

块体理论 在工程岩体 稳定分析中的 应用

刘锦华 吕祖尧

水利电力出版社

块体理论在工程岩体 稳定分析中的应用

刘锦华 吕祖珩

水利电力出版社

块体理论在工程岩体稳定分析中的应用

刘锦华 吕祖堃

· *

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

· *

787×1092毫米 32开本 8.75印张 180千字

1988年5月第一版 1988年5月北京第一次印刷

印数0001—2840册

ISBN 7-120-00074-81

TV·58 定 价 2.10元

内 容 提 要

块体理论是近年来发展和完善起来的一种岩体工程稳定分析理论。本书对该理论做了简要而系统的介绍。第一章至第四章叙述块体理论的基本原理和分析方法；第五章至第八章分别介绍了该理论在岩石边坡工程、地下洞室、隧洞、竖井、坝基、坝肩等岩体工程中的实际应用，并附有实例；附录中简要介绍了与本书有关的矢量运算和全空间赤平投影方法的基本原理。

全书章节层次排列有序，深入浅出，通俗易懂，简明实用，既可供各类岩体工程的勘察、设计、施工等工程技术人员参考，也可供有关的科研和教学人员参考。

前 言

1985年春，石根华与美国R·E·Goodman教授合著的《块体理论及其在岩体工程中的应用》(Block Theory And Its Application To Rock Engineering)一书出版，这标志着利用块体理论作为岩体工程分析的一种有效方法已趋于完善。

虽然，块体理论的形成和发展与我国的工程实践和学者的努力分不开，并在国际上得到日益广泛的应用，但至今在国内还没有文献对此理论做全面地介绍。因此，我们在石根华的帮助和支持下，编写了这本小册子，力求用工程技术人员通俗易懂的语言和直观的表述方法，精简扼要地把块体理论介绍给我国岩石工程界的同行们。工程技术人员可以照本书所述详细步骤进行岩体工程的稳定分析。科研、教学人员可以把它作为了解块体理论的入门，以便于进一步深入对这一理论的研究。

在编写本书的过程中，还得到水利电力部潘家铮总工程师、水利水电科学研究院傅冰骏、黄仁福高级工程师，以及水利电力部第五工程局孙国纬同志等的帮助，在此谨表谢意。

编著者

1986年2月

符 号 说 明

$\vec{A}$ —— A 矢量

$\vec{a}$ —— A 单位矢量

$A \cap B$ —— A 和 B 的交集

$A \cup B$ —— A 和 B 的合集 (或称并集)

$A \in B$ 或 $B \ni A$ —— A 是 B 集合的一个元素 (或点)

$A \subset B$ 或 $B \supset A$ —— A 是 B 集合的一个子集; A 属于 B ; B 包括 A

$A \notin B$ 或 $B \not\ni A$ —— A 非 B 集合的一个元素 (或点)

$A \not\subset B$ 或 $B \not\supset A$ —— A 非 B 集合的一个子集

$\sim B$ —— B 的补集 (非包括于 B 的元素的集合)

$U(\hat{w})$ —— $\hat{w}$ 的上半空间, 其界面通过原点

$L(\hat{w})$ —— $\hat{w}$ 的下半空间, 其界面通过原点

$U(\hat{n}, Q)$ ——界面与 $\hat{n}$ 垂直, 且通过原点的上半空间

$\emptyset$ ——空集

Jp (Joint pyramid)——裂隙锥, 为闭集

Ep (Excavation pyramid)——开挖锥, 为闭集

Bp (Block pyramid)——块体锥

Sp (Space pyramid)——空间锥 ($= \sim EP$), 为开集

α 、 β ——平面的倾角及倾向

(x, y, z) ——以 $(0, 0, 0)$ 为原点的矢量的顶点坐标

R ——参照圆 (赤道圆) 半径

r ——赤平投影大圆的半径

$\vec{\tau}$ ——荷载合力矢量

$\hat{n}_i$ ——平面 i 的单位法线矢量

$\vec{A} \times \vec{B}$ —— A 和 B 的矢量积 (叉积)

$\vec{A} \cdot \vec{B}$ —— A 和 B 的数量积 (点积)

$\bar{W}_i$ —— 边墙 i

E_{ij} —— $\bar{W}_i$ 和 $\bar{W}_j$ 相交构成的凹墙棱

C_{ijk} —— $\bar{W}_i$ 、 $\bar{W}_j$ 和 $\bar{W}_k$ 相交构成的凹形角顶

E'_{ij} —— 两洞室相交的凸墙棱

C'_{ijk} —— 两洞室交的凸形顶角

目 录

前言

符号说明

第一章 绪论	1
第一节 岩体的工程特性	1
第二节 岩体工程的分析方法	3
第三节 块体理论的一些基本概念	4
第四节 块体理论的应用范围及其发展前景	7
第二章 块体理论的基本原理	9
第一节 块体的基本类型	9
第二节 棱锥的类型	12
第三节 空间块体的数学表述	13
第四节 有限性定理	15
第五节 可动性定理	21
第六节 块体或棱锥的标注方法	24
本章附录 有关集合的基本概念	26
第三章 块体可动性的判别方法	30
第一节 裂隙块体的总数	30
第二节 裂隙块体的赤平投影判别方法	33
第三节 裂隙块体的矢量运算判别方法	42
第四节 块体可动性的赤平投影判别方法	52
第五节 块体可动性的矢量运算判别方法	54
第四章 关键块体的判别	60
第一节 力的平衡方程	60
第二节 运动学分析	61
第三节 块体运动形式的判别方法	65

第四节	关键块体的判别方法	74
本章附录	有关定理的证明	78
第五章	块体理论在岩石边坡稳定分析中的应用	81
第一节	岩石边坡概述	81
第二节	运用赤平投影方法确定边坡内的可动块体	86
第三节	运用矢量运算方法确定边坡内的可动块体	95
第四节	边坡走向确定时求开挖临界坡度	104
第五节	边坡坡度确定时求开挖临界走向	111
第六章	块体理论在地下洞室稳定分析中的应用	116
第一节	运用赤平投影方法判别围岩内的可动块体	116
第二节	运用矢量运算方法判别围岩内的可动块体	133
第三节	地下洞室围岩的稳定分析步骤	139
第四节	地下洞室方位的选择方法	145
第五节	交叉洞室、岩墙和岩柱的稳定分析	147
第七章	块体理论在隧洞围岩稳定分析中的应用	154
第一节	隧洞的几何形状	154
第二节	隧洞的局部坐标系	156
第三节	隧洞断面上的可动块体	158
第四节	运用矢量运算方法确定最大可动区域	163
第五节	运用赤平投影方法确定最大可动区域	181
第六节	隧洞进口各部位的可动块体	196
本章附录	公式的推导	203
第八章	平衡区域图的原理、绘制方法 and 应用	206
第一节	平衡区域图的概念	206
第二节	平衡区域图的绘制方法	208
本章附录	平衡区域的证明	220
附录一	有关矢量运算的基本公式	224
附录二	赤平投影的基本方法	241

第一章 绪 论

第一节 岩体的工程特性

作为边坡、地基、以及地下洞室等工程直接作用对象的岩体，是一种古老而又极为复杂的天然地质体。虽自远古以来，人类就一直进行着岩体工程活动，但在漫长的过去，人们一直是以实践经验和现场直观判断做为活动基础，而对天然岩体复杂的工程特性则知之甚少，更没有称得上真正的理论分析方法。只是到了近代，特别是近三十年来，随着科学技术的高度发展，以及人类的岩体工程活动日益频繁，规模也越来越大，因而对岩体的本质的研究才逐渐趋于深入、全面。这方面的技术成就，集中反映在近代岩石力学这一新兴而又十分活跃的边缘学科中。

在大量岩石试验、工程实践和理论研究的基础上，目前人们对于岩体这一复杂工程材料的认识，已逐渐由浅入深，由粗到细，由片面到全面，由定性分析到定量计算。目前人们对于岩体以下一些工程特性逐渐取得了趋于一致的认识。

一 岩体的力学属性

岩体是在漫长的地质历史发展过程中形成的地质体的一部分，它的成因和构造复杂，岩性多样。从结构特点看，它包含了连续介质、裂隙介质和散体介质；从力学性能看，岩体几乎包括了所有固体材料的力学属性——粘性、弹性、塑性、流变性、各向异性以及非均质性。不同岩体其力学属性不同，而同一岩体的物理力学参数也具有明显的分散性和不确

定性；同时，岩体还具有难于确定的初始应力场。

二 岩体的结构概念

为了综合研究岩体的工程特性，近年来人们提出了岩体结构这一概念，认为岩体是有结构的，岩体的力学作用主要受岩体内结构面及岩体结构控制着。所谓结构面即是在地质发展历史中，在岩体内形成具有一定方向、一定规模、一定形态和特性的面、缝隙以及带状的地质界面，如层面、片理、节理、软弱夹层，以及断层破碎带等。岩体就是由结构面及其所包围的结构体共同组成的。谷德振教授在其所著的《岩体工程地质力学基础》一书中，根据岩体结构这一概念，将自然界岩体划分成如表1-1所列的结构类型和相应的力学介质模型。应该说，这样的划分基本上概括了天然岩体的主要结构特征。

表 1-1 岩体结构类型及其相应的力学介质模型

结 构 类 型		亚 类		力学介质模型
代号	名 称	代号	名 称	
I	整体块状结构	I ₁	整体结构	连续介质
		I ₂	块状结构	连续或不连续介质
II	层状结构	II ₁	层状结构	不连续介质
		II ₂	薄层状结构	
III	碎裂结构	III ₁	镶嵌结构	似连续介质
		III ₂	层状碎裂结构	不连续介质
		III ₃	碎裂结构	不连续介质 似连续介质
VI	散体结构			似连续介质

三 岩体的破坏机制

具有不同结构的岩体在同样的荷载作用下，将出现不同的变形和破坏机制。概括各类岩体的实际破坏形态，大体可分为五种类型：1) 脆性破坏：岩体因应力集中或爆破等产生的强度破坏，引起结构面的扩展以及岩爆等；2) 块体运动：沿结构面产生剪切破坏，块体将发生相对位移；3) 层体弯曲：是薄层或软硬相间岩层的典型破坏机制，表现为鼓肚、弯曲、倾倒等；4) 松动溃散：是碎裂结构的典型破坏机制，如断层及破碎带的塌方等；5) 塑性变形：如软岩的类土变形，流变破坏，散体或结构面的压缩等。

四 岩体工程的分析目的

通过各种手段和途径，正确认识受力岩体的变形和破坏规律，判定岩体的稳定状况，预测其未来的变化，并制定出有效的工程处理措施。

第二节 岩体工程的分析方法

由于岩体具有极为复杂的工程特性，因而在实践中也就出现了不同的探索途径和各具特色的分析方法。例如：散体理论分析、极限平衡分析、应力应变分析（有限单元、离散单元、边界元分析等）、地质力学模型试验、工程类比分析、以及块体理论分析等。详细论述这些方法，已超出本书的范围。然而应该指出的是，上述各类分析方法都是人们在不同的阶段，根据对岩体本质的认识程度，针对岩体的某一主要特性，在做出某些基本假定的基础上提出的，因而这些方法都具有其一定的实用范围和一定的局限性。在用于接近其基本假定的一类岩体中，将会有较好的准确性；而对于另一

类岩体则可能完全无能为力。因此，岩体工程分析的一条重要原则就是要具体问题具体分析，根据不同的岩体结构采用不同的分析手段。这里仍需强调的是，尽管目前岩体工程的理论分析已获得很大发展，然而工程技术人员的实践经验，现场直观判断能力，以及现场监测手段等仍是保证岩体工程安全的不容忽视的重要环节。许多开挖工程的最后抉择往往仍然以经验和明智的判断为基础进行直观的评价。

第三节 块体理论的一些基本概念

一 块体理论的基本概念

在坚硬和半坚硬地层中，岩体被结构面切割成各种类型的空间镶嵌块体。在自然状态下，这些空间块体处于静力平衡状态。当进行边坡、地基以及地下洞室的人工开挖，或对岩体施加新的荷载后，使暴露在临空面上某些块体失去原始的静力平衡状态，因而造成某些块体首先沿着结构面滑移、失稳、进而产生连锁反应，造成整个岩体工程的破坏。我们称这种首先失稳的块体为“关键块体”。块体理论的目的就是研究上述岩体结构模型的破坏机制和工程处理措施。

二 块体理论的基本假定

块体理论的基本假定如下：

(1) 结构面为平面，对于每个具体工程，各组结构面具有确定的产状，并由现场地质测量获得。

(2) 结构面贯穿所研究的岩体，即不考虑岩石块体本身的强度破坏。

(3) 结构体为刚体，不计块体的自身变形和结构面的压缩变形。

(4) 岩体的失稳是岩体在各种荷载作用下沿着结构面

产生剪切滑移。

三 块体理论的研究方法

根据上述基本假定，块体理论首先将结构面和开挖临空面看成空间平面，将结构体看成凸体，将各种作用荷载看成空间向量，进而应用几何方法(拓扑学和集合论)详尽研究了在已知各空间平面的条件下，岩体内将构成多少种块体类型及其可动性，并给予严格的数学证明。然后通过简单的静力计算，求出各类失稳块体的滑动力，以做为工程加固措施的设计依据。具体分析手段有两种：一是矢量运算法——将空间平面和力系以矢量表示，通过矢量运算给出全部块体理论分析结果，该法已用BASIC语言编制出全部程序，在微机上运算，可以自动给出全部判断和计算结果，应用简便；二是作图法——应用全空间赤平投影方法直接作图求解，该法简便、直观，仅需圆规、直尺作图，或用微机绘图，无需进行复杂的计算。应该说明的是，这两种分析方法是各自独立的，所得的结果是一样的，且都有其严格的数学基础。这两种方法的进一步结合，就是应用矢量运算给出全部分析结果，并将赤平投影分析结果通过微机和绘图机绘出开挖结构和塌滑形式之间相互关系的空间图形，如图1-1所示，使分析结果更加直观。关于上述两种分析方法，本书将做详尽介绍。

四 块体理论的特点

块体理论的特点如下：

(1) 块体理论分析完全是三维分析，这正是岩体工程的主要特性，也是该法优于其他分析方法的主要特点。

(2) 块体理论分析的核心可以归结为寻找开挖临空面上的关键块体。对于要求保持开挖稳定的岩体工程，则需在开挖过程中，当关键块体完全暴露之前，加以工程处理措

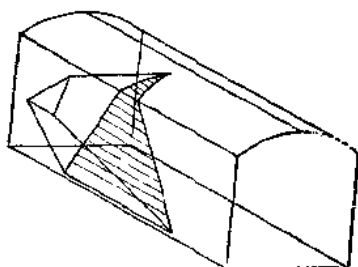


图 1-1 块体理论分析的一个典型输出成果：与一隧洞相交的某关键块体

施,使之保持稳定;对于要求以最小的开挖面而达到最大开挖效果的某些采掘工程,则需使关键块体暴露,使之造成连锁破坏,以期用最少的爆破量达到最大的爆破效果。

(3) 由基本假定可知,块体理论的研究对象是具有明显滑动面的空间岩体运动,只考虑结构面间的抗剪强度,不考虑岩体本身的强度破坏和变形,且讨论只限于岩体的平行移动,对于重心落在支撑面以外的倾覆失稳,本理论仅能求出切割孤立体,而倾覆力矩的计算要根据岩体的几何数据和荷载作用条件而定。由于讨论对象的力学模型实质只是刚体的平行移动,故应用空间向量合成来求各种荷载的合力才是正确的。

(4) 关于块体理论的分析方法,不论是矢量运算法,还是赤平投影法,理论上是完备的,数学证明是严谨的,研究问题是充分的,而最后的应用方法则十分简便,一般工程技术人员都易于掌握。故本理论不仅有重要的工程实用价值,而且在应用数学的发展方面也有重要的理论价值。本书在以后各章中,将主要介绍分析结论和应用方法,有关一些重要的数学证明将摘要列于附录中,以供一些欲深入研究本理论的同志参考。

(5) 与其他分析方法一样, 块体理论分析成果的可靠性取决于分析参数取值的准确程度。首先取决于结构面力学指标 c 、 ϕ 值的准确性; 其次取决于结构面产状取值的准确性。严格说来, 任何结构面都不是一个理想的平面, 且在同一地质背景条件下, 结构面产状常具有一定的分散性。因此, 在野外实际量测时, 必须选取具有代表性的结构面产状。

第四节 块体理论的应用范围 及其发展前景

块体理论是近年来发展和完善起来的一种岩体工程稳定分析方法, 和其他任何一种分析方法一样, 有其一定的适用范围和局限性。尽管如此, 在以后介绍中我们可以看到该方法在工程实践中的广泛适用性。例如: 对于边坡工程, 当已知结构面产状和力学指标, 以及工程作用力和边坡方向之后, 可以求出开挖面不稳定岩体的全部塌滑型式和需施加的工程锚固力, 可以选择最优的边坡走向和倾角, 以使边坡工程稳定性最好和工程处理工作量最小; 对于地下工程, 当已知岩体的结构面产状和力学指标, 以及工程作用力和洞轴线方向之后, 可以求出洞室四周及顶部不稳定岩体的全部塌滑型式和塌滑力, 以做为工程处理措施的依据, 并可进而优选洞轴线方向和断面形状, 以获得围岩稳定性最佳的工程布置型式; 对于坝基、坝肩等水电工程, 当已知结构面和临空面产状, 以及结构面力学指标和工程作用力之后, 可以分析坝基、坝肩的稳定性, 并给出工程所需加固措施的锚固力; 对于一些采掘工程, 当已知矿体结构面产状以后, 可以选择最优的开挖方向, 以求得以最小的开挖爆破量而达到最大的开挖效果。

块体理论虽然以刚体的平移运动为出发点，但学科的发展到此远没有结束，它的进一步发展，是将块体理论与岩体的应力、应变分析结合起来，从而有希望突破岩体结构的大变形，亦即“不连续变形”这个悬而未决的重大课题，这将是岩石力学的一个重大突破。目前，这方面的探索工作已经取得了一定的进展。

块体理论虽然问世不久，但很快以它鲜明的特点和实用性在岩石力学研究领域里独树一帜，并得到国际岩石力学界普遍赞誉和推崇。这方面的情况明显地反映在1983年召开的第五届国际岩石力学会议专题总结报告中，以及1985年瑞典“国际岩石支撑锚固座谈会”中。石根华与R.E. 古德曼在座谈上发表的论文：“块体理论在岩体锚固设计中的应用”，曾被美国评为1984年获奖论文。

应该特别指出的是，块体理论的形成和发展是与我国学者石根华的名字分不开的，不论是在理论的创立，分析方法的数学推演，以及具体运算程序的编制等方面，石根华都做出了很大的贡献，他的成就得到国际岩石力学界和计算数学界的公认。

虽然，块体理论的建立和发展与我国学者的努力分不开，并在国际上得到日益广泛的应用，但直至目前在国内还缺乏系统的介绍。因此，我们在学习的基础上，结合我们以往在这方面的工作体会，在这里对块体理论及其应用做一个系统而简要的介绍。为便于工程技术人员直接应用，在介绍中力求通俗易懂，简单适用。如果通过介绍能使这一新的学科在我国得到进一步推广和应用，并对我国四化建设有所裨益，这将使我们感到莫大欣慰，这也就是我们编写此书的目的。