

# 块体理论与数值模拟结合应用于 块裂岩质边坡稳定性分析\*

谭 鑫 傅鹤林 郭明香 沈 宏 田卿燕  
(中南大学)

**摘 要** 由于结构面的存在,块裂岩质边坡的完整性遭到破坏,并且岩体的力学性质和应力分布也直接受到影响,因此块裂岩质边坡稳定性分析十分复杂。块体理论是近年来发展和完善的一种适合于岩体稳定性分析的较行之有效的分析方法。但块体理论不能充分反映岩体结构面间的相互作用,而数值分析模拟具有可充分考虑岩体结构面间的相互作用的特点。应用块体理论,判识可移动块体类型及失稳模式,在确定可移动块体的基础上,结合数值分析模拟,对边坡稳定性进行分析,并且揭示块裂岩质边坡的失稳机理,为块裂岩质边坡稳定性分析提供一条新途径。

**关键词** 岩质边坡 结构面 块体理论 数值分析 FLAC3D

## Combined Application of Block Theory and Numerical Simulation in the Stability Analysis of Rocky Slope with Block Fracture

Tan Xin Fu Helin Guo Mingxiang Shen Hong Tian Qingyan  
(Central South University)

**Abstract** The existence of structural planes destroys the integrity of rocky slope with block fracture, which can directly affect the mechanical properties and stress distribution of rock mass, making the stability analysis of such slope very complex. The block theory is an efficient analysis method suitable for rock mass stability, which has been developed and improved in recent years. However, the block theory can not fully reflect the interaction between the structural planes of rock mass while numerical simulation can give a full consideration to this. In this paper, the block theory is used to identify the type and instability mode of movable blocks and, on the basis of the determination of movable blocks, the numerical simulation is also used to assist the analysis of slope stability and reveal the instability mechanism of rocky slope with block fracture, thus providing a new approach to the stability analysis of such slope.

**Keywords** Rocky slope, Structural planes, Block theory, Numerical analysis, FLAC3D

由于结构面的存在,块裂岩质边坡的完整性遭到破坏,并且岩体的力学性质和应力分布也直接受到影响,因此块裂岩质边坡稳定性分析十分复杂。

大量研究表明,岩质边坡崩塌块体往往由3组或4组结构面交切而成。大多数情况下,沿着某一组结构面发生垮塌、坠落;这些结构面和边坡临空面组合成为四面结构体或五面结构体<sup>[1]</sup>。针对这一特点,可根据取得野外实测结构面的产状数据,新近出现的块体理论对不同开挖面上的可移动块体类型、形态特征及失稳模式进行识别,为块裂岩质边坡稳定性提供了一条途径。但块体理论不能充分反映岩体结构面间的相互作用,因而影响了其分析结果的准确性。数值分析模拟具有可充分考虑岩体结构

面间的相互作用的特点。因此本研究应用块体理论,判识可移动块体类型及失稳模式,在确定可移动块体的基础上,结合数值分析模拟,对边坡稳定性进行分析,真正揭示块裂岩质边坡的失稳机理,为块裂岩质边坡稳定性分析提供一条新途径。

### 1 块体理论简介<sup>[2-3]</sup>

块体理论是20世纪80年代中期发展和完善起来的一种岩体工程稳定分析理论,由我国学者石根华和美国R. E. Goodman教授合作研究完成的,是借

\* 国家自然科学基金项目(编号:50878213),湖南省科技厅科技项目(编号:200506)。

谭 鑫(1984—),男,中南大学土木建筑学院,硕士,410075 湖南省长沙市。

助于拓扑学、集合论、几何学和矢量代数学,对块状岩体稳定性进行分析的一种新方法,在国际上得到了日益广泛的应用。

块体理论的基本假定为:①结构面为平面并贯穿所研究的岩体;②结构体为刚体;③岩体失稳首先是岩体在各种荷载作用下首先沿着结构面产生剪切位移。块体理论根据这些假定,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,进而应用几何方法详尽研究在已知各空间平面条件下,岩体将构成多少块体类型及其可动性,并给予严格的数学证明。

### 1.1 块体与棱锥的基本类型

(1)块体的基本类型。块体可分为有限块体和无限块体2大类,有限块体又可分为不可动块体和可动块体;可动块体又可分为稳定块体、可能失稳块体和关键块体。如图1所示。

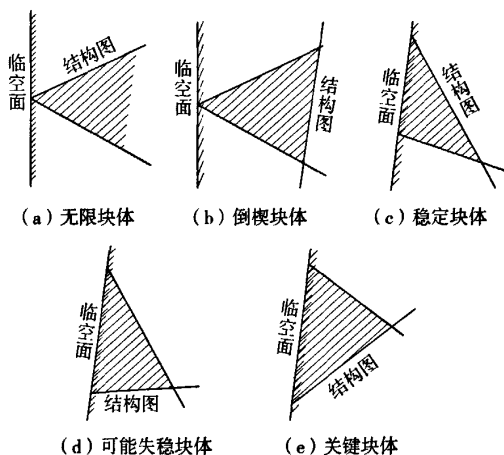


图1 块体类型的二维示意

(2)棱锥的类型。如果将空间各结构面和临空面平移,使之通过原点,则各空间平面将构成以坐标原点为顶点的一系列棱锥。棱锥有以下几种:①裂隙锥。仅以结构面为界的岩体半空间所构成的棱锥,符号为JP;②开挖锥。仅以临空面为界的岩体半空间所构成的棱锥,符号为EP;③空间锥。开挖锥以外的空间的锥体,符号为SP;④块体锥。由一个以上临空面和若干个结构面为界的岩体半空间所构成的棱锥,符号为BP。

(3)空间块体的数学描述。在解析几何空间中,岩体结构面的普遍方程可表达为

$$Ax + By + Cz = D. \quad (1)$$

结构面将全空间划分成两个半空间,则半空间

的表达式为

$$Ax + By + Cz \geq D. \quad (2)$$

若一个块体由  $n$  个半空间构成,其数学表达式为

$$\begin{aligned} A_1x + B_1y + C_1z &\geq D_1, \\ A_2x + B_2y + C_2z &\geq D_2, \\ &\vdots \\ A_nx + B_ny + C_nz &\geq D_n, \end{aligned} \quad (3)$$

亦即,  $n$  面块体可以用  $n$  个不等式来表达,它是  $n$  个半空间的交集。在式(1)~(3)中,都含有常数  $D$ ,其几何意义是表示平面、半空间和块体在空间的具体位置。

若平移各平面,使其通过坐标原点,则将上述各式中的常数  $D$  用0替换。令块体各界面通过原点则构成棱锥,亦即,棱锥是通过坐标原点的半空间的交集。

### 1.2 块体有限与可动性原理

岩体被结构面切割后,将形成无限块体和有限块体。人们感兴趣的是有限块体。块体有限定理为

$$JP \cap EP = \phi,$$

$\phi$  为空集。

块体有限的数学运算判别:若式(3)存在唯一解(0,0,0),则块体锥为空集,相应的块体为有限。反之,若(3)式有非零解,则块体锥为非空集,相应的块体为无限。

若由结构面和临空面共同组成的块体为有限,而仅由结构面构成的裂隙块体为无限,则该块体为可动;若由结构面和临空面共同构成的块体为有限,而仅由结构面构成的裂隙块体亦为有限,则该块体为不可动。数学表达为

$$JP \neq \phi, \text{ 且 } EP \cap JP = \phi \text{ 或 } JP \subset SP.$$

块体理论的研究方法首先通过几何分析,排除所有的无限块体和不可动块体;再通过运动学分析,找出在工程作用力和自重力作用下有可能失稳的块体;然后,根据滑动面的物理力学特性,确定工程开挖面上的关键块体,并采取相应的工程加固措施。

### 1.3 块体理论的特点和缺陷

块体理论的特点为:①块体理论完全是三维的;②块体理论的核心是寻找开挖临空面上的关键块体。对于需要保持开挖稳定的岩体工程,则需要是在开挖过程中,当关键块体完全暴露之前,加以工程处理;③块体理论研究的对象具有明显滑动面的空间岩体运动,只考虑结构面的抗剪强度,不考虑岩体本

身的强度破坏和变形;④与其它分析方法一样,块体理论的分析成果的可靠性取决于分析参数取值的准确程度,首先取决于结构的力学参数、值的准确性,其次取决于结构面产状的准确性。

块体理论的分析方法已取得很大成果,并日臻完善,但其不足之处仍然存在,表现在以下几个方面:①没有反映岩体内部结构的间断性;②现有的大多数研究方法都认为结构是无限延展的,块体的各个面都是完全独立的。尽管有些学者考虑了结构面,并分析其特征,但还远远不够,没有对块体各个面的连通情况作细致的研究;③在分析中,仅考虑了结构面产状的影响,未考虑结构面分布情况和尺寸特征对块体形成的影响;④不能区分块体大小对稳定性的影响,以及结构面的粘结系数对块体稳定性的影响。

因此本研究在块体理论的基础上引入数值分析,可以在一定程度上完善块体理论缺乏的部分,更加合理地反映岩质边坡失稳的机理。

## 2 FLAC 3D 数值分析

FLAC 3D(三维快速拉格朗日法)是一种基于三维显式有限差分法的数值分析方法,它可以模拟岩土或其他材料的三维力学行为。FLAC3D 程序将计算区域划分为若干六面体单元,每个单元在给定的边界条件下遵循指定的线性或非线性本构关系,如果单元应力使得材料屈服或产生塑性流动,则单元网格可以随着材料的变形而变形,由于采用了显式有限差分格式来求解场的控制微分方程,并应用了混合单元离散模型,所以这种算法非常适合模拟大变形问题<sup>[4]</sup>。

### 2.1 FLAC 3D 对岩体及结构面的模拟

FLAC 具有强大的适合模拟岩土材料的本构模型及结构模型。对于一般岩土体的材料及力学行为,通常采用摩尔-库仑塑性模型,它遵循摩尔-库仑强度准则。对于摩尔-库仑本构模型相关资料介绍较多,本研究不再赘述,下面重点介绍对结构面模型的数值模拟。

FLAC 提供接触单元用来模拟那些在地质力学中可能发生滑动和分离的平面,因此可以利用接触单元来模拟地质体当中的节理、断层或岩层面等结构面。

FLAC 3D 用三角形接触单元的集合来形成界面,每一个接触单元通过 3 个结点(接触结点)进行定义<sup>[5]</sup>。接触单元通过结点与交界面一侧的网格

表面相连接,当另一组网格表面与接触单元发生连接时,两者在接触结点处分离开来,并通过法向和切向刚度以及滑动性质来定义它们之间的联系。每个接触单元通过结点将它的区域划分成合适的形式,每一个接触结点与之相关的等代区域相联系。图 2 说明了界面单元和界面结点以及单个结点所联系的“等代面积”之间的关系。基本的连接关系在区域表面即目标面与接触结点之间定义,由目标面的方向来确定接触力的法向方向。

在每个计算时步中,任何接触结点和与之相连的目标面的法向位移及相关剪切速率都将被计算。然后接触本构模型利用这些数值计算出法向和切向力矢量。接触本构模型采用线性的 Coulomb 剪切强度准则。图 3 说明了接触结点 P 所采用的本构模型。

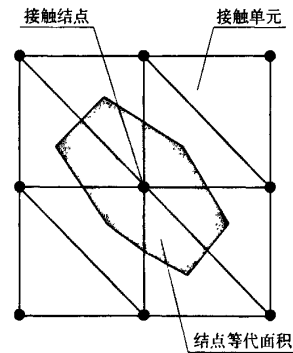


图 2 接触结点等代面积的分配

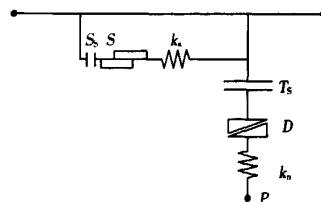


图 3 接触本构模型的组成

$S$  - 滑动面;  $T_s$  - 抗拉强度;  $S_s$  - 剪切强度;

$D$  - 膨胀角;  $k_s$  - 剪切刚度;  $k_n$  - 法向刚度

接触单元数值求解方案:每一个计算时步的法向和切向力矢量通过下面的关系式确定

$$\begin{aligned} F_n^{(t+\Delta t)} &= k_n u_n + \sigma_n A, \\ F_{si}^{(t+\Delta t)} &= F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{[t+(1/2)\Delta t]} A + \sigma_{si} A, \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $F_n^{(t+\Delta t)}$  为计算时步  $(t + \Delta t)$  时的法向力, N;  $F_{si}^{(t+\Delta t)}$  为计算时步  $(t + \Delta t)$  时的切向力, N;  $u_n$  为接触结点向目标面发生的绝对位移, m;  $\Delta u_{si}$  为剪切位移矢量的增量, m;  $\sigma_n$  为初始接触应力所产生的附加法向应力, N/m;  $k_n$  为法向刚度, Pa/m;  $k_s$  为切向刚度,

$Pa/m; \sigma_{si}$  为初始接触应力所产生的附加切向应力,  $Pa$ ;  $A$  为接触结点相关的“等代面积”,  $m^2$ 。

2.2 岩质边坡数值分析实例

贵毕公路 (k79 + 380) ~ (k79 + 500) 右边坡基岩为灰岩, 局部基岩裸露, 为深灰色, 中风化, 中厚层状, 且岩体连续性和完整性均较差, 岩石较破碎, 已有危岩出现, 危岩时有向下垮塌的危险, 发育有 4 组节理, 其节理产状:  $J_1$  为  $225^\circ \angle 71^\circ$ ,  $J_2$  为  $120^\circ \angle 84^\circ$ ,  $J_3$  为  $123^\circ \angle 10^\circ$ ,  $J_4$  为  $174^\circ \angle 87^\circ$ , 边坡面为临空面,  $P_5$  为  $65^\circ$ , 倾向为  $226^\circ$ ,  $P_6$  为  $15^\circ$ , 倾向为  $220^\circ$ 。

经块体理论判识, 由  $J_1J_2J_3J_4$ 、 $P_5$ 、 $J_2J_3J_4$  及  $P_5J_1J_3J_4P_6$  切割而成的多面体为可动块体。

选取其中 3 组结构面  $J_1J_2J_4$  进行简化建立网格模型, 如图 4 所示。采用摩尔-库仑模型模拟岩体, 接触单元模拟结构面, 各力学参数按照经验数据选取如表 1 和表 2 所示。

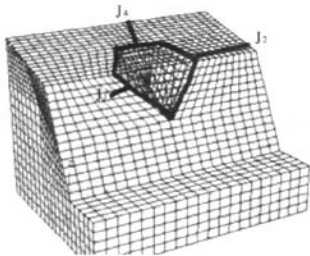


图 4 边坡模型网格

表 1 岩体力学参数

密度 /( $kg/m^3$ )	摩擦角 /( $^\circ$ )	粘聚力 /MPa	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	抗拉强度 /MPa
2 700	40	9	2 000	1 000	6

表 2 结构面力学参数

摩擦角 /( $^\circ$ )	粘聚力 /MPa	法向刚度 /MPa	切向刚度 /MPa	抗拉强度 /Pa
25	1	150	100	1 000

采用自重压力给模型赋予初始应力, 一次性开挖后, 边坡  $z$  轴方向应力分布见图 5。结构面的存在给应力分布造成了比较大的影响, 在  $J_4$  结构面上部出现了零应力区域, 表示该结构面在开挖后块体自重下可能已经被拉裂。坡体中剖面上的  $z$  轴方向应力分布和网格点位移矢量见图 6, 结构面上剪应力分布见图 7。被结构面切割的块体产生了矢量箭头所示的运动趋势, 而坡体位移几乎为零, 表明了开挖后坡体稳定性丧失是由于块体结构的不稳定造成的。

$J_4$  结构面剪应力为零, 表示该结构面已经完全

拉裂。监测块体结构上一点的  $z$  方向位移随时步变化历史见图 8, 位移曲线无法收敛, 块体结构产生持续下滑, 边坡产生破坏。

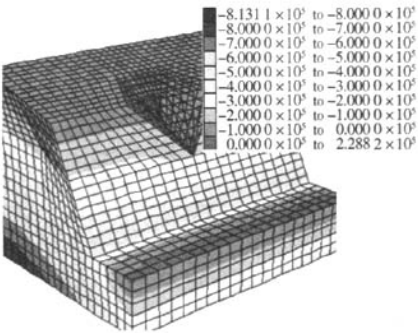


图 5 开挖后  $z$  轴方向应力分布

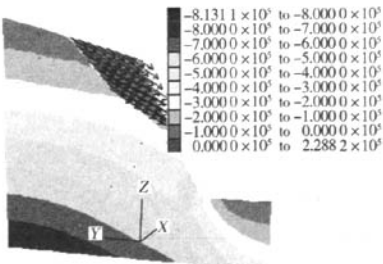


图 6 剖面  $z$  轴方向应力分布与位移矢量

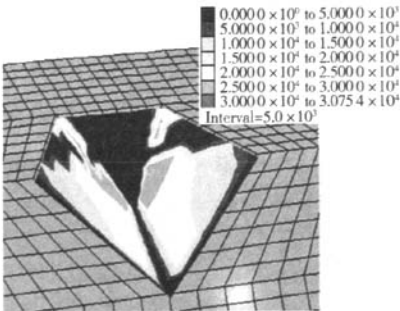


图 7 结构面上剪切应力分布

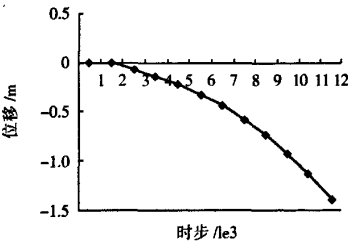


图 8 块体上一点的  $z$  方向位移历史

(下转第 68 页)

明通过添加氢氧化钠来调节矿浆 pH,在同等条件下,可以减少一半硫化钠用量,并且获得较好的浮选指标。

表 3 氢氧根浓度试验结果

氢氧化钠 用量 /(g/t)	产品名称	产 率 /%	锌精矿 品位/%	锌回收率 /%	pH 值
2	精矿	25.63	23.99	43.48	9~9.5
	尾矿	74.37	10.75	56.52	
	原矿	100.00	14.14	100.00	
20	精矿	39.45	28.15	78.54	10~10.5
	尾矿	60.55	5.01	21.46	
	原矿	100.00	14.14	100.00	
200	精矿	42.98	27.82	84.57	10.5~11
	尾矿	57.02	3.83	15.43	
	原矿	100.00	14.14	100.00	
2 000	精矿	17.45	22.56	27.84	12~12.5
	尾矿	82.55	12.36	72.16	
	原矿	100.00	14.14	100.00	

异极矿实际矿石试验的结果与纯矿物试验的结果完全一致,进一步证实了在 pH=9~11 范围内,氢氧根离子与硫氢根离子的协同效应可以促进硫氢根对异极矿的活化作用,提高异极矿的回收率。

3 结 论

(1)纯矿物试验结果表明,pH 在 9~11 的范围内,氢氧根离子与硫氢根离子的协同效应,可以提高异极矿的回收率。在硫化钠活化异极矿表面的过程中,硫氢根离子起主要作用,同时氢氧根离子有一定的活化作用。氢氧根离子与硫氢根离子的协同效

应,可以促进硫氢根离子对异极矿表面的活化,从而降低硫化钠的活化浓度。

(3)实际矿石试验结果表明,异极矿的浮选需要在较高的硫化钠用量(14.28 kg/t)下,才能获得比较好的浮选指标:锌精矿品位 28.72%,锌回收率 89.10%。而通过联合使用氢氧化钠和硫化钠,只需要一半的硫化钠用量(7.13 kg/t)就可以获得较好的浮选指标:锌精矿品位达 27.82%,锌回收率达 84.57%。这说明氢氧根离子与硫氢根离子的协同效应适用于实际矿石的浮选,在较少硫化钠用量条件下可以实现异极矿的回收利用。

参 考 文 献

- [1] 方启学. 西部氧化铅锌资源提取基本思路探讨[J]. 矿冶, 2002(增刊):75-78.
- [2] 徐晓军,羊依金,刘邦瑞. 羟肟酸-羟肟酸加中性油浮选氧化锌矿的研究[J]. 云南冶金,1990(4):29-32.
- [3] 朱建光,赵景云. 铜铁灵浮选硫酸铅和菱锌矿研究[J]. 中南矿冶学院学报,1991,22(5):522-528.
- [4] 冷 娥,汪 伦,刘邦瑞. 应用有机螯合剂活化异极矿的研究[J]. 有色金属,1991,43(1):44-49.
- [5] 冯家祥,杨 敖,石道民. 菱锌矿-石英体系选择性絮凝研究[J]. 1992(4):24-27.
- [6] 文书明,张文彬,刘邦瑞. 无机硫代类活化剂对异极矿胺法浮选的影响[J]. 昆明工学院学报,1994,19(5):112-114.
- [7] 王淀佐,胡岳华. 浮选溶液化学[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1989:32-36.

(收稿日期 2009-01-16)

(上接第 27 页)

3 结 论

块体理论是分析块裂岩质边坡稳定性行之有效的方法,利用块体理论能够合理地识判岩质边坡开挖后可移动块体的类型及失稳模式,但块体理论仅从几何方面考虑其稳定性还不能充分揭示块裂岩质边坡失稳的机理。在块体理论判识可动块体的基础上引入数值分析,采用 FLAC 3D 对存在结构面的岩质边坡进行开挖模拟,能够考虑岩体应力应变非线性特点以及结构面相互作用机理,能较好地反映块体的真实应力应变情况。两者相结合,可以为岩质边坡岩块稳定性评价提供一定的指导依据。

但是,无论块体理论还是数值分析,其结果的可靠性都取决于计算参数的正确与否。各种参数如结

构面产状、结构面和岩体本构模型的力学参数等的正确选取,还需要做更多的研究工作。

参 考 文 献

- [1] 傅鹤林. 块裂岩质边坡稳定性理论分析模型及工程应用研究[D]. 长沙:中南大学,2000.
- [2] Goodman R E,Shi G H. Block theory and It's application to rock engineering[M]. Englewood: Prentice-Hall Inc, 1985.
- [3] 刘锦华,吕祖琦. 块体理论在工程岩体稳定分析中的应用[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [4] 寇晓东,周维垣,杨若琼. FLAC-3D 进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(1):6-10.
- [5] FLAC-3D(Fast Langrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) User's Manual [M]. [S. l.]: Itasca Consultitiog Goup, Inc. 2003.

(收稿日期 2009-01-10)