程地质博采众家之长,不断发展自己。只有这样,工程地质学才能真正成为一门既有用又好用的学科。

阻碍工程地质发展的主要问题,是岩、土体系统高度的非线性。正是由于非线性的存在,才使人们对岩、土体变形破坏机理认识模糊,引进的数力理论有时失效,工程地质量化问题难以实现。求解非线性问题一般极为困难,非线性问题个性极强,必须是具体问题具体分析。但非线性问题具有普适性,如地震、滑坡、岩爆等,虽然失稳的表现形式各异,但都是在外界影响下,介质物理力学性质改变引起的,其失稳机制并无本质区别。显然研究这种普适性,具更大理论指导意义。

耗散结构论、协同学、突变理论、混沌理论、分形理论及重正化群理论等非线性科学的发展,给研究地学中的非线性问题提供了理论和方法。这些理论是研究非线性性质、非平衡体系的科学,决定了它们在地学中的应用的普适性和广阔前景。地质体中平衡和封闭是相对的,非平衡和开放才是绝对的,在自发地质过程的非平衡演变中,可能形成非平衡耗散结构,如地震、滑坡等的孕育过程,均是耗散结构的形成过程。

牛顿的物理学是机械论,它所描述的世界是没有变化的,牛顿力学方程对时间反演 $t \rightarrow -t$ 是不变的,它仅适用于封闭系统,而对具开放性、不断和外界交换物质和能量的岩体系统并不适用,某些基于牛顿力学的工程地质分析理论,不能不说有着巨大局限性。

非线性科学在地学中的应用,是以方法论的变更开始的。它对整个自然科学和哲学都有重大影响。对确定性和随机性、有序和无序、简单性和复杂性、量变与质变、整体与局部、偶然性和必然性等范畴和概念的重新认识,正形成着一种新的自然观,这些都将深刻地影响人类的思维方法,并涉及现代科学逻辑体系的根本性问题。

(1) 只有非线性存在,量变才能引起质变: 如果岩、土体系统中各要素相互作用仅仅是线性的,那么无论它们怎样组合,只有量的增减,而不可能有质的变化,也即滑坡不会失稳,地震不能发生。

(2) 内因和外因在一定条件下可以转化: 如应力集中使斜坡滑动面锁固段产生了大量裂缝,其强度降低,上部岩体沿滑面开始蠕滑。此时如有外因(如降雨作用),这些裂缝会按一定有利方向有选择性地逐步贯通,使斜坡更加不稳定导致最后滑坡。以上所说的外因一旦作用到不稳定系统中,使系统内部起了反应,进一步的作用就不再是外因了,而成

了内因。

(3) 整体不等于各部分之和：整体功能可能大于、也可能小于各部分之和。岩体系统内各部分之间的关系往往是非线性的，并不单纯存在数学中的代数可加性。线性方程只对应唯一解，而非线性方程却有多不同解，如用非线性微分方程描述斜坡演化过程，可能出现多个不同的方向和结果，有时稳定、有时渐近稳定、有时临界稳定、有时不稳定，即使向不稳定态演进，局部有时还呈现相对稳定态。

非线性科学已有二十年左右的历史，但引入到工程地质学，还只是近几年的事情。与传统工程地质思想未能交融，可能是非线性科学长期未被引入的原因。

笔者沿另一种途径作了探索，希望利用工程地质学已有传统理论，在此基础上引入非线性科学理论，在传统工程地质学和现代非线性科学之间架起一座桥梁。工程地质学的传统思想与非线性科学是十分接近的，如都强调历史性、整体性、不可逆性及协同性等。研究复杂的工程地质问题，非线性科学是迄今为止最好的指导思想，建立非线性工程地质学，将促进工程地质发展，对新近兴起的非线性科学也是大有裨益的。但要获得工程地质学家的认同，在理论和实践上都要寻求合适的途径。如笔者用分形理论研究节理岩体，是从岩体结构调查统计出发，建立分维与岩体结构特征参数的关系，探讨分维的物理意义和工程地质意义，为其应用指出可能的方向。这就易于被大家认可和接受。

非线性科学在工程地质中的应用，才刚刚起步，有许多问题需要解决。用分形理论研究岩石破裂机理，已有不少学者作过探讨。但据文献检索发现，用分形理论研究节理岩体系统，用突变理论、重正化群理论、混沌理论等，研究岩体稳定性和滑坡预报，尚未有深入、系统研究的报道，主要原因是未找到和工程地质问题结合的生长点。但近年来，笔者在此领域作了许多开拓性工作，如用分形理论研究节理岩体特征，发现分维可用于评价岩体强度和岩体质量；用突变理论研究岩体稳定性，提出刚度效应失稳新理论；用突变理论、重正化群理论、混沌理论等建立滑坡预报系统，已取得初步成功。通过这些已能看出，非线性科学将为工程地质学开辟一个广阔新天地，带来勃勃生机。是否可以说这将是工程地质学一个充满活力的发展新方向？我想答案应该是肯定的。

工程地质学早就应该不囿于传统的圈子。非线性科学的引入，不仅能使传统工程地质学得以升华，结出更丰硕成果，而且在很大程度上代表了工程地质学的未来。

用非线性科学研究工程地质问题，应遵循以下原理：

(1) 确定岩体系统性质与结构性质：这是非线性科学理论应用的前提。通过详细的地层岩性、地球物理、地球化学、区域构造演化史及岩体结构特征调查，确定所研究的系统，是孤立系统、封闭系统还是开放系统；系统结构是平衡结构、近平衡结构还是耗散结构。一般说来，对有明显变形破坏迹象和即将失稳的岩体，可认为是耗散结构（或认为正在形成耗散结构）；绝对平衡结构是不存在的；长期稳定且无变形的岩体，可认为是近平衡结构，但工程地质学对这种稳定结构不感兴趣，也无必要研究。

(2) 对岩体系统的结构、功能、涨落作用作详细描述：若为耗散结构，则应从微观、宏观两方面研究岩体时空结构。不同结构具有不同功能，结构是功能的基础，结构决定功能，功能体现结构并对结构有反作用。如某种特定岩体结构，是在构造动力、风化剥蚀、水、温度等长期作用下形成的；而岩体再变形、再破坏所表现出的功能又受岩体结构控制，在向失稳态演化过程中，必然要产生新的结构适应新的功能需要；岩体结构不同，其力学性能及可能失稳方式也将不同；最终失稳破坏了原来结构，形成了新的结构，这体现了功能

对结构的反作用。

开放岩体系统从不稳定走向稳定的有序化自组织过程往往不是渐变产生的,而是通过突变形成的,当系统远离平衡在非稳定态附近,涨落起关键作用,涨落不是被衰减反而会放大,从而导致系统从不稳定态走向一个新的状态,产生新的结构。传统工程地质学往往忽视了对涨落作用的研究,这不能不使人遗憾。

功能 $\leftrightarrow$ 结构 $\leftrightarrow$ 涨落之间的相互作用,是深入研究岩体变形破坏机制的基础。

上述方法实质上是强调从历史角度,考查岩体系统演化的内涵和外延。

(3) 建立系统的非线性动力学模型,对岩体时空结构作动力学分析: 建模前,应对有序时空结构的微观和宏观机制仔细分析,找出起关键作用的机制,筛选出控制变量。按照先易后难的原则,根据耗散结构论的“局域平衡假设”或协同学的“绝热消去法”,得到系统控制变量的动力学模型,由动力学稳定性分析理论(突变理论、分支理论、Lyapounov 稳定性判别法等)对系统的演化规律和趋势作出判断;用涨落理论研究岩体时空结构产生的原因及动力学机制,进而预测产生的各种结果及所需条件。

(4) 动力学模型的验证: 包括野外验证、数值模拟和实验验证。对地质作用中的各种现象和耗散结构的成因机制作出解释和预测,找出某种普适性规律,对地质灾害防治提出合理建议。

研究工程地质中非线性问题的技术路线框图如下图所示。

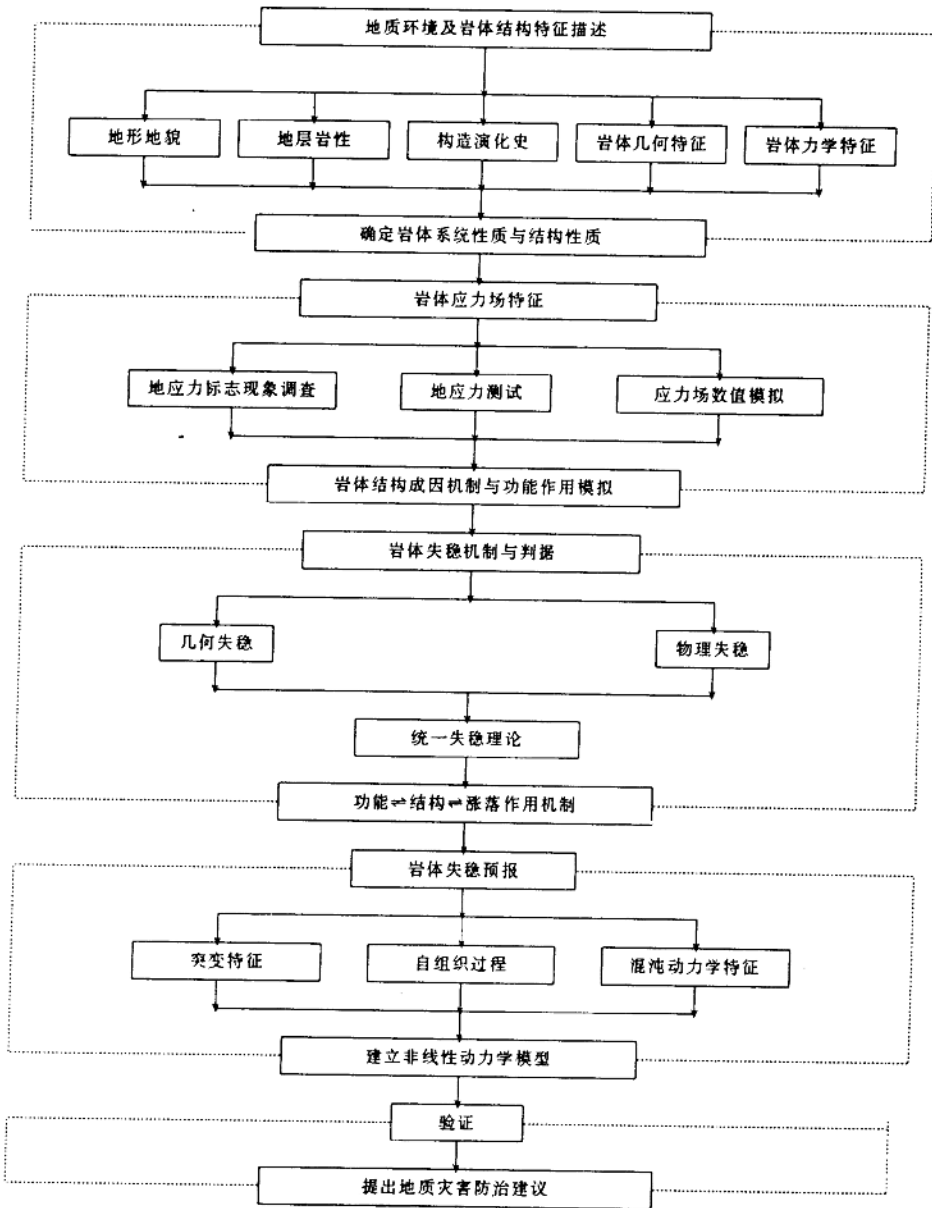
近年来,非线性科学已广泛应用于众多领域,并取得了巨大成功,有关的论著也逐渐增多。但迄今还未见到一本适合工程地质学科特点、且易于被大家理解和接受的参考书面世,这在一定程度上阻碍了非线性科学在工程地质界的广为传播和应用。出版本书的目的,就是为了使对这门新学科有浓厚兴趣的同志,在短时间内迅速领会它的基本思想、理论框架及其在工程地质中的应用方法,以便更好地运用它为工程建设服务。

本书是笔者在成都理工学院工程地质研究所,作博士后研究期间,吸取非线性科学的理论和方法,并在张倬元、王士天、黄润秋教授热情支持下,结合实际工程著述的。本书阐明了如何用非线性科学解决典型工程地质问题的思路和方法,叙述深入浅出。本书对非线性科学的名词与概念,未作详细介绍,并尽可能避免一些抽象的数学定义和推理,这可能会影响论述的严密性,但愿能适应更多读者的需要;学习本书可能会遇到一些数学、力学方面的困难,但完全可领会其主要精神;在阅读中如需详细了解非线性科学背景、概念和原理,可参阅书末的附录 A 及列出的有关参考文献。

作者深知自己水平有限,实不堪承担为这样一门博大精深新兴学科著述入门书的任务。但鉴于国内目前还缺少这样一本书,不少同志的迫切需要,老一辈工程地质学家的热情鼓励,才决定将这些不成熟的成果奉献出来。如果本书的出版,能帮助您解决实际工程地质问题时获得某种启示,作者便深感欣慰了。

本书观点新颖,但谬误之处也在所难免,衷心希望读者批评指正。

作者工作期间,曾得到成都理工学院刘家铎教授、章兰萍老师、刘蜀俊老师、孔德坊教授、王兰生教授、聂德新教授、刘汉超教授、涂元刚工程师、苏道刚工程师、严明讲师、邓荣贵博士、傅晓敏工程师、许强硕士、邓浩硕士及西南交通大学刚性试验机组全体同志的热情支持和帮助,李太熙副编审、李志侃助工分别编辑了本书和绘制了书中插图,在此一并致以衷心感谢。



研究思路与技术路线框图

第一章 节理岩体的非确定性结构与强度特征

第一节 非确定性是岩体结构几何及力学特征的本质属性

岩体中的节理、断层等破裂结构面是岩体介质不连续的根本原因。结构面的存在,不仅破坏了岩体完整性,而且直接影响岩体力学性质和破坏方式。工程地质研究者早已认识到岩体结构面和岩体结构对岩体力学性质的控制作用,并致力于探求定量刻画岩体结构数学模型的研究。但由于结构面空间形态的非规则性、非连续性及所构成结构面网络的复杂性,使之建立确定性数学模型比较困难;再者,描述结构面几何特征的一般参数,如方位、间距、连通率等,不能准确反映结构面网络发育和交切特征,局限性较大;此外,由于岩体出露条件的限制,也难以对岩体结构的几何参数进行系统和确定性的量测。所以长期以来没有解决岩体结构的定量描述问题。

由于结构面网络高度的非均匀性,从严格意义上说,岩体中每一点的结构都是不同的。由此表征的岩体结构几何及力学特征都是不同的,也就是不确定的。岩体的各向异性及同一地点、同一岩性岩石力学参数测量值的数据离散性等,都是这种不确定性的反映。

岩体结构的不确定性使工程岩组分类难以确切,即工程岩组是一个模糊集合。这种工程岩组划分的模糊性,使所取岩样的岩石力学参数试验值具有模糊非确定性;在工程岩体分级中,也无法找到精确的分级标准,所划定的界限值是人为规定的,是个灰数,即岩体分级具有灰色非确定性。

针对节理岩体几何和力学性质的非确定性问题,本章应用分形理论、模糊理论及灰色理论等非确定性理论,在查明雅砻江锦屏水电站解放沟坝段工程地质条件和岩体结构一般特征的基础上,对节理网络分布特征、岩石力学参数合理取值及岩体质量非确定性分级等问题,进行了深入研究,为解决岩体结构定量描述问题开拓了一条新路。将之用于澜沧江小湾电站边坡岩体研究,亦取得了满意的结果。

第二节 工程地质条件及岩体结构特征研究的一般方法

以锦屏水电站解放沟坝段为例,说明一般研究方法。

拟建的锦屏水电站是雅砻江上继二滩电站之后的第二个梯级电站,位于冕宁县境内,雅砻江“大拐弯”部位,目前处于可行性研究选坝阶段。

一、工程地质条件

1. 地形地貌

解放沟坝址位于解放沟与普斯罗沟之间 1.5km 长的河段上。河道顺直,河谷呈“V”型,流向 N25—35°E。两岸基岩裸露,左岸坡度 40—50°,右岸坡度 35—45°(图 1—1),具典型的高山峡谷地貌景观。

2. 地层岩性

研究区基岩主要由二叠系下统大理岩及砂板岩组成,左岸岩层倾向坡内,右岸岩层倾

向坡外。

大理岩,分布于右岸、河床及左岸谷坡下部,总厚大于 560m,按岩性特征自下而上可细分为八层。

$P_1^{2-2(1)}$: 灰白色厚层块状大理岩,厚度大于 100m,本层地表未出露。

$P_1^{2-2(2)}$: 深灰色薄—中厚层状大理岩夹条带角砾状大理岩。偶见灰白色粗晶大理岩透镜体,厚 100—120m,本层地表未出露。

$P_1^{2-2(3)}$: 灰白色粗晶大理岩,夹肉红色大理岩及角砾状大理岩,厚 65—100m,本层地表未出露。

$P_1^{2-2(4)}$: 杂色中厚层角砾状大理岩,含绿片岩透镜体夹层,厚 40—50m。

$P_1^{2-2(5)}$: 浅灰或灰白色厚层块状大理岩,厚 20—40m。

$P_1^{2-2(6)}$: 灰色或深灰色中厚层条带状、角砾状大理岩,厚 20—30m。

$P_1^{2-2(7)}$: 浅灰、灰白色厚层状大理岩,上部渐变为中厚层条纹状大理岩,夹少量绿片岩条带或透镜体,厚 70—100m。

$P_1^{2-2(8)}$: 灰白色中厚—厚层状大理岩、条纹状大理岩,底部有大量绿片岩透镜体,厚 20—50m。

砂板岩分布于左岸高程 1710—2000m 之间,为板岩及细砂岩的互层,根据砂岩、板岩何者为主,自下而上细分为六层。

$P_1^{2-3(1)}$: 深灰、灰黑色粉砂质板岩,夹深灰色中厚层状变质细砂岩,厚 20—45m。

$P_1^{2-3(2)}$: 灰色中厚、厚层状变质细砂岩夹少量深灰、灰黄色板岩,厚 30—60m。

$P_1^{2-3(3)}$: 深灰、灰黑色粉砂质板岩夹少量变质粉细砂岩,厚 20—40m。

$P_1^{2-3(4)}$: 灰色厚层状变质细砂岩夹深灰、灰黑色少量粉砂岩,厚 40—60m。

$P_1^{2-3(5)}$: 深灰、灰黑色泥质板岩及粉砂质板岩,夹灰色薄层状变质细砂岩,厚 30—50m。

$P_1^{2-3(6)}$: 灰色中厚层变质细砂岩夹粉砂质、泥质板岩,厚 30—50m。

3. 地质构造及其演化

综合分析研究区地质构造资料,认为该区存在四期构造作用。

第一期: 印支晚期。主压应力方向为 $N60^\circ-70^\circ W$,主要地质构造是一套轴面走向为 $N20^\circ-30^\circ E$ 的紧密向斜、背斜,是该区主体构造形迹。褶皱轴面为典型的压性结构面,它控制了区内地层和构造的总体轮廓,是区内最早的构造体系(图 1—2a)。

第二期: 燕山早期。 σ_1 方向为 $N40^\circ-60^\circ E$,主要形成有:NE 向张裂面;NW 向宽缓横跨背斜,轴面产状 $N48^\circ W/NE \angle 80^\circ$;NNE 向剪裂面(图 1—2b)。

第三期: 燕山晚期—喜山早期。 σ_1 方向为 NNE 向,主要地质构造有:NNE 向正断层;NE 向扭性断层;NNW 向剪切破裂面;NNW 向褶皱,轴面产状 $N72^\circ W/NE \angle 42^\circ$ (图 1—2c)。

第四期: 喜山期。 σ_1 方向为 NW 向,主要形成:NE 向压扭性构造;NW 向扭性构造;NNW 向剪切裂隙(图 1—2d)。NNW 向剪切裂隙几乎错断了所有其它方向裂隙,是坝区

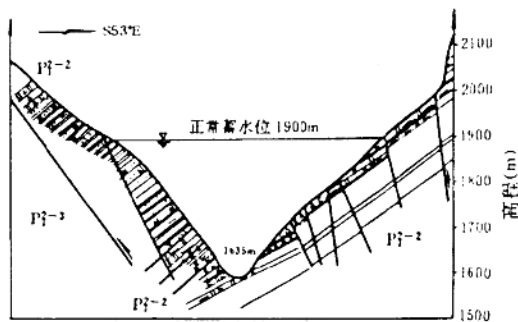


图 1—1 坝区典型地质地貌剖面

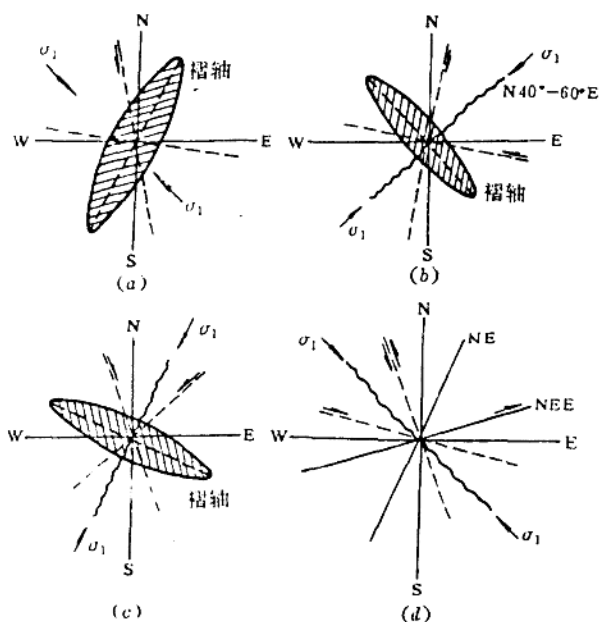


图 1—2 四期构造应力场示意图

最新构造。

第四期应力场为现今构造应力场,其主压应力方向为 NW 向。

4. 新构造运动特征

研究区内广泛发育有三级夷平面,断续出现多级侵蚀基座阶地。根据夷平面和阶地形成时代和高程,可确定研究区各时期地壳抬升速率(表 1—1)。由表看出,锦屏地区及邻区地壳运动一直在上升中,且有加速趋势。

表 1—1 新构造运动上升幅度和速率

夷平面或阶地级序	高 程(m)	高 差(m)	形成时代	上升幅度(m)	抬升速度(mm/a)
I	4000		老第三纪		
II	3000	1000	中新世	1000	0.06
III	2200	800	上新世	800	0.08
T ₆	280—390	520—410	早更新世末	520—410	0.25—0.31
T ₅	230—270	50—120	中更新世	150—210	0.25—0.35
T ₄	130—180	100—90			
T ₃	90—130	40—50			
T ₂	55—70	35—60	晚更新世	75—110	0.66—0.97
T ₁	15—20	40—50	全新世初	40—50	3.3—4.16

二、解放沟坝区岩体结构特征

根据结构面的几何特性和工程地质特性,将坝区结构面划分为三大类。I 类为坝区内不同规模的断层,其抗剪性能主要取决于断裂带构造岩的物质组成,结构面起伏形态的影

响次之；Ⅱ类为坝区不同规模的贯通性裂隙，其抗剪性能取决于结构面的起伏及充填情况；Ⅲ类为非贯通性裂隙，其抗剪性能受连通率控制。

1. I类结构面几何特征及物质组成调查

限于现场条件，仅对平硐中出露的I类结构面作统计分析。经野外调查，将坝区内对边坡稳定性有较大影响的断层汇总于表1—2。结合剖面图1—3可看出， F_1 — F_8 断层可作为切割面，甚至次级滑面，尤其 F_1 、 F_2 、 F_7 及 F_8 胶结程度差，更应加以重视。

表 1—2 关 键 断 层 特 征 汇 总 表

断层	产 状	与边坡关系	规 模	性 质	宽 度 (cm)	胶结情况
F_1	$N40^\circ-55^\circ E/SE\angle 56^\circ$	平行边坡	地表， JD_1 、 JD_2 出露，延伸长 $>500m$	逆 断	31	胶结差
F_2	$N45^\circ E/SE\angle 66^\circ$	平行边坡	JD_1 、 JD_2 出露，延伸长 $>280m$	逆 断	40	胶结差
F_3	$N50^\circ E/SE\angle 64^\circ$	倾向坡内，与边坡大角度相交	地表， JD_1 出露，延伸长 $>190m$	逆 断	35	胶结较好
F_4	$N25^\circ E/SE\angle 71^\circ-90^\circ$	倾向坡内，与边坡大角度相交	地表， JD_1 出露，延伸长 $>100m$	逆 断	60	胶结较好
F_5	$N80^\circ-84^\circ E/SE\angle 85^\circ-89^\circ$	倾向坡内，与边坡大角度相交	地表， JD_1 出露，延伸长 $>100m$	左行张扭 正 断	60	胶结较好
F_6	$N56^\circ E/SE\angle 70^\circ$	倾向坡内，与边坡大角度相交	地表， JD_1 出露，延伸长 $>180m$	逆 断	6	胶结较好
F_7	$N80^\circ E/NW\angle 80^\circ$	倾向坡内，与边坡大角度相交	地表， JD_2 出露，延伸长 $>180m$	逆 断	3	胶结较差
F_8	$N55^\circ E/SE\angle 73^\circ$	倾向坡内，与边坡大角度相交	地表， JD_2 出露，延伸长 $>130m$	左行平移	8	胶结较差
F_9	$N70^\circ E/SE\angle 30^\circ$	倾向坡外，与边坡小角度相交	JD_1 中出露 20 米	正 断	20	胶结差

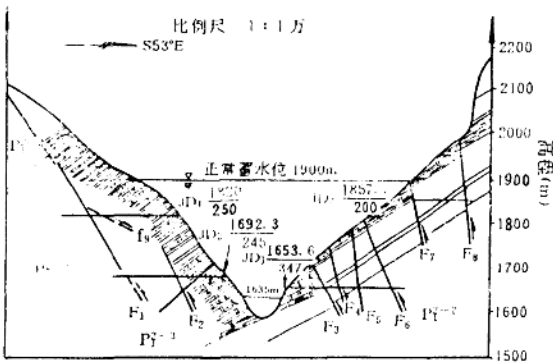


图 1—3 解放沟坝段 I—I 剖面

2. I类结构面的调查统计

坝区内较发育的I类结构面主要有两组。一组为NNE—NE/NW $\angle$ 30°—40°的层面裂隙。这组裂隙大都闭合,极少充填,裂隙面平直,可成为右岸潜在滑移面。此外,顺层方向还发育层间挤压带(表1—3),同样可成为右岸潜在滑移面。

表1—3 坝区层间挤压带特征调查统计表

坝号	编号	位置 (m)	产 状	地 层	宽度 (cm)	破碎带物质组成	胶结 程度
JD ₁	81	34	N21°E/NW $\angle$ 31°	P ₁ ²⁻²⁽⁶⁾	37	大理岩角砾、泥质、糜棱质	一般
	82	78	N19°E/NW $\angle$ 30°	P ₁ ²⁻²⁽⁴⁾	5	碎片状大理岩,绿片岩	一般
	83	241	N30°E/NW $\angle$ 32°	P ₁ ²⁻²⁽³⁾	4	角砾岩,糜棱质、泥质	较差
JD ₂	81	154	N22°E/NW $\angle$ 40°	P ₁ ²⁻³⁽²⁾	10	碎片状板岩	较好
	82	164	N4°E/NW $\angle$ 52°	P ₁ ²⁻³⁽³⁾	3	黑色片状岩	较好
JD ₃	81	37.2	N30°E/NW $\angle$ 37°	P ₁ ²⁻²⁽⁴⁾	25—30	片状岩及糜棱岩,局部软化	一般
	82	120	N15°E/NW $\angle$ 33°	P ₁ ²⁻²⁽⁴⁾	8—20	绿片岩及大理岩等片状岩,糜棱质	一般
JD ₄	81	47	N15°E/NW $\angle$ 43°	P ₁ ²⁻³⁽³⁾	8	片状岩夹泥	较好
	82	47	N15°E/NW $\angle$ 43°	P ₁ ²⁻³⁽³⁾	6	片状岩夹泥	较好
	83	56	N5°W/NE $\angle$ 45°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	10	黑色板岩夹少量泥质	较好
	84	69	N5°E/NW $\angle$ 33°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	10	千枚状板岩,充填石英脉	好
	85	114	E—W/N $\angle$ 56°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	2	可塑状灰色夹泥	差
	86	115	N78°E/NW $\angle$ 70°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	4	片状岩,可塑状灰泥,局部充填石英脉	较好
	87	114	N80°W/NE $\angle$ 60°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	4—8	片状岩、糜棱岩、泥化	差
	88	118	N30°E/NW $\angle$ 37°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	20	片状岩、糜棱岩、石英脉、夹泥	差
	89	145	N27°E/NW $\angle$ 60°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	18	片状岩,充填肠状石英脉	好
	810	151	N6°E/NW $\angle$ 35°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	5	片状岩,充填石英脉	好
	811	160	S—N/W $\angle$ 43°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	38	片状岩,少量夹泥	较好
	812	163	N35°E/NW $\angle$ 43°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	6	片状岩,局部为可塑状	较好
	813	170	N15°W/SW $\angle$ 40°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	10	充填石英脉,片状岩	极好
	814	173	N35°E/NW $\angle$ 50°	P ₁ ²⁻³⁽⁴⁾	18	千枚状板岩	好
JD ₅	81	28	N40°E/NW $\angle$ 35°	P ₁ ²⁻²⁽⁴⁾	8	压碎岩及方解石脉充填	较差
	82	35.5	N40°E/NW $\angle$ 27°	P ₁ ²⁻²⁽⁴⁾	5	角砾岩,泥质	差
	83	43	N27°E/NW $\angle$ 45°	P ₁ ²⁻²⁽⁴⁾	45—103	片状岩,角砾岩,绿片岩	一般
	84	137	N30°E/NW $\angle$ 25°	P ₁ ²⁻²⁽³⁾	9—28	压碎大理岩	好

另一组为NE/SE $\angle$ 65°—85°的陡倾角裂隙。裂隙面一般较粗糙或较平直,充填少量岩粉,胶结情况由洞内向洞外逐渐变差。该组结构面在左、右岸均起到分割面的作用。

3. II类结构面的调查统计

在解放沟坝区左右岸,用路线精测法共进行了37个点的节理网络统计。共计测网面积148m²,测量裂隙400余条。

在多数情况下,优势结构面对岩体稳定性起控制作用。根据节理极点等密图(图1—

4),可找出优势与次优势结构面组(表1-4),由结构面组出现的频率(表1-5),可确定坝区优势结构面组依次为NE组、NNE组、NEE组,次优势结构面组依次为NNW组、NW组、NW组。

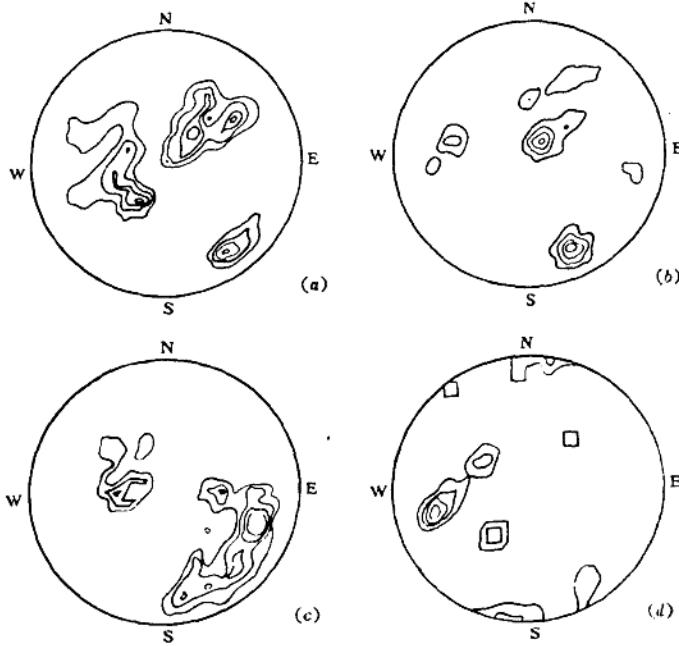


图1-4 平硐结构面极点密度等值线

(a)1号平硐;(b)2号平硐;(c)3号平硐;(d)4号平硐

表1-4 平硐优势结构面组

硐号	高程	优势方向	次优势方向
		结构面组 走向/倾向/倾角	结构面组 走向/倾向/倾角
JD ₁	1653.66	NE/SE/陡	NW/SW/中
		NNE/NWW/中	
		NNW/NE/中	
JD ₂	1682.82	NE/SE/中	NNW/SW/中
		NEE/SSE/中	
		NNE/NWW/中	
JD ₃	1850	NE/NW/中	NWW/SSW/陡
		NEE/NNW/缓	NNW/SWW/陡
JD ₄	1820	NE/SE/中	NE/NW/中
		NNE/SEE/中	NE/SE/缓

表1-5 各结构面组频率统计

优势方向	NE	NNE	NEE	NW	NWW	NNW	总和 Σ
条数	117	109	69	30	33	49	407
百分率	28.75	26.78	16.95	7.37	8.11	12.04	100%
优势次序	1	2	3	6	5	4	

表1-6列出了一些测点的结构面倾向象限角 θ 、倾角 α 、平均间距 d 、平均密度 ρ 、平均线连通率 K_l 和平均迹长 l 。表1-7列出了研究区各测点的算术平均值 $\bar{d}$ 、 $\bar{\rho}$ 、 $\bar{K}_l$ 和 $\bar{l}$ 。由 $\bar{\rho}$ 值可确定结构面的发育程度依次是:NE、NNE、NEE、NNW、NWW和NW,表1-8列出了分类后,结构面的几何特征、充填及胶结情况。

表 1—6 某些测点的岩体结构特征

测点号	硇深 (m)	结构 面组	θ (°)	α (°)	d (m)	ρ (条/m)	K_t (%)	l (m)
JD ₁₋₁	41	NE	S38.6E	53.5	0.303	3.31	58.09	
JD ₁₋₂	65	NE	N53.4W	31.7	0.220	4.55	84.29	
JD ₁₋₃	96	NE	S38.8E	43.7	0.275	3.64	89.23	6.12
JD ₁₋₄	147	NE	N45.0W	45.0	0.605	1.65	89.36	3.06
JD ₁₋₅	175	NE	S30.0E	67.8	0.222	4.50	82.65	3.15
JD ₂₋₁	32.5	NNE	S81.9E	60.0	0.680	1.47	38.07	2.71
JD ₂₋₂	58.5	NNE	S80.5E	51.0	0.267	3.75	79.71	2.07

表 1—7 坝区结构面参数统计

结构 面组	平均产状	裂隙平 均间距	裂隙平 均密度	裂隙平 均迹长	平均线 连通率
		$\bar{d}$	$\bar{\rho}$	$\bar{l}$	$\bar{K}_t$
		(m)	(条/m)	(m)	(%)
NNE	17°/NW, SE $\angle$ 45°	0.4154	2.407	3.070	75.54
NE	48°/NW, SE $\angle$ 52°	0.4068	2.458	3.464	71.98
NEE	71°/SE, NW $\angle$ 58°	0.4728	2.115	2.009	69.50
NWW	285°/NE, SW $\angle$ 68°	0.7246	1.380	0.9667	75.24
NNW	344°/NE, SE $\angle$ 45°	0.7028	1.425	1.0195	86.74
NW	310°/SW $\angle$ 32°	1.2500	0.800	0.5814	46.42

表 1—8 坝区结构面充填、胶结及粗糙情况统计

裂隙组	各张开度出现频率(%)			粗糙程度出现频率(%)				充填物出现频率(%)			
	闭 合	<1mm	>1mm	粗 糙	较粗糙	较平直	平 直	无充填	岩 粉	石 英	方解石
NE	42.7	47.9	9.4	23.7	36.8	3.5	36.0	7.08	71.68	15.93	5.31
NNE	63.3	29.4	7.3	13.8	33.9	0.9	51.4	8.2	61.5	21.1	9.2
NEE	39.1	43.5	17.4	22.8	48.7	5.7	22.8	13.0	63.8	11.6	11.6
NW	53.3	26.7	20.0	23.3	36.7	0	40.0	16.7	70.0	0	13.3
NWW	21.2	66.7	12.1	36.4	42.4	0	21.2	9.1	81.8	6.1	3.0
NNW	44.9	40.8	14.3	24.0	40.0	0	36.0	12.5	64.6	4.2	18.7

第三节 节理岩体的分维特征及其工程地质意义

一、概 述

法国数学家 Mandelbrot^[1]创立的分形几何学,是研究具有自相似性的形态或事件的一门新兴学科,在众多领域得到了广泛应用。所谓自相似性是指局部与整体在形态、功能和信息等方面具有统计意义上的相似性,适当放大或缩小分形对象的几何尺寸,整个结构并不改变。已有研究^[2]表明,从地壳中的大型断裂带到岩石标本中的微破裂,都具分形性质。徐光黎^[3]指出,结构面规模、隙宽及密度等具有自相似性。平田隆幸^[4]认为,节理的空间分布大多具自相似特征。利用这种自相似性,就可从小范围的节理网络统计出发,推求更大范围的节理网络发育情况及其对岩体力学性质的影响。有关分形理论在岩石力学、工程地质学及地震学方面的应用与进展,请参阅文献^[1-20]。

在研究中应注意的是:地质体中的分形不像数学上的分形那样纯粹和“干净”,只在一定尺度范围内,才表现出分形特征;地质体中的自相似现象具有随机性和模糊性,应采用概率统计的方法处理;当测得的维数严格大于其拓扑维数时,才是真正的分形维数。

用分形理论研究地质体中的非规则、非均匀等非确定性现象,是真正的“对症下药”,有望使岩体结构定量描述问题取得新进展。分形理论在工程地质研究中的应用才刚刚起

步,有许多问题需要解决。分维的物理意义和工程地质意义如何,有待于从本质上弄清楚。鉴于此,本节建立了分维与强度、最大主损伤值、 RQD 与 JRC 的定量关系,对分维的物理意义和工程地质意义作了较深入分析,为分形理论在岩体结构研究中的广泛应用奠定了基础。

二、节理极点及裂隙分支的分维特征

1. 节理极点的分维特征

根据野外测定的解放沟坝段左、右岸节理产状资料,分别作出节理极点图,如图 1—5 所示。

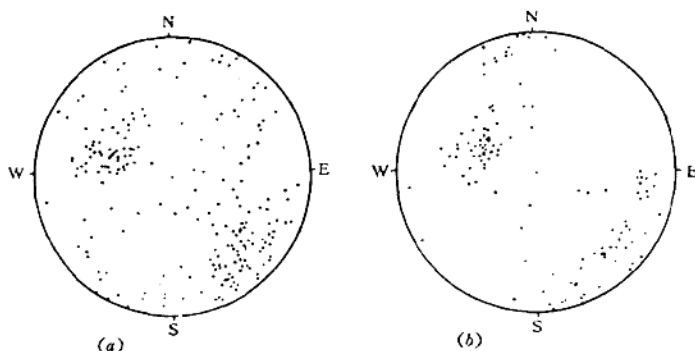


图 1—5 解放沟坝段左、右岸节理极点图
(a)左岸;(b)右岸

考虑以圆点为中心,以 r 为半径的圆,并记极点总数为 $M(r)$ 。如果 $M(r)-r$ 满足

$$M(r) \propto r^{D_f} \quad (1-1)$$

则 D_f 即为极点分布的自相似维数。在实际计算时,作出 $\ln M(r)-\ln r$ 关系曲线,直线的斜率即为 D_f (图 1—6)。左岸和右岸极点分维分别为 1.966 和 1.894,相关系数分别为 0.9967 和 0.9943。可见节理极点分布具自相似现象。

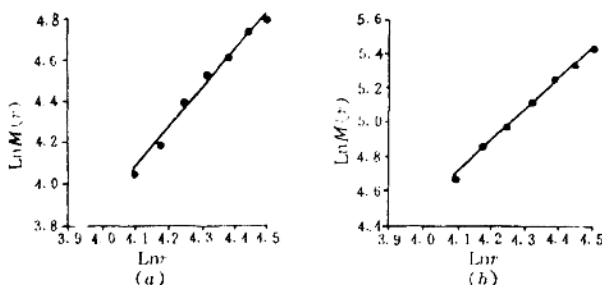


图 1—6 节理极点 $\ln M(r)-\ln r$ 关系
(a)左岸;(b)右岸

左岸节理极点分维大于右岸,说明左岸裂隙的发育情况比右岸复杂。这种复杂性不仅与裂隙的多少有关,更重要的是与在构造运动作用下,产生的不同期次、不同方向、不同规模裂隙的相互切割情况有关。因此 D_f 越大,岩体越破碎。

从野外调查看,左岸岩体更破碎些。如左岸 4 号洞 131—137m 处,岩体强烈松动,需

圆木支撑才能保持硐室稳定(图 1—7)。

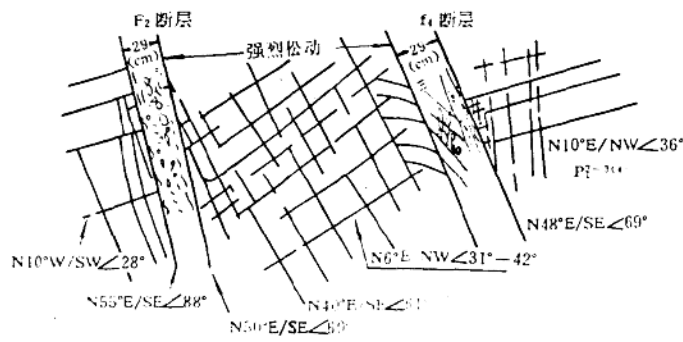


图 1—7 JD₄ 号洞 131—137m 松动带素描

有趣的是,我们测定的节理极点分维与月坑直径及岩石碎块大小分布的分维(约等于 2)^[21]十分接近,这从一个侧面揭示了宇宙的某些统一图景。

2. 裂隙分支的分维特征

野外调查发现了许多具有统计自相似性的裂隙分支现象(图 1—8)。谢和平^[22]建立了裂隙分支的分形模型(图 1—9),推得

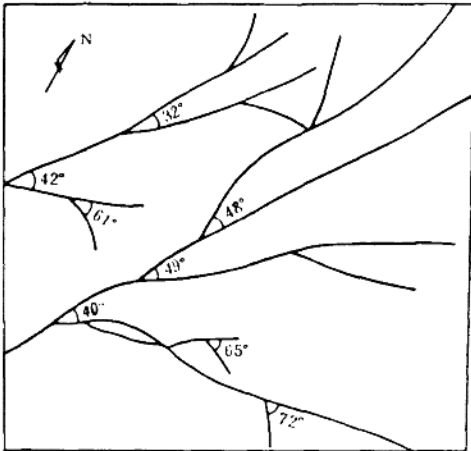


图 1—8 解放沟坝段裂隙实测图

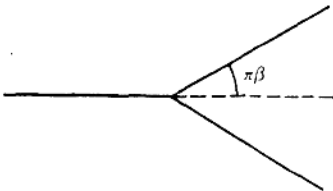


图 1—9 裂隙分支的分形模型^[22]

$$D_f = \frac{\lg 3}{\lg(2\cos \frac{\pi\beta}{2})} \quad (1-2)$$

D_f 越大,耗散能量越多,这种断裂现象越难发生。

据上式,计算了图 1—8 所示不同方向裂隙分支的分维数(表 1—9)。由表看出,NE 向分维值小于 NEE 向分维值,这说明 NE 向裂隙要比 NEE 向裂隙发育。此观点

表 1—9 裂隙分支分维值计算结果

	$2\pi\beta$	42°	32°	40°	49°	48°
NE 向	D_f	1.62	1.61	1.62	1.64	1.64
	平均值	1.63				
NEE 向	$2\pi\beta$	61°	65°	72°		
	D_f	1.67	1.68	1.71		
	平均值	1.69				

与本章第二节结论一致。

三、分维是表征岩体强度和脆性度大小的新参数

1. 岩体强度的分形模型

岩体中存在许多强度不同的缺陷,一般缺陷强度作概率性分布。利用缺陷分布的泊松假设和断裂事件的最弱环假设^[21],可导出体积为 V 的试样,在应力 σ 作用下的破坏概率为

$$P(\sigma) = 1 - \exp\left[-V \int_0^{\sigma} n(\sigma) d\sigma\right] \quad (1-3)$$

Weibull^[24]从一种纯启发性方式出发,提出 $n(\sigma)$ 具有如下关系式

$$\int_0^{\sigma} n(\sigma) d\sigma = \begin{cases} \left(\frac{\sigma - \sigma_*}{\sigma_0}\right)^m & \sigma > \sigma_* \\ 0 & \sigma \leq \sigma_* \end{cases} \quad (1-4)$$

式中, σ_* 为缺陷的最小强度值; σ_0 为与材料性质有关的常数; m 为反映缺陷强度分布集中程度的参数, m 越大,缺陷强度分布越集中,即材料的脆性度越大。

破坏时的平均应力可由下式给出

$$\bar{\sigma} = \int_0^1 (\sigma - \sigma_*) dP(\sigma) \quad (1-5)$$

把(1-4)式代入(1-3)式,再把(1-3)式代入(1-5)式,可得岩石平均强度为

$$\bar{\sigma} = \sigma_* + \sigma_0 V^{-\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (1-6)$$

式中, Γ 为伽玛函数。一般 σ_* 较小,可视为零,故上式可简化为

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 V^{-\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (1-7)$$

对同一种岩石材料, m 为定值,则(1-7)式可变为

$$\bar{\sigma} \propto V^{-\frac{1}{m}} \quad (1-8)$$

由于

$$V \propto r^3 \quad (1-9)$$

式中, r 为试样边长。将(1-9)式代入(1-8)式得到

$$\bar{\sigma} \propto r^{-\frac{3}{m}} \quad (1-10)$$

根据分维定义,可确定岩体强度分维表达式为

$$D_f = \frac{3}{m} \quad (1-11)$$

上式即岩体强度与其尺寸关系的分形模型。除此,岩体强度与岩体内的结构体数亦存在自相似性。因尺寸越大,结构体数越多,强度则越小。

2. 模型验证

对文献^[25]的试验资料(表1-10)进行分析,可看出岩体强度与其尺寸间有相当好的自相似性(图1-10)。粘土岩和板岩强度分维分别为0.595和0.286,相关系数分别为0.9928

表 1-10 强度与试样尺寸或结构体个数关系试验数据

粘土岩抗压强度 与边长关系	σ_f (MPa)	105.0	114.3	154.3	194.3	245.7	400.0
	r (cm)	100	70	40	30	20	10
板岩单轴抗压强度 与结构体数关系	σ_f (MPa)	2.57	2.68	2.74	3.43	4.29	7.43
	n (个)	52222	40000	30000	15555	14444	1111