

DOI: 10.11779/CJGE2018S1019

兰永一级公路顺层滑坡抗剪强度参数确定及应用

马金莲^{1,2}, 朱彦鹏³, 杨晓宇³, 周欣海³

(1. 中国地震局黄土地震工程实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 兰永一级公路工程修建过程中在路堑边坡开挖时形成了顺层边坡, 以 K23+520 处的大型顺层滑坡最为典型。由于岩土体抗剪强度参数在边坡稳定性分析和加固设计中不可或缺, 为了更好地实现其余类似边坡的加固设计和稳定性分析, 以 K23+520 处的滑坡为研究对象, 提出含有软弱夹层的顺层滑坡结构面上抗剪强度参数的确定方法: 对已知一个滑动面位置的滑移-拉裂破坏模式下的顺层滑坡, 通过结合顺层滑坡失稳条件(临界高度、局部稳定系数)及变形破坏特征对满足刚体滑移模型下的多组强度参数进行逐步修正, 得到了满足工程应用要求的强度参数取值, 并将结果用于类似边坡的加固设计和稳定性分析。方法不仅适合兰永一级公路 K23+520 处顺层滑坡结构面上抗剪强度参数的确定, 还适用于类似滑坡工程强度参数的确定, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 顺层滑坡; 刚体滑移; 强度参数; 稳定性分析

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0118-06

作者简介: 马金莲(1988-), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事黄土动力学与地震工程理论研究与试验工作。E-mail: majinlian152@163.com。

Determination and application of shear strength parameters of bedding landslide of Lanzhou-Yongjing Highway

MA Jin-lian^{1,2}, ZHU Yan-peng³, YANG Xiao-yu³, ZHOU Xin-hai³

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, Lanzhou 730000, China; 3. School of Civil Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Bedding slope is formed in the excavation of cutting slope during construction of Lanzhou-Yongjing Highway, with K23+520 large bedding landslide being the most typical. Due to the importance of shear strength parameters of rock and soil in the slope stability and support design, in order to better realize the reinforcement design and stability analysis of similar slopes, taking K23+520 section of landslide as the research object, a method is put forward to determine the shear strength parameters of slip surface of bedding landslide with weak interlayer: for the landslide with a given location of slip surface, the failure conditions of the bedding landslide (critical height, local stability coefficient) and the deformation characteristic are combined to revise multiple groups of strength shear parameters to meet the rigid sliding model step by step, the strength parameters satisfying the requirements of engineering application are obtained, and the results are used for the reinforcement design and stability analysis of similar slopes. This method is suitable for determining the strength parameters of the structural plane of K23+520 bedding landslide of Lanzhou-Yongjing Highway and other similar landslides, and it has a certain practical value in engineering.

Key words: bedding landslide; rigid sliding; shear strength parameter; stability analysis

0 引言

顺层边坡指岩层走向和倾向与边坡走向和倾向一致的边坡, 在路堑边坡开挖中最为常见^[1-3]。在兰永一级公路的修建过程就形成了大量的路堑边坡, 其中不乏顺层边坡。在准确确定工程计算参数的基础上, 及时对不满足稳定性要求的边坡进行加固也是本项目建设的主要任务之一, 而快速有效获取满足工程应

用要求的力学计算参数是完成加固设计任务的关键。

目前, 对顺层边坡的研究主要集中在失稳机理和稳定性分析方面, 顺层边坡抗剪强度参数取值的确定除了常用的试验方法外还有位移反分析法、神经网络、

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2017IESLZ04)

收稿日期: 2018-02-24

表 1 不同变形情况对应的边坡稳定系数取值^[7]

Table 1 Stability coefficient for different development stages of landslide

发育阶段	变形性质	安全系数	变形状态
局部变形	蠕滑	1.05~1.0	前缘或后缘变形微弱, 地表出现未连通微裂缝 局部坡面变形异常, 陡坎处出现小型局部滑崩, 裂缝发展, 逐渐连通 坡面出现鼓丘、挤压变形和较长的大裂缝
整体变形	微滑	1.0~0.9	
	剧滑	<0.9	
稳定固结	固结	>1.05	

表 2 结构面抗剪强度参数参考值

Table 2 Reference values of shear strength parameters of structural plane

结构面类型	结构面结合程度	内摩擦角 φ / (°)	黏聚力 c / MPa
硬性结构面	结合好	> 35	> 0.13
	结合一般	35~27	0.13~0.09
	结合差	27~18	0.09~0.05
软弱结构面	结合很差	18~12	0.05~0.02
结合极差 (泥化层)		$\varphi = 8 \sim 11^\circ$, c 根据试验或地区经验确定	

遗传算法^[4-6, 7-10]等用于参数反演的方法。这些方法在工程应用中均不同程度受到费用高、耗时长、试验结果离散型大等方面的影响, 不利于快速解决边坡的稳定加固问题。

从对顺层边坡失稳变形特点的研究来看, 顺层边坡沿着其软弱岩结构面上的变形破坏形式有多种^[11-12]。本文以兰永一级公路在 K23+520 处形成的大型顺层滑坡为例, 研究滑移—拉裂破坏模式下的顺层滑坡结构面上抗剪强度参数的取值问题, 建立一套快速有效确定顺层滑坡结构面上抗剪强度参数的方法。本文的研究成果不仅可以服务于兰永一级公路的建设, 还可以应用于类似顺层滑坡工程强度参数的确定, 具有一定的参考价值。

1 顺层滑坡抗剪强度参数确定方法

本文结合前人关于岩层结构面上强度参数参考值的研究, 基于刚体滑移模型确定抗剪强度参数取值范围并进一步修正, 得到满足于工程应用要求的强度参数取值。

为了确定满足于工程应用要求的顺层滑坡结构面上抗剪强度参数取值, 本文将充分利用顺层滑坡失稳破坏条件和变形特征不断缩小强度参数 c , φ 的取值范围以确定出满足工程应用的计算参数。具体的修正措施有: ①基于滑坡失稳破坏临界高度条件的修正; ②基于滑坡局部稳定系数的修正; ③基于滑坡变形特征的修正。

1.1 滑坡稳定系数的确定

滑坡稳定系数确定的基础是对滑坡进行现场勘查并连接滑动面、确定裂缝位置和深度, 根据滑坡变形状态结合表 1 确定, 进而为抗剪强度参数的确定提供

条件。

1.2 结构面抗剪强度参数参考值的选取

根据中国铁路、公路和水电等单位的地质勘察经验及试验成果, 常见的结构面抗剪强度指标参考值见表 2^[13]。根据表 2 中软弱结构面给出的强度参数参考取值, 考虑到本文中 K23+520 处的顺层滑坡结构面为泥化层, 结合程度极差, 可以初步判断确定 K23+520 处顺层滑坡结构面上强度参数 φ 的取值范围为 $\varphi=8^\circ \sim 11^\circ$ 。

1.3 基于刚体滑移模式确定强度参数取值范围

图 1 为含有软弱夹层的顺层滑坡, 滑坡高 H , 滑坡滑动面倾角与岩层倾角相等为 α , 坡面倾角为 β , 假定滑坡为平面应变问题, 取单位宽度范围内的滑体进行计算。设滑坡发生在第 i 软弱结构面上, 根据刚体滑移模型, 在重力作用下则第 i 滑动面上的抗滑力和滑动力分别为

$$\left. \begin{aligned} T &= A\gamma \sin \alpha, \\ R &= A\gamma \cos \alpha \tan \varphi + cL \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据上述关于滑动面上稳定系数的定义, 则第 i 岩层面上的稳定系数 F_s 可以表达为

$$F_s = \frac{R}{T} = \frac{A\gamma \cos \alpha \tan \varphi + cL}{A\gamma \sin \alpha}, \quad (2)$$

式中, A 为滑坡体断面面积 (m^2), γ 为滑体重度, 这里取加权平均重度 (kN/m^3), L 为滑面长度。

2 加固后顺层边坡稳定系数计算

如上所述: 顺层边坡稳定系数可以定义为滑动面上抗滑力 R 与滑动力 T 的比值, 对锚杆锚索支护下的顺层边坡其稳定系数的计算如下^[13]。

非预应力锚杆锚索支护下的顺层边坡稳定系数计

算:

$$F_s = \frac{(G\sin\alpha - V\sin\alpha - U)\tan\varphi + cL}{G\sin\alpha + V\cos\alpha - T\sin\psi} \quad (3)$$

预应力锚杆锚索支护下的顺层边坡稳定系数计算:

$$F_s = \frac{(G\sin\alpha - V\sin\alpha - U + T\cos\psi)\tan\varphi + cL}{G\sin\alpha + V\cos\alpha - T\sin\psi} \quad (4)$$

式中 G 为单位宽度滑体重力, U 为单位宽度总水压力, V 为后缘陡倾裂隙面上的单位宽度总水压力, T 为锚杆或者锚索的拉力, ψ 为锚杆(索)倾角, 其他参数物理意义同上。

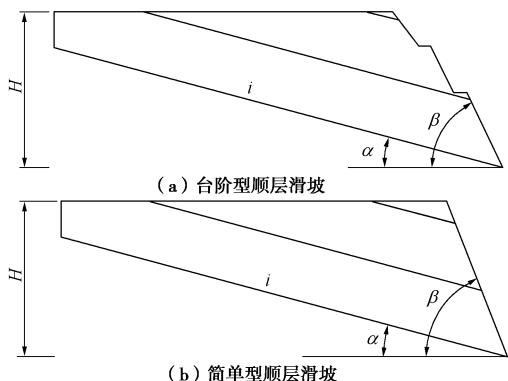


图1 岩质顺层滑坡简图
Fig. 1 Bedding landslide of rock slope

3 工程实例分析

3.1 工程介绍

(1) 滑坡岩层组成

根据地质调查, 开挖坡体地层基岩出露, 地层岩性为下白垩统河口群粘土岩夹中薄层砂岩, 紫红色、青灰色, 中厚层状构造, 泥钙质胶结, 成岩较好。具弱一中膨胀性, 易软化, 易崩解。岩层产状为 $55^\circ \angle 15^\circ$, 发育两组节理, 产状依次为 $195^\circ \angle 82^\circ$ 和 $106^\circ \angle 10^\circ$, 岩体呈中厚层状。

(2) 滑坡变形情况

该段路基约2013年4月12日开挖上部山梁, 开挖坡率一级 $1:0.5$, 高8 m, 第二级坡率 $1:0.5$, 高8 m, 第三级坡率 $1:0.75$, 坡高6 m, 每级边坡设2 m宽平台。2013年4月初路堑基本挖至设计标高, 在开挖左侧边沟过程中, 于2013年4月13日凌晨1点左侧边坡发生整体变形破坏。在坡口左侧平台上部位置产生两处裂缝, 第一条裂缝宽5~10 m, 可见深度3~8.9 m, 第二条裂缝宽3~5 m, 可见深度4.3~11.2 m。滑坡情形如图2所示。

3.2 滑坡抗剪强度参数确定

根据对滑坡现场勘察调研和对滑坡开裂变形的分

析, 对照结合表1可以确定该滑坡的稳定系数 $F_s < 0.9$; 结合工程类比法, 这里将此滑坡稳定系数的范围取为[0.8~0.9]。下面笔者将取 $F_s = 0.8$, $F_s = 0.85$ 和 $F_s = 0.90$ 参与确定该顺层滑坡结构面上抗剪强度参数的取值范围, 根据式(2)计算得到的强度参数取值见表3。



图2 顺层滑坡现场照片
Fig. 2 Photos of bedding landslide

表3 不同稳定系数取值下的抗剪强度参数

Table 3 Values of shear strength parameters under different stability coefficients (kPa)

$\varphi /(^{\circ})$	$F_s = 0.80$	$F_s = 0.85$	$F_s = 0.90$
8	20.7849	24.5572	28.3925
9	15.7607	19.5330	23.3053
10	10.7087	14.4810	18.2533
11	5.6254	9.3977	13.1700

3.3 强度参数的修正

上述基于刚体滑移模型确定得到的多组抗剪强度参数的取值范围并不能满足工程应用的要求。笔者将根据顺层滑坡发生的条件及变形特征来进一步对上述多组抗剪强度参数进行筛选修正, 从而确定出满足工程应用要求的强度参数取值。

(1) 基于临界高度的修正

根据对顺层滑坡失稳的条件的研究^[13-14]: 刚体滑移模式下的顺层滑坡发生失稳时的高度一定大于其临界高度, 这里滑体加权平均重度 $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ 。对任意刚体模式下的顺层滑坡, 其滑坡临界高度可以表示为

$$H_{cr} = \frac{2c\sin\beta\cos\varphi}{\gamma\sin(\beta-\alpha)\sin(\alpha-\varphi)} \quad (5)$$

滑坡高度大于临界高度 H_{cr} 时边坡发生失稳破坏。

笔者将对上述12组强度参数下的滑坡临界高度进行计算, 这里取满足 $H = 22 \text{ m} = H_{cr}$ 进行进一步对取值范围内的强度参数进行分析修正。表4为根据式(5)计算得到的这12组强度参数下滑坡临界高度 H_{cr} 。

本文将确定得到的K23+520处结构面上的抗剪强度参数用于确定兰永一级公路K23+890—K23+975处泥岩与砂岩互层某顺层边坡加固设计, 其结构面如

表 4 不同强度参数下的边坡临界高度

Table 4 Critical heights of slope under different strength parameters

$\varphi /(^{\circ})$	$F_s = 0.80$		$F_s = 0.85$		$F_s = 0.90$	
	c / kPa	H_{cr} / m	c / kPa	H_{cr} / m	c / kPa	H_{cr} / m
8	20.7849	18.4093	24.5572	21.7504	28.3925	25.0915
9	15.7607	16.2327	19.5330	20.1180	23.3053	24.0033
10	10.7087	13.1893	14.4810	17.8355	18.2533	22.4816
11	5.6254	8.6287	9.3977	14.4150	13.1700	20.2013

图 3 所示。其中泥岩厚度为 2 m, 砂岩厚度 8 m。此段挖方采用台阶型边坡, 第一级边坡坡率为 1:0.5, 高 10 m; 第二级坡率为 1:0.75, 高 8 m; 第三级边坡坡率 1:0.75, 高 8 m; 第四级边坡坡率为 1:1, 开挖至坡顶。该边坡的支护形式为: 一、二级均采用预应力锚索框格梁支护, 三、四级边坡采用锚杆框格梁支护, 其中一、二级采用的是钢筋直径为 22 mm 全长注浆锚杆支护, 三、四级采用的是 6 束 7 股 15.2 钢绞线预应力锚索, 锚固长度 10 m, 锚杆锚索倾角 25°。图 4 为该边坡支护断面图。

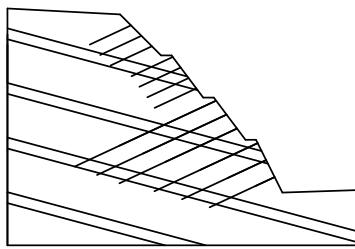


图 3 K23+890—K23+975 处某边坡加固设计方案

Fig. 3 Design scheme of slope reinforcement of K23+890—

K23+975

从表 4 的计算结果中可以排除 $F_s = 0.80$ 和 $F_s = 0.90$ 情况下得到的该顺层滑坡结构面上抗剪强度参数的所有取值情况, 以及 $F_s = 0.85$ 情况下的两组强度参数, 得到 K23+520 处顺层滑坡结构面上满足滑坡高度要求的抗剪强度参数取值有: $\begin{cases} c = 24.5572 \text{ kPa}, \\ \varphi = 8^{\circ}, \end{cases}$, $\begin{cases} c = 18.2533 \text{ kPa}, \\ \varphi = 10^{\circ}. \end{cases}$ 。

(2) 基于局部稳定系数的修正

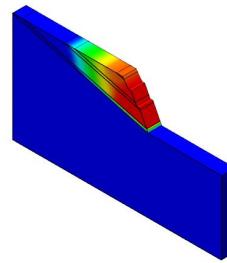
考虑到此处的研究对象发生的是沿着软弱岩层面的滑移—拉裂模式下的顺层滑坡, 其滑动面在软弱结构岩层面 i 上, 那么在除 i 以外的任意结构面上则应该有稳定系数 $F'_s \geq 1.0$, 此处笔者取上述筛选出的两组强度参数, 对 K23+520 处的顺层滑坡取滑动面以上的软弱岩层, 并基于刚体滑移模式建立稳定系数求解方程, 得到的稳定系数分别为 $F'_{s1} > 1.303$, $F'_{s2} > 1.237$ 。

从局部稳定系数的计算结果看到这两组强度参数均满足要求。

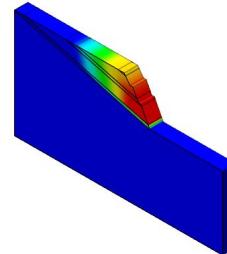
(3) 基于滑坡变形特征的修正

滑移—拉裂破坏模式下的顺层滑坡, 其破坏特征是: 临空面岩体在自重作用下发生变形并产生较大位移, 随着临空面岩体位移的增大, 结构面上部岩体被拉开产生一定的裂缝; 随着结构面上岩体的不断开裂和临空面滑体的滑移带动, 临空面后部的岩体也开始产生变形, 并随位移的增大下滑力拉动上部岩体继续开裂, 再次产生一定程度的裂缝, 逐渐形成由下向上的贯通破坏, 边坡发生整体失稳。

下面笔者将选用有限元软件 Midas/GTS 对 K23+520 处的顺层滑坡建立了三维有限元模型: 模型纵向长度 154 m, 高度 81 m, 文中对恢复原状后的该滑坡进行了非线性静态下的变形分析, 分别得到了两组强度参数下该边坡的位移云图, 如图 4 所示。



(a) 第一组强度参数下边坡的变形



(b) 第二组强度参数下的边坡变形

图 4 两组强度参数下有限元分析的边坡变形

Fig. 4 Finite element analysis of slope deformation under two groups of strength parameters

通过以上两组强度参数取值下有限元软件 Midas/GTS 分析得到的非线性静态下的边坡体变形云图可以看到: 两组强度参数下边坡均发生了沿着软弱岩层的顺层滑动, 但与实际滑坡变形相比, 第一组强度参数得到的变形更符合真实变形情况。故综合确定 K23+520 处的顺层滑坡抗剪强度参数取值为 $c =$

24.5572 kPa, $\varphi=80^\circ$, 见表 5。

表 5 顺层边坡岩层参数取值

Table 5 Selection of parameters of bedding rock slope

岩层	γ /(kN·m ⁻³)	E /(10 ⁴ kN·m ⁻²)	c /kPa	φ /(°)	μ
泥岩	20	3	24.5572 (18.2533)	8(10)	0.30
砂质泥岩	22	20	48	35	0.25
砂	24	60	110	30	0.20

为了验证支护后边坡沿着各软弱结构面(编号依次从上往下)均处于稳定状态,笔者计算得到了支护前后该边坡各软弱结构面上的稳定系数取值见表 6。需要注意的是在非临空面上稳定系数的计算需要考虑被动土压力的作用。从表 6 的计算结构来看,支护后该边坡在各结构面上均满足边坡工程安全系数的要求: $F_s > 1.3$, 该边坡处于稳定状态。

表 6 加固前后边坡沿结构面上的稳定系数值

Table 6 Values of stability coefficient of structure plane before and after reinforcement

支护前		支护后	
结构面	稳定系数 F_s	结构面	稳定系数 F_s
1	1.27	1	1.86
2	0.85	2	2.41
3	0.88	3	1.83
4	1.04	4	1.62
5	1.24	5	1.71

4 结 论

本文以兰永一级公路开挖过程在 K23+520 处形成的顺层滑坡为工程实例,提出通过结合多种手段逐步修正的方法来确定符合工程要求的抗剪强度参数的方法,并将结果用于类似边坡的加固设计和稳定性分析。得到以下结论和建议:

(1) 对滑移-拉裂破坏模式下的顺层滑坡,在已知一个滑动面位置的条件下,通过刚体滑移模型并不能唯一确定结构面抗剪强度参数,可以结合工程实际通过多种修正措施得到满足工程应用要求的强度参数取值。

(2) 本文以滑坡临界高度和局部稳定系数的修正手段可以根据滑坡岩土体性质、变形特点等具体情况决定其先后使用顺序。本文方法不仅可以用于兰永一级公路 K23+520 处顺层滑坡结构面上抗剪强度参数的确定,在类似滑坡抗剪强度参数确定中也可以采用,具有一定的工程实用价值。

(3) 本文基于刚体滑移模型确定结构面抗剪强度参数时并未考虑开挖扰动对边坡的影响,建议在后续的研究中能够考虑以确定更符合实际情况的抗剪强度参数,在确保安全的基础上更经济地实现边坡的加固设计要求。

参 考 文 献:

- [1] 杨明亮,袁从华,骆行文,等.高速公路路堑边坡顺层滑坡分析与治理[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23): 4383 - 4389. (YANG Ming-liang, YUAN Cong-hua, LUO Xing-wen, et al. analysis of bedding landslide of cutting slope in an expressway and ITS treatment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4383 - 4389. (in Chinese))
- [2] 龚文惠,王平,陈峰.顺层岩质路堑边坡稳定性的敏感性因素分析[J].岩土力学,2007,28(4): 812 - 816. (GONG Wen-hui, WANG Ping, CHEN Feng. Analysis of sensitivity factors to stability of bedding rock cutting slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 812 - 816. (in Chinese))
- [3] 陈鹏,徐博侯.顺层岩质路堑边坡稳定性数值极限分析[J].交通运输工程学报,2012,12(2): 38 - 45. (CHEN Peng, XU Bo-hou. Numerical limit analysis of stability for bedding rock cutting slope[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 38 - 45. (in Chinese))
- [4] 张玉军,刘谊平.层状岩体抗剪强度的方向性及剪切破坏面的确定[J].岩土力学,2001,22(3): 254 - 257. (ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. Anisotropy of shear strength of layered rocks and determination of shear failure plane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 254 - 257. (in Chinese))
- [5] 师刚,刘华莉,刘学增.不等厚互层顺层磷矿高边坡变形机制研究[J].地下空间与工程学,2014,10(5): 1223 - 1229. (SHI Gang, LIU Hua-li, LIU Xue-zeng. Research on deformation mechanism of the bedding high rock slope with different interbed thickness at jinning phosphorus mine[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1223 - 1229. (in Chinese))
- [6] 王根龙,伍法权,蔡晓光.考虑层间错动的顺层岩质边坡稳定性分析[J].水文地质工程地质,2010,37(2): 55 - 58. (WANG Gen-long, WU Fa-quan, CAI Xiao-guang. Stability analysis of consequent rock slope considering slippage of bedding plane[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2): 55 - 58. (in Chinese))
- [7] 易朋莹,王凯,任佳,等.基于传递系数法的滑坡滑带

- 土强度参数反分析研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, **19**(4): 23 - 26. (YI Peng-ying, WANG Kai, REN Jia, et al. Research on anti-analysis of the landslide's strength parameter through transferring coefficient method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, **19**(4): 23 - 26. (in Chinese))
- [8] 邓 勇. 边坡岩体力学参数反分析遗传—神经网络算法[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(4): 751 - 757. (DENG Yong. A genetic-artificial neural network algorithm for mechanical parameters of rock slope[J]. Chinese Journal of Underg round Space and Engineering, 2007, **3**(4): 751 - 757. (in Chinese))
- [9] 汤罗圣, 殷坤龙, 周 丽, 等. 基于数值模拟与位移监测的滑坡抗剪强度参数反演分析研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, **39**(4): 32 - 37. (TANG Luo-sheng, YIN Kail-ong, ZHOU Li, et al. A study of landslide shear strength parameters y inversion analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, **39**(4): 32 - 37. (in Chinese))
- [10] 罗 莉, 肖裕民, 黄红元, 等. 遗传算法在滑坡抗剪强度参数反演中的应用[J]. 公路交通技术, 2005(1): 10 - 13. (LUO Li, XIAO Yu-ming, HUANG Hong-yuan, et al. Application of genetic algorithm to back analysis of shear strength parameters[J]. Technology of Highway and Transport, 2005(1): 10 - 13. (in Chinese))
- [11] 李安洪, 周德培, 冯 君. 顺层岩质边坡破坏模式及设计对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2915 - 2920. (LI An-hong, ZHOU De-pei, FENG Jun. failure modes of bedding rock cutting slope and design countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2915 - 2920. (in Chinese))
- [12] 邓荣贵, 周德培, 李安洪, 等. 顺层岩质边坡不稳定岩层临界长度分析[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 178 - 182. (DENG Rong-gui, ZHOU De-pei, LI An-hong, et al. On the critical length of unstable rock stratum on bedrock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 178 - 182. (in Chinese))
- [13] 吉 峰. 顺层边坡硬性结构面强度参数及工程技术研究—以广巴高速公路顺层边坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2008. (JI Feng. Study on strength parameter of hard structural plane and engineering technique for consequent slope Taking consequent slope of GUANGBA Highway for example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [14] 路 为, 白 冰, 陈从新. 岩质顺层边坡的平面滑移破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 204 - 207. (LU Wei, BAI Bing, CHEN Cong-xin. Analysis of mechanism of plane sliding failure for bedded rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 204 - 207. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)