

文章编号: 1000-7598-(2007) 05-0981-06

高速公路滑坡稳定性分析及治理优化研究

李新平, 王 涛, 谢全敏, 郭运华, 代翼飞

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘 要: 在分析溪沟口滑坡工程地质概况及形成机理的基础上, 采用传递系数法和有限元法对其进行了稳定性评价。结果表明, 该滑坡稳定性达不到安全标准, 必须进行加固治理。考虑滑坡稳定状况, 采用抗滑桩结合地表排水对滑坡进行治理。在传递系数法结合有限单元法计算结果的基础上, 构造出一定数量的抗滑桩加固方案, 分别计算其治理后的稳定性和工程造价, 以此为进化神经网络的学习样本, 建立设计参数与稳定性及加固方案造价之间的非线性映射关系, 利用遗传算法在全局范围内快速搜索出最优的设计参数, 选择合理的滑坡治理方案。最后利用有限元法对滑坡体治理前后的稳定状况进行分析, 对所提出的优化治理方案进行稳定性验算, 结果证明优化方案能够达到滑坡治理的设计要求, 治理效果明显。

关 键 词: 滑坡; 稳定性; 有限单元法; 抗滑桩; 滑坡治理; 进化神经网络

中图分类号: TU 411.3

文献标识码: A

Study on stability analysis and optimum harness design for expressway landslide

LI Xin-ping, WANG Tao, XIE Quan-min, GUO Yun-hua, DAI Yi-fei

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: According to geological characteristics and formation mechanism of Xigoukou Landslide, the calculation and evaluation of landslide stability are performed in consideration of four kinds of loading conditions by transmitting coefficient method and FEM. Based on the results of stability analysis, the anti-slide piles and ground drainage are adopted as the harnessing measures of landslide. Some harnessing schemes are formed based on the results of transmitting coefficient method and FEM as the study samples for the evolutionary neural network. The landslide stability and construction cost of these harnessing schemes are evaluated respectively; and the nonlinear relationship of the designing parameters of anti-slide piles with safety factors and construction costs is established. Through the genetic algorithm, optimum designing parameters of anti-slide piles are searched out from above schemes; and the most optimally harnessing scheme is achieved. The stability examination and analysis by FEM show that this optimized scheme can satisfy the design requirements; and it is effective and economic to the landslide harness.

Key words: landslide; stability; FEM; anti-slide pile; landslide harness; evolutionary neural network

1 引 言

近年来, 我国中西部高速公路建设得到了快速发展。由于中西部地区地形地质条件复杂, 线路在经过山区和丘陵地带时, 将遇到越来越多的滑坡问题。目前国内滑坡治理工程多采用极限平衡法对滑坡进行稳定性分析与评价, 指导滑坡治理措施的设计与计算, 但该方法没有考虑土体内部应力-应变关系, 也不能考虑土体与支挡结构的共同作用, 因此就不能定量评价支挡结构对滑坡的加固效果, 而

有限单元法则能较好地克服上述弊端。本文以十堰一漫高速公路溪沟口滑坡为工程背景, 在极限平衡法计算的基础上引入有限单元法对滑坡进行稳定性计算, 并将两种方法的计算结果进行分析比较, 增加了结果的准确性和可靠性。

抗滑桩具有抗滑能力强、适用条件广、不易恶化滑坡状态以及施工简单等优点, 被广泛应用于高速公路滑坡治理工程中。但在目前滑坡治理实践中, 抗滑桩设计多按经验取值, 往往造成设计过于保守, 造价偏高, 浪费较大。本文针对这些问题,

采用进化的神经网络方法,对溪沟口滑坡的抗滑桩治理措施进行了优化,由有限单元法的计算结果可以看出,该优化方案节省了造价,达到了预期的设计目标,取得了良好的防治效果。

2 工程概况

溪沟口滑坡位于十堰市至郧县的公路南西侧,距离十堰市区 5 km,属于堆积层古滑坡。滑坡主滑方向为 50° ,两侧缘宽 400 m,纵长 350 m,滑体面积为 14 万 m^2 ,厚度为 4.00~19.45 m,剖面形态为折线型,为典型的顺层滑坡。滑体主要由粉质黏土组成,部分含 10%~30% 片岩风化角砾及碎石,具有一般中等压缩性,厚 4.00~18.70 m。滑床由强风化和弱风化的白云钠长片岩 (Pt3wy) 构成,片状构造,裂隙极发育,岩石质量等级为 V 级。勘查资料显示,粉质黏土及碎石土与下部强风化白云钠长片岩接触面为滑移带。滑移带在主滑方向呈折线型,滑面倾角为 $3\sim 27^\circ$,后缘倾角为 $15\sim 23^\circ$ [1]。

从地质勘探资料可以看出,滑坡体形成的直接原因是由地形、地貌和地质土层所决定的。滑坡体中粉质黏土层厚度大,而下伏地层基岩面坡度较大,且粉质黏土与基岩接触面存在软弱层,当雨水侵入时,极易沿基岩面发生顺层滑动。拟建高速公路从滑坡前缘通过,将形成新的临空面,改变了原坡体结构,减小了滑体抗滑力,容易诱发滑坡的发生。

3 滑坡稳定性分析与评价

3.1 极限平衡法 (传递系数法)

根据滑坡地质勘查资料和现场踏勘的成果,确定溪沟口滑坡为中型土质顺层滑坡,滑动面为折线型,两个主滑剖面 (I-I' 剖面与 II-II' 剖面) 见图 1 和图 2。

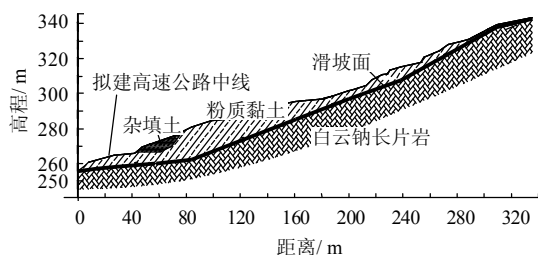


图 1 溪沟口滑坡 I-I' 主滑剖面示意图
Fig.1 Sketch map of I-I' critical section of Xigoukou landslide

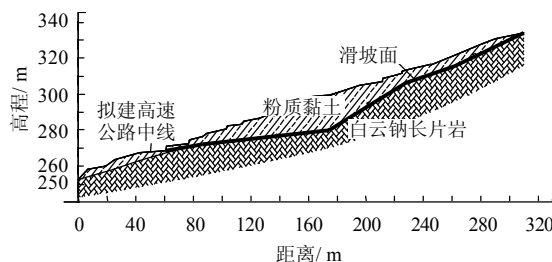


图 2 溪沟口滑坡 II-II' 主滑剖面示意图
Fig.2 Sketch map of II-II' critical section of Xigoukou landslide

依据相关规范,采用传递系数法作为滑坡稳定计算的基本方法 [2-4],计算滑坡推力时假定沿滑动面取单位宽度计算,不计两侧摩擦力和滑坡体自身挤压力;滑动面按直线计算,整体呈折线滑动。计算公式为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left((B \tan \phi_i + c_i L_i) \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left((W_i (\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) + T_{D_i}) \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + T_n} \quad (1)$$

式中: $B = (W_i ((1 - r_u) \cos \alpha_i - A \sin \alpha_i) - R_{D_i})$;

$$R_n = (W_n ((1 - r_u) \cos \alpha_n - A \sin \alpha_n) - R_{D_n}) \tan \phi_n + C_n L_n;$$

$T_n = (W_n (\sin \alpha_n + A \cos \alpha_n) + T_{D_n})$; W_i 为第 i 块滑体的重量 (kN/m); T_{D_i} 为渗透压力产生的平行滑面分力; R_{D_i} 为渗透压力产生的平行滑面分力; c_i 为第 i 块滑面凝聚力 (kPa); ϕ_i 为第 i 块滑面内摩擦角 ($^\circ$); L_i 为第 i 块滑面长度 (m); α_i 为第 i 块滑面倾角 ($^\circ$); A 为地震加速度 (重力加速度 g); r_u 为孔隙压力比; ψ_j 为第 i 块滑体的剩余下滑力传递至第 $i+1$ 块时的传递系数,即

$$\psi_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \phi_{i+1} \quad (2)$$

为了分析自重荷载、水、地震荷载等因素对滑坡稳定性的影响,选取 4 种工况进行稳定性计算,见表 1,稳定性计算参数及计算结果分别见表 2 和表 3。

表 1 稳定性计算工况

Table 1 Loading conditions of stability analysis

工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
天然状态 (自重)	滑体饱水 状态	天然状态 + 地震 (VI 度)	饱水状态 + 地震 (VI 度)

表2 滑坡稳定计算参数取值表

Table2 Parameters for stability analysis of the landslide

状态	参数	粉质黏土	碎石土	基岩
天然状态	凝聚力 c /kPa	21.5	15.2	300
	内摩擦角 φ /°	13.7	25.6	40
	重度 γ /kN·m ⁻³	19.8	21.8	24.5
	变形模量 E /GPa	0.025	0.03	2.03
	泊松比 ν	0.35	0.35	0.32
饱水状态	凝聚力 c /kPa	18.5	13.3	240
	内摩擦角 φ /°	11.3	19.2	32
	重度 γ /kN·m ⁻³	20.2	24.6	27
	变形模量 E /GPa	0.02	0.026	1.72
	泊松比 ν	0.39	0.39	0.35

表3 稳定性计算结果

Table 3 Results of stability analysis

计算 工况	主滑剖面 I-I'		主滑剖面 II-II'	
	传递系数法	有限元法	传递系数法	有限元法
1	1.14	1.16	1.18	1.19
2	0.94	0.96	0.98	0.99
3	1.10	1.13	1.13	1.15
4	0.89	0.89	0.92	0.94

3.2 有限单元法

有限单元法作为数值模拟方法已经在工程领域中得到了广泛的应用,具有如下优点:(1)可对具有复杂地貌、地质的边坡进行计算;(2)能考虑土体的非线性弹塑性本构关系以及变形对应力的影响;(3)能模拟土坡的失稳过程及其滑移面形状;(4)可模拟岩土体与支护的共同作用;(5)求解安全系数时不需要假定滑移面的形状,也无需进行条分。

本文采用二维非线性弹塑性有限单元法,对溪沟口滑坡中典型的剖面进行变形破坏机制和稳定性数值模拟^[4, 5],得到了应力和位移分布等计算成果图,并对滑坡稳定性进行了分析,且与规范法所得到的结果进行比较,可为该滑坡的治理提供科学的依据。

在有限元分析中,滑坡岩土体采用理想弹-塑性模型,采用 Drucker-Prager 屈服准则。有限单元法中安全系数定义为沿滑动面的抗剪强度与滑动面上实际剪力的比值,公式如下:

$$K = \frac{\int_0^1 (c + \sigma_n \tan \varphi) ds}{\int_0^1 \tau_s ds} \quad (3)$$

作用与单元滑面的法向应力 σ_n 和剪应力 τ_s 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - \tau_{xy} \cos 2\alpha; \\ \tau_s &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: σ_x 、 σ_y 分别为作用于相应单元的水平应力和竖向应力; τ_{xy} 为作用于相应单元的剪应力。

以 I-I' 主滑剖面为例,有限元计算按照平面应变问题处理,岩土体用平面应变单元模拟。由于滑动带的厚度非常小,滑坡尚未滑动,因此在网格划分中将滑动带作为单元的界面来处理。计算范围:坡顶侧延伸到+380 m 标高处,坡底向下延伸 20 m,向公路对面延伸 30 m。边界条件:左右两侧水平约束,下部 X、Y 方向约束,上部边界为自由边界。岩土体输入参数及有限元法计算的安全系数结果汇总仍见表 2 和表 3。

3.3 结果分析及评价

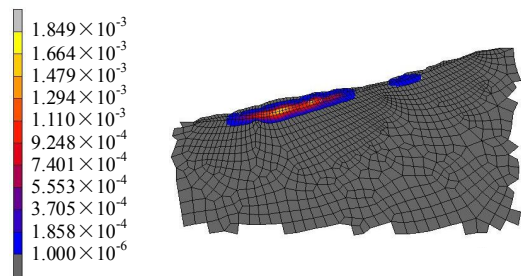
从表 3 中可知,传递系数法和有限元法计算结果较吻合,可见溪沟口滑坡整体虽然在天然状态和考虑地震影响两种工况下处于基本稳定状态,但安全储备较低,暴雨影响时整体处于极限平衡状态,考虑暴雨影响,并同时迭加地震因素后整体处于失稳状态,必须加以治理。

工况 1 的塑性区(图 3(a))呈现出局部化特征,而且只发生在滑坡前部粉质黏土层内,这说明滑体内强度低的黏土层是诱发滑坡的一个非常重要原因。工况 2 的塑性区(图 3(b))明显增大,说明水对塑性区扩展有较大的影响,是滑坡发生的主要原因。从工况 3 的塑性区(图 3(c))可以看出,塑性区基本没有变化,主要是地震烈度较低,地震荷载较小,对滑坡稳定性影响不大。由工况 4 的塑性区(图 3(d))可见,在滑体区域饱水以及叠加地震影响时,区域内塑性区几乎贯通,塑性正继续发展、扩大,尤其在剪出口附近,塑性应变已经达到了较高水平,滑体发生整体剪切破坏,从而导致滑坡滑动的发生。

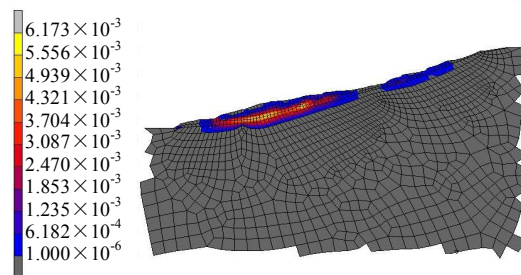
4 滑坡治理工程的设计与优化

在滑坡治理工程设计中,常用的方案有工程排水、预应力锚杆锚索、边坡整形、抗滑桩等工程。单纯排水工程还不能完全满足滑坡体的稳定性要求,因此需增设阻滑工程才能起到彻底根治该滑坡的目的。预应力锚杆锚索施工难度大、造价高,且锚杆锚索对于松散碎石土体发挥加固作用较难;坡面整形及削坡压脚,方法简单适用,但由于该工程

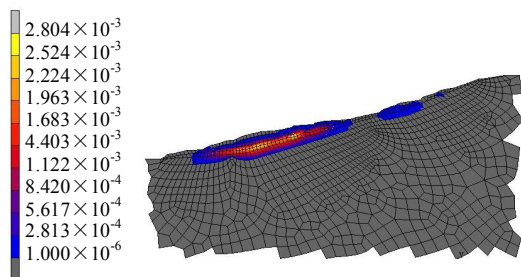
条件所限,下部滑舌又紧靠十堰至郧县公路无任何压脚场地,抗滑桩是一个极为有利的工程措施,其治理效果好,桩位设置灵活,对正在活动的滑坡采用跳跃式施工方法可不加剧其活动性,同时桩孔本身是个很好的探井,因此选择抗滑桩工程和地表排水相结合的治理加固方案^[6,7]。



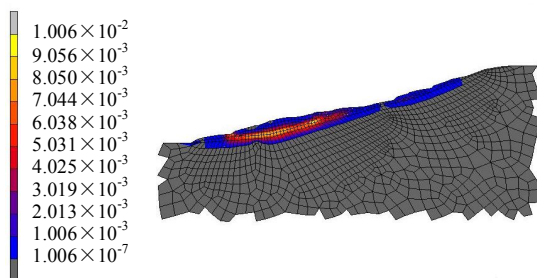
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图 3 等效塑性应变分布图

Fig.3 Distribution of equivalent plastic strains

实践证明抗滑桩在治理滑坡中确实具有非常好的效果,但其造价昂贵。一个工程使用抗滑桩的滑坡治理的费用动辄上千万,有时 1 根桩的费用就可达 20~30 万元,抗滑桩的设计中尽量降低其工程造价就极为重要。在我国目前治理滑坡的工程中,工程人员进行抗滑桩设计的时候,主要参数多按经验取值,往往使设计的方案并不是最经济节省的。

针对滑坡加固方案优化问题,已有很多学者采用不同的方法进行了研究,如层次分析法、灰色理论方法、遗传算法等。滑坡加固方案的优化设计是一个有约束的优化问题,本文采用进化的神经网络算法对该滑坡的治理方案进行优化^[8,9]。

进化神经网络方法通过对不同的治理工程设计参数设计出若干组治理加固方案,以形成加固方案设计参数与稳定性、工程造价之间对应关系的样本集,利用搜索到的进化神经网络,在最优学习误差下对设计参数样本进行学习训练,形成设计参数与稳定性及造价间的映射关系模型:

$$\left. \begin{aligned} GA-NN(n, h_1, \dots, h_p, m): R^n &\rightarrow R^m; \\ (M, F) &= GA-NN(n, h_1, \dots, h_p, m)(X); \\ (X) &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: F 为滑坡加固后的安全系数; M 为滑坡防治工程总造价; x_i 为待优化的滑坡加固方案设计参数; $j=1, 2, \dots, n$; GA 表示遗传算法参数; NN 表示神经网络参数。

利用上述进化神经网络模型 $GA-NN$, 记其输出项中的安全系数为 F , 其输出项中的防治工程造价 M , 则在满足防治工程安全系数要求的前提下,以造价最低作为滑坡治理的最优设计方案,可以归纳为这样一个数学优化模型:

$$\left. \begin{aligned} \min f &= M(GA-NN) \\ \text{s.t.}: F(GA-NN) &\geq F_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: f 为滑坡治理工程最优的造价; F_s 为治理工程中安全等级要求的安全系数。

从抗滑桩设计的工程实践中可知: 桩截面宽度、桩截面长度、桩间距、桩长以及最大配筋率是影响抗滑桩造价的关键因素。样本可采用如下方法构造: 首先,根据滑坡防治工程的实际情况初步选择抗滑桩长度、截面尺寸、桩间距等参数,进行稳定性分析和抗滑桩的内力计算,进而确定桩体配筋率,最后计算加固措施实施后的滑坡体安全系数及防滑工程造价,从而形成一个样本。根据上述思路,计算出 55 种设计方案的造价及加固后滑坡体的稳

定性系数。通过对样本的学习, 建立加固方案设计参数与稳定性、工程造价之间的非线性关系。

以这些设计方案作为初始样本集, 输入设计参数: 抗滑桩长 L 、截面宽 b 、截面长 h 、桩间距 d 、最大配筋率 ρ , 按照式 (5) 所示方法, 通过对样本的学习, 建立对应关系, 经过遗传操作, 进化 65 代, 最后搜索出的方案为: 抗滑桩长 21.6 m, 截面宽 2.1 m, 截面长 2.9 m, 桩间距为 5.7 m, 截面最大配筋率为 2.76 %, 安全系数为 1.333, 工程总造价为 1 584.846 万元。优化后的设计参数能满足抗滑桩稳定验算检验。按照此方案优化设计参数, 实际计算加固后滑体的安全系数为 1.34, 滑坡治理工程的总造价为 1 578.629 万元。若考虑滑坡两翼滑体厚度较薄, 在满足抗滑桩稳定验算检验的基础上, 结合桩位处实际滑体厚度对桩长进行适当修正, 得到优化后工程总造价为 1 424.692 万元。滑坡治理初步方案总造价为 1 642.586 万元, 比优化方案总造价高出 15.29 %, 可见此方法能有效进行滑坡治理工程优化。

5 滑坡治理工程数值模拟与评价

本文采用有限元法对治理后的滑坡进行数值模拟分析, 以验证治理效果。在有限元分析中抗滑桩采用梁单元模拟, 其余参数与 3.2 中相同, 岩土体参数仍按表 2 取值, 主要计算治理后表 1 所示 4 个工况条件下滑坡的安全系数、滑体中的位移矢量、等效塑性应变的变化与分布等。以 I-I' 主滑剖面为例, 治理后各工况条件下安全系数见表 4。可以看出在各种工况作用下滑坡的安全系数均大于 1.15, 处于稳定状态。治理方案能够达到滑坡治理的预期要求, 合理且有效。

表 4 治理后有限元法稳定性计算结果
Table 4 Results of stability analysis after landslide harnessing by FEM

工况	1	2	3	4
安全系数	1.36	1.25	1.27	1.19

在按常规方法进行抗滑桩设计时, 抗滑桩设计推力是滑坡整治设计的重要依据, 以设桩处的推力差值即天然状态下设桩后滑坡拟达到一定安全系数 (本文取 1.30) 时的滑坡推力与天然状态时的滑坡推力的差值来确定。抗滑桩在天然状态下除库仑土压力外不再承受其他载荷, 对滑体内力不产生影响。由表 4 可知, 埋设抗滑桩后天然状态下 I-I' 滑面的安全系数为 1.36, 达到了预期目标。治理前滑体

中的最大等效塑性应变和剪应力分别为 1.849×10^{-3} 和 66.51 kPa, 治理后为 1.833×10^{-3} 和 64.41 kPa, 治理前后仅相差 0.86 % 和 1.24 %, 可以认为天然状态下抗滑桩并不起承载作用, 不影响滑体内力分布, 仅是一种安全储备。

在极端不利工况作用下 (暴雨导致滑体饱水迭加地震), 治理后滑体的塑性区 (图 4) 与治理前 (图 3) 相比塑性区向强度更高的基岩处转移, 且桩前、后滑体的位移矢量比治理前明显减少。验证了抗滑桩将受荷段承受的滑坡推力通过桩固段向基岩传递, 利用了基岩承载的加固机理。治理后滑体内最大等效塑性应变为 7.039×10^{-3} , 比治理前的 1.006×10^{-2} 减少了 30.03 %。最大剪应力为 80.56 kPa, 比治理前的 0.090 47 MPa 减少了 10.95 %, 加固效果明显。

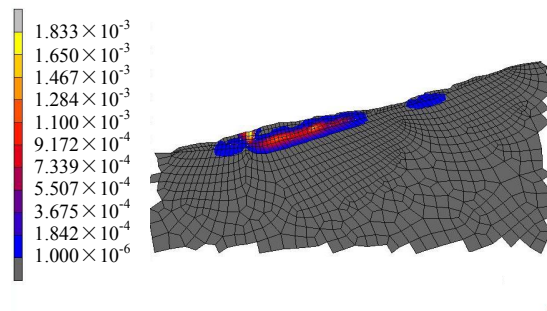


图 4 治理后工况 4 等效塑性应变分布图
Fig.4 Distribution of equivalent plastic strains of condition 4 after landslide harnessing

6 结 论

(1) 采用传递系数法与有限元法对溪沟口滑坡进行稳定性分析, 所得结果能较好的吻合, 互相印证, 增加了结果的可信度。有限单元法的计算模型不仅满足力的平衡方程, 且考虑了土体的非线性弹塑性本构关系, 计算结果更可靠。

(2) 根据滑坡稳定性分析的计算结果和滑坡地质情况, 提出采用抗滑桩加地表排水的滑坡治理方案。并针对抗滑桩造价昂贵, 设计多依靠经验、存在浪费等现状采用遗传算法改进的神经网络方法进行滑坡治理方案优化。通过计算可以看出, 这种方法对该滑坡治理工程的优化效果比较明显。

(3) 利用有限元法对滑坡体加固前后的稳定状况进行分析, 利用土体与支护的共同作用及其变形协调等优点对所提出的优化治理方案进行验算, 该方案能够达到滑坡治理的预期要求, 加固效果明显。

参 考 文 献

- [1] 李新平, 谢全敏, 王涛, 等. 溪沟口滑坡治理工程设计报告[R]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [2] 交通部第二公路勘测设计院. 路基(第2版)[M]. 北京: 北京人民交通出版社, 1996.
- [3] GB50021—2001, 岩土工程勘察规范[S].
- [4] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [5] 赵尚毅, 时卫民, 郑颖人. 边坡稳定性分析的有限元法[J]. 地下空间, 2001, 21(5): 450—454.
ZHAO Shang-yi, SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren. FEM for analysis of slope stability[J]. **Underground Space**, 2001, 21(5): 450—454.
- [6] 魏丽敏, 何群, 林镇洪. 考虑地下水影响的滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2004, 3(25): 422—426.
WEI Li-min, HE Qun, LIN Zhen-bong. Stability analysis of landslide under influence of groundwater[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 3(25): 422—426.
- [7] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [8] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 冯夏庭, 李邵军, 张友良, 等. 滑坡的综合集成智能分析与优化设计方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 592—1 596.
FENG Xia-ting, LI Shao-jun, ZHANG You-liang, et al. Study on methodology of comprehensive intelligent analysis and optimum design for landslide[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1 592—1 596.