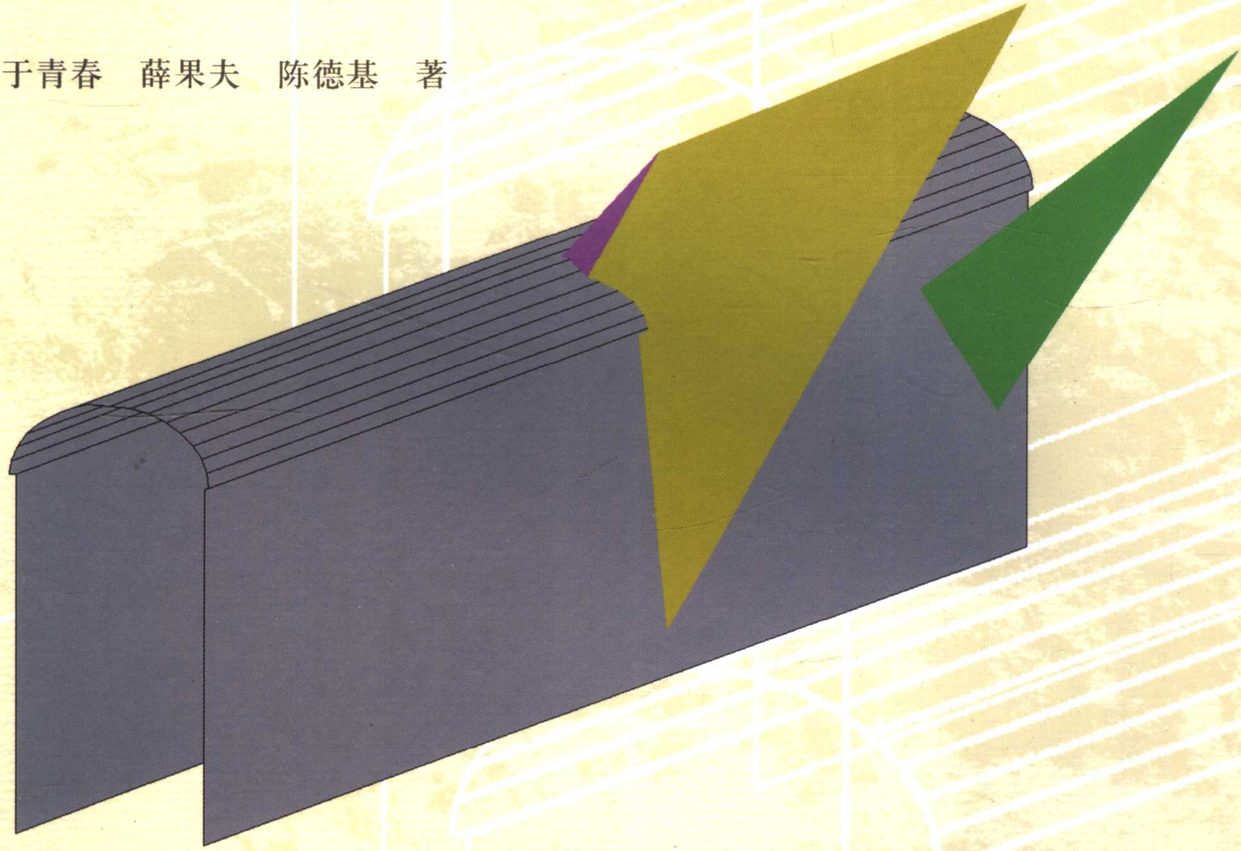
国家自然科学基金资助研究

裂隙岩体一般块体理论

于青春　薛果夫　陈德基　著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家自然科学基金资助研究

裂隙岩体一般块体理论

于青春　薛果夫　陈德基　著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书在前人工作的基础上提出了一般块体理论，给出了有限延展裂隙在任意形状非均质工程岩体条件下岩石块体识别的通用算法。裂隙可以是实测裂隙也可以是通过随机模拟方法生成的随机裂隙，工程岩体可以是任意由多面体组合成的形状，如复杂边坡或地下硐室，而且岩体和裂隙面可以是非均质的。

作者直接以自己的理论成果为基础开发了计算机软件 GeneralBlock，对现场岩土工程技术人员是一个实用的辅助工具，书中对此软件进行了详细的说明。

本书可作为岩石力学与工程领域的科研人员和研究生的参考书。书中介绍的软件及其使用说明书可从作者的网站上下载，网站地址为 http：//www. rockfractures. com。

图书在版编目（CIP）数据

裂隙岩体一般块体理论/于青春，薛果夫，陈德基著.
北京：中国水利水电出版社，2007
ISBN 978-7-5084-4336-2

Ⅰ. 裂…　Ⅱ. ①于…②薛…③陈…　Ⅲ. 岩石力学　Ⅳ. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 158468 号

书　　名	**裂隙岩体一般块体理论**
作　　者	于青春　薛果夫　陈德基　著
出版　发行	中国水利水电出版社（北京市三里河路 6 号　100044） 网址：www. waterpub. com. cn E-mail：sales@ waterpub. com. cn 电话：（010）63202266（总机）、68331835（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　　刷	北京市兴怀印刷厂
规　　格	787mm×1092mm　16 开本　8.5 印张　202 千字
版　　次	2007 年 3 月第 1 版　2007 年 3 月第 1 次印刷
印　　数	0001—2300 册
定　　价	**25.00** 元

序

岩体中存在不同种类、不同规模的裂隙（也常被称之为不连续面或软弱结构面），这使岩体区别于其他材料，往往表现出比其他材料更复杂的力学性质，也促使岩体力学成为一门独立的学科。

在岩体力学的各种数值方法中裂隙的处理都是一个难点，块体理论是比较适合处理岩体不连续面的一种数值方法，在国内外水电、矿山、道路等大规模裂隙岩体的稳定性分析和岩体支护设计中得到了非常广泛的应用。

在传统的块体理论中，结构面（裂隙）被假设为无限延展的平面，这使块体理论在理论上只能识别简单的凸形楔形体（数学上可以证明，无限大平面形成的块体必然为凸形体），使其解决实际工程问题的能力受到很大的限制。在大多数的裂隙岩体工程中，科研人员都会投入很大的人力物力以确定岩体结构面的延展性，特别是对一些重要建筑物周围的大型结构面。如何有效地利用工程勘探、设计、施工阶段积累的结构面延展性资料，也是工程实际为块体理论提出的挑战之一。

本书在前人工作的基础上提出了一般块体理论，基本上克服了“无限大裂隙假设”带来的问题，使块体理论前进了一大步。一般块体方法所要解决的关键问题是有限延展裂隙，任意形状非均质工程岩体的岩石块体识别的算法问题。裂隙可以是实测裂隙也可以是通过随机模拟方法生成的随机裂隙，工程岩体可以是任意由多面体组合成的形状，如复杂边坡或地下硐室，而且岩体和裂隙面可以是非均质的。

在本书中，作者直接以自己的理论为基础开发了计算机软件General-Block，其成果已在实际工程中初步应用，目前正用于三峡地下厂房工程，指导地下厂房开挖过程中不稳定岩石块体的识别和支护设计。相信作者的研究成果会得到越来越广泛的应用，推进岩体力学的发展，并在岩石工程的勘测、研究中发挥重要的作用。

中国工程院院士 王思敬

2006年12月8日

前　　言

1993年，本书的作者们有机会聚在了一起。当时正值三峡工程永久船闸开挖之际，工程开挖量之大令世界瞩目，不稳定岩石块体的预测及支护问题是现场技术人员非常关心的一个问题。当时作为三峡工程地质总负责人的陈德基先生提出了两个具体问题：①在开挖施工之前，如何通过岩体裂隙的调查统计对开挖过程中可能出现的不稳定块体的数量、规模、稳定性以及支护工程的工作量作出初步的预测；②工程开挖施工过程中，在裂隙和开挖面的几何参数已相当明确的情况下如何确定块体的详细几何参数以指导快速准确的支护。自那时起本书的作者们就一直致力于完成这两项工作的方法或理论，有时投入的精力多一些，有时投入的精力少一些，但从未间断过，现在展现给读者的是作者们这十几年中为了解决上述问题在理论上的研究成果。其间作者完成了若干个工程实例研究，但其结果没有包括在本书中。2004年，“裂隙岩体一般块体理论及应用”被定为国家自然基金资助项目。

这项工作开始后不久作者们就发现，它比预想的要困难得多，要完成上述两个工程实际问题必须对现有的理论作比较大的拓展。即使在当时，关于块体理论的文献也已经比较多，但如果对这些文献稍作仔细研读就会遗憾地发现，这些文献几乎都有一个共同的问题就是假设裂隙是一个无限大的平面。在这一假设条件下几乎无法讨论块体的多少问题，因为很显然，众多的无限大裂隙面会形成无限多个块体，把岩体切割成整齐的“砖头”；在这一假设下也无法真正定义裂隙的位置，也就难以讨论块体的位置问题。因此，必须设法把“裂隙无限大”这一假设从块体理论中去除。另外，要使我们的理论能够实用，必须使理论能够适应各种形状复杂的工程建筑，如复杂的边坡、地下硐室或者他们的组合形式。

这样，可以把我们在理论上的关键问题表述为：**任意大小岩石裂隙（包括随机模拟和确定性裂隙）任意岩体形状（如各种形状边坡和地下硐室）条件下三维岩石块体的识别、可移动性判别、稳定性评价的通用方法**。解决此核心问题的相关理论方法作者们称其为一般块体理论，以区别前人假设裂

隙无限大，以关键块体为主要研究对象的关键块体理论。

块体理论可以分为三个相对独立的研究内容：①块体识别问题，也就是在裂隙几何参数和岩体开挖面几何形状已知的情况下找出裂隙和开挖面切割成的岩石块体；②块体的几何可移动性问题，即在块体形状已知的情况下判断块体几何上是否可能移动；③块体稳定性分析，当已知块体可移动时，分析块体失稳的可能性，一般是计算出块体的安全系数。在这三个问题中，块体稳定性分析是一个比较成熟的课题，早在块体理论成形之前就已存在；块体可移动方面有矢量方法，它适合任意多面体形状的块体，可以称为块体可移动性判断的通用方法。因此，有限大小裂隙条件下的块体识别的通用算法是本书对块体理论的最主要贡献。

本书第 1 章概括性地描述了块体理论的基本内容、关键块体理论的基本概念（如半空间、块体锥、有限性定理、可移动性定理等）及块体理论的发展简史。第 2 章是本书的核心内容，其中重点是块体识别部分。第 3 章简要地讨论了岩体裂隙网络随机模拟方法；第 4、第 5 章介绍了以本书理论为基础开发的两个软件。

本书可供岩石力学与工程领域的科学工作者阅读参考。以解决实际工程中岩石块体问题为目的的读者可跳过第 1 ~ 第 3 章直接阅读第 4、第 5 两章；以理论研究为目的的读者可以只阅读第 1 ~ 第 3 章；对块体理论和三维岩体裂隙网络有关数值算法以及软件开发感兴趣的读者可经常参考网页 www. rockfractures. com，在那里读者可直接与作者讨论共同感兴趣的问题，也可从中了解作者们相关研究的最新进展。

作　者

2006 年 12 月

目　录

1 关键块体理论与一般块体理论概述

岩体中存在的不连续面（也称裂隙或结构面）与施工开挖面形成不同规模的岩石块体，这些块体的失稳或垮落既破坏岩体的整体稳定性，也常常在施工及其后的工程运营过程中造成灾害。设计阶段如何根据已有的裂隙数据对施工过程中可能出现的不稳定岩石块体的数量、规模、形状等进行预测，对不同开挖面的安全性及支护工程的工作量（所需锚杆锚索的长度、数量等）进行估算，进而优化开挖及锚固支护设计方案；施工过程中如何根据实测的裂隙快速准确地识别出不稳定块体，确定其空间位置、几何形状和规模从而进行及时合理的支护，一直是水电、矿山、道路等大规模裂隙岩体工程中的难题之一。大规模天然危岩体的防灾及治理，以及大型石刻石雕等文物保护修缮，也常面临同样的问题。

块体理论是为了解决上述实际工程问题而产生的，主要包括三个基本研究内容：①块体识别问题；②块体运动学可移动性问题；③块体力学稳定性分析问题。

块体识别是块体理论解决实际问题的第一步，简单地说就是在已知研究范围岩体、露头面、岩体裂隙几何参数的条件下找出每一个独立的岩石块体，确定其空间位置、规模、几何形状等，为进一步分析块体以及岩体的稳定性做好准备。找出岩石块体有三个层次上的含义：第一种是概念上的，如在大型岩石工程的可行性分析阶段，关于岩石结构面方面的信息还较少，只能初步查明岩石裂隙可以分几组，各组裂隙的发育程度和主要发育方向，哪组裂隙与哪组裂隙的组合可能形成比较多的不稳定块体，对某一方向的工程开挖面的施工造成威胁；第二种是统计上的，在工程开挖施工之前，一般会对岩体裂隙进行较详细的调查统计，这时的裂隙资料一般能够做出岩体裂隙统计模型，在此基础上可以分析不同的开挖工程可能出现的不稳定块体的数量、规模、稳定性以及支护工程的工作量等；第三种是确定意义上的，如在工程的开挖施工阶段，有关的岩体裂隙和开挖面的几何参数已相当明确，这时希望确定块体的详细几何参数和稳定性。

块体识别最终给出每个块体的几何定义。目前，三维块体一般是通过表面描述的方法进行定义的，即一个三维的块体由其表面多边形进行描述，每个多边形由其顺序排列的顶点进行定义，而每个顶点由其三维空间坐标确定。

块体之间是有区别的，从几何上讲，或者从运动学的角度讲，有些块体是可能运动的，而其他块体由于周围岩体的限制在周围岩体发生移动之前是不可能运动的。由于大

多数岩体未扰动的岩块本身强度都是比较高的，块体理论中一般把岩石块体看作刚体，不考虑块体本身的破坏，块体的可移动性完全由其几何特征决定。这样，只有可移动块体才可能失稳，分析各种块体的可移动性构成块体理论的基本内容之一。

块体的可移动性分析最终给出每个块体是否可移动的结论。对于可移动块体一般能给出块体的可移动方向。目前块体一般被假设为刚体，而且块体的旋转运动一般被忽略，这样整个块体的所有点的运动方向都可以用一个统一的矢量进行描述。在实际中往往可以归结为块体沿某一个裂隙面的滑落线方向（倾斜线）或某两个裂隙的共同方向（即交线方向）滑动，这时可移动性分析给出作为块体滑动面的裂隙面。

块体的稳定性分析一般是在已知块体的几何参数和结构面的力学参数的情况下确定块体的稳定性。一般用稳定性系数描述块体的稳定程度，如果一个块体的稳定系数超过某个规定值称这个块体是稳定的，否则称为不稳定的。这个规定值主要取决于块体失稳给人类带来损失的大小，如果块体失稳给人类造成灾难性后果，则这个值便会被取得很高。理论上，稳定系数大于1.0的块体是稳定的，小于1.0的块体是不稳定的。

块体的稳定性分析是块体理论中历史最久的部分，可以说在块体理论形成之前块体稳定性研究已经存在。早期的研究往往是针对某类特殊形状的块体，如四面体块体，研究人员一般通过野外的实际观察确定块体的存在及其几何形状。

1.1 关键块体理论概述

关键块体理论是岩石块体理论的最成熟部分，由Goodman和Shi[1,2]创立，目前在国内外研究不稳定岩石块体的识别、稳定性评价以及加固设计时得到很普遍的应用[3~7]，简介如下。

1.1.1 关键块体理论的假设条件

Goodman和Shi[1]在下列假设条件下建立了关键块体理论：

(1) 所有的不连续面为严格的平面状。

(2) 所有裂隙切穿整个研究领域。

(3) 岩石块体是刚体。

(4) 不连续面和开挖面是已知的输入参数。

把不连续面假设为平面，这样所有的块体为多面体，块体的面、棱以及稳定分析中的滑动方向可以用一次的平面或矢量进行描述。所有裂隙切穿整个研究领域等于假设裂隙无限大，这有两方面的含义：一方面意味着所有块体都由已经存在的结构面完全定义，不考虑块体破裂形成新块体面的可能性；另一方面，由于每个裂隙都假设为无限大，这样不必考虑裂隙面的形状，也为使用半空间定义块体的方法创造了条件。假设块体是刚体即不考虑块体内部的变形，这样块体能否移动，可能在哪个方向移动完全由块体的几何形状决定。在关键块体理论中，开挖面和每组裂隙的方向是作为确定性已知参数输入的，如果一组内裂隙的方向是变动的，则取其平均值做代表。

图 1.1 为关键块体理论块体分类图。在关键块体理论中，块体首先被划分为无限块体和有限块体。如图 1.2（a）所示，块体在开挖面上截面较小，越向岩体内部结构面彼此之间的距离越大，在这种情况下结构面实际上不能在岩体内部完全圈闭形成真正的块体，但为了理论体系的完整性，关键块体理论称这种假想的块体为无限块体（第Ⅴ类块体）。有限块体被进一步划分为（几何）不可移动块体和（几何）可移动块体。如图 1.2（b）所示，不可移动块体（第Ⅳ类块体）与无限大块体几何上有一定相似性，块体越向岩体深部截面越大，但在岩体深部结构面能够完全封闭形成真正意义上的块体，不可移动块体又被称为锥形块体（tapered block）。

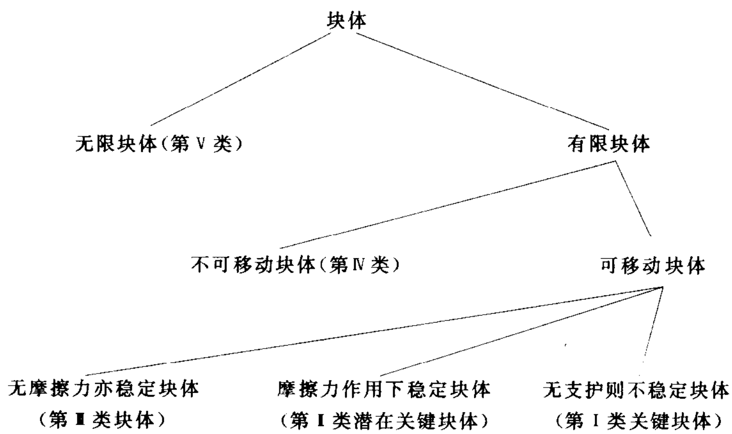


图 1.1 关键块体理论块体分类图

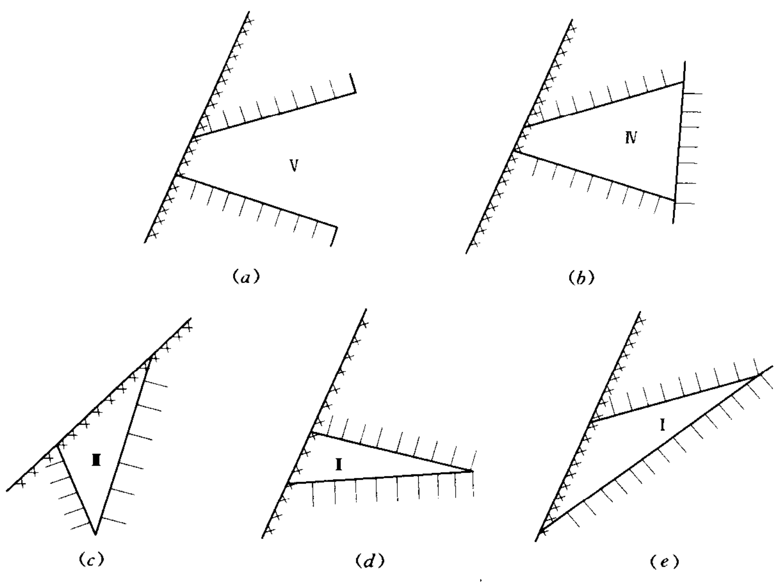


图 1.2 不同类型块体示意图

（a）无限块体；（b）不可移动块体或称锥形块体；（c）无摩擦力亦稳定块体；（d）摩擦力作用下稳定块体；（e）无支护则不稳定块体或称关键块体

可移动块体进一步分为三种：一种是在不考虑结构面摩擦力和粘聚力情况下仍然自然稳定的块体（第Ⅲ类块体），这类块体能够自然稳定的原因是块体可移动方向与块体外驱动力方向相反［夹角大于90°，见图1.2（*c*）］；第二种是在结构面摩擦力和粘聚力作用下能够稳定的块体［第Ⅱ类块体，见图1.2（*d*）］；第三种是在结构面摩擦力和粘聚力作用下不能稳定的块体，即在没有人工支护的条件下不能稳定的块体［第Ⅰ类块体，见图1.2（*e*）］。

在关键块体理论中，上述第Ⅰ类块体被称之为关键块体，第Ⅱ块体被称之为潜在关键块体。因此，关键块体是块体中稳定性最差的一类块体，是工程中没有人工支护则会失稳的块体。但不能说关键块体是在岩体稳定性中起到关键作用的块体，由于他们的失稳垮落一定会引起周围块体的连锁反应。实际上块体之间的稳定性影响问题仍是块体理论的一个未解决的问题，到目前为止，尚未见到系统研究块体之间稳定性相互影响的文献。但一般来讲，某个块体的失稳会使周围块体的稳定性变差，这是因为块体失稳后给周围块体提供了新的自由面（临空面）。

1.1.2 关键块体理论的基本概念

1. 半空间

半空间是关键块体理论中的最基本概念，块体是通过半空间进行描述的。如图1.3所示，一个平面F将空间分成了上、下两个半空间。图中的点P_1位于上半空间，P_2位于下半空间。

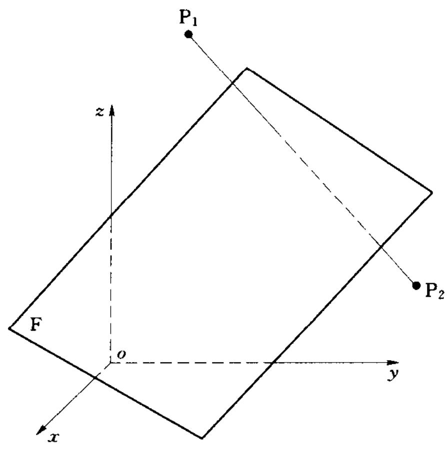


图1.3 平面与半空间

确定一个点位于上半空间还是下半空间，即判断一个点位于一个平面之上还是之下，是关键块体理论的一个基本问题。假设平面的方程为：$ax + by + cz + d = 0$，(a, b, c)是平面的法线矢量，假设这一矢量是指向上方的（否则把平面方程两边同时乘以 -1.0），如果有一个点 $P = (x, y, z)$，P点有$ax + by + cz + d \geqslant 0$，则称P点属于平面F的上半空间；否则，如果P点有$ax + by + cz + d \leqslant 0$，则称P点属于平面$F$的下半空间。

裂隙平面相互交切形成了各种形状的块体，对三维问题而言，一个块体要有4个或4个以上的面，也就是至少要有4个面相互交切才能形成块体。

假设一个块体有n个面，它由n个平面交切形成。每个平面（i）都把三维空间分割为两个半空间，一个上半空间（an upper half - space）用U_i表示，一个下半空间（an lower half - space）用L_i表示。每一个平面的上半空间或者下半空间的相交确定了块体的形状。

如图1.4所示，有5个裂隙分别为F_1、F_2、F_3、F_4、F_5。F_1的上半空间、F_2的下半

空间、F_3 的下半空间、F_4 的上半空间和 F_5 的下半空间，5 个半空间相交形成了一个块体，这个块体可以表示成半空间定义的形式，记为 $U_1L_2L_3U_4L_5$，等价于下列不等式的形式：

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 \geqslant 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 \leqslant 0 \\ a_3x + b_3y + c_3z + d_3 \leqslant 0 \\ a_4x + b_4y + c_4z + d_4 \geqslant 0 \\ a_5x + b_5y + c_5z + d_5 \leqslant 0 \end{cases} \tag{1.1}$$

尽管可以用半空间对块体进行定义，但一般希望能计算块体的体积、重量、各个面的面积等，这时就必须知道块体各顶点的坐标。

块体的顶点是裂隙之间的交点，对二维问题它是两条裂隙直线的交点，对三维问题它是三个裂隙平面的交点。裂隙之间有多少个交点，可以用组合的方法确定。图 1.4 中有 5 个裂隙，裂隙 1 与裂隙 2 的交点用 P_{12} 表示，裂隙 1 与裂隙 3 的交点用 P_{13}，5 个裂隙彼此之间共有的交点为

$$C_5^2 = \frac{5!}{(5-2)!2!} = 10$$

如果是三维的情况，裂隙之间的交点数为

$$C_5^3 = \frac{5!}{(5-3)!3!} = 10$$

三维问题中若要求三个平面的交点既是求解 3 个平面方程组成的方程组，如要求 F_1，F_2，F_3 的交点，须解方程组：

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \\ a_3x + b_3y + c_3z + d_3 = 0 \end{cases}$$

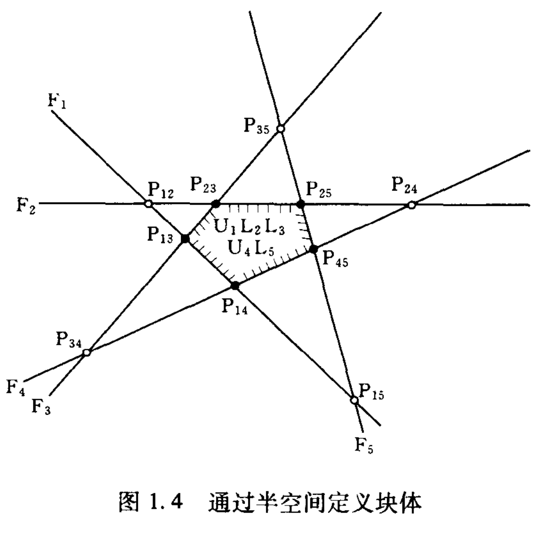


图 1.4　通过半空间定义块体

裂隙和开挖面在 4 个以上时，面彼此之间的任意组合能形成的交点数是比较多的，这些交点多数并非实际或所希望块体的交点。通过一定的判断可以分别出哪些交点是实际块体的顶点。仍以图 1.4 中的二维块体为例，如果正在分析处理的块体如图中所示由 $U_1L_2L_3U_4L_5$ 定义，则很容易确定图中用空心圆圈表示交点即 P_{12}、P_{34}、P_{15}、P_{24}、P_{35}等 5 个交点不是当前块体的顶点。因为即使从图上也能发现 P_{12}不满足 F_3 的不等式，P_{34}不满足 F_1 的不等式，P_{15}不满足 F_4 的不等式，P_{24}不满足 F_5 的不等式，P_{35}不满足 F_2 的不等式。

2. 块体锥

如果一个块体有 n 个面（包括裂隙面和自由面），这个块体由 n 个平面圈闭而成，也就是由 n 个半空间相交切而成。把这 n 个面进行平行移动使他们通过一个共同点如坐标原点，这 n 个半空间形成一个锥体，称为块体锥（block pyramid）。如上文中的块体通过半空间的形式表示为 $U_1L_2L_3U_4L_5$，它的块体锥也可以表示为半空间的形式：$U_1^oL_2^oL_3^oU_4^oL_5^o$，上标（o）的含义是半空间平面已被平移至坐标原点。相对于同时考虑裂隙与开挖面半空间平面的块体锥，如果只考虑开挖面，将其半空间平面平移至原点形成的锥称之为开挖面锥（excavation pyramid），只考虑裂隙时形成的锥为节理面锥（joint pyramid）。如果块体锥、节理面锥、开挖面锥分别用 BP、JP、EP 表示，三者之间有

$$BP = JP \cap EP$$

块体锥在数学上很容易理解，只是把形成块体的各半空间平面平行移动至原点，或者说把定义块体的各平面方程不等式中的 d_i 变为 0，即把式（1.1）改为

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z \geqslant 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z \leqslant 0 \\ a_3x + b_3y + c_3z \leqslant 0 \\ a_4x + b_4y + c_4z \geqslant 0 \\ a_5x + b_5y + c_5z \leqslant 0 \end{cases} \tag{1.2}$$

但块体锥在物理上或者空间几何上是比较难以想象的，不要把块体本身和块体锥混淆，实际上二者在某种意义上正好相反，当裂隙和开挖面能圈闭成真正的块体时，块体锥必然为一个几何上的空集，这一规律被称为有限性定理。

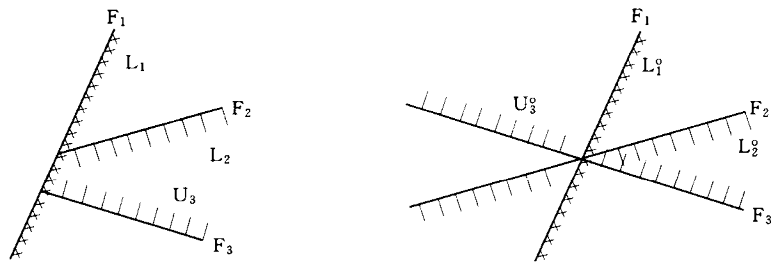
3. 有限性定理

如果一个凸形块体的块体锥是空集，那么它是有限块体；反过来，如果一个凸形块体的块体锥不是空集，那么这个块体不是有限的，这在关键块体理论中被称为有限性定理（Theorem of finiteness）。

图 1.5 是一个二维问题的例子。例中有一个开挖面（F_1）和两条裂隙（F_2，F_3），F_1 的下半空间、F_2 的下半空间和 F_3 的上半空间形成了一个无限块体［见图 1.5（a）］，块体的半空间定义形式可表示为 $L_1L_2U_3$。将这三个半空间平面移至一个共同点之后［见图 1.5（b）］，可以看出 $L_1^oL_2^oU_3^o$ 的共同部分位于图 1.5（b）右下部，不是一个空集合。

相反，图 1.6 是一个块体有限，而块体锥为空集合的例子。例中同样有一个开挖面（F_1）和两条裂隙（F_3，F_3），F_1 的下半空间，F_2 的下半空间和 F_3 的上半空间形成了一个有限块体［见图 1.6（a）］，块体的半空间定义形式可表示为 $L_1L_2U_3$。将这三个半空间平面移至一个共同点之后［见图 1.6（b）］，可以看出 $L_1^oL_2^oU_3^o$ 的共同部分不存在，也就是说块体锥的集合为空。

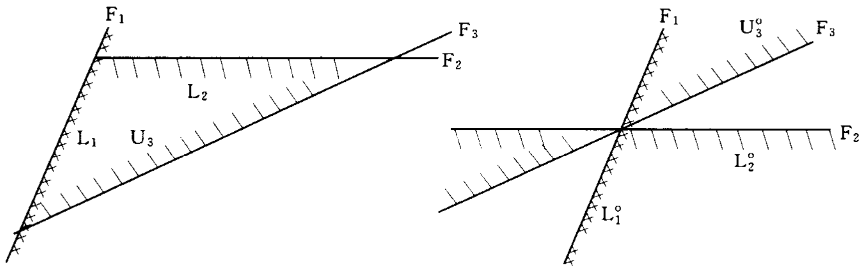
有限性定理是关键块体理论中的最基础概念。可以看出，无限大块体不是实际存在



(a) (b)

图 1.5 无限块体及其块体锥

(a) 无限块体；(b) 非空集合块体锥



(a) (b)

图 1.6 有限块体及其块体锥

(a) 有限块体；(b) 空集合块体锥

的块体，只是关键块体理论为了体系完整而建立的概念。有限性定理解决的是块体识别问题，只有有限块体存在时，才可能有关键块体，才会有接下来的关键块的多少、块体稳定性、支护设计、工程开挖优化等问题。

4. *可移动性定理*

一个凸形块体如果其块体锥为空集合，而节理面锥不是空集合则这个块体是可移动的；如果块体锥是空集合，而节理锥也是空集合则这个块体是不可移动的，这在关键块体理论中被称为有限凸形块体的可移动性定理。

可移动性定理描述了节理面锥和可移动性的关系。可移动块体的块体锥肯定是空集合，否则块体是无限的，即块体实际上不存在。可移动性定理也可简化为：一个凸形块体，如果其节理面锥是空集合则这个块体是不可移动的，如果节理面锥不是空集合则块体是可动的。

图 1.7 所示二维问题中有一个开挖面（F_1）和三条裂隙（F_2，F_3，F_4），F_1 的下半空间，F_2 的下半空间，F_3 的上半空间和 F_4 的上半空间形成了一个块体［见图 1.7 (*a*)］，根据图形的判断可知这是一个锥形块体（tapered）即不可移动块体，块体的半空间定义形式可表示为 $L_1L_2U_3U_4$。将裂隙面的三个半空间平面移至一个共同点之后［见图 1.7（*b*）］，可以看出 $L_2^oU_3^oU_4^o$ 的共同部分不存在，即是一个空集合。

图 1.8 中 F_1 的下半空间，F_2 的下半空间，F_3 的上半空间和 F_4 的上半空间形成了

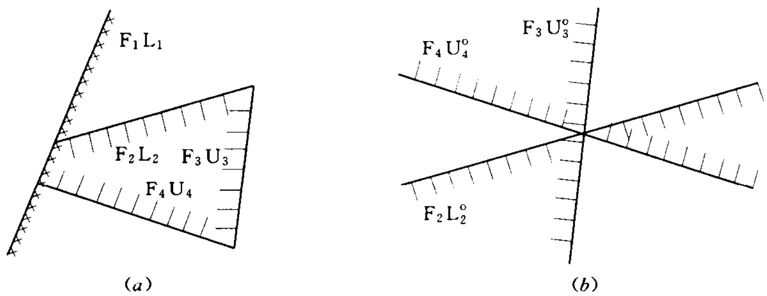


图 1.7 不可移动块体及其空集合节理面锥

(*a*) 不可移动块体；(*b*) 不可移动块体的空集合节理面锥

一个块体［见图 1.8（*a*）］，是一个可移动块体，块体的半空间定义形式可表示为 $L_1L_2U_3U_4$。将裂隙面的三个半空间平面移至一个共同点之后［见图 1.8（*b*）］，可以看出 $L_2^oU_3^oU_4^o$ 的共同部分位于图形左部，不是一个空集合。

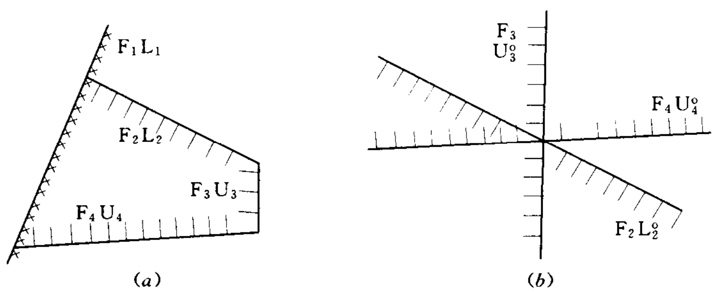


图 1.8 可移动块体及其非空集合节理面锥

(*a*) 可移动块体；(*b*) 可移动块体的非空集合节理面锥

以上通过例子说明了有限性定理和可移动性定理，其严格的数学证明请读者参考专门的关键块体文献。掌握下述基本规律将非常有利于对关键块体理论的理解。

（1）一个凸形块体是若干个半空间的共同区域，区域内任意两点的连线上的点都完全位于区域内部。一个半空间是一个无限的凸形块体。

（2）任何两个凸形块体的共同部分（交集）也是一个凸形块体。

（3）任意个半空间的共同部分（交集）定义一个凸形块体。

（4）假设下列不等式定义了一个有限凸形块体：

$$\left\{\begin{array}{l} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 \geqslant 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 \geqslant 0 \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ a_mx + b_my + c_mz + d_m \geqslant 0 \end{array}\right. \tag{1.3}$$

则下述不等式组中的未知数只有一个解：