

边坡剪应变滑动面程序嵌入及参数分析

林 杭^{1, 2}, 熊 威¹, 李正明³

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福建 神州 350002;
3. 湖南长沙高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410100)

摘要: 采用强度折减法计算得到的剪应变率表征边坡滑动面位置, 在边坡面上设置控制点形成控制线, 并找出控制线上的最大剪应变率对应的点, 然后连接成滑动面, 利用 Fish 语言编制程序量化滑动面; 分析各个参数对于滑动面位置的影响, 表明: 强度折减法剪应变率滑动面位置与极限平衡法确定的滑动面位置基本一致, 验证了该方法的正确性。随着黏结力的增大, 边坡由浅层滑动转变为深层滑动, 滑动面越来越缓, 滑体的体积逐渐增大。随着内摩擦角的增大, 边坡由深层滑动转变为浅层滑动, 滑动面上缘越来越靠近坡顶。安全系数和滑动面受到抗拉强度的影响较小。

关键词: 边坡; 剪应变; 滑动面; 参数分析; 强度折减

中图分类号: TU353.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S1-0052-05

作者简介: 林 杭(1980-), 男, 福建福州人, 博士, 副教授, 从事边坡稳定性和岩土工程数值模拟的工作。E-mail: linhangabc@126.com。

Embedded program for slip surface by shear strain of slopes and parametric analysis

LIN Hang^{1, 2}, XIONG Wei¹, LI Zheng-ming³

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountain, Ministry of Land and Resources, Fuzhou 350002, China; 3. Hunan Changsha Highway Construction Development Co., Ltd, Changsha 410100, China)

Abstract: The location of slip surface is featured by the shear strain rate obtained by the shear strength reduction method. The controlling points are set on the slope surface to form the controlling line, then the points with the maximum shear strain rate along the controlling lines are found and connected to form the slip surface. The data of the slip surface is obtained by the FISH program to quantitate the slip surface. The influence of each parameter on the slip surface is analyzed, showing that the locations of slip surface obtained from shear strain rate by the strength reduction method and the limit equilibrium method are basically the same, which validates the correctness of the proposed method. With the increase of cohesion, the type of slip changes from shallow slip to deep one, and the slope of slip surface becomes less steeper and the slip volume becomes larger. With the increase of internal friction angle, the type of slip changes from deep slip to shallow one, then the slip surface becomes steeper and the upper vertex of slip surface comes closer to the top of slope. The tensile strength has little impact on the factor of safety and the slip surface of slope.

Key word: slope; shear strain; slip surface; parametric analysis; strength reduction

0 引言

确定临界滑动面位置是边坡稳定分析的重要内容, 从 20 世纪 70 年代后期开始, 许多学者致力于临界滑动面自动搜索技术的研究, 提出了多种确定边坡圆弧或非圆弧临界滑动面的优化搜索方法^[1-3], 这些方法主要从数学优化的角度进行研究, 一般适用于简单平面边坡问题。近年来, 随着计算机技术的发展, 数值分析方法被广泛运用于边坡稳定性分析, 可分为强度折减数值方法和与优化搜索法结合的数值方法。其

中, 与优化搜索法结合的数值方法将数值计算与临界滑动面搜索相结合, 通过优化理论指定一系列线段和圆弧的组合作为可能的滑移路径, 根据数值计算得到的应力分布从中搜索出安全系数最小的滑移路径作为潜在滑面, 如 Kim 等^[3]根据有限元法计算的应力场,

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金课题(20120162120014);
国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室开放基金项目
(FJKLGP2012K005)

收稿日期: 2013-03-01

改进搜索策略寻找边坡临界滑动面。这种方法需要在数值计算的基础上再采用其他优化理论, 只是间接使用了数值计算的结果, 因此, 若能直接将数值方法得到的应力或者应变应用于滑动面确定上, 则可略去优化方法的使用, 使数值方法确定滑动面的过程更为简便。于是, 许多学者选择强度折减法, 该法通过折减边坡强度参数使边坡达到临界状态, 从而出现多个特征量表征滑动面, 如塑性区云图^[4]、剪应变率云图^[5-6]、网格畸变带^[7]等, 连镇营等^[5]利用贯通的广义塑性剪应变的等色图来定义滑动面; Griffiths 等^[7]通过使用非关联流动法则, 发现变形后的网格中会出现一条明显的网格畸变带, 并将这条畸变带就定义为潜在滑面。本文在前人研究的基础上, 拟采用剪应变率来表征边坡的滑动面, 并编制相应计算程序, 分析各个参数对于滑动面位置的影响。

1 计算模型与方法

1.1 模型介绍

选取文献[8]的均质边坡作为分析对象, 该边坡高 20 m, 坡角为 45°。按照平面应变建立计算模型, FLAC^{3D} 计算边坡安全系数时, 网格大小对结果有一定影响。通过多次试算, 并权衡计算时间和计算精度(误差小于 2%), 建立的模型共 7200 个单元, 14802 个节点, 如图 1 所示。由于模型尺寸对结果有一定影响, 取坡脚到左侧边界距离为 30 m, 坡顶到右侧边界距离为 55 m, 坡脚向下延伸 1 个单位坡高 20 m, 具体模型尺寸如图 1。岩土体参数为重度 $\gamma=25$ kN/m³, 弹性模量 $E=10$ MPa, 泊松比 $\mu=0.3$, 黏结力 $c=42$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=17^\circ$, 抗拉强度 $\sigma_t=10$ kPa。边界条件为下部固定, 左右两侧水平约束, 上部为自由边界; 采用同时考虑拉伸和剪切破坏的 Mohr-Coulomb 准则, 初始应力场按自重应力场考虑; 计算收敛准则为不平衡力比率(节点平均内力与最大不平衡力的比值)^[9]满足 10^{-5} 的求解要求, 计算时步上限为 30000 steps; 采用强度折减技术^[4-8, 10-14]计算整体安全系数; 当边坡达到破坏状态时, 滑动体上的位移将发生突变, 产生很大的且无限制的塑性流动, 程序无法找到一个既能满足静力平衡, 又能满足应力-应变关系和强度准则的解, 此时, 不管是从力的收敛标准, 还是从位移的收敛标准来判断, 计算都不收敛^[12-13]。因此, 本文以静力平衡方程组是否有解、计算是否收敛作为边坡失稳的判据。

1.2 强度折减法

Mohr-Coulomb 准则作为岩土体强度的重要描述模型之一被广泛使用。由 Mohr-Coulomb 强度准则可知, 岩土材料强度由两部分组成: 黏结强度 c 和摩擦

强度 $\sigma \tan \varphi$ ^[15]。黏结强度 c 是岩土体中颗粒间的一种黏结作用力。当边坡发生扰动时, 岩土体的内力将自动调整, 以发挥最大的抗滑能力, 若摩擦力足以抵抗下滑力, 土体内部连接键可能未断裂, 岩土体未发生沿剪切方向的转动; 若摩擦力不足以抵抗下滑力时, 边坡发生滑动面上的滑动, 其内部连接键可能发生部分或全部断裂以及岩土体细观颗粒发生沿剪切方向的转动。

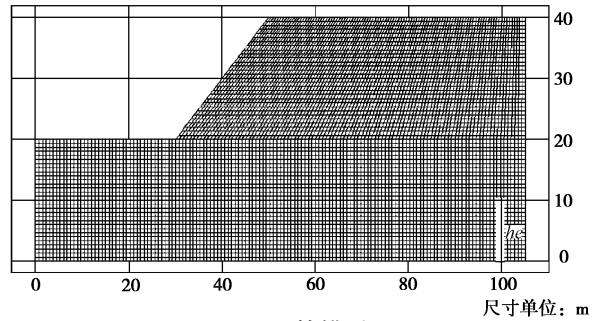


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

在强度折减法实施过程中, 将原始边坡的黏结力 c_0 和内摩擦角 φ_0 的正切值 $\tan \varphi_0$ 同时除以一折减系数 K , 进行数值分析判断边坡是否失稳, 然后, 利用二分法改变折减系数 K , 反复分析直至边坡达到临界失稳状态, 此时边坡的安全系数 $F_{cr}=1$, 假设对应的黏结力和内摩擦角为 c_{cr} 和 φ_{cr} , 则原始边坡(强度参数未折减时)的安全系数 F 为

$$F = \frac{F}{F_{cr}} = \frac{c_0}{c_{cr}} = \frac{\tan \varphi_0}{\tan \varphi_{cr}} \quad . \quad (1)$$

将式(1)进行变换, 可得

$$1 = \frac{c_0 + \sigma \tan \varphi_0}{F(c_{cr} + \sigma \tan \varphi_{cr})} = \frac{\tau_s^0}{F\tau_{cr}^0} \quad (2)$$

式中, τ_s^0 , τ_{cr}^0 分别对应原始边坡和临界状态边坡的抗剪强度。

数值计算过程中, 根据应变张量计算应力张量, 并根据相应 Mohr-Coulomb 模型判断计算后的应力是否符合强度准则, 若应力达到屈服条件, 则根据相应塑性流动法则进行应力调整, 使实际应力符合屈服准则。当边坡强度参数折减到一定程度时, 边坡滑动体内的位移将发生突变^[10], 可采用双曲线方程描述边坡岩土体强度折减系数和位移之间的关系。另外, 由于边坡发生失稳, 滑体上的位移将不断增大, 从而导致计算程序无法收敛^[12], 因此, 可采用程序计算的这种特征来判断边坡是否达到临界状态, 即计算不收敛的边坡临界失稳判据。

2 滑动面程序编制

对于给定滑面的边坡, 稳定性计算方法已十分完

善, 或用极限平衡法, 或用有限元计算结果沿滑动面进行积分。而实际情况往往是滑面的形状事先未知的。当潜在滑面被假定为圆弧状时, 临界滑面可不借助复杂的优化技术就能搜索出满意的结果。当滑面形状是任意时, 问题就变得复杂多了。目前还没有普遍有效的方法可以很好地解决任意形状滑动面的确定问题。由于滑动面定义是^[16]: 在已知的求解域内, 给定一组坐标点的 x 坐标, 变化寻找相应的 y 坐标, 使它所确定的曲线对应的安全系数 F 最小。基于这种定义, 需要对大量的潜在危险滑面(这些面或是经验设定, 或是随机产生, 或是采用非线性规划法得出)进行不停试算, 而且对于复杂的问题, 可能得不到全局最优解。本文在分析滑动现象本质的基础上, 采用基于应变分析的滑动面确定方法, 利用强度折减法的计算结果直接确定滑动面。

工程实践表明^[16], 当边坡失稳时, 会产生明显的局部化剪切变形, 如图 2 所示。这种局部化现象一旦发生, 变形将会相对地集中在局部化变形区域内, 而区域外的变形相当于卸载后的刚体运动, 滑坡体将沿某一滑动面滑出。滑动面两侧沿滑动面方向的位移相差明显, 存在较大的变形梯度。为了进一步分析滑动面参数影响, 自编 Fish 程序量化强度折减法的滑动面位置, 在编制程序过程中, 以一定水平间隔在边坡表面处设置控制点, 然后, 以这些控制点为起点, 向下以一定竖向间隔搜索, 从而形成搜索控制线, 找出这些搜索控制线上剪应变率最大的点, 将它们连为曲线即为边坡的滑动面, 如图 3。在搜索过程中, 搜索结果的精度受到控制点水平和竖向间距的影响, 若剪应变率没有变化, 则略去该控制点。另外, 通过计算对比, 得到强度折减法剪应变率滑动面位置与极限平衡法(LEM)确定的滑动面位置基本一致, 如图 2 所示, 说明了采用剪应变率云图确定边坡滑动面方法的可行性。

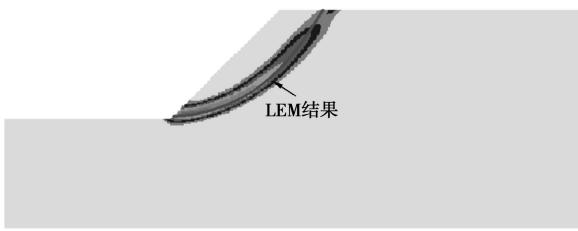


图 2 剪应变率滑动面位置

Fig. 2 Location of slip surface by shear strain rate

3 参数影响分析

进行影响因素分析的具体思路为: 固定其他参数, 只改变其中一个参数, 分析这个参数的变化对边坡安全系数和滑移面的影响。由于计算采用同时考虑拉剪破坏的 Mohr-Coulomb 准则, 因此影响因素分析包括:

黏结力、内摩擦角、抗拉强度。

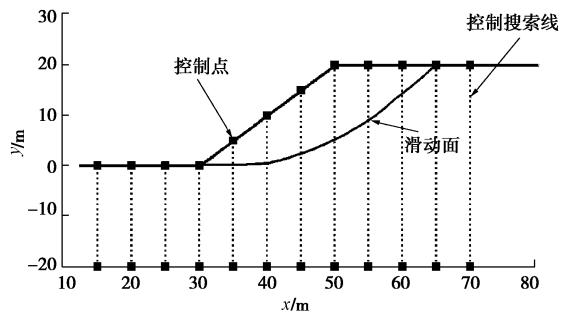


图 3 边坡滑动面位置

Fig. 3 Location of slip surface of slope

3.1 黏结力的影响

在抵抗剪切作用时, 岩土体的黏结力可认为是其内部连接键断裂和沿剪切方向的转动(颗粒剪切定向)所需要的能量。在受剪过程中, 岩土体层理的定向作用对其抗剪能力的影响十分显著, 平行于定向颗粒层理的剪切强度将小于垂直于颗粒基本平行方向的剪切强度约 20%左右^[11, 15], 这主要体现在岩土体的黏结力方面。将黏结力 c 变化于区间[4.2 kPa, 268.8 kPa], 变化梯度为 K_c , 即

$$c_i = K_c c_{i-1} \quad , \quad (1)$$

其中, c^i 和 c^{i-1} 为第 i 步变化对应的黏结力和第 $i-1$ 步变化对应的黏结力。

得到边坡安全系数 F 和黏结力的关系如图 4 所示, 可见, 黏结力 c 在研究区间内变化时, 安全系数 F 发生相应的增加, 但其变化的倍数与黏结力变化的倍数并不相同。从图 5 滑动面位置和黏结力的关系中可以看出, 随着黏结力的增大, 边坡滑动由浅层滑动转变为深层滑动, 滑动面越来越缓, 滑动面上缘越来越远离坡顶, 滑体的体积逐渐增大, 说明黏结力越大, 边坡滑动需要的能量也越大, 因此边坡更加稳定。当黏结力变化于 4.2~67.2 kPa 时, 滑动面剪出口位于坡脚以上的倾斜坡面; 当黏结力变化于 133.4~268.8 kPa 时, 滑动面穿出坡脚左侧的水平地面。

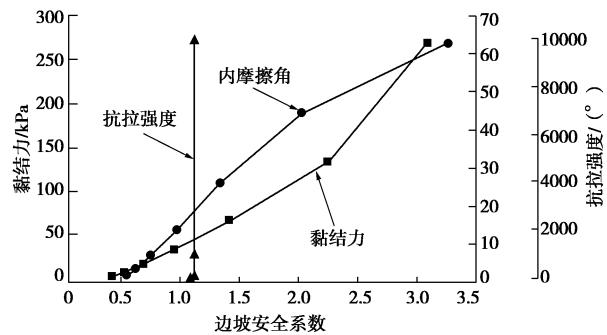


图 4 各岩土参数对安全系数的影响

Fig. 4 Effect of each geotechnical parameter on factor of safety of slope

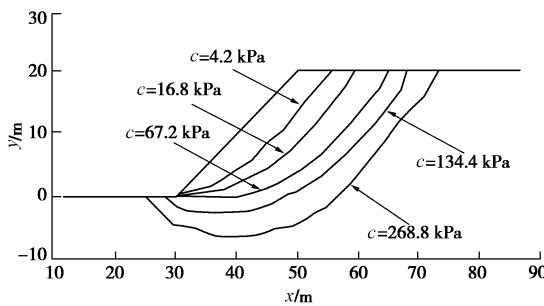


图 5 黏结力对滑动面的影响

Fig. 5 Effect of cohesion on slip surface

3.2 内摩擦角的影响

内摩擦角 φ 可认为是土体颗粒在剪切作用下移动时, 土颗粒间的摩擦作用或土体水化膜的黏滞作用的结果; 它与滑动面上的法向应力密切相关。将内摩擦角 φ 变化于区间 $[1.75^\circ, 44.37^\circ]$, 变化梯度 K_φ , 即

$$\varphi_i = \arctan[K_\varphi \tan(\varphi_{i-1})] \quad (2)$$

其中, φ_i 和 φ_{i-1} 为第 i 步变化对应的内摩擦角和第 $i-1$ 步变化对应的内摩擦角。

得到边坡安全系数和内摩擦角的关系如图 4, 从中可以看出, 随着内摩擦角的增大, 安全系数不断增大; 与黏结力与安全系数的变化倍数关系相同, 安全系数增加的倍数与 $\tan \varphi$ 增加的倍数并不相同, 这是由于安全系数的增加除了内摩擦角的贡献处, 还受到黏结力的影响。

滑动面位置和内摩擦角的关系如图 6 所示, 从图 6 中可以看出, 随着内摩擦角的增大, 边坡滑动由深层滑动转变为浅层滑动, 此规律和黏结力与滑动面位置的关系正好相反; 另外, 滑动面越来越陡, 滑动面上缘越来越靠近坡顶, 滑体的体积逐渐减小。当内摩擦角变化于 $1.75^\circ \sim 3.49^\circ$ 时, 滑动面穿出坡脚左侧的水平地面; 当内摩擦角变化于 $6.97^\circ \sim 44.37^\circ$ 时, 滑动面剪出口位于坡脚以上的倾斜坡面。

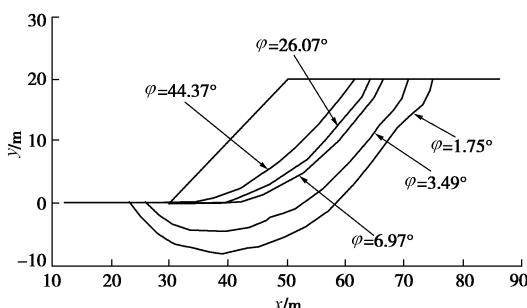


图 6 内摩擦角对滑动面的影响

Fig. 6 Effect of friction angle on slip surface

3.3 抗拉强度的影响

由于多数情况下, 埋藏在半无限地表以下的岩土体是受压的, 因此, 常将岩土体的破坏形式视为单纯

的剪切破坏。然而, 人们常见洪水过后沉积的淤泥, 在水分蒸发体积缩小时, 因收缩导致众多龟裂; 各种边坡或挡土墙临近失稳时其后缘靠近地面产生的裂隙等都是受拉破坏的结果, 而不是剪切破坏行为^[17]。因此, 在这些情况下, 如果仍按剪切屈服与破坏来处理, 显然是不符合实际的, 因此, 也需讨论抗拉强度对稳定性的影响。

将边坡岩土体的抗拉强度 σ_t 变化于区间 $[0.1 \text{ kPa}, 10 \text{ MPa}]$, 变化梯度 K_t , 在抗拉强度变化过程中, 边坡岩土体的黏结力和内摩擦角保持不变, 得到

$$\sigma_{ti} = K_t \sigma_{ti-1} \quad (3)$$

其中, σ_{ti} 和 σ_{ti-1} 为第 i 步变化对应的抗拉强度和第 $i-1$ 步变化对应的抗拉强度。

得到边坡安全系数和抗拉强度的关系如图 4, 从中可以看出安全系数的变化范围很小, 安全系数随着抗拉强度的增大而呈现递增的规律, 其变化范围明显小于黏结力和内摩擦角引起安全系数的变化范围。另外, 图 7 显示抗拉强度与边坡滑动面的关系, 从图中可以看出, 虽然抗拉强度的变化幅度很大, 但其引起滑动面位置的变化却不太明显(由于各曲线基本重合, 在图中未标明各个曲线对应的抗拉强度值), 说明抗拉强度对于边坡滑动面的影响较小。

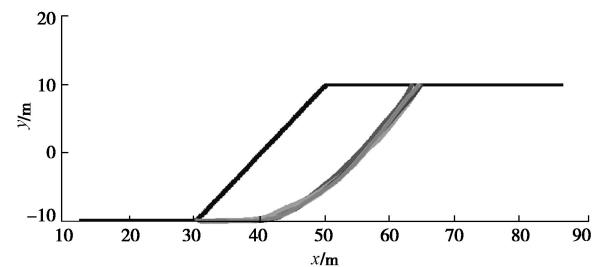


图 7 抗拉强度对滑动面的影响

Fig. 7 Effect of tensile strength on slip surface

5 结 论

(1) 在边坡面上设置控制点形成控制线, 并找出控制线上的最大剪应变率对应的点, 然后连接成滑动面。编制了边坡剪应变滑动面获取程序, 并与极限平衡法的结果进行对比, 说明了该方法的正确性。

(2) 进行了参数影响分析, 得到: 随着黏结力的增大, 边坡滑动由浅层滑动转变为深层滑动, 滑动面越来越缓。随着内摩擦角的增大, 边坡滑动由深层滑动转变为浅层滑动, 滑动面越来越陡, 滑动面上缘越来越靠近坡顶, 滑体的体积逐渐减小。安全系数和滑动面受到抗拉强度的影响较小。

参考文献:

- [1] CHENG Y M. Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(3): 255 - 267.
- [2] 万文, 曹平, 冯涛, 等. 基于改进遗传算法的地下空区边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(11): 2015 - 2019. (WAN Wen, CAO Ping, FENG Tao, et al. Analysis of slope stability for underground vacant areas based on improved genetic algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(11): 2015 - 2019. (in Chinese))
- [3] KIM J Y, LEE S R. An improved search strategy for the critical slip surface using finite element stress fields[J]. Computers and Geotechnics, 1997, **21**(4): 295 - 313.
- [4] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, **26**(8): 1345 - 1348. (LIU Jin-long, LUAN Mao-tian, ZHAO Shao-fei, et al. Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on shear strength reduction technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(8): 1345 - 1348. (in Chinese))
- [5] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 406 - 411. (LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 406 - 411. (in Chinese))
- [6] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods[J]. Computers and Geotechnics, 2007, **34**: 137 - 150.
- [7] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, **49**(3): 387 - 403.
- [8] 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. (ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. The feasibility study of strength reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1): 21 - 27. (in Chinese))
- [9] Itasca Consulting Group. Theory and background[Z]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2002.
- [10] 林杭, 曹平, 宫凤强. 位移突变判据中监测点的位置和位移方式分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(9): 1433 - 1438. (LIN Hang, CAO Ping, GONG Feng-qiang. Analysis of location and displacement mode of monitoring point in displacement mutation criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(9): 1433 - 1438. (in Chinese))
- [11] 唐芬, 郑颖人. 边坡稳定安全储备的双折减系数推导[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007, **26**(4): 95 - 100. (TANG Fen, ZHENG Yin-ren. Analysis on safety reserve of slope with two strength reduction factor[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2007, **26**(4): 95 - 100. (in Chinese))
- [12] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 边坡临界失稳状态的判定标准分析[J]. 煤炭学报, 2008, **33**(6): 643 - 647. (LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, et al. Analysis of the standards for critical failure state of slope[J]. Journal of China Coal Society, 2008, **33**(6): 643 - 647. (in Chinese))
- [13] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 332 - 336. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 333 - 336. (in Chinese))
- [14] 宋二样. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(2): 1 - 7. (SONG Er-xiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(2): 1 - 7. (in Chinese))
- [15] 郑颖人, 龚晓南. 岩土塑性力学基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. (ZHENG Ying-ren, GONG Xiao-nan. Basis of geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989. (in Chinese))
- [16] 吴春秋. 非线性有限单元法在土体稳定分析中的理论及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (WU Chun-qi. Theory and application study on the non-linear FEM for soil stability analysis[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [17] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HUANG Wen-xi. Engineering characteristic of soil[M]. Beijing: Water Resources and Power Press, 1983. (in Chinese)))

(本文责编 孙振远)