

岩坡稳定的三维强度折减法分析

陈菲^{1,2}, 邓建辉³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 国电大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610016;

3. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 目前, 强度折减法基本上用于边坡的二维稳定分析。为研究其在岩石边坡三维稳定分析中的适用性, 选择平面滑动和楔形体滑动 2 个经典算例, 运用强度折减法求解其安全系数, 并与 E. Hoek 和 J. W. Bray 给出的解析解进行对比。计算结果表明, 数值解与解析解非常接近, 模拟的滑动方向与理论假定也基本一致。算例中, 结构面使用实体单元模拟, 为此进一步探讨结构面单元厚度和网格密度对计算精度的影响; 结构面均为平面, 其厚度为块体高度的 1/10~1/200, 厚度与单元数对安全系数的计算结果影响不大。对特征点位移准则和塑性区贯通准则进行比较分析, 认为结构面塑性区贯通收敛准则在理论上与极限平衡理论较为吻合, 实际应用上也易于操作, 作为收敛准则较为合理。三滑面五面体滑动算例进一步验证该方法的适用性。

关键词: 边坡工程; 岩坡; 三维稳定性分析; 强度折减法

中图分类号: P642.22; O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)12 - 2546 - 06

THREE-DIMENSIONAL STABILITY ANALYSIS OF ROCK SLOPE WITH STRENGTH REDUCTION METHOD

CHEN Fei^{1, 2}, DENG Jianhui³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610016, China;

3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The strength reduction method(SRM) is mainly used for two-dimensional slope stability analysis. In order to verify its feasibility for the stability analysis of three-dimensional issues, two benchmark problems, i.e. planar slide and wedge slide, are selected; and the safety factors are calculated by SRM. The obtained safety factors agree well to the analytical solutions by E. Hoek and J. W. Brown; and the modeled sliding direction is also almost the same as the hypothetical one. In the analysis, solid elements are used to model the behavior of structural planes, so the influences of their thickness and element intensity on modeling precision are further investigated. For blocks cut by planar structural planes, the influence is limited when the thickness is 1/10 - 1/200 of the block height. Compared with the displacement criterion of characteristic points, the entirely run-through criterion of plastic zone is more rational for its theoretical coherence to the theory of limit equilibrium and its easy use in application. The stability of a pentahedron block is further analyzed to verify the applicability of the method.

Key words: slope engineering; rock slope; three-dimensional stability analysis; strength reduction method

1 引言

结构面是控制岩石边坡稳定的重要因素之一。

对于由结构面切割而成的简单块体稳定问题, 如平面失稳和楔形块体失稳, E. Hoek 和 J. W. Bray^[1]给出安全系数计算的解析表达式。但是, 对于由多个结构面切割而成的多面块体问题稳定问题, 目前只

收稿日期: 2005 - 11 - 28; **修回日期:** 2006 - 01 - 13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702); 国家自然科学基金资助项目(50279051)

作者简介: 陈菲(1980 -), 女, 2002年毕业于武汉大学水利水电建筑工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事边坡稳定方面的研究工作。E-mail: feierchen_sunny@163.com

能借助三维极限平衡法求解,或利用有限元法(或有限差分法)的应力计算成果,套用极限平衡法原理求解。应该指出,三维极限平衡理论目前有待于完善,条柱间不同的应力假定所得出的安全系数相差较大,工程应用无所适从;而基于应力计算成果所获得的安全系数比极限平衡法所得到的安全系数小,主要原因在于滑动面并未全部进入塑性状态,违背极限平衡法的基本假定^[2]。

近年来基于强度折减概念的有限元法或有限差分法在边坡稳定性分析中逐步得到推广应用,对于二维问题所得到的安全系数与极限平衡法是基本一致^[3~10],同时在主滑方向变动的滑坡三维稳定分析方面具有极限平衡法难以比拟的优点^[2]。强度折减法的这些特点为复杂块体的安全系数计算提供一条可行的途径。

本文利用 E. Hoek 和 J. W. Bray^[1]提供的两个算例(平面滑动和楔形体滑动)及一个三滑面五面体滑动算例,研究强度折减法在岩块三维稳定性分析中的适用性,并对计算中所涉及的几个主要问题,即网格密度对计算结果的影响及收敛准则等进行探讨。鉴于传统的界面单元,如 Goodman 单元和 Katona 单元等的非线性收敛性较差,文中使用实体单元模拟软弱界面,并对单元厚度对计算成果的影响进行分析。

2 强度折减法的基本原理

1975 年, O. C. Zienkiewicz 等首次提出抗剪强度折减系数概念,其所确定的强度储备安全系数与 Bishop 在极限平衡法中所给出的稳定安全系数在概念上是一致的^[8]。强度折减的基本原理是将材料的强度参数 c , $\tan \varphi$ 值同时除以一个折减系数 F , 得到一组新的 c' , φ' 值,然后作为新的材料参数进行试算,通过不断地增加折减系数 F ,反复分析研究对象,直至其达到临界破坏,此时得到的折减系数即为安全系数 F_s , 其分析方程为

$$c' = c / F \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan \varphi / F) \quad (2)$$

强度折减法的原理十分简单,应用中的关键问题是临界状态判定问题。目前主要有 4 类准则:

(1) 特征点的位移法,绘制研究对象多个特征点的位移与折减系数的关系曲线,以位移曲线出现较为明显的转折处对应的强度折减系数作为该研究

对象的安全系数。

(2) 结构面某一幅值的广义剪应变的贯通^[10]。

(3) 计算不收敛^[6]。

(4) 结构面塑性区贯通^[8]。

剪应变贯通准则中的广义剪应变不仅含塑性分量,且也包括弹性分量。虽然广义剪应变的大小能够在一定程度上反映剪切破坏状态,但是并不能准确地描述塑性区的发生与发展过程。所以以此作为判断失稳指标是不够合理和准确的^[8]。数值计算不收敛准则对数值计算软件和所建模型的质量依赖较大,作为收敛准则缺乏客观性。本文拟对这两个收敛准则进行探讨。

本文采用 FLAC^{3D} 实现岩体稳定的三维强度折减分析,屈服准则使用 Mohr-Coulomb 屈服准则,软弱结构面使用实体单元模拟。计算中除结构面单元使用理想弹塑性模型外,岩块与下伏基岩均使用线弹性模型。计算中借鉴郑宏等^[9]建议的方法,在对结构面的抗剪强度参数 c 和 φ 进行折减的同时,亦对其刚度参数 E 和 ν 作相应调整。在有限元计算中,采用关联流动法则的计算结果比采用非关联流动法则的计算结果稍大,一般为 3%~5%^[6]。同时关联准则在破坏机制上与极限平衡比较一致^[11],故本文采用关联准则,且认为剪胀角等于摩擦角。塑性区贯通准则的物理意义明确,本文将用其作为收敛准则,并对位移收敛准则进行探讨。

3 算例分析

3.1 平面滑动

图 1 给出了平面滑面计算模型。结构面使用一厚度为 1.125 m 的薄层六面体单元模拟。计算范围 x 向 120 m, y 向 100 m, z 向 70 m。岩块高度 22.50 m。结构面的抗剪强度指标为 $c = 20$ kPa, $\varphi = 30^\circ$ 。

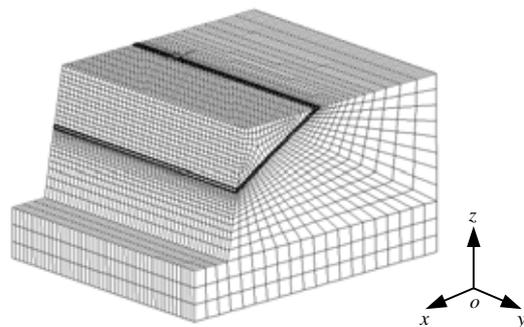


图 1 平面滑面计算模型

Fig.1 Calculation model of three-dimensional mesh for a planar landslide

计算边界两端设水平向约束，底部设竖向约束，坡面自由。计算分两步进行，第一步计算在重力作用、弹性状态下的应力和变形，作为初始状态；第二步把位移清零，计算结构面在塑性状态下的变形和破坏发展过程。

此例计算的理论解为 $F_s = 1.233$ 。计算的安全系数为 $F_s = 1.215$ ，相对误差 1.460%，满足精度要求。

3.2 楔形体滑动

楔形体滑动分非对称楔形体和对称楔形体 2 种情况。楔形体滑动算例几何参数如表 1 所示。本例中楔形体的左、右结构面采用相同的抗剪强度指标，对于非对称楔形体 $c = 50 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 30^\circ$ ；而对于对称楔形体， $c = 20 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 20^\circ$ ，岩石重度均为 26 kN/m^3 。

表 1 楔形体滑动算例几何参数表
Table 1 Geometrical parameters of wedges

部位	对称楔形体		非对称楔形体	
	倾向/(°)	倾角/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)
左结构面	115	45	120	40
右结构面	245	45	240	60
顶面	180	10	180	0
坡面	180	60	180	60

(1) 非对称楔形体

图 2 给出了非对称楔形体三维计算模型，结构面厚度取 2 m。计算范围分别为：x 向 375.96 m，y 向 476.70 m，z 向 238.35 m。楔形体高度 100.00 m，共划分 10 612 个节点，9 120 个六面体单元。

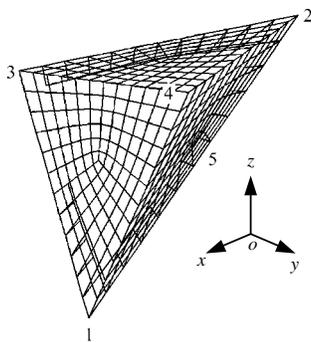


图 2 非对称楔形体三维计算模型
Fig.2 Three-dimensional calculation model for an asymmetrical wedge

图 3 给出了结构面塑性区扩展过程(阴影部分单元处于弹性状态)。当折减系数 $F = 1.623$ ($c' =$

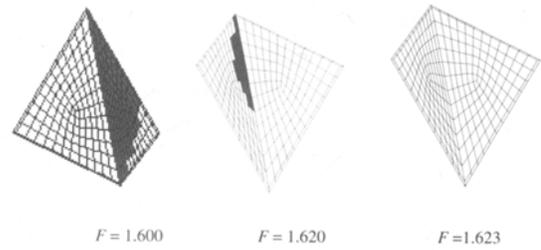


图 3 结构面塑性区扩展过程(阴影部分单元处于弹性状态)
Fig.3 Development of plastic zones in slip surface with strength reduction(shaded areas are in elastic state)

30.807 kPa ， $\varphi' = 19.58^\circ$ ），结构面的塑性区完全贯通，岩块处于极限平衡状态。E. Hoek 和 J. W. Bray^[1] 给出的解析解为 $F = 1.64$ 。计算值与理论值的相对误差为 1.037%。

(2) 对称楔形体

图 4 给出了对称楔形体三维计算模型。结构面使用一薄层四面体单元模拟。结构面厚度取 1.3 m，计算范围分别为：x 向 587.71 m，y 向 796.60 m，z 向 398.30 m。楔形体高度 64.89 m，共划分 4 229 个节点，21 109 个四面体单元。

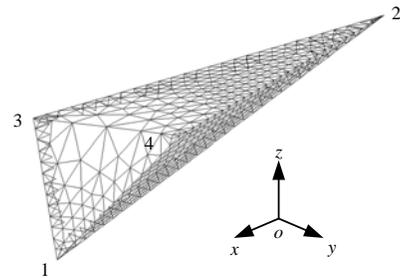


图 4 对称楔形体三维计算模型
Fig.4 Three-dimensional calculation model for a symmetrical wedge

图 5 给出 F_s 值逐渐升高的条件下结构面塑性区扩展过程。当折减系数 $F=1.520$ ($c' = 13.00 \text{ kPa}$ ， $\varphi' =$

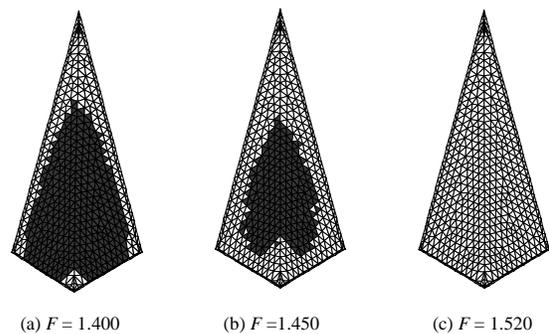


图 5 结构面塑性区扩展过程(阴影部分单元处于弹性状态)
Fig.5 Development of plastic zones in slip surface with strength reduction(shaded areas are in elastic state)

13.46°)时结构面的塑性区完全贯通, 岩块处于极限平衡状态。E. Hoek 和 J. W. Bray^[1]给出的解析解为 $F = 1.55$ 。计算值与理论值的相对误差为 1.935%。

3.3 三滑面五面体滑动

图 6 给出了三滑面五面体三维计算模型, 其后缘结构面产状为 $180^\circ \angle 45^\circ$, 其他几何与物理参数与图 2 所示的非对称楔形体相同。结构面厚度取为 2 m, 共划分 14 543 个节点, 12 708 个六面体单元。

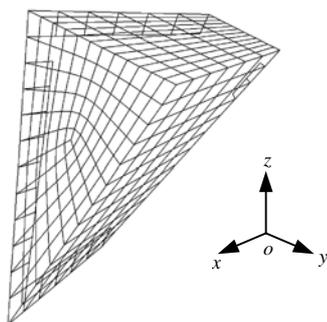


图 6 三滑面五面体三维计算模型

Fig.6 Three-dimensional calculation model for a pentahedron

图 7 给出了折减系数值逐渐升高的条件下结构面塑性区的扩展过程。当折减系数 $F = 1.600$ ($c' = 31.25 \text{ kPa}$, $\varphi' = 19.84^\circ$)时结构面的塑性区完全贯通, 岩块处于极限平衡状态。该算例的安全系数略低于图 2 的非对称楔形体(图中粗线是滑动面的交线)。

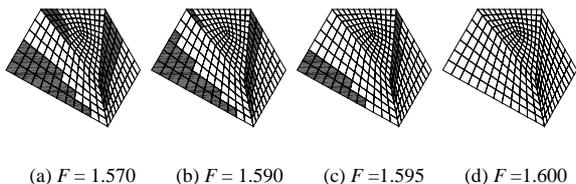


图 7 结构面塑性区扩展过程(阴影部分单元处于弹性状态)
Fig.7 Development of plastic zones in the slip surface during strength reduction(shaded areas are in elastic state)

4 讨 论

4.1 结构面单元厚度的影响

以平面滑动和非对称楔形体滑动为例, 探讨结构面单元厚度对计算安全系数的影响。表 2 给出不同结构面厚度下的安全系数。在块体高度的 1/10~1/200 范围内, 结构面厚度对安全系数的计算结果影响不大, 计算安全系数与解析解的平均相对误差为

表 2 结构面单元厚度对计算安全系数的影响

Table 2 Influence of structural plane thickness on calculation safety factor F_s

相对厚度	平面滑面		非对称楔形体滑面		
	安全系数 F_s	相对误差 /%	相对厚度	安全系数 F_s	相对误差 /%
H/10	1.210	1.865	H/10	1.630	0.610
H/20	1.215	1.460	H/20	1.680	2.439
H/50	1.221	0.973	H/50	1.680	2.439
H/100	1.220	1.054	H/100	1.635	0.305
H/200	1.215	1.460			

注: H 为块体高度。

1.4%, 最大相对误差为 2.4%。

4.2 网格密度的影响

仍以平面滑动和非对称楔形体滑动为例, 采用结构面厚度为 $H/50$ 的模型, 探讨结构面单元数或网格密度对计算安全系数的影响, 网格密度对计算安全系数的影响如表 3 所示。网格密度对计算安全系数影响不大, 两者的平均误差为 1.5%。

表 3 网格密度对计算安全系数的影响

Table 3 Influence of interface element density on calculation factors F_s

结构面单元数	平面滑面		非对称楔形体滑面		
	安全系数 F_s	相对误差 /%	结构面单元数	安全系数 F_s	相对误差 /%
2 775	1.220	1.054	600	1.695	3.354
1 250	1.221	0.973	486	1.680	2.439
595	1.222	0.933	384	1.665	1.524
300	1.222	0.892	216	1.623	1.037
91	1.220	1.054	150	1.610	1.829
			96	1.620	1.220

4.3 位移收敛准则

图 2, 4 中几个特征点的位移随强度折减系数的变化见图 8, 9。对于非对称楔形体, 5 个特征点的位移变化曲线基本一致(见图 8), 并且在安全系数解析解 $F_s = 1.64$ 处, 曲线变化有加速趋势, 但是转折点不十分明显。对于对称楔形体, 处于对称位置上的特征点 3, 4 的位移变化基本一致(见图 9)。特征点 2 跟其他特征点相比较, 位移数值比较大, 其位移与强度折减系数的变化曲线也呈现出不同的变化

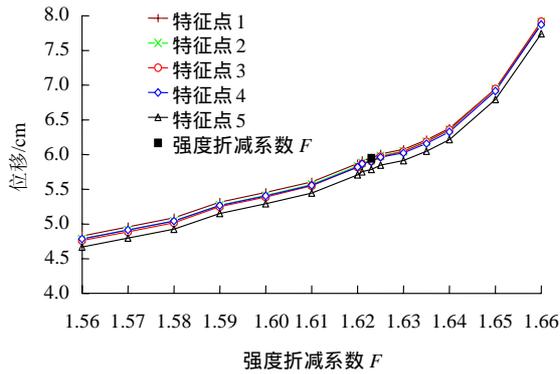


图 8 非对称楔形体特征点平面位移与强度折减系数的关系
Fig.8 Displacements of key points vs. factors of strength reduction for an asymmetrical wedge

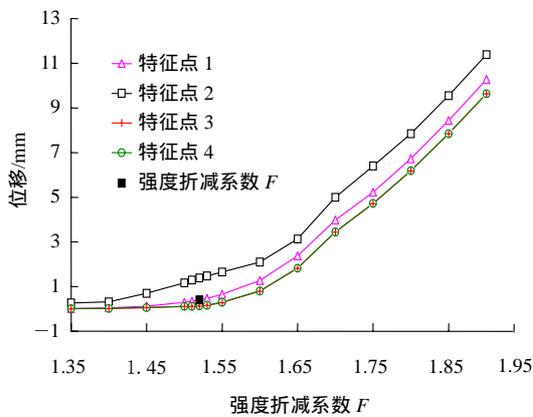


图 9 对称楔形体特征点平面位移与强度折减系数的关系
Fig.9 Displacements of key points vs. factor of strength reduction for a symmetrical wedge

特征。因此，对于特征点位移收敛准则问题包括两个方面：如何选择特征点及如何选择合适的位移变化量作为转折点出现的评判准则。两种选择的人为主观因素均较大，作为收敛的评判准则缺乏客观性。

4.4 滑动方向

图 10, 11 分别为临界状态时非对称楔形体模型和对称楔形体模型的平面滑动方向矢量图。计算滑动方向基本上平行楔形体交线上,同 E. Hoek 和 J. W. Bray^[1]假设的方向一致，一定程度上验证计算结果的合理性和可比性。

图 12 为临界状态时三滑面五面体模型的平面滑动方向矢量图。定义滑动方向角为平面滑动方向与 x 轴正向的夹角，顺时针方向为负，逆时针为正。图 13 给出了计算滑动方向统计结果。

由图 13 可知，块体的变形明显受后缘结构面控制，变形方向与后缘法线方向的平面投影基本一致。

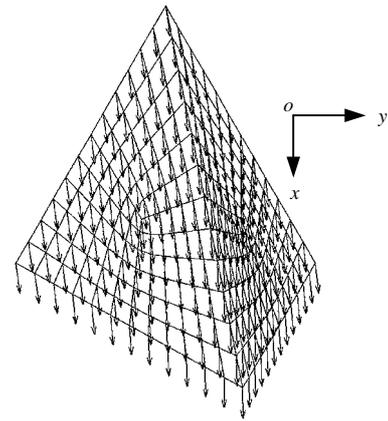


图 10 临界状态时非对称楔形体平面滑动方向矢量图
Fig.10 Sliding direction vectors of an asymmetrical wedge at critical state

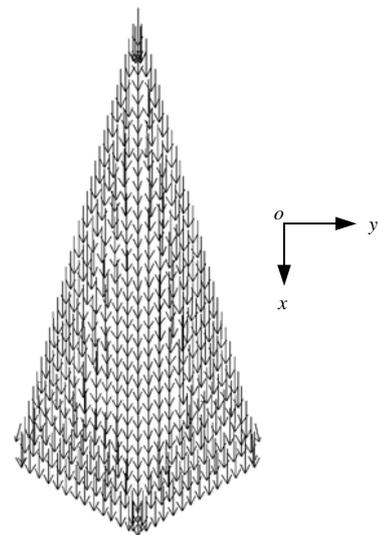


图 11 临界状态时对称楔形体平面滑动方向矢量图
Fig.11 Sliding direction vectors of a symmetrical wedge at critical state

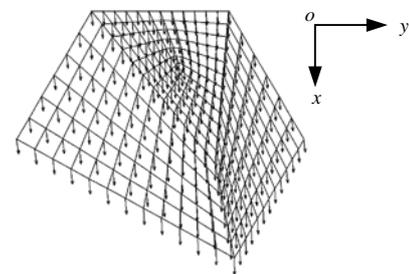


图 12 临界状态时三滑面五面体平面滑动方向矢量图
Fig.12 Sliding direction vectors of a pentahedron at critical state

同时受前缘结构面的交线(与 x 轴夹角为 11°)的作用，和 x 轴有一定的偏角。

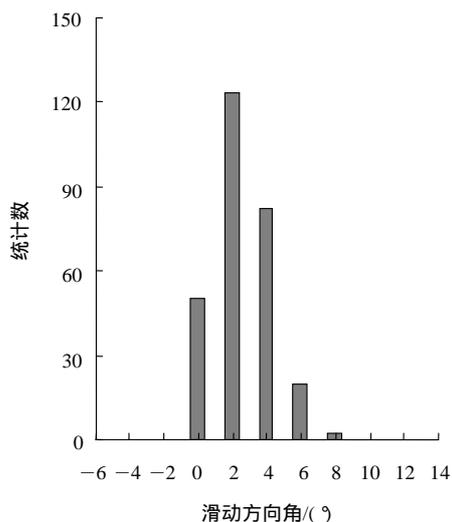


图 13 计算滑动方向统计结果

Fig.13 Statistics results of sliding direction calculation

5 结 语

本文利用强度折减法对由结构面切割的岩块稳定性进行评价,通过数值解与解析解的对比分析,得出如下的结论:

(1) 强度折减法可用于岩块稳定的三维稳定性评价,结构面使用实体单元模拟是合理的。使用强度折减方法可获得与传统的极限平衡法基本一致的安全系数。

(2) 对于平面结构面,在块体高度的 1/10~1/200 处,结构面厚度和单元数(网格密度)对安全系数的计算结果影响不大。这一结论是否适用于曲面型滑动尚需进一步验证。

(3) 特征点位移法收敛准则在特征点与曲线转折点选取方面的人为主观因素较大,作为收敛准则缺乏客观性,建议尽量使用结构面塑性区贯通收敛准则。

参考文献(References):

[1] Hoek E, Bray J W. Rock Slope Engineering[M]. London: E and FN Spon, 1981.

[2] 邓建辉,张嘉翔,闵 弘,等. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法(II): 加固安全系数计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 871 - 875.(Deng Jianhui, Zhang Jiexiang, Min Hong, et al. Three-dimensional stability analysis of landslides based on strength reduction(II): evaluation of reinforcing factor of safety[J]. Rock and

Soil Mechanics, 2004, 25(6): 871 - 875.(in Chinese))

- [3] 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): 343 - 346.(Zhao Shangyi, Zheng Yingren, Shi Weimin, et al. Analysis of safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 - 346.(in Chinese))
- [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, 2003, 22(2): 254 - 260.(Zhao Shangyi, Zheng Yingren, Deng Weidong, et al. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 254 - 260.(in Chinese))
- [5] 张鲁渝,郑颖人,赵尚毅. 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 Luyu, Zheng Yingren, Zhao Shangyi, 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))
- [6] 赵尚毅,郑颖人. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 381 - 3 388.(Zhao Shangyi, Zheng Yingren. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3 381 - 3 388.(in Chinese))
- [7] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [8] 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.(Luan Maotian, Wu Yajun, Nian Tingkai. A criterion for evaluating slope stability based on development of plastic zone by shear strength reduction FEM[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(3): 1 - 8.(in Chinese))
- [9] 郑 宏,李春光,李焯芬,等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626 - 628.(Zheng Hong, Li Chunguang, Lee C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 626 - 628.(in Chinese))
- [10] 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 Zhenying, Han Guocheng, Kong Xianjing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 406 - 411.(in Chinese))
- [11] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.