

基于正交设计的堆积体稳定性影响因素的敏感性分析

王冰¹, 王常明¹, 张索煜¹, 卢长伟²

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林省水利水电勘测设计研究院, 吉林 长春 130021)

摘要:采用正交试验设计和极限平衡方法,以九子崩滑堆积体为实例进行稳定性分析。并对正交试验设计结果进行了极差和方差分析;极差和方差分析结果均显示,堆积体稳定性影响因素敏感性最大的因素为粘聚力 c ,其次为内摩擦角 φ ,重度 γ 对稳定性影响的敏感性较小。找出了影响边坡稳定性的主导因素,为滑坡防治工程提供了参考依据。

关键词:堆积体;滑坡;稳定性分析;正交设计;敏感性分析

中图分类号:P642.2 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2017)12-0075-04

Sensitivity Analysis on Influence Factors of Accumulation Stability Based on Orthogonal Design/WANG Bing¹, WANG Chang-ming¹, ZHANG Suo-yu¹, LU Chang-wei² (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Jilin Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Changchun Jilin 130021, China)

Abstract: Taking Jiuzi toppling accumulation as the example, the stability analysis is carried out by using orthogonal experiment design and limit equilibrium method, and the range analysis and the variance analysis are made on the orthogonal experimental design results, all the analysis results show that the most sensitive influence factor of accumulation stability is cohesion c , followed by the friction angle φ , the accumulation weight γ has little effect on the stability. The dominant factors affecting slope stability are found out, which provides a reference for the landslide prevention and control project.

Key words: accumulation body; landslide; stability analysis; orthogonal design; sensitivity analysis

0 引言

伴随着水利水电事业的发展,由于水库修建、蓄水等行为引发的滑坡等地质灾害频发。2003年7月13日三峡库区秭归县,由于水库蓄水引发千将坪滑坡,造成多人死亡,经济损失达几千万元^[1]。2004年9月5日四川宣汉县由于受前期暴雨影响,天台乡义和村渠江支流前河岸坡上的南樊公路出现开裂,此后逐步发展扩大为天台特大滑坡。此外,由于滑体前部滑入前河,形成的堰塞湖导致上游2个乡镇被淹^[2]。岸坡滑坡具有规模大、危害性大的特点,因此其稳定性受到了大家的高度关注。影响岸坡稳定性的因素有很多,如岩土体的重度、内摩擦角、粘聚力及地下水活动等。但是由于测量技术、实验设备、场地条件等方面的限制,因素的具体数值存在一定误差。在边坡稳定性分析中传统的定值法不能反映参数不确定性的影响,而基于边坡稳定性影响因素敏感性的分析方法与传统定值方法相比则可

以得出参数不确定性对稳定性的影响,反映土性参数的真实情况,更加科学合理。

很多专家学者对敏感性分析进行了较深入的研究,目前单因素分析法依旧被广泛采用。杨继红等考虑了水库蓄水因素对边坡稳定性的影响^[3];张杰等考虑了黄土分层性对边坡稳定性的影响^[4]。Rahardjo、唐栋等考虑前期降雨对边坡稳定性的影响^[5-6]。也有学者采用双因素法进行敏感性分析,方景成等通过分析库水和降雨两个因素对岸坡稳定性进行分析^[7];唐栋、Alonso等考虑前期降雨过程与不同岩土体对边坡稳定性的影响^[8-9]。以上边坡的稳定性分析考虑了单因素或者两个因素并进行定量分析,未考虑全部影响因素,存在一定局限性。

本文基于正交试验设计和极限平衡方法对自然状态下九子崩滑堆积体力学因素的敏感性进行分析,得出不同因素的敏感性大小,继而得到影响边坡稳定性的主导因素,在边坡的防治过程中采取针对

收稿日期:2017-09-13; 修回日期:2017-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目“结合水对软粘土力学行为的控制作用与机理”(编号:41572257)

作者简介:王冰,男,汉族,1991年生,硕士研究生在读,岩土工程专业,研究方向为地质灾害防治,吉林省长春市西民主大街938号,1414951734@qq.com。

性措施,从而达到经济安全的目的。

1 工程概况

九子崩塌堆积体位于万家口子水电站上游 400 ~ 1200 m 左岸,分布高程为 1350 ~ 1770 m。该崩塌堆积体为主要岩性为石炭系中统黄龙群(C_2hn)中厚层状白云岩(岩层产状为 $SE170^\circ \angle 30^\circ$)和摆佐组(C_1b)灰岩(岩层产状 $SW196^\circ \angle 28^\circ \sim 30^\circ$)发生大规模崩塌和错落形成的堆积层。两者产状总体接近,略呈角度不整合。崩塌及下滑过程中相互碰撞挤压使部分岩体破碎,后经压密固结并被地表水及地下水携带的钙质重新胶结。据已有调查资料,堆积体地面坡度平均约为 30° ,地势比较平缓,对堆积体稳定性影响较小。整个崩塌堆积体体积约为 853 万 m^3 。堆积体后缘陡崖连续分布,前缘为堆积阶地,堆积有厚 20 ~ 35 m 钙质胶结卵石层,并且经常形成陡坎。堆积体平面图见图 1,堆积体主要地质剖面见图 2。



图 1 堆积体平面图

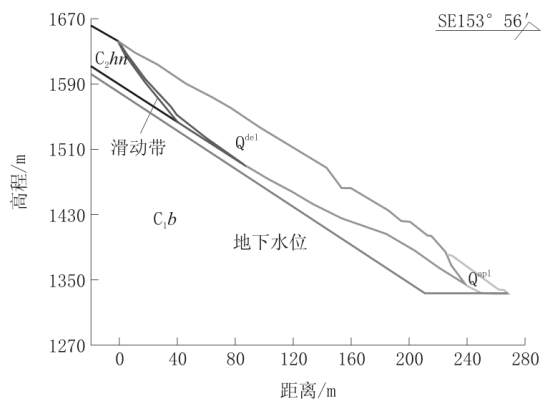


图 2 堆积体主要地质剖面图

崩塌堆积体与基岩界面之间的滑带土经现场勘察,综合室内土工试验确定为碎石土。组成堆积体的坡体地层划分为 4 层:堆积体、碎石土、微胶结卵

砾石和基岩。该坡体上附堆积体岩性比较复杂,以第四系堆积体为主,中间含有相互胶结的灰岩、白云岩及胶结卵砾石。地下水位全部位于崩塌堆积界面以下,且该堆积体透水率较大,有良好的地下水排泄条件,故前期稳定性计算未考虑地下水、降雨对堆积体稳定性的影响。力学参数由现场实际调查及室内试验得出,详见表 1。

表 1 岩土体力学参数

岩土位置	岩土名称	天然重度 $\gamma / (kN \cdot m^{-3})$	抗剪指标	
			内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	粘聚力 c / kPa
堆积体	崩塌堆积体	25.8	28.8	200
	卵砾石	20.0	26.5	30
	白云岩/灰岩	27.4	43.8	1250
滑带	碎石土	19.8	25.0	20
堆积阶地	坡脚前缘卵砾石	20.0	26.5	30
基岩	白云岩/灰岩	27.4	43.8	1250

2 正交试验方案设计

正交试验设计是用于多因素设计的一种方法,以概率论、数理统计和实践经验为基础,利用标准化正交表安排试验方案,对结果进行计算分析,最终迅速找到优化方案,具有很高的效率^[12]。正交试验设计和分析方法是目前最常用的工艺优化试验设计和分析方法,是部分因子设计的主要方法^[13]。

根据边坡堆积体本身性质,正交试验方案可划分为重度 γ 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ 三因素三水平范畴。参照正交表选取原则,在三个因素相互独立,且不考虑因素间相互作用的基本前提下,选择 $L_9(3^4)$ 正交表,其中第四列空列可以作为误差项进行分析。因素水平对照表见表 2,详细的试验安排见表 3,并根据表 3 确定的方案采用极限平衡方法中的摩根斯坦-普利斯法计算实验方案中的安全系数 F_s 。各实验方案安全系数结果见表 3。

表 2 因素水平对照

水平	$\gamma / (kN \cdot m^{-3})$	$\varphi / (^\circ)$	c / kPa	空白列
1	25.8	28.8	200	
2	20.0	26.5	30	
3	27.4	43.8	1250	

3 正交试验结果计算分析

3.1 极差计算

正交设计方案计算结果一般用极差分析法和

表 3 正交试验方案设计及模拟结果

实验 编号	影响因素				安全系 数 F_s
	γ	φ	c	空白列	
1	1	1	1	1	1.153
2	1	2	2	2	0.968
3	1	3	3	3	1.071
4	2	1	2	3	1.153
5	2	2	3	1	1.063
6	2	3	1	2	1.430
7	3	1	3	2	1.210
8	3	2	1	3	1.320
9	3	3	2	1	1.061

方差分析法两种方法。其中,极差分析法(亦称直观分析法)简单明了,只需进行少量的计算,便可得到各因素对试验指标的影响。极差计算公式:

$$m_i = K_i/n; n=3 \quad (1)$$

$$R = m_{imax} - m_{imin} \quad (2)$$

式中: K_i ——同一水平所对应的试验指标之和,在这里, K_1 为水平 1 的 3 次指标值之和, K_2 为水平 2 的 3 次指标值之和, K_3 为水平 3 的 3 次指标值之和。

例如影响因素 γ 在水平 1 时的 K 值: $K_1 = 1.520 + 0.968 + 1.071 = 3.559$ 。

各因素列的极差 R 表示该因素在其取值范围内试验指标变化的幅度。根据极差 R 的大小,进行因素的主次排队。 R 越大,表示该因素的水平变化对试验的影响越大,在本试验中这个因素就越重要,敏感性越大。 K_i 和 m_i 以及 R 值的计算结果见表 4。

表 4 剖面 1-1 极差分析结果

实验号	γ	φ	c
K_1	3.559	3.883	4.270
K_2	3.646	3.351	3.182
K_3	3.519	3.562	3.195
m_1	1.186	1.294	1.432
m_2	1.215	1.117	1.061
m_3	1.197	1.187	1.065
R	0.029	0.177	0.362

由表 4 可以看出,极差结果大小为粘聚力 $c >$ 内摩擦角 $\varphi >$ 重度 γ ,所以边坡稳定性影响因素的敏感性大小为粘聚力 $c >$ 内摩擦角 $\varphi >$ 重度 γ 。

3.2 方差计算

方差分析是通过对试验数据进行分析,检验在 F 假设条件下各组的均值是否相等,由此判断因素对试验指标的结果是否产生显著性影响(显著性水平 α 取 0.01、0.05、0.1)。当 $F \geq F_{0.99}$ 时,为特别显著; $F_{0.95} \leq F < F_{0.99}$ 时,为有显著性影响; $F_{0.9} \leq F <$

$F_{0.95}$ 时,为有影响但不是特别显著; $F < F_{0.9}$ 时,为 $F_{0.9}$ 无显著性影响^[14]。

方差分析弥补了极差试验无法精确反映误差项的大小及其带来的影响。此外还弥补了极差分析不能够对各因素进行显著性分析的缺点^[15]。数据分析所需公式如下^[12,16]。

$$SS_T = \sum_{j=1}^c SS_j + SS_e \quad (3)$$

$$df_i = \sum_{j=1}^c df_j + df_e \quad (4)$$

$$MS_j = SS_j/df_j \quad (5)$$

$$MS_e = SS_e/df_e \quad (6)$$

$$F_j = \frac{MS_j}{MS_e} \sim F(df_j, df_e) \quad (7)$$

$$df_j = m - 1 \quad (8)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^c x_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2 \quad (9)$$

$$SS_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^m K_{ij}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2 \quad (j = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

式中: SS_T ——总偏差平方和; SS_j ——因素偏差平方和; SS_e ——误差偏差平方和; df_i ——总自由度; df_j ——因素自由度; df_e ——误差自由度; MS_j ——因素方差; MS_e ——误差方差; F_j ——因素 F 值,用以判断试验因素的显著性程度; m ——每个因素的水平数; x_i ——模拟试验对应的所有某一试验指标; K_{ij} ——某一因素的某一水平所对应的试验指标之和; n ——试验总次数; r ——水平重复次数。

依上述公式进行计算,得出因素的显著性,方差分析结果见表 5。

表 5 剖面 1-1 方差分析结果

因素	偏差平方和	自由度	平均方差	F 值	F_j 临界值	显著性
γ	0.001	2	0.001	0.755	$F_{0.01} = 99$	无影响
c	0.230	2	0.115	134.321	$F_{0.05} = 19$	高度显著
φ	0.048	2	0.024	27.975	$F_{0.1} = 9$	显著

选取显著性水平 $\alpha = 0.01, 0.05, 0.1$ 。查 F 分布表可知 $F_{0.99}(2, 2) = 99; F_{0.95}(2, 2) = 19; F_{0.90}(2, 2) = 9$ 。若 $F_j \geq 99$,表示因素 j 对指标的影响高度显著;若 $19 \leq F_j < 99$ 表示因素 j 对指标的影响显著;若 $9 \leq F_j < 19$,表示因素 j 对指标有一定影响;若 $F_j < 9$

表示因素 j 对指标无显著影响。

在方差结果分析中可以看出粘聚力 c 的 F_j 值大于 99, 对指标安全系数的影响高度显著; 内摩擦角 φ 的 F_j 值位于 19 和 99 之间, 对指标安全系数影响显著; 重度 γ 的 F_j 值小于 9, 对指标安全系数无影响。

4 结论

采用正交试验设计和极限平衡法, 以九子堆积体实例: 其中极差分析结果为 $R_c = 0.362 > R_\varphi = 0.177 > R_\gamma$, 表明影响该滑坡的 3 种因素, 敏感性最大为粘聚力 c , 其次为内摩擦角 φ , 敏感性最小的因素是重度 γ 。方差分析结果为: $F_c > F_{0.99}$ 表明因素粘聚力 c 对稳定性系数指标的影响高度显著; $F_{0.1} \leq F_\varphi \leq F_{0.05}$ 表明因素内摩擦角 φ 对稳定性系数指标的影响度显著; $F_\gamma \leq F_{0.1}$ 表明因素重度 γ 对指稳定性系数指标无影响。综合极差、方差分析结果, 两者所确定的堆积体稳定性影响因素的敏感性顺序一致。

本文只对堆积体自然状态下的力学影响因素进行敏感性分析, 水电站投入使用后, 随着水位周期性变化, 产生加卸载效应, 堆积体孔隙结构、岩土体力学性质、地貌等随之改变。因此水位周期性变化对堆积体稳定性的影响将是接下来工作的重点。基于正交试验分析设计和极限平衡方法对边坡稳定性影响因素的敏感性进行分析, 与传统定值方法相比体现了参数不确定性对稳定性的影响, 反映了岩土体参数的真实情况, 得出了影响稳定性计算结果的主要参数、次要参数。是对边坡进行多因素敏感分析的一种有效的试验设计方法。

参考文献:

- [1] 王思敬, 黄鼎成. 中国工程地质世纪成就[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [2] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454.
- [3] 杨继红, 王俊梅, 董金玉, 等. 水库蓄水过程中堆积体边坡瞬态稳定性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 464 - 470.
- [4] 张杰, 韩同春, 豆红强, 等. 基于降雨入渗分层假定的黄土边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4355 - 4361.
- [5] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(5): 483 - 491.
- [6] 唐栋, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3239 - 3247.
- [7] 方景成, 邓华锋, 肖瑶, 等. 库水和降雨联合作用下岸坡稳定影响因素敏感性分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(3): 146 - 152.
- [8] 唐栋, 祁小辉, 蒋水华, 等. 不同前期降雨与土-水特征曲线对边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 149 - 155.
- [9] ALONSO E, GENS A, LLORET A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[C]// Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils. Paris, France: 1995.
- [10] 覃伟, 徐智彬, 李东林. 渗透性与降雨强度对堆积层滑坡稳定性的影响[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 743 - 750.
- [11] 雷迪. 库岸边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 人民长江, 2014, 45(S2): 95 - 97.
- [12] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [13] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交实验设计和方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, (9): 52 - 55.
- [14] 刘涛, 王俊杰. 基于正交设计的土坡稳定影响因素敏感性分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(3): 88 - 90.
- [15] 葛云峰, 唐辉明, 熊承仁, 等. 滑动面力学参数对滑坡稳定性影响研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3873 - 3884.
- [16] 侯化国, 王玉民. 正交试验法[M]. 吉林长春: 吉林人民出版社, 1985.