

基于三维多重网格法的极限平衡法在锦屏高边坡稳定性分析中的应用

杨 强, 朱 玲, 薛利军
(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 结合锦屏高边坡三维非线性有限元仿真分析, 对高边坡整体稳定分析的极限平衡计算方法进行了研讨。提出并采用多重网格的概念和方法, 将有限元的应力成果转移到任一滑面(平面或曲面)上, 进而分析滑面的稳定状态, 包括滑面的应力、屈服区与剪应力的分布及变化过程, 并可求出类似刚体极限平衡法的滑面安全系数和滑块体安全系数, 进而对块体变形直至失稳的全过程进行了全面深入的探讨。

关键词: 边坡工程; 刚体极限平衡法; 块体; 滑动面

中图分类号: P 642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5313 - 06

APPLICATION OF LIMIT EQUILIBRIUM METHOD TO STABILITY ANALYSIS OF JINPING HIGH SLOPE BASED ON 3D MULTI-GRID METHOD

YANG Qiang, ZHU Ling, XUE Li-jun

(Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on 3D nonlinear FEM analysis of Jinping high slope, the rigid limit equilibrium method in the stability analysis of high slope is discussed. The first stage hydropower station of Jinping locates between in Yanyuan county and Muli county in Sichuan province. It is an important cascade hydropower station in Yalong River. The high slopes of both left and right banks of Jinping Hydropower Station are on large scales, and the geology is complicated too. The excavated slopes of this project include the excavated slope of spandrel groove and cable machine platform. The concept and method of multiply mesh are put forward, and the stress result of FEM is transferred to any sliding surface(plane or surface). In this way, the stability state of sliding surfaces can be analyzed. The stress distribution on sliding surfaces of sliding blocks is computed, including the safety factor of the sliding surfaces and blocks at each load step, yield area, normal strength and shear strength of sliding surfaces during overloading. Based on the results, the process of sliding blocks' failure due to deformation is discussed systemically. This findings can provide a more profound cognition on limit equilibrium analysis for stability analysis of high slope in practical engineering.

Key words: slope engineering; rigid limit equilibrium method; blocks; sliding surfaces

1 引 言

在传统的边坡稳定分析的工程实践中, 多数采

用极限平衡条分法。对于给定滑动面的边坡, 为了使问题变得静定可解, 各种极限平衡条分法都对条底上法向力的作用点以及条间推力的方向或作用线作了不同的假定, 从而使方法的严密性受到损害^[1]。

收稿日期: 2005 - 06 - 14; **修回日期:** 2005 - 07 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50279016); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708)

作者简介: 杨 强(1964 -), 男, 1988 年于清华大学水利水电工程系水工结构专业获硕士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事水工结构和岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: yangq@tsinghua.edu.cn.

随着有限元法的发展,越来越多的研究人员开始尝试将极限分析与有限元法结合起来,于是不少新的计算方法应运而生^[2~8],强度折减法就是其中之一。但这种算法依赖有限元的计算收敛性,而三维非线性有限元的收敛问题长久以来并未得到很好的解决。

本文提出了多重网格的概念和方法,将有限元的应力成果转移到任一滑面(平面或曲面)上,进而求得其上的应力分布及合力,分析滑面的稳定状态,并可求出类似刚体极限平衡法的滑面安全系数和滑块安全系数,从而对滑块变形直至失稳的全过程进行了全面深入的探讨。本文以锦屏左岸高边坡为例,分析锦屏左坝肩的整体稳定尤其是变形拉裂岩体的稳定性问题。此变形拉裂岩体以 f₄₂₋₉ 断层为上游侧滑面、以 NNW 向裂隙密集带为下游侧滑面、以煌斑岩脉为后缘拉裂面,高程差近 400 m,且同一侧滑面的不同部位,材料参数有所不同。

2 多重网格法简介

三维有限元的应力成果依托于结构网格,以高斯点应力成果精度最高,节点应力都是由高斯点应力修匀而得。多重网格法的思路是,将滑面(平面或曲面)剖分成平面或曲面网格,滑面上各个节点应力由有限元高斯点应力值插值得到,具体步骤如图 1, 2 所示:先搜索与滑面 P 中节点 A 距离最近的一个高斯点 B,取其所在单元 M 所有高斯点进行应力插值。插值方法如下式所示,这里的单元均假设采用 8 个高斯点积分点:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sum_{k=1}^8 \sigma_{ij}^{(k)} S_k \\ S_k &= \frac{1}{\sum_{k=1}^8 \frac{1}{L_k^n}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为滑面网络上任一节点 A 的某一应力, $\sigma_{ij}^{(k)}$ 为单元 M 中第 k 个高斯点的某一应力, S_k 为单元 M 第 k 个高斯点的权函数, L_k 为节点 A 与第 k 个高斯点的距离。当指数 $n = 0$ 时,节点应力为 8 个高斯点应力的算术平均;当 $n \rightarrow \infty$ 时,节点应力就是最近高斯点的应力。经计算比较,本研究取 $n = 2$ 。理论上,在天然地应力场作用下上游侧滑面、下游侧滑面和后缘拉裂面的合力应与块体自重平衡,其方向垂直向下,利用这一点作者校核了多

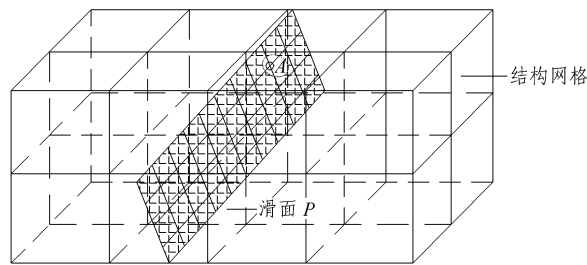


图 1 滑面与结构网格示意图

Fig.1 Sliding surface and structural mesh

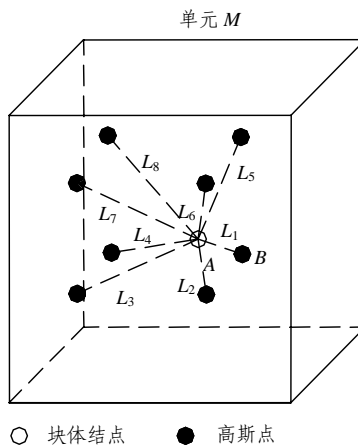


图 2 权函数示意图

Fig.2 Sketch map of weight function

重网格的误差。对锦屏左岸变形拉裂岩体的计算表明,当 n 取 2 时,得到三面的合力方向偏离铅直方向约 5° ,合力大小和自重相差约 6%。

滑面网格一般采用四边形单元。在四边形单元中,先将单元分为 2 个三角形(如图 3 所示),单元力矢量为 2 个三角形上力矢量的叠加。单元中任一三角形上的力矢量按下式计算:

$$F_i = \sigma_{ij} \bar{A}_j \quad (2)$$

其中,

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{3} (\sigma_{ij}^{(A)} + \sigma_{ij}^{(B)} + \sigma_{ij}^{(C)})$$

$$\bar{A}_j = \frac{1}{2} \overrightarrow{BC} \times \overrightarrow{BA}$$

式中: F_i 为某一单元其中一个三角形上的力; σ_{ij} 为该单元中其中一个三角形所有节点应力的平均应力; $\bar{A}_j = A_j$ 为该单元其中一个三角形的面积矢量; \overrightarrow{BC} , \overrightarrow{AC} 均为构成该三角形的节点形成的矢量。

将滑面上各单元法向矢量加和求平均,即可得到滑面的平均法向矢量,然后将各单元的力矢量加和得到的合矢量投影到滑面平均法向上,即可得到

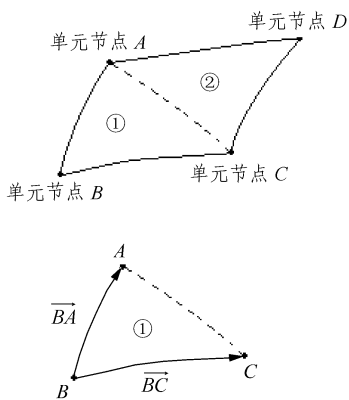


图3 面积矢量示意图

Fig.3 Sketch of area vector

滑面的法向合力，另一分量即为滑面的切向合力。由此可确定各滑面上的面安全度(式(6))及块体的整体安全度(式(5))。

3 基于有限元法的刚体极限平衡法基本原理

3.1 刚体极限平衡法

典型的边坡稳定分析的刚体极限平衡法如图 4 所示，滑移体是由 3 个结构面(上游侧滑面 F1、下游侧滑面 F2、上游拉裂面 F3)与临空面构成的块体。失稳岩体主要承受岩块自重 W ，以及作用在结构面上的渗透压力 U_1, U_2, U_3 和岩体抗力。考虑较为普遍的滑动块体沿交线 om 的滑动模式，此时假设拉裂面 nol 裂开，不存在法向反力 R_3 和切向力 S_3 ，但存在渗透压力 U_3 ，并假设上游侧滑面和下游侧滑面同时达到极限状态且切向力 S_1, S_2 平行于交线。这些假定意味着只有 3 个未知数， R_1, R_2 和 $S_1 + S_2$ ，由 3 个力的平衡条件可以确定它们，进而可求出稳定安全系数 K_c ，即

$$K_c = \frac{f_1(R_1 - U_1) + c_1A_1 + f_2(R_2 - U_2) + c_2A_2}{S_1 + S_2} \quad (3)$$

式中： R_1, S_1, U_1, A_1 分别为上游侧滑面法向力、切向力、渗透压力、面积； f_1, c_1 均为上游侧滑面剪摩系数； R_2, S_2, U_2, A_2 分别为下游侧滑面法向力、切向力、渗透压力、面积； f_2, c_2 为下游侧滑面剪摩系数。

3.2 基于有限元法的刚体极限平衡法

采用前述多重网格法，可直接根据有限元法应力成果求得滑面合力的法向和剪切分量，以式(3)为基础计算安全系数。需要指出的是，有限元计算中已经考虑了渗流场的作用，故而滑面上的渗透压力 U_1, U_2, U_3 不予考虑。另外刚体极限平衡法中的

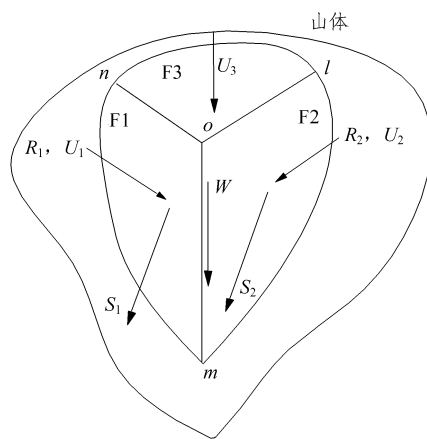


图4 典型边坡滑移块体图

Fig.4 Typical sliding block of slope

2 个侧滑面切向力 S_1, S_2 平行于交线 om 的假定也不成立，如图 5 所示。因此，计算滑块安全度时，要根据二者夹角 α (如图 5 所示，以面切向力到交线 om 顺时针方向为正)，投影到交线 om 上再代入计算。故基于有限元法的块体安全度 K 可由如下公式计算：

$$K = \frac{f_1R_1 + c_1A_1 + f_2R_2 + c_2A_2}{S_1 \cos \alpha_1 + S_2 \cos \alpha_2} \quad (4)$$

式中： α_1 为上游侧滑面切向力方向与滑面交线的夹角， α_2 为下游侧滑面切向力方向与滑面交线的夹角。

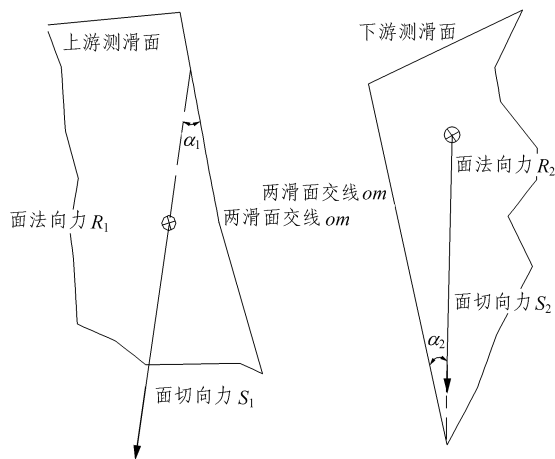


图5 面切向力与块体交线夹角示意图

Fig.5 Separation angle from intersect ant line of blocks to the surface tangential force

和式(3)一样，式(4)没有考虑同一滑面内不同部位材料参数有所不同的情况。若考虑材料分区，块体安全度计算公式(4)应修正为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{1i} R_{1i} + c_{1i} A_{1i}) + \sum_{i=1}^m (f_{2i} R_{2i} + c_{2i} A_{2i})}{\sum_{i=1}^n (S_{1i} \cos \alpha_{1i}) + \sum_{i=1}^m (S_{2i} \cos \alpha_{2i})} \quad (5)$$

式中： n 为上游侧滑面材料分区数； m 为下游侧滑面材料分区数； f_{1i} ， c_{1i} 为上游侧滑面各材料分区剪摩系数； f_{2i} ， c_{2i} 为下游侧滑面各材料分区剪摩系数； A_{1i} 为上游侧滑面各材料分区面积； A_{2i} 为下游侧滑面各材料分区面积； R_{1i} ， S_{1i} 分别为上游侧滑面各材料分区法向力与切向力； R_{2i} ， S_{2i} 分别为下游侧滑面各材料分区法向力与切向力； α_{1i} 为上游侧滑面各材料分区切向力与交线夹角； α_{2i} 为下游侧滑面各材料分区切向力与交线夹角。

根据多重网格法，也可以方便地求出单一滑面安全度：

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{f_1 R_1 + c_1 A_1}{S_1} \\ K_2 &= \frac{f_2 R_2 + c_2 A_2}{S_2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： K_1 为上游侧滑面安全度， K_2 为下游侧滑面安全度。

4 计算实例——锦屏左岸高边坡整体稳定分析

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内，是雅砻江干流上的重要梯级电站，工程枢纽位于盐源县洼里乡下游 10~15 km 的河段上。锦屏电站拱坝左、右岸高边坡规模大，地质条件复杂，存在深拉裂隙带、煌斑岩脉且层间挤压

带较发育。枢纽区工程开挖边坡主要包括拱肩槽、缆机平台等，均属于一级边坡。

三维整体计算网格参见图 6，材料屈服准则一律采用 D-P 准则^[9, 10]。左岸边坡稳定的关键块体为左岸的 NNW 向裂密带 + 煌斑岩脉 + f_{42-9} 断层组成的滑移块，属交线滑动的情况，其主要信息如表 1 所示。根据锦屏高边坡关键块体的几何信息进行了滑移体网格划分，如图 7 所示。表 2, 3 所示为开挖过程中各滑面及后缘拉裂面受力情况。表 4 所示为滑移块整体安全度。

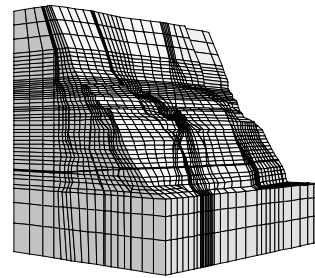


图 6 左岸有限元计算网格

Fig.6 Mesh of finite element analysis of left block of Jinping Hydropower Station

表 1 左岸边坡整体稳定分析块体参数

Table 1 Parameters of left slope blocks

编号	块体边界特征参数			力学参数	
	名称	产状	分区	c /MPa	f
1	NNW 向裂隙	NW18°	A3	0.55	0.68
	密集带	SE65°	A2	0.17	0.36
2	f_{42-9} 断层	NE80°	B3	0.31	0.50
		SE48°	B2	0.02	0.30
3	IV 岩体	NE10°	A1	0.60	0.70
		SE15°	B1	0.60	0.70

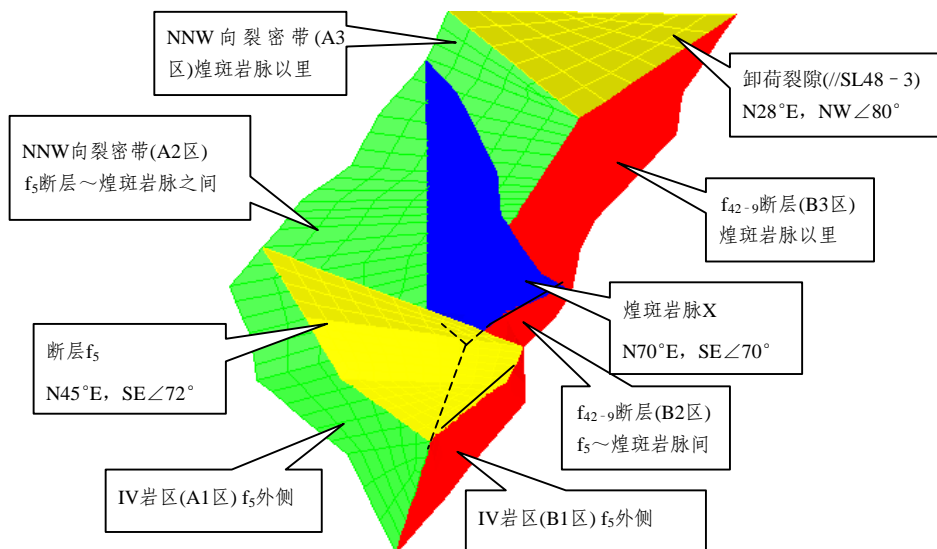


图 7 锦屏左岸变形拉裂体滑移边界抗剪参数分区分布

Fig.7 Shear parameter distribution of left block of Jinping Hydropower Station

表 2 开挖过程中滑面数据统计

Table 2 Data of sliding surfaces during excavation

滑面	开挖情况	法向力 (/10 ⁴ N)	切向力 (/10 ⁴ N)	切向力与交 线夹角/(°)	滑动力 (/10 ⁴ N)	切向力与真 倾角夹角 (/°)	面积/m ²	面安全度
NNW 向裂密带(A2区, $f=0.356$, $c=0.168$ MPa)	未开挖	3 130 501	2 230 536	-9.4	2 200 585	44.0	44 054.14	0.831
	开挖至坝顶	2 074 678	1 430 436	-10.9	1 404 629	48.0	29 464.99	0.862
	完全开挖	2 042 490	1 417 721	-11.2	1 390 721	48.4	29 464.99	0.862
f_{42-9} 断层(A2区, $f=0.3$, $c=0.02$ MPa)	未开挖	2 537 691	1 437 917	6.6	1 428 388	33.7	21 238.42	0.559
	开挖至坝顶	2 121 315	1 122 798	5.2	1 118 177	30.2	21 238.42	0.603
	未开挖	1 703 445	1 045 274	5.4	1 040 635	31.1	21 238.42	0.522

注: (1) 切向力与交线夹角以偏向交线为正; (2) 切向力与真倾角夹角以切向力偏向真倾角逆时针方向为正。

表 3 开挖过程中卸荷裂隙(平行于 SL_{48-3})受力情况统计

Table 3 Data of relaxed crack during excavation

卸荷裂隙	法向力/(10 ⁴ N)	切向力/(10 ⁴ N)	切向力与真倾角夹角/(°)	面积/m ²	面安全度
未开挖	2 257 415	2 342 561	0.7	22 872.62	1.260
开挖至坝顶	2 278 351	2 360 787	0.8	22 872.62	1.257
完全开挖	2 292 145	2 371 950	0.9	22 872.62	1.255

表 4 开挖过程中滑块(NNW 向裂密带、 f_{42-9} 断层与卸荷裂隙(平行 SL_{48-3}))体安全度统计

Table 4 Safety factor of block during excavation

NNW 向裂密带, f_{42-9} 断层, 卸荷裂隙	滑动力合力/(10 ⁴ N)	滑阻力合力/(10 ⁴ N)	体安全度
未开挖	15 1309 66	16 656 164	1.100 800
开挖至坝顶	13 376 184	15 205 997	1.136 796
完全开挖	11 707 186	12 505 532	1.068 193

由上述结果可得如下结论:

(1) NNW 向裂密带 A2 区: 坝顶以上开挖对该区影响很大, 法向力、切向力分别降低了 33.73%, 35.87%。切向力偏离交线 1.50, 面安全度为 0.86, 略有提高; 1 885 m(坝顶高程)以下的开挖对该区影响不大。

(2) f_{42-9} 断层 B2 区: 受开挖影响大, 开挖到坝顶后, 法向力、切向力分别降低了 16.41%, 21.91%, 切向力降幅相对较大, 面安全度由 0.56 增加到 0.60; 完全开挖后法向力、切向力分别降低了 32.87%, 27.31%, 切向力降幅略小。

(3) 后缘拉裂面—卸荷裂隙: 如表 3 所示, 由于该拉裂面距开挖区较远, 开挖过程中, 法向力、切向力、切向力偏转角均变化不大。

(4) 体安全度: 变形拉裂体安全度在未开挖、

开挖至坝顶、完全开挖时分别为 1.100 800, 1.136 796, 1.068 193, 表明开挖至坝顶时, 减载作用明显, 完全开挖后, 挖坡脚的作用明显。

5 结 论

本文结合锦屏高边坡三维非线性有限元仿真分析, 对高边坡整体稳定分析的极限平衡计算方法进行了探讨。提出了多重网格的概念和方法, 将有限元的应力成果转移到任一滑面(平面或曲面)上, 进而分析出滑面的稳定状态, 包括滑面的法向力、剪力及变化过程, 并可求出类似刚体极限平衡法的滑面安全系数和滑块体安全系数, 对滑块体变形直至失稳的全过程进行了全面深入的探讨。该研究对工程中高边坡的极限平衡稳定分析提供了更深刻的认识。

参考文献(References):

- [1] 郑颖人, 王敬林, 陆新, 等. 岩土力学与工程进展[M]. 重庆: 重庆出版社, 2003. 279 - 336.(Zheng Yingren, Wang Jinglin, Lu Xin, et al. Development of Geotechnical Mechanics and Engineering[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 2003. 279 - 336.(in Chinese))
- [2] 张均锋, 丁桦. 边坡稳定性分析的三维极限平衡法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 365 - 370.(Zhang Junfeng, Ding Hua. Generalized 3D limit-equilibrium method for slope stability analysis and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 365 - 370.(in Chinese))
- [3] 马建勋, 赖志生, 蔡庆娥, 等. 基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 690 - 2 693.(Ma Jianxun, Lai Zhisheng, Cai Qing'e, et al. 3D FEM analysis of slope stability based on strength reduction method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 690 - 2 693. (in Chinese))
- [4] 万文, 曹平, 吴永恒. 弹塑性极限平衡法分析复杂岩质边坡的稳定性[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(16): 100 - 108.(Wan Wen, Cao Ping, Wu Yongheng. Elasto-plastic limit equilibrium method for stability analysis of complex rock slope[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(16): 100 - 108.(in Chinese))
- [5] 姜清辉, 王笑海, 丰定祥, 等. 三维边坡稳定性极限平衡分析系统软件 SLOPE^{3D}的设计及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 121 - 1 125.(Jiang Qinghui, Wang Xiaohai, Feng Dingxiang, et al. SLOPE^{3D}—a three-dimensional limit equilibrium analysis software for slope stability and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 121 - 1 125.(in Chinese))
- [6] 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.(Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Zhang Luyu. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. Engineering Science, 2002, 4(10): 57 - 61.(in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 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. 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))
- [9] 杨强, 陈新, 周维垣. 基于 D-P 准则的三维弹塑性有限元增量计算的有效算法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 16 - 20.(Yang Qiang, Chen Xin, Zhou Weiyuan. A practical 3D elasto-plastic incremental method in FEM based on D-P yield criteria[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 16 - 20.(in Chinese))
- [10] 陈新, 杨强, 黄岩松, 等. 基于 D-P 准则的理想弹塑性材料本构关系积分的渐近解析解——子增量法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 465 - 2 469.(Chen Xin, Yang Qiang, Huang Yansong, et al. Sub-incremental method for perfect elasto-plastic material based on D-P yield criteria[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, (Supp.2): 2 465 - 2 469.(in Chinese))