

基于 MSC . Marc 的边坡渗流及稳定有限元分析

娄一青^{1,2}, 黄养连³, 陈红梅^{1,2}, 蒋裕丰^{1,2}, 李 君⁴

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098 ;
3. 舟山市原水管理中心, 浙江 舟山 316021 ; 4. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 利用 MSC . Marc 软件提供的用户子程序, 对 MSC . Marc 进行二次开发。采用死活单元技术和折减过渡单元虚区高斯点渗透系数的方法对边坡的稳定渗流场进行分析, 由各节点水头值分析单元所受渗透力, 并以其代替周边孔隙水压力施加于土体单元, 最后采用有限元强度折减法进行渗流作用下边坡的稳定性分析。算例表明, 基于 MSC . Marc 软件分析边坡的渗流及稳定是可行的。
关键词 渗流 边坡稳定 有限元强度折减法 ; MSC . Marc 软件
中图分类号 : TV139 . 14 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-7647(2008)03-0029-04

Finite element analysis of slope seepage and stability with MSC . Marc / LOU Yi-qing^{1,2}, HUANG Yang-lian³, CHEN Hong-mei^{1,2}, JIANG Yu-feng^{1,2}, LI Jun⁴ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 3. Zhoushan Raw Water Management Centre, Zhoushan 316021, China ; 4. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)
Abstract : By use of user subroutines, the MSC . Marc soft is further developed, and the seepage field of soil slope is analyzed with the active and inactive element technique and the method of adjusting the permeability coefficient at Gauss points in transitional elements. The seepage force, instead of the pore-pressure around soil element, is analyzed with the water head at each node of the seepage field. Finally, the stability of soil slope under seepage is studied with the strength reduction finite element method. An example calculation indicates that the approach in this paper is feasible in practice.
Key words : seepage ; slope stability ; strength reduction finite element method ; MSC . Marc soft

边坡的稳定性在很大程度上受到渗流作用的影响, 因此近年来国内外专家学者针对渗流作用对边坡稳定性的影响做了大量的研究工作。毛昶熙等^[1]以三角形单元的渗透力取代条分法中垂直土条周围的水压力, 提出了圆弧滑动的有限元法 ; 汪自力等^[2]以土体单元渗透力取代其周边孔隙水压力, 进行饱和-非饱和渗流作用下边坡的稳定性分析 ; 唐晓松等^[3]应用 PLAXIS 程序, 采用有限元强度折减法分析了水平自由面渗流作用下边坡的安全系数。
目前, MSC . Marc, ANSYS 等商业软件已广泛应用于水利土木工程中, 但关于将这些软件运用于渗流及边坡稳定分析的信息较少。文献 [4] 中采用 MSC . Marc 软件中的死活单元技术和折减过渡单元虚区高斯点渗透系数的方法对渗流场进行研究, 并利用计算所得的节点水头进行渗透力的分析。本文

在此基础上, 以土体单元渗透力代替其周边孔隙水压力, 应用有限元强度折减法进行边坡的渗流及稳定性分析。

1 计算原理

1.1 渗流分析理论 1.1.1 渗流场数学模型

根据广义达西定律, 二维稳定渗流的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q = 0 \tag{1}$$

其边界条件为

$$\begin{aligned} h \Big|_{\Gamma_1} &= h_0 \\ - k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i \Big|_{\Gamma_2} &= q_0 \end{aligned}$$

式中： h 为水头函数； Γ_1 为已知水头边界； h_0 为已知水头； Γ_2 为已知流量边界； q_0 为已知流量； k_{ij} 为介质渗透张量分量； Q 为源汇项； n_i 为边界外法线方向余弦； x_i 表示直角坐标， $i = 1, 2$ 。

1.1.2 渗流作用力分析理论

采用有限单元法求解模型(1)，得到模型中各个单元节点的水头值，则此时单元内任意点的渗透压力为

$$p = \rho_w g (h - y) \tag{2}$$

可得单元单位面积的渗流力 f_s 为

$$f_s = - \frac{\partial p}{\partial S} \tag{3}$$

将式(2)代入式(3)，并对单元面积进行积分，可得单元渗透力 P_S 为

$$P_S = - \rho_w g \int_S \frac{\partial h}{\partial S} dS \tag{4}$$

将单元渗透力分解到直角坐标系中，则得 P_x 和 P_y 分别为

$$P_x = - \rho_w g \int_S \frac{\partial h}{\partial x} dS \tag{5}$$

$$P_y = - \rho_w g \int_S \frac{\partial h}{\partial y} dS + \rho_w g S$$

式中： S 为单元的面积； ρ_w 为水的密度； $\rho_w g S$ 表示单元所受浮力。

由式(5)并结合文献[1]可知，渗透力等价于浮力与作用在土条周边各水压力的总和，因此在进行稳定分析时，以渗透力作为水荷载施加在土体单元上，从而使问题得到简化。

1.2 边坡稳定有限元分析理论

1.2.1 有限元强度折减法原理

有限元强度折减法又称强度储备安全系数法，有限元计算中通过不断降低岩土强度使材料最终达到破坏状态，此时的折减系数就是强度折减安全系数。对于 Mohr-Coulomb 材料，强度折减安全系数 ω 可表示为^[5]

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) / \omega = c' + \sigma \tan \varphi' \tag{6}$$

其中

$$c' = c / \omega$$

$$\tan \varphi' = \tan \varphi / \omega$$

式(6)中，将土体的抗剪强度指标 c 和 φ 用一个折减系数 ω 进行折减，然后用折减后的抗剪强度指标 c' 和 φ' 取代原来的抗剪强度指标 c 和 φ 在有限元分析中使用，直到材料达破坏状态为止。根据有限元计算结果自动得到破坏滑动面，并获得强度折减安全系数 ω 。

1.2.2 本构模型和屈服准则

有限元强度折减法中岩土材料本构模型采用理想弹塑性模型，安全系数的大小与采用的屈服准则

密切相关，不同的屈服准则会得出不同的安全系数。计算中通常选用的屈服准则是 Mohr-Coulomb 准则、Drucker-Prager 准则和 Mohr-Coulomb 等面积圆准则。

Mohr-Coulomb 准则较为可靠，但是由于 Mohr-Coulomb 准则在 π 平面上的屈服轨迹为六角形，在主应力空间的屈服面有 1 个奇异的顶点，易导致计算不收敛。为了消除角点，提出了以与 Mohr-Coulomb 六棱锥相关的圆锥作为屈服面，将拐角消除变成光滑的曲面，其在 π 平面上的屈服轨迹为圆，该屈服准则即为 Drucker-Prager 准则，用函数表示如下^[6]：

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \tag{7}$$

式中： I_1, J_2 分别为应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量； α, K 为与岩土材料黏聚力 c 和内摩擦角 φ 有关的常数，不同的 α, K 在 π 平面上代表不同的圆。在 π 平面上，Drucker-Prager 圆可以是 Mohr-Coulomb 六角形外角点外接圆(DP1)、内角点交接圆(DP2)、等面积圆^[7](DP3)和内切圆(DP4)。文献[8]给出了各种准则参数换算及计算所得安全系数之间的转换关系。

1.2.3 边坡失稳判据

有限元强度折减法分析边坡稳定性的一个关键问题是如何根据计算结果来判别边坡是否处于稳定状态。目前，常用的边坡失稳判据主要有以下 3 种：

①收敛性判据^[9]，即采用有限元计算中迭代不收敛作为边坡失稳的标志；②突变性判据^[10]，即以计算过程中关键部位位移发生突变作为边坡失稳的标志；③塑性区贯通判据^[11]，即以广义或等效塑性应变从坡脚到坡顶贯通作为边坡破坏的标志。文中采用塑性区贯通作为失稳判据推求边坡稳定安全系数。

2 渗流及稳定分析在 MSC. Marc 中的实现

2.1 渗流场及渗透力分析

由于多孔介质渗流的控制方程与热传导方程相似，因此，可以按照处理热传导问题的数值方法来求解渗流方程，即在 MSC. Marc 软件中选择热传导模块来分析渗流场。问题的关键是如何通过二次开发来确定自由面和逸出点的位置。在迭代求解渗流自由面时，采用 MSC. Marc 软件提供的死活单元技术(子程序接口 UACTIVE^[12])对单元高斯点的计算水头 h 与高程 z 进行比较：若单元所有高斯点 $h < z$ ，则将该单元“杀死”(虚区)；若单元所有高斯点 $h > z$ ，则该单元为“活”单元(实区)；若单元的部分高斯点位于实区，部分高斯点位于虚区，则该单元为过渡单元。对于过渡单元通过各向异性热传导矩阵的子程序接口 ANKOND，采用单元渗透矩阵调整法^[13]来进行处理：当高斯点 $h \geq z$ 时，采用实际的渗

透系数;当高斯点 $h < z$ 时,渗透系数取实际值的 $1/1000$ 。在搜寻逸出点位置时,先假定整个可能逸出区域为已知水头边界,各节点的水头值等于其位置高程。在迭代过程中,结合死活单元技术,根据各迭代步骤的计算结果不断地将虚区的单元‘杀死’。调整可能逸出区域的范围,将‘死’单元的节点从该区域中去除,将‘活’单元的节点保留并继续作为已知水头边界进行下一次的迭代计算。当前后 2 次迭代计算的节点水头差小于容许误差时计算停止,此时便可确定渗流自由面和逸出点的位置。

计算出渗流场之后,由式(5)编制相应的程序计算土体单元各个方向的渗透力。在求解单元渗透力时,输出单元中各个高斯点的渗透力,通过用户子程序接口 FORCEM 施加到单元各个相应的高斯点上,作为水荷载对模型进行弹塑性有限元计算分析。

由于 MSC. Marc 软件的后处理模块中没有设置专门的自由面处理功能,在绘制渗流场水头分布图时只根据单元各个高斯点的水头值进行插值,从而使得到的渗流自由面呈锯齿形分布,而并非光滑的曲面。因此,在对计算结果进行后处理、绘制渗流场水头分布图时,应特别注意对自由面的处理。由于自由面上各点的水头值等于其高程,因此在根据计算结果绘制好等值线图后,选取各条等值线上水头值等于高程的点作为控制点,采用光滑的曲线将各控制点连起来,该光滑曲线即为渗流场的自由面(浸润线)。

2.2 稳定分析

MSC. Marc 软件中定义线性 Mohr-Coulomb 屈服函数表示如下^[14]：

$$f = \sqrt{3}\alpha I_1 + \sqrt{3}J_2 - \sigma_y = 0 \tag{8}$$

式中系数 α, σ_y 由式(9)定义：

$$c = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}(1 - 12\alpha^2)} \tag{9}$$

$$\frac{3\alpha}{\sqrt{1 - 3\alpha^2}} = \sin\varphi$$

经转换后写成如下形式：

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \tag{10}$$

$$\sigma_y = \frac{3c\cos\varphi}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi}}$$

对比式(7)和式(8)可以发现, MSC. Marc 软件中定义的线性 Mohr-Coulomb 准则,实际上是线性 Drucker-Prager 准则,且其初始屈服应力 $\sigma_y = \sqrt{3}K$, 对应于 Mohr-Coulomb 六角形内切圆(DP4)。因此,基于 MSC. Marc 软件的弹塑性模型和线性 Mohr-Coulomb 准则进行边坡的有限元强度折减稳定分析

是可行的。

3 算例分析

某均质土坡,坡高 $H = 20\text{ m}$,坡角 $\beta = 45^\circ$,土体密度 $\rho = 2 \times 10^3\text{ kg/m}^3$,土颗粒与水体的相对密度 $G_s = 2.71$,孔隙率 $n = 0.44$,黏聚力 $c = 42\text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 17^\circ$ (有效应力抗剪强度指标),渗透系数 $k_x = k_y = 1.0 \times 10^{-3}\text{ m/d}$ 。土坡右侧水头高 48 m ,土坡左侧水头高 32 m 。该边坡的尺寸及边界条件如图 1 所示,左右两侧水平约束,下部固定,上部为自由边界。渗流计算与稳定计算采用相同的网格,其有限元计算模型如图 2 所示,共剖分 4400 个单元,4551 个节点。

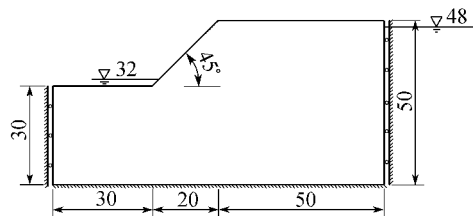


图 1 边坡尺寸及边界条件(单位:m)

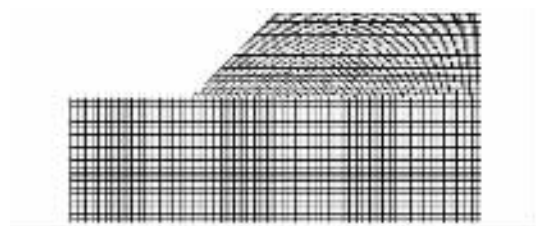


图 2 边坡有限元计算模型

边坡的渗流场分布如图 3 所示,渗透力分布如图 4 所示。由图 3~4 可以看出,基于 MSC. Marc 软件进行渗流有限元计算分析得到的结果总体上是令人满意的。在坡脚处等水头线分布比较密集,渗透坡降比其他地方大,渗透力比较集中,该处发生渗透破坏的可能性也比其他地方大。因此,在考察边坡的渗透稳定时,应将坡脚作为关键部位进行分析。边坡内渗透坡降最大值为 0.79,出现在坡脚处,坡脚以外其他部位的渗透坡降都在 0.30 之内。

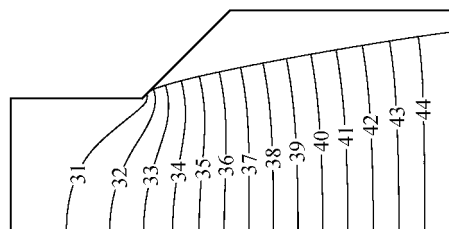


图 3 边坡渗流场分布(单位:m)

根据文献^[15],本边坡土体的渗透变形类型为流土,其临界水力坡降为

$$J_{cr} = (G_s - 1)(1 - n) \tag{11}$$

式中 J_{cr} 为土的临界水力比降。

结果有一定的差异,误差在 5% 左右。总体而言,采用有限元强度折减法进行渗流作用下边坡的稳定性分析是可行的。

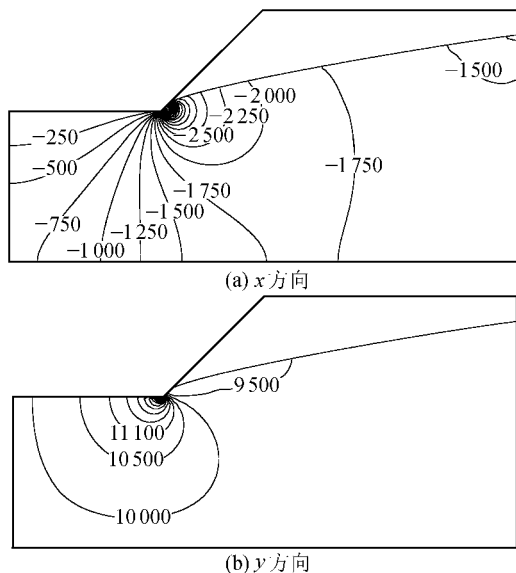


图 4 边坡渗透力分布(单位 N)

由式(11)可求得边坡土体的临界水力坡降为 0.96。由此可见,本边坡的渗透坡降小于临界坡降,尚处于渗透稳定状态,但坡脚出口处渗透稳定安全裕度较低,可采取适当的工程措施加以处理。

为分析渗流作用对边坡稳定性的影响,计算了天然情况下和水头荷载(渗流)作用下边坡的稳定安全系数,并进行比较。对于上述 2 种情况,均从 $\omega = 1.00$ 开始折减,以塑性区贯通时的 ω 值作为稳定安全系数。计算得出天然情况下边坡的稳定安全系数为 1.27,其等效塑性应变分布如图 5(a) 所示;水头荷载(渗流)作用下边坡的稳定安全系数为 1.21,比天然情况下降了 0.06,其等效塑性应变分布如图 5(b) 所示。图 5 中等效塑性应变幅值最大的点相连所得曲线为边坡的潜在滑动面。分析图 5 可以发现,在塑性区贯通后,边坡土体的等效塑性应变比较集中,呈带状分布,带状区域内土体基本接近极限状态,且考虑渗流作用时边坡塑性带比较宽,其潜在滑动面位置比天然情况下的略低,可能滑坡体体积比天然情况下的大。

为了验证分析成果的可靠性,采用传统的简化 Bishop 法计算该边坡的稳定安全系数,并与有限元方法计算的结果进行比较。采用简化 Bishop 法计算得到的天然情况下边坡的安全系数为 1.22,其可能滑动面如图 6(a) 所示;渗流作用下边坡的安全系数为 1.15,比天然情况下降了 0.07,其可能滑动面如图 6(b) 所示。对比图 5(a)、图 6(a) 和图 5(b)、图 6(b) 可以看出,采用有限元强度折减法与采用传统简化 Bishop 法计算得到的边坡可能滑动面位置基本一致。由于模型范围的大小、计算网格的疏密、屈服准则的选取等都对有限元强度折减法的计算结果有一定的影响,因此采用以上 2 种方法计算得到的

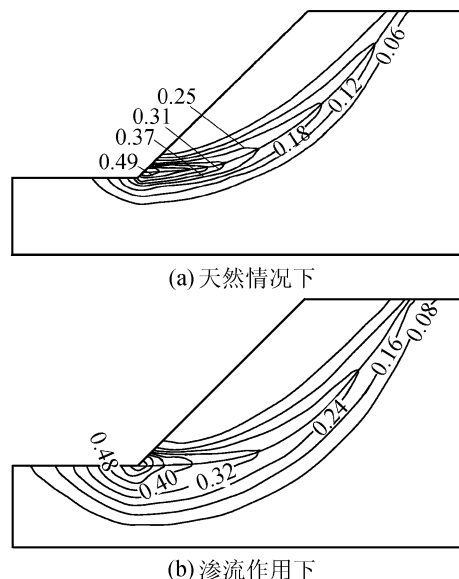


图 5 边坡等效塑性应变分布(局部放大)

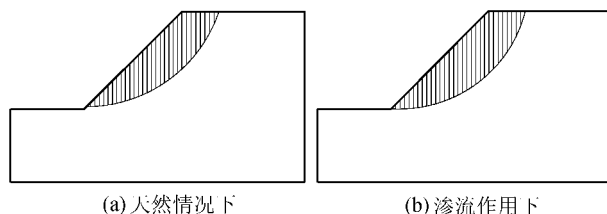


图 6 简化 Bishop 法计算得到的边坡可能滑动面(局部放大)

4 结 语

a. 基于 MSC. Marc 软件的热传导模块和死活单元技术,采用折减过渡单元虚区高斯点渗透系数的方法分析边坡有自由面的稳定渗流问题是可行的。

b. 基于 MSC. Marc 软件的弹塑性模型和线性 Mohr-Coulomb 准则,采用有限元强度折减法进行渗流作用下的边坡稳定分析是可行的。

c. 以土体单元渗透力取代其周边孔隙水压力,采用有限元强度折减法分析渗流作用下边坡的稳定性是可行的。

参考文献:

- [1] 毛昶熙,李吉庆,段祥宝. 渗流作用下土坡圆弧滑动有限元计算[J]. 岩土工程学报,2001,23(6): 746-752.
- [2] 汪自力,朱明霞,高青伟,等. 饱和-非饱和和渗流作用下边坡稳定分析的混合法[J]. 郑州大学学报,2002,23(1): 25-27.
- [3] 唐晓松,郑颖人,邬爱清,等. 应用 PLAXIS 有限元程序进行渗流作用下的边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报,2006,23(4): 13-16.

(下转第 44 页)

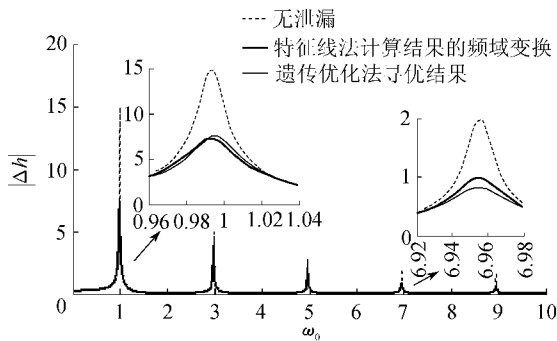


图4 全频域法辨识结果与特征线计算结果对比

表1 泄漏检测全频域法遗传算法辨识结果

进化代数/ 代	泄漏点距上游 水库距离/m	泄漏量/ 10^{-4}m^3	适应度
1	0.835 11	1.816 1	-0.002 892 7
10	0.753 30	2.135 4	-0.001 756 1
100	0.751 49	2.172 8	-0.001 752 0

变异概率 $p_m = 0.05$, 泄漏相对位置 l 的范围为 $0 < l < 1$, 泄漏量的范围 $0 < Q_{l0} < 0.3 Q_{00}$ 。由表1可看出, 种群经过100代的进化后, 辨识的泄漏位置和泄漏流量分别为751.5 m和0.21 L/s, 二者的寻优精度良好, 数值模拟少许偏差主要是受瞬间关闭时非恒定摩阻的影响。

4 结 论

本文分析了现有管道泄漏检测频域法的特点及其存在的问题, 建立了适合各种边界条件的管道水

击频域数学模型, 并应用拉氏变换原理导出了实测离散函数的频域数学模型。在此基础上, 提出完全在频域中检测管道泄漏的新方法, 称之为管道泄漏检测的全频域法。采用全频域法, 可以将管道泄漏检测过程转化为参数的优化过程, 用遗传优化方法辨识管道泄漏点和泄漏流量。最后, 通过数字算例检验了管道泄漏检测全频域法的可行性。

参考文献:

- [1] MPESHA W, GASSMAN S L, CHAUDHRY M H. Leak detection in pipes by frequency response method [J]. Hydr Engrg, 2001, 127(2): 124-147.
- [2] 毛汉领, 黄文, 包家福, 等. 自来水管网泄漏检测方法的研究 [J]. 噪声与振动控制, 2004(4): 20-23.
- [3] 杨开林, 郭宗周, 宋朝晖. 热力管网瞬变泄漏检测数学模型研究 [J]. 水利学报, 1996(5): 50-56.
- [4] 王通, 阎祥安, 李伟华. 基于谐波分析的输油管道泄漏检测机理研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(1): 51-54.
- [5] WANG Xiao-jian, LAMBERT M F, SIMPSON A R, et al. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients [J]. J Hydr Engrg, 2002, 128(7): 697-711.
- [6] LEE P J, VÍTKOVSKÝ J P, LAMBERT M F, et al. Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks [J]. J Hydr Engrg, 2005, 131(7): 596-604.
- [7] KIM S H. Extensive development of leak detection algorithm by impulse response method [J]. J Hydr Engrg, 2005, 131(3): 201-208.

(收稿日期 2007-07-31 编辑 骆超)

(上接第32页)

- [4] 黄耀英, 沈振中, 吴中如. Marc 软件在分析渗流场和渗流力中的应用 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 509-512.
- [5] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57-61.
- [6] 李咏偕, 施泽华. 塑性力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 108-111.
- [7] 徐干成, 郑颖人. 岩土工程中屈服准则应用的研究 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 93-99.
- [8] 赵尚毅, 郑颖人, 刘明维, 等. 基于 Drucker-Prager 准则的边坡安全系数定义及其转换 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2730-2734.
- [9] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 333-336.
- [10] 张培文, 陈祖煜. 糯扎渡大坝设计边坡稳定的有限元分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 207-210.
- [11] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用 [J]. 防灾减灾工程学报,

2003, 23(3): 1-8.

- [12] 陈火红, 尹伟奇, 薛小香. MSC. Marc 二次开发指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 288-289.
- [13] 朱军, 刘光廷. 改进的单元渗透矩阵调整法求解无压渗流场 [J]. 水利学报, 2001(8): 49-52.
- [14] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 158-166.
- [15] GB 50287-99, 水利水电工程地质勘察规范 [S].

(收稿日期 2007-09-28 编辑 骆超)

