

文章编号:1673-9469(2009)02-0016-03

## 强度折减有限元法土坡失稳判据分析均质土坡

马晓雨<sup>1</sup>,李池<sup>2</sup>,卢香果<sup>2</sup>

(1.河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2.邯郸市诚明建筑安装有限公司,河北 邯郸 056001)

**摘要:**目前强度折减法分析土坡稳定一般有三种判断依据:位移突变法、求解过程中计算的不收敛、塑性区的贯通情况。针对典型均质土坡算例,采用强度折减有限元方法进行稳定分析,并与极限平衡方法所得到的安全系数进行对比。对比分析表明,三种判别法得到的安全系数与极限平衡法计算的结果接近,说明对均质土坡有适用性。

**关键词:**土坡失稳判据;强度折减法;稳定分析;安全系数

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

### Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on SSR technique

MA Xiao-yu<sup>1</sup>, LI Chi<sup>2</sup>, LU Xiang-guo<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Chengming Construction and Installation Co., Ltd, Handan 056001, China)

**Abstract:** At present, there are three criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on SSR technique including the abruptness of the displacement, the convergence of numerical computations or deformation at a certain characteristic location and connectivity of plastic zone. An example homogenous soil slope is analyzed by using the elastoplastic FEM based on the SSR technique and their computed results are compared with the solution of limit equilibrium. It is shown that the safety factors computed by using the three criteria are almost identical to the solution of limit equilibrium method. It is also proven that the three criteria are feasibility to analyze the homogenous soil slope.

**Key words:** instability criteria; SSR technique; analysis of stability; safety factor

随着数值分析方法在工程领域应用技术的成熟,人们已经采用有限元强度折减法对坡体进行稳定分析。目前强度折减法存在三种判断判据<sup>[1-6]</sup>:(1)位移突变法;(2)求解过程中计算的不收敛;(3)塑性区的贯通情况。其中,判据(1)认为土坡破坏是伴随着节点位移(或位移增量)的迅速增加而进行的。判据(2)是在指定的收敛准则下算法不收敛,表示应力分布不能满足莫尔-库仑破坏准则和总体平衡要求,意味着出现破坏。Ugai(1989)指定迭代次数为500<sup>[7]</sup>,超过这个限值认为土体破坏。判据(3)是基于剪应变屈服区域同边坡最终破坏面是一致的现象,认为强度折减过程中土坡的破坏是和剪应变的发展直接相关,定义

土坡破坏为剪应变破坏区域从坡角发展到坡顶,根据应变分析的结果,以规定数值的剪应变贯通整个土坡为破坏标准<sup>[8]</sup>。

在前人的基础上,本文采用有限元软件ABAQUS,利用强度折减法,根据土坡失稳的三种判据,针对经典算例进行稳定分析,并与极限平衡法进行比较,以证明对均质土坡有适用性。

#### 1 强度折减法的基本原理

当土体材料的抗剪强度参数  $c$  和  $\varphi$  分别用其临界抗剪强度参数  $c_c$  和  $\varphi_c$  所代替后,结构处于临界破坏状态,其中

$$c_c = c/F_s \quad (1)$$

$$\varphi_c = \arctan(\tan\varphi/F_s) \quad (2)$$

在用有限元法求解式(1)(2)所示的安全系数  $F_s$  时, 通常要求解一系列的强度参数  $c'$  和  $\varphi'$ :

$$c' = c/R \quad (3)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan\varphi/R) \quad (4)$$

式中  $c$  和  $\varphi$  是土体抗剪强度参数,  $R$  是抗剪强度的折减系数。

强度折减技术的要点是假设外荷载不变, 利用式(3)(4)来折减土体的强度指标  $c$ 、 $\varphi$ , 然后对土坡进行弹塑性有限元分析, 通过不断地增加折减系数  $R$ , 反复进行应力应变分析, 直至土坡达到临界破坏, 此时的折减系数就是安全系数  $F_s$ 。

## 2 均质土坡的算例

选取经典均质土坡<sup>[9]</sup>作为分析对象, 采用莫尔-库仑屈服准则和相关联流动法则。土料计算参数如下: 土体容重  $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ , 粘聚力  $c = 40\text{kPa}$ , 内摩擦角  $\varphi = 20^\circ$ , 剪胀角  $\psi = 20^\circ$ , 弹性模量  $E = 20\text{MPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ 。基底采用刚性边界, 两侧为水平滑动支承, 只允许竖向沉降, 上部边界为自由边界。用 ABAQUS 建立计算模型, 采用八节点四边形减缩单元 (CPE8R) 模型, 共 4171 个单元, 12790 个节点 (见图 1)。

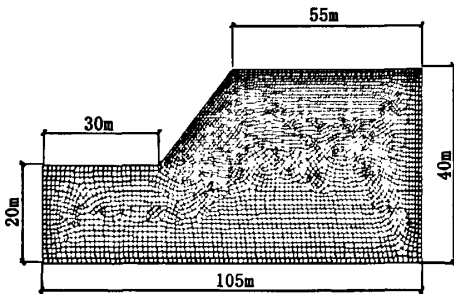


图 1 计算模型

Fig.1 Calculation model

在采取位移突变法时, 考虑到坡顶的位置较易确定, 且必在滑移线之内, 故本文选取了坡顶点的位置作为特征点。坡顶点的位移采用了其水平位移、竖直位移和总位移进行分析比较。其中, 总位移是从几何关系  $\delta_{\text{总}} = \sqrt{\delta_{\text{水平}}^2 + \delta_{\text{竖直}}^2}$  得出的。图 2 是坡顶点的三种位移与折减系数之间的关系。

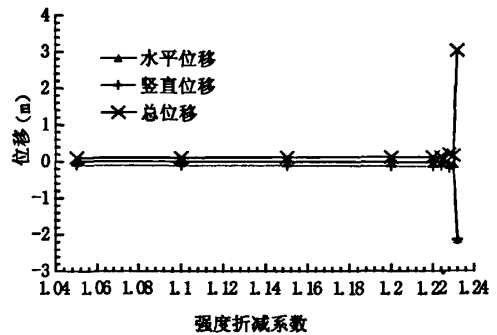


图 2 坡顶点位移与强度折减系数的关系

Fig.2 Relationship between SSRF and the top slope point displacements

从图 2 可知, 位移突变前, 水平位移接近零 (都在  $0.000\text{0m} \sim -0.041\text{3m}$  范围内变化), 坡顶位移主要表现为竖直位移 ( $-0.106\text{m} \sim -0.16\text{m}$ ), 因此这个时期, 竖直位移与总位移接近。但是, 当折减系数达到 1.232 时, 水平位移和竖直位移都发生了突变 (水平位移达到了  $-2.13638\text{m}$ , 竖直位移达到了  $-2.13638\text{m}$ )。所以以位移突变法得到的安全系数为 1.232。在安全系数达到 1.23 时, 计算迭代不收敛, 应力分布不能满足莫尔-库仑破坏准则和总体平衡要求, 出现了破坏, 因此判据 (2) 得到的安全系数为 1.23。在折减系数达到 1.232 时, 塑性区发生了贯通, 图 3(a)(b) 给出了贯通前后等效塑性区的变化。由图可知, 折减系数为 1.23 时, 塑性区尚未贯通, 而折减系数达到 1.232 时, 塑性区得以贯通。也就是以塑性区贯通作为判据得到的安全系数为  $F_s = 1.232$ 。

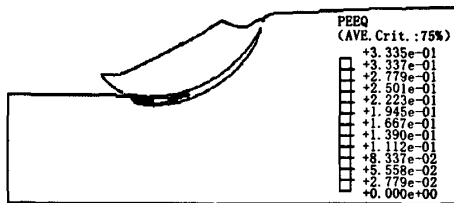
综上所述, 根据土坡稳定的三种判断依据所获得的稳定安全系数 (见表 1), 并且比较了极限平衡法的解。由表 1 可知, 有限元算法中计算出的

表 1 各判据获得的土坡稳定安全系数

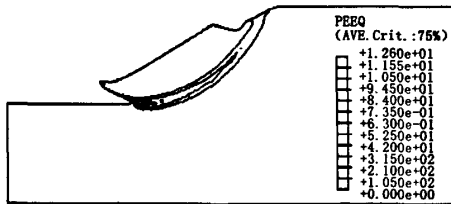
Tab.1 Safety factor of slope stability from different assessment criteria

方法	安全系数 ( $F_s$ )
(1) 节点位移突变	1.23
(2) 计算中的不收敛	1.232
(3) 塑性区的贯通	1.232
简化的 Bishop	1.220 4
简化的 Janbu	1.231 1
Spencer	1.217 2
[(1) - J]/J	0.089%
[(2) - J]/J	0.073%
[(3) - J]/J	0.073%

安全系数与极限平衡法算出的安全系数十分接近,说明强度折减有限元法的这三种判据是合理的,其较极限平衡法考虑了应力应变关系。塑性区的贯通和位移突变这两个判据同时发生,位移突变法较以计算不收敛作为判据考虑了土坡的变形特征,具有明确的物理意义。



(a) 等效塑性应变 ( $F_s=1.23$ )



(b) 等效塑性应变 ( $F_s=1.232$ )

图3 不同安全系数下的等效塑性应变图

Fig.3 Distribution of equivalent plastic strain indifferent reduction factor

### 3 结论

1) 三种判据下所得到的安全系数都与极限平衡法计算的结果较接近,因此三种判据分析均质土坡有一定的适用性。

2) 综合土坡的计算分析,建议一般土坡选坡顶作为位移突变点:水平位移、竖直位移和总位移都可以较准确地反应出位移随折减系数的变化而

变化。

3) 位移突变法较以计算不收敛作为判据考虑了土坡的变形特征,具有明确的物理意义。

### 参考文献:

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] GRIFFITH D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [3] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [4] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32(1): 59 - 70.
- [5] COLBY C. Limit state analysis of earthen slopes using dual continuum/FEM approaches[J]. *Numer. Anal*, 1999, (23): 1359 - 1371.
- [6] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析 限元法及其应用[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(1): 92 - 104.
- [7] UGAI K. A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto - plastic FEM[J]. *Soils and Foundations*, 1992, 3(1): 59 - 70.
- [8] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减法研究开挖边坡的稳定性[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 407 - 411.
- [9] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. *水利学报*, 2003, (1): 21 - 27.
- [10] 邹祖银, 莫忧, 陶连金, 等. 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.
- [11] 周利芬, 顾家腹, 李顺波. 近输油管道边坡松动爆破震动分析[J]. *黑龙江科技学院学报*, 2008, 18(6): 451 - 454.

(责任编辑 闫纯有)