

中国科学院地质研究所
工程地质力学开放实验室

块体结构力学

——工程地质力学的数值方法

刘钧 著



西南交通大学出版社

P642
L-434

中国科学院地质研究所
工程地质力学开放实验室

块体结构力学

——工程地质力学的数值方法

刘 钧 著

西南交通大学出版社

931401

内 容 简 介

本书在谷德振教授的岩体结构和岩体分类理论的基础上,结合弹性力学、塑性力学和损伤力学等提出来“块体结构力学”的基本原理和基本方程式。对于工程地质中各类岩体结构的数值计算方法都分别作了深入研究,并在一些地质工程计算分析中得到了应用和验证。同时本书结合块体结构单元的分析,对有限单元法、边界单元法和耦合计算方法进行了介绍,且在书末附有 BMA 通用程序。本书在工程地质和力学分析的结合上作了大量的探索和开创性的研究工作,得到有关专家的好评,是从事工程地质力学教学和研究的老师和研究人员的一本较好的参考书。

块体结构力学 ——工程地质力学的数值方法 刘 钊 著

西南交通大学出版社出版发行
(成都 二环路北一段 610031)

新华书店经销
郫县犀浦印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.125
字数: 260 千字 印数: 1—1000 册
1996 年 3 月第 1 版 1996 年 3 月第 1 次印刷
ISBN 7—81022—886—2/O·078

定价: 15.00 元

104166

序 言

岩体工程地质力学的提出首先是实践的启发，同时也是在实践中才得以发展的。谷德振先生得益于李四光先生的指导，又得益于建国后大规模的工程建设的实践，他抓住岩体稳定中岩体结构这个关键，迎刃解决工程地质学中若干重大问题，奠定了岩体工程地质力学基础。改革开放以来，在国民经济高速发展的条件下，岩体工程地质力学得以进一步充实，形成了一套比较完整的理论和方法体系。

同时，岩体工程地质力学作为工程地质学一个新兴领域来说也是学科交叉的产物，而且是大跨度的学科交叉和渗透。岩体是自然造物，它是在漫长的地质历史中经过建造、改造和次生演化形成的。从岩体作为研究对象来看，最基本的问题应是深知它的结构和物性的来由。然而，从地质认识到力学表征非地质学一家所能为之，与力学的结合才能成功，而且只有这种结合才能满足工程的需求。不同来源的知识集成是学科交叉的可行途径。

刘钧同志撰写的《块体结构力学——工程地质力学的数值方法》，从岩体结构出发，概括出块体结构的若干力学模型，并提出其力学分析方法。本书体

68-19601

现了地质和力学学科的结合，因而显示了它的新颖和创造性。本书在地质体的力学简化和定量描述上下了一番功夫，所以必定会在工程实际中得到广泛的应用。

岩体工程地质力学研究方兴未艾，正在向纵深开拓，在此庆祝本书问世之际，谨祝刘钧同志沿着学科交叉的方向，取得更大更多的成果，推动工程地质学科的发展。

中国科学院地质研究所所长
国际工程地质学会副理事长
中国工程院院士

王思敬
一九九五年五月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 块体结构力学的提出	1
第二节 块体结构力学研究的主要问题	4
第二章 块体结构模型	8
第一节 岩体结构模型	8
第二节 块体结构模型及其基本方程	11
第三章 完整块体和无限大块体	17
第一节 单个完整块体的力学分析	18
第二节 无限大块体问题	33
第三节 块体间的相互作用	38
第四节 数值积分问题	44
第四章 层状块体和破碎块体	59
第一节 层状块体和破碎块体的地质特征	59
第二节 块体的有限单元分析	62
第三节 层状块体和破碎块体的应力—应变关系	75
第四节 非线性有限单元分析	85
第五节 简单例题	96
第五章 损伤块体	102

第一节	损伤张量和等效损伤体	103
第二节	真应力和层状损伤体	109
第三节	真应力的求解和有限单元离散化过程	116
第四节	裂隙扩展和间断节理的分析方法	124
第六章	节理的计算问题	133
第一节	节理单元分析	134
第二节	节理的非线性分析	143
第三节	曲线追踪法	150
第四节	节理的几何剪胀问题	161
第七章	位移反分析方法	170
第一节	反分析公式的一般表述	172
第二节	反分析理论的再探讨	178
第三节	岩体结构效应的综合反分析	187
第八章	地质工程数值分析中的几个问题	198
第一节	概 述	198
第二节	地应力问题	202
第三节	地质工程的开挖计算问题	206
第四节	边坡逐次破坏的数值模拟	
	——金川露天矿边坡有限单元分析	219
第五节	边坡变形主导因素的确定	
	——抚顺西露天矿边坡的数值模拟	228
第六节	边坡滑动面的确定	
	——可变网格有限单元分析的应用	240
第九章	块体结构力学的计算程序	250
第一节	BMA 程序简介	250

第二节 BMA 程序的数据组织	256
附录 BMA 源程序	271
参考文献	308

第一章 绪 论

科学是伴随人类的实践活动而发展的。一种科学理论提出来以后，推动了人类的生产实践，同时又在此基础上开展了更广泛更深入的研究工作，到一定程度后，又会提出新的理论，把科学推向一个新阶段。在工程地质界，自谷德振教授创立工程地质力学以来，通过工程地质学家的努力，提出来一些新的理论和新的见解，极大地丰富了工程地质学。二十多年来，作者一直从事工程地质力学数值方法方面的研究工作，并在一些大型地质工程中，利用数值计算和工程地质分析相结合的方法进行研究取得了一些成果。块体结构力学的提出就是作者多年来研究工作的阶段性的总结。块体结构力学并非是一门纯粹的力学分支，而是以工程地质为基础，以工程力学数值方法为手段来分析地质工程的一门学科。在本书中，从第一章中块体结构力学的提出，到块体结构的建立，块体结构单元的力学分析，直至到第八章中地质工程数值分析中的几个计算问题，都体现了两个学科相互结合、相互补充和相互验证的基本特色。作者希望，通过工程地质学家和力学工作者的不懈努力，最终能解决工程地质力学定量化的问题。

第一节 块体结构力学的提出

50年代初，在水利、水电、铁道交通等工程实践中，进行工程地质评价时，主要侧重于岩性、构造与地下水等对工程的影响。随着我国大规模的地质工程的修建，带来了各种工程地质问题。从一个拥有坚硬花岗岩坝基的大坝所发生的局部变形破坏，到山区

铁路开挖人工边坡和隧道时多次发生坍塌、滑动与冒顶，以及西南山区自然边坡发生大规模的崩落和滑坡等，这些工程地质现象都反映了岩体或山体的失稳，它们都与岩体或山体内部存在着某种地质界面有着密切关系。以谷德振教授为代表的老一辈工程地质学家，在总结多个地质工程所遇到的问题的基础上，首先明确地建立了软弱结构面（断层、节理等）控制岩体稳定的基本概念。在70年代初，中国科学院地质研究所工程地质研究室的同志们，在谷德振教授的指导下，又参加了一系列的矿山工程和巨型地下工程，进一步认识到工程岩体的失稳，不仅与地质界面的发育程度有关，而且地质界面的组合形式不同，岩体的变形破坏方式也不一样。在此基础上，进而明确结构面（断层与节理等）和结构体是岩体结构的两大基本要素，于是形成和完善了岩体结构的概念。岩体结构概念的提出是工程地质学家认识上的飞跃，形成了工程地质力学的核心思想。按着这一思路，完成了结构面、结构体类型和岩体结构类型的划分等研究工作，这样就为岩体结构控制岩体稳定的思想打下了坚实的理论基础。从而就形成了一门工程地质学范畴的边缘学科——工程地质力学。谷德振教授的《岩体工程地质力学基础》一书，对这一学科作了理论阐述。

孙广忠教授在工程地质研究的基础上，又进行了大量的室内外试验研究，更明确地提出来岩体结构控制论。他指出：“岩体是有结构的，其变形和破坏是由岩体结构控制的。岩体变形不仅是材料变形，而且很多情况下是结构变形。岩体破坏也不仅是材料破坏，而且很多情况下是结构失稳。”在他著的《岩体结构力学》一书中把岩体结构控制论视为岩体力学的理论基础。在这个理论指导下，不仅研究了岩体力学性质的基本规律，而且还分别对连续介质、碎裂介质、块裂介质和板裂介质等四种介质进行了研究，并建立了相应的力学理论。由此可见，岩体结构力学是在岩体结构学说的基础上发展起来的一个重要的力学分支。

岩体乃是指工程所辖范围内的地质体。我们利用工程地质力

学的知识就可以搞清楚岩体的两大基本要素结构面和结构体的成因，以及形成历史等等，并且可以从裂隙产状、发育程度以及组合关系等因素出发进行岩体结构分类，这就查清了地质结构。利用岩体结构力学的观点，对岩体结构中各种介质进行分析，且进行现场和室内试验，最后可以确定岩体结构中各组成单元（指结构体和结构面）的力学性质。在某些简单条件下，也可以对某个单块体进行初步的分析、计算，以评价地质工程中局部块体的稳定性。

地质工程是由各个组成单元构成的一个整体，这些单元间相互联系，相互作用，在外力作用下共同工作。我们难以直接地取出任意一个结构体来单独地进行分析，即使是已经清楚地知道了它的裂隙分布规律和力学性质等也是如此。原因是尚不知道周围的结构体对它是如何进行力学作用的。这就需要对整个地质工程进行整体分析，以确定各个组成单元的受力状态、应力状态以及变形破坏情况等等，判断出哪一部分可能失稳，最后对整个工程的稳定性作出评价。这就是说，需要建立一种力学分析的方法，才能够解决上述问题。

另一方面，地质工程是由不同性质的结构面和结构体以及工程实体所组成的。如果把结构面和结构体视为具有某种力学性质以及几何形状和尺寸的“构件”，而不涉及它们的地质成因的话，那么就完全可以把地质工程抽象化为一个“块体结构”。这就如同结构力学中的桁架结构、推力结构和刚架结构等一样。不过块体结构是自然造物的结果，或者是部分地经过人工改造而成的，并不完全是人工建造的。块体结构是一个由地质工程抽象出来的一个新的结构模型，它是由大小、形状不同、力学性质各异的，通过结构面相互联系的块体堆积而成的“结构物”。它不同于结构力学中任何一种结构形式，因此就不能简单地沿用已有的计算方法进行结构分析。这就需要建立一种反映块体结构特色的理论和方法——块体结构力学，对块体结构模型进行分析，最后结合工程的要求，对整个地质工程的稳定性作出评价。从上述可知，块体

结构力学是为了解决工程地质力学的定量化问题而建立起来的，因此它是工程地质力学的延伸和发展，也可以说是工程地质力学的一个新的分支。块体结构力学是为了分析计算由岩体结构抽象出来的块体结构模型而提出来的，因此，与工程地质相结合是它的一大特色；另一方面，地质工程中尚包括各种工程问题，这在块体结构模型中是不能完全反映出来的，然而这正是块体结构力学必须要分析、研究的问题，故与工程实践相结合是块体结构力学的另一大特色。与工程地质相结合和与工程实践相结合将是始终贯穿于块体结构力学的一条主线。从这里也可以看出，块体结构力学是为了解决工程地质力学数值计算问题而抽象出来的力学概念，故也可以说是工程地质力学的数值方法。

第二节 块体结构力学研究的主要问题

毋庸置疑，块体结构力学最终目的是要解决地质工程的稳定分析问题，它直接研究的对象是块体结构模型。在由地质模型向块体结构模型转化的过程中，应当注意什么问题以及岩体结构的组成单元——结构面和结构体又是如何进行抽象化的等问题都是首先要搞清楚的。

在修建地质工程之前，首先必须进行工程地质勘测，通过现场工程地质测绘、物探、钻探、坑槽探以及重点工程地质问题的专门研究，取得了大量第一手资料。而后，运用工程地质力学观点，进行整理分析，尤其是针对结构面（断层、节理等）进行统计、归纳和分类，最终确立一个地质模型。再通过岩体力学试验得到力学参数后，就可以抽象化出块体结构模型，这就是力学分析、计算过程中始终研究的对象。为了不脱离真实的地质情况，必须要做到以下几点：①块体结构的各个组成单元要具有工程地质工作揭露出来的，如裂隙分布规律等主要的地质特性和通过岩体力学试验得到的岩体力学特性；②块体结构各个组成单元在自重

和工程营力的作用下，要能反映出来真实工作状态，即它们的变形、破坏要和地质工程中出现的实际情况相吻合；③有的地质工程实体的修建是一个较长时间的渐近过程，在这个过程中某些块体的力学参数会发生变化，如有的块体受风化作用或浸水后力学参数降低，而有的块体则是通过灌浆处理，力学参数强化了。块体结构模型应该反映这种情况。

结构面在岩体结构中具有特殊的重要性，从直观的意义上讲，“没有结构面就没有岩体结构”，这种提法是不过分的。因此，工程地质力学非常重视对结构面的研究。对于一个具体的地质工程，往往根据结构面的延展性、贯通性、密集程度和充填物的力学性质进行归纳分类，然后确定它们在工程中所起的作用。结构面所起的作用大体上是两种：分割作用和削弱作用。在块体结构模型中，必须充分地考虑这两种作用。

一、分割作用

它对岩体结构的形成有着巨大影响。一般说来，规模较大的、贯穿于整个工程所辖区域的结构面，如断层或大节理等，把岩体分割成若干个彼此间相互作用又相互独立的岩块体。这些岩块体的力学性质并没有因为分割作用而有所改变。岩块体间的作用力是通过结构面来传递的。由于结构面的强度一般比结构体的强度低，故块体受力破坏时，多是沿着结构面受剪切滑动或垂直于结构面受拉张开。这一类结构面数量并不太多，但对于地质工程的稳定性有着重大影响。为此，对于这种起分割作用的结构面，在块体结构力学中要给予特殊对待。由于这种结构面数量是有限的，在实际计算中，往往既要考虑结构面在工程中的具体位置和几何尺寸，也要考虑它的岩体力学特性。用特定的结构单元进行描述。

二、削弱作用

有的结构面，如节理裂隙是成组出现的，它们的延展性不太

强，但密集度高。在岩体中这种结构面常常是多组分布，地质产状和发育程度等都不相同。其数量可以说是无限的。人们难以确定地质工程是沿哪一条或哪几条结构面破坏而丧失稳定，它们的力学作用是综合性的。这样，在块体结构力学分析中就不能和前面一样来研究这一类结构面的力学效应了。但可以发现，由于这一类岩体在小范围内受到切割作用，使得岩块的力学性质变得复杂化了：有的结构体的弹性参数和强度都变得各向异性；有的结构体被多组结构面切割变成近乎于散体。这样一来，在块体结构力学中，某些块体不再具有岩石特性，而是具有“岩体特性”了，这就是结构面对块体的削弱作用。多组结构面不同组合形式的切割作用，造就了不同力学性质的块体。而这些块体的力学效应，都体现出结构面削弱作用的影响。因此，在块体结构力学中引入不同力学性质的块体——这些力学性质只能是由结构面切割作用造成的——就是间接地处理了节理裂隙的削弱作用。

块体结构力学的重要任务是分析地质工程问题。在地质工程中首先遇到的是开挖，很多工程问题，如变形失稳都是由于开挖引起的。不论是地下洞室还是边坡、基坑开挖都产生了新的临空面，增加了块体可移动的空间，从而加大了块体结构的变形。研究开挖后各单元的应力状态和变形破坏情况，追踪逐步开挖逐次变形破坏的力学过程是块体结构力学的重要内容。另外，地质工程中常用的衬砌、喷锚等工程处理措施在分析计算时也要予以考虑。同时，地震、爆破等不利因素以及岩体的特别是断层的蠕变特性，也是块体结构力学的研究内容。

块体结构不是人工造就的，人们不能预先造定岩体的力学性质，也不能事先构造一个初始应力场。工程技术人员需要通过室内外的力学试验得到各岩体力学参数，再通过力学分析计算，来求得各个结构单元的应力、变形状态，进而判断整个工程的稳定情况。这就是所谓的正演分析。另一方面，工程技术人员在现场的探洞或试验洞中，可以直接测量到开挖变形的位移值。通过有

限个测量值，可以有条件地反演出代表块体结构的整体综合性能的弹性模量或初始构造应力场；有的还根据多点位移计测出的位移值，反演推断洞室周围一定范围内的岩体结构。这就是所谓“反演”计算。在块体结构力学中，不论是正演计算还是反演分析，都受到了同等程度的重视。

作者认为，随着时间的推移，块体结构力学所研究的内容与工程地质结合的会越来越紧密；分析地质工程的功能会越来越完善。

第二章 块体结构模型

块体结构不是一种人工直接建造的结构，而是一种由工程地质模型中抽象化而来的结构模型。因此，在研究块体结构模型之前，应该先了解地质模型；否则就难以判断块体结构模型是否正确地代表了真实的地质结构。然而地质体是极其复杂的，地质科学工作者进行野外考察后得到的资料是极其丰富的。把这些资料分析归纳，抓住主要矛盾，去掉一些次要东西，在结构体和结构面分类的基础上绘制成工程地质图件，这实际上就形成了岩体结构模型。可以说这个模型是工程地质工作者进行第一次加工的结果。不过这个模型尚不能直接用来进行力学计算，因为这个模型中的组成单元——结构面和结构体仅是按地质成因、几何尺寸来划分的。还没有跟力学特性和实际运营中的力学效应联系起来。因此，还要进行第二次加工处理，把结构面、结构体结合岩体力学试验资料进行分类、归纳，这就形成不同力学性质的“块体”。块体和结构面的组合体就是块体结构模型。块体结构是岩体结构模型演化而来的，但又不完全一样，是力学工作者再加工的结果。本章中首先介绍岩体结构模型，再介绍块体结构模型的各个组成单元，最后介绍力学分析的基本原理。

第一节 岩体结构模型

说到岩体结构就要谈岩体结构分类。对于不同的工程部门如铁道、水电等，岩体的结构分类是不完全一样的。不过从工程地质学的观点来看，任何一种分类都是根据本学科的特殊需要对两

个基本组成元素——结构面和结构体的重新归类。因此，还是从结构面和结构体的一般情况进行叙述。

一、结构面

谷德振教授在《岩体工程地质力学基础》一书中指出：“所谓结构面实际上就是地质发展历史中，岩体内形成的具有一定方向、一定规模、一定形态和特性的面、缝、层、带状的地质界面。”这就是说结构面并非几何上的面，而是有一定厚度的。谷教授把结构面大体上分成以下五级：

1. I级结构面。指对区域构造起控制作用的断裂带，是地壳或区域内的巨型地质结构面。延展甚远，一般都在数十公里以上，纵深方向延伸至少可以切穿一个构造层。其破碎带的宽度一般在数米以上。在工程范围内，通常认为是不变的。

2. II级结构面。一般指延展性强而宽度有限的区域性的地质界面，如不整合面、假整合面、原生软弱夹层等等；同时也包括延展数百米至数千米、深度数百米以上、宽度一米上下最大不超过三至五米的、贯穿整个工程区域或切穿某一局部的断层、层间错动、接触破碎带等。

3. III级结构面。包括在走向上、纵深方向上的延伸都有限，一般在百米范围内的断层、挤压或接触破碎带、风化夹层。其宽度在一米左右或更小；亦包括宽数十厘米以内的、走向和纵深延伸断续的原生软弱夹层、层间错动等。

4. IV级结构面。延展性差，无论在走向上还是在纵深方向上的发展都是有限的。一般在数米范围内，大者不超过二三十米，无明显的宽度。即岩体中断续分布的裂隙，主要是指节理和层面以及发育的劈理等。

5. V级结构面。延展性甚差，无厚度之别，随机分布，为数甚多的细小的结构面，主要指微小的节理、劈理、隐微裂隙等。