

降雨型滑坡抗剪强度参数反演研究

徐鹏松¹, 贺可强^{1,*}, 陈小羊², 孙延龙¹, 吴靖江², 孙林娜¹, 李精昆², 逢淑祥¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中建七局交通建设有限公司, 郑州 450003)

摘要:以三峡库区树坪滑坡为例,在综合分析降雨型滑坡位移变化特征与降雨量动力因素关系的基础上,根据灰色关联理论,提出了一种确定边坡抗剪强度参数的综合反演测定计算方法。该方法克服了传统测定方法试验样本数量偏少,以少量样本试验结果代替边坡整体抗剪强度参数取值及试验成本高的局限性,且操作步骤易于实施,计算成本相较于其他测定方法低。通过计算可以获得边坡的抗剪强度参数的取值,此计算结果更能代表边坡整体参数取值,并验证了该方法对降雨型滑坡抗剪强度参数的真实性与可行性。

关键词:降雨型滑坡;抗剪强度;反分析;灰色关联理论

中图分类号:TU42

文献标志码:A

文章编号:1673-4602(2024)05-0052-08

Study on the inversion of shear strength parameters of rainfall-type landslide

XU Pengsong¹, HE Keqiang^{1,*}, CHEN Xiaoyang², SUN Yanlong¹, WU Jingjiang²,
SUN Linna¹, LI Jingkun², PANG Shuxiang¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. China Construction Seventh Traffic Construction Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Taking the Shuping landslide in the Three Gorges Reservoir area as an example, and based on the comprehensive analysis of the relationship between the displacement variation characteristics of rainfall-type landslide and the dynamic factors of rainfall, this study proposes a comprehensive inversion measurement and calculation method for determining the shear strength parameters of the slope according to the grey correlation theory. The proposed method overcomes some limitations of traditional measuring method, including that the test sample quantity is small, the test result of a small sample size replaces the whole slope shear strength parameter selection, and the test cost is high. In addition, the steps of the new method are easy to handle, and the computation cost is low compared with other methods. The value of slope shear strength parameters can be obtained through calculation and the calculation results are more representative of the whole slope parameter selection. The authenticity and feasibility of this method in selecting rainfall-type landslide shear strength parameters is verified.

收稿日期:2023-05-30

基金项目:山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE004)

作者简介:徐鹏松(1998—),男,山东潍坊人。硕士,研究方向为边坡稳定性评价与预测。E-mail:xupengsong163@163.com。

* 通信作者:贺可强(1960—),男,山东蓬莱人。博士,教授,主要从事地质灾害预测、评价与防治方面的研究。

E-mail:keqianghe@163.com。

Key words: rainfall-type landslides; shear strength; back analysis; grey correlation theory

根据中国地质调查局最新发布的《全国地质灾害通报》,在过去的10年时间里,全国地质灾害共发生110 422起,其中滑坡发生72 967起,滑坡灾害数所占比例高达66%。滑坡现象往往最易在地震和降雨影响下发生^[1]。地震对滑坡的影响主要表现为震动作用对边坡岩土体内部结构发生破坏,造成失稳导致滑坡。降雨期间大量雨水渗入边坡,致使边坡岩土体饱和并且增加土石质量,边坡的抗剪强度发生变化,从而不满足抗滑要求导致滑坡。在降雨条件下,滑坡发生失稳破坏的概率更大,因此,研究降雨型滑坡抗剪强度参数及其确定方法,对类似的边坡整体稳定性监测、预警和防治都具有重要的理论意义与应用价值。

在边坡工程中,边坡抗剪强度参数的确定是稳定性计算的关键,通常情况下是通过试验、经验公式估算法、经验类比、反演计算等方法计算求得^[2]。反演计算方法主要包括参数反演的极限平衡法、有限元法、智能方法。当均质边坡的几何形状等条件已知,JIANG等^[3]利用特定的临界滑移面位置只与黏聚力和内摩擦角的比值有关这种关系来反计算,提出了两种具有圆形滑移机制的边坡模型。汤罗圣等^[4]利用工程地质类比法得到滑坡的抗剪强度参数值和区域统计规律,再通过数值模拟进行滑坡的抗剪强度参数的反演分析。李清等^[5]利用极限平衡理论中的传递系数法和可靠度理论中的数据表法相结合,推出了一种既简单又实用的滑坡强度参数反演方法,且与实际勘察值非常相近。对于传统的参数反演方法未能考虑岩土体参数的不确定性对边坡稳定性的影响,赵炼恒等^[6]采用极限分析上限法结合可靠度分析理论的方法,提出了一种简单实用的新反演计算方法。江巍等^[7]以BP神经网络系统确定的稳定系数以及现场测定的剪入口和剪出口位置为基础,通过反复算验以此实现迭代修正反演。反演计算方法通常存在着计算效率低下、求解的唯一性和结果的稳定性等问题,亟需进一步研究。

上述研究表明抗剪强度参数反演研究已得到了广泛应用。但是在不同平衡状态下,该方法在计算滑坡抗剪强度时所选取的参数不一定相同^[8]。而对于降雨型滑坡而言,降雨并不是诱发降雨型滑坡发生失稳破坏的单一因素,它的发生是降雨与坡体结构以及地质环境等因素相互作用耦合的结果^[9],如何根据降雨型滑坡的降雨条件与位移变化规律对其进行抗剪强度参数测定与预测还有待于进一步研究。

1 灰色关联理论基本原理及建模过程

灰色关联理论是一种数学分析方法,由我国邓聚龙教授于1982年提出,其基本原理是对比分析所需研究对象序列曲线几何形状的相似程度来确定其关联程度,即2条序列曲线的相似程度越大,其关联程度越大,反之则越小。

运用灰色关联度理论进行降雨型滑坡抗剪强度参数反演计算时,发现监测位移变形值并不能很好地与配对组合基本特征值随地下水位变化的稳定性系数值进行匹配,即2条曲线差异很大,关联程度小。根据边坡稳定性系数的定义及其与边坡稳定性演化关系与规律提出了等效监测变量,发现其随地下水位的变化趋势与稳定性系数随地下水位的变化曲线在空间上具有相似性,因而可以对两数列进行灰色关联敏感性分析。等效监测变量是边坡任一时刻的监测位移量与该值相对于初始时刻位移量变化量的比值。关联度分析具体过程如下:

1) 确定边坡稳定性系数的评价指标体系矩阵。将 m^2 组配对组合参数 (c_j, φ_k) (其中 c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; $j, k=1, 2, \dots, n$)在地下水位为 H_1, H_2, \dots, H_n 所对应的稳定性系数 $F_{1j}, F_{2j}, \dots, F_{nj}$ 作为灰色关联理论的评价指标,形成如下矩阵:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} F_{11}(1) & \cdots & F_{1m^2}(1) \\ F_{21}(2) & \cdots & F_{2m^2}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{n1}(n) & \cdots & F_{nm^2}(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 确定评价参考数列 X_0 。将地下水位 H_1, H_2, \dots, H_n 对应的位移等效监测变量 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 作为评价参考序列,即 X_0 为

$$X_0 = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T \quad (2)$$

3) 因上述各评价指标的数量级不统一,采用式(3)对各指标进行处理:

$$F'_i(k) = \frac{F_i(k)}{F_i(1)}, (k=0, 1, \dots, n; i=0, 1, \dots, m^2) \quad (3)$$

按上述计算进行无量纲化处理,评价指标序列变为如下矩阵:

$$X' = \begin{bmatrix} \lambda'_1 & F'_{11}(1) & \cdots & F'_{1m^2}(1) \\ \lambda'_2 & F'_{21}(2) & \cdots & F'_{2m^2}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda'_n & F'_{n1}(n) & \cdots & F'_{nm^2}(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

4) 按式(5)计算各评价指标序列与参照序列差的绝对值:

$$\Delta_{0i}(k) = |\lambda'_0(k) - F'_i(k)|, (k=0, 1, \dots, n; i=0, 1, \dots, m^2) \quad (5)$$

5) 按式(6)和式(7)计算序列差值中的最大值 Δ_{\max} 和最小值 Δ_{\min} :

$$\Delta_{\max} = \max_{i=1}^{m^2} \max_{k=1}^n \{\Delta_{0i}(k)\} \quad (6)$$

$$\Delta_{\min} = \min_{i=1}^{m^2} \min_{k=1}^n \{\Delta_{0i}(k)\} \quad (7)$$

6) 按式(8)对各评价序列与参考列的关联系数进行计算:

$$r(F_0(k), F_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (8)$$

式中: ζ 为分辨系数,通常在(0,1)之间取值,其值越小,表示关联系数之间的差异也就越明显,通常 ζ 取 0.5。

7) 各评价指标与参考指标关联度 γ_{0i} 的确定:

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(\lambda_0(k), F_i(k)) \quad (9)$$

确定的不同组合参数所对应稳定性系数与位移等效监测变量的关联度进行对比与排序,由灰色关联度原理可知,最大关联度所对应的边坡整体稳定性系数与该边坡位移等效监测变量的切合度是最优的,因此确定该稳定性系数对应的组合参数即为边坡的黏聚力与内摩擦角取值。

2 抗剪强度参数反演研究分析

本文使用降雨作用下堆积层滑坡的模型试验^[10]进行该方法的准确性验证,试验中所使用试验土样为黏性土,其抗剪强度参数黏聚力为 27 kPa,内摩擦角为 20° ,渗透系数为 28.8 mm/h。降雨条件是以 30 mm/h 的强度降雨 2 h、停 1 h,再以相同强度降雨 2 h。可知降雨 15 min 后下部形成裂缝产生断裂并碎屑滑落,在 1.5 h 后再次形成裂缝并形成潜在滑面,但最终并没有形成滑坡,如图 1 所示。

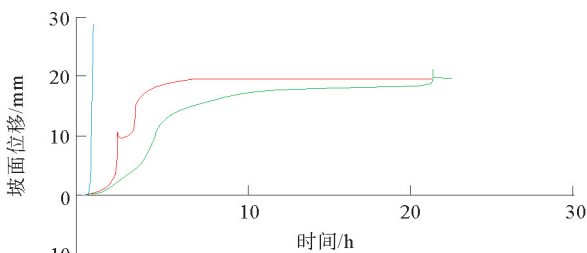


图1 黏性土坡面变形监测结果^[10]

— 下部; — 中部; — 上部

根据边坡坡体基本物质组成与结构及规程规范^[11],综合确定黏性土的黏聚力、内摩擦角分别为 12~50 kPa、 $17^\circ \sim 24^\circ$ 。把该取值范围划分为黏聚力 20、30、40 kPa,内摩擦角 17° 、 20° 、 24° 的基本特征值并进行全面配对组合得到 9 组。选取上部坡面为研究对象,以 5 h 降雨条件验证本方法的准确性,其计算结果如表 1,图 2 所示。

表 1 监测及计算数据

监测时间/h	监测位移变形值/mm	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	地下水位高度/m	位移等效监测变量
1	0.5	30	0.0384	1.25
2	1.0	30	0.0768	1.11
3	2.0	0	0.0768	1.05
4	4.0	30	0.1152	1.02
5	10.0	30	0.1536	1.01

确定边坡稳定性系数的评价指标体系矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} 1.265 & \cdots & 1.423 \\ 1.225 & \cdots & 1.385 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1.127 & \cdots & 1.312 \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据评价参考数列:

$$X_0 = (1.25, 1.11, \cdots, 1.01)^T \quad (11)$$

进行各指标量纲、数量级统一,评价指标序列变为如下矩阵:

$$X' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0.89 & 0.97 & \cdots & 0.89 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.81 & 0.97 & \cdots & 0.92 \end{bmatrix} \quad (12)$$

按式(5)~(9)依次进行计算,求得 9 组配对组合基本特征值与位移等效监测变量 λ_i 的关联度 γ_{0i} : $\gamma_{01} = 0.967, \gamma_{02} = 0.911, \gamma_{03} = 0.891, \gamma_{04} = 0.938, \gamma_{05} = 0.976, \gamma_{06} = 0.907, \gamma_{07} = 0.820, \gamma_{08} = 0.824, \gamma_{09} = 0.856$ 。依据灰色关联度原理,可知最大关联度 γ_{05} 所对应的组合参数(30,20)为边坡黏聚力与内摩擦角的取值,并与该黏性土的抗剪强度参数组合(27,20)进行比较,本方法与实际数值较为接近,可证明本方法的准确性。

使用滑坡抗剪强度参数反演优化算法^[12]对上述案例进行计算分析,首先使用稳定性计算方法得出稳定性系数 K ,其次选择抗剪强度参数变化区间 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ (μ 为均值, σ 为方差)进行敏感性分析,最终通过式(13)得出抗剪强度参数所对应的比较函数 R_i :

$$R_i = \eta_c \frac{|c_i - \mu_c|}{\sigma_c} + \eta_\varphi \frac{|\varphi_i - \mu_\varphi|}{\sigma_\varphi} \quad (13)$$

式中: η_c, η_φ 分别为黏聚力、内摩擦角对滑坡稳定性影响程度; μ_c, μ_φ 分别为黏聚力、内摩擦角变化区间的均值; σ_c, σ_φ 分别为黏聚力、内摩擦角变化区间的方差。

根据黏性土的黏聚力、内摩擦角的取值范围 12~50 kPa, 17~24°, 确定其参数变化区间为 (27.84, 11.38)、(20.50, 6.48), 由式(13)计算所得如表 2 所示。

其中 R_i 最小值为 0.249, 所对应的最优抗剪强度参数组合为 (25, 20)。这种方法需要先确定滑坡的稳定性系数, 再进行参数反演计算, 且该计算过程过于繁琐、计算量过大; 而本文所提出的计算方法略去了这一过程, 采用灰色关联度进行敏感性分析确定最优组合。从计算结果来看两种计算结果都很接近真实数值, 但本文计算方法更能体现出计算成本相对较低、适用性较强等特点。

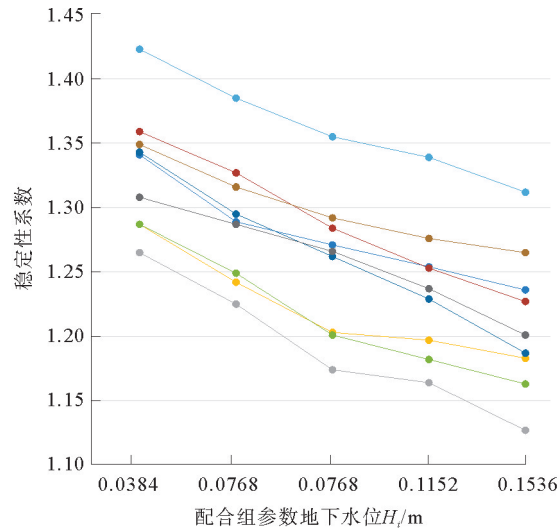


图 2 配对组合基本特征值随地下水位变化的稳定性系数值

- 第1组 (20, 17); —●— 第2组 (20, 20); —●— 第3组 (20, 24);
- 第4组 (30, 17); —●— 第5组 (30, 20); —●— 第6组 (30, 24);
- 第7组 (40, 17); —●— 第8组 (40, 20); —●— 第9组 (40, 24)

表 2 反演参数和比较函数值

(c_j, φ_k)	R_i	(c_j, φ_k)	R_i
(12, 17)	2.646	(30, 21)	0.650
(16, 18)	1.862	(35, 22)	1.515
(20, 19)	1.078	(40, 23)	2.380
(25, 20)	0.249	(45, 24)	3.244

3 实例分析

以三峡库区树坪滑坡为例进行抗剪强度参数反演测定方法的计算,该滑体南北纵长约 800 m,东西宽约 700 m,面积约 56 万 m^2 ,厚约 30~70 m,平均厚约 50 m,总体积约 2750 万 m^3 。后缘以姜家湾至上树坪后山高程(390 m)带为界,前缘直抵长江。该滑坡为三叠系中统巴东组泥岩、粉砂岩夹泥灰岩组成的逆层向斜坡,滑带土体主要由粉质黏土组成(图 3)。

根据边坡坡体基本物质组成与结构及《边坡工程勘察规范》(YS 5230—1996)等规程规范^[11],综合确定边坡粉质黏土的黏聚力、内摩擦角分别为 12~19.8 kPa、9~16°。在该取值范围内,将岩土体的黏聚力、内摩擦角平均划分成 3 个基本特征值,分别为 14.6、17.2、19.8 kPa,11.3、13.6、16.0°,并进行配对组合得到 9 组 (c_j, φ_k) 。根据规程规范^[11]确定滑坡分布范围与尺寸等特征参数,并在边坡主滑区、后缘张拉裂缝处、剪切出口等关键位置设置位移监测点,如图 4 所示。



图 3 树坪滑坡全貌^[13]

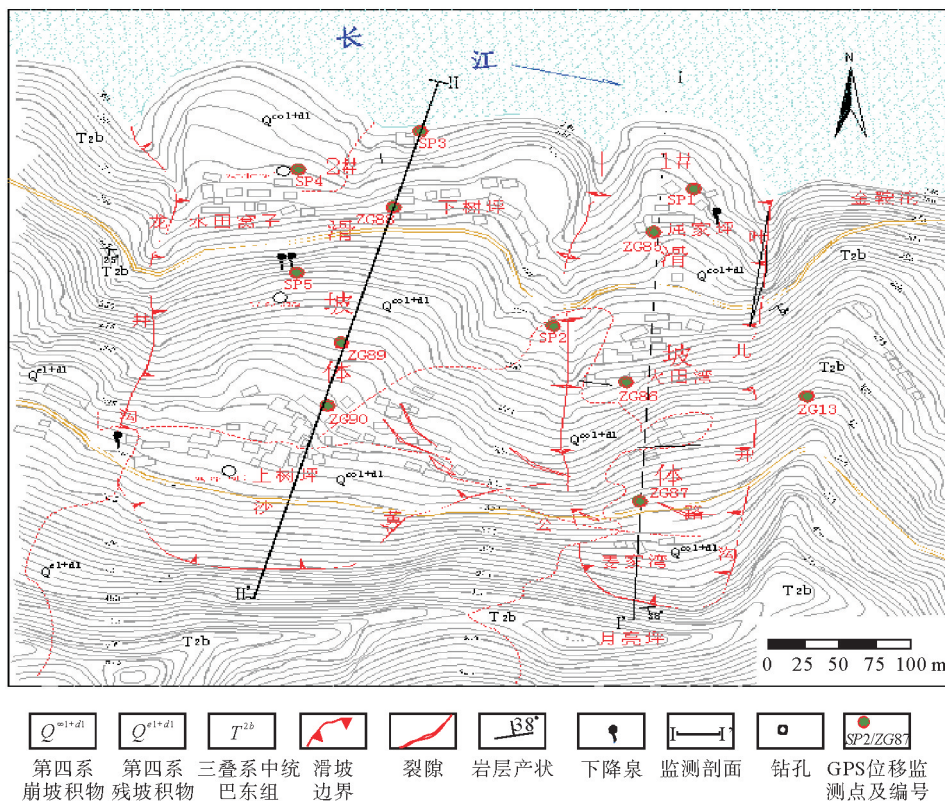


图 4 树坪滑坡监测点分布

1) 边坡位移监测设备的布置。在树坪滑坡体主滑区等间距设置 6 个变形监测点,呈两纵三横布置,大致能监控整个滑坡体的变形;在监测滑坡以外稳定区域设置基准点。在上述基准点和监测点位置进行钻孔布设 GPS 位移监测仪,监测不同降雨量的边坡水平位移 Δx_i 和竖直位移 Δy_i ,根据式(14)确定其累计位移变形值 S_i 。

$$S_i = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2} \quad (14)$$

位移监测点的布置如图 4 所示,根据布置的监测点数据,得到表 3 所示的位移监测数据,起始时刻位移变形值 $S_0 = 0.112$ m。

2) 降雨监测设备的布置。降雨强度的监测采用翻斗式雨量计在边坡监测区域覆盖式监测,取各雨量计的均值作为 t_i 时刻的降雨强度 Q_i 。根据布置的雨量计对边坡周围降雨强度 Q_i 进行监测,得到降雨强度数据如表 3 所示。

表 3 监测及计算数据

监测时间/h	监测位移变形值/m	降雨强度/(mm · h ⁻¹)	地下水位高度/mm	位移等效监测变量
1	0.125	19.8	26.4	9.615
2	0.238	35.7	47.6	1.889
3	0.347	48.9	65.2	1.476
4	0.219	27.5	36.7	2.046
5	0.386	53.6	71.4	1.408
6	0.412	64.2	85.6	1.373
7	0.537	85.6	114.1	1.243
8	0.615	91.4	121.9	1.223

运用双环法^[14]测定出边坡岩土体渗透系数 k 为 21.6 mm/h,并计算出边坡岩土体的孔隙率 n 为 0.75,根据 t_i 降雨时刻的降雨强度 Q_i 与渗透系数 k 之间的大小关系、降雨历时 Δt_i 计算边坡内部地下水位 H_i ,如式(15)所示,得到地下水位高度 H_i 如表 3 所示。

$$H_i = \frac{\min(Q_i, k) \times \Delta t_i}{n} \quad (15)$$

式中: n 为坡体孔隙率; $\min(Q_i, k)$ 为降雨强度 Q_i 与渗透系数 k 之间的最小值。

根据树坪滑坡的地质资料,结合地形地貌资料,采用地质调查、勘探与物探等手段综合确定堆积层边坡下伏基岩整体滑移面倾角、坡体垂直埋深,并将坡体进行条分成 n 个垂直条块,由于各个条块之间相隔较近,所以可假定每个计算条块的滑动面为直线,即整个滑动面在剖面上为折线,如图 5 所示。

运用剩余下滑推力计算方法进行稳定性系数计算时,对边坡整体稳定性做了三大基本假定^[15]。根据图 6 可以得到土条切向、法向的平衡方程:

$$V_i = (W_{1i} + W'_{2i}) \sin \alpha_i + D_i \cos(\alpha_i - \beta_i) - T_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - T_i \quad (16)$$

$$N_i = (W_{1i} + W'_{2i}) \cos \alpha_i - D_i \sin(\alpha_i - \beta_i) + T_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (17)$$

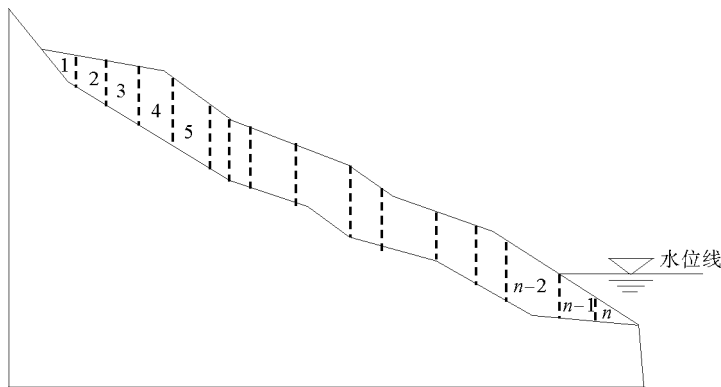


图 5 树坪滑坡条分

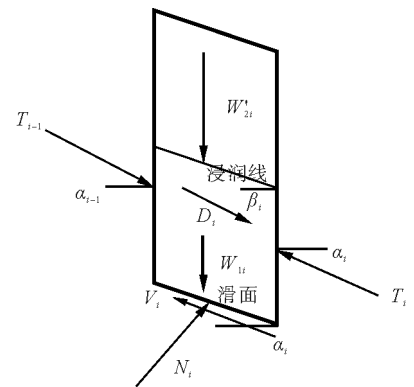


图 6 土条切向、法向方向受力分析

由摩尔-库伦强度准则可得

$$V_i = \frac{C_i l_i}{F} + N_i \frac{\tan \varphi_i}{F} \quad (18)$$

对式(16)~(18)进行整理可得

$$T_i = [(W_{1i} + W'_{2i}) \sin \alpha_i + D_i \cos(\alpha_i - \beta_i)] - \{c_i l_i + [(W_{1i} + W'_{2i}) \cos \alpha_i - D_i \sin(\alpha_i - \beta_i)] \tan \varphi_i\} / F + T_{i-1} \varphi_i \quad (19)$$

$$\varphi_i = \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - \frac{\tan \varphi_i}{F} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (20)$$

式中： T_i 为第 i 条块的剩余下滑推力； W_{1i} 、 W'_{2i} 分别为第 i 条块浸润线下部、上部的重力； D_i 为第 i 条块的渗透力； α_i 为第 i 条块的滑面倾角； β_i 为第 i 条块的水面倾角； l_i 为第 i 条块的滑面长度； c_i 为第 i 条块滑面的有效黏聚力， φ_i 为第 i 条块滑动面的内摩擦角， F 为稳定性系数。

根据配对组合后 9 组的基本特征值参数组合及测定出的 t_i 降雨时刻对应的地下水位 H_i ，运用式 (19) 和式 (20) 确定 t_i 时刻边坡的稳定性系数 F_{ij} ，计算时重度 γ_w 取 19.5 kN/m^3 ，计算结果如图 7 所示。

起始时刻位移变形值 $S_0 = 0.112 \text{ m}$ ，由式 (21) 进行计算，结果如表 3 所示，并对两数列进行灰色关联敏感性分析。

$$\lambda_i = \frac{S_i}{S_i - S_0} \quad (21)$$

根据所监测的边坡位移量，计算出位移等效监测变量，确定边坡稳定性系数的评价指标体系矩阵式 (22)，然后根据评价参考数列式 (23)，进行各指标量纲、数量级统一，评价指标序列变为如下矩阵式 (24)：

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1.335 & \cdots & 1.567 \\ 1.116 & \cdots & 1.525 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1.113 & \cdots & 1.452 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{X}_0 = (9.615, 1.889, \dots, 1.223)^T \quad (23)$$

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0.196 & 0.836 & \cdots & 0.973 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.127 & 0.834 & \cdots & 0.927 \end{bmatrix} \quad (24)$$

按式 (5) — (9) 依次进行计算，求得 9 组关联度： $\gamma_{01} = 0.812$ ， $\gamma_{02} = 0.758$ ， $\gamma_{03} = 0.726$ ， $\gamma_{04} = 0.783$ ， $\gamma_{05} = 0.895$ ， $\gamma_{06} = 0.738$ ， $\gamma_{07} = 0.712$ ， $\gamma_{08} = 0.684$ ， $\gamma_{09} = 0.736$ 。最大关联度 γ_{05} 所对应组合参数 (17.2, 13.6) 即为边坡的抗剪强度参数。

4 结论

1) 对三峡库区树坪滑坡的抗剪强度参数反演计算，计算结果表明该方法准确，更能反映出边坡整体抗剪强度参数取值，且操作步骤易于实施，计算成本相较于其他测定方法低。

2) 使用降雨作用下堆积层滑坡的模型试验进行本文方法验证，得出本方法与实际数值较为接近，故可证明本方法的准确性；与滑坡抗剪强度参数反演优化算法进行对比分析，可知本方法计算成本较低，计算过程简单。

3) 运用排列组合方法对边坡抗剪强度参数进行配对组合，根据下滑推力法求得不同地下水位下所对应的稳定性系数，并运用降雨条件下位移变形求解得到不同地下水位时对应的位移等效监测变量，进而运用灰色关联理论对上述两数列进行敏感性分析。该分析过程切实可行，与实际情况较为贴近。

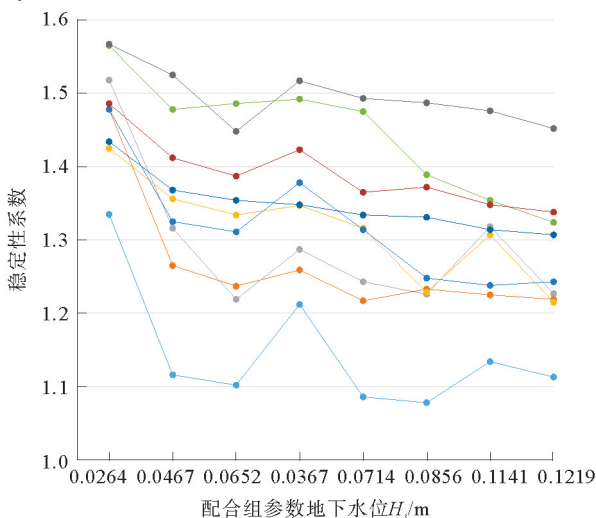


图 7 配对组合基本特征值随地下水位变化的稳定性系数值
 — 第1组 (14.6, 11.3)；— 第2组 (14.6, 13.6)；— 第3组 (14.6, 16.0)；
 — 第4组 (17.2, 11.3)；— 第5组 (17.2, 13.6)；— 第6组 (17.2, 16.0)；
 — 第7组 (19.8, 11.3)；— 第8组 (19.8, 13.6)；— 第9组 (19.8, 16.0)

参考文献(References):

- [1] 李永松,赵温亮,刘宗林. 水库坝肩滑坡滑带土抗剪强度参数确定及稳定性评价[J]. 珠江水运,2022(17):33-35.
LI Yongsong,ZHAO Wenliang,LIU Zonglin. Parameter determination of shear strength and stability evaluation of landslide zone soil on reservoir abutment[J]. Zhujiang Water Transportation,2022(17):33-35.
- [2] 郭兵兵,孙光中,孙强,等. 边坡岩土参数优化确定方法研究[J]. 煤炭工程,2011(2):100-103.
GUO Bingbing,SUN Guangzhong,SUN Qiang,et al. Study on method to optimize rock and soil parameter of slop[J]. Coal Engineering,2011(2):100-103.
- [3] JIANG J C,YAMAGAMI T. Charts for estimating strength parameters from slips in homogeneous slopes-ScienceDirect[J]. Computers and Geotechnics,2006,33(6/7):294-304.
- [4] 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 Luosheng,YIN Kunlong,ZHOU Li,et al. A study of landslide shear strength parameters by inversion analysis based on numerical simulation and monitoring displacement[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2012,39(4):32-37.
- [5] 李清,赵志刚,左仕. 基于极限平衡理论的滑坡抗剪强度参数反演数据表法研究[J]. 路基工程,2015(2):22-27.
LI Qing,ZHAO Zhigang,ZUO Shi. Back analysis on shear strength parameters of landslide by datasheet method based on limit equilibrium theory[J]. Roadbed Engineering,2015(2):22-27.
- [6] 赵炼恒,左仕,陈静瑜,等. 考虑参数互相关性的滑坡抗剪强度参数可靠度反演分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(6):121-128.
ZHAO Lianheng,ZUO Shi,CHEN Jingyu,et al. Reliability back analysis of shear strength parameters of landslide considering mutual-correlation between parameters[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2016,44(6):121-128.
- [7] 江巍,欧阳晔,闫金洲,等. 边坡岩土体抗剪强度的逆向迭代修正反演方法[J]. 岩土力学,2022,43(8):2287-2295.
JIANG Wei,OUYANG Ye,YAN Jinzhou,et al. Inversion iterative correction method for estimating shear strength of rock and soil mass in slope engineering[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(8):2287-2295.
- [8] 汪宇. 浅析反演法计算滑带土抗剪强度时反演参数的取值方法[J]. 科学技术创新,2021(26):145-146.
WANG Yu. Analysis of inversion parameter value method when calculating shear strength of slip zone soil by inversion method[J]. Science and Technology Innovation,2021(26):145-146.
- [9] 陈骏峰. 降雨型堆积层滑坡抗剪强度参数反演分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2008(4):249-252.
CHEN Junfeng. Back analysis of the shear strength parameters of rainfall-induced colluvial landslides[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Urban Science Edition),2008(4):249-252.
- [10] 石振明,赵思奕,苏越. 降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究[J]. 水文地质工程地质,2016,43(4):135-140.
SHI Zhenming,ZHAO Siyi,SU Yue. An experimental study of the deposit slope failure caused by rainfall[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2016,43(4):135-140.
- [11] YS 5230—1996,边坡工程勘察规范[S].
YS 5230—1996.Code for investigation of engineering of slope[S].
- [12] 柴波,殷坤龙,简文星. 滑坡计算参数反演分析的优化算法[J]. 武汉理工大学学报,2007(11):98-102.
CHAI Bo,YIN Kunlong,JIAN Wenxing. Optimization algorithm of back analysis of landslide's calculation parameters[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2007(11):98-102.
- [13] 郭璐. 水库型滑坡复合渗流动力灾变规律与物理预测模型研究[D]. 青岛理工大学,2020.
GUO Lu. Study on dynamic catastrophe law of compound seepage and physical prediction model of reservoir landslide [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology,2020.
- [14] 莫斌,陈晓燕,雷廷武,等. 不同方法测定紫色土坡耕地入渗性能试验研究[J]. 水土保持学报,2015,29(3):1-5.
MO Bin,CHEN Xiaoyan,LEI Tingwu,et al. Experimental study on infiltration capacity on slope cropland of purple soil with different determining methods[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(3):1-5.
- [15] 贺可强. 复杂堆积层滑坡的稳定性评价方法分析与展望[J]. 青岛理工大学学报,2016,37(1):1-9.
HE Keqiang. Analysis and prospects of the stability evaluation methods of the complicated colluvial and slides[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2016,37(1):1-9.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)