

文章编号:1673-9469(2012)04-0009-04

## 含硬性贯通结构面的岩质边坡稳定性研究

魏翠玲,吕博

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**选取典型的具有硬性贯通结构面的岩质边坡模型,采用有限元强度折减法并应用岩土数值模拟软件对其进行详细的数值模拟,得到边坡在不同位置结构面、坡角及倾角下的安全系数和潜在滑移面。这说明将含贯通结构面的岩体总体特征予以反映并使之模型化是可行的。结果表明,随着结构面与坡脚距离的增大,安全系数也逐渐提高;边坡坡度越大,剪应力向坡脚集中,继而易发生破坏;坡角一定时,安全系数随倾角呈U形抛物线变化;潜在滑移面不一定沿着结构面发生破坏,也可能在岩体内滑动。上述各项岩土参数对岩质边坡稳定性的影响规律,可用于指导工程实践,有一定的推广价值。

**关键词:**硬性贯通结构面;边坡稳定;安全系数;滑移面

**中图分类号:**TU457

**文献标识码:**A

### Research on rock slope stability containing hard continuous structure interface

WEI Cui-ling, LV Bo

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** This text will take the typical slope with hard continuous structure as example, adopt the finite element strength reduction method and the geotechnical numerical analysis software to create the numerical models in order to solve the safety factor and find the slip plane of the model in different structure surface positions, slope angles, structure inclinations. So it is viable to reflect the general characteristics and make modeling. The results show that the safety factor improve gradually with the increases of the distance between the structure plane and the slope foot; when the slope angle becomes large, the shear stress is concentrated to the foot of the slope, then the damage appear; when the slope angle is a certain value, the safety factor with the inclination angle is a U-shaped parabola; the potential slip plane maybe occurs along the structural plane, maybe in the rock slide. The regular understanding of the above geotechnical parameters has effect on the slope stability, which can be used for instructing the project, and there is certain value to popularize.

**Key words:** hard continuous structure; slope stability; safety factor; slip plane

岩质边坡的稳定性问题一直是工程界和学术界最为关注的重大研究课题。岩质边坡的特点是岩体结构复杂,存在大量的不连续结构面,而岩体内的结构面又常常是岩坡不稳定的主要因素。由于岩体内部构造的复杂性,给岩质边坡的稳定分析带来了诸多困难因素。李世桂<sup>[1]</sup>通过弹性力学理论给出了在极限平衡状态下计算顺倾层状岩体

滑坡的失稳边界的方法,得到含软弱结构面的顺倾层边坡的失稳边界的判断函数。彭从文等<sup>[2]</sup>以压剪荷载下非贯通节理岩体为研究对象,结合断裂力学方法推导了非贯通节理岩体多层结构模型。然而以上研究很少涉及对硬性贯通结构面的探讨。周瑞光等<sup>[3]</sup>进行了三组结构面状态下不同产状结构面的力学效应研究。赵尚毅等用有限元

收稿日期:2012-06-25

作者简介:魏翠玲(1963-),女,河北衡水人,博士,教授,从事工程结构动力分析的教学与研究。

强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析,找出了节理岩质边坡的滑动面,并求出了相应的稳定安全系数。然而这些研究却又未考虑结构面位置、倾角及坡角对岩体安全系数和潜在滑移面位置的影响。本文通过 MIDAS/GTS 岩土数值模拟软件针对不同工况建立相应的模型,试图对岩质边坡稳定分析作进一步探讨。

## 1 有限元强度折减法

由于岩体是弱面体,其强度主要由结构面控制,用于土质边坡稳定分析的传统滑动面搜索法对岩质边坡不再适用。而有限元强度折减法不仅能够模拟边坡的失稳过程及其滑移面形状,同时可以求出相应的稳定安全系数,能够对具有复杂地貌、地质的边坡进行计算。因此 MIDAS/GTS 的边坡稳定分析采用基于有限单元法的强度折减法<sup>[5]</sup>。

安全系数可以定义为使边坡刚好达到临界破坏状态时,对土的剪切强度进行折减的程度。从而,强度折减法可以表述为:使岩土体的重力加速度保持为常数,逐步减小抗剪强度指标,将  $C$ 、 $\varphi$  值同时除以折减系数  $F$ ,得到一组新的强度指标  $C_1$ 、 $\varphi_1$ ,反复计算,直至边坡达到临界破坏状态。此时的强度指标与岩土体原来的强度指标之比即为该边坡的安全系数。公式如下

$$C_1 = \frac{C}{F} \quad (1)$$

$$\tan\varphi_1 = \frac{\tan\varphi}{F} \quad (2)$$

式中: $C$ 、 $\varphi$  - 岩土体初始的粘聚力和内摩擦角; $C_1$ 、 $\varphi_1$  - 经过折减后的粘聚力和内摩擦角; $F$  - 折减系数即安全系数。

## 2 材料的本构模型

边坡岩体的本构模型采用莫尔-库仑模型<sup>[6]</sup>岩体的任何一个受力面上的极限抗剪强度均可用 Mohr - Coulomb 定律表示:

$$\tau_f = \sigma_f \tan\varphi + C \quad (3)$$

式中: $\varphi$  - 内摩擦角; $\sigma_f$  - 受力面上的正应力; $C$  - 内聚力。

同时还可以用平面内的主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  表示:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = C \cos\varphi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin\varphi \quad (4)$$

$$\text{或 } \sigma_1(1 - \sin\varphi) - \sigma_3(1 + \sin\varphi) - 2C \cos\varphi = 0 \quad (5)$$

## 3 边坡二维数值模型

### 3.1 模型概况

计算模型中,坡高  $H$  为 20 m,边坡坡角  $A$  的研究范围  $60 \sim 90^\circ$ ,结构面倾角  $B$  的研究范围为  $20 \sim 75^\circ (A > B)$ 。防止在运算过程中约束对边坡位移的影响,可取较大范围的基层:基层厚 40 m,基层长 100 m。

### 3.2 岩体基本物理力学参数

硬性结构面即无充填的结构面,包括剪应力作用下形成的剪性破裂面,如剪节理、剪裂隙等,发育较好的层面与片理面。计算模型考虑两种材料类型,模型岩体材料和结构面的物理力学指标如表 1 所示。

表 1 物理力学参数表

Tab. 1 The material properties

材料	$C/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$\nu$
岩体	500	30	25	2000	0.3
结构面	30	20	0	0	0

### 3.3 模型的建立

对于边坡这样纵向很长的实体,计算模型可以简化为平面应变问题并将边坡视作各向同性均匀弹塑性材料,且材料参数为常数。由于模型较简单,采用实体单元中的高阶单元自由划分网格便能满足计算精度的要求。网格密度控制采用长度划分,并定义单元线段的长度为 2 m。边界条件为左右两侧边界水平约束,底部固定约束,上部为自由边界。为使荷载比较明确,本模型只考虑自重作用。

对于无充填的贯通结构面,不能按照传统连续介质原理进行处理,采用 MIDAS/GTS 中接触单元的设置模拟硬性结构面的不连续性<sup>[7]</sup>。MIDAS 中的接触单元采用了库伦摩擦理论。假设应变  $\Delta u^{\&}$  由弹性应变  $\Delta u^{\&e}$  和塑性应变  $\Delta u^{\&p}$  组成,则有下面公式

$$\Delta u^{\&} = \Delta u^{\&e} + \Delta u^{\&p} \quad (6)$$

接口发生裂缝前接触单元的应力定义如下

$$t^{\&} = D^e \Delta u^{\&e} \quad (7)$$

式中: $D^e$  - 弹性刚度矩阵。

库伦摩擦模型的破坏应力  $f$  和势函数  $g$  定义如下

$$f = \sqrt{t_i^2} + t_n \tan \varphi(k) - \bar{c}(k) \quad (8)$$

$$g = \sqrt{t_i^2} + t_n \tan \varphi \quad (9)$$

式中:  $\varphi(k)$  - 内摩擦角函数;  $\bar{c}(k)$  - 粘聚力函数;  $\phi$  - 剪胀角。

#### 4. 计算结果分析

##### 4.1 不同结构面位置对安全系数的影响

为了研究结构面位置对边坡安全系数的影响,分别取结构面底端距坡脚的垂直距离为 0m、4m、8m、12m,坡角和倾角分别为 75°和 30°,计算的安全系数如表 2。

表 2 不同结构面位置下的安全系数结果

Fig. 2 The safety factors of different structure position

H/m	0	4	8	12
安全系数	0.887 5	1.087 5	1.107 5	1.112 5

由表 2 可知,结构面的位置发生变化时,所求的稳定安全系数也随之改变<sup>[8]</sup>。坡脚处受力最大容易出现应力集中,使得当贯通结构面接近坡脚时,安全系数最低,坡体易从坡脚处沿着结构面失稳破坏,位于坡中时次之,靠近坡顶时安全系数最高。

##### 4.2 不同坡角和倾角对安全系数的影响

当结构面底端距坡脚的垂直距离为 4m 时,经过运算得到不同坡角下不同结构面倾角的安全系数,整理后如表 3。

表 3 各种工况安全系数结果

Tab. 3 The safety factors of different modal analyses

安全系数	B=20°	B=30°	B=45°	B=60°	B=75°
A=60°	1.387 5	0.987 5	1.237 5	-	-
A=75°	1.162 5	1.087 5	0.862 5	1.037 5	-
A=90°	1.012 5	0.912 5	0.537 5	0.687 5	0.862 5

由表 3 得知,当结构面倾角一定,随着坡度的增大,剪应力不断向坡脚集中,坡脚随之成为最易破坏的挤压破坏点,安全系数也同时降低;当坡角一定时,安全系数随倾角的增大先减小后增大,大体呈 U 形抛物线变化,当倾角增大至接近于坡角时,安全系数甚至大于 1 使岩质边坡处于稳定

状态。

由于在边坡形成过程中,主应力迹线发生了明显偏转,表现为接近临空面,其最大主应力  $\sigma_1$  方向趋于平行临空面,而最小主应力  $\sigma_3$  方向则与临空面垂直相交。由结构面破坏准则式<sup>[9]</sup>经过三角运算可得结构面破坏准则的另一种形式:

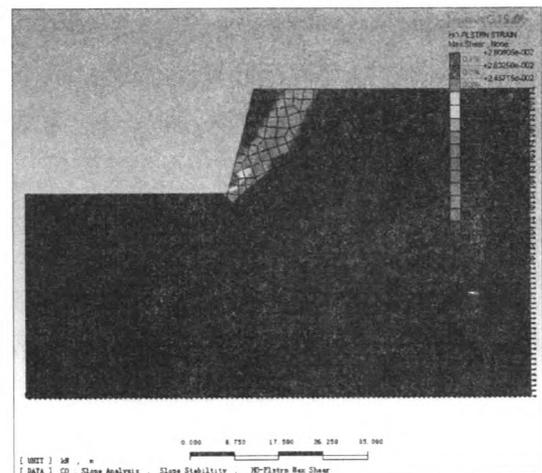
$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq \frac{2\sigma_3 \tan \varphi_j + 2c_j}{(1 - \tan \varphi_j) \cot \beta \sin 2\beta} \quad (10)$$

式中:  $c_j$ 、 $\varphi_j$  - 结构面的剪切强度参数;  $\beta$  - 结构面法线与最大主应力的夹角。

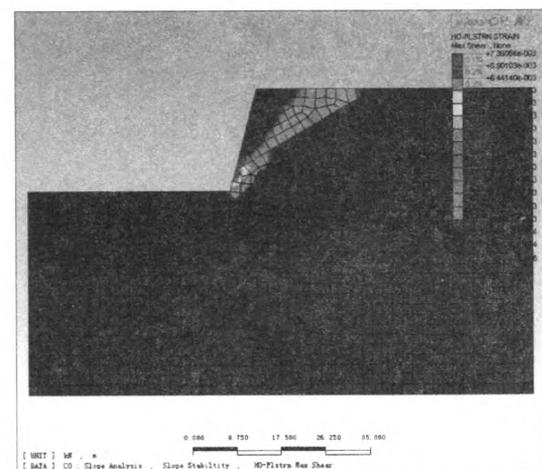
假设  $c_3$  为定值,上式中  $\sigma_1 - \sigma_3$  的应力差是  $\beta$  的函数,当  $\beta \rightarrow 90^\circ$  时即结构面与  $\sigma_1$  作用方向趋于平行,  $\sigma_1 \rightarrow \infty$ 。这表明结构面的倾角越接近于临空面的角度,安全系数越大坡体稳定性越高。这与安全系数计算结果是相吻合的。

##### 4.3 滑移面位置的变化情况

本文只列出坡角  $A=75^\circ$  时不同结构面倾角下的滑移面的位置情况。如图 1 所示。



(a) B=20°



(b) B=30°

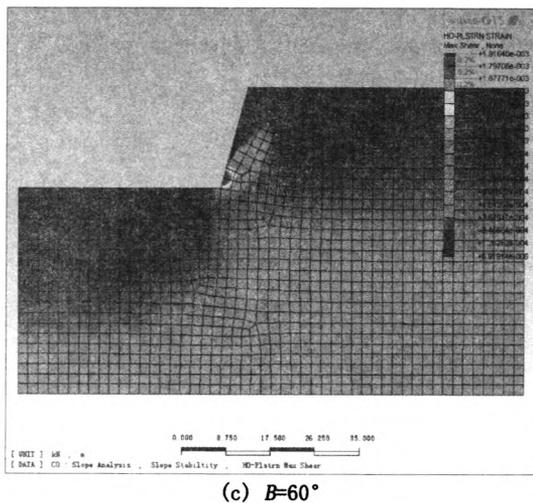


图1 最大剪切应变图

Fig.1 The biggest shearing strain chart

通过图1和表3可以得出:当硬性结构面倾角相对坡角属于缓倾角结构面时,在平行于坡面的最大主应力作用下产生平行于坡面的剪应力,滑动面并非沿着结构面发生破坏而是在靠近坡面处产生与坡面近乎平行的破坏面;当硬性结构面倾角角度接近于坡角角度时,大主应力对岩体的约束越大,同时结构面受到岩体的约束,容易在远离坡面的硬质结构面附近形成潜在滑移面;当结构面倾角约为边坡坡角一半大小时,安全系数最小,坡体稳定性差,极易沿着结构面失稳破坏。

## 5. 结论

1) 含硬性结构面的边坡,剪应力由坡角扩散,逐步连通坡脚与结构面之间的范围<sup>[9]</sup>。故当结构面位于坡脚处时安全系数很低,坡体极易发生破坏。

2) 当倾角一定时,坡角越大安全系数越小;当

坡角为定值时,安全系数随倾角呈U形抛物线变化。在进行边坡稳定性评价时,不能的通过坡角或结构面的倾角来判断,是要综合考虑两者之间的关系。

3) 坡体发生破坏时,可能是沿着岩体中的结构面滑动,也可能在岩体内部滑动。

## 参考文献:

- [1] 李世桂. 含软弱结构面的顺倾层边坡失稳边界的研究[J]. 企业技术开发, 2009, 28(4): 58-61
- [2] 彭从文, 曹芳. 非贯通节理岩体多层结构模型研究 I: 理论部分[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2010, 7(3): 131-135.
- [3] 周瑞光, 成彬芳, 张向东, 等. 三组结构面状态下不同产状结构面的力学效研究[J]. 工程地质学报, 1997, 5(4): 318-322.
- [4] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报[J], 2003, 22(2): 254-260.
- [5] 赵尚毅, 时为民, 郑颖人. 边坡稳定性分析的有限元法[J]. 地下空间, 2001, 21(5): 450-454.
- [6] 卿翠贵, 苏阳, 张桂林, 等. 某高岭土矿开采边坡稳定性的赤平投影解析[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(3): 38-39.
- [7] 邹祖银, 莫忧, 陶连金. 公路路堑岩质高陡边坡稳定性评价[J]. 黑龙江科技学院学报, 2008, 18(3): 172-175.
- [8] 吉锋. 结构面形态对岩体应力分布状态的影响[J]. 河北理工大学学报, 2011, 33(1): 119-122.
- [9] 赵明阶. 岩石力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

(责任编辑 马立)