

堰塞坝稳定性快速评估模型

——以小岗剑(上)堰塞坝为例

石振明^{1,2},程世誉^{1,2},张清照^{1,2},薛丹璇³

(1. 同济大学 土木工程学院 地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300110)

摘要: 为了对堰塞坝的稳定性快速作出定量评价,通过分析历史案例并进行相关性分析,选取堰塞坝坝长、坝宽、坝高、回水长度、库容量作为堰塞坝稳定性评价因素,并进行主成分分析。将单一变量按照主成分大小及权重进行组合,得到坝高因子,高宽比,水流冲击系数,湖面形状系数,坝体形状系数五个复合因素,在此基础上提出一种定量分析堰塞坝稳定性的快速评估模型,同时引入稳定性系数来反映堰塞坝的稳定程度,进行等级划分,并对汶川大地震中形成的小岗剑(上)堰塞坝应用模型进行评估。结果表明所提出的模型判定准确率达89.9%,可以为堰塞坝应急处理提供参考。小岗剑(上)堰塞坝判定为不稳定,需及时采取泄流措施避免灾害损失。

关键词: 堰塞坝溃决;快速评估模型;稳定性系数

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)02—0095—06

A Fast Model for Landslide Dams Stability Assessment: A Case Study of Xiaogangjian (Upper) Landslide Dam

SHI Zhenming^{1,2}, CHENG Shiyu^{1,2}, ZHANG Qingzhao^{1,2}, XUE Danxuan³

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300110, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the stability of landslide dams quickly, the length, width, height, back-water length and reservoir capacity of the dam were selected as the evaluation factors of the stability of landslide dams through the analysis of historical cases and correlation analysis. Then the principal component analysis was carried out to choose the most influential factors. Evaluation factors are combined according to the size and weight of the principal component to get five composite factors as dam height factor, height-width ratio, flow impact coefficient, lake surface shape factor and dam body shape factor. On this basis, a rapid assessment model for quantitative analysis of dam stability is proposed. Besides, stability coefficient is introduced to reflect and classify the degree of the stability of dam. This model is applied to the evaluation of Xiaogangjian (upper) landslide dam which is formed in Wenchuan Earthquake. Results indicate that the accuracy of the model proposed is 89.9%, which can provide a reference for the emergency treatment of the landslide dams. The result shows that Xiaogangjian (upper) landslide dam is unstable, so quick discharge is necessary to avoid disaster losses.

Keywords: landslide dam breach; assessment model; stability coefficient

收稿日期:2019-11-25

修稿日期:2019-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41731283)

作者简介:石振明(1968—),男,辽宁喀左人,教授,博士生导师,主要从事地质灾害与环境工程研究方面的教学与研究工作。

E-mail:shi_tongji@tongji.edu.cn

通讯作者:张清照(1982—),男,河南新郑人,助理研究员、硕士生导师,主要从事岩土力学与工程等方面的教学与研究工作。

E-mail:zqz0726@163.com

堰塞坝是由火山喷发物、滑坡体、泥石流、冰川堆积物等失稳体横向阻塞河谷形成的天然坝体。堰塞坝坝体的溃决模式主要有 3 种:漫顶溢流、管涌、坝坡失稳。堰塞湖蓄水后,上下游产生水头差,在坝体内形成渗流。当堰塞湖水位低于坝顶时,堰塞坝在渗流力作用下,可发生坝坡失稳和管涌破坏。当堰塞湖水位高于坝顶时,水流冲刷坝体,导致坝体逐渐破坏,即漫顶溢流。堰塞坝可在短时间内发生漫顶溃决^[1-2],造成巨大的生命财产损失。1933 年四川叠溪和 1950 年西藏墨脱,均因堰塞坝溃决造成上千人死亡^[3]。2008 年汶川地震形成 257 个大小堰塞湖,威胁总人口达 130 万人^[4]。对不稳定的堰塞坝未及时采取有效的防治手段会对流域内的生命财产安全造成巨大的威胁。而另一方面,对稳定的堰塞坝采取过于保守的处理措施则会造成不必要的资源浪费。

堰塞坝形成初期,有关坝体的工程地质、水文气象与结构特征等相关资料和信息欠缺,同时受应急治理的时间限制,该阶段通常采用经验方法对堰塞坝的稳定和安全进行快速评估^[5],根据历史上发生的一些堰塞坝案例,选取其中的一些主要控制因素,通过统计拟合分析来预测堰塞坝是否稳定。

在定性分析研究方面,崔鹏等^[6]选定坝高、物质组成和堰塞湖的库容作为判定堰塞湖危险级别的 3 个指标,并给出危险性分级标准表,建立单个堰塞湖溃决风险评估方法,把堰塞湖溃决风险分为极高危险、高危险、中危险和低危险四个等级,对照分级标准可以快速评定堰塞坝危险等级。堰塞湖风险等级划分标准^[7]根据堰塞湖可能最高水位对应的库容将堰塞湖的规模简单划分为大型、中型、小(1)型和小(2)型,并结合堰塞体物质组成和堰塞体高度将堰塞体危险级别划分为四个等级。定性分析方法考虑的因素有限,堰塞湖处理条件、汇水面积、水位上涨速度、宽高比、异常渗流、岩基条件等因素未考虑,导致快速评价仍存在不准确性。而且堰塞坝的溃决大多不是一溃到底,如唐家山堰塞坝。以库容量作为因素之一,使评估结果偏于保守。

在定量分析研究方面,Casagli 等^[8]提出堆积指数 I_b (Blockage Index) 和回水指数 I_i (Impoundment Index),发现这两个参数越大,堰塞湖越稳定。其中 I_i 的规律性较好,统计样本中的堰塞坝体稳定,则满足 $I_i > 0$,坝体不稳定,则 $I_i < 0$ 。Ermini 等^[9]根据 84 座堰塞坝资料的统计分析,对堆积体指数法进行修正,利用无量纲堆积指数 (DBI) 来评估堰塞坝的

稳定性。该指数加入坝高这一变量,一方面,坝高影响坝体下游坡度、漫顶时水流速度和冲蚀程度;另一方面,它控制了坝前水位和坝体内水力比降,对坝体的渗流稳定性影响较大。黄来源等^[10]利用 DBI 成功评估了四川什邡青牛沱崩塌群形成的堰塞坝的整体稳定性。但 Korup^[11]在分析新西兰的堰塞坝时发现, I_b 、 I_i 和 DBI 这三个参数并不能很好的区分坝体稳定与否。上述研究表明 DBI 这种方法的适用具有一定的区域局限性。Hu 等^[12]采用瑞典条分法计算堰塞坝在不同上下游水位、不同地震荷载等条件下的稳定性,但瑞典条分法不考虑条间作用力,忽略了渗流的影响。年廷凯等^[13]根据坝长、坝宽和堰塞湖库容提出三参数快速评估方法,但选取的参数相对有限。

现有的堰塞坝稳定性评估研究,选取的因素较少,且受区域条件等因素的限制较大。因此,本文从多个评价因素中利用相关性分析选出具有代表性的因素,进行主成分分析建立新变量,提出一种堰塞坝稳定性快速评估模型。实现在较短的时间内,基于易测量、易获取的相关参数,对堰塞坝的稳定性快速作出定量评价,以便于采取相应应急处理措施,消除堰塞湖潜在风险和隐患,避免产生二次灾害。本文以汶川大地震中形成的小岗剑堰塞坝为例,对模型加以应用验证,进行稳定性分析。

1 小岗剑(上)堰塞坝介绍

四川省绵竹市小岗剑(上)堰塞坝是汶川大地震造成的堰塞坝之一,因清平乡下游约 6 km 的绵远河右岸岩质岸坡发生大规模滑坡阻塞河道形成。小岗剑(上)堰塞坝位于绵竹市绵远河小岗剑电站上游约 300 m 处,地理位置为东经 104. 139 80°,北纬 31. 493 02°。堰塞湖库容约 1 100 万 m^3 ,回水长度 4 000 m。堰塞湖河段谷坡高陡,河谷狭窄,为典型的“V”形谷,河道流向整体呈 SN 向。堰塞体高约 70 m ~ 120 m,顺河向长约 300 m,横河向长约 250 m,总方量约 200 万 m^3 。坝顶距滑坡后缘高差约 300 m。堰塞体横河向总体左岸低、右岸高,呈鼓丘状横亘在绵远河上,地形坡度可以分为 3 段:左侧堰体段宽约 50 m,地形平缓,坡度 2° ~ 5°;中间段堰体宽约 120 m,地形坡度 18° ~ 20°;右段堰体宽约 100 m,地形平缓,坡度 0° ~ 5°^[14-17]。其主要物质组成为孤、碎块石,岩性为白云岩、白云质灰岩,岩质坚硬,弱风化为中。堰塞体结构杂乱,架空明显,原始岩体结构已完全解体。

小岗剑堰塞湖库容量大,堰塞体较高,且堰塞体单薄,下游地形较陡,大流量、高速度冲刷可能导致堰塞坝局部垮塌,进而导致溃决的可能性极大,对下游汉旺镇以及绵远河沿线的城镇造成巨大威胁。但坝体几何参数、堰塞湖库容等多个因素与堰塞坝的稳定性都有紧密联系,故先通过分析堰塞坝历史案例各相关参数的情况,确定各影响因素作用下堰塞坝稳定性的计算公式,再利用该判定公式,根据小岗剑(上)堰塞坝的实际参数数值,进行小岗剑(上)堰塞坝的稳定性分析验证。

2 堰塞坝稳定性评估因素选取

影响堰塞坝稳定性的因素多种多样,且很多因素并非独立存在,彼此之间具备相关性。需对各个影响因素作相关性分析,从中选取具有代表性的因素。

2.1 相关性分析

Pearson 简单相关用于衡量两个数据是否存在线性相关关系,其相关系数计算公式为^[18]:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中: r 是相关系数; n 是样本观测测量数。 $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别是 n 个数据的均值。相关系数 r 的取值范围为 $[-1, 1]$ 。 $|r|$ 越接近 1,则表明 X 与 Y 线性相关程度越高。若 $r = 1$,表明 X 和 Y 之间为完全正线性相关的关系;若 $r = -1$,表明 X 和 Y 之间为完全负线性相关的关系;若 $r = 0$,表明 X 和 Y 之间不存在线性相关关系。

本文选取堰塞坝能快速且定量获取的稳定性影响因素,包括坝体体积、坝长、坝宽、坝高、回水长度、库容量。对这些因素进行 Pearson 相关性分析,从而选取相对独立的评估因素,得到的结果如表 1 所示。

表 1 简单相关系数						
影响因素	坝体 体积	坝高	坝长	坝宽	回水 长度	库容
坝体体积	1.000	0.715	0.731	0.767	0.471	0.747
坝高	0.715	1.000	0.498	0.582	0.395	0.733
坝长	0.731	0.498	1.000	0.477	0.360	0.643
坝宽	0.767	0.582	0.477	1.000	0.468	0.612
回水长度	0.471	0.395	0.360	0.468	1.000	0.757
库容	0.747	0.733	0.643	0.612	0.757	1.000

表 1 为各影响因素之间的 Pearson 简单相关系数数值,数值越大表示两个变量之间的相关性越强。

通过表 1 可知坝体体积与坝高、坝长、坝宽、库容相关系数均位于 0.7~0.8 之间,表明坝体体积与其他四个因素均有强相关关系,应避免坝体体积与坝高、坝长、坝宽、库容进行组合。故以下稳定性分析不考虑坝体体积,选取其他五个因素进行研究。

2.2 主成分分析

主成分分析是把原来多个变量化为少数几个综合指标的一种统计分析方法,通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量。其原理可表述为假定有 n 个样本,每个样本共有 p 个变量,构成一个 $n \times p$ 阶的资料矩阵^[19-20]:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & L & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & L & x_{2p} \\ M & M & O & M \\ x_{n1} & x_{n2} & L & x_{np} \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过变换将原变量指标 $x_1, x_2, \dots, x_p$ 转换为综合指标 $z_1, z_2, \dots, z_m (m \leq p)$ 为新变量指标:

$$\begin{cases} z_1 = l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + L + l_{1p}x_p \\ z_2 = l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + L + l_{2p}x_p \\ L \\ L \\ L \\ z_m = l_{m1}x_1 + l_{m2}x_2 + L + l_{mp}x_p \end{cases} \quad (3)$$

新变量指标 $z_1, z_2, \dots, z_m$ 分别称为原变量指标 $x_1, x_2, \dots, x_p$ 的第 1, 第 2, $\dots$, 第 m 主成分。每个主成分都能够反映原始变量的大部分信息,且所含信息互不重复。信息的大小通常用离差平方和或方差来衡量。

本文选取坝长、坝宽、坝高、回水长度、库容量五个因素进行主成分分析。主成分分析之前先对数据进行 KMO 和 Bartlett 检验以确定数据是否适合进行主成分分析。KMO 检验用于考察变量间的偏相关性,取值在 0~1 之间。KMO 统计量越接近于 1,变量间的偏相关性越强,因子分析的效果越好。Bartlett 球形检验判断如果相关阵是单位阵,则各变量独立因子分析法无效^[21]。检验结果如表 2 所示。KMO 统计量为 0.739,说明变量具有相关性;Bartlett 球形检验卡方值 168.641,显著性 P 为 0.000,达到极显著水平。两种检验都表明,该数据适合进行主成分分析。

主成分特征值和主成分贡献率如表 3 所示。特征值的大小代表了矩阵正交化之后所对应特征向量对于整个矩阵的贡献程度。选取特征值大于 0.5 的前三个主成分,第一主成分的特征值为 2.887,说明其影响力度较大,第二、第三主成分特征值小于 1,

说明影响力度相对较小。

第一主成分解释率为 57.7%,其重要性远大于其余主成分,但不能充分包含所有信息,因此,将第二、第三主成分纳入分析范围,共同解释总方差的 88.03%,说明三个主成分综合原始变量的信息的能力很强。

主成分荷载是主成分分析中原始变量与主成分之间的相关系数。计算各主成分的荷载值得到结果如表 4 所示。

表 2 KMO 和 Bartlett 的检验结果

取样足够度的 Kaiser – Meyer – Olkin 度量	0.739	
Bartlett 的球形度检验	近似卡方	168.641
	Sig.	0.000

表 3 主成分特征值和主成分贡献率

成分	初始特征值	初始特征值方差/%	初始特征值累积方差/%	提取平方和载入合计	提取平方和载方方差%	提取平方和载入累积方差/%
1	2.887	57.733	57.733	2.887	57.733	57.733
2	0.840	16.810	74.543	0.840	16.810	74.543
3	0.674	13.490	88.033	0.674	13.490	88.033
4	0.391	7.819	95.852	—	—	—
5	0.207	4.148	100.000	—	—	—

表 4 主成分荷载值

影响因素	不同主成分荷载值		
	1	2	3
坝高	0.829	-0.239	-0.098
坝长	0.689	0.022	0.703
坝宽	0.722	-0.478	-0.322
回水长度	0.598	0.739	-0.258
库容	0.920	0.094	-0.019

表 4 为三个主成分的荷载值,数值的正负表示影响方向,荷载值的绝对值越大表示变量对主成分影响的强度越大。通过分析表 4 中荷载值的绝对值可知,在第一主成分中占据主要影响的三个变量是库容、坝高和坝宽,在第二主成分中占据主要影响的是回水长度和坝宽,在第三主成分中占据主要影响的是坝长和坝宽。由于第一主成分重要性远大于第二、第三主成分,故坝高、坝宽和库容的重要性也远远大于坝长和回水长度。

3 堰塞坝稳定性评估模型

3.1 逻辑回归方法

本文采用二元逻辑回归模型讨论堰塞坝的稳定

性,对定性因变量进行回归分析^[22]。

二元逻辑回归模型的因变量 y 是只取 0、1 两个值的定性变量,因变量与自变量的关系通常是 S 型曲线关系。

通常把出现某种结果的概率与不出现的概率之比称为比值,即 $odds = \frac{\pi}{1 - \pi}$, 取其对数 $\lambda = \ln(odds) =$

$\ln \frac{\pi}{1 - \pi}$ 。这就是 logit 变换。通过变换,Logit(π) 的取值范围就被扩展为整个实数域,这使得在任何自变量取值下,对 π 值的预测均有实际意义,并可以通过该变换将曲线直线化。因此,只需要以 Logit(π) 为因变量,建立包含 p 个自变量的 logistic 回归模型如下:

$$Z = \text{logit}(P) = \beta_0 + \beta_1x_1 + L + \beta_px_p \tag{4}$$

式中: P 为某种结果的概率; $x_1, x_2 \cdots x_p$ 为自变量。

以上即为 logistic 回归模型。由式(4) 可推得:

$$P = \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)} = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1x_1 + L + \beta_px_p)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1x_1 + L + \beta_px_p)} \tag{5}$$

P 与 Z 之间的关系如图 1 所示。

用二元逻辑回归模型讨论堰塞坝稳定性,因变量稳定与否用 P 值表示,其中, $P = 0$ 代表不稳定, $P = 1$ 代表稳定,在运算过程中,当 $0.5 < P \leq 1$,即 $Z > 0$ 时,判断堰塞坝为稳定;当 $0 < P \leq 0.5$,即 $Z \leq 0$ 时,判断堰塞坝为不稳定,将 Z 定义为堰塞坝稳定性系数。

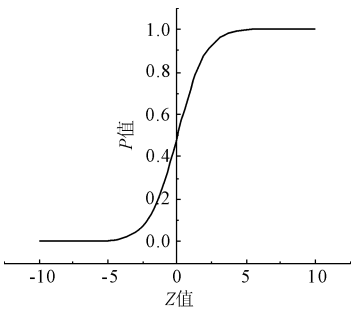


图 1 $P - Z$ 函数关系图

3.2 单因素逻辑回归模型

单因素逻辑回归模型把每个因素单独作为评估的变量之一。分别建立三变量逻辑回归模型和五变量逻辑回归模型,对整理得到的 79 例堰塞坝案例是否溃决进行判定。

3.2.1 三变量逻辑回归模型

选取第一主成分的三个因素坝高、坝宽、库容建立三变量回归模型,得到模型方程:

$$Z = 0.348\ln H_d + 0.254\ln W_d - 0.654\ln V_l - 3.410$$

(6)

式中: $\ln H_d$ 为取对数后的坝高; $\ln W_d$ 为对数化后的坝宽; $\ln V_l$ 为对数化后的堰塞湖库容量。利用公式(6)对数据库中的案例进行稳定性评估并与实际情况对照,模型判断正确率如表5所示。通过表5可知,三变量回归模型对不稳定案例的预测结果正确率为91.7%,对稳定案例的预测结果正确率为26.3%,预测结果整体正确率为75.9%。

表 5 三变量模型判断正确率

因素	预测不溃坝 0.00	预测溃坝 1.00	百分比校正/%
观测不溃坝 0.00	55	5	91.7
观测溃坝 1.00	14	5	26.3
总计百分比			75.9

3.2.2 五变量逻辑回归模型

三变量逻辑回归模型准确度不高,不能全面的表征堰塞坝影响稳定性的各个因素,采用全部五变量得到的回归模型方程为:

$$Z = 0.435\ln H_d + 0.076\ln L_d + 0.501\ln W_d + 1.352\ln L_l - 1.122\ln V_l - 15.568$$

(7)

式中: $\ln H_d$ 为取对数后的坝高; $\ln L_d$ 为对数化后的坝长; $\ln W_d$ 为对数化后的坝宽; $\ln L_l$ 为对数化后的回水长度; $\ln V_l$ 为对数化后的堰塞湖库容量。

模型判断正确率如表6所示。由表6数据可知五变量模型对不稳定案例的预测正确率为95.0%,对稳定案例的预测正确率为36.8%,预测结果整体正确率为81.0%,正确率高于三变量逻辑回归模型。分析原因可能为选取的变量越多,包含的信息越多,可更全面的判断堰塞坝稳定与否。

表 6 五变量模型判断正确率

因素	预测不溃坝 0.00	预测溃坝 1.00	百分比校正/%
观测不溃坝 0.00	57	3	95.0
观测溃坝 1.00	12	7	36.8
总计百分比			81.0

单一因素逻辑回归模型在不稳定堰塞坝的判断上正确率很高,但在稳定型堰塞坝的判断上,正确率不足40%。运用此逻辑回归模型判断结果过于保守,可能造成处置稳定堰塞坝导致资源的浪费。此外,该评估模型仍存在不稳定堰塞坝判断为稳定的可能性,可能会影响下游生命财产安全。

为了解决这一问题,考虑到不同影响因素对数化后的值可能不是简单的线性加减关系,不同变量之间可能存在内在联系,故采用选取复合因素来进行逻辑回归分析。

3.3 复合因素逻辑回归

对堰塞坝及堰塞湖的几何参数进行处理,得到了量纲统一的复合因素,包括坝高因子,高宽比,水流冲击系数,湖面形状系数,坝体形状系数五个定量因素。

坝高因子($\frac{H_d}{H_r}$):描述最大的水头高度或者水的势能,这里 H_r 为1 m。

高宽比($\frac{H_d}{W_d}$):描述水力梯度的大小,影响坝坡的侵蚀以及水的渗流及侵蚀速率。

水流冲击系数($\frac{L_l}{W_d}$):回水长度比坝宽,描述水流对坝体的冲击作用及坝体对水流的阻挡作用。

湖面形状系数($\frac{V_l^{\frac{1}{3}}}{H_d}$):描述堰塞坝的库容,影响溃口深度及溃坝流量。

坝体形状系数($\frac{L_d}{W_d}$):坝长比坝宽,描述坝体底部抗滑能力,影响溃决时间和坝体稳定性。

采用逻辑回归法得到的复合因素逻辑回归模型方程为:

$$Z = -1.896\ln\left(\frac{H_d}{H_r}\right) + 1.126\ln\left(\frac{H_d}{W_d}\right) - 0.113\ln\left(\frac{L_l}{W_d}\right) - 1.101\ln\left(\frac{V_l^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right) - 0.387\ln\left(\frac{L_d}{W_d}\right) + 8.766$$

(8)

模型判断正确率如表7所示。

表 7 复合因素模型判断正确率

因素	预测不溃坝 0.00	预测溃坝 1.00	百分比校正/%
观测不溃坝 0.00	63	1	98.4
观测溃坝 1.00	7	8	53.3
总计百分比			89.9

由表7可知复合因素逻辑回归模型对不稳定案例预测结果的正确率为98.4%,对稳定案例的预测结果正确率为53.3%,整体正确率为89.9%。与单一因素逻辑回归变量相比,复合因素模型在稳定堰塞坝、不稳定性堰塞坝及整体正确率上都有提升,尤其是稳定堰塞坝判断正确率达50%以上,可以比较

准确的判断堰塞坝稳定与否。

逻辑回归模型不仅可以预测堰塞坝稳定与否,还可以反映堰塞坝稳定程度。 Z 值与概率有关,根据概率的不同,可将堰塞坝稳定性划分为不同的等级。由图 1 中 S 型曲线图可知,当 $Z \leq -5$ 时,堰塞坝有 99% 的概率破坏;当 $Z \geq 5$ 时,堰塞坝有 99% 的概率保持稳定。所以,可根据稳定性系数的不同将堰塞坝稳定性划分为不同的等级,如表 8 所示。

表 8 堰塞坝等级划分

Z 值	≤ -5	$-5 \sim 0$	$0 \sim 5$	≥ 5
稳定程度	极不稳定	不稳定	稳定	极稳定

逻辑回归模型对于非稳定堰塞坝的判断率准确率明显高于稳定堰塞坝,分析原因可知,实际工程中稳定的堰塞坝案例数明显少于非稳定堰塞坝,案例数目的差距导致判断准确性有所差距,本评估模型评估结果偏于保守,但能最大程度的避免将非稳定性堰塞坝判断为稳定性堰塞坝从而危害下游人民生命财产安全的风险。

将堰塞坝各因素数值代入公式(8),得到堰塞坝稳定性系数 $Z = -1.54 < 0$,堰塞坝不稳定,会发生溃决。堰塞坝稳定性快速评估模型对不稳定堰塞坝判断正确率高达 98%,故小岗剑(上)堰塞坝判定为不稳定堰塞坝,需采取爆破泄流的应急处置措施,避免对下游造成巨大的生命财产损失。

4 结 论

(1) 采用二元逻辑回归方法,通过坝高因子、高宽比、水流冲击系数、湖面形状系数、坝体形状系数五个定量因素,建立了堰塞坝稳定性快速评估模型,并具有较高的判定准确率。

(2) 根据堰塞坝稳定性快速评估模型 Z 值的取值范围不同,将堰塞坝稳定性进行不同等级的划分,更加直观的描述堰塞坝的稳定程度大小,为堰塞坝应急处理的时间和处理措施方式提供有益的参考。

(3) 堰塞坝稳定性快速评估模型是一种定量分析方法,未能考虑堰塞坝物质组成等定性因素,且不能评估堰塞坝成群分布连溃的相互作用,仍有一定的改进空间。但总体来说,堰塞坝稳定性快速评估模型在堰塞坝稳定性评估方面具有积极的实际应用价值,其评价结果可为堰塞坝紧急处置提供一定的理论依据。

参考文献:

[1] Peng M M, Zhang L. Breaching parameters of landslide dams[J]. Landslides, 2012,9(1):13-31.

[2] Hong Y, Adler R, Verdin J. Use of 21st century satellite remote sensing technology in natural hazard analysis[J]. Natural Hazards, 2007,43(2):165-166.

[3] 聂高众,高建国,邓 砚. 地震诱发的堰塞湖初步研究[J]. 第四纪研究,2004,24(3):293-301.

[4] Cui P, Zhu Y Y, Han Y S, et al. The 12 May Wenchuan earthquake - induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation. [J]. Landslides, 2009, 6(3):209-223.

[5] 严祖文,魏迎奇,蔡 红,等. 堰塞湖天然坝安全性状评估研究[J]. 水利水电技术,2009,40(2):74-77,81.

[6] 崔 鹏,韩用顺,陈晓清. 汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估[J]. 四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):35-42.

[7] 中华人民共和国水利部,堰塞湖风险等级划分标准:SL 450—2009[S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[8] Casagli N, Ermini L. Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine [J]. Chikei, 1999, 20(3):219-249.

[9] Ermini L,Casagli N. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2003, 28(1):31-47.

[10] 黄来源,季 为. 四川什邡青牛沱崩塌群特征及其形成的堰塞坝体稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2012,23(1):39-47.

[11] Korup O. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams [J]. Engineering Geology,2004,73(1):13-35.

[12] Hu X W, Luo G, Lv X P, et al. Analysis on dam - breaking mode of Tangjiashan barrier dam in Beichuan county[J]. Journal of Mountain Science,2011,8(2):354-362.

[13] 年廷凯,吴 昊,陈光齐,等. 堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(8):1796-1812.

[14] 邱炽兴,李书健. 绵远河小岗剑(上)堰塞湖应急排险处理[J]. 水利水电技术,2008(8):36-38.

[15] 马学强,邹 俊. 绵远河流域上游堰塞湖应急排险施工[J]. 水利水电技术,2008(8):46-49.

[16] 李为乐,黄润秋,唐 川,等. 汶川地震触发的绵远河流域崩塌滑坡的特征[J]. 山地学报,2011,29(4):483-492.

确定适宜的水位下降时间过程。

(2) 水位迅速骤降至正常水位时,滑坡稳定性与暂态渗流浸润线和滑坡结构有关。计算表明,滑坡稳定性系数的变化是由大变小的。

(3) 汛期洪水会在堤身浅层非饱和区域形成暂饱和区域,当水位骤降时,这也会导致浅层填埋土的抗剪强度降低,最终导致堤防稳定性降低。

综上,即便每次水位升、降循环作用下的对堤防的损伤效果可能不是很明显,但长年累月重复作用下损伤效果可能会产生叠加发展,可能导致稳定堤防朝着不稳定方向发展。

参考文献:

- [1] 蒋正华. 城市地铁区间隧道开挖的地表沉降控制研究[D]. 成都:西南交通大学,2003.
- [2] 刘招伟. 地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):1297-1301.
- [3] 李青云,张建民. 长江堤防安全评价的理论方法和实现策略[J]. 中国工程科学,2005,7(6):7-13.
- [4] 方绪顺,钱亚俊,何 宁,等. McSEIS 多功能综合地震仪在堤防隐患探测中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(1):6-9,26.
- [5] 陈 健,黄永亮. 超大直径泥水盾构施工难点与关键技术总结[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(S2):637-644,660.
- [6] 龚云强,郭魏峰,章忠华. 大直径水平平行顶管穿堤施

工及控制[J]. 隧道建设,2011,31(1):110-113,120.

- [7] 李 明,张春进. 宁波轨道交通越江隧道盾构法施工控制技术研究[J]. 地下工程与隧道,2015(2):25-29,66.
- [8] 刘冠男,许春虎,张永凯,等. 盾构隧道施工引起海堤沉降的预测及控制[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(5):75-78.
- [9] 李明超,苗 露,刘 菲. 洪水作用下土石坝系统结构图仿真与渗流稳定性分析[J]. 应用力学学报,2014,31(1):110-115.
- [10] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils[J]. New York: Wiley,1993.
- [11] Fredlund D G, Xing A Q, Huang S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal,1994,31(3):533-546.
- [12] 郑颖人,唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2007,29(8):1115-1121.
- [13] 郑颖人,时卫民,孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(18):3203-3210.
- [14] 刘新喜. 库水位下降对滑坡稳定性的影响及工程应用研究[D]. 武汉:中国地质大学,2003.
- [15] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [16] 堤防工程设计规范:GB 50286—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.

(上接第 100 页)

- [17] 陈淑婧. 梯级土石坝连溃洪水计算模型及小岗剑堰塞湖反演分析[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2018.
- [18] 张宇镭,党 琰,贺平安. 利用 Pearson 相关系数定量分析生物亲缘关系[J]. 计算机工程与应用,2005(33):83-86,103.
- [19] 王彩鸽. 泾惠渠灌区水循环特征及其主要驱动因素研究[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(4):173-177.
- [20] 张素芳. 基于主成分分析法的咸阳市区地下水动态驱动因子分析[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(2):126-129,133.
- [21] 解 坤,张俊芳. 基于 KMO - Bartlett 典型风速选取的 PCA - WNN 短期风速预测[J]. 发电设备,2017,31(2):86-91.
- [22] 陈 啸,张 祺,杜 征,等. 逻辑回归模型在堰塞湖应急风险评估中的应用[J]. 中国农村水利水电,2014(11):86-89,97.