

文章编号:1673-2049(2016)03-0036-06

基于强度折减法的边坡岩土体抗剪强度参数反演

朱彦鹏^{1,2}, 马金莲^{1,2}, 叶帅华^{1,2}, 马孝瑞^{1,2}

(1. 兰州理工大学 甘肃土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 鉴于传统位移优化反分析复杂的数学运算和迭代程序编制, 提出了将强度折减法与位移优化反分析法相结合求解边坡岩土体抗剪强度参数。将双参数优化模型转变为单参数优化模型, 通过折减系数将位移与抗剪强度参数联系起来, 并结合有限元分析、数据拟合、最小二乘法优化, 反演边坡岩土体折减系数。通过算例验证了所提方法的可靠性。结果表明: 在合理选取初始值的条件下, 通过该方法可以求得边坡岩土体抗剪强度参数; 该方法不仅避免了复杂的数学计算和迭代程序的编制, 还克服了双参数反演时二元线性或非线性回归引起的较大误差。

关键词: 抗剪强度参数; 优化反分析; 强度折减法; 非线性分析; 边坡

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A

Inversion of Shear Strength Parameters for Rock and Soil of Slope Based on Strength Reduction Method

ZHU Yan-peng^{1,2}, MA Jin-lian^{1,2}, YE Shuai-hua^{1,2}, MA Xiao-rui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In view of complex mathematical calculations and iterative programming of traditional displacement back analysis, a method combining strength reduction method and displacement optimization back analysis method was presented to calculate shear strength parameters for rock and soil of slope. Double-parameters model was converted into single-parameter model, the displacement and strength parameters were linked by reduction factors, and finite element analysis, data fitting, least squares optimization were combined to inverse the reduction factors for rock and soil of slope. The reliability of the method was verified by a numerical example. The results show that under the condition of reasonable selection of the initial value, the shear strength for rock and soil of slope can be obtained through the method, and the method not only avoid complex mathematical calculations and iterative programming, but also overcome error induced by two-element linear regression or non-linear regression when two-parametric inversion.

Key words: shear strength parameter; optimization back analysis; strength reduction method; non-linear analysis; slope

收稿日期: 2015-12-05

基金项目: 甘肃省创新研究群体计划项目(1210RJLA003); 国家自然科学基金项目(51508256); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2015-5)

作者简介: 朱彦鹏(1960-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: zhuyp@lut. cn.

0 引言

边坡工程的首要问题是稳定性问题,在边坡工程中经常要对边坡体进行正常工况、降雨工况、地震工况下的稳定性分析,获得边坡在不同工况下的安全系数、位移云图、应力与应变云图等,进而对边坡的稳定性作出合理的评价。在进行边坡稳定性分析时,不管采用极限平衡法、有限元强度折减法、离散元法3种方法中的哪一种,均涉及边坡岩土体抗剪强度参数的取值问题。研究表明^[1-2],合理的抗剪强度参数取值是保证边坡稳定性评价结果合理或可靠的关键。实践表明,强度参数的微小变化往往会引起滑坡推力的极大变化。因此,边坡工程中获取合理的抗剪强度参数就显得尤为重要。

目前,边坡岩土体抗剪强度参数的获取方式主要有试验法、经验法和反分析法。边坡岩土介质的成因、组成成分、结构构成的多样性和复杂性,使得前2种方法在工程应用中都具有一定的局限性^[2-3]。因此,利用边坡动态监测得到的数据(位移或应力),采用反分析法求解边坡岩土体抗剪强度参数成为另一种有效途径。反分析法由于工作量小、反演结果准确性较高等优点,在岩土工程和边坡工程中得到了广泛应用。学者们在利用反分析法求解初始应力、岩性参数、力学参数等方面成果显著;同时,基于数值模拟、遗传算法、神经网络和粒子群算法等反演边坡抗剪强度参数的研究也取得了一定突破^[4-8]。

传统位移法确定边坡岩土体抗剪强度参数常采用优化的方法,即位移优化反分析法。通过监测位移与计算位移余差最小的原则建立优化分析模型,再通过各种不同的手段来进行参数识别,从而获得理想的求解参数^[9-12]。在这一过程中将计算位移视为强度参数的强非线性函数,目前主要对边坡体进行敏感度分析后通过拟合或回归获得此函数。从回归经验来看,一元函数的回归精度明显高于二元或多元函数的回归精度。因此,本文将强度折减法与位移优化反分析法结合起来,进行边坡岩土体抗剪强度参数反演。将双参数反演模型转变为单参数反演模型,不仅避免了复杂的数学计算和迭代程序的编制,还克服了双参数反演时二元线性或非线性回归引起的较大误差。

1 位移优化反分析法与强度折减法

1.1 位移优化反分析法模型

位移优化反分析法是岩土工程反分析问题中经

常采用的方法,该方法是在正分析程序的基础之上,应用各种优化理论,寻找计算位移值与实测位移值平方和误差最小的解^[8,10,12],其数学表达式为

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U}_i)^2 \quad (1)$$

式中: x 为待求参数, $x = x_1, x_2, \dots, x_m$, m 为待求参数的个数; i 为测点个数; n 为测点总数; U_i 为数值计算位移,是待求参数 x 的函数; \bar{U}_i 为监测位移,本文选取理论强度参数下的数值位移作为监测位移参与计算。

对式(1)的求解一般采用 Newton-Raphson 迭代法。反演实践表明,此方法用来求解抗剪强度参数的效果并不理想,究其原因:一方面是因为抗剪强度参数对位移的敏感度不是很高;另一方面是由于抗剪强度参数为位移的强非线性函数,此函数的获得就已引进了一定范围的误差,加之用此方法求解时还会涉及到一个敏感系数矩阵,即

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial u_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial u_2}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial u_n}{\partial x_1} & \frac{\partial u_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial u_n}{\partial x_m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u 为待反演参数 x 表示的边坡岩土体位移。

矩阵式(2)又涉及隐式函数求偏导的问题,目前解决复杂隐式函数求偏导数的方法主要为复变量求导法^[10,12]。这种方法虽然克服了隐式函数求偏导的难题,但依然涉及复杂的数学运算。因此,对优化模型的简化是必要的,而单参数反演模型最佳。

1.2 强度折减法

Zienkiewics 等^[13]于1975年首次提出了强度折减有限元法,该方法由于在进行稳定性分析时不需要假定边坡滑动面位置,能够动态反映边坡的渐进破坏且物理意义明确而备受欢迎^[13-14]。实际上,强度折减就是通过对边坡岩土体抗剪强度参数进行多次相应的折减,将折减至边坡塑性区完全贯通时的折减系数称为边坡的稳定系数,数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} c_{\text{new}} &= \frac{c}{F} \\ \phi_{\text{new}} &= \arctan\left(\frac{\tan(\phi)}{F}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: c, ϕ 均为边坡岩土体抗剪强度参数; $c_{\text{new}}, \phi_{\text{new}}$ 均为折减后的边坡岩土体抗剪强度参数; F 为折减系数。

2 基于强度折减法的边坡岩土体抗剪强度参数反演

2.1 方法思路

众所周知,初始边坡在其自重应力下处于稳定状态,但一般都会因各种外界因素作用在边坡体上使其应力状态发生改变,进而引起位移的变化。边坡体在进行应力调整的过程中,每一个状态都会对应惟一的一个稳定系数。基于此,本文选取一组初始值进行手动折减,并进行有限元非线性分析、MATLAB 非线性拟合,通过位移反分析优化模型反演折减系数后,由强度折减原理求得边坡岩土体抗剪强度参数。具体实现过程如图 1 所示。

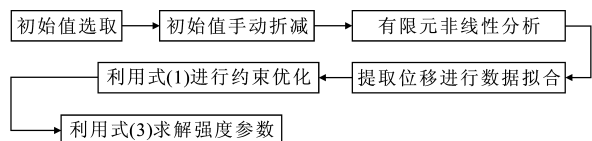


图 1 求解过程示意

Fig. 1 Schematic of Solving Procedure

2.2 初始值选取原则

初始值的合理选取是利用本文方法实现强度参数反演的关键。首先,对几何形状一定的边坡体作出以下假定^[15-16]:①边坡体为均质边坡;②边坡岩土体重量和孔隙水压力的分布确定不变。

基于上述 2 个假定,若边坡体真实抗剪强度参数为 c_0, ϕ_0 ,相应地,其稳定系数为 F_0 ,那么边坡临界滑动面上岩土体的抗剪强度参数 c_1, ϕ_1 分别为

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{c_0}{F_0} \\ \phi_1 &= \arctan\left(\frac{\tan(\phi_0)}{F_0}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)与式(3)看似都为强度折减法的数学表达,但其物理意义完全不同。式(3)表示边坡渐进破坏的动态过程中强度参数的变化,而式(4)则只表示边坡最危险潜在滑动面上的一组强度参数值。另外,本文公式中所涉及的 ϕ_0 均为角度值。

如果对边坡体任意取岩土体抗剪强度参数 c', ϕ', F' 为边坡体在 c', ϕ' 下的稳定系数, F' 可以表示为 $F' = rF_0$, 其中 r 为任意的正实数。要使边坡体在该强度参数下的最危险潜在滑动面与真实强度参数下的最危险潜在滑动面重合,那么根据强度折减法则有

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{c'}{F'} \\ \phi_1 &= \arctan\left(\frac{\tan(\phi')}{F'}\right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

联立式(4)与式(5)则有

$$\frac{c_0}{\tan(\phi_0)} = \frac{c_1}{\tan(\phi_1)} = \frac{c'}{\tan(\phi')} \quad (6)$$

因此,在已知边坡岩土体最危险潜在滑动面位置的条件,岩土体抗剪强度参数初始值的选取只要满足式(6)即可。

2.3 强度参数的确定

通过引入量纲一常数 λ , 可以求得 c_0 与 ϕ_0 的比值^[15-16], 而 λ 可根据最危险潜在滑动面位置确定。通过以上分析可知,在已知边坡最危险潜在滑动面的情况下, c_0 与 $\tan(\phi_0)$ 的比值可惟一确定。对滑动面为圆弧的简单边坡体,其最危险潜在滑动面的确定可以采用文献[15]中基于对数螺旋机构求解边坡临界面位置的方法,也可以采用瑞典条分法或 Bishop 条分法,本文中采用 Bishop 条分法。

研究表明, λ 与滑动面深度的关系如图 2 所示。由图 2 可知,滑动面深度随 λ 的增大而逐渐加深。因此,只要确定最危险潜在滑动面位置,相应于此滑动面的 λ 也就被惟一确定下来,再结合式(7)求得 c_0 与 $\tan(\phi_0)$ 的比值,即

$$\lambda = \frac{c_0}{\gamma h \tan(\phi_0)} \quad (7)$$

式中: γ 为岩土体重量; h 为边坡体高度。

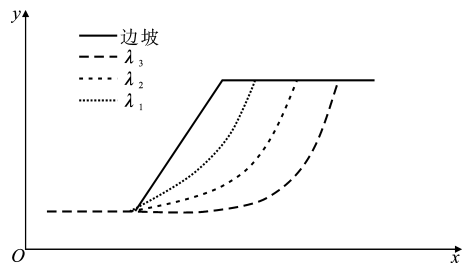


图 2 不同 λ 下临界滑动面位置

Fig. 2 Locations of Critical Slip Surfaces with Different λ

3 算例分析

本文选取文献[10]中的模型来验证此方法的可行性。边坡模型及取点位置见图 3, 弹性模量 $E = 20 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 岩土体重量 $\gamma = 20.58 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

考虑到滑动面搜索计算工作的复杂性, 本文将采用理正岩土软件, 选用 Bishop 条分法确定边坡最危险潜在滑动面位置, 并具体确定了图 2 中 λ 的数值大小, 进而将 c 与 $\tan(\phi)$ 的比值取为 190。笔者将选取 2 组满足式(6)要求的抗剪强度参数作为初始值进行反演, 即 $c = 110 \text{ kPa}$, $\phi = 30^\circ$ 和 $c = 90 \text{ kPa}$, $\phi = 25^\circ$ 。

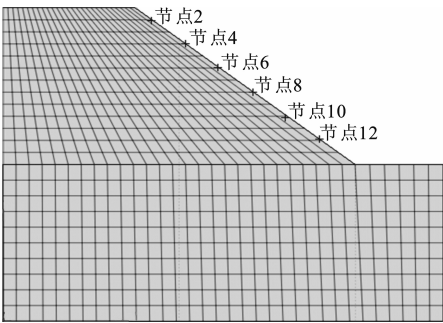


图 3 边坡模型取点位置

Fig. 3 Point Location on Slope Model

首先对 2 组抗剪强度参数进行了手动折减,得到了不同折减系数下的抗剪强度参数,见表 1。

表 1 不同折减系数下的抗剪强度参数

Tab. 1 Shear Strength Parameters Under Different Reduction Factors

组别	折减系数	c/kPa	$\phi/(^{\circ})$
第 1 组	1.6	68.75	20.68
	1.8	61.11	18.38
	2.0	55.00	16.54
	2.2	50.00	15.04
	2.4	45.83	13.79
	2.6	42.31	12.73
	2.8	39.29	11.81
	3.0	36.67	11.03
第 2 组	1.2	75.00	22.27
	1.4	64.29	19.09
	1.6	56.25	16.70
	1.8	50.00	14.85
	2.0	45.00	13.36
	2.2	40.90	12.15
	2.4	37.50	11.13
	2.6	34.62	10.27

3.1 位移-折减系数关系曲线

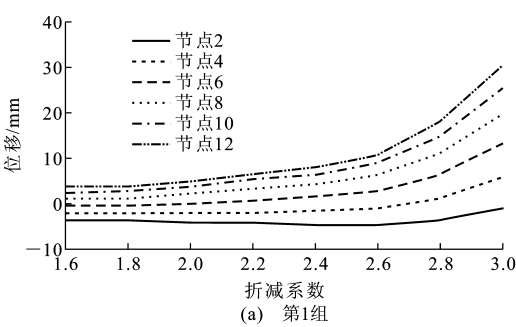
本文采用有限元软件 MIDAS/GTS 对表 1 中不同折减系数下的强度参数进行非线性分析,提取了 2 组初始值在不同折减系数下 6 个节点的位移,得到的位移-折减系数曲线如图 4 所示。

3.2 拟合位移-折减系数曲线

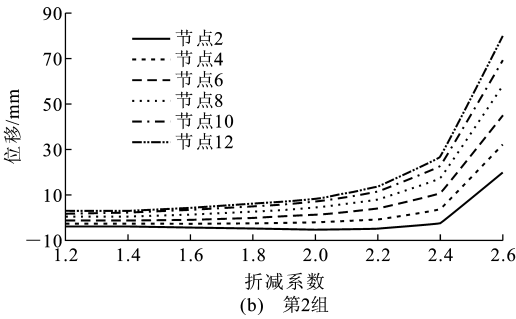
采用 MATLAB 软件对图 4 中各节点进行一元多次函数的拟合,以找到各节点位移与折减系数之间的非线性表达,在拟合过程中应该注意以下几点:

(1)在所选抗剪强度参数初始值满足式(6)的条件下,对其进行手动折减后采用有限元软件分析边坡的变形情况,提取各节点在不同折减系数下的位移值,绘出各节点的位移-折减系数曲线。

(2)岩土体强度参数手动折减时尽量不要使边



(a) 第1组



(b) 第2组

图 4 不同节点的位移-折减系数曲线

Fig. 4 Displacement-reduction Factor Curves of Points

坡体发生失稳破坏,因为失稳后边坡的变形将进入流变状态,会影响拟合结果的准确性。

(3)为了使拟合精度满足要求,尽可能选择高次一元函数,本文中对个别节点采用一元五次函数来拟合,其余的节点均采用一元四次函数来拟合。

(4)在拟合过程中,由于选点位置的原因,某些节点位移在较大折减系数下会发生突变,影响拟合精度。因此,可以避免一些突变比较严重的节点位移参与拟合,本文在拟合时对个别节点突变严重的位移数据进行了剔除。

(5)在条件允许的情况下,为了使拟合更接近真实状态,在确保边坡稳定的前提下进行多次的折减并提取位移。

基于以上几点,本文得到了 2 组初始值下 6 个节点的位移-折减系数拟合曲线和误差曲线,如图 5 所示。从图 5 可以看出,最大拟合误差在 ± 0.1 范围内,说明拟合得到的一次多元函数在一定范围内是满足位移-折减系数关系的。

3.3 抗剪强度参数求解

本文取理论强度参数下的数值模拟位移作为监测位移,采用有限元软件 MIDAS/GTS 分析并提取了该边坡在理论强度参数下的 6 个节点的水平位移,依次为 $-4.864, -1.656, 1.830, 5.103, 7.602, 9.121$ mm。

根据以上拟合得到的各节点位移-折减系数函数表达,在已知监测位移和计算位移的前提下,利用

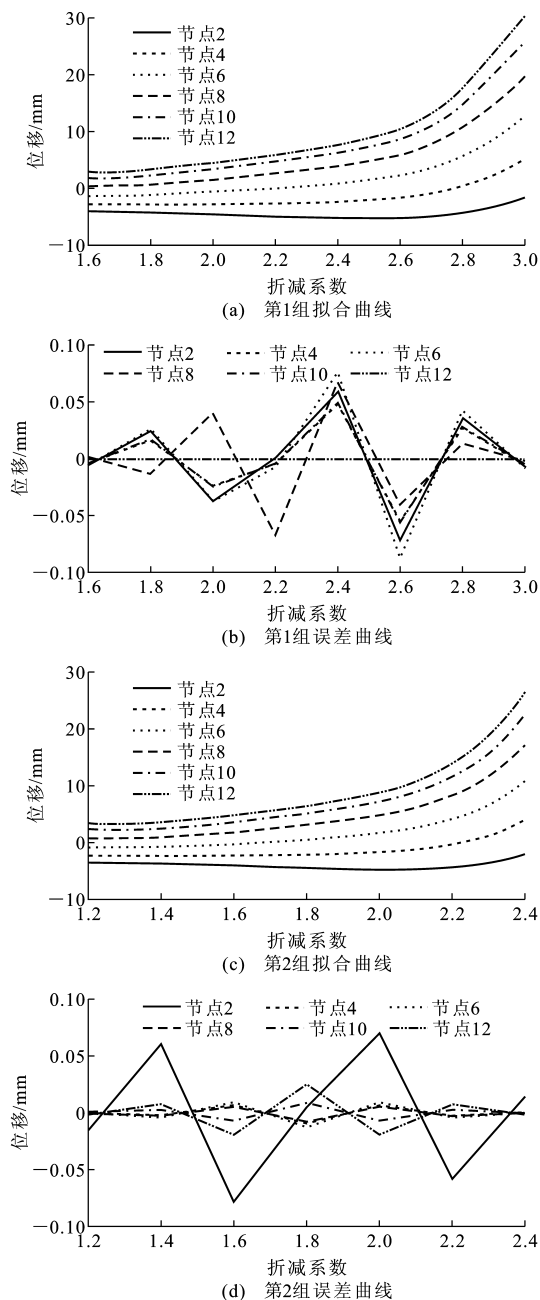


图5 节点拟合曲线及误差曲线

Fig. 5 Fitting Curves and Residual Curves of Points

式(1)优化得到满足某一监测位移下的边坡岩土体的折减系数。笔者采用 MATLAB 优化工具箱中的最小二乘法通过迭代优化得到 2 组初始值下的折减系数分别为 2.491 和 2.031。将折减系数 2.491 和 2.031 分别代入到式(3)中计算得到的抗剪强度参数为: $c=44.16 \text{ kPa}$, $\phi=13.28^\circ$ 和 $c=44.31 \text{ kPa}$, $\phi=13.16^\circ$ 。

以上 2 组初始值反演得到的强度参数值与边坡理论强度参数 $c=44 \text{ kPa}$, $\phi=13^\circ$ 基本相近,说明该方法可以用来反演边坡岩土体抗剪强度参数。另外,通过将反演得到的 2 组参数采用有限元软件分

别进行正演分析,并提取相应节点位移,与理论强度参数 $c=44 \text{ kPa}$, $\phi=13^\circ$ 下的位移作比较也可以验证该方法反演结果的可靠性。

4 结 语

(1)将强度折减法与位移优化反分析法结合起来进行简单边坡岩土体抗剪强度参数的反演,可以将双参数反演模型转变为单参数反演模型,避免了复杂的数学计算和迭代程序的编制,还克服了双参数反演时二元线性或非线性回归引起的较大误差。

(2)基于强度折减法的位移优化反分析法要求边坡体处于稳定状态,防止边坡失稳后变形进入流变阶段影响反演结果的准确性。同时初始抗剪强度参数的选取至关重要,一定要确保初始取值满足式(6)的要求。

(3)该方法适合用在有位移监测数据的边坡中,由于测点位置的不同、测点数量的多少,均对计算精度有一定的影响,因此在计算中合理选取测点位置和测点数量尤为重要。

(4)对滑坡体抗剪强度参数的反演可以先对该边坡体恢复原状,并将优化模型中的监测位移取极限平衡条件下点的位移,有必要对反演结果进行相应的折减。另外,对复杂边坡和滑动面为非圆弧类边坡强度参数的反演,该方法还需作进一步改进。

参考文献:

References:

- [1] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 528-532.
ZHENG Ming-xin. Research of Strength Characteristic of Landslide Slip and Revised Counter Calculation Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 528-532.
- [2] 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, 32.
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, 32.
- [3] 聂文波, 张利洁, 晏鄂川. 滑坡推力计算中抗剪强度标 C , ϕ 的确定[J]. 土工基础, 2002, 16(2): 58-60, 67.
NIE Wen-bo, ZHANG Li-jie, YAN E-chuan. Determination of Indexes of Shearing Strength C and ϕ in Landslide Thrust Calculation[J]. Soil Engineering and

- Foundation, 2002, 16(2): 58-60, 67.
- [4] 邓建辉,魏进兵,闵弘. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法(I):滑带土抗剪强度参数反演分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 896-900.
- DENG Jian-hui, WEI Jin-bing, MIN Hong. 3D Stability Analysis of Landslides Based on Strength Reduction (I): Back Analysis for the Shear Strength of Slip Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 896-900.
- [5] 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 Kun-long, ZHOU Li, et al. A Study of Landslide Shear Strength Parameters by Inversion Analysis Based on Numerical Simulation and Monitoring Displacement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 32-37.
- [6] 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-min, 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.
- [7] 李端有,甘孝清. 滑坡体力学参数反分析研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(6): 44-48.
- LI Duan-you, GAN Xiao-qing. Mechanical Parameter Back Analysis of Landslide[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(6): 44-48.
- [8] 谢良,支学艺,郭钟群,等. 基于位移反分析的岩质边坡稳定性分析[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(5): 89-92.
- XIE Liang, ZHI Xue-yi, GUO Zhong-qun, et al. Study on the Stability of Rock Slope Based on Back Analysis of Displacement Nonferrous[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011, 2(5): 89-92.
- [9] 赵冰,盛国刚,李宁. 位移反分析的有限元线法及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1146-1149.
- ZHAO Bing, SHENG Guo-gang, LI Ning. Back Analysis Method Based on Finite Element Method of Lines and Its Application to Geo-engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1146-1149.
- [10] 谭万鹏,郑颖人. 岩质边坡弹黏塑性计算参数位移反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2988-2993.
- TAN Wan-peng, ZHENG Ying-ren. Study of Displacement Back Analysis of Elasto-viscoplastic Parameters of Rock Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2988-2993.
- [11] 刘明维,郑颖人,张玉芳. 一种基于复变量求导法的岩土体抗剪强度参数反演新方法[J]. 计算力学学报, 2009, 26(5): 676-683.
- LIU Ming-wei, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. A New Inversion Method of Rock-soils Parameters Based on Complex-variable-differentiation Method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(5): 676-683.
- [12] 洪俊,高效伟. 基于复变量求导法的弹塑性边界元参数识别[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2010, 40(5): 1025-1028.
- HONG Jun, GAO Xiao-wei. Elastic-plastic Parameter Identification in BEM Based on Complex Variable Differentiation[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(5): 1025-1028.
- [13] ZIENKIEWICS O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and Non-associated Visco-plasticity and Plasticity in Soil Mechanics[J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [14] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1-7.
- SONG Er-xiang. Finite Element Analysis of Safety Factor for Soil Structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 1-7.
- [15] 孙志彬,杨小礼,张胜,等. Mohr-Coulomb准则下基于滑动面深度的边坡参数反分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1323-1328.
- SUN Zhi-bin, YANG Xiao-li, ZHANG Sheng, et al. Slope Back Analysis Based on Slip Surface Depth Under Mohr-Coulomb Criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1323-1328.
- [16] 岳铭. 一种新的边坡反分析方法研究[J]. 公路工程, 2014, 39(1): 229-231, 238.
- YUE Ming. A New Approach of Slope Parameters Back Analysis[J]. Highway Engineering, 2014, 39(1): 229-231, 238.