

马河崩塌体边坡稳定程度敏感性分析

张楚楚,孙少锐,王帅,唐凯
(河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:针对雅砻江楞古水电站边坡稳定性问题,以马河崩塌体边坡为例,选取岩体重度、粘聚力、内摩擦角、水位、地震系数为影响因子,以边坡的安全系数为指标,基于均匀设计开展数值试验,对试验结果进行灰关联分析,得出各因素与边坡安全系数之间的关联系数和关联度。研究结果表明,各因素对边坡稳定性的影响大小依次为内摩擦角 > 水位 > 地震系数 > 粘聚力 > 重度。

关键词:马河崩塌体;均匀设计;灰关联分析;敏感性分析

中图分类号:TV223

文献标识码:A

Sensibility analysis of stability of Mahe deposit slope

ZHANG Chuchu, SUN Shaorui, WANG Shuai, TANG Kai
(Institute of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Lenggu hydropower station is located in alpine valley region of Yalong River. Due to the complex geological environment, the stability problem is sever and it is influenced by numerous factors. With slope safety factor chosen to be the index, the unit weight, cohesion, internal friction angle, water level and seismic coefficient were selected to be the factors. Then, the numerical experiments based on uniform design were done and the results were analyzed with grey correlation theory. The result show that the sequence of magnitude of correlation with slope stability is : internal friction angle > water level > seismic coefficient > cohesion > unit weight.

Key words: Mahe deposit slope; uniform design; grey correlation analysis; sensibility analysis

在边坡稳定性分析中,时常要对影响边坡稳定的各因素进行敏感性分析,以确定其在特定环境下对边坡稳定的影响程度,从而为边坡工程进行有针对性的设计、施工、监测、治理等提供依据。一般的敏感性分析主要采用单因子分析法,如杨春发,周文斌利用单因子分析法对刚果(金)SICO-MINES 铜钴矿矿区边坡进行了敏感性分析^[1]。但这种方法的前提假设与实际有较大出入,存在明显的局限性。之后又有人提出了基于正交设计的敏感性分析。莫晓华,赵双祥^[2]利用正交设计对软弱夹层岩质边坡的影响因素进行了分析,取得良好的效果;倪恒^[3]等讨论了正交设计在滑坡敏感性分析中的应用。但正交设计只适用于水平数不多的试验中^[4]。本文采用基于均匀设计的灰关联分析^[5]对楞古水电站马河崩塌体边坡进行敏感性分析。近年来,随着灰色理论的不完善与发

展,灰色理论和方法被越来越多地应用于工程实践^[6-8],但其算例多是简单的土质边坡模型,非实际工程,且未考虑地震因素对边坡稳定性的影响。因此,本文将地震因素纳入影响因素中,以雅砻江楞古水电站马河崩塌体边坡为例,讨论了基于均匀设计和灰关联理论的边坡敏感性分析方法在实际工程中的应用。

1 工程概况

楞古水电站位于雅砻江干流中游河段上,为典型的高山峡谷地形,两岸山体雄厚,谷坡陡峭,地形高差大,临江坡高超过 500 m。该河段基岩主要为三叠系变质砂板岩和少量的花岗岩侵入体,第四系松散堆积物主要沿右岸阶地和大型冲沟分布,厚度较大,分布范围较广。河段冲沟较发育,沟内堆积有大量泥石流、碎石崩塌体等松散堆积

物。由于工程区岸坡高耸陡峻,相对高差大,加之风化卸荷影响,岸坡稳定问题突出。根据现场勘察报告,马河崩塌体边坡现整体虽处于稳定状态,但在边坡前缘发现局部塌滑现象。

马河崩塌体地形较简单,地势较两边低,呈下凹的簸箕形。滑坡体整体呈瀑布状,坡度自上而下较为均一,约为 $30^\circ \sim 35^\circ$ 。由于为岩石崩塌堆积形成,前缘较不规则。崩塌体物质主要为崩塌的碎石块,表面土石胶结良好,内部存在架空层,架空层碎石块松散堆积。崩塌体所在的区域冲沟较为发育,其中一小部分是泥石流沟,一般这些较大的冲沟延伸长,切割深度大,有的甚至达到十几米,崩塌体附近冲沟中分布的块石粒径大小较为统一,岩石有轻微磨圆。崩塌体所在边坡为变质砂岩反倾边坡。根据边坡的风化特征,将边坡岩体分为四层,分别是微风化的基岩,弱风化的变形岩体,强风化的变形岩体以及表层松散堆积体。各层岩体的物理力学参数取值如表1所示。

针对马河崩塌体边坡特点,考虑工程的蓄水要求以及所处地区的抗震设防烈度(VIII度),选择岩体重度、粘聚力、内摩擦角、蓄水前后水位以及地震动参数作为边坡稳定性的影响因子。表2为工程场地设计地震动参数。

2 均匀设计

2.1 均匀设计表的构造

均匀设计表的构造方法很多,最常用的是好格子点法,具体方法是:

确定试验数 n ,寻找比 n 小且与 n 的最大公约

数为1的整数 h 。将符合该条件的正整数组成一个向量 $h = (h_1, h_2, \dots, h_m)$,称为生成向量。

均匀设计表的第 j 列由下法生成:

$$u_{ij} = ih_j [\text{mod}n]$$

式中, $[\text{mod}n]$ 表示同余运算,若 ih_j 超过 n ,则用它减去 n 的一个倍数,使其差落在 $[1, n]$ 中。 u_{ij} 可以通过递推来生成:

$$u_{ij} = h_j$$

$$u_{i+1,j} = \begin{cases} u_{ij} + h_j, & u_{ij} + h_j \leq 0 \\ u_{ij} + h_j - n, & u_{ij} + h_j > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

2.2 设计过程

确定岩石重度(γ)、粘聚力(C)、内摩擦角(φ)、水位(H)、地震动参数作为试验因素,其中地震动参数按地震系数(α)考虑。边坡的安全系数 K 作为试验指标。值得注意的是,由于马河崩塌体边坡是由松散堆积体、强变形岩体、弱变形岩体和基岩四种不同物理力学参数的物质组成,理论上选择影响因子时需分别考虑,但实际上在同一边坡中,不同层岩体的同一参数指标变化应当具有一致性,即若基岩的重度增大,由其风化所得的强、弱变形岩体的重度也应相应增大。本文仅选取基岩的参数作为影响因子,而堆积体、强变形岩体和弱变形岩体的参数水平取值根据基岩参数水平取值的变化而近似等比例变化,这样既可以避免不同岩体的同一参数指标变化不一致而对因素的关联分析产生干扰,又有效地减少了试验次数。表3为试验因素的范围和水平。

表1 边坡组成物质的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanics parameters of slope composition material

岩土体	湿重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	饱和重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ $^\circ$
堆积体(碎石土)	20.00	21.00	40.00	35.00
变形岩体(强)	21.00	22.00	70.00	38.00
变形岩体(弱)	26.00	27.00	300.00	45.00
基岩(微)	27.00	28.00	800.00	50.00

表2 场地设计地震动参数

Tab.2 Designing seismic dynamic parameters of the site

概率水平	地震系数 K	放大系数 β_m	地震影响系数 最大值 α_{\max}	特征周期 T_g	衰减系数 c
50年63%	0.056	2.5	0.100	0.45	0.97
50年10%	0.167	2.5	0.418	0.50	1.02
50年5%	0.224	2.5	0.560	0.50	1.02
100年2%	0.393	2.5	0.983	0.55	1.07

表3 试验因素水平表

Tab.3 Experimental factor level table

水平	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $/\circ$	地震系数	水位 H/m
1	22	600	45	0.056	2400
2	23	640	46	0.167	2479
3	24	680	47	0.224	-
4	25	720	48	0.393	-
5	26	760	49	-	-
6	27	800	50	-	-
7	28	840	51	-	-
8	29	880	52	-	-

表4 均匀设计表

Tab.4 Uniform design

试验号	因素				
	1	2	3	4	5
1	3	2	3	4	1
2	2	5	8	3	1
3	8	3	5	1	1
4	6	7	6	4	2
5	1	6	4	1	2
6	4	1	7	2	2
7	5	8	2	2	1
8	7	4	1	3	2

表5 均匀设计计算结果

Tab.5 Calculation result of uniform design

试验号	因素					安全系数
	1 重度 $/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	2 粘聚力 $/\text{kPa}$	3 内摩擦角 $/\circ$	4 地震系数	5 水位 $/\text{m}$	
1	24	640	47	0.393	2 400	0.854
2	23	760	52	0.224	2 400	1.054
3	29	680	49	0.056	2 400	1.027
4	27	840	50	0.393	2 479	0.933
5	22	800	48	0.056	2 479	1.046
6	25	600	51	0.167	2 479	1.040
7	26	880	46	0.167	2 400	0.948
8	28	720	45	0.224	2 479	0.881

本次试验共设置 8 水平因素 4 个,4 水平因素 1 个,2 水平因素 1 个,试验次数定为 8 次,采用混合水平设计。试验表由数据处理系统(DPS)生成^[9],表 4 为本文采用的均匀设计表。

根据上表代入边坡的各项影响因素,利用 SLIDE 软件采用简化 Bishop 方法进行边坡稳定性计算,得出边坡安全系数 K 作为试验指标。如第一次试验,各项因素 1(重度)、2(粘聚力)、3(内摩擦角)、4(地震系数)、5(水位)的水平分别取 3、2、3、4、1,对照表 3,即重度取 $24 \text{ kN}/\text{m}^3$,粘聚力取 640 kPa ,内摩擦角取 47° ,地震系数取 0.393 ,水位

取 $2\,400 \text{ m}$,计算在该条件下的边坡安全系数。表 5 为均匀设计计算结果。

3 灰关联分析

3.1 关联系数与关联度

若经数据变换的母数列为 $\{x_0(t)\}$,子数列为 $\{x_i(t)\}$,则在时刻 $t=k$ 时, $\{x_0(t)\}$ 与 $\{x_i(t)\}$ 的关联系数 $\varphi_{0i}(k)$ 可以用下式进行计算:

$$\varphi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (2)$$

式中: $\Delta_{0i}(k)$ - k 时刻两个序列的绝对差,即 Δ_{0i}

$(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$; Δ_{\min} - 各个时刻的绝对差中的最小值; Δ_{\max} - 各个时刻的绝对差中的最大值; ρ - 分辨系数, 其作用在于提高关联系数之间的差异显著性, 取值在 0 ~ 1 之间, 一般取 0.5, 本文中为提高关联系数之间的差异显著性, ρ 取 0.1。

两序列的关联度用两比较序列各个时刻关联系数的平均值来计算, 即:

$$r_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varphi_{0i}(k) \quad (3)$$

式中: r_{0i} 为子序列 i 和母序列 0 的关联度; N 为序列的长度, 即数据个数。

在进行边坡因素的关联性分析时, 由于不存在时间序列, 故上式简化为:

$$r_{0i} = \frac{1}{N} \sum \varphi_{0i} \quad (4)$$

3.2 数据处理与分析

(1) 数据预处理。由于系统中各因素量纲不一致, 且数值的数量级相差较大, 因此在进行关联度分析前需对数据进行无量纲化处理, 避免造成非等权情况, 常用的无量纲化方法有初值化、均值

化、区间值化、归一化等。本文采用均值化处理, 具体方法是把所有因素各水平数据取平均值, 再用各个数据去除这个平均值, 得到一个新的数列, 新数列中各个值的大小反映了各因素的变化幅度。表 6 为均值化处理之后的数据表。

(2) 计算关联系数和关联度。将表 6 数据代入上述公式进行计算, 得出各因素各水平值关于边坡安全系数的关联系数, 再取平均值即得出各因素与边坡安全系数之间的关联度, 计算结果见表 7。

(3) 灰关联分析。由于关联系数受数据变换方式、数列长度、分辨系数等因素的影响, 因此即使是同一组数列得到的关联度也并不唯一, 因此关联度数值本身的多少并不是关键, 而各因素关联度大小的排列顺序更为重要, 称为关联序。由表 7 可知, 影响马河崩塌体边坡稳定性的因素与其安全系数之间的关联序为内摩擦角(φ) > 水位(H) > 地震系数(k) > 粘聚力(C) > 重度(\square)。故边坡组成物质的内摩擦角是本次试验中的优势因素。其次, 水库蓄水对边坡的稳定性具有较大影响, 具体

表 6 均值化数据表

Tab.6 Normalized data

试验号	因素					安全系数
	1	2	3	4	5	
1	0.941	0.865	0.969	1.871	0.984	0.878
2	0.902	1.027	1.072	1.067	0.984	1.083
3	1.137	0.919	1.010	0.267	0.984	1.055
4	1.059	1.135	1.031	1.871	1.016	0.959
5	0.863	1.081	0.990	0.267	1.016	1.075
6	0.980	0.811	1.052	0.795	1.016	1.069
7	1.020	1.189	0.948	0.795	0.984	0.974
8	1.098	0.973	0.928	1.067	1.016	0.905

表 7 关联系数与关联度计算结果

Tab.7 Calculation of correlation coefficient and correlation degree

试验号	因素关联系数				
	1	2	3	4	5
1	0.647 11	0.939 12	0.552 49	0.796 42	0.512 87
2	0.375 51	0.677 29	0.954 00	0.908 77	0.530 08
3	0.581 82	0.446 65	0.728 96	0.418 66	0.616 05
4	0.528 76	0.382 38	0.614 80	0.504 16	0.672 62
5	0.338 17	0.999 47	0.570 55	0.516 11	0.666 10
6	0.561 04	0.294 87	0.903 07	0.582 56	0.693 11
7	0.728 40	0.335 37	0.841 50	0.878 50	0.967 84
8	0.360 97	0.631 42	0.865 44	0.404 42	0.501 56
关联度	0.515 22	0.588 32	0.753 85	0.626 20	0.645 03

表现为当库水位由 2 400 m 高程升高至正常蓄水位 2 479 m 高程时,边坡的破坏概率大大增加。分析其原因可能是水位上升导致边坡坡角被浸没,降低坡角岩体粘聚力的同时还加强了对岸坡的侵蚀作用,从而加速了坡角处岩体的塌滑;地震系数对边坡的影响与水位相差无几,因此地震也是影响马河崩塌体稳定性的重要因素。由于马河崩塌体边坡表面岩体本身较松散破碎,地震产生的水平向动力加速度,可能导致边坡表面的堆积体沿坡面发生滑塌,甚至可能产生涌浪的危险。工程区的抗震设防烈度为 VIII 度,因此需慎重考虑地震作用的影响,做好抗震设计;另外,从关联度来看,边坡组成岩体的粘聚力和重度变化对边坡稳定性的影响较小。将此结果与其他学者对边坡敏感性的研究结果对比发现,在不同的工程背景下,即使取相同的影响因子,其对边坡稳定性影响的大小关系不尽相同,说明边坡稳定性对各因素的敏感程度受其所处的具体环境控制,但具体关系仍无定论。

4 结论

1) 采用均匀设计对楞古水电站马河崩塌体边坡进行敏感性分析,在确保准确性的基础上大大减少了试验次数。

2) 各因素对边坡稳定性的影响大小依次为内摩擦角 > 水位 > 地震系数 > 粘聚力 > 重度,因此在进行边坡治理时应当加强水库蓄水前后边坡的监测工作,避免水位上升对边坡产生不利影响;另外,充分考虑当地抗震设防烈度,合理设计,采用

合适的加固支护手段,确保边坡的稳定性。边坡稳定性对各影响因素的敏感程度在不同条件下差别较大,与其所处的环境有关,具体关系有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨春发,周文斌. 刚果(金) SICOMINES 铜钴矿矿区边坡敏感性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(1): 148 - 151.
- [2] 莫晓华,赵双祥. 基于正交设计的软弱夹层岩质边坡影响因素分析[J]. 北方交通, 2014(10): 66 - 68.
- [3] 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.
- [4] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [5] 易德生,郭萍. 灰色理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [6] 闫计瑞,刘海,王强. 灰色理论在偏压连拱隧道中的应用[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(3): 75 - 77.
- [7] 井培登,范付松,宋义亮,等. 基于均匀设计的边坡敏感性灰色关联分析[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(2): 116 - 118.
- [8] 陈高峰,卢应发,陈龙,等. 基于均匀设计的边坡敏感性灰色关联分析[J]. 水力发电, 2010, 36(4): 20 - 22.
- [9] TANG Qiyi, ZHANG Chuanx. Data Processing System (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data Mining developed for use in entomological research[J]. Insect Science, 2013(20): 254 - 260.
(责任编辑 王利君)
- [10] 栾茂田,李顺群,杨庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 611 - 615.
- [11] VAN GENUCHTEN M TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [12] 付宏渊,曾铃,王桂尧,等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2359 - 2365.
- [13] 张芳枝,陈晓平. 非饱和堤岸的渗流特征及其稳定性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1561 - 1567.
- [14] 中仿科技公司. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [15] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379 - 392.
(责任编辑 李军)

(上接第 42 页)

- [9] WANG HUABIN, LI JIWEI. Analytical Solutions to the One - Dimensional Coupled Seepage and Deformation of Unsaturated Soils with Arbitrary Nonhomogeneous Boundary Conditions [J]. TRANSPORT IN POROUS MEDIA, 2015, 108(2): 481 - 496.
- [10] 栾茂田,李顺群,杨庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 611 - 615.
- [11] VAN GENUCHTEN M TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.

- [12] 付宏渊,曾铃,王桂尧,等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2359 - 2365.
- [13] 张芳枝,陈晓平. 非饱和堤岸的渗流特征及其稳定性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1561 - 1567.
- [14] 中仿科技公司. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [15] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379 - 392.
(责任编辑 李军)