

文章编号: 1000-7598 (2013) 12-3555-06

顺层岩质边坡预应力锚索抗震加固机制研究

王 秒, 李海波, 刘亚群, 张 伟, 黄晓程

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 将顺层岩质边坡的层面考虑为弱面, 将其等效为等间距共线多节理的力学模型。预应力锚索加固边坡的锚固模型等效为平面有限宽度岩体节理问题。并将初始应力和地震荷载引起的附加动应力视为远场作用, 锚固边坡的受力问题视为远场作用效果和节理面集中力作用效果的叠加。根据叠加原理计算地震荷载作用下裂纹端部应力强度因子, 发现位于裂纹端部的预应力锚索能大幅度降低 I 型裂纹的应力强度因子。以应力强度因子作为岩体的压剪破坏判据解释顺层岩质边坡预应力锚索的抗震加固机制, 能很好地解释汶川地震边坡破坏特点。

关 键 词: 顺层岩质边坡; 地震; 预应力锚索; 破坏机制; 应力强度因子; 加固机制

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Reinforcement mechanism of bedding rock slopes with prestressed anchor cable subjected to seismic loads

WANG Miao, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, ZHANG Wei, HUANG Xiao-cheng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The interfaces in bedding rock slopes are regarded as weak planes, which are equivalent to equal-interval collinear multi-joint mechanical model. The anchorage model of the slope reinforced by prestressed anchor cable is equivalent to plane problem of the rock mass joints with finite width. The original stresses and additional dynamic stresses caused by seismic loads are regarded as far field effect, and the force of the anchored slopes is the superposition of far field effect and effect of concentrated force of joint surface. The stress intensity factor of crack tip subjected to seismic loads is calculated based on superposition principle. It is found that the prestressed anchor cable whose anchor point located close to the crack tip can greatly reduce the stress intensity factor of the mode I crack. The reinforcement mechanism of bedding rock slopes reinforced by prestressed anchor cable subjected to seismic loads is interpreted using stress intensity factor as an important parameter of compression and shear failure criterion of rock mass, which can well explain the failure features of slopes in Wenchuan earthquake.

Key words: bedding rock slope; seism; prestressed anchor cable; instability mechanism; stress intensity factor; reinforcement mechanism

1 引 言

锚索是一种主要承受拉力的类杆状构件, 它是通过钻孔将钢绞线或高强度钢丝固定于深部稳定的地层中, 并在被加固岩体表面通过张拉产生预应力, 从而使被加固岩体稳定并限制其发生有害变形和位移的目的。作为一种主动加固方式, 预应力锚索加固技术具有先进性、经济性、可靠性的特点, 在岩质高边坡的治理和整治过程中得到了广泛应用, 但一直以来预应力锚索的设计理论始终落后于

工程实践, 很大程度上限制了锚固技术的发展, 因此, 研究预应力锚索的锚固机制具有很重要的工程意义^[1-2]。

文献[3]根据不同的岩体强度理论, 对预应力锚索的锚固机制总结出 3 种不同的解释: (1) 从结构面剪切破坏角度分析, 锚索具有承剪阻滑的作用; (2) 从脆性断裂强度理论分析, 锚索具有降低裂隙间应力强度因子、阻碍裂隙扩展的作用; (3) 从节理岩体的岩桥强度理论出发, 锚索具有增强节理岩体的裂隙前缘岩桥的断裂韧度的作用, 使裂隙断裂

收稿日期: 2012-09-06

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (No. 51025935); 国家自然科学基金项目 (No. 51174190)。

第一作者简介: 王秒, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事地震边坡稳定性分析方面的研究工作。E-mail: wang-miao112@163.com

扩展力不但要克服岩桥的阻力,还要克服锚索的桥联作用,因而阻止了裂隙的进一步扩展与贯通。文献[4]采用室内试验的方法研究锚固作用对裂隙岩体力学特性的影响,分别对含预制裂缝的加锚试样和未加锚的含预制裂缝试样进行单轴压缩试验,试验结果表明加锚作用能显著增强裂隙试样的抗压强度和压缩弹性模量。汶川地震边坡破坏现象调研发现,没有支护的岩石边坡发生了大量破坏,锚索支护边坡大部分保持完好,少部分存在局部破坏,这说明预应力锚索支护方式对提高边坡的抗震性作用明显。静载下锚索的锚固机制随锚索形式及结构的不同而不同,但地震作用下预应力锚索的锚固机制的研究并不多见,理论研究远落后于工程实际^[1,5]。

本文采用平面应变的应力分析方法研究了地震荷载作用下顺层岩质边坡的破坏机制。将预应力锚索支护边坡简化为单根锚杆锚固的平面有限宽度岩体节理模型,从弹性断裂力学角度计算了模型的节理间应力强度因子,根据计算结果说明地震荷载作用下预应力锚索的锚固机制。

2 地震荷载下顺层岩质边坡破坏机制

地震荷载中的岩体的应力状态是地震作用下的附加动应力和自身静应力的叠加,且动应力的大小和方向都是时刻变化的。地震边坡的破坏是由于地震作用所产生的动应力改变了边坡原有的稳定应力场^[6-7]。

2.1 边坡的原始应力场

天然或人工边坡在形成过程中,坡面周围的岩体发生卸荷回弹^[7],引起应力重分布和应力集中等效应,如图 1 所示。其中, σ_h 、 σ_v 分别为水平和垂直方向主应力。

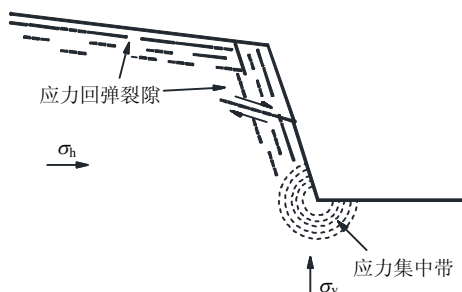


图 1 边坡卸荷回弹影响示意图

Fig.1 Sketch of the influence of unloading rebound of the slopes rock mass

岩体应力状态的变化对边坡稳定性产生的关键性影响表现在:(1)坡缘附近,由于卸荷回弹,

水平应力显著降低形成一个张力带,这些部位的岩体容易被拉裂形成张拉微裂隙。(2)坡面附近最大主应力平行于坡面,最小主应力垂直坡面,沿坡面往下最大主应力持续增大,最小主应力基本保持不变,因而坡脚处形成了斜坡中最大的剪应力区,且最大剪应力迹线方向与边坡层面呈锐角。研究地震作用下附加动应力对边坡稳定性的影响,主要从坡缘和坡脚这两个地方的受力出发分析边坡的破坏模式。

2.2 地震荷载作用下的附加动应力

按照波动理论,可将地震动引起的附加动应力表示为^[8]

$$\sigma_p = \rho C_p v_p \quad (1)$$

$$\sigma_s = \rho C_s v_s \quad (2)$$

式中: σ_p 、 σ_s 为地震波产生的动应力, σ_p 为 P 波产生的附加正应力, σ_s 为 SV 波产生的附加剪应力; ρ 为岩体密度; C_p 、 C_s 为岩体中 P 波、SV 波的波速; v_p 、 v_s 为在 P 波、SV 波作用下岩体中质点振动速度。

2.3 边坡破坏模式受力的平面应力分析

将边坡等效为平面应变问题,由上一节的分析可知,边坡开挖卸荷回弹会在坡缘附近产生一个张拉区,张拉区的垂直向应力为 0,水平向为拉应力。模型底部入射 SV 波的附加动应力对张拉区质点受力状态影响的应力莫尔圆如图 2 所示(压为正,拉为负),由图可知,SV 波作用下张拉区容易产生张拉破坏,形成垂直向的张拉裂缝。

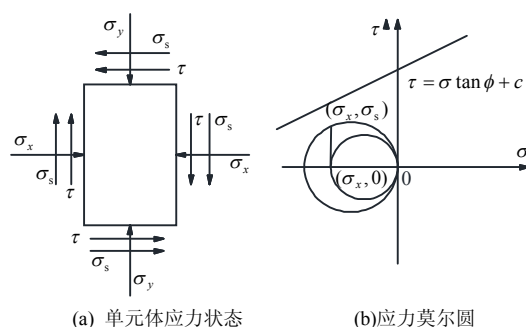


图 2 SV 波模型底部入射坡缘张拉区应力状态影响图

Fig.2 Influence diagrams of stress state in the tension region at incident slope edge of the SV wave model bottom

由于坡脚处最大剪应力迹线方向与边坡层面呈锐角,且层面强度较低,对受力敏感。模型底部入射 SV 波和 P 波产生的附加动应力对坡脚层面处受力影响的应力莫尔圆如图 3、4 所示,由图可知,地震引起的附加动应力使得坡脚处层面质点的应力莫尔圆更接近剪切包络线,易发生剪切破坏。

综上所述,地震荷载作用下顺层岩质边坡的失稳机制是地震作用所产生的动应力改变了边坡原有的稳定应力场,坡缘张拉微裂隙扩展,坡脚层面发生局部剪切,产生局部破坏,裂隙进一步扩展至贯通,边坡表现出拉裂-剪切滑移的破坏特征。

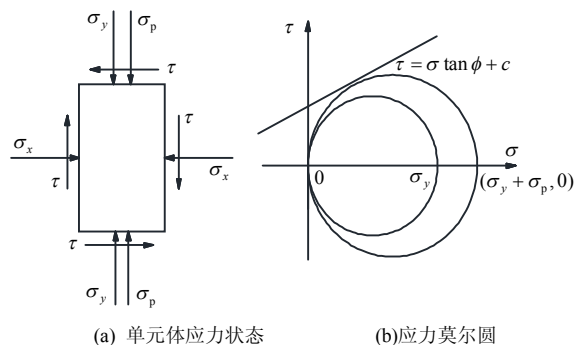


图 3 P 波模型底部入射坡脚质点应力状态影响图
Fig.3 Influence diagrams of stress state at incident slope toe of the P wave model bottom

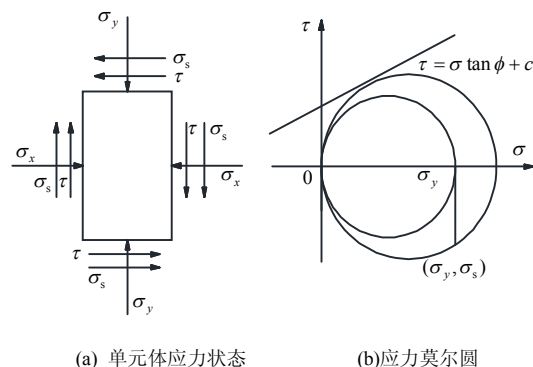


图 4 SV 波模型底部入射坡脚质点应力状态影响图
Fig.4 Influence diagrams of stress state at incident slope toe of the SV wave model bottom

3 顺层岩质边坡锚固模型

采用线弹性断裂力学来研究边坡的锚固机制,首先要对预应力锚索加固的实际边坡进行简化,建立理想边坡的锚固模型,包括两个方面:节理的简化和荷载的简化。

层状边坡的层面是弱面容易形成岩体的滑动面,且层间缺陷分布很难预先准确测量,具有随机分布特征,为了定量研究岩体锚固的增效问题,将层面等效为存在若干等间距、同宽度的节理模型。文献[9]提出,多根锚索(杆)加固的边坡问题可视为单根锚索的平面有限宽度岩体节理问题。

将地震作用引起的附加动力和自重体力等效为节理的远场应力,由于应力强度因子为标量,根据应力强度因子的叠加原理,采用等效抹平的方法,

用 σ_t 表示地震作用产生的附加动应力与原始静应力共同作用产生的正应力的不利组合, τ_t 表示剪应力的不利组合。

根据文献[10],锚索的自由段穿过滑面,且锚固段长度不得小于 3~4 m。预应力锚索锚固段的应力分布规律^[11-12]表明,锚固段的应力主要集中在靠近自由段的一小段内,故预应力锚索可简化为一个作用在节理面上的集中力。因此,锚固边坡的受力问题可简化为远场作用效果和节理面集中力作用效果的叠加^[13]。边坡的锚固和受力模型如图 5 所示。

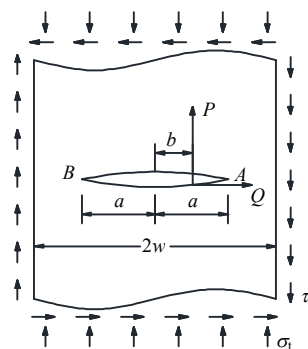


图 5 顺层岩质边坡锚固模型
Fig.5 Anchorage model of bedding rock slope

图中 $2w$ 为岩体模型的宽度; $2a$ 为节理长度; b 为锚固点距离节理中点的距离; P 和 Q 为作用在节理面上的锚固力的两个分量: $P = F \sin \varphi$, $Q = F \cos \varphi$, F 为预应力, φ 为预应力锚索与节理面的夹角。

4 预应力锚固的断裂力学机制

4.1 裂纹的类型

根据顺层岩质边坡在地震荷载作用下的失稳机制,预应力锚索的加固机制体现在两个方面:控制坡肩拉裂纹的扩展和控制坡脚剪切裂纹的扩展。断裂力学中根据裂纹在外力作用下的扩展方式可以将裂纹分为 3 种形式^[14]:

(1) 张开型 (I 型): 在垂直于裂纹面的拉应力作用下,使裂纹张开而扩展。

(2) 滑开型 (II 型): 在平行于裂纹面而垂直于裂纹前缘的剪应力作用下,使裂纹滑开而扩展。

(3) 撕开型 (III 型): 在既平行于裂纹表面又平行于裂纹前缘的剪应力作用下,使裂纹撕开而扩展。

如果裂纹同时受到正应力和剪应力作用,这时 I 和 II 型 (或者 III 型) 同时存在,称为复合型裂纹。

4.2 应力强度因子的计算

裂端末部的应力分量可以表达为

$$\sigma_{ij}^J = \frac{K_J}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^J(\theta) + o(r^{-1/2}) \quad (3)$$

式中: σ_{ij}^J 为裂端末部某点的应力; $f_{ij}^J(\theta)$ 为 θ 的函数; r 为该点到裂端末部的距离; θ 为点与裂端末部的连线层面的夹角; $o(r^{-1/2})$ 为高阶小量; J 可取 I、II、III (3 种裂纹类型), 对于每一种类型的裂端末部应力场的分布规律 (即 σ_{ij} 随 r 和 θ 的变化规律) 是相同的, 其大小则完全取决于参数 K_J , 把这个表征裂端末部应力场的特征物理量称为应力强度因子, 因此, 如何计算应力强度因子 K_J 的值是断裂力学的一个重要内容^[14]。

根据叠加原理: 复杂力系作用下的裂纹应力强度因子等于各个力系单独作用时的应力强度因子的叠加, 如图 6 所示。计算靠近锚固点的裂纹 A 端的应力强度因子。

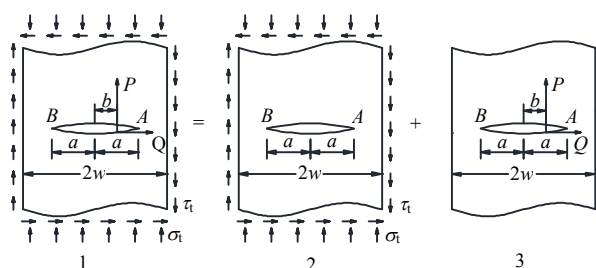


图 6 地震荷载作用下应力强度因子叠加示意图
Fig.6 Sketchs of the superposition of stress intensity factors under seismic loads

$$K_I^{1A} = K_I^{2A} + K_I^{3A} \quad (4)$$

$$K_{II}^{1A} = K_{II}^{2A} + K_{II}^{3A} \quad (5)$$

式中: K_I^{1A} 、 K_{II}^{1A} 、 K_I^{2A} 、 K_{II}^{2A} 、 K_I^{3A} 、 K_{II}^{3A} 分别为模型 1、模型 2、模型 3, A 端 I 型和 II 型裂纹强度因子。有限宽板的裂纹与板的尺寸相比不能忽略, 必须考虑板的宽度对裂纹应力场的影响, 但这问题得不到理论的完全解, 只能通过一些近似的简化或数值计算方法, 得到近似的数值解。

单向拉伸的应力强度因子取裂纹周期排列的无限大平板受单向拉伸的应力强度因子作为近似解^[15] (受压取负号):

$$K_I^{2A} = -\sigma_t \sqrt{2w \tan \frac{\pi a}{2w}} \quad (6)$$

在有限宽度平板裂纹面上, 受均布剪应力作用

的应力强度因子取裂纹周期排列的无限大平板裂纹受剪应力作用的应力强度因子作为近似解:

$$K_{II}^{2A} = \tau_t \sqrt{2w \tan \frac{\pi a}{2w}} \quad (7)$$

有限宽度平板裂纹面上受偏心集中力作用时采用插值法求得应力强度因子近似解:

$$K_I^{3A} = -N_A \frac{1}{\sqrt{2w}} \frac{P}{2} \quad (8)$$

$$K_{II}^{3A} = N_A \frac{1}{\sqrt{2w}} \frac{Q}{2} \quad (9)$$

其中

$$N_A = \left[1 + 0.297 \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2} \left(1 - \cos \frac{\pi a}{2w} \right) \right] \tan \sqrt{\frac{\pi a}{2w}} \cdot \frac{1 + \sin \frac{\pi b}{2w} / \sin \frac{\pi a}{2w}}{\sqrt{1 - \left(\cos \frac{\pi a}{2w} / \cos \frac{\pi b}{2w} \right)^2}} \quad (10)$$

式中: N_A 是影响系数, 与裂纹宽度、板宽度和预应力锚固点位置有关, 在 a/w 分别取 0.3、0.4、0.5 时, N_A 随自变量 b/a 的变化情况如图 7 所示。

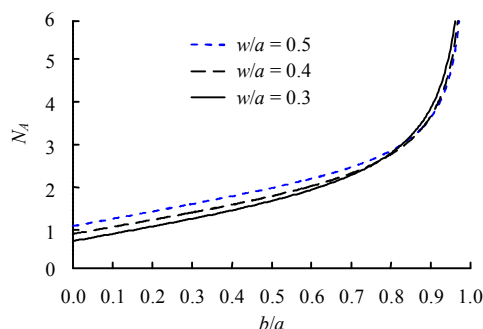


图 7 N_A 随自变量 b/a 的变化曲线
Fig.7 Curves of N_A changes with independent variable b/a

锚固模型节理端部的应力强度因子根据叠加原理有

$$K_I^{1A} = -\sigma_t \sqrt{2a \tan \frac{\pi b}{2w}} - N_A \frac{1}{\sqrt{2w}} \frac{P}{2} \quad (11)$$

$$K_{II}^{1A} = \tau_t \sqrt{2a \tan \frac{\pi b}{2w}} + N_A \frac{1}{\sqrt{2w}} \frac{Q}{2} \quad (12)$$

由上可知, 位于裂端末部的预应力锚索能大幅度减小地震荷载作用下 I 型裂纹的应力强度因子。

4.3 岩体的压剪破坏判据

线弹性断裂力学在处理张开型裂纹失稳扩展问题上取得了很大的成功, 对于金属材料, 现在国内外比较经典的几种复合型裂纹断裂判据主要有最大周向正应力判据 ($\sigma_{\theta\max}$ 判据)、最大能量释放率判据 (G 判据) 和最小应变能判据 (S 判据)。但这些判据理论和方法都是就均质、线弹性材料而言的, 而岩石中界面裂纹大量存在, 即使脆性材料也具有明显的非线性特征, 必须采用试验来验证这些理论的适用性。诸多学者在进行此类工作, 其中比较有代表性的文献[16]认为, 岩石压剪破坏应满足:

$$\lambda_{12}K_I + |K_{II}| = K_{JC} \quad (13)$$

式中: K_{JC} 为断裂韧度; λ_{12} 为压剪系数。采用室内单边裂缝试件压剪断裂试验测试得到各类材料不同裂缝尺寸下的 λ_{12} 的取值为: 0.46~1.47。材料的破坏判据可以表述为

$$(\tau_t - \lambda_{12}\sigma_t) \sqrt{2a \tan \frac{\pi b}{2w} + \frac{N_A F (\cos \varphi - \lambda_{12} \sin \varphi)}{2\sqrt{2w}}} = K_{JC} \quad (14)$$

由图 6 可知, N_A 在 b/a 接近 1 时表现出奇异性, 趋向于无穷大。由式 (14) 可知, 当 $\cos \varphi - \lambda_{12} \sin \varphi < 0$, 即锚索与裂缝的夹角 $\varphi > \arctan(1/\lambda_{12})$ 时, 锚固边坡能够承受很大的地震力, 即位于裂纹端部附近的锚索具有很好的起裂控制作用, 也不难推测位于裂纹面外, 端部附近的锚索有很好的止裂控制作用。因此, 锚索加固能限制地震荷载作用下坡脚处岩体剪切裂纹的扩展。拉伸裂纹的扩展判据式可以视为式 (13) 的特殊形式, 式 (14) 具有通用型, 可以说明锚索对于坡缘拉裂纹扩展的限制作用。由此可知, 锚索加固限制地震荷载引发的裂纹的扩展, 当预应力锚索的间距小于 $2w$ 时, 即增大预应力锚索的布置密度, 能有效控制裂纹的扩展贯通。在坡缘和坡脚处设置构造锚索能有效提高边坡的抗震性。

5 结 论

(1) 边坡在形成过程中, 坡面周围的岩体发生卸荷回弹, 引起应力重分布和应力集中等效应。坡缘形成一个张力带, 坡脚形成了最大的剪应力区, 最大剪应力方向与顺层边坡的层面方向呈锐角, 顺层岩质边坡层面是弱面, 在地震荷载下易发生剪切破坏。

(2) 顺层岩质边坡的失稳机制为被地震作用所产生的动应力改变了边坡原有的稳定应力场, 坡缘张拉微裂隙扩展, 坡脚层面发生局部剪切, 产生局部破坏, 裂隙进一步扩展贯通, 边坡产生整体破坏。

(3) 当锚索与裂缝的夹角 $\varphi > \arctan(1/\lambda_{12})$ 时锚固边坡能承受较大的地震力, 即位于裂纹端部附近的锚索有很好的起裂控制作用, 位于裂纹面外端部附近的锚索有很好的止裂控制作用, 增大预应力锚索的布置密度能更为有效地控制裂纹的扩展贯通。

(4) 采用预应力锚索对顺层岩质边坡进行抗震加固时, 位于坡脚和坡缘处的锚索能有效控制裂纹扩展贯通, 增强边坡的抗震性。

为简化分析, 本文推导过程采用了一些假设, 得到的结论对于顺层岩质边坡的预应力锚索抗震设计具有一定的参考价值, 对于其他结构特征的边坡及相应的支护方式的抗震加固机制需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 洪海春, 徐卫亚. 地震作用下岩体锚固性能研究综述与展望[J]. 金属矿山, 2006, (3): 5—11.
HONG Hai-chun, XU Wei-ya. Review and prospect of anchorage properties of reinforced rock mass under earthquake[J]. *Metal Mine*, 2006, (3): 5—11.
- [2] 丁秀丽, 盛谦, 韩军, 等. 预应力锚索锚固机制的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980—988.
DING Xiu-li, SHENG Qian, HAN Jun, et al. Numerical simulation testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 980—988.
- [3] 李宁, 张平, 李国玉. 岩质边坡预应力锚固的设计原则与方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2972—2976.
LI Ning, ZHANG Ping, LI Guo-yu. Discussion on design principle and method of prestressed cable for support of rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(17): 2972—2976.
- [4] 张宁, 李术才, 李明田, 等. 单轴压缩条件下锚杆对含三维表面裂隙试样的锚固效应试样研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3288—3305.
ZHANG Ning, LI Shu-cai, LI Ming-tian. Experimental study of reinforced effect of bolt in 3D surface fractured specimens under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3288—3305.
- [5] 叶海林, 黄润秋, 郑颖人, 等. 岩质边坡锚杆支护参数地震敏感性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1374—1379.

- YE Hai-lin, HUANG Run-qiu, ZHENG Ying-ren, et al. Sensitivity analysis of parameters for bolts in rock slopes under earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(9): 1374—1379.
- [6] 言志信, 张森, 张学东, 等. 地震边坡失稳机制及稳定性分析[J]. 工程地质, 2010, 18(6): 844—850.
- YAN Zhi-xin, ZHANG Sen, ZHANG Xue-dong, et al. Failure mechanism and stability analysis of slope under earthquake[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(6): 844—850.
- [7] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [8] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 洪起超. 工程断裂力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [10] 重庆市建设委员会. GB 5033—2000 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [11] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 925—928.
- YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Distributing characters and analysis of stresses in prestressed cables[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 925—928.
- [12] 何思明, 李新坡. 预应力锚杆作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1876—1880.
- HE Si-ming, LI Xin-po. Study of mechanism of prestressed anchor bolt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1876—1880.
- [13] 王成. 层状岩体边坡锚固的断裂力学原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1900—1904.
- WANG Cheng. Fracture mechanics principle of anchorage for layered rock mass slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(11): 1900—1904.
- [14] 尹双增. 断裂·损伤理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [15] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [16] 周群力. 岩石压剪断裂判据及其应用[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(3): 34—37.
- ZHOU Qun-li. Criterion and its application of rock compression shear fracture[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 9(3): 34—37.

上接第 3554 页

- [9] 冯夏庭, 周辉, 李邵军, 等. 岩石力学与工程综合集成智能反馈分析方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1737—1744.
- FENG Xia-ting, ZHOU Hui, LI Shao-jun, et al. Integrated intelligent feedback analysis of rock mechanics and engineering problems and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1737—1744.
- [10] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. [S. l.]: [s. n.], 1995, 1942—1948.
- [11] 苏国韶, 张克实, 吕海波. 位移反分析的粒子群优化-高斯过程协同优化方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 510—515.
- SU Guo-shao, ZHANG Ke-shi, LÜ Hai-bo. A cooperative optimization method based on particle swarm optimization and Gaussian process for displacement back analysis [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 510—515.
- [12] 张丽平. 粒子群优化算法的理论及实践[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
- [13] 原国红, 陈剑平, 马琳. 可拓学评判方法在岩体质量分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1539—1544.
- YUAN Guo-hong, CHEN Jian-ping, MA Lin. Application of extenics in evaluating of engineering quality of rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 1539—1544.
- [14] 贾超, 肖树芳, 刘宁. 可拓学理论在洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 751—756.
- JIA Chao, XIAO Shu-fang, LIU Ning. Application of extenics theory to evaluation of tunnel rock quality[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 751—756.
- [15] 水利部. GB50218—94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
- [16] 陈昌彦, 王贵荣. 各类岩体质量评价方法的相关性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1894—1900.
- CHEN Chang-yan, WANG Gui-rong. Discussion on the interrelation of various rockmass quality classification systems at home and abroad[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1897—1900.