



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.026

李子隆, 许模, 郭健, 等. 基于逐个修正法的滑带土参数取值优化[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 170-175. LI Zi long, XU Mo, GUO Jian, et al. Landslide soil parameters optimization based on one by one correction method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 170-175. (in Chinese)

## 基于逐个修正法的滑带土参数取值优化

李子隆<sup>1</sup>, 许模<sup>1</sup>, 郭健<sup>1</sup>, 徐晨梓<sup>2</sup>, 赵勇<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 北京航空航天大学计算机学院, 北京 100191; 3. 四川省水利水电勘测设计研究院, 成都 610072)

**摘要:** 滑带土强度参数是滑坡评价及治理工程设计的关键参数。较为常见的取值方法是剖面反演, 单剖面反演的结果为参数的多种组合, 然而两个以上剖面反演则存在数学上超定问题, 不存在唯一的解。基于最优化理论与方法, 重点讨论了多剖面反演参数方程组出现超定问题时, 将逆问题转化为正问题, 构造目标函数, 利用逐个修正法间接反演参数, 获得最优的参数取值。实现得到综合反映滑带土特点并适用于各个剖面的强度参数的目标。以黄角树滑坡为例, 结合室内试验和反演分析结果, 确定参数取值范围, 用逐个修正法对参数取值进行优化, 得到的优化参数为  $c = 9.76 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 6.81^\circ$ , 验证各剖面均与变形状态相符合。对滑坡防治工程中的滑带土参数取值问题具有一定借鉴意义。但该方法并不适用所有情况, 仅在必须要获得一组综合参数的情况下, 具有一定的合理性。

**关键词:** 滑带土; 强度参数; 逐个修正法; 优化

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)02-0170-06

### Landslide soil parameters optimization based on one by one correction method

LI Zi long<sup>1</sup>, XU Mo<sup>1</sup>, GUO Jian<sup>1</sup>, XU Chen zhi<sup>2</sup>, ZHAO Yong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Institute, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Landslide soil strength parameters are the key parameters in the landslide evaluation and management engineering design. Currently a common value selection method is profile inversion. The result of single profile inversion is multiple combinations of parameters. The inversion of two or more profiles would present a mathematically overdetermined problem with no unique solution. Based on the optimization theory and method, when the equation set of multi profile inversion parameters had an overdetermined problem, this paper transformed the inverse problem into a direct problem, constructed an objective function, indirectly inverted the parameters using the one by one correction method, and obtained the optimal values of the parameters. Thus, it obtained the strength parameters that reflected the characteristics of sliding soil and were suitable for each profile. In this paper, with Huangjiaoshu landslide as an example, we combined the results of indoor experiments and inversion analysis to determine the range of parameters values, and used one by one correction method to optimize parameters values. The optimized parameters were  $c = 9.76 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 6.81^\circ$ , and they tallied with the deformation state when verified with each profile. This paper can provide reference for landslide soil parameters values selection in landslide prevention engineering. But the method does not apply to all cases; it is only feasible when a set of comprehensive parameters are needed.

**Key words:** landslide soil; strength parameters; one by one correction method; optimization

收稿日期: 2016-04-03 修回日期: 2016-05-18 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLG2012K032)

Funds: Geological Disaster Prevention and Environmental Protection Foundation of State Key Laboratory(SKLG2012K032)

作者简介: 李子隆(1992), 男, 陕西宝鸡人, 主要从事水文地质工程地质方面研究。E-mail: 517234265@qq.com

通讯作者: 许模(1963), 男, 重庆涪陵人, 教授, 主要从事水文、工程、环境地质教育研究。E-mail: xm@cdut.edu.cn

在水利工程中常伴随着库岸滑坡发生。在滑坡的稳定性计算和工程设计中,滑带土的强度参数黏聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )取值正确与否至关重要。当前最常用的取值方式大致分为三类:室内试验、工程类比和反演分析。室内试验的结果较直观,但是对样本的真实度要求很高,且样本具有离散型。工程类比法带有较多的主观性,在确定参数时又不得不考虑滑坡的个体因素。反演分析法是稳定性计算的逆过程,根据滑坡的变形状态假定稳定性系数值,通过一个参数去反演另一个参数,这种方法的结果可以在没有试验数据时直接作为稳定性分析,工程设计的参数<sup>[3]</sup>。然而在处理实际问题的时候,通常又会出现以上三种方法的结果都不太切合实际。

滑带土实际是三维形态,各部位参数略有不同,但在稳定性分析和工程设计时,通常是将滑带土的强度参数视为各向同性的,即滑带上的任意一点的强度参数值是相同的,这样的理想值兼顾了滑坡的区域共性和个体特性,是滑带土强度参数影响因素的综合反映。二维反演分析是根据滑坡某一剖面计算得到的值,在多个剖面反演分析时,各剖面的反演结果又不同,甲剖面的反演结果用于乙、丙剖面的稳定性计算,结果又与其所在位置的滑坡变形状态不吻合。这是因为反演参数有不确定因素,反演方程的个数大于未知数个数,这样的方程组从数学角度上看是超定的,没有唯一解,加权平均得出的参数又不够严谨。针对这个问题,显然用反演方法行不通,然而正演参数是存在唯一解的。考虑将反演转化为正演,用数学方法来优化参数取值,可以兼顾多个剖面,排除了超定方程不严谨的因素。根据各剖面位置变形状态,构造目标函数,用逐个修正法优化参数取值,求得目标函数的极小值所对应的参数。用正演的方法来优化参数可以回避剖面的个体特性,同时在计算过程中又兼顾了滑坡整体的共性<sup>[47]</sup>。在多剖面导致参数超定,必须要获得一组综合参数的情况下,该方法具有一定的合理性。本文介绍了用逐个修正法对滑带土强度参数求解的方法,并以黄角树滑坡为例,得到参数即为相对可靠的参数。

## 1 逐个修正法优化参数

反演分析获得滑带土强度参数是工程地质学中常见的解逆问题,当前解逆问题的方法很多,大体上可以分为直接解法和间接解法两大类,直接解法效率高,但对于解决实际问题来说,比较起来,效率不高的间接方法还能提供可靠的结果。

### 1.1 将解逆问题转化为解正问题

解逆问题就是执果所因,在稳定性系数( $K$ )已知的情况下去求黏聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )。每一个剖面都可以得到一个函数给定 $K$ 值即得到一个方程:

$$K = f(c, \varphi)$$

逆问题具有不稳定性,求解通常会遇到三种情况:

(1) 不定。方程的个数少于未知数的个数,此时方程没有唯一解;

(2) 超定。方程的个数多于未知数的个数,此时不存在任何一组解能使所有方程同时满足;

(3) 确定。方程的个数等于未知数的个数,此时方程有唯一解。

大多数滑坡通常会有2个以上的剖面,通过解逆问题来求参数就会出现超定情况,即无解。面对这种情况,可以设定一个目标函数 $E$ ,通过求出 $E$ 的极小值,所对应的黏聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )的值就是最理想的参数值。即将解超定方程转化为最优化问题,解这类问题通常要用到迭代法,先给定一组假想值,根据算出的 $E$ 值逐次修正,使 $E$ 值不断减小,这个过程要不断的解正问题,将无解的逆问题通过多次解正问题来解决,也就是间接方法。

### 1.2 逐个修正法

求一组参数( $\overline{k_1}, \overline{k_2}, \dots, \overline{k_m}$ ),使目标函数 $E(\overline{k_1}, \overline{k_2}, \dots, \overline{k_m}) = \min E(k_1, k_2, \dots, k_m)$ 并满足约束条件

$$m_i \leq k_i \leq M_i \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

其中 $m_i$ 和 $M_i$ 分别是参数的上限与下限。最简单的解法是用单因素优选法将参数逐个加以修正,步骤如下:

第一步,给出参数的初值( $k_1^0, k_2^0, \dots, k_m^0$ ),其余参数固定,对第一个参数用通常的单因素优选法在区间 $[m_1, M_1]$ 中优选出改进值( $k_1^0 + \lambda_1, k_2^0, \dots, k_m^0$ );

第二步,在上述改进值中把其余参数固定,对第二个参数用单因素优选法在区间 $[m_2, M_2]$ 中选出改进值( $k_1^0 + \lambda_1, k_2^0 + \lambda_2, \dots, k_m^0$ ),重复这一过程直到把全部参数都修改一遍,得到改进值( $k_1^0 + \lambda_1, k_2^0 + \lambda_2, \dots, k_m^0 + \lambda_m$ );

第三步,检验收敛准则是否满足,即看修正量( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ )是否已经足够小;

第四步,若修正量( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ )已经足够小,则停止运算,否则以改进值( $k_1^0 + \lambda_1, k_2^0 + \lambda_2, \dots, k_m^0 + \lambda_m$ )替代原来的初值( $k_1^0, k_2^0, \dots, k_m^0$ )返回第一步重做。

具体优选方法:其他参数固定时,对要优选的参

数在取值范围上取值比较, 可令参数组的初值为  $k_1^0 = m_1, k_2^0 = m_2, \dots, k_m^0 = m_m$  若

$$E(m_1, m_2, \dots, m_m) > E(M_1, m_2, \dots, m_m)$$

说明理想的  $k_1$  值更靠近  $M_1$ , 则将  $k_1$  的取值范围向靠近  $M_1$  的方向缩小, 可用 0.618 法(黄金比例), 再次比较, 若

$$E(m_1 + 0.382(M_1 - m_1), m_2, \dots, m_m) > E(M_1, m_2, \dots, m_m)$$

则继续向  $M_1$  方向缩小范围, 反之则向  $m_1$  方向缩小取值范围。直到求出在精度范围内最小的  $E(m_1 + \lambda, m_2, \dots, m_m)$ , 然后继续逐个修正其他参数, 当修正量( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ )已经足够小时, 这一组参数即是相对可靠的参数。

当参数个数较多时, 这一方法的运算量较大, 滑带土强度参数只有黏聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )两个参数, 用逐个修正法来获取参数具有较高的适用性<sup>[8-10]</sup>。

### 1.3 目标函数的确定

在求滑带土参数的问题上, 根据稳定性分析的计算方法: 极限平衡法, 每个剖面都满足方程:

$$K = f(c, \varphi)$$

当存在 2 个及以上的剖面时, 对于每一组  $c, \varphi$  值都计算出其相应的  $K$  值。先假定滑坡的稳定性系数, 通常要根据斜坡的变形状态来确定, 不同类型、不同性质、不同特点的滑坡, 在变形阶段, 一般都会出现一些征兆。蠕滑阶段滑坡体整体变形微弱, 地表出现未连通微裂缝; 滑体中前部出现横向及纵向裂缝, 后缘裂缝急剧扩展, 反映了滑坡体向前推挤并受到阻碍, 即将进入临滑阶段; 临滑阶段局部坡面变形异常, 陡坎处出现小型局部崩滑, 裂缝发展, 逐渐连通; 剧滑阶段滑坡体周围的岩(土)体会出现小型崩塌和松弛现象, 滑坡体前缘坡脚处, 土体上凸, 表明滑坡向前推挤<sup>[11-18]</sup>。根据现场实际情况判断处于临界状态的剖面, 选取稳定性系数  $F$ , 见表 1。

表 1 滑坡不同阶段的安全系数<sup>[19-21]</sup>

Tab. 1 Safety factors of different stages of landslide

发育阶段	变形阶段	安全系数	变形状态
局部变形	蠕滑	1.05~ 1.00	前缘或后缘变形微弱, 地表出现未连通微裂缝
整体变形	临滑	1.00~ 0.90	局部坡面变形异常, 陡坎处出现小型局部崩滑, 裂缝发展, 逐渐连通
	剧滑	< 0.90	坡面出现鼓丘、挤压变形和较长的大裂缝
稳定固结	固结	> 1.05	/

根据各剖面位置的滑坡变形状态, 分别假定稳

定性系数  $K_1^c, K_2^c, \dots, K_n^c$ , 针对每一组强度参数值, 都会有一组计算出的稳定性系数  $K_1^i, K_2^i, \dots, K_n^i$ , 需要时可以为各剖面设计权重  $\omega$ 。为了求得参数的理想值, 就需要一组参数使得各剖面的计算出的稳定性系数和假定的稳定性系数尽可能相等, 因此可构造目标函数为:

$$E = \sum \omega_{ij} (K_j^i - K_j^c)^2 \quad (i \text{ 为参数组的组号, } j \text{ 为剖面的编号})$$

由于计算出的稳定系数与假定的稳定性系数的差值正负号不定, 因此采用计算方差来构造目标函数值, 方差值越小, 则计算结果的离散性越小, 也就越接近强度参数的理想值。

## 2 工程实例

黄石盘水库位于四川省南江县, 黄角树滑坡为一古滑坡, 位于巴河支流- 恩阳河中游河段左岸, 覆盖层主要有第四系残坡积土、崩坡积碎石土、滑坡堆积块碎石土和冲洪积砂卵石等, 基岩主要有侏罗系蓬莱镇组砂泥岩互层, 经过调查分析古滑坡滑带为基覆界面, 且处于稳定状态, 但前缘的堆积物发生了临空方向的变形, 分布高程为 353~ 385 m, 钻孔勘察确定其存在潜在滑带, 堆积物变形体平均厚度约 8 m, 根据裂隙变形的加权统计得出变形主方向为 SW64°, 暴雨条件下多有地表和房屋产生裂隙, 变形明显, 根据不稳定斜坡的地表特征将其分为 4 个区, 从图中可以看出地表裂缝主要分布于古滑坡前缘变形区内, 且主要集中于两个部位(见图 1)。室内试验得出潜在滑带土的残余强度为  $c = 6 \sim 17 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 11.8 \sim 16.3^\circ$ , 见表 2。工程类比法参考亭子口水利工程红层地区和万州晒网坝滑坡, 残余强度  $c = 7 \sim 16 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 12.5 \sim 15.1^\circ$ 。

根据极限平衡法计算稳定性系数得出的结果是滑坡处于稳定状态。考虑到实验样本的离散性和工程类比法的主观性, 再对滑坡进行反演分析获得强度参数。值得注意的是, 两个裂缝集中区都位于抗滑桩的上游侧, 而抗滑桩 NE 侧不稳定堆积体滑移方向上基本没有发现新的裂缝变形迹象, 因此不考虑 d 区的反演。根据表 1 判定黄角树滑坡前缘变形体处于蠕滑中即将进入临滑阶段, 设定 a、c 区稳定性系数  $F = 1.02$ , b 区未发生明显的变形迹象, 根据表 1 判定 b 区的稳定性系数应该大于 1.05, 具体是多少不易确定。根据目标函数可将 a、c 剖面反演的结果各赋予 0.5 的权重, b 剖面由于不易判定, d 剖面有抗滑桩作用, 均赋予 0 的权重。

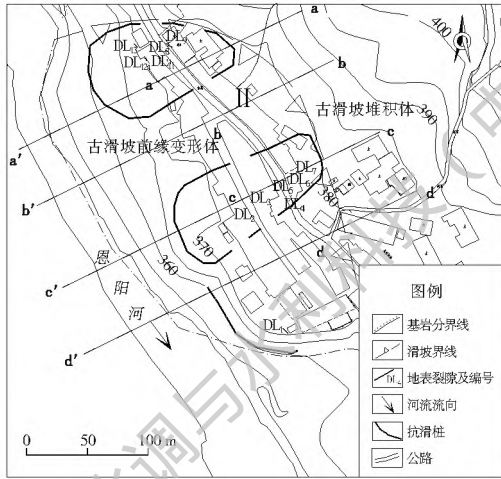


图1 黄角树滑坡变形体裂隙分布

Fig. 1 Fracture distribution in Huangjiaoshu landslide

据室内试验、工程类比以及经验确定滑带土的内聚力残余强度应在  $c = 2 \sim 18$  kPa 之间,反演分析结果 a 区  $\varphi = 4.49 \sim 9.51^\circ$ 、c 区  $\varphi = 5.73 \sim 8.12^\circ$ 。各种方法的参数取值范围见表 2。

表2 各方法的参数取值范围

Tab. 2 Range of parameters values of each method

剖面位置	$c$ / kPa	$\varphi$ (°)
室内试验	6~ 17	11.8~ 16.3
工程类比	7~ 16	12.5~ 15.1
反演分析	2~ 18	4.49~ 9.51
综合	2~ 18	4.49~ 16.3

用极限平衡法计算滑坡稳定性, a、c 剖面见图 2、图 3, 因此可构造目标函数为:

$$E = 0.5 \times (K_a^i - K_a^c)^2 + 0.5 \times (K_c^i - K_c^c)^2$$

( $i$  为参数组的组号)

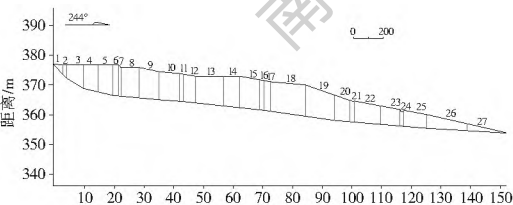


图2 a剖面计算模型

Fig. 2 Calculation model of profile a

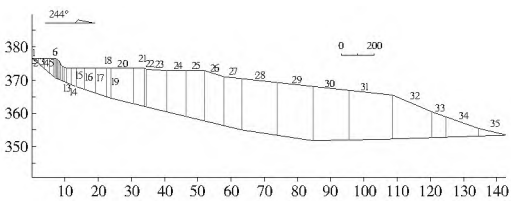


图3 c剖面计算模型

Fig. 3 Calculation model of profile c

c 剖面的稳定性系数大致为 1.02, 处于蠕滑阶段, 黏聚力( $c$ )的取值范围为 2~ 18 kPa, 内摩擦角( $\varphi$ )的取值范围为  $4.49 \sim 16.3^\circ$ , 目标函数为:

$$E = 0.5 \times (K_a^i - 1.02)^2 + 0.5 \times (K_c^i - 1.02)^2$$

给定初值  $c = 2$  kPa,  $\varphi = 4.49^\circ$ , 采用 0.618 法(黄金比例)按照逐个修正法优化参数, 每次修正量和目标函数值的计算结果见表 3。

表3 逐个修正法优化参数结果

Tab. 3 Optimized parameters by one by one correction method

参数组编号	$c$ / kPa	$\varphi$ (°)	$c'$ / kPa	$\varphi'$ (°)	$\lambda_1$ / kPa	$\lambda_2$ (°)	目标函数值 / $10^{-6}$
1	2	4.99	17.95	5.22	15.95	0.23	5 031.113
2	17.95	5.22	16.92	5.42	- 1.03	0.2	3 867.153
3	16.92	5.42	16.02	5.59	- 0.9	0.17	2 975.445
4	16.02	5.59	15.26	5.74	- 0.76	0.15	2 313.175
5	15.26	5.74	14.58	5.87	- 0.68	0.13	1 849.794
6	14.58	5.87	14	5.99	- 0.58	0.12	1 398.788
7	14	5.99	13.46	6.09	- 0.54	0.1	1 077.019
8	13.46	6.09	13.01	6.18	- 0.45	0.09	840.781
9	13.01	6.18	12.6	6.26	- 0.41	0.08	651.065
10	12.6	6.26	12.24	6.33	- 0.36	0.07	504.464
11	12.24	6.33	11.92	6.39	- 0.32	0.06	389.974
12	11.92	6.39	11.65	6.45	- 0.27	0.06	304.778
13	11.65	6.45	11.38	6.5	- 0.27	0.05	229.847
14	11.38	6.5	11.16	6.54	- 0.22	0.04	176.718
15	11.16	6.54	10.98	6.58	- 0.18	0.04	138.570
16	10.98	6.58	10.8	6.61	- 0.18	0.03	104.821
17	10.8	6.61	10.66	6.64	- 0.14	0.03	81.889
18	10.66	6.64	10.53	6.66	- 0.13	0.02	63.353
19	10.53	6.66	10.44	6.68	- 0.09	0.02	51.600
20	10.44	6.68	10.34	6.7	- 0.1	0.02	40.110
21	10.34	6.7	10.25	6.72	- 0.09	0.02	31.029
22	10.25	6.72	10.16	6.74	- 0.09	0.02	23.286
23	10.16	6.74	10.07	6.75	- 0.09	0.01	16.504
24	10.07	6.75	10.03	6.76	- 0.04	0.01	13.721
25	10.03	6.76	9.98	6.77	- 0.05	0.01	10.751
26	9.98	6.77	9.94	6.78	- 0.04	0.01	8.639
27	9.94	6.78	9.89	6.79	- 0.05	0.01	6.336
28	9.89	6.79	9.85	6.8	- 0.04	0.01	4.896
29	9.85	6.8	9.8	6.81	- 0.05	0.01	3.260
30	9.8	6.81	9.76	6.81	- 0.04	0	2.199
31	9.76	6.81	9.76	6.81	0	0	2.199

由表 3 可知, 利用逐个修正法优化参数后, 相对可靠的参数值为  $c = 9.76$  kPa,  $\varphi = 6.81^\circ$ , 用此参数计算各剖面的稳定性系数结果见表 4。a、c 剖面位置发育的裂隙较多, 变形明显, 而 b 剖面为调查到裂

首先规定参数的精度为 0.01, 根据表 1 判断 a、

隙,计算的稳定性系数、稳定性分析评价结果与滑坡各剖面处的变形状态相同。说明经过逐个修正法优化过后的参数用于计算稳定性非常切合实际。

表 4 各剖面稳定性计算结果

Tab. 4 Calculation results of profile stability

剖面	a	b	c
稳定性系数	1.021	1.164	1.018
稳定性评价	欠稳定	稳定	欠稳定

## 4 结论

(1) 参数反演的逆问题可转化为多次解正问题来解决,并用逐个修正法对参数的取值进行优化,可以得到相对可靠的参数值。

(2) 逐个修正法是以单因素优选法为基础,这一方法可以使目标函数  $E$  的值不断减小,虽然可以求得最优化参数,但运算量大,收敛较慢,当参数个数不太多的时候使用较为方便。

(3) 滑带土的强度参数只有黏聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ ),因此构造的目标函数  $E$  仅为二维的,用逐个修正法对参数进行优化,其结果为相对可靠的参数值。

(4) 对黄角树滑坡通过逐个修正法求得其滑带土相对可靠的参数为  $c=9.76$  kPa,  $\varphi=6.81^\circ$ ,各剖面验证结果均与滑坡的变形状态相符,证明逐个修正法可用于优化滑带土的强度参数。

(5) 逐个修正法并不一定适用于所有情况,滑带土的实际形态是三维的,各个位置的参数本身就略有不同,在必须要获得一组综合参数的情况下,使用逐个修正法具有一定的合理性。

### 参考文献(References):

- [1] 沈华章,郭明伟,王水林,等.基于离散元的边坡矢量和稳定分析方法研究[J].岩土力学,2016,37(2):592-600.(SHEN Huazhang, GUO Mingwei, WANG Shuilin, et al. Vector sum method for slope stability analysis based on discrete elements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 592-600. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.033
- [2] 程媛彩,戴自航.多剖面反算滑带土抗剪强度指标的研究[J].岩土力学,2006,27(10):1811-1814.(CHENG Yucan, DAI Zhihang. Back analysis of indexes of shearing strength of slip zone with multi sections[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1811-1814. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2006.10.034
- [3] 薛秀,王金鹏.蓄水及降雨条件下库岸边坡变形机理研究[J].科学技术与工程,2015,15(34):110-115.(XUE Xiu, WANG Jirong. An analysis on the deformation mechanism of slope in the process of reservoir and rainfall[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(34): 110-115. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2015.34.019
- [4] 尹剑辉,赵安平,冉涛,等.永吉高速公路黑潭坪边坡三维稳定性研究[J].地质与勘探,2015,56(6):1187-1192.(YIN Jianhui, ZHAO Anping, RAN Tao, et al. Three Dimensional analysis of slope stability: A case study of the Heitanping slope at the Yongji Highway[J]. Geology and Exploration, 2015, 56(6): 1187-1192. (in Chinese)) DOI: 10.13712/j.cnki.dzykt.2015.06.021
- [5] 强菲,赵法锁,宋飞.黄土完全软化强度的试验研究[J].南水北调与水利科技,2015,13(2):302-305.(QIANG Fei, ZHAO Fesuo, SONG Fei. Experimental study on fully softened strength of loess[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 302-305. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2015.02.024
- [6] 魏玉峰,聂德新,吕生弟,等.大型滑坡滑带土强度参数取值试验研究[J].人民黄河,2011,33(7):127-129.(WEI Yufeng, NIE Dexin, LYU Shengdi, et al. Experimental study on determining the values of shear strength parameters of soil in sliding zone of large scale landslide[J]. Yellow River, 2011, 33(7): 127-129. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2011.07.048
- [7] 汪丁建,唐辉明,李长冬,等.强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J].岩土力学,2016,37(2):439-445.(WANG Dingjian, TANG Huiming, LI Changdong, et al. Stability analysis of colluvial landslide due to heavy rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 439-445. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.017
- [8] 孙纳正.地下水流的数学模型和数值方法[M].北京:地质出版社,1981.242-256.(SUN Nazheng. Mathematical model and numerical method of groundwater flow[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981. 242-256. (in Chinese))
- [9] 许强.滑坡的变形破坏行为与内在机理[J].工程地质学报,2012,20(2):145-151.(XU Qiang. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 145-151. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2012.02.001
- [10] 潘网生,卢玉东.黄陵县印台山边坡稳定性分析[J].南水北调与水利科技,2015,13(5):946-952.(PAN Wangsheng, LU Yudong. Stability analysis of Yintaihan slope in Huangling County[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 946-952. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2015.05.027
- [11] 王宇,李晓,张博,黎明.降雨作用下滑坡渐进破坏动态演化研究[J].水利学报,2013,44(4):416-425.(WANG Yu, LI Xiaoyu, ZHANG Bo, LI Ming. Dynamic progressive failure evolution research on landslide under precipitation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 416-425. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9350.2013.04.007
- [12] 穆鹏,吴玮江,折学森.汶川地震重灾区陇南红土坡滑坡稳定性分析与防治对策研究[J].工程地质学报,2012,(2):204-211.(MU Peng, WU Weijiang, ZHE Xuesen. Stability assessment and treatment for Hongtupo landslide in severe dis-

- aster area of southern Gansu induced by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, (2): 204-211. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2012.02.008
- [13] 蒋发森,王运生,吴俊峰.大渡河章古滑坡演化机制分析及稳定性评价[J].南水北调与水利科技,2013,11(3):138-146. (JIANG Fa sen, WANG Yun sheng, WU Jun feng. Analysis of formation evolution mechanism and stability assessment of Zhanggu Landslide in Daduhe River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(3): 138-146. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2013. 03138.
- [14] 易庆林,胡大儒,代天凡,等.基于小波分析的滑坡变形规律研究[J].南水北调与水利科技,2013,11(5):91-94. (YI Qing lin, HU Da ru, DAI Tian fan, et al. Deformation law for a landslide in the three gorges reservoir area based on wavelet analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 91-94. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2013. 05091
- [15] 陈丽丽,何江达,谢红强,等.考虑暴雨入渗的覆盖层滑坡体渗流特性及稳定性评价[J].南水北调与水利科技,2013,11(3):147-150. (CHEN Li li, HE Jiang da, XIE Hong qiang, et al. Seepage characteristics and stability evaluation of landslide cover considering rain infiltration[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(3): 147-150. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2013. 03147
- [16] 湛威,许模,郭健,等.山区中小型水库滑坡堵江预测及负效应分析[J].南水北调与水利科技,2016,16(1):155-160. (CHEN Wei, XU Mo, GUO Jian, et al. Prediction of landslide damming in medium and small sized reservoir mountainous area and its negative effects[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 16(1): 155-160. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2016.01.026
- [17] 吉峰,钟湖平.雅砻江中游某特大型滑坡基本特征及稳定性初步分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(5):92-95. (JI Feng, ZHONG Hu ping. Characteristics and stability of a large landslide in the Yalong River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 92-95. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2010. 05092
- [18] 陈刚,李世民,蔡敏.高川陈家坡滑坡的形成机制及稳定性评价[J].南水北调与水利科技,2011,9(1):134-138. (CHEN Gang, LI Shi min, CAI Min. Formation mechanism and stability evaluation of Chenjiapo Landslide in Gaochuan County [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 134-138. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2011. 01134
- [19] 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. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2003.04.008
- [20] 陈静瑜.滑坡抗剪强度参数反演方法研究[D].长沙:中南大学,2014.5-6. (CHEN Jing yu. Research on Back Analysis Methods of Slope Shear Strength Parameters[D]. Changsha: Central South University, 2014, 5-6. (in Chinese))
- [21] 代贞伟,李滨,陈云霞,等.三峡大树场镇堆积层滑坡暴雨失稳机理研究[J].水文地质工程地质,2016,43(1):149-156. (DAI Zhen wei, LI Bin, CHEN Yun xia, et al. A study of the failure mechanism of rainfall induced accumulation landslide in the Three Gorges Reservoir region [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 149-156. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.01.23