

多层软弱夹层边坡岩体稳定性及加固分析

许宝田^{1,2}, 钱七虎¹, 阎长虹², 许宏发¹

(1. 解放军理工大学, 江苏 南京 210007; 2. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 野外地质调查发现九顶山边坡岩体内存在 3 条规模较大的软弱夹层控制着岩体的稳定性。采用数值法对该边坡岩体的变形特征进行研究, 发现直接开挖后沿软弱夹层将发生大的相对滑动, 岩体最大水平位移位于 P₂ 软弱夹层坡面附近, 达 1.25 cm, 相对滑动造成软弱夹层强度降低为残余强度, 易造成边坡失稳。P₁, P₂ 软弱夹层上剪应力最大值分别为 239.0, 172.4 kPa, 位于滑面中前部。当采用锚喷加固边坡时, 锚杆穿过软弱夹层时轴力突然增大, 表明 3 条软弱夹层均发生较大的变形, 对边坡稳定较为不利, 但锚杆加固效果明显, 能较大地提高边坡稳定性, 采用强度折减法计算得到加固后边坡稳定性系数为 1.65。结果表明, 应用数值模拟技术, 可以直观形象地反映出边坡变形及应力变化的全过程, 从而对工程措施优化、信息化设计和施工起超前预报与辅助决策起到一定的作用。

关键词: 岩石力学; 软弱夹层; 边坡; 岩体; 稳定性

中图分类号: TU 45; P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 3959 - 06

STABILITY AND STRENGTHENING ANALYSES OF SLOPE ROCK MASS CONTAINING MULTI-WEAK INTERLAYERS

XU Baotian^{1,2}, QIAN Qihu¹, YAN Changhong², XU Hongfa¹

(1. PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Three weak interlayers were found in the rock mass of Jiudingshan slope by outdoor investigation, which control the stability of the slope. The deformation characteristics of the slope rock mass are studied using numerical simulation. The results indicate that: (1) large relative slide will be induced by the direct excavation, and the maximum horizontal displacement, 1.25 cm, happens on the slope surface where the weak interlayer P₂ emerges; and (2) the relative deformation makes the strength of the weak interlayers reduce to be the residual one, which makes the slope more instable. The maximum shear stresses at the middle and front of the weak interlayers P₁ and P₂ are 239.0, 172.4 kPa respectively. When the slope is strengthened by anchors, the axial force increases rapidly near the weak interlayers, which indicates that the anchors make the stability of the slope be improved. The stability coefficient of the slope after reinforcement calculated by strength reduction method is 1.65. It is shown that the numerical simulation can give the variation process of deformation and stress in the slope, and it is helpful for engineering optimization, informational design and construction.

Key words: rock mechanics; weak interlayers; slope; rock mass; stability

1 引言

含软弱夹层岩体的破坏形式及其发展过程取决

于组合系统的稳定性, 系统的稳定性则与系统中夹层与围岩间的相互作用密切相关, 而系统中岩层间的相互作用又影响着岩体破坏的发展。因此, 岩层及其结构的破坏与系统的失稳是相互影响和相互制

收稿日期: 2008 - 10 - 12; **修回日期:** 2008 - 12 - 16

作者简介: 许宝田(1976 -), 男, 2000 年毕业于南京大学地球科学系水文地质与工程地质专业, 现为在站博士后, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: zhangqingxubt@sohu.com

约的^[1]。目前已有不少学者^[1~9]对软弱夹层对边坡岩体稳定性的影响进行了研究。软弱夹层是岩体中的不连续面,由于其物理力学性质差,不论厚薄,都会给工程建设带来一系列问题,常成为地下洞室、边坡稳定、坝基、坝肩抗滑稳定等的控制性弱面。历史上许多工程的失事、失稳,究其原因,大多是由于沿着软弱夹层或软弱结构面发生位移量很大的滑动而造成的^[10]。目前考虑软弱夹层对岩体稳定性影响的研究成果已经很多,但对岩体内部含多条软弱夹层时,岩体与软弱夹层相互作用导致的变形和稳定性问题则研究较少。本文针对具体边坡工程,运用FLAC数值模拟方法,对含多条软弱夹层岩体的应力分布和变形进行计算,并在此基础上,选取适当的边坡加固方法,最后采用强度折减法对含多条软弱夹层情况下加固后边坡岩体的稳定性进行计算,验证加固方案的效果。

2 工程概况

九顶山人工边坡是莱芜钢铁股份有限公司特钢厂扩建开坯车间征地需要而开挖形成的。车间长度方向与边坡走向一致,两者水平距离为6.0 m。原自然坡度小于30°,坡面未发现有软弱夹层出露,开挖后边坡最高约35.0 m,坡角一般为70°。边坡开挖后、厂房施工前发现该边坡存在较大安全隐患,需要对其进行稳定性评价,以便采取相应的加固措施,以策安全,且为下一阶段开山放坡工作提供指导。

坡体内主要地层为上古生界寒武系凤山组的石灰岩,局部覆盖松散第四系土薄层,自上而下具体为:

(1) 强风化石灰岩:青灰色,泥晶质结构,中厚层、薄层及板状构造。主要矿物成分为方解石,岩层产状为 $28^\circ \angle 22^\circ$ 。分布于边坡的顶部。

(2) 中风化石灰岩:青灰色,泥晶质结构,中厚~薄层。主要矿物成分为方解石,岩层产状为 $28^\circ \angle 22^\circ$, $RQD = 50 \sim 60$ 。

(3) 风化软弱夹层:主要成分为全风化泥质灰岩,一般厚为5~10 cm,产状与岩层一致,并有东厚西薄、局部不连续的特征。本工程中具代表性的强~中风化泥质灰岩软弱层,经调查发现,在坡面共出露 P_1 , P_2 , P_3 三层(见图1)。

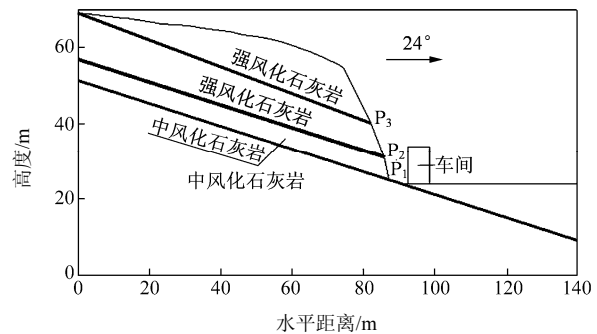


图1 边坡工程地质剖面图

Fig.1 Geological cross-section of slope engineering

此外,在岩体内还发育有产状为 $200^\circ \angle 70^\circ$, $128^\circ \angle 70^\circ$ 的节理,坡面岩体破碎。

可以确定软弱层和节理面为控制边坡稳定性的主要结构面。在进行勘察工作前,边坡西侧坡顶岩体沿 P_3 软弱夹层发生块体滑动破坏,滑体体积达上千方,表明边坡岩体不稳定,处于临界状态。同时,根据勘察结果发现,软弱夹层强度参数虽然不高,但层面倾角不大,仅 20° 左右,小于软弱夹层的内摩擦角,再加上软弱夹层本身有一定的黏聚力,从通常的极限平衡角度来看,边坡是稳定的,但实际上并非如此,而且坡顶也未增加荷载,故造成不稳定的原因主要包括:(1)滑动面抗剪强度随岩体变形增大而下降;(2)软弱夹层上的应力分布有变化。说明边坡岩体的变形在不断发展,塑性区不断扩大,若任其发展将可能导致岩体破坏的规模和程度不断加大。所以,要分析边坡的稳定性就应对岩体内的变形特征和滑动面上的应力分布状况作详细了解,以便尽快对岩体稳定性作出准确判断,及时采取加固措施,为加固方案提供依据。

3 计算方法和模型

在边坡稳定性分析方法中,极限平衡分析法固然有它的优点,但不能解决分析边坡应力和应变的问题。有限元在解决小变形方面有其优越性,但通常的边坡破坏多具弹塑性体特征,为大变形问题,而有限元在解决大变形方面不十分方便。FLAC程序在计算过程中允许材料发生屈服及大塑性变形,可以模拟岩土的力学性能,尤其在弹塑性分析、大变形分析方面有其独到的优点^[11~13]。

从该边坡区域出露的地层岩性特征分析来看,软弱夹层的产状与岩层一致,力学强度低,为潜在滑动面和分离体边界。采用FLAC软件对图1所示的边坡剖面建立二维FLAC计算模型,模拟的边坡

岩体范围为：水平向为 140 m，竖向为 75 m；采用四边形四节点单元进行剖分，水平向最大网格数 162 个，竖向最大网格数 138 个，软弱夹层处加密。岩体采用横观各向同性材料的节理化本构模型。由于软弱夹层比较薄，采用接触单元模拟，岩体和接触单元的层面切向均采用 Mohr-Coulomb 屈服准则，层面法向不抗拉。

软弱夹层力学参数根据现场原位大型剪切试验确定。勘察发现，3 条软弱夹层物质成分相同，加上现场条件限制，试验时假设 3 条软弱夹层力学性质相同，具体试验原理和试验方法见作者^[14]的研究，该剪切试验设备在“马鞍山马三峰边坡‘十一五’技改新建 500 万吨钢厂开山形成的人工边坡工程”边坡稳定性和加固方案设计研究中使用效果较好，测得的试验数据可靠，故在本工程中再次使用该设备对软弱夹层的力学参数进行测试，根据作者^[14]研究结果，强度参数取屈服值，石灰岩力学参数在现场勘察和室内试验的基础上确定。岩体物理力学参数见表 1。

表 1 岩体的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses

地层	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa	天然容重 /($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	剪切刚度 /($MPa \cdot m^{-1}$)	法向刚度 /($MPa \cdot m^{-1}$)	抗拉强度 /MPa
强风化石灰岩	0.37	1.1	25.0	100	27			0.0
中风化石灰岩	2.30	5.0	25.0	200	30			1.0
软弱夹层				40	24	65	400	0.0

模型结构除对地质原型进行了必要的简化处理外，基本上保持了与地质原型的一致性。模型边界采用铰支约束，即左右边界无水平位移，底边界无竖向位移。

4 边坡稳定性计算结果

首先假设不考虑软弱夹层的影响，只考虑边坡岩体完全为石灰岩体组成的情况。采用强度折减法^[15]计算得到边坡的稳定性系数为 1.51(计算时对各地层和软弱夹层按同比例折减)，表明边坡稳定，并且有足够的储备，而实际情况是边坡已经发生破坏，并不稳定，说明软弱夹层的存在对边坡稳定性影响大，岩体整体性差，各向异性特征显著。

因此，必须对边坡的稳定性做出全面评价，以便为加固方案提供必要的参考依据，杜绝重大事故的发生。

因此，这里先对边坡岩体的位移和软弱夹层的应力分布特征进行计算，准确评价软弱夹层对边坡稳定性的影响程度，根据计算结果确定具体加固方案。

4.1 未加固岩体稳定性分析

根据计算结果得岩体水平变形等值线见图 2，位移速度矢量图见图 3，在顺层岩体中变形从上部岩层开始逐步向深部岩层传递，当穿越软弱夹层时向下的传递被削弱，其中 P₃ 软弱夹层以上水平位移达 1 cm 的范围约为 P₂，P₃ 软弱夹层之间水平位移变化幅值的 2 倍，P₁ 软弱夹层由于接近坡脚，受坡前岩体的支撑作用，变形相对较小；边坡的变形以坡顶最为显著，随着边坡内变形的不断积累和向深层及坡脚的传递，在软弱夹层两侧水平位移等值线为折线，表明在该处水平位移值有突变，沿 3 条软弱夹层两侧岩体均产生不同程度的层间错动。

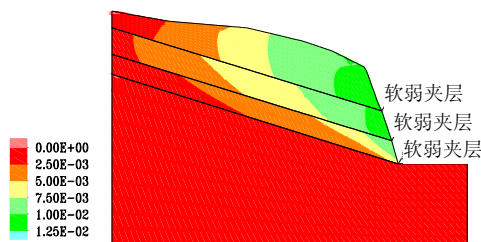


图 2 水平位移等值线(单位: m)

Fig.2 Isolines of horizontal displacement(unit: m)

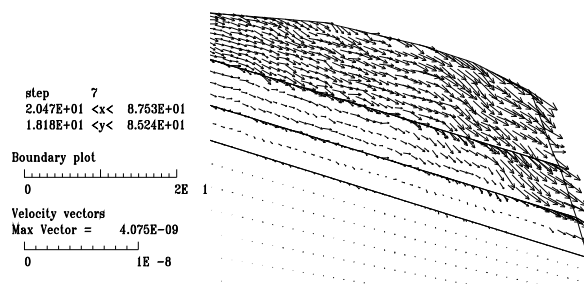


图 3 位移速度矢量图(单位: m/s)

Fig.3 Vectogram of displacement velocity(unit: m/s)

坡面最大水平位移位置在 P₃ 软弱夹层坡面位置，最大值达 1.25 cm；P₁，P₂ 软弱夹层坡面最大水平位移分别为 1.00，0.50 cm，说明软弱夹层控制岩体的水平位移，决定着岩体的稳定性状况。

以上计算结果表明，沿软弱夹层两侧岩体发生了较大的相对滑动，表明边坡岩体的稳定性决定于变形是否进一步发展和变形后的软弱夹层力学参数

是否发生变化。

根据作者^[14]研究结果及现场剪切试验，软弱夹层力学参数随剪切变形变化的同时，参数的取值也发生变化。根据试验结果，该软弱夹层的黏聚力 $c = 20 \sim 60$ kPa(峰值为 60 kPa，屈服值为 40 kPa，残余强度为 20 kPa)，内摩擦角 $\varphi = 20^\circ \sim 26^\circ$ (峰值为 26° ，屈服值为 24° ，残余值为 20°)。为了更准确地分析软弱夹层对边坡的稳定性的影响程度，采用强度折减法^[15]计算软弱夹层在不同强度参数下的边坡稳定性系数，见表 2。

表 2 软弱夹层在不同强度参数下的边坡稳定性系数
Table 2 Stability coefficients of slopes containing weak interlayers with different strength parameters

$\varphi / (^\circ)$	边坡稳定性系数				
	$c = 20$ kPa	$c = 30$ kPa	$c = 40$ kPa	$c = 50$ kPa	$c = 60$ kPa
20	0.92	0.96	0.99	1.02	1.04
22	0.97	1.01	1.03	1.05	1.06
24	1.01	1.03	1.05	1.06	1.07
26	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08

根据稳定性系数计算结果，尽管强度参数在较大范围内变化，但稳定性系数仅为 0.92~1.08，非常接近临界状态，表明边坡不稳定或缺少很大的安全储备，一旦受不利因素影响，其破坏的可能性大。

图 3 表明边坡的变形仍在继续，岩体运动的方向平行于软弱夹层，由坡底向上，位移速度逐渐增加。软弱夹层现场大型剪切试验结果表明，软弱夹层发生错动之后，其强度降低为残余强度，黏聚力接近 20~30 kPa，内摩擦角为 $20^\circ \sim 22^\circ$ ，边坡岩体处于临界状态，这对边坡稳定极为不利。若受降雨或外部动荷载等不利因素影响，则必然造成岩体的滑动破坏。

从图 4 可以看出， P_1, P_2 软弱夹层上的剪应力从前缘开始向滑面中部由小到大分布，从滑面中部到滑面后缘剪应力从大到小分布，滑面中部剪应力最大，剪应力最大位置分别位于(68.9 m, 27.1 m)，(59.8 m, 36.0 m)处，最大值分别为 239.0, 172.4 kPa，说明滑面中前部(此处与前文所提到的滑动破坏岩体的位置一致)剪应力较大，产生了应力集中现象，使该处剪应力更为接近软弱夹层的抗剪强度，一旦受不利因素影响，将从剪应力最大处首先发生屈服破坏。

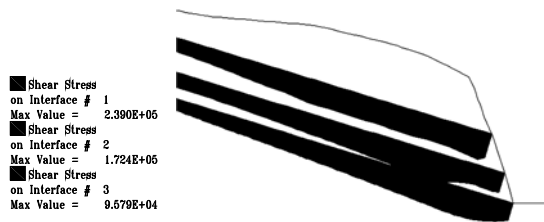


图 4 软弱夹层上剪应力分布图(单位: Pa)

Fig.4 Distribution of shear stress on weak inter layers (unit: Pa)

图 5 的塑性区分布特征也证明了以上结论，图中“*”表示剪切屈服，“o”表示拉伸屈服。剪切屈服位置均位于软弱夹层附近，其中 P_3 软弱夹层附近也局部有拉伸屈服现象。由于边坡岩体中分布有走向与边坡走向一致的延伸性好的节理，若软弱夹层的错动进一步发展，沿塑性区首先破坏后，破坏面贯穿形成滑动面时岩体就可能沿软弱面发生顺层滑脱，并在软弱夹层两侧将岩石拉裂。因此，从坡脚先发生屈服后形成的破坏面逐渐向后、向上延伸，一旦屈服带贯通至地表便成为滑动面，导致边坡失稳。

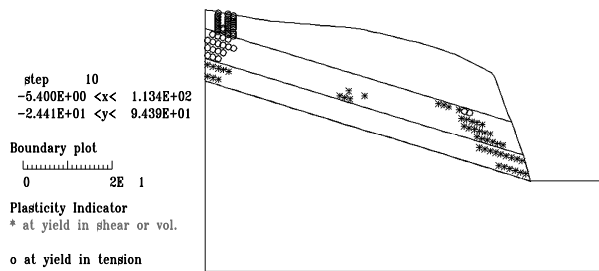


图 5 岩体塑性区分布特征

Fig.5 Distribution character of plastic zone in rock mass

以上分析表明，受软弱夹层影响，边坡水平变形大，岩体沿软弱夹层发生层间错动，导致层面抗剪强度下降，同时，由于软弱夹层中前部的应力集中现象，均导致了边坡稳定性的降低，所以，边坡的破坏过程是沿着软弱夹层的局部首先发生屈服并导致屈服区附近岩石拉裂，随着岩体位移的增大，破坏区也逐渐加大，最终导致边坡失稳，所以边坡实际上不安全，必须要采取加固措施。

4.2 岩体加固效果分析

根据边坡实际状况，拟采用锚喷法加固，即采用全长黏结型锚杆+表面挂网喷射素混凝土加固法。锚杆孔径 110 mm，弹性模量 210 GPa。锚杆锚固段必须深入到软弱夹层下的岩体内并有足够的长度，

以满足承载力要求。因此, 锚杆总长度应达到 16~24 m, 边坡上部抗滑锚杆长度应在 16 m 以上, 坡底锚杆长度应为 14~22 m。确定锚杆间距的主要因素是锚固强度需求和锚杆的相互作用。通过对锚杆的相互作用和锚固强度的研究, 锚杆间距为 2.0~2.5 m 时, 锚杆的锚固效果最佳^[16]。

计算时不考虑表面钢筋网和混凝土的加固作用(即钢筋网只考虑起护面作用), 根据多次反复试算, 确定锚杆水平、垂直间距均为 2 m, 整个边坡体内由上到下共布置 14 道锚杆, 锚杆下倾 15°安放, 计算得到的锚杆长度和轴力图见图 6。根据计算结果, 考虑 2.0 的安全系数, 杆体采用 2φ 28 mm 可满足抗拉断条件, 在锚杆穿过软弱夹层时轴力突然增大, 锚杆加固效果明显, 能较大地提高边坡稳定性, 也说明岩体在软弱夹层附近有较大的变形, 导致锚杆轴力增大。

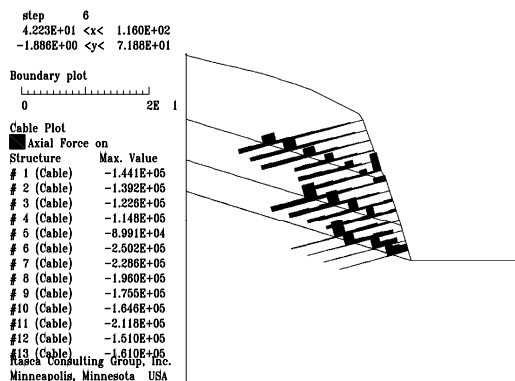


图 6 锚杆轴力分布图(单位: N)

Fig.6 Diagram of axial forces distribution in anchors(unit: N)

图 7 表明, 加固后边坡岩体塑性区范围很小。在近坡面位置, 仅在 P₂ 软弱夹层附近有小范围达到剪切塑性状态, 可能引起小型块体崩塌, 但对边坡的整体稳定性并不构成影响。根据经验, 坡面钢筋网和喷射混凝土完全可以保障其不发生破坏。

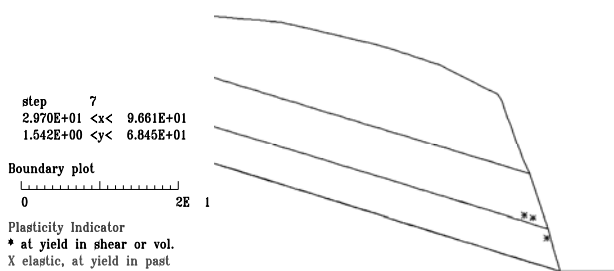


图 7 锚固后岩体塑性区分布

Fig.7 Distribution of plastic zone after reinforcement by anchors

锚喷加固提高了岩体的整体性, 故采用强度折减法计算加固后边坡整体稳定性系数为 1.65, 表明采取锚喷加固措施后边坡整体稳定并有足够的安全储备。

5 结 论

经过以上分析, 得出如下结论:

(1) 对含多条软弱夹层的岩石边坡, 直接开挖后沿软弱夹层将发生大的相对滑动变形。当边坡稳定性接近临界状态时, 相对滑动造成软弱夹层强度降低为残余强度, 易造成边坡失稳。

(2) 由于软弱夹层发生较大的剪切变形, 造成抗剪强度发生变化, 根据试验得到的软弱夹层强度参数变化范围计算得到的边坡稳定性系数均接近于临界状态, 证明受 3 条软弱夹层影响边坡不稳定或缺乏足够的安全储备。

(3) 软弱夹层上的剪应力分布具有中前部高、前后低的特征, 剪切屈服位置均位于软弱夹层附近, 从坡脚首先发生屈服后形成的破坏面逐渐向后、向上延伸, 一旦屈服带贯通至地表便成为滑动面, 导致边坡失稳。

(4) 采用锚喷加固后, 在软弱夹层附近锚杆轴力迅速增大, 表明锚杆具有较好的加固作用, 能提高岩体的整体性, 对提高边坡的稳定性效果明显, 同时也进一步证明了几条软弱夹层对岩体稳定性的影响是很大的。

(5) 模拟结果表明, 应用数值模拟技术研究边坡的变形和破坏特征, 可以直观形象地反映出边坡变形及应力变化的全过程。各种状态下的仿真可以为设计提供较好的反馈, 从而对工程措施优化、信息化设计和施工起超前预报与辅助决策的作用。

参考文献(References):

[1] 张顶立, 王悦汉, 曲天智. 夹层对层状岩体稳定性的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 140 - 144.(ZHANG Dingli, WANG Yuehan, QU Tianzhi. Influence analysis of interband on stability of stratified rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 140 - 144.(in Chinese))

[2] 刘文方, 隋严春, 周菊芳, 等. 含软弱夹层岩体边坡的突变模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2 663 - 2 669.(LIU Wenfang, SUI Yanchun, ZHOU Jufang, et al. Catastrophe analysis of rock mass slope with weak intercalated layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 663 - 2 669.(in

- Chinese))
- [3] 赵永红, 杨振涛. 含软弱夹层岩石材料的损伤破坏过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 350 - 2 355.(ZHAO Yonghong, YANG Zhentao. Research on fracturing around cemented slot in rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2 350 - 2 355.(in Chinese))
- [4] 金峰, 邵伟, 张立翔, 等. 模拟软弱夹层动力特性的薄层单元及其工程应用[J]. 工程力学, 2002, 19(2): 36 - 40.(JIN Feng, SHAO Wei, ZHANG Lixiang, et al. A thin-layer element for simulation of static and dynamic characteristics of soft interlayer and its application[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(2): 36 - 40.(in Chinese))
- [5] 黎剑华, 颜荣贵, 陈寿如, 等. 高等级公路缓斜陡节理边坡的复合破坏机制与治理对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 415 - 418.(LI Jianhua, YAN Ronggui, CHEN Shouru, et al. Mechanism and control method of complex landslide of steep cut slope with brandy-inclined joints in high-grade highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 415 - 418.(in Chinese))
- [6] 陈静曦, 章光, 袁从华, 等. 顺层滑移路堑边坡的分析和治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 48 - 51.(CHEN Jingxi, ZHANG Guang, YUAN Conghua, et al. Analysis and treatment of bedding-slip cut slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 48 - 51.(in Chinese))
- [7] OKUBO C H. Rock mass strength and slope stability of the Hilina slump, Kilauea volcano, Hawai'i[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 138(1/2): 43 - 76.
- [8] 任光明, 聂德新, 米德才, 等. 软弱层带夹泥物理力学特征的仿真研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(1): 65 - 71.(REN Guangming, NIE Dexin, MI Decai, et al. A simulation study of physico-mechanical properties of intercalated gouge in layered weak zones[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(1): 65 - 71.(in Chinese))
- [9] 陈镨, 陈竹昌, 薛松涛, 等. 夹有软弱土层的层状场地对入射SH波的响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 161 - 165.(CHEN Rong, CHEN Zhuchang, XUE Songtao, et al. The response analysis of strata with extremely soft layer to incident SH waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 161 - 165.(in Chinese))
- [10] 李克钢, 许江, 李树春. 三峡库区岩体天然结构面抗剪性能试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1 063 - 1 067.(LI Kegang, XU Jiang, LI Shuchun. Study on property of rock mass discontinuity shear strength in the Three Gorges reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1 063 - 1 067.(in Chinese))
- [11] 郭军辉, 阎长虹, 许宝田, 等. 马三峰土质边坡稳定性分析与评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(1): 101 - 106.(GUO Junhui, YAN Changhong, XU Baotian, et al. Analysis and evaluation on stability of Masanfeng soil slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(1): 101 - 106.(in Chinese))
- [12] Itasca Consulting Group Inc.. FLAC users manual(version 5.0)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2005.
- [13] 刘波, 韩彦辉. FLAC原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.(LIU Bo, HAN Yanhui. Guideline for principle, example and application of FLAC[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.(in Chinese))
- [14] 许宝田, 阎长虹, 陈汉永, 等. 边坡岩体软弱夹层力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3 077 - 3 081.(XU Baotian, YAN Changhong, CHEN Hanyong, et al. Experiment study of mechanical property of weak intercalated layers in slope rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3 077 - 3 081.(in Chinese))
- [15] 郑颖人, 赵尚毅. 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.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction FEM to soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3 381 - 3 388.(in Chinese))
- [16] 吴顺川, 高永涛, 王金安. 坡间路基挡土墙“双锚”建设方案评价及参数优化数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 332 - 336.(WU Shunchuan, GAO Yongtao, WANG Jin'an. Assessment on double anchor construction project of subgrade retaining wall on slope and its parameters optimization with numerical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 332 - 336.(in Chinese))