

# Sensitivity Analysis of Impact Factors of Landslide Based on Orthogonal Experiment

—A Case Study of Huilai Valley Landslide in Lingshi County, Shanxi Province

Bin Cheng<sup>1,2</sup>, Yaming Tang<sup>2</sup>, Dingguo Zheng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Northwest University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Email: 895239749@qq.com

Received: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Jan. 17<sup>th</sup>, 2018; published: Jan. 24<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

The influencing factors of the stability of Huilai valley landslide include the weight of rock-soil body  $\gamma$ , cohesion  $c$  and internal friction angle  $\varphi$ , the height of slope  $h$  and the acceleration produced by blasting. In order to determine the significant degree of landslide stability affected by various factors, the sensitivity analysis method is proposed to quantitatively characterize it. The results show that the internal friction angle of rock-soil body and the acceleration produced by blasting have especially significant influence on the landslide stability; The cohesion has some significant influence on the landslide stability; The landslide height and the weight of the rock-soil body make no difference to landslide stability. In the later landslide treatment, it should be focused on the impact of the change of internal friction angle and the wallop of blasting on the stability of landslide primarily.

## Keywords

Landslide, Influence Factor, Orthogonal Experimental Design Method, Sensitivity Analysis

# 基于正交试验法的滑坡影响因子敏感性分析

—以山西灵石县回来峪滑坡为例

程 斌<sup>1,2</sup>, 唐亚明<sup>2</sup>, 郑定国<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西北大学地质学系, 陕西 西安

<sup>2</sup>中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安

<sup>3</sup>长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安

Email: 895239749@qq.com

收稿日期: 2018年1月3日; 录用日期: 2018年1月17日; 发布日期: 2018年1月24日

## 摘要

回来峪滑坡稳定性影响因子包括岩土体重度 $\gamma$ 、粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ , 边坡高度 $h$ 和爆破产生的加速度 $a$ 等, 为了确定各因子影响滑坡稳定性的显著程度, 拟采用正交试验法对其敏感性定量分析。结果表明: 岩土体内摩擦角和爆破产生的加速度对滑坡稳定性影响特别显著; 粘聚力对滑坡稳定性影响显著; 滑坡高度和岩土体重度对滑坡稳定性影响甚微, 几乎没影响。在今后滑坡治理中, 应当有所侧重, 首要考虑岩土体内摩擦角的变化和爆破产生的冲击对滑坡稳定性的影响。

## 关键词

滑坡, 影响因子, 正交试验设计法, 敏感性分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

滑坡发生是多种因素共同作用的结果[1] [2] [3] [4], 各因素间的致灾机理错综复杂, 要想定量地分析出各因素对滑坡发生的贡献度是相当困难的。前人针对已经发生的滑坡进行研究时, 更多的关注于滑坡的诱发因素而忽略了其他相关因素, 而滑坡的发生又是一个多因素共同作用下累进的过程, 基于此, 如果求得各相关因子对滑坡稳定的相对影响程度, 则可以针对性的预防以及治理滑坡。敏感性分析法作为一种衡量不同因素对目标值的影响程度的方法, 已被诸多学者[5] [6] [7]应用到滑坡灾害防治与预测中, 并取得了很好的效果。

目前, 针对滑坡敏感性分析, 前人主要采用单因素分析法和多因素分析法, 前者虽然可以直观的给出各影响因子敏感性的相对大小, 但是, 在应用时假设其他因素不变这一前提明显与实际情况有所不符, 其分析结果也不够严谨。事实上, 滑坡稳定性要受众多因素的影响, 其影响机制复杂且往往又相互关联, 因此, 多因素分析法显得更加合理, 而多因素分析法中的链环替代法、函数法适用范围又有限[8], 正交试验设计法则适用范围更广。因此本文采用该方法对回来峪滑坡进行敏感性分析, 旨在找出可能导致滑坡复活的最敏感因子, 进而有针对性地进行防治, 达到安全、经济、合理的目标。

## 2. 回来峪滑坡概况

回来峪滑坡位于山西省灵石县境内, 黄河一级支流汾河左岸, 地理位置坐标:  $111^{\circ}43'33.7''E$ ,  $36^{\circ}52'54.1''N$  地形上属于低山丘陵区。滑坡高约 130 m, 宽约 150 m, 平均坡度  $25^{\circ}$ , 滑体体积约  $4.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。经钻探, 滑坡地层岩性上部为晚更新世风积黄土( $Q_3^{eol}$ ), 土质相对疏松, 大孔隙显著, 遇水易崩解发生滑塌; 中部为紫红色石炭系泥质砂岩( $CPt$ ), 滑体虽已扰动, 但其岩体结构尚存, 强度仍较大; 下部为灰白色奥陶系灰岩( $Om^6$ )。滑坡平面形态呈半圆形, 坡面形态近似为直线形。滑体左右两侧为冲沟, 中间略低,

易汇水,加之矿区爆破震动,滑坡局部表层岩体已发生滑塌,崩积物散落在冲沟内,碎石粒径大小不等,最大可达1 m。其地质剖面图见图1。

### 3. 正交试验设计

正交试验设计是研究多因素、多水平试验的一种设计方法。其优点是:部分代替整体,即从目标函数涉及的多水平因素的所有排列组合中,选取具有代表性的部分进行试验,这将大大节约计算时间并且不影响最终结果。例如:对于一个三因素三水平的试验,如果进行全面试验将会有27种组合,如果使用正交试验的话,仅需进行9次试验即可。如图2所示,立方体中所有27个交点即代表了27次全面试验,其中带标记的9个交点即为9次正交试验,可以看出,立方体每条线上点数一样,每个面上的点数也一样,每个点距离周边最近的点的距离还是一样,即9个交点是均匀分布于立方体内部的,也说明正交试验足以代表全面试验的情况。

在进行正交表设计时,应先确定表格的行数和列数,即因子个数和水平数;除此之外,还要考虑试验过程中可能出现的误差并预留处一定的空列,确定了行数和列数以后,正交表也就确定了,即 $L_n(t^b)$ ,其中, $L$ 为正交表符号, $n$ 为试验的次数, $a$ 为水平数(正交表行数), $b$ 为因素数+空列(正交表列数)。随后,把主要因素随机填入表格并使得正交表具有正交性、代表性以及综合可比性[9],最终,设计方案就被 $L_n(a^b)$ 确定了。在设计方案的基础上进行计算,所得结果一般用两种方法进行分析,即极差分析法和方差分析法,前者只需分别求得各因素同一水平对应的试验指标和,并对其求均值,通过比较不同因素间均值的差来分析敏感性的大小。这种方法虽然简单、易于操作,但是对于试验结果的差异具体是由因素水平不同引起的还是试验误差引起的而无从得知,也就是说,极差分析法最终求得的结果存在一定的误差,故本次分析将采用方差分析法。方差分析的基本原理就是试验的总偏差平方和由各列因素偏差平方和和误差偏差平方和组成。

在方差分析中,假设每一次试验独立进行且试验指标 $y_i$ 服从正态分布。现构造 $F$ 检验的统计量,记:

$$T = \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2, \quad \bar{y} = \frac{T^2}{n}, \quad r = \frac{n}{a},$$

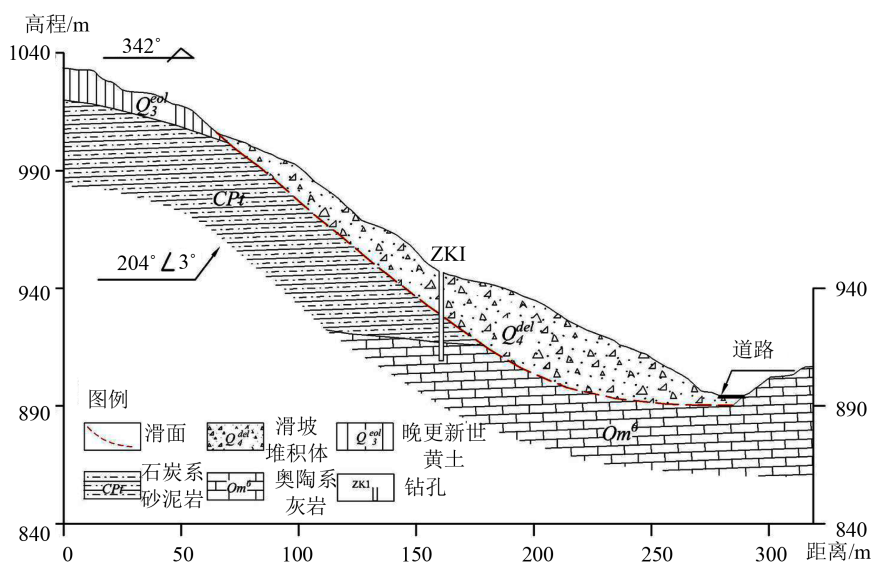


Figure 1. Geological section of Huilai Valley  
图1. 回来峪滑坡地质剖面图

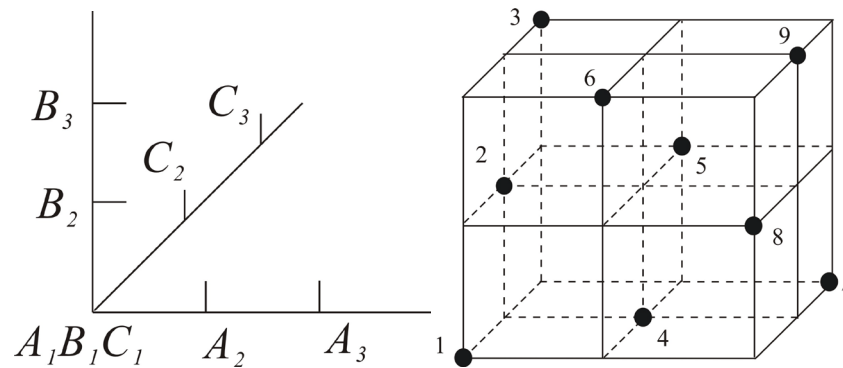


Figure 2. 3 factors, 3 levels of well-distributed schematic view

图 2.3 因素 3 水平的均匀分布示意图

总偏差平方和:  $SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(T)^2}{n}$  (1), 其中,  $\frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}$  被称为修正项。

$$\text{因素偏差平方和: } SS_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^a T_{ij}^2 - \frac{T^2}{n}, \quad j=1, 2, \dots, b, \quad (2)$$

$$\text{误差偏差平方和: } SS_e = SS_T - SS_j \quad (3)$$

用  $df_T, df_j, df_e$  分别表示总自由度、因素自由度和误差自由度:  $df_T = n-1$ 、 $df_j = a-1$ 、 $df_e = a-1$  构造  $F$  分布,  $F = MS_{\text{因素}}/MS_{\text{误差}}$ , 其中,  $MS_{\text{因素}} = SS_j/df_j$ ,  $MS_{\text{误差}} = SS_e/df_e$

## 4. 滑坡稳定的敏感性分析

### 4.1. 各因子之间相互作用

对于滑坡稳定的问题, 工程上更多的使用稳定系数  $F_s$  来直观地表征滑坡的稳定程度, 根据回来峪滑坡的结构特征和工程地质情况, 拟选用瑞典条分法来计算滑坡的稳定系数, 由于滑体上深 38 m 的钻孔未揭露地下水, 本次计算不考虑孔隙水压力的影响。瑞典条分法稳态函数如下:

$$F_s = \frac{\sum (c'_i l_i + \gamma b_i h_i \cos \theta_i \tan \varphi')}{\sum \gamma b_i h_i \sin \theta_i} \quad (4)$$

由上式可知: 稳定系数的影响因子包括岩土体重度  $\gamma$ 、粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ , 边坡高度  $h$ 、坡度  $\theta$ 。稳定系数分别对影响因子求偏微分可以得出各影响因子对稳定系数的敏感度[7], 记为  $S$ 。

$$S_\gamma = \frac{\partial F_s}{\partial \gamma} = -\frac{\sum c'_i l_i}{\gamma^2 \sum b_i h_i \sin \theta_i} \quad (5)$$

$$S_c = \frac{\partial F_s}{\partial c} = -\frac{\sum l_i}{\sum \gamma b_i h_i \sin \theta_i} \quad (6)$$

$$S_\varphi = \frac{\partial F_s}{\partial \varphi} = \sec^2 \varphi' \sum \cot \theta_i \quad (7)$$

由式(5) (6) (7)得: 岩土体重度  $\gamma$  的敏感度  $S_\gamma$  与  $c$ 、 $\varphi$ 、 $\theta$  有关; 粘聚力  $c$  的敏感度  $S_c$  与  $\gamma$ 、 $\theta$  有关; 内摩擦角  $\varphi$  的敏感度与  $\gamma$ 、 $\theta$  有关。它们的值均不是恒定不变的常数, 而是与其它因子存在函数关系, 也就是说, 当其它因子变化时, 相应的敏感度也会发生变化。

## 4.2. 正交设计表的确定及结果分析

对回来峪滑坡进行调查分析以及结合钻孔资料可知：滑坡稳定的主要影响因素有 6 个，包括岩土体重度  $\gamma$ 、粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ，边坡高度  $h$ 、坡度  $\theta$  和爆破冲击的影响。根据式(4)确定其内在因素为岩土体重度  $\gamma$ 、粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ ；在爆破震动影响下，滑坡顶部存在小型崩滑的现象，碎屑物自然散落在坡体上，长此以往，滑坡高度会不断较小，但是坡度变化并不大，故滑坡坡度变化也不做考虑；爆破震动产生的冲击换算成震动加速度，用  $a$  表示；至此，可以确定外在影响因素为坡高  $h$ ，震动加速度  $a$ 。把每个因素水平数设为 3，其中，岩土体内在因素的三个水平条件下的值为实验所测值；坡高  $h$  实际值为 135 米，其余两个值为推测  $N$  年后滑坡的坡高；震动加速度  $a$  为滑坡不同部位所测的 3 个峰值加速度，分别用来表示滑坡的平均震动加速度值。最终，可确定五因素三水平的正交表，因素水平表如表 1 所示。

由表 1 可知：对滑坡正交设计分析时，主要因子涉及到 5 个因素，每个因素水平数为 3，表格设计要求留出一定的空列，空列的含义为因素之间相互作用对结果的影响，本次试验选取  $L_{18}(3^7)$  正交表。把不同水平下的主要因素参数随机填入表格使其满足正交表的一般性质。稳定性系数可以直观的表达滑坡的稳定程度，本文基于 geo-studio 中的 slope 模块选取滑坡原型的概化剖面作为计算剖面，分别求得 18 种设计方案下的滑坡稳定性系数，以方案 1 为例，如图 3 所示，然后依次将计算所得值填入表格，得到结果如表 2 所示。

Table 1. Factor level table

表 1. 因素水平表

| 因素<br>水平 | 重度<br>$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 粘聚力<br>$c$ (kPa) | 内摩擦角<br>$\varphi$ (°) | 坡高<br>$h$ (m) | 震动加速度<br>$a$ (m/s <sup>-2</sup> ) |
|----------|-------------------------------------|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------------------|
| 1        | 21.5                                | 34.7             | 23.3                  | 125           | 0.1                               |
| 2        | 22.8                                | 39.3             | 27.8                  | 130           | 0.15                              |
| 3        | 26.2                                | 44.6             | 32.1                  | 135           | 0.2                               |

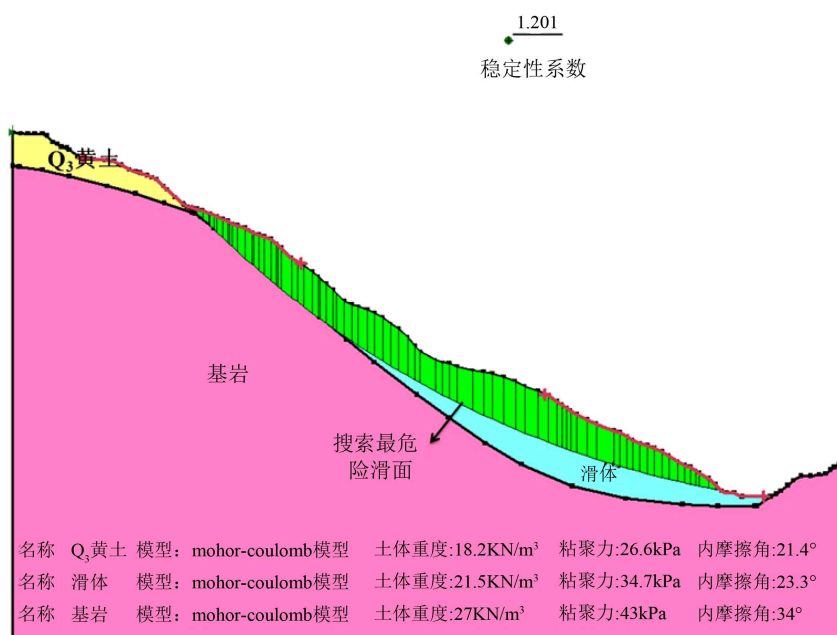


Figure 3. Calculation results of the stability coefficient of Scheme 1.

图 3. 方案 1 的稳定性系数计算结果

**Table 2.** Orthogonal design table  
**表 2.** 正交设计表

| 方案 | 1( $\gamma$ ) | 2( $e$ ) | 3( $\rho$ ) | 4( $h$ ) | 5( $a$ ) | 6 | 7 | 稳定系数  |
|----|---------------|----------|-------------|----------|----------|---|---|-------|
| 1  | 1             | 1        | 1           | 1        | 1        | 1 | 1 | 1.201 |
| 2  | 1             | 2        | 2           | 2        | 2        | 2 | 2 | 1.251 |
| 3  | 1             | 3        | 3           | 3        | 3        | 3 | 3 | 1.280 |
| 4  | 2             | 1        | 1           | 2        | 2        | 3 | 3 | 1.044 |
| 5  | 2             | 2        | 2           | 3        | 3        | 1 | 1 | 1.082 |
| 6  | 2             | 3        | 3           | 1        | 1        | 2 | 2 | 1.607 |
| 7  | 3             | 1        | 2           | 1        | 3        | 2 | 3 | 1.071 |
| 8  | 3             | 2        | 3           | 2        | 1        | 3 | 1 | 1.469 |
| 9  | 3             | 3        | 1           | 3        | 2        | 1 | 2 | 1.067 |
| 10 | 1             | 1        | 3           | 3        | 2        | 2 | 1 | 1.327 |
| 11 | 1             | 2        | 1           | 1        | 3        | 3 | 2 | 0.987 |
| 12 | 1             | 3        | 2           | 2        | 1        | 1 | 3 | 1.390 |
| 13 | 2             | 1        | 2           | 3        | 1        | 3 | 2 | 1.311 |
| 14 | 2             | 2        | 3           | 1        | 2        | 1 | 3 | 1.448 |
| 15 | 2             | 3        | 1           | 2        | 3        | 2 | 1 | 1.232 |
| 16 | 3             | 1        | 3           | 2        | 3        | 1 | 2 | 1.160 |
| 17 | 3             | 2        | 1           | 3        | 1        | 2 | 3 | 1.137 |
| 18 | 3             | 3        | 2           | 1        | 2        | 3 | 1 | 1.285 |

利用式(5) (6)分别计算因素偏差平方和和误差偏差平方和。 $F$  检验临界值选择  $\alpha$  分别等于 0.01、0.05 和 0.1 的值, 将计算所得  $F$  分布值与临界值进行比较, 若  $F > F_{0.01}$ , 称因素有特别显著影响; 若  $F_{0.05} < F < F_{0.01}$ , 称因素有显著影响; 若  $F_{0.1} < F < F_{0.05}$ , 称因素有影响, 但不显著; 若  $F < F_{0.1}$ , 则称因素无影响, 分析结果如表 3。

由表 3 可知: 岩土体内摩擦角和爆破产生的加速度对滑坡稳定性影响特别显著; 粘聚力对滑坡稳定性影响显著; 滑坡高度和岩土体重度对滑坡稳定性影响甚微, 几乎没有影响。从所得结果来看, 在对滑坡治理过程中, 要分清主次, 首先, 降低开矿爆破对滑坡的冲击影响; 其次, 再考虑降水入渗引起滑坡岩土体参数的改变。

## 5. 结论

采用正交分析法对影响回来峪滑坡稳定性的主要因子进行多因素敏感性分析, 相对于全面试验, 正交试验的工作量大大减少了, 试验结果仍然可以代替全面试验的情况, 因此, 该方法具有自己独特的优点。回来峪滑坡稳定性主要受岩土体内摩擦角和爆破冲击的影响, 在后期治理时, 应有所侧重, 以达到经济高效的目的。

**Table 3.** Results of variance analysis**表 3.** 方差分析结果

| 因素                | 偏差平方和 | 自由度 | F 比    | F 临界值              | 显著性  |
|-------------------|-------|-----|--------|--------------------|------|
| 重度( $\gamma$ )    | 0.002 | 2   | 3.692  | $F_{0.01} = 18.00$ | 无影响  |
| 粘聚力( $c$ )        | 0.032 | 2   | 7.385  | $F_{0.05} = 6.94$  | 显著   |
| 内摩擦角( $\varphi$ ) | 0.041 | 2   | 33.846 | $F_{0.1} = 4.32$   | 特别显著 |
| 高度( $h$ )         | 0.003 | 2   | 2.308  | -                  | 无影响  |
| 加速度( $a$ )        | 0.487 | 2   | 21.846 | -                  | 特别显著 |
| 误差(空列)            | 0.005 | 4   | 2.000  | -                  | -    |

## 基金项目

中国地质调查局二级项目(121201011000150018)。

## 参考文献 (References)

- [1] 王恭先, 徐峻龄, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [2] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- [3] 王念秦, 王永锋, 罗东海, 等. 中国滑坡预测预报研究综述[J]. 地质论评, 2008, 54(3): 355-361.
- [4] 殷坤龙. 滑坡预测的若干问题[J]. 地质科技情报, 1986(2): 52-58.
- [5] 马显春, 王雷, 赵法锁. 滑坡稳定影响因子敏感性分析及治理方案探讨[J]. 地质力学学报, 2008, 14(4): 381-388.
- [6] 葛华, 刘汉超. 万州草街子双堰塘滑坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(2): 15-18.
- [7] 常宝. 郴州市流星岭——同心河滑坡稳定性影响因素敏感程度研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [8] 倪恒, 刘佑荣, 龙治国. 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.
- [9] 姜同川. 正交试验设计[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1985.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2330-1724, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojns@hanspub.org](mailto:ojns@hanspub.org)