

# 块体理论在边坡稳定分析中的应用

杨慧敏, 戴兴国

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 介绍了块体理论的原理、研究方法和适用情况, 结合国道某省境内某段公路岩质边坡实例, 介绍了块体理论在岩质边坡稳定性分析中的应用, 指出在确定可动块体时, 用赤平投影法比矢量法快捷, 在分析可动块体的稳定性时, 矢量法比较简便。

**关键词:** 块体理论; 赤平投影; 矢量法; 岩质边坡; 稳定性

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2009)04-0016-04

## Application of Block Theory in Analyzing Slope Stability

Yang Huimin · Dai Xingguo

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Presents the principle, the research methods and the applicable condition of block theory. On the basis of an example of rocky slope on a certain part of national highway, introduces the application of block theory in analysis of rock slope stability. Indicates that stereographic projection in determining movable block is quicker than vector analyzing method and the vector analyzing method is simpler in analyzing the movable block stability.

**Keywords:** block theory; stereographic projection; vector analyzing method; rocky slope; stability

## 0 引言

边坡稳定性问题一直是岩土工程的一个重要研究内容。随着国民经济建设的蓬勃发展, 铁路、公路、水利水电、矿山等工程的高陡边坡越来越多, 崩塌的问题更加突出。为了防止崩塌地质灾害的发生, 有计划、有重点地对边坡进行整治, 对边坡崩塌稳定性进行分析就变得更加迫切<sup>[1]</sup>。大量的研究表明, 崩塌现象的发生绝大部分与岩体结构面有关。结构面是地质历史发展过程中在岩体内形成的具有一定方向、一定规模、一定形态和特性的地质界面, 由于结构面的存在, 不仅破坏了岩体的完整性, 而且直接影响岩体的力学性质和应力分布形态<sup>[2-4]</sup>。根据岩体复杂的结构特点, 近年来发展起来一种基于图解法和矢量分析法的块体理论分析法。以下结合工程实例, 介绍块体理论在岩质边坡稳定性分析中的应用。

## 1 块体理论的原理及研究方法

### 1.1 原理

块体理论是20世纪80年代由我国学者石根华和美国R.E.Goodman教授合作研究完成的<sup>[5]</sup>。它借助于拓扑学、集合论、几何学和矢量代数学, 对块裂岩体稳定性进行分析。

块体理论的基本假定为<sup>[6]</sup>:

- 1) 结构面为平面;
- 2) 结构面贯穿所研究的岩体(即结构面假设为无限延伸);
- 3) 结构体为刚体, 不计块体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。

块体理论根据这些假定, 首先将结构面和开挖临

收稿日期: 2009-03-12

作者简介: 杨慧敏(1985-), 女, 湖南长沙人, 中南大学资源与安全工程学院硕士研究生, 主要研究方向为隧道, 边坡稳定,

E-mail: [muyi0914@163.com](mailto:muyi0914@163.com)

空面看成空间平面, 将结构体视为凸体, 各种作用荷载视为空间向量, 进而应用几何方法详尽研究岩体将构成多少块体类型及其可动性 (在已知各空间平面条件下), 并给予严格的数学证明。

在坚硬和半坚硬岩层中, 岩体被结构面切割成各种形状的空间块体, 在自然状态下, 这些空间块体处于静力平衡状态。当进行边坡开挖时, 暴露在临空面上的某些块体失去平衡, 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。一般称这些首先发生失稳的块体为“关键块体”, 找出由结构面和临空面切割形成的关键块体, 判断其在重力和外荷载作用下的稳定性及稳定所需要的锚固力是边坡稳定性分析的核心, 也是边坡设计和实施加固的依据。

### 1.2 研究方法<sup>[7-8]</sup>

用块体理论分析边坡稳定性的方法有3种: 1) 赤平投影图解法——该法简便、直观, 无须复杂的数学计算; 2) 矢量运算法——该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; 3) 赤平投影解析法 (矩阵运算法)——该法是通过结构面赤平投影方程, 用矩阵的形式表示出结构面与结构面的位置关系, 空间块体与结构面的位置关系, 通过矩阵运算, 给出全部块体理论分析结果。这3种分析方法是相对独立的, 但分析结果是一致的, 3种方法可以相互检校。在实际工作中, 一般用赤平投影图解法判断块体可动性, 再用解析法或矢量运算法计算分析可动块体的滑动形式及滑动力, 以分析其稳定性。值得一提的是, 块体理论与其它分析方法一样, 其分析成果的可靠性取决于参数的准确性, 即结构面力学指标  $C_1$ 、 $\varphi$  值的准确性和结构面产状取值的准确性。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

国道某省境内某段公路岩质边坡走向近南北, 边坡主要由泥岩组成, 坡内主要分布2组斜交结构面  $P_1$ 、 $P_2$ , 自然坡面  $P_3$ 、开挖坡面  $P_4$ , 结构面产状的力学参数实测结果见表1, 其产状见图1~4。依据现场实测结果, 岩体结构类型为块裂结构, 宜用块体理论分析其稳定性。

表1 结构面和边坡产状的力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of slopes and weak planes

边坡面	走向 $\alpha/^\circ$	倾向 $\beta/^\circ$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
结构面 $P_1$	57.8	343	29
结构面 $P_2$	42.2	205	37
自然坡面 $P_3$	23.0	263	
开挖坡面 $P_4$	74.0	263	

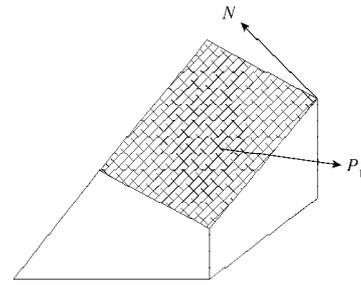


图1 结构面  $P_1$  产状示意图

Fig. 1 Strike-dip of slope  $P_1$

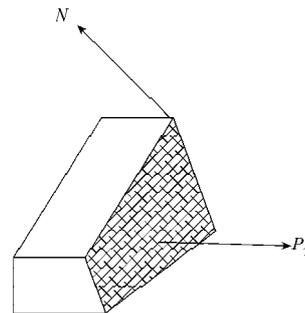


图2 结构面  $P_2$  产状示意图

Fig. 2 Strike-dip of slope  $P_2$

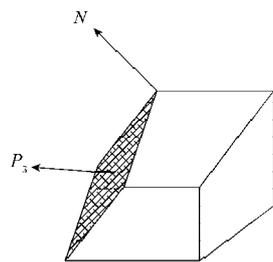


图3 自然坡面  $P_3$  产状示意图

Fig. 3 Strike-dip of slope  $P_3$

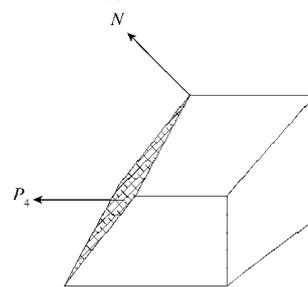


图4 开挖坡面  $P_4$  产状示意图

Fig. 4 Strike-dip of slope  $P_4$

### 2.2 可动块体判断

#### 2.2.1 用赤平投影图解法判断可动块体

取参照圆半径  $R=2$ , 根据直角坐标法: 赤平投影图直角坐标系以参照圆心为原点, 正东向为  $x$  轴, 正北向为  $y$  轴, 则平面  $P$  的投影圆半径为  $r$ , 圆心坐标为  $C_x$  和  $C_y$ , 故有:

$$r=R/\cos \alpha, C_x=R \tan \alpha \sin \beta, C_y=R \tan \alpha \cos \beta。$$

计算出以上各平面的投影大圆半径和圆心的直角

坐标, 其计算结果如表 2。

表 2 R=2 时投影圆的半径 r 和圆心坐标 (C<sub>x</sub>, C<sub>y</sub>)

Table 2 Radius r and center coordinates (C<sub>x</sub>, C<sub>y</sub>) of the projection circle(R=2)

边坡面	走向 α/°	倾向 β/°	r	C <sub>x</sub>	C <sub>y</sub>
P <sub>1</sub>	57.8	343	3.75	-0.93	3.04
P <sub>2</sub>	42.2	205	2.69	-0.77	-1.64
P <sub>3</sub>	23.0	263	2.17	-0.84	-0.10
P <sub>4</sub>	74.0	263	7.26	-6.92	-0.85

通过计算结果可以作出该边坡的赤平投影图, 如图 5 所示。

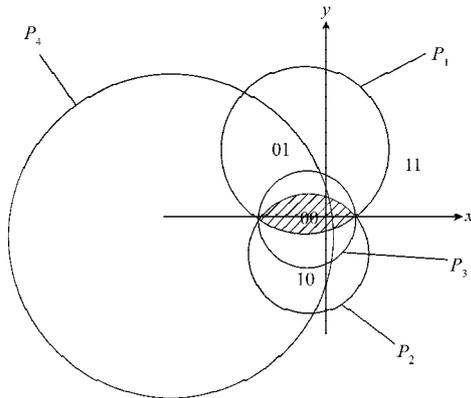


图 5 该边坡赤平投影图

Fig. 5 The stereographic projection of the slope

由图 5 知, 由两结构面 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 所组成的裂隙块体总数为 4 个, 即无限裂隙块体为 4 个, JP 为 00, 01, 10, 11。开挖锥 EP=L<sub>3</sub>∩L<sub>4</sub>, 可以看出, 仅有 JP<sub>00</sub>∩EP=∅ (∅ 为空集), 且 JP<sub>00</sub>≠∅, 由可动性定理可知, 只有 JP<sub>00</sub>∩EP 为可动块体, 即自然边坡, 开挖面的共同下盘和 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 的上盘交集块体为可动块体。

2.2.2 用矢量法判断可动块体的移动方向

在分析该块体滑动时假设仅有重力  $\hat{r}$  作用, 其大小为  $W=w(v, \gamma)$ , 方向  $\hat{r}=(0, 0, -1)$ , 安全系数取 1.2, 可动块体的运动方向为  $\hat{s}$ , 结构面指向上部的单位法线矢量为  $\hat{v}_1$ , 分析各种可能的滑动形式。

1) 计算各结构面单位法向矢量

$$\hat{n}_i=(A, B, C)=(\sin \alpha^{\circ} \sin \beta^{\circ}, \sin \alpha^{\circ} \cos \beta^{\circ}, \cos \alpha^{\circ})$$

则 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 的向上单位法向矢量分别是:

$$\hat{n}_1=(-0.2474, 0.8092, 0.5329),$$

$$\hat{n}_2=(-0.2838, -0.6088, 0.7408)。$$

2) 计算所有可能的移动方向

由于边坡开挖后块体滑动时仅可能与 1 个或 2 个面接触, 且为事前没有任何支护的空间滑动, 故其基本是在重力作用下的向空间自由滑动。其主动力  $\hat{r}=(0, 0, -W)$ , 沿单面滑动

$$\hat{s}=\hat{s}_i=\frac{\left(\hat{n}_i \times \hat{r}\right) \times \hat{n}_i}{\left|\hat{n}_i \times \hat{r}\right|}$$

$$\hat{s}_1=(-0.1558, 0.5096, -0.8462),$$

$$\hat{s}_2=(-0.3130, -0.6714, -0.6717)。$$

沿双面滑动:

$$\hat{s}=\hat{s}_{ij}=\frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{\left|\hat{n}_i \times \hat{n}_j\right|} \operatorname{sign}\left[\left(\hat{n}_i \times \hat{n}_j\right) \cdot \hat{r}\right],$$

$$\hat{s}_{12}=(-0.9243, -0.0320, -0.3805)。$$

3) 计算相应各运动形式的可动块体沿单面滑动当块体沿单面 i 滑动时, 必须满足 2 个运动学条件:

①合力且使块体不脱离滑动面 i, 即  $\hat{r} \cdot \hat{v}_i \leq 0$ ;

②块体的运动方向  $\hat{s}$  使各结构面 (除结构面 i 以外) 与岩体脱离, 即  $\hat{s} \cdot \hat{v}_i > 0$ , 已知  $\hat{n}_i$  为结构面 i 的向上法线矢量, 所以当  $\hat{s} \cdot \hat{v}_i > 0$  时, 有  $\hat{v}_i = \hat{n}_i$ , 而当  $\hat{r} \cdot \hat{v}_i \leq 0$  时, 有  $\hat{v}_i = -\hat{n}_i$ , 所以可以得到:

$$\hat{v}_i = -\operatorname{sign}\left(\hat{r} \cdot \hat{n}_i\right) \hat{n}_i, \hat{v}_i = \operatorname{sign}\left(\hat{s} \cdot \hat{n}_i\right) \hat{n}_i,$$

l 为块体各结构面,  $l \neq i$ 。

沿 P<sub>1</sub> 面滑动时, 即:  $\hat{s}=\hat{s}_1$ ,

$$\hat{v}_1 = -\operatorname{sign}(-0.5329) \hat{n}_1 = \hat{n}_1,$$

$$\hat{v}_2 = \operatorname{sign}(-0.8929) \hat{n}_2 = -\hat{n}_2,$$

得出沿 P<sub>1</sub> 单面移动的裂隙块体为 U<sub>1</sub>∩L<sub>2</sub>。同理可得出, 沿 P<sub>2</sub> 单面移动的裂隙块体为 L<sub>1</sub>∩U<sub>2</sub>。

4) 计算相应各运动形式的可动块体沿双面滑动

当块体沿双面滑动时, 合力 R 必须使块体与滑动面 i 和 j 接触, 即要满足  $\hat{s}_i \cdot \hat{v}_j \leq 0$  和  $\hat{s}_j \cdot \hat{v}_i \leq 0$ , 并且运动方向  $\hat{s}$  使各结构面 (除结构面 i 和 j 以外) 均与岩体脱离, 即要满足  $\hat{s} \cdot \hat{v}_l > 0$  (l 为块体各结构面, 且  $l \neq i \neq j$ ), 则

$$\text{可得到: } \hat{v}_i = -\operatorname{sign}\left(\hat{s}_j \cdot \hat{n}_i\right) \hat{n}_i,$$

$$\hat{v}_j = -\operatorname{sign}\left(\hat{s}_i \cdot \hat{n}_j\right) \hat{n}_j。$$

沿 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 双面移动时, 即

$$\hat{v}_1 = -\operatorname{sign}(-0.8238) \hat{n}_1 = \hat{n}_1,$$

$$\hat{v}_2 = -\operatorname{sign}(-0.8929) \hat{n}_2 = \hat{n}_2。$$

得沿 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 双面移动的裂隙块体为: U<sub>1</sub>∩U<sub>2</sub>。

根据赤平投影图形判断, 只有 U<sub>1</sub>∩U<sub>2</sub> 为可动块体, 其运动方向  $\hat{s}$  为 (-0.9243, -0.0320, -0.3805)。

2.2.3 可动块体稳定性分析<sup>[7]</sup>

块体沿双面滑动时净滑力计算公式为 (不计粘聚

$$\text{力): } \frac{F}{k} = \frac{1}{\left|\hat{n}_1 \times \hat{n}_2\right|^2} \left[ \left| \hat{r} \cdot \left(\hat{n}_1 \times \hat{n}_2\right) \right| \left| \hat{n}_1 \times \hat{n}_2 \right| -$$

$$\frac{1}{k} \left[ \left( \hat{r} \times \hat{n}_2 \right) \cdot \left( \hat{n}_1 \times \hat{n}_2 \right) \right] \tan \varphi_1 - \frac{1}{k} \left[ \left( \hat{r} \times \hat{n}_1 \right) \cdot \left( \hat{n}_1 \times \hat{n}_2 \right) \right] \tan \varphi_2 \right],$$

由上面分析已知  $\hat{n}_1$ 、 $\hat{n}_2$ 、 $\hat{n}$ 、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ , 从而求出

$$\frac{F}{k} = 0.3475W。$$

依据现场实测  $P_3$ 、 $P_4$  面交线被  $P_1$ 、 $P_2$  面切割的长度, 计算得: 滑动块体体积  $V=68.25 \text{ m}^3$ , 岩体容重为  $2850 \text{ kg/m}^3$ ,  $W=194510 \text{ kg}$ ,  $k=1.2$ , 则  $F=81110 \text{ kg}$ , 所以得所需抗滑力为  $N=81110 \text{ kg}$ , 据此可做锚固设计。

### 3 结语

块体理论分析法是分析块裂岩体稳定的一种有效方法, 其在求开挖临界坡度(边坡走向确定时)、开挖临界走向(边坡坡度确定时)时, 可使边坡保持自身稳定的情况下将开挖及锚固工程的费用降到最低, 对边坡的设计和施工有指导作用。经实际应用发现, 用全空间赤平投影法确定可动块体比矢量法简便, 而在进行稳定性分析时, 用矢量分析法分析比赤平投影法快捷, 故在实际工程分析中应将两者结合, 使块体理论的应用更加方便和有效。

#### 参考文献:

- [1] 郭建峰, 傅鹤林, 周宁. 块体理论在潜在崩塌体稳定性分析中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 14-16.  
Guo Jianfeng, Fu Helin, Zhou Ning. Application of Block Theory in Stability Analysis of Potential Rockfall Masses[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(3): 14-16.
- [2] Wang Z Q. Study on Stereoscopic Monitoring and Prediction Model of Slope Engineering System on Complicated Conditions[C]//Proc. of Inter. Conf.99 Mining Science & Technology. Netherlands: Balkma Publishers, 1999: 423-426.
- [3] 廖国燕, 伍佑伦, 徐东升. 块体理论在金属矿山关键块体辨识中的应用[J]. 金属矿山, 2007(5): 21-24.  
Liao Guoyan, Wu Youlun, Xu Dongsheng. Application of Block Theory in Key Block Identification in Metal Mines[J]. Metal Mine, 2007(5): 21-24.
- [4] 傅鹤林, 彭思甜, 韩汝才, 等. 岩土工程数值分析新方法[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006: 145-162.  
Fu Helin, Peng Sitian, Han Rucai, et al. A New Method in Numerical Analysis of Geotechnical Engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2006: 145-162.
- [5] 黄正加, 邬爱清, 盛谦. 块体理论在三峡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 648-652.  
Huang Zhengjia, Wu Aiqing, Sheng Qian. Usage of Block Theory in the Three Gorges Projects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 648-652.
- [6] 刘德仁, 梁波. 北岭隧道围岩随机块体的稳定分析[J]. 兰州交通大学学报: 自然科学版, 2005, 24(1): 54-55.  
Liu Deren, Liang Bo. Stability Analysis of Random Key Block of Surrounding Rock of Beiling Tunnel[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University: Natural Sciences, 2005, 24(1): 54-55.
- [7] 李素梅. 块体理论在岩石路堑边坡稳定分析中的运用[J]. 云南交通科技, 2003, 19(4): 14-16.  
Li Sumei. Application of Block Theory in Analysis of Stability of Rocky Cut Slope[J]. Yunnan Communication Science and Technology, 2003, 19(4): 14-16.
- [8] 高正. 块体理论在岩质边坡稳定分析中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.  
Gao Zheng. Applied Research on Block Theory in Analyzing Rocky Slope Stability[D]. Xi'an: Chang An University, 2005.

(责任编辑: 张亦静)