

# 交互效应对滑坡稳定性的影响

段颖星, 张天芳\*

江西师范大学数学与统计学院, 江西 南昌

收稿日期: 2022年11月2日; 录用日期: 2022年11月22日; 发布日期: 2022年12月6日

## 摘要

滑坡稳定性受多种因素的影响, 如地震加速度、内摩擦角、粘聚力、库水位变化、岩体密度等。这些因素并不是相互独立的, 往往存在着相关性, 这些相关性对滑坡稳定性会产生显著影响。本文对滑坡试验中的相关数据进行分析, 同时考虑因素的主效应和交互效应, 从而得出地震加速度与粘聚力、内摩擦角的交互效应对试验结果有显著影响, 并根据所得模型求出最优解。在此基础上得到的各因素的最佳水平组合比以往的文献稳定性更优。因此在滑坡处理的过程中, 我们应特别注意地震与降雨的交互效应对滑坡稳定性的不良影响。

## 关键词

滑坡稳定性, 多元回归模型, 敏感性分析, 交互效应

# The Effects of Interaction on Landslide Stability

Yingxing Duan, Tianfang Zhang\*

College of Mathematics and Statistics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi

Received: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Dec. 6<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The stability of landslide is affected by many factors, such as earthquake acceleration, internal friction angle, cohesion, reservoir water level change, rock mass density and so on. These factors are not independent, there are often correlations, and the correlations will have a significant impact on the stability of landslides. In this paper, considering the main effect and interaction effect of factors, we obtain the interaction effect of seismic acceleration, cohesion and internal friction angle has a significant influence on the test results. The optimal solution is obtained according to

\*通讯作者。

the model. The optimal level combination of the factors obtained on this basis is more stable than the previous literature. Therefore, in the process of landslide treatment, we should pay special attention to the interaction between earthquake and rainfall on the landslide stability.

## Keywords

Landslide Stability, Multiple Regression Model, Sensitivity Analysis, Interaction Effects

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

滑坡指斜坡上的土地或者岩体,受河流冲刷、雨水浸泡、地下水活动、地震及人工切坡等因素影响,在重力作用下,沿着一定的软弱面或者软弱带,整体地或者分散地顺坡向下滑动的自然现象。一旦滑坡稳定性不强,就会导致坡体自身失去平衡,如果到了更加严重的状态,便会发生山体滑坡。山体滑坡会造成人员、财产以及周边环境的损害。因此对滑坡进行加固是必要的,滑坡稳定性影响因素的敏感性分析试验为实施加固措施提供了导向作用。滑坡的稳定性受多种内外因素的综合影响,例如滑坡的形态、地形地貌、岩体的岩性、地震力的作用、地质构造、人类工程活动等。这些因素中部分是确定性的,但大多具有随机性、模糊性、可变性等不确定性特点。并且这些不确定性因素对滑坡稳定性的影响程度各不相同。面对众多不确定因素,在勘察和设计中,运用敏感性分析来对滑坡稳定性有较大影响的因素进行检查和分析,确定影响滑坡稳定性的较敏感或最敏感的因素,从而使得滑坡防治和监测更有针对性,治理设计更安全、可靠和经济[1]。

目前用于分析滑坡稳定性敏感因素的方法众多,依据所考虑的影响因素个数可分为单因素分析法和多因素分析法。单因素分析法多采用绘制指标与影响因素变化的关系曲线来评价敏感性[2]。用于滑坡敏感性分析的多因素分析法有正交设计法、基于影响因素分布模型分析法等。对于运用各种试验方法得到的数据,目前大多都是采用极差分析法和方差分析法进行分析。这些分析方法只考虑了主效应对试验结果的影响,忽略了交互效应。而交互效应在实际中同样起着重要作用[3]。在此我们不仅考虑主效应,还考虑交互效应,得到各因素的敏感性对稳定性的影响,并分析出使得滑坡稳定性达到最优的水平组合。

## 2. 数据

在影响滑坡稳定性的重要因素中,往往只有少数几个起重要作用。根据效应稀疏原则[4]并结合文献[5],我们只对密度增量( $X_1$ ,  $\text{kN/m}^3$ )、粘聚力增量( $X_2$ ,  $\text{kPa}$ )、内摩擦角增量( $X_3$ ,  $^\circ$ )、库水位变化( $X_4$ ,  $\text{m}$ )、地震加速度( $X_5$ ,  $\text{g}$ )这五个影响滑坡稳定性因素进行敏感性分析。它们的试验范围分别为 $[-5, 5]$ ,  $[-15, 15]$ ,  $[-8, 8]$ ,  $[1815, 1819]$ ,  $[0, 0.214]$ , 滑坡稳定性衡量指标用安全系数  $K$  表示。为方便计算与分析,我们将文献[5]中的数据列在表 1。

## 3. 含交互效应模型与最优解

在多因素试验中,因子间可能存在交互效应。在有交互效应的情况下,如果依然只考虑主效应,那么对数据进行分析后所得的结果与实际会有偏离。由于参考文献[5]对试验数据所采用的分析方法只考虑了主效应对滑坡稳定性的影响,默认各因素对试验结果的影响是相对独立的,而事实上,各因素之间存

在交互效应。为弥补参考文献[5]中分析方法的不足, 本文借助含交互效应模型来分析滑坡稳定性, 考虑因素之间的主效应及交互作用对试验结果的影响, 并利用最终所构造的回归方程计算出最优解。由于在实际中三阶及以上效应所起作用不大, 我们在此只考虑二阶交互效应, 具体步骤如下。

**Table 1.** Test data  
**表 1.** 试验数据

试验号	密度增量	粘聚力增量	内摩擦角增量	库水位变化	地震加速度	安全系数
1	-5	-15	-8	1815	0	0.51
2	-5	0	0	1817	0.107	0.757
3	-5	15	8	1819	0.214	0.597
4	0	-15	0	1817	0.214	0.475
5	0	0	8	1819	0	1.171
6	0	15	-8	1815	0.107	0.779
7	5	-15	-8	1819	0.107	0.394
8	5	0	0	1815	0.214	0.612
9	5	15	8	1817	0	1.245
10	-5	-15	8	1817	0.107	0.711
11	-5	0	-8	1819	0.214	0.520
12	-5	15	0	1815	0	1.220
13	0	-15	8	1815	0.214	0.586
14	0	0	-8	1817	0	0.712
15	0	15	0	1819	0.107	0.827
16	5	-15	0	1819	0	0.676
17	5	0	8	1815	0.107	0.866
18	5	15	-8	1817	0.214	0.602

步骤 1 (模型拟合): 假设含二阶交互效应的模型为:

$$K = \beta_0 + \sum_{i=1}^5 \beta_i X_i + \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 \beta_{ji} X_j X_i + \varepsilon,$$

其中  $\beta_i, \beta_{ji}$  为参数,  $\varepsilon$  为随机误差, 其均值为 0, 方差为  $\sigma^2$ 。运用 Minitab 软件对该组数据进行逐步回归分析, 输出结果列在表 2, 因此回归方程为

$$K = 36.1 + 0.01377X_2 + 0.02711X_3 - 0.01936X_4 - 1.668X_5 - 0.0441X_2X_5 - 0.1126X_3X_5, \quad (1)$$

给定检验水平  $\alpha = 0.05$ , 从表 3 知该回归模型对应的  $p$  值小于 0.05, 说明该模型显著。在回归模型中, 我们发现除主效应  $X_2, X_3, X_4, X_5$  外,  $X_5$  与  $X_2, X_3$  的交互效应也是显著的。而且它们对最优结果也会产生影响。

步骤 2 (最优解): 在试验范围内根据步骤 1 所得的回归方程(1)确定最优解, 即使得安全系数  $K$  最大。首先将(1)式分别对  $X_2, X_3, X_4, X_5$  求偏导, 得

**Table 2.** Results of second-order regression models  
**表 2.** 二阶回归模型结果

项	系数	系数标准误	T 值	p 值	方差膨胀因子
常量	36.1	14.4	2.51	0.028826	
$X_2$	0.01377	0.00169	8.15	0.000005	3.38
$X_3$	0.02711	0.00317	8.56	0.000003	3.38
$X_4$	-0.01936	0.00790	-2.45	0.032281	1.32
$X_5$	-1.668	0.129	-12.95	0.000000	1.00
$X_2X_5$	-0.0441	0.0121	-3.64	0.003855	3.32
$X_3X_5$	-0.1126	0.0227	-4.96	0.000430	3.32

**Table 3.** Variance analysis of second-order regression models  
**表 3.** 二阶回归模型方差分析

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	p 值
回归	6	1.04773	0.174622	76.64	0.000000025
误差	11	0.02506	0.002278		
合计	17	1.07280			

$$K_{X_2} = 0.01377 - 0.0441X_5, \quad K_{X_3} = 0.02711 - 0.1126X_5, \quad K_{X_4} = -0.01936, \\ K_{X_5} = -1.668 - 0.0441X_2 - 0.1126X_3,$$

令上面五个式子等于零构成一个方程组, 但是发现此时方程组无解, 因此(1)式没有极值点, 所以该函数的最大值只能在边界处取得。由表 4 知, 第 12 组水平组合对应的安全系数 K 最大, 此时便为最优解。由于在这一组合下没有做实体试验, 所以我们建议试验者在此追加一次试验, 以验证我们所拟合的最佳结果。

**Table 4.** The corresponding K value after the boundary point is fitted  
**表 4.** 边界点拟合后对应的 K 值

序号	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	K
1	-15	-8	1815	0	0.53817
2	15	8	1819	0.214	0.616
3	-15	-8	1815	0.214	0.516
4	-15	-8	1819	0	0.46073
5	-15	8	1815	0	0.97193
6	15	-8	1815	0	0.95127
7	-15	-8	1819	0.214	0.4381102
8	-15	-8	1815	0.214	0.5155502
9	-15	8	1819	0	0.89449
10	15	-8	1815	0	0.95127
11	15	-8	1815	0.214	0.6455282

Continued

12	15	8	1819	0	1.30759
13	-15	8	1819	0.214	0.4863278
14	15	8	1819	0.214	0.6163058
15	15	-8	1815	0.214	0.6455282
16	15	-8	1819	0	0.87383

#### 4. 结果比较

参考文献[5]中对数据分析运用的极差分析法和方差分析法只考虑了主效应对试验结果的影响, 得出的敏感性大小排序为: 地震加速度 > 粘聚力 > 内摩擦角 > 库水位变化 > 岩体密度, 并得出地震加速度、粘聚力、内摩擦角对结果影响是高度显著的。而我们考虑含交互效应的模型, 根据表 2 中  $p$  值的大小, 在该滑坡稳定性影响因素敏感性分析试验中, 不只是地震加速度, 内摩擦角, 粘聚力这三种因素对结果有影响, 库水位变化对滑坡稳定性的影响也是高度显著的。根据表 2 中的  $p$  值, 这五个因素敏感性大小排序也与文献[5]不同, 为: 地震加速度 > 内摩擦角 > 粘聚力 > 库水位变化 > 岩体密度。同时我们也得到地震加速度分别与粘聚力和内摩擦角的二阶交互效应对试验结果有显著影响。由于岩石密度对结果影响微小, 因此我们在计算最优解时, 只需要考虑四个显著因素, 并且得到在该试验范围内当粘聚力增量 = 15 kPa, 内摩擦角增量 =  $8^\circ$ , 库水位变化 = 1819 m, 地震加速度 = 0 g 时, 安全系数  $K$  最大。因此相对而言我们的结论更加科学有效。为保证安全性, 人们应监测该滑坡区域的地震对滑坡的影响, 同时还应设置排水措施, 以免降雨渗入岩体, 引起粘聚力和内摩擦角的变化, 从而对滑坡的稳定性不利。

#### 5. 小结

本文考虑含交互效应的模型对滑坡稳定性影响因素敏感性分析的试验数据进行分析, 得出了主效应以及因素之间的二阶交互效应对试验结果的影响, 弥补了参考文献[5]中的不足。与传统的极差分析法和方差分析法相比, 我们利用最终得到的回归方程, 计算出在该试验范围内的最优解。因此本文对数据的分析方法更加全面, 所得结果更加合理。本文对试验数据的分析方法不局限于滑坡稳定性试验, 对于其他多因素试验数据进行分析时, 也同样适用, 并可以推广到高阶交互效应显著的情况。

#### 基金项目

本项目由国家自然科学基金(基金号: 12061070)支持。

#### 参考文献

- [1] 倪恒, 刘佑荣, 荣治国. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 989-992.
- [2] 柴波, 殷坤龙, 汪洋, 李远耀. 基于影响因素分布模型的滑坡稳定性敏感性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2624-2628.
- [3] Mukerjee, R. and Wu, C.F.J. (2006) A Modern Theory of Factorial Designs. Springer, New York.
- [4] 方开泰, 刘民千, 周永道. 试验设计与建模[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [5] 毛新生, 张玉灯, 郑涛. 基于正交设计的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2008, 29(2): 76-79.