

文章编号:0253-9993(2010)08-1283-04

# 无明显滑面岩质边坡稳定性研究

言志信<sup>1,2</sup>, 段建<sup>1,2</sup>, 王后裕<sup>3</sup>

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 空军工程设计研究局, 北京 100077)

**摘要:**依据岩体结构面及其抗剪强度特性对岩质边坡稳定性的控制作用, 基于岩体结构面网络及其工程边界条件, 搜索边坡所有可能的滑移路径。应用 Lajtai、Einstein 理论及等效 Mohr-Coulomb 屈服准则, 分别计算岩桥和结构面的抗滑力和下滑力, 进而获得了严密的安全系数计算式, 并确定不同滑移路径上各区段抗滑储备大小和总抗滑储备。进行不同滑移路径安全系数、总抗滑储备、总抗滑储备密度的对比研究, 探索无明显滑面岩质边坡的危险滑移路径及其稳定性研究方法, 并通过算例阐明: 安全系数和总抗滑储备密度用于岩质边坡稳定性评价是可行的。

**关键词:**岩质边坡稳定性; 滑移路径; 总抗滑储备密度; 安全系数

**中图分类号:** TU43 **文献标志码:** A

## Study on the stability of rock slope without obvious sliding surface

YAN Zhi-xin<sup>1,2</sup>, DUAN Jian<sup>1,2</sup>, WANG Hou-yu<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Air Force Engineering Design & Research Bureau, Beijing 100077, China)

**Abstract:** According to the rule that rock mass structure plane and its shear strength properties were dominant in controlling the stability of rock slope, on the basis of rock mass structure plane network and its engineering boundary conditions, every possible slide path of rock slope was searched. By applying the theory of Lajtai and Einstein, Equivalent Mohr-Coulomb Yield Criterion, anti-slide force and sliding force of rock bridge and structure plane were calculated. Furthermore, got a rigorous formula for calculating safety coefficients; and moreover, skid-resisting reserve on each section of different slide paths and total skid-resisting reserve were ascertained. The comparative research of different slide path safety coefficients, total skid-resisting reserve and the density of total skid-resisting reserve was established. The research method for exploring dangerous slide path and stability of rock slope without obvious slip surface was studied. The example shows that applying safety coefficients and density of total skid-resisting reserve in assessing rock slope stability is feasible.

**Key words:** rock slope stability; slide path; density of total skid-resisting reserve; safety coefficient

岩体是在漫长的地质历史演化过程中形成的, 其成因和构造复杂, 岩性多样<sup>[1]</sup>, 由结构面和结构体两种基本结构单元构成。就一般岩石而言, 边坡稳定性的最主要的影响因素并非岩石的性质, 结构面对于岩体和边坡的失稳破坏起着主要的控制作用<sup>[2]</sup>, 并在岩体工程的设计与施工中占有重要的地位。

对于无明显滑面岩质边坡, 基于岩体结构面网络, 运用数值分析方法, 定量研究无明显滑面岩质边

坡稳定性, 能为此类岩质边坡的加固设计与施工提供科学依据和指导。

### 1 无明显滑面岩质边坡滑移路径

基于岩体结构面网络和边界条件, 在靠近岩体结构边坡表面附近选择满足一定条件的一条结构面作为初始基准结构面, 由此基准结构面端点确定一个搜索区域, 一般为 1/4 的直角扇形区域, 在搜索区域内

收稿日期: 2010-03-30 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672191); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20090211110016); 甘肃省自然科学基金资助项目(096RJZA048)

作者简介: 言志信(1961—), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士后。E-mail: yzx10@163.com, yanzhx@lzu.edu.cn

搜索所有包含其内的岩体结构面,从中选择满足特定条件的一结构面作为新的基准结构面,继续搜索循环,直至边界,最后按照搜索循环步骤首尾连接所有这些搜索到的基准结构面,对于该初始基准结构面可搜索到一系列的滑移路径,形成一树枝形结构<sup>[3]</sup>。按上述搜索基本思想,对靠近边坡每条满足条件的初始基准结构面进行循环搜索,从而可确定无明显滑面岩质边坡所有可能的滑移路径<sup>[4-7]</sup>。

在计算区域内搜索滑移路径时,必须先确定初始的基准结构面,将以此作为初始步,初始基准结构面应满足 3 个假设条件:① 结构面必须位于计算区域内;② 结构面端点距边界的距离不大于平均迹长;③ 结构面的视倾角  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ 。根据这些条件对计算区域内的所有结构面进行筛选,可确定所有满足上述条件的初始基准结构面,其可能有多条,如图 1 所示。

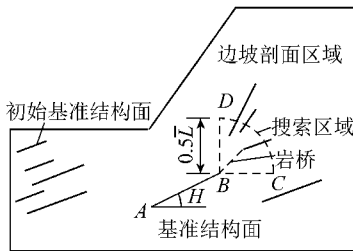


图 1 初始基准结构面及搜索区域的确定  
Fig. 1 The determination of initial reference structural plane and search area

假设  $AB$  为搜索到的某一条基准结构面,在结构面端点  $B$  点,以平均迹长的一半为半径,即  $r = 0.5\bar{L}$ ,其中,  $r$  为搜索半径;  $\bar{L}$  为平均迹长长度。作  $1/4$  的直角扇形区域,如图 1 中  $BCD$  区域所示,则此扇形即为所要确定的搜索区域。

在搜索区域内确定所有满足下述条件的结构面:  
① 结构面至少有一端点位于搜索区域内;② 结构面任一端点和  $B$  点的连线与水平方向的夹角满足  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$  的条件;③ 结构面的视倾角满足  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ;④ 与基准结构面相交以及重叠不相交的特殊结构面,也得考虑将它作为一待选基准结构面。基于岩体结构的复杂性,在搜索区域内可能会出现多条待选基准结构面。若搜索区域内没有待选基准结构面,则判断是否已接近边界,判断依据为结构面端点到计算区域边界的距离小于搜索半径,若判别条件成立,即接近边界,则结束搜索;否则,加倍搜索半径,继续搜索,直至边坡边界<sup>[8-9]</sup>。根据上述搜索原则,从计算区域内的每一条初始基准结构面出发,都可搜索出相应的一系列的滑移路径,形成树枝形结构形式,循环搜索从而可以确定计算区域内所有可能的滑移路径。

## 2 无明显滑面岩质边坡稳定性分析

针对任意可能滑移路径,我们均可利用 ANSYS 计算出其对应的安全系数  $F$  的大小<sup>[2,10-13]</sup>,令  $\Sigma R$  为下部岩体为阻止其上部岩体的相对滑动在滑移路径上所产生的最大抗滑力,  $\Sigma T$  表示上部滑动岩体相对于下部稳定基岩在滑移路径上所产生的实际剪力值,即下滑力,则边坡安全系数  $F$  为  $\Sigma R$  与  $\Sigma T$  之比。由岩体结构面网络可知,任意条滑移路径为一岩桥和结构面首尾相接的多线段组成的不规则的折线图形,因此抗滑力  $\Sigma R$  和下滑力  $\Sigma T$  分别由岩桥和结构面所产生,故边坡安全系数为

$$F = \frac{\Sigma R}{\Sigma T} = \frac{\Sigma R_i + \Sigma R_j}{\Sigma T_i + \Sigma T_j}$$

式中,  $\Sigma R_i$ 、 $\Sigma T_i$  为滑移路径上所有岩桥所产生的抗滑力和下滑力;  $\Sigma R_j$ 、 $\Sigma T_j$  为滑移路径上所有结构面所产生的抗滑力和下滑力。

### 2.1 单个岩桥抗滑力和下滑力的确定

设  $\alpha$  为剪切方向角,  $\beta$  为岩桥倾角,  $\gamma$  为产生拉裂纹的主应力方向与水平方向的夹角,  $\theta$  为拉裂纹与剪切方向的夹角,  $\tau_{xy}$ 、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  均源自于有限元计算得到的应力场数据,根据 Lajtai 和 Einstein 研究理论<sup>[7]</sup>,当  $\beta < \gamma + 0.5\pi$ ,岩桥将发生受剪破坏;当  $\beta \geq \gamma + 0.5\pi$ ,则岩桥将发生受拉破坏。以下为岩桥在不同破坏形式下  $R_i$ 、 $T_i$  的计算公式。

$$(1) \text{ 受剪破坏 } \left( \beta < \gamma + \frac{\pi}{2} \right)。$$

$$d = L \cos(\beta - \alpha)$$

$$\sigma_{ni} = 0.5(\sigma_x + \sigma_y) + 0.5(\sigma_x - \sigma_y) \cos(\pi - 2\alpha) - \tau_{xy} \sin(\pi - 2\alpha)$$

$$\tau_{si} = 0.5(\sigma_x - \sigma_y) \sin(\pi - 2\alpha) + \tau_{xy} \cos(\pi - 2\alpha)$$

$$\tau_{ri} = 0.5\sqrt{c_i^2 - 2c_i\sigma_{ni}}, R_i = \int_0^d \tau_{ri} ds, T_i = \int_0^d \tau_{si} ds$$

式中,  $c_i$  为岩桥的黏聚力;  $\sigma_{ni}$  为作用在岩桥上的法向应力;  $\tau_{ri}$  为岩桥的抗剪应力强度;  $\tau_{si}$  为作用在岩桥上的剪应力。

$$(2) \text{ 受拉破坏 } \left( \beta \geq \gamma + \frac{\pi}{2} \right)。$$

$$h = L \sin(\beta - \alpha)$$

$$\sigma_{ai} = 0.5(\sigma_x + \sigma_y) + 0.5(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha$$

$$R_i = \sigma_{ri} h, T_i = \int_0^h \sigma_{ai} ds$$

式中,  $\sigma_r$  为岩体的抗拉强度;  $\sigma_{ai}$  为作用在岩体上的拉应力。

### 2.2 单个结构面抗滑力和下滑力的确定

在结构面上, 计算  $R_j$ 、 $T_j$  比较简单, 利用摩尔-库仑强度准则有

$$\sigma_{nj} = 0.5(\sigma_x + \sigma_y) + 0.5(\sigma_x - \sigma_y) \cos(\pi - 2\alpha) - \tau_{xy} \sin(\pi - 2\alpha)$$

$$\tau_{sj} = 0.5(\sigma_x - \sigma_y) \sin(\pi - 2\alpha) + \tau_{xy} \cos(\pi - 2\alpha)$$

$$\tau_{vj} = c_j - \sigma_{nj} \tan \varphi_j, R_j = \int_0^L \tau_{vj} ds, T_j = \int_0^L \tau_{sj} ds$$

式中,  $\varphi_j$ 、 $c_j$  分别为结构面上的内摩擦角和黏聚力大小;  $\sigma_{nj}$ 、 $\tau_{vj}$ 、 $\tau_{sj}$  分别为作用在结构面上的法向应力、抗剪应力强度以及剪应力;  $L$  为结构面的长度。

## 3 案例分析

### 3.1 基础资料

某岩质边坡的坡角  $\beta = 65^\circ$ , 坡高  $H = 60$  m, 坡体被 5 条结构面所分割, 分别为  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 、 $J_4$ 、 $J_5$ ; 边坡材料物理力学参数见表 1; 运用大型有限元分析软件 ANSYS 进行分析计算, 所确定的有限元计算区域: 垂直方向边坡坡高的 2 倍, 即 120 m, 水平方向取边坡坡高的 4 倍, 即 240 m, 所取岩质边坡的分析剖面及结构面在空间的布局情况如图 2 所示。

表 1 边坡材料物理力学参数

Table 1 Material parameters of slope used in calculation

名称	倾角/ ( $^\circ$ )	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松 比 $\mu$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
岩体		8 000	0.2	2 000	1.00	35
结构面 $J_1$	20	3 000	0.3	1 800	0.20	35
结构面 $J_2$	30	3 000	0.3	1 800	0.20	35
结构面 $J_3$	45	3 000	0.3	1 800	0.20	35
结构面 $J_4$	57	3 000	0.3	1 800	0.07	35
结构面 $J_5$	40	3 000	0.3	1 800	0.29	35

### 3.2 ANSYS 有限元分析

根据边坡空间实际情况, 利用 ANSYS 计算和综合研究, 进而可获得边坡的稳定性<sup>[8,14]</sup>。边界条件: 地表及坡面为自由边界, 底部边界考虑垂直方向位移约束, 左右边界按水平位移约束考虑。边坡岩体采用 Plane42 单元, 结构面用接触对单元 (contact172 和 target169) 来模拟, 分析类型为平面应变问题, 有限元模型如图 3 所示。基于等效 Mohr-Coulomb 屈服准则参数转换公式对其进行分析计算, 图 4 给出了坡体各结构面法向应力  $\sigma_n$  及剪应力  $\tau_s$ 。

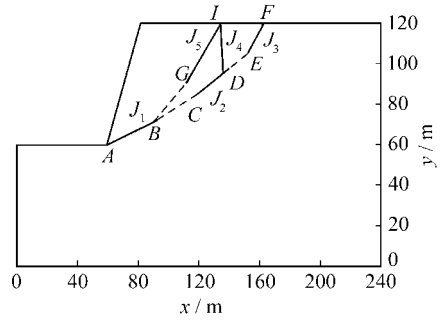


图 2 边坡几何尺寸

Fig. 2 Slope sectional drawing

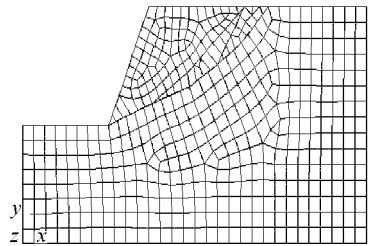


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Finite element calculation model

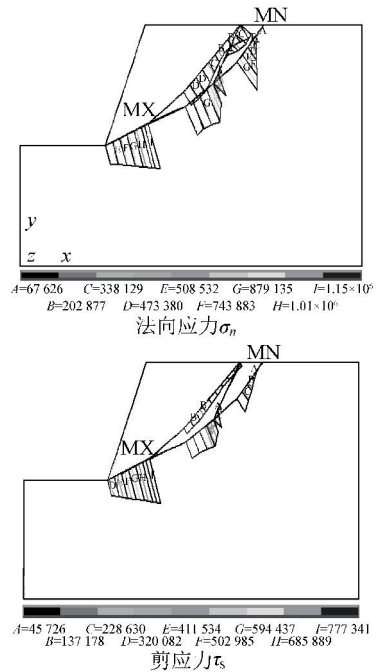


图 4 结构面法向应力及剪应力

Fig. 4 Normal stress and shear stress on structure surface

### 3.3 滑移路径的确定

根据岩体结构面空间布局及滑移路径搜索原理, 该算例显然存在 3 条可能滑移路径: ①  $A-B-C-D-E-F$ , ②  $A-B-C-D-I$ , ③  $A-B-G-I$ 。

### 3.4 危险滑移路径的确定及其验证

基于边坡结构面  $\sigma_n$ 、 $\tau_s$  有限元结果分析数据和 ANSYS 路径工具功能, 判断岩桥破坏形态, 通过路径积分获得结构面及岩桥抗滑力、下滑力及抗滑储备大

小(表2),从而确定不同滑移路径对应的边坡安全系数(表3)。

表2 结构面及岩桥结果数据

Table 2 Results of rock bridge and structure surface

计算内容	长度/m	破坏形态	抗滑力/kN	下滑力/kN	抗滑储备/kN	
结构面	$J_1$	32.118 3	抗剪破坏	25 440	11 812	13 628
	$J_2$	22.759 5	抗剪破坏	17 330	6 560	10 770
	$J_3$	26.323 2	抗剪破坏	11 585	2 014	9 571
	$J_4$	34.755 8	抗剪破坏	6 852	2 693	4 159
	$J_5$	52.018 7	抗剪破坏	28 195	16 275	11 920
岩桥	BC段	27.330 6	抗剪破坏	16 203	4 891	11 312
	BG段	29.232 2	抗剪破坏	15 033	296	14 737
	DE段	19.700 5	抗剪破坏	11 924	3 275	8 649

表3 各路径的结果对比分析

Table 3 The contrastion analysis of different paths results

路径名称	总长度/m	总抗滑力/kN	总下滑力/kN	总安全储备/kN	安全系数
①	128.232 1	82 482	28 552	53 930	2.889
②	116.964 2	65 825	25 956	39 869	2.536
③	113.369 3	68 668	28 383	40 285	2.419

路径③的安全系数最小,  $F=2.419$ , 为该算例最危险滑移路径, 而路径②的总抗滑储备最小, 但其对应的安全系数  $F=2.536$ , 明显大于路径③安全系数计算结果, 由此可以推断该路径并不是安全系数最小的危险滑移路径。进一步对该问题用有限元强度折减法进行分析计算, 得该边坡的安全系数  $F=2.437$ , 与路径③计算结果接近, 说明文献[3]以总抗滑储备最小为危险滑移路径的算法存在弊端, 有待改进。

## 4 结 论

(1) 基于岩体结构面网络及其工程边界条件, 可搜索边坡所有可能的滑移路径。

(2) 有限元分析能真实合理地显现无明显滑移路径边坡不同滑移路径上的应力分布情况, 并实现边坡安全系数的精确计算。

(3) 采用等效 Mohr-Coulomb 屈服准则, 通过有限元软件 ANSYS 计算获得的边坡安全系数与有限元强度折减法进行边坡稳定性分析所获得的边坡安全系数值接近。

(4) 通过计算结果对比分析发现, 以总抗滑储备最小为危险滑移路径的算法存在弊端, 有待改进。

## 参考文献:

[1] 刘兴远, 雷 用, 康景文. 边坡工程—设计监测鉴定与加固[M].

北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

- [2] 邓洪亮, 孙丽霞, 廖 丹, 等. 复杂地质条件下岩石边坡的稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(1): 45-48.  
Deng Hongliang, Sun Lixia, Liao Dan, et al. Stability analysis of rock slope under complex geological condition[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2008, 6(1): 45-48.
- [3] 单衍景. 岩体宏观力学参数的多尺度计算与岩体边坡稳定性分析的数值方法[D]. 北京: 中国科学院, 2002.
- [4] Lade P V. Modeoling yield surface for granular in three dimensions [J]. Computer Methods and Advances in Geomechanics, 1997, 23(6): 65-73.
- [5] Sun D A, Matsuoka H. An elastic-plastic model for  $C-\Phi$  materials under complex loading [A]. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics [C]. Balkema, 1997.
- [6] 蔡 跃, 三谷泰浩, 江琦哲郎. 反倾层状岩体边坡稳定性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2 517-2 522.  
Cai Yue, Mitani Yasuhiro, Esaki Tetsuro. Numerical analysis of stability for an antidip stratified rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2 517-2 522.
- [7] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 525-1 544.  
Huang Runqiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 525-1 544.
- [8] Lade P V. Elastic-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface [J]. Interna. J. Solids and Structure, 1977, 11, 13: 1 019-1 035.
- [9] 徐卫亚, 谈小龙, 蒋中明. 节理岩体边坡模糊稳定性分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 232-1 236.  
Xu Weiya, Tan Xiaolong, Jiang Zhongming. Research on fuzzy analytic approach for stability analysis of joined rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1 232-1 236.
- [10] Liu Zizhen, Yan Zhixin, Duan Jian. Couple analysis on strength reduction theory and rheological mechanism for slope stability [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(2): 351-356.
- [11] 徐 青, 陈胜宏, 汪卫明. 岩石边坡稳定性与支护的数值分析及综合比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S): 3 692-3 698.  
Xu Qing, Chen Shenghong, Wang Weiming. Numerical analysis and comprehensive comparison of stability and reinforcement of rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S): 3 692-3 698.
- [12] Yan Zhixin, Duan Jian, Jiang Ping, et al. A study on constitutive model and parameters of rock slope stability [A]. Materials Science Forum [C]. 2008, 2: 1 210-1 216.
- [13] Yan Zhixin, Duan Jian, Wang Houyu. Constitutive model models in stability analysis of rock slope [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(2): 302-306.
- [14] 林 杭, 曹 平, 李江腾, 等. 边坡临界失稳状态的判定标准 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 643-647.  
Lin Hang, Cao Ping, Li Jiangteng, et al. The standards for critical failure state of solpe [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 643-647.