

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.195



基于正交设计的麻柳林滑坡稳定性敏感分析

刘毅^{1,2}, 赵斌滨¹, 殷坤龙^{2*}, 陈丽霞³, 桂蕾², 梁鑫²

1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055
2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074
3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要:以麻柳林滑坡为例,选取了内摩擦角、粘聚力、渗透系数、浸没率、库水位下降速率及降雨量等 6 个因素进行了正交试验,采用极差分析法进行了稳定性敏感分析.结果表明,滑坡稳定性及其变化率主要由内因决定,库水和降雨对其影响较小.滑坡稳定性对内摩擦角最敏感,其次依次为渗透系数、粘聚力和浸没率.滑坡初始稳定性主要由内摩擦角和粘聚力决定.滑坡稳定性随浸没率的降低而逐步增加,但增幅较小;渗透系数对滑坡稳定系数变化率的影响最大,并存在临界值 K_0 .渗透系数大于 K_0 时,滑坡稳定性随渗透系数的增加而增加,渗透系数小于 K_0 时,滑坡稳定性随渗透系数的降低而降低.

关键词:敏感性分析;正交设计;麻柳林滑坡;三峡库区;稳定性.

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2019)02-0677-08

收稿日期: 2018-09-15

Sensitivity Analysis of Maliulin Landslide Stability Based on Orthogonal Design

Liu Yi^{1,2}, Zhao Binbin¹, Yin Kunlong^{2*}, Chen Lixia³, Gui Lei², Liang Xin²

1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Taken Maliulin landslide as a case, the friction angle, cohesive strength, hydraulic conductivity, immersion ratio, reservoir drawdown rate and rainfall are chosen as influential factors and orthogonal experiment was carried out. Sensitivity analysis was performed using range analysis. Results show that the stability of Maliulin landslide is mainly influenced by its self-factors, and the reservoir and rainfall have limited impact on landslide stability. Landslide stability is most sensitive to friction angle, followed by hydraulic conductivity, cohesive strength and immersion ratio. The initial landslide stability is mainly influenced by friction angle and cohesive strength. As the decreasing of immersion ratio, the landslide stability has limited increase. The changed ratio of factor of safety is mainly influenced by hydraulic conductivity in which a critical value K_0 existed. When hydraulic conductivity is greater than K_0 , the landslide stability increases with the increasing of permeability coefficient. On the contrary, the landslide stability decreases with the decreasing of hydraulic conductivity when hydraulic conductivity is less than K_0 .

Key words: sensitivity analysis; orthogonal design; Maliulin landslide; Three Gorges Reservoir; stability.

研究三峡库区库岸滑坡的稳定性及其影响因素的作用规律具有重要意义.为减少库水下降对滑坡的影响,三峡水库在蓄水之初将最大库水位下降速

率限制在 0.6 m/d.经过 8 年的平稳运行,库岸已基本适应了目前的水文地质条件,库岸滑坡及其变形得到缓解.但限制库水位下降速率,阻碍了三峡大坝

基金项目:国家自然科学基金资助项目(Nos.41572292,41601563,41641012,41572278);国家重点研发计划(No.2018YFC0809400);国家电网公司科技项目(No.GCB17201700121).

作者简介:刘毅(1989-),男,博士研究生,主要从事滑坡灾害机理研究. ORCID: 0000-0002-0234-3504. E-mail: liu_yi_369@163.com

* **通讯作者:**殷坤龙, ORCID: 0000-0002-3547-1633. E-mail: yinkl@126.com

引用格式:刘毅,殷坤龙,陈丽霞,等,2019.基于正交设计的麻柳林滑坡稳定性敏感分析.地球科学,44(2):677-684.

效益的发挥,需适当放开,但放开之前需评估增大库水位下降速率时滑坡的稳定性.

为此,众多科研单位针对全库区方量超过 100 万方的 741 处涉水滑坡进行了详细的野外调查.为研究库岸滑坡的稳定性特点,研究滑坡对各因素的敏感性至关重要,以明确各因素对滑坡稳定性的影响程度.

目前部分学者开展了针对库岸滑坡的敏感性研究.宋琨等(2011)、Xia *et al.*(2015)等采用单因素分析法研究了岩土体重度、强度参数、渗透系数、库水升降速率等对滑坡的敏感性;刘长春等(2010)、张万涛和余宏明(2009)、倪恒等(2002)等采用正交设计研究了库岸滑坡的敏感性.但对库水下降模式及下降的速率的考虑过于简单,且未考虑降雨的作用,关于敏感因子如何影响滑坡的稳定性也缺乏进一步的分析.

本文选取粘聚力、内摩擦角、渗透系数、浸没率、降雨量及库水下降速率等作为影响因子,选取稳定性系数和稳定性变化率作为试验指标,利用正交试验设计方法进行了敏感性分析,并深入分析了各因素对滑坡稳定性的影响规律.由于库区绝大部分滑坡没有勘查资料,因此本文选取没有勘查资料的滑坡进行研究,以使该研究方法能推而广之.

1 麻柳林滑坡概况

麻柳林滑坡位于重庆市万州区太龙乡,长江南岸.滑坡平面形态为箕形,滑坡纵长约 300 m、横宽约 450 m、平均厚 25 m、面积约 $13.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、体积约 $303 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向为 293° (图 1).滑坡前缘剪出口高程 125 m,后缘高程 230 m;滑坡前缘和中部平缓,后缘较陡;滑体受库水影响程度大,垂向约 50 m 高差受库水的直接影响,属典型的涉水型滑坡.

滑坡属松散堆积层滑坡,由第四系人工填土、残坡积层、崩坡积层、滑坡堆积层组成,表层可见大量砂岩块石,直径可达 1~8 m;钻探结果显示块石段所占岩心总长约 30%,表明滑体渗透性良好.滑带土为粉质粘土,滑床为侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s)的砂岩、泥质砂岩,岩层产状为 $99^\circ \angle 8^\circ$.

蓄水后滑体中部房屋开裂,并全部搬迁;2014 年 8 月调查时,后缘公路密集开裂,裂缝垂直滑动方向展布,裂缝走向约 40° 、长 10~30 m、宽 5~10 cm、下沉 1~3 cm;深部位移监测结果表明,CX-1 处滑面在堆积层厚 36 m 位置.CX-2 钻探结果表明:24~30 m 段为砂岩巨石,岩心完整性好、采取率高,该巨石起到锚固作用,导致巨石表层 22.5 m 处位移最

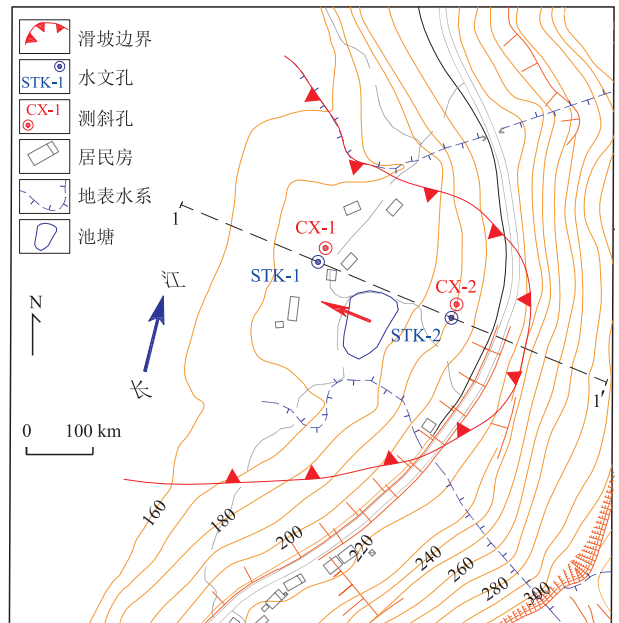


图 1 麻柳林滑坡平面图

Fig.1 Plan of Maliulin landslide

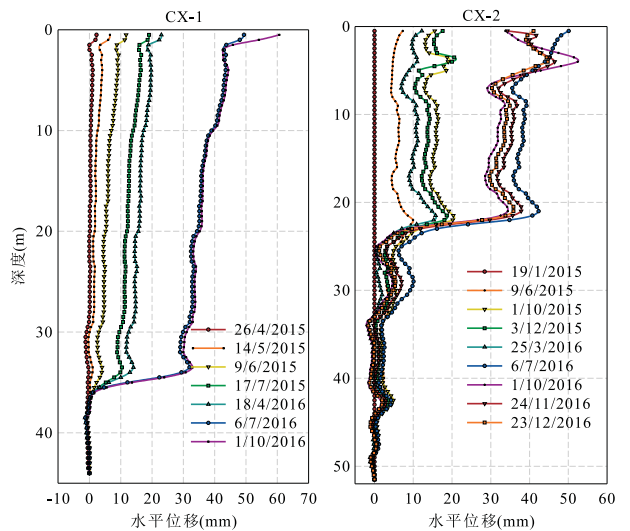


图 2 麻柳林滑坡深部位移监测结果

Fig.2 Results of deep displacement monitored by inclinometer

大,巨石以下深层滑面在 32 m 位置,位移较小,滑体沿覆盖层—基岩的接触面滑动,滑坡处于蠕滑状态(图 2).

2 基于正交设计的敏感性分析

2.1 正交设计方法介绍

正交设计法是从全面试验中挑选出有代表性的试验点进行试验,选中的试验点具有均衡分散、整齐可比的特征,代表性强、效率高.正交试验对全体

因素而言是部分试验,但对其中任意两个因素而言则是具有相同重复次数的全面试验(倪恒等, 2002; 张万涛和余宏明, 2009).该方法无须假定单一因素变化时其他因素保持不变,同时各影响因素之间也可以进行有效的横向对比(李远耀, 2007),与单因素分析法相比有明显优势.

正交设计敏感性分析主要包括两个方面:正交设计的试验和因素的敏感性分析.主要步骤如下:

(1)根据研究对象确定试验指标、敏感因子及其水平,并据此选择合适的正交表,记为 $L_n(t^m)$,其中 L 为正交表记号, n 试验次数, t 为水平数, m 为正交表的列数;正交表的列数 m 需大于等于所选取的敏感性因子个数;

(2)根据正交表确定方案,并开展试验,得到各组合条件下试验指标的结果;

(3)利用极差分析法或方差分析法对试验结果进行分析,得到敏感性结果.

由于方差分析法需要预留自由度,因此本文采用极差分析法,其原理如下:设 M_{ij} 表示第 j 列因素、第 i 水平下各工况的计算结果的平均值,第 j 列因素的极差 R_j 为 M_{ij} 中的最大值与最小值之差,即:

$$R_j = \max\{M_{ij}\} - \min\{M_{ij}\}, \quad 1 \leq i \leq t, \quad (1)$$

式中: R_j 反映了第 j 列因素的水平变动时,试验指标的最大变动幅度. R_j 越大,表明该因素水平的改变对试验指标的影响越显著,敏感度也越高.因此,根据 R_j 的大小可判断各因素的敏感性大小(陈鹏, 2012).

2.2 确定敏感因素及其变化范围

从地质条件和影响因素两方面,选取粘聚力 c 、内摩擦角 φ 、渗透系数 K 、浸没率 α 、降雨量 T 及库水下降速率 V 6 个因素进行敏感性分析(苏琦等, 2016; 喻孟良等, 2016).由于麻柳林滑坡没有土工试验数据,因此,根据三峡库区不同地层的滑带土强度参数统计规律(李远耀等, 2008),运用工程地质类比法确定粘聚力、内摩擦角取值范围;根据三峡库区堆积层滑坡渗透特征,确定渗透系数取值范围(贾淑霞, 2002).下面讨论浸没率 α 、降雨量 T 及库水下降速率 V 这 3 个敏感参数的确定.

2.2.1 浸没率 α 现场调查表明,一个区域因其构造条件相似,形成的堆积层滑坡的剖面形态较为相似,但其剪出口高程不一致,导致库水位对滑坡的影响规律也不一样.因此选取浸没率作为敏感因素,以分析浸没程度对滑坡稳定性的影响.

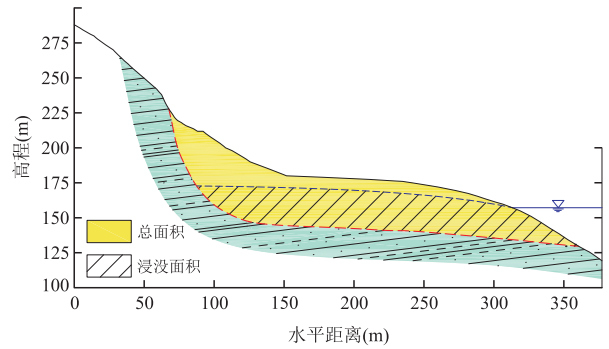


图 3 计算浸没率的概化模型

Fig.3 A generalized model for calculating immersion ratio

本文提出浸没率来衡量滑坡体浸没程度(图 3),其表达式为:

$$\alpha = A_s / A_t \times 100\%, \quad (2)$$

式中: A_s 代表 175 m 以下滑体剖面面积(滑体内浸润线倾角设为 3°), A_t 代表滑体剖面的总面积.

为研究浸没率对滑坡体稳定性的影响,将滑体整体上下平移,不改变其他参数.由于麻柳林滑坡 1-1'剖面初始浸没率较大,达 77.85%,因此以 5% 间隔逐步降低其浸没率.

2.2.2 降雨量 T 由于三峡库区降雨分布不均,而本次研究区为汛前(1/1~6/20),因此不能将一个水文年的极值降雨数据用于本分析中.张珍等(2005)通过研究重庆地区滑坡与降雨的关系,结果表明在降雨的 3 d 内所发生的滑坡占总数的 93.7%,因此选取连续 3 d 降雨计算重现期.滑坡根据库水位调度和降雨分布规律,将一个水文年划分为 4 个区段,再对每个区段分别计算降雨极值.

本文采用皮尔逊 III 型分布曲线(Singh, 1998)计算 3 d 累计的降雨重现期,运用适线法估计参数,并基于有限比较的 Kolmogorov-Smirnov 方法检验估计的参数(张博庭, 1991),降雨重现期计算结果见表 1.

表 1 万州 3 d 降雨量降雨重现期(单位: mm)

Table 1 The extreme rainfall of three consecutive days in Wanzhou district

重现期	第一阶段 1/1~4/20	第二阶段 4/21~6/20	第三阶段 6/21~9/30	第四阶段 10/1~12/31
5 年	50.32	108.61	167.15	64.37
10 年	61.58	133.21	208.48	76.48
20 年	72.27	157.23	249.16	87.82
50 年	85.85	188.44	302.32	102.08
100 年	95.84	211.76	342.22	112.50

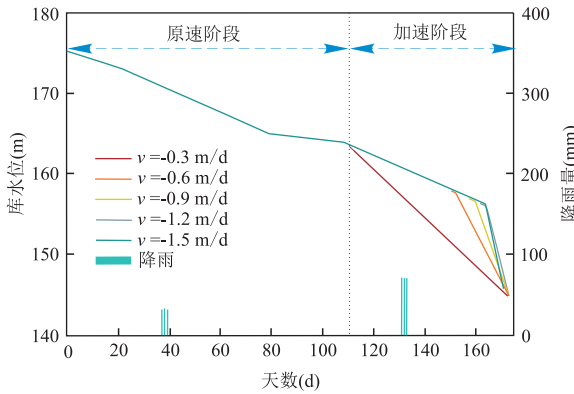


图 4 库水位下降阶段调度模型及降雨加载位置

Fig.4 Calculation model for reservoir drawdown and rainfall

参考年降雨分布规律,本文第一阶段的降雨加载在第 37~39 天(以每年的 1/1 为第一天),重现期统一取 5 年;第二阶段加载在第 131~133 天,重现期依次取 5 年、10 年、20 年、50 年和 100 年。

2.2.3 库水下降速率 V 第一阶段库水下降模式不变,第二阶段库水加速下降,下降速率分 0.3、0.6、0.9、1.2 和 1.5 m/d 这 5 种工况(图 4)。第二阶段库水位降至 145 m 的时间不变,库水位无需加速下降时,按 0.14 m/d 下降。

该库水调度模型与实际情况较为符合,增加下降速率后库水不至于过早到达 145 m,同时库水加速下降阶段设置在低水位处,有助于减小库水对滑坡的影响,且该模型综合权衡了发电、航运、防洪及防灾减灾的需求。

综合以上分析,得到正交试验的因素水平,见表 2。

表 2 正交试验因素水平

Table 2 Factor levels of orthogonal experiment

水平	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ ($^\circ$)	渗透系数 K (m/s)	浸没率 α (%)	重现期 T (a)	下降速率 V (m/d)
1	15	10	1E-4	77.85	5	0.3
2	19	12	5E-5	72.85	10	0.6
3	23	14	1E-5	67.85	20	0.9
4	27	16	5E-6	62.85	50	1.2
5	31	18	1E-6	57.85	100	1.5

2.3 渗流模拟及稳定性计算

根据正交设计特点,不考虑因素间相互作用,选取 5 水平 6 因素的正交表 $L_{25}(5^6)$ 安排试验。试验采用 Geo-studio 中的 SEEP/W 模块以 1-1' 剖面建立渗流模型(图 5)。滑坡体单元网格长度设为 5 m,由于麻柳林滑坡为堆积层滑坡,滑体材料设为均值和

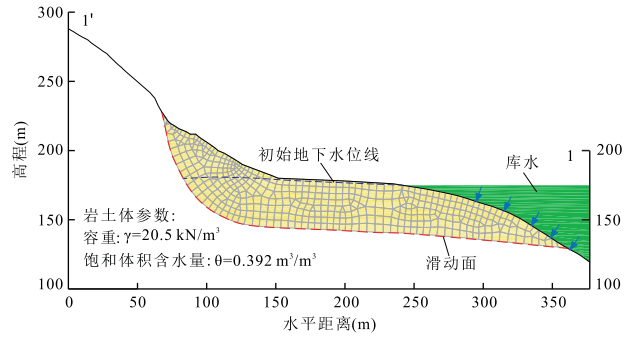


图 5 麻柳林滑坡计算模型与参数

Fig.5 Calculation model and soil properties for stability analysis

各项同性,滑体容重和饱和体积含水量根据工程地质类比法确定,并根据 Van Genuchten 经验曲线确定渗流分析的计算参数;结合现场调查、地下水监测及地形地貌等,取初始地下水位线倾角为 3° 。

将渗流计算结果作为初始条件导入 SLOPE/W 中,采用 Morgenstern-Price 方法计算稳定性,得到各试验工况下每天的滑坡稳定系数,统计最终的稳定性系数 F_s 和稳定性变化率 η 。正交设计方案及稳定性计算结果见表 3。

2.4 正交试验结果分析

2.4.1 正交结果敏感性分析 采用极差分析法分析正交计算结果,结果见表 4 和表 5,并分别作出各因素与稳定系数和稳定系数变化率的关系图,见图 6 和图 7。对稳定性而言(表 4),各影响因素的敏感性由大到小依次为:内摩擦角 φ 、渗透系数 K 、粘聚力 c 、浸没率 α 、库水下降速率 V 、降雨量 T ;但对稳定系数变化率而言(表 5),则各因素的影响次序依次为:渗透系数 K 、粘聚力 c 、浸没率 α 、内摩擦角 φ 、库水下降速率 V 、降雨量 T 。

对图 6 所述各因素的曲线进行线性拟合,见表 6。结果显示, φ 、 K 、 c 和 α 随着水平的变化呈现高度的线性相关性, R^2 值接近于 1;拟合直线的斜率与该因素的敏感性相一致,斜率的绝对值越大,因素越敏感。从水平 1 增加到水平 5,斜率为正的因素有利于滑坡的稳定,斜率为负的因素降低滑坡的稳定性。 V 和 T 的线性拟合的斜率均接近于零,且 R^2 值也接近于零,表明这两组因素对滑坡影响很小,且不呈现出线性相关。相对于滑坡体自身因素而言,外界影响因素(库水下降速率和降雨)对滑坡稳定性影响较小。

分析浸没率对滑坡稳定性的影响(表 4),可发现随着浸没率的降低,滑坡稳定性逐渐缓慢增加,当麻柳林滑坡浸没率由 77.85% 降低至 57.85% 时,滑坡稳定性系数提高了 0.07,提升幅度达 6.83%;表 6

表 3 正交设计方案及计算结果

Table 3 Calculation scheme and results of the orthogonal experiment

试验序号	工况	c	φ	K	α	V	T	稳定系数 F_s	变化率 $\eta(\%)$
1	A1	1	1	1	1	1	1	0.81	11.42
2	B1	1	2	2	2	2	2	0.91	7.16
3	C1	1	3	3	3	3	3	0.95	-1.93
4	D1	1	4	4	4	4	4	1.06	-5.61
5	E1	1	5	5	5	5	5	1.17	-7.71
6	C2	2	1	2	3	4	5	0.81	6.19
7	D2	2	2	3	4	5	1	0.88	-3.24
8	E2	2	3	4	5	1	2	0.99	-5.08
9	A2	2	4	5	1	2	3	0.98	-11.60
10	B2	2	5	1	2	3	4	1.40	10.79
11	E3	3	1	3	5	2	4	0.80	-3.53
12	A3	3	2	4	1	3	5	0.84	-7.70
13	B3	3	3	5	2	4	1	0.94	-10.50
14	C3	3	4	1	3	5	2	1.30	10.67
15	D3	3	5	2	4	1	3	1.45	9.13
16	B4	4	1	4	2	5	3	0.78	-8.14
17	C4	4	2	5	3	1	4	0.87	-9.86
18	D4	4	3	1	4	2	5	1.21	9.79
19	E4	4	4	2	5	3	1	1.33	6.66
20	A4	4	5	3	1	4	2	1.27	-3.93
21	D5	5	1	5	4	3	2	0.81	-9.27
22	E5	5	2	1	5	4	3	1.11	8.11
23	A5	5	3	2	1	5	4	1.15	3.41
24	B5	5	4	3	2	1	5	1.20	-3.53
25	C5	5	5	4	3	2	1	1.29	-5.69

表 4 稳定系数极差分析结果

Table 4 Range analysis of factor of safety

均值	c	φ	K	α	V	T
F_{s1}	0.98	0.80	1.16	1.01	1.06	1.05
F_{s2}	1.01	0.92	1.13	1.04	1.04	1.06
F_{s3}	1.06	1.05	1.02	1.04	1.07	1.05
F_{s4}	1.09	1.17	0.99	1.08	1.04	1.05
F_{s5}	1.11	1.32	0.95	1.08	1.05	1.05
R_j	0.13	0.52	0.21	0.07	0.03	0.01
改变率	13.62	64.33	21.89	6.83	2.82	0.73
敏感性		$\varphi > K > c > \alpha > V > T$				

表 5 稳定系数变化率极差分析结果

Table 5 Range analysis of changed ratio of factor of safety

均值	c	φ	K	α	V	T
η_1	0.67	-0.67	10.16	-1.68	0.42	-0.27
η_2	-0.59	-1.10	6.51	-0.84	-0.77	-0.09
η_3	-0.38	-0.86	-3.23	-0.12	-0.29	-0.89
η_4	-1.10	-0.68	-6.45	0.16	-1.15	-0.96
η_5	-1.39	0.52	-9.79	-0.31	-1.00	-0.59
R_j	2.06	1.62	19.94	1.84	1.57	0.87
敏感性		$K > c > \alpha > \varphi > V > T$				

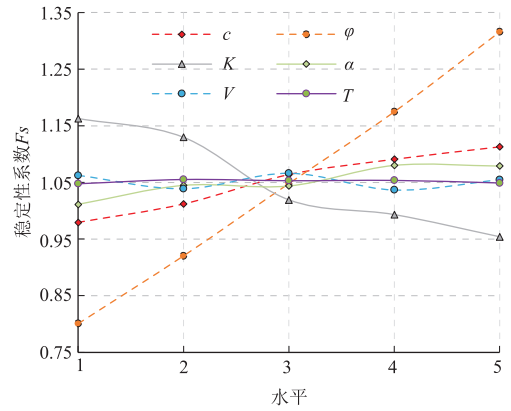


图 6 各因素变化对滑坡稳定性的影响

Fig.6 Effect on landslide stability by various factors

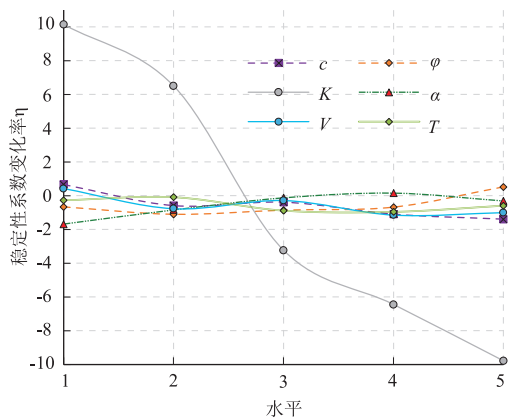


图 7 各因素水平变化时对滑坡稳定性变化率的影响

Fig.7 Effect on changed ratio of factor of safety by various factors

表 6 各因素对滑坡稳定性影响曲线的线性拟合

Table 6 Linear fitting of various factors on landslide stability

因素	线性拟合公式	R^2 值
φ	$y=0.1284x+0.6665$	0.9992
K	$y=-0.0554x+1.218$	0.9461
c	$y=0.0346x+0.9481$	0.9780
α	$y=0.0171x+1.0004$	0.8842
V	$y=-0.0018x+1.0571$	0.0440
T	$y=0.0001x+1.0514$	0.0037

显示,在线性相关的 4 组拟合结果中,浸没率的斜率最小,说明其对滑坡有影响但影响有限,下文重点分析渗透系数和强度参数对滑坡的影响规律。

2.4.2 渗透系数对滑坡稳定性的影响 图 7 表明,渗透系数 K 对稳定系数变化率 η 影响最大,渗透系数越大或越小, η 也越大。随着渗透系数 K 从 K_1 降低到 K_5 , η 降低了 19.95%,其影响幅度是粘聚力 c (敏感性第二)的 9.7 倍;但对于稳定性的影响,其影响力小于内摩擦角 φ ,随着渗透系数 K 的降低,稳

定系数降低 0.21.

将正交试验按渗透系数的水平进行分类,每个水平下有 5 组试验,分析每组的滑坡稳定性,部分典型的渗透系数与滑坡稳定性的关系见图 7.

滑坡稳定性变化率 η 的走势主要受渗透系数 K 的影响.滑坡渗透系数 K 存在一个临界值 K_0 ,此时对滑坡稳定性没有影响,渗透系数靠近 K_0 时,例如 K_3 (图 8b), η 受库水位调度模型 V 和降雨 T 影响较大.当渗透系数 K 大于 K_0 时,随着 K 值的增加, F_s 同步增大,各工况下 η 的走势趋向一致,各工况的最终稳定性的变异系数降低(图 8a);当渗透系数 K 小于 K_0 时,随着 K 值的降低, F_s 同步降低,各工况下 η 的走势也趋向一致,稳定性变异系数也逐步降低(图 8c).

2.4.3 强度参数对滑坡稳定性的影响 对比表 4 和表 5 两种敏感性分析结果,最大的不同在于内摩擦角 φ 的排序问题.对稳定性 F_s 而言, φ 属于最敏感的因素,随着 φ 值从 φ_1 增大到 φ_5 ,滑坡稳定性系数 F_s 呈直线上升, F_s 增加了 0.52,增长率达 64.33%(图 6),但对于稳定性变化率 η 而言,随着 φ 值的增加, η 仅仅增加了 1.62%.

图 8d 显示渗透系数 K 相同时,各曲线的起点均不同,在其他 K 值时,也具有相似现象.分析各曲

线对应的其他参数,发现初始稳定性 F_s 与内摩擦角 φ 有直接联系, φ 越大,初始 F_s 越高(图 6).

统计内摩擦角 φ 在各个水平下,滑坡的初始和最终稳定系数(图 9,初始稳定系数为第 0 天的稳定系数,最终稳定系数为计算期最后一天的稳定系数),可知滑坡初始稳定性和最终稳定性均随内摩擦角的增加而稳步增大.当 φ 值固定时,其初始稳定性仍然有不同.分析每个点的其他参数,可知初始稳定性与粘聚力的参数分布完全一致,随着粘聚力的增长,初始稳定性会增加;但最终稳定性与粘聚力没有相对应的关系.

2.4.4 敏感性综合分析 以上分析表明,麻柳林滑坡对内部因素的改变比较敏感,库水和降雨对其影响较小,也反映该库水位下降模型对滑坡稳定性影响较小.因此,在调查、分析滑坡稳定性时,主要从强度参数和渗透系数考虑.

现场调查和深部位移监测表明,麻柳林滑坡变形主要集中在每年的 5~7 月,此时正值库水快速下降和暴雨频发时期,表明库水下降和降雨对滑坡稳定性有影响,也反映滑坡体稳定性本身较低.

麻柳林属深层滑坡,内摩擦角 φ 对滑坡稳定性影响最大, φ 值从 10° 增加到 18° 时,滑坡稳定性呈线性增加(图 6 和表 6),增幅达 64%(表 4),该成果也

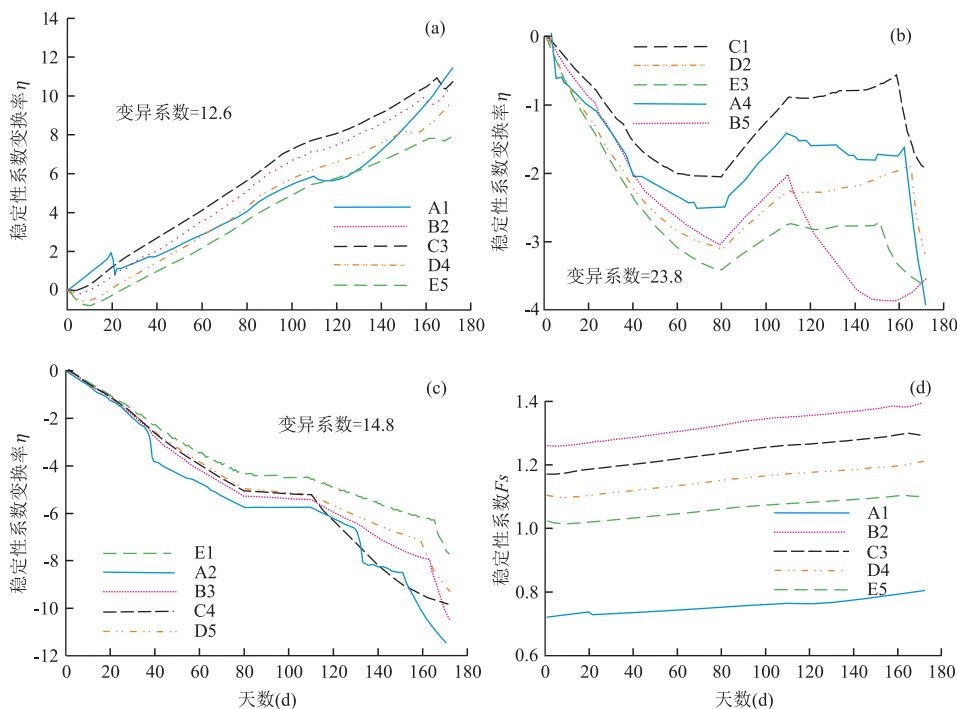


图 8 渗透系数 K 一定时滑坡稳定性变化特点

Fig.8 Characteristics of landslide stability under certain permeability coefficient K

a. K_1 水平稳定性变化率 η ; b. K_3 水平稳定性变化率 η ; c. K_5 水平稳定性变化率 η ; d. K_1 水平稳定性 F_s

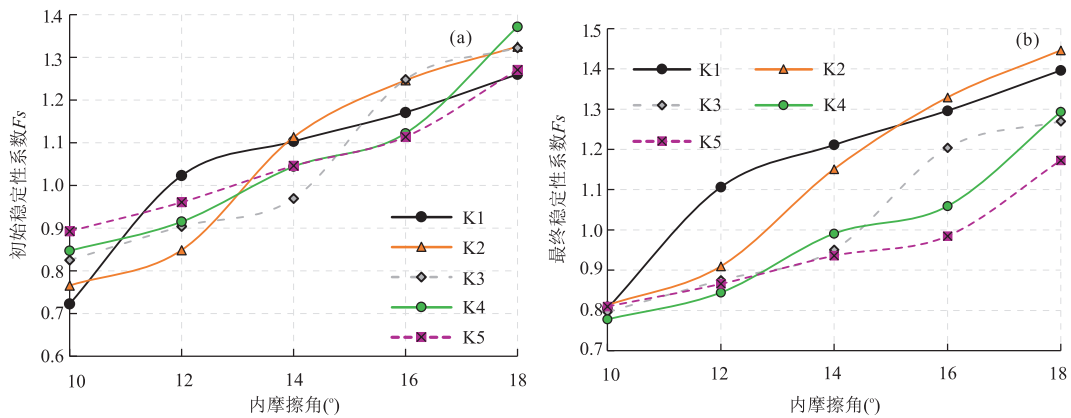


图 9 内摩擦角与滑坡稳定性的关系

Fig.9 Relationship between internal friction angle and landslide stability

a.内摩擦角与初始稳定性关系; b.内摩擦角与最终稳定性关系

与李长江等(2008)的结论相一致.即便渗透系数对滑坡稳定系数改变率的影响远高于其他因素(图 6),也仅属于局部调整,调整范围约 20%.

从地质上分析,位置低的堆积层受库水浸泡的时间更长,滑坡体的自适应能力得到充分发挥,滑坡体内逐渐形成完善的管道渗流,库水下降引起的水压力能得到及时消散(Uchida *et al.*, 2001; 尚岳全等, 2005),滑体渗透性增强,根据 2.4.2 的研究结果,如果渗透系数持续增加并超过临界值 K_0 ,此时库水下降反而有利于滑坡稳定性,此规律有助于解释库岸滑坡整体变形趋缓的现象.

3 结论

(1)基于正交设计的敏感性分析结果表明,影响麻柳林滑坡稳定性的 6 个因素的敏感性由大到小依次为:内摩擦角 φ 、渗透系数 K 、粘聚力 c 、浸没率 α 、库水下降速率 V 、降雨量 T ;影响麻柳林滑坡稳定性变化率的因素敏感性由大到小依次为渗透系数 K 、粘聚力 c 、浸没率 α 、内摩擦角 φ 、库水下降速率 V 、降雨量 T .

(2)麻柳林滑坡的稳定性主要由滑坡体的内因决定.其中,内摩擦角 φ 、粘聚力 c 对滑坡初始稳定性影响较大,渗透系数 K 对滑坡稳定性变化率的影响很大,降低浸没率 α ,有利于滑坡稳定,但影响程度较小;相对于内因而言,外因对滑坡稳定性影响较小,因此在敏感性分析中,当内因和外因同时改变时,外因对滑坡稳定性的影响被内因所掩盖.

(3)对于库水位下降工况,渗透系数 K 存在临界值 K_0 ,此时对滑坡稳定性没有影响; K 大于 K_0

时,滑坡稳定性随渗透系数 K 的增加而增加,渗透系数小于 K_0 时,滑坡稳定性随渗透系数的降低而降低.

致谢:感谢审稿专家和编辑部对本文提出的诸多建设性的意见和建议.

References

Chen, P., 2012. Study on the Stability and Its Influence Factors for Highway Bedding Rock Slopes (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese with English abstract).

Jia, S.X., 2002. Some Questions in the Assessment and Investigation of the Landslides in the Three Gorges Reservoir. *Hubei Geology & Mineral Resources*, 16(4): 44-46 (in Chinese with English abstract).

Li, C.J., Ma, S.H., Zhu, X.S., 2008. Forecasting of Landslides Triggerred by Rainfall: Theory, Methods and Applications. Geological Publing House, Beijing (in Chinese).

Li, Y. Y., 2007. The Deformation Mechanics and Stability Study of Bedding Bank Rock Slopes in the Head Area of the Three Gorges Reservoir (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Li, Y. Y., Yin, K.L., Chai, B., et al., 2008. Study on Statistical Rule of Shear Strength Parameters of Soil in Landslide Zone in Three Gorges Reservoir Area. *Rock and Soil Mechanics*, 29(5): 1419-1424, 1429 (in Chinese with English abstract).

Liu, C.C., Yin, K.L., Li, Y. Y., 2010. Stability Calculation and Sensitivity Analysis of Wenjia Landslide, Badong County. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 37(1): 113-117, 123 (in Chinese with English abstract).

- Ni, H., Liu, Y. R., Long, Z. G., 2002. Applications of Orthogonal Design to Sensitivity Analysis of Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(7): 989–992 (in Chinese with English abstract).
- Shang, Y. Q., Sun, H. Y., Hou, L. G., et al., 2005. Study on the Stability of Pebbly Clay Slopes with Pipe Drainage System. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(8): 1371–1375 (in Chinese with English abstract).
- Singh, V. P., 1998. Entropy-Based Parameter Estimation in Hydrology. Springer, Netherlands, 231–251.
- Song, K., Yan, E. C., Zhu, D. P., et al., 2011. Base on Permeability of Landslide and Reservoir Water Change to Research Variational Regularity of Landslide Stability. *Rock and Soil Mechanics*, 32(9): 2798–2802 (in Chinese with English abstract).
- Su, Q., Liang, M. J., Yuan, D. Y., et al., 2016. Geomorphic Features of the Bailongjiang River Drainage Basin and Its Relationship with Geological Disaster. *Earth Science*, 41(10): 1758–1770 (in Chinese with English abstract).
- Uchida, T., Kosugi, K., Mizuyama, T., 2001. Effects of Pipe-flow on Hydrological Process and Its Relation to Landslide: A Review of Pipeflow Studies in Forested Headwater Catchments. *Hydrological Processes*, 15(11): 2151–2174. <https://doi.org/10.1002/hyp.281>
- Xia, M., Ren, G. M., Zhu, S. S., et al., 2015. Relationship between Landslide Stability and Reservoir Water Level Variation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(3): 909–917. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0654-0>
- Yu, M. L., Mei, H. B., Li, J. H., et al., 2016. Landslide Displacement Prediction Based on Varying Coefficient Regression Model in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 41(9): 1593–1602 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. T., 1991. Finite Comparison Method for the Test on Goodness of Fit. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 13(6): 84–91 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. T., Yu, H. M., 2009. Applications of Orthogonal Experiment Design to Sensitivity Analysis of Bank Landslide. *Safety and Environmental Engineering*, 16(5): 13–16 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Li, S. H., Ma, L., 2005. Probability Analysis of Relationship between Landslide and Rainfall in Chongqing Area. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(17): 3185–3191 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈鹏, 2012. 公路顺层岩质边坡稳定及其影响因素分析 (博士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 贾淑霞, 2002. 湖北省三峡库区滑坡勘查评价几个问题的商榷. *湖北地矿*, 16(4): 44–46.
- 李长江, 麻士华, 朱兴盛, 2008. 降雨型滑坡预报的理论、方法及应用. 北京: 地质出版社.
- 李远耀, 2007. 三峡库首区顺层基岩岸坡变形机制与稳定性研究 (硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 李远耀, 殷坤龙, 柴波, 等, 2008. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究. *岩土力学*, 29(5): 1419–1424, 1429.
- 刘长春, 殷坤龙, 李远耀, 2010. 巴东县文家滑坡稳定性计算及其敏感性分析. *水文地质工程地质*, 37(1): 113–117, 123.
- 倪恒, 刘佑荣, 龙治国, 2002. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用. *岩石力学与工程学报*, 21(7): 989–992.
- 尚岳全, 孙红月, 侯利国, 等, 2005. 管网渗流系统对含碎石粘性土边坡的稳定作用. *岩石力学与工程学报*, 24(8): 1371–1375.
- 宋琨, 晏鄂川, 朱大鹏, 等, 2011. 基于滑体渗透性与库水变动的滑坡稳定性变化规律研究. *岩土力学*, 32(9): 2798–2802.
- 苏琦, 梁明剑, 袁道阳, 等, 2016. 白龙江流域构造地貌特征及其对滑坡泥石流灾害的控制作用. *地球科学*, 41(10): 1758–1770.
- 喻孟良, 梅红波, 李冀骅, 等, 2016. 基于变系数回归模型的三峡库区滑坡位移预测. *地球科学*, 41(9): 1593–1602.
- 张博庭, 1991. 用有限比较法进行拟合优度检验. *岩土工程学报*, 13(6): 84–91.
- 张万涛, 余宏明, 2009. 正交试验设计方法在库岸滑坡敏感性分析中的应用. *安全与环境工程*, 16(5): 13–16.
- 张珍, 李世海, 马力, 2005. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析. *岩石力学与工程学报*, 24(17): 3185–3191.