

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20120614. 2251. 018

超标准洪水条件下土石坝安全性应急判别分析

李 云^{1,2}, 王晓刚¹, 祝 龙¹, 宣国祥^{1,2}, 刘火箭¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 当前极端气候频发, 溃坝事件时有发生, 提出一种超标准洪水条件下快速判别土石坝安全性的方法对于提升中国防洪决策水平、提高抗洪抢险能力具有重要的意义。然而, 由于坝体结构复杂, 不确定因素众多, 超标准条件下快速判断土石坝安全性具有非常大的难度。借鉴堰塞湖天然坝安全性判别的研究方法, 将判别分析法应用于超标准洪水条件下土石坝的安全性快速判别分析, 结果证明, 该套思路是可行的。从各坝体安全性判别分析方法的预测结果来看, 判别分析法和 I_{db} 指标判别方法具有较高的判别正确率, 两种判别方法正确率均达到 90.0%, 优于其它简单指标判别方法。

关键词: 堰塞湖天然坝; 土石坝; 判别分析; 溃坝; 超标准洪水

中图分类号: TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2012)04-0516-07

受全球性气候变化影响, 中国极端天气事件明显增多, 超标准洪水灾害的突发性、反常性、不可预见性日益突出, 对水库大坝安全提出了巨大挑战。如 2010 年, 中国华南、江南地区连遭 14 轮暴雨袭击; 7 月, 北方地区连遭 5 轮暴雨袭击, 渭河、辽河、第二松花江出现严重汛情; 中国 28 个省(自治区、直辖市)遭受洪涝灾害, 农作物受灾 972.1 万 hm^2 , 受灾人口 1.4 亿人, 因灾死亡 1 072 人, 失踪 619 人, 倒塌房屋 110 万间, 直接经济损失约 2 096 亿元。水利工程水毁损失已达 400 多亿元, 较常年多 3 倍。迄今中国有记录的溃坝事件有 3 500 多起, 仅 2010 年就发生 11 起溃坝事件, 且多数为土石坝, 在此背景下, 提出一种超标准洪水条件下快速判别土石坝安全性的方法对于提升中国防洪决策水平、提高抗洪抢险能力具有重要的意义。当前, 超标准洪水条件下土石坝安全性分析尚无直接的方法, 相近的土石坝稳定性分析主要采用极限平衡法^[1], 该方法可细分为圆弧滑动法和滑楔法。对于均质坝、厚心墙或厚斜墙坝, 其滑动面往往接近圆弧, 因此采用圆弧滑动法; 而对于软弱夹层的地基以及薄心墙坝, 滑动面为折线, 坝坡稳定计算采用滑楔法。在对各种运行工况下的土石坝进行坝坡稳定分析后, 给出最小的安全系数值^[2], 从而对坝体的稳定性给出评价。李宗坤等^[3]研究了渗流场与应力场在土石坝稳定性研究中的耦合效应, 指出坝体中渗流与应力的相互作用是不可忽视的, 这种耦合作用将对土石坝的稳定性产生不利影响。孙丽丽等^[4]基于强度折减法对土石坝边坡稳定进行了分析和探讨。

以上方法涉及参数多, 计算过程复杂, 对于超标准洪水条件下洪水发生漫顶, 要求快速判别分析坝体的安全性, 这些方法通常难以适用。笔者在查阅大量资料后发现, 国内外一些学者结合天然坝(堰塞坝)的基本资料, 从数据挖掘的角度提出了一些判定天然坝安全性的方法^[5-9], 如简单指标判别法、判别分析法, 这类方法只需通过一些简单的参数就能对坝体溃决与否进行快速判定, 准确率较高。鉴于该类方法对大坝参数数据量要求低, 判断快速的特点, 同时考虑中国面广量大的诸多小型水库、塘坝基础资料匮乏, 本文拟将该类方法引入到超标准洪水条件下土石坝坝体安全性的应急判别分析上。

收稿日期: 2011-08-29; **网络出版时间:** 2012-06-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20120614.2251.018.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201001033); 科技部国际科技合作项目(S2012ZR0108)

作者简介: 李云(1962-), 男, 江苏高淳人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事水工水力学方面研究。

E-mail: yli@nhri.cn

1 简单指标判别分析法

1985年 Weidinger 等^[5]指出, 堰塞湖坝体的安全取决于坝的几何特征、内部结构、材料特性以及颗粒级配。Costa 等^[6]在1988年针对堰塞湖天然坝提出了相关的理论。认为坝体存在时间的长短(即安全与否)主要受以下因素的影响: 堆积物体积、尺寸、形状以及种类; 渗流的速度; 集水物质沉积的速度以及堰塞湖入流量的速度等。后来众多学者又提出了分析坝体安全性的几个主要变量: 坝高(H_d)、坝体积(V_d)、堰塞湖体积(V_l)、集水区面积(A_c)。提出坝体体积越大越不容易破坏; 集水面积则间接反应堰塞湖的入流量, 集水区面积越大则坝体越有破坏的趋势; 湖体积越大则坝体承受的水压力越大, 坝体破坏的可能性随机上升。1999年 Casagli 等^[7]用坝体体积分别除以集水面积及湖水体积然后取对数, 得到2个参数: 堆积指数 I_b (Blockage Index) 和回水指数 I_i (Impoundment Index), 如下式所示:

$$I_b = \lg \frac{V_d}{A_c} \quad (1)$$

$$I_i = \lg \frac{V_d}{V_l} \quad (2)$$

利用式(1)、式(2)分别对意大利67个堰塞湖进行了分析, 发现 I_b 和 I_i 越大, 堰塞湖越安全。其中 I_i 的规律性较好, 统计样本中的堰塞坝安全则满足 $I_i > 0$, 坝体不安全则 $I_i < 0$ ^[7]。

2003年 Casagli 等^[7]又提出了一个新的指标, 量纲一堆积指数 I_{DB} (Dimensionless Blockage Index)^[7], 如下式所示:

$$I_{DB} = \lg \frac{A_c H_d}{V_d} \quad (3)$$

这个指标加入了坝高这个变量, 因为坝高越高, 上下游的水头差越大, 坝体承受的压力也就越大, 安全性随之降低, 所以坝高是个非常重要的影响因素。利用这个指标对全球84个天然坝(堰塞湖坝体)进行了分析, 发现 I_{DB} 越小, 坝体越安全^[8], I_{DB} 能够较好地判别天然坝安全性。但是2004年 Korup^[8]利用 I_b 、 I_i 和 I_{DB} 3个参数对新西兰的堰塞坝分析时发现并不能很好地区分坝体安全与否。认为这些模型的适用还有一定区域性。Korup 通过分析堰塞湖资料, 结合集水区面积等也提出了3个量纲一判别指标, 具体定义如下:

$$I_s = \lg(H_d^3/V_l), I_a = \lg(H_d^2/A_c), I_r = \lg(H_d/H_r) \quad (4)$$

式中 H_r 为堵塞点至上游顶的高程差。但其最好的判别正确率仅为69%^[8], 判别效果较差。笔者分析可能其所用的原始资料(新西兰堰塞坝资料)不够准确所致。

Casagli 等^[7]、Korup^[8]均认为加入更多的地形参数及建立更大、更准确的天然坝资料库可使统计分析更有意义, 且利用多变量分析方法进行更严谨的量化分析能够更有效地判断堰塞湖天然坝的安全性。

2008年童煜翔^[6]基于判别分析法, 采用资料可信度较高的日本43座堰塞湖案例资料进行分析, 并分别采用集水区面积、坝高、坝宽、坝长4个变量以及峰值流量、坝高、坝长、坝宽4个变量建立多变量统计模型, 同时利用 Casagli 等^[7]所整理的全球84座堰塞湖资料进行模型验证, 其判别公式分别为

$$Y_d = -2.62X_1 - 4.67X_3 + 4.57X_4 + 2.67X_5 + 8.26 \quad (5)$$

$$Y_d = -2.94X_2 - 4.58X_3 + 4.17X_4 + 2.39X_5 - 2.52 \quad (6)$$

式中 Y_d 为计算所得判别得分; X_1 为集水区面积取对数; X_2 为峰值流量取对数; X_3 为坝高取对数; X_4 为坝宽取对数; X_5 为坝长取对数(变量标示结合实际情况有所修改)。两个判别公式计算所得交叉验证正确率均为86.0%, 判别正确性较高。

对于土石坝, 由于溃坝资料非常匮乏, 目前直接依据土石坝溃坝资料建立判别模型尚有一定难度。考虑到土石坝与堰塞坝之间存在较多的相似性, 本文拟首先论证堰塞坝与土石坝溃决形式、溃决动力参数的相关

一致性,并以此为基础,将基于堰塞坝的预测模型应用于超标准条件下土石坝安全性判别。同时,对各种预测模型在土石坝中应用的优劣程度进行评价。

2 堰塞坝与土石坝溃决动力参数的相似性

堰塞坝是自然作用的产物,是一种特殊形式的土石坝。虽然它的几何特征、物质组成、颗粒粒径和孔隙度等方面不同于土石坝^[9],但是他们的破坏形式与原理有着很大的相似性。

从已溃决的堰塞坝破坏的方式看,有坝顶溢流、管涌、坝坡失稳引起的破坏3种模式,其中漫顶溃决为主要原因^[9]。对于土石坝,据2010年南京水利科学研究院统计,在中国各类溃坝原因中,漫顶引起大坝溃决数量约占坝体溃决总数的47.8%^[10]。可见漫顶是堰塞坝及土石坝共同的溃决主因。

堰塞坝影响坝体安全性的几个主要变量为坝高、坝体积(含坝宽、坝长)、堰塞湖体积、集水区面积等,这些参数综合反映了坝体溃决主动力与溃决抗力,对于土石坝,采用上述参数进行分析也是适用的。为定量分析堰塞坝与土石坝相关溃坝动力参数之间的相关一致性,本文采用典型相关分析的方法对两者进行统计分析。

典型相关分析是研究两组变量之间相关关系的一种多元统计分析方法,其基本原理^[11]如下:设两组变量用 X_1, X_2, \dots, X_p 及 Y_1, Y_2, \dots, Y_q 表示,采用类似提取主成分进行主成分分析的方法,在每一组变量中都选择若干个具有代表性的综合指标(变量的线性组合),通过研究两组综合指标之间的关系来反映两组变量之间的相关关系。典型相关分析首先在每组变量中找出变量的相关组合,使其具有最大的相关性,然后再在每组变量中找出第2对线性组合,使其与第1对线性组合不相关,而第2对本身具有最大的相关性,如此继续下去,直到两组变量之间的相关性被提取完毕为止。这些综合变量被称为典型变量,或典则变量,第 i 对典型变量间的相关系数则被称为第 i 典型相关系数。一般来说,只需要提取1~2对典型变量即可较为充分地概括样本信息。

设两组变量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)'$ 及 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_q)'$ 表示(设 $p \leq q$)。设 $p + q$ 维随机向量 $Z = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$ 的协差阵为 $\sum \begin{pmatrix} \sum_{11} & \sum_{12} \\ \sum_{21} & \sum_{22} \end{pmatrix}$,其中 \sum_{11} 为 X 的协差阵; \sum_{22} 为 Y 的协差阵; $\sum_{12} = \sum_{21}$ 为 X, Y 的协差阵。

用 X 和 Y 的线性组合 U, V 之间的相关性来研究变量 X 与 Y 之间的相关性。 U, V 表达为

$$U = a'X, V = b'Y \quad (7)$$

典型相关分析试图找到向量 a, b ,使 $\rho(U, V)$ 最大,从而找到替代原始变量的典型变量 U 和 V ,其中:

$$\rho(U, V) = \frac{\text{cov}(U, V)}{\sqrt{\text{var}(U)} \sqrt{\text{var}(V)}} = \frac{a' \sum_{12} b}{\sqrt{a' \sum_{11} a} \sqrt{b' \sum_{22} b}} \quad (8)$$

本文搜集整理了10组土石坝溃坝数据资料(包括坝长、坝宽、坝高、集水面积、库容,见表1),与童煜翔^[6]搜集整理具有相当可信度的日本堰塞湖案例资料(表2),进行典型相关分析。

典型分析结果为:第一相关系数为 $r_1 = 0.997$;第二相关系数为 $r_2 = 0.984$ 。其显著性概率分别为: $p < 0.001$ 和 $p = 0.007$ 。结果表明,土石坝和堰塞坝之间的溃坝动力参数之间存在较好的相关一致性,从数学的角度可以理解为:土石坝数据与堰塞坝数据具有共同的样本属性,这也为超标准洪水条件下将堰塞坝坝体安全性判别模型移用到土石坝坝体安全性判别提供了科学依据。

表1 土石坝数据资料

Table 1 Statistics data of earth-rock dams

坝名	坝长/m	坝宽/m	坝高/m	集水面积/km ²	库容/万 m ³
李家咀	140	42.00	25.00	12.5	114
石漫滩	500	80.80	25.00	215	9 180
铁佛寺	340	15.20	26.50	50.0	3 800
前进	500	21.00	8.45	3.00	117
象山	239	42.50	15.30	1.88	101
史家沟	131	70.39	28.60	25.0	85.6
友谊	287	84.00	40.00	2 250	11 600
张拔	425	75.70	35.00	61.0	3 310
龙屯	742	62.95	9.50	214	-
板桥	1 700	87.35	24.50	762	49 200

注: 数据资料取自文献[12]。由于大坝资料的匮乏, 部分数据是结合搜集的文献资料反求所得, 例如: 文献资料中给出了大坝的坝顶宽度、坝坡与坝高, 则可求出坝底宽度, 进而算出其平均坝宽等。

表2 堰塞湖天然坝数据资料

Table 2 Statistics data of the natural dams

坝名	坝长/m	坝宽/m	坝高/m	集水面积/km ²	湖体积/万 m ³
十津川·山手新湖	350	300	80	7.30	1200
十津川·柏溪新湖	450	170	70	3.20	170
十津川·無名新湖	150	350	100	0.600	230
十津川·突合新湖	90	340	75	7.00	900
十津川·桂釜新湖	250	250	60	15.0	640
十津川·久保谷新湖	200	300	20	61.0	130
十津川·重里新湖	250	250	25	72.0	180
十津川·西ノ陰地新湖	120	100	20	75.0	40.0
濃尾地震後·ナンノ崩壊	250	110	38	38.0	200
那賀川·高磯山	330	250	80	480	7 500

3 堰塞湖天然坝安全性判别模型在土石坝上的应用

3.1 简单指标判别法应用

利用 Casagli 等^[7]、Korup^[8]提出的判别指标对土石坝进行计算, 计算结果见表3。利用 I_b 和 I_i 指标对意大利 67 个堰塞湖案例成功判为安全及不安全: 当 $I_b > 5$ 时, 认为安全; $4 < I_b < 5$ 时, 为不确定区; $I_b < 3$ 则不安全已破坏。当 $I_i > 0$ 时判断为安全即未破坏, $I_i < 0$ 时判断为破坏之天然坝。结合表3 计算结果也可对土石坝安全状态判别进行分类。由表3 可见, 对于土石坝, Casagli 等^[7]分类标准不再适用, 但其总体规律是一致的, 即 I_b 、 I_i 值越大则坝体安全性越高。根据表3 可初步确定: 对于土石坝体, 当 $I_b > 4.5$ 时, 认为坝体安全; 当 $I_b < 4$ 时, 认为坝体不安全即溃决; 当 $4 < I_b < 4.5$ 时, 为不确定区。其判别正确率为 $8/10 = 80.0\%$ 。对于土石坝, 当 $I_i > -1.2$ 时, 认为安全; $I_i < -1.2$ 时, 判定为溃决破坏, 其判别正确率为 $6/9 = 66.7\%$ 。当 $I_{DB} < -3$ 时, 坝体安全; $I_{DB} > -3$ 时, 为不安全区, 则其判别正确率为 $9/10 = 90.0\%$ 。由表3 可知 Korup 提出的 I_s 、 I_a 指标值较分散, 范围区分不明显, 判别结果不佳。根据上述分析得出的各指标判别标准及正确率如表4 所示。

从各种判别公式判别结果来看, I_{DB} 指标方法具有较高的判别正确率, 优于其它方法, 各种方法的优劣顺序为: $I_{DB} > I_b > I_i > I_s (I_a)$ 。

表 3 各指标计算结果

Table 3 Calculation results of the indexes

坝名	实际溃决情况	I_b	I_i	I_{DB}	I_s	I_a
李家咀	溃	4.07	-0.89	-2.67	-1.86	1.70
石漫滩	溃	3.67	-1.96	-2.27	-3.77	0.46
铁佛寺	溃	3.44	-2.44	-2.01	-3.31	1.15
前进	未溃	4.47	-1.12	-3.54	-3.29	1.38
象山	未溃	4.92	-0.81	-3.73	-2.45	2.10
史家沟	溃	4.02	-0.51	-2.57	-1.56	1.51
友谊	未溃	2.63	-2.08	-1.03	-3.26	-0.15
张拔	溃	4.27	-1.47	-2.72	-2.89	1.30
龙屯	溃	3.32	—	-2.34	—	-0.37
板桥	溃	3.68	-2.13	-2.29	-4.52	-0.10

注：在计算时，将库容近似看作堰塞湖的湖体积代入计算； I_i 在人工坝中不可用，故省略计算。

表 4 各指标判别标准及正确率

Table 4 The criterion of each index and their discriminant accuracy

指标	安全	不安全或不确定	判别正确率/%
I_b	> 4.5	< 4.5	80.0
I_i	> -1.2	< -1.2	66.7
I_{DB}	< -3.0	> -3.0	90.0
$I_s(I_a)$	—	—	判别效果不佳

3.2 判别分析法应用

鉴于上述简单指标模型考虑参数较少，且在模型建立过程中不够严谨，童煜翔采用“判别分析法”建立了多变量统计模型。“判别分析法”是多元统计中判别样本所属类型的一种方法^[11]，它的研究对象是训练样本，也就是说原始数据的具体分类是预先已知的，然后根据原始数据求出判别函数，将待判样本的原始数据代入判别函数中，判断其类型。判别分析的目的在于寻求一模型使两组间差异最大，从而进行分类，以存在的分类来判定新样本的归属。判别准则如下：把样本观测值代入计算所得的判别方程式中，然后通过比较其值与 0 的大小关系即可确定该样本的类别。

考虑到将判别分析法应用于土石坝安全性判别在国内外尚属首次，且判别分析法的应用对数据资料的特有要求，为严谨起见，本文首先对收集到的 10 组土石坝溃坝数据适用性进行论证。对于土石坝，集水面积资料相对容易获取，因此本文优先采用式(5)判别公式，即采用集水区面积、坝高、坝宽、坝长 4 个变量进行判别。

运用判别分析法建立判别函数式时对样本数据的基本要求如下：

①自变量与因变量之间的关系符合线性假定。

②因变量的取值是独立的，且必须是事先就已经确定。

③自变量服从多元正态分布。样本变量在违反正态分布假设时，判别分析显得比较稳健，只要不是偏离正态分布太离谱，对结果影响不大。

④所有自变量在各组间方差齐次性，协方差矩阵也相等。但是判别分析法是具有相当“稳健性”的统计方法，在违反它的情况下仍可进行分析。

⑤自变量之间不存在多重共线性。存在共线性可能使方程系数和变量发生改变，但不会对判别结果产生太大影响，即判别分析在这方面仍然十分稳健。

对于条件①、②，本文数据显然能够满足要求。对于条件③，运用 K-S 检定方法对自变量进行正态分布检验，其结果如表 5 所示。由表 5 可知，K-S 显著性检验满足要求，即都服从正态分布。

对于条件⑤，多重共线性检验结果如表 6 所示。由表中相关系数可知，各参数之间相关性较小，仅坝宽与坝高的相关系数较大，为 0.860。主要是由于土石坝的坝坡大都在 1:2.0 ~ 1:3.5 之间，而各水库坝顶宽度

相差不大, 因此在坝高确定的情况下, 坝体平均宽度与坝高之间必然存在一定线性相关。但是由于判别分析方法的“稳健性”, 仍然可以进行判别计算。综合分析, 所搜集的溃坝数据资料基本满足进行判别分析的各项条件, 可以进行判别分析计算。对于条件④, 限于本文自变量数据较少, 未能进行检验, 但依据以往经验, 判别分析法对该条件具有相当的“稳健性”。

表5 变量正态性 K-S 显著性鉴定结果

Table 5 Appraisal results of normality test by the way of K-S

变量	原始参数双尾检定显著水平	对数转换后双尾检定显著水平
集水面积	0.026	0.778
坝高	0.994	0.671
坝长	0.167	0.900
坝宽	0.975	0.909

注: 显著水平达 0.05 以上者符合正态分布。

表6 各变量相关系数

Table 6 Correlation matrix of all variables

	集水面积	坝长	坝高	坝宽
集水面积	1.000	0.547	0.498	0.636
坝长	0.547	1.000	-0.102	0.188
坝高	0.498	-0.102	1.000	0.860
坝宽	0.636	0.188	0.860	1.000

利用式(5)对土石坝坝体安全性进行判别分析, 判别结果见表7。由表7可见, 对收集到的10组土石坝溃坝资料分析, 未溃决组预报正确率为66.7%, 已溃决组预报正确率为100%, 判别总正确率达90.0%, 可见采用判别分析法对土石坝安全性判别分析是可行的, 且具有很强的实用性。

表7 判别分析结果

Table 7 Results of discriminant analysis

库名	判别得分	判别结果	实际	库名	判别得分	判别结果	实际
李家咀	-3.71	溃	溃	史家沟	-3.83	溃	溃
石漫滩	-4.18	溃	溃	友谊*	-8.37	溃	未溃
铁佛寺	-6.40	溃	溃	张拔	-3.74	溃	溃
前进	0.21	未溃	未溃	龙屯	-2.25	溃	溃
象山	0.08	未溃	未溃	板桥	-4.00	溃	溃

注: 计算中所有单位均采用国际标准单位; *为判别结果与实际结果不相符。

与简单指标判别法对比可见, 简单指标判别法均需要寻找一个判别临界值或阈值, 且该判别临界值或阈值随着判别样本数量的不同而不同, 缺乏唯一性。而利用判别分析方法建立的模型物理意义明确, 数学推导严谨, 判断结果确定(以0为唯一判别阈值), 判别结果正确率高。

4 结 论

由于坝体结构复杂, 不确定因素众多, 超标准洪水条件下快速判断土石坝安全性一直是困扰决策者、管理者及科研工作者的难点问题, 迄今, 国内外未见有相关快速判别方法的报道。本文基于典型相关分析法, 论证了土石坝与堰塞湖天然坝之间的相似性。并以此为基础, 将堰塞湖天然坝的安全性判别方法引入到土石坝的安全性判别分析中, 结果证明, 该方法可行。该方法的引入为超标准条件下土石坝安全稳定性判别提供了新的思路。

从各坝体安全性分析方法的预测结果来看, 判别分析法以及 Casagli 和 Ermini 提出的 I_{DB} 指标判别方法具有较高的判别正确率(本文判别正确率均达到90.0%), 高于其它方法。与简单指标判别法相比, 利用判别分析方法建立的模型物理意义明确, 数学推导严谨, 判断结果确定(以0为唯一判别阈值), 其优势不言而喻。判别分析方法涉及参数少且非常容易获取, 能够快速给出判别结果, 准确率高, 非常适合超标准洪水条件下应急判别使用, 可为水库大坝安全决策提供重要技术支持。该套方法的推广应用对于提升中国应对突发公共安全事件能力具有重要的价值。

参考文献:

- [1] 彭学彬. 大坝稳定性分析方法与应用实例[J]. 中国西部科技, 2009, 8(4): 49-50. (PENG Xue-bin. Dam stability analysis method and application example [J]. Science and Technology of West China, 2009, 8(4): 49-50. (in Chinese))

- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析-原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 18-19. (CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis- methods· process· theory[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003: 18-19. (in Chinese))
- [3] 李宗坤, 王鹏飞, 赵凤遥. 基于流固耦合理论的土石坝稳定性分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2009, 30(3): 44-47. (LI Zong-kun, WANG Peng-fei, ZHAO Feng-yao. Stability analysis of earth-rockfill dam based on fluid-solid coupling[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2009, 30(3): 44-47. (in Chinese))
- [4] 孙丽丽, 李宗利. 基于强度折减法的土石坝边坡稳定分析与探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 113-116. (SUN Li-li, LI Zong-li. Slope stability analysis of the earth rockfill dam based on the strength reduction method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(5): 113-116. (in Chinese))
- [5] 石振明, 李建可, 鹿存亮, 等. 堰塞湖坝体稳定性研究现状及展望[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 657-663. (SHI Zhen-ming, LI Jian-ke, LU Cun-liang, et al. Research status and prospect of the stability of landslide dam[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 657-663. (in Chinese))
- [6] 童煜翔. 山崩引致之堰塞湖天然坝体稳定性之量化分析[D]. 台湾: 台湾中央大学应用地质研究所, 2008: 49-54. (TONG Yu-xiang. Quantitative analysis for stability of landslide dam[D]. Taiwan: National Central University Graduate Institute of Applied Geology, 2008: 49-54. (in Chinese))
- [7] ERMINI L, CASAGLI N. Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003(28): 31-47.
- [8] KORUP O. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams[J]. Engineering Geology, 2004(73): 13-35.
- [9] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元, 等. 天然土石坝稳定性初步研究[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 77-81. (CHAI He-jun, LIU Han-chao, ZHANG Zhuo-yuan, et al. Preliminarily stability analysis of natural rock field dam resulting from damming landslide[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1): 77-81. (in Chinese))
- [10] 南京水利科学研究所. 水库大坝病险与溃坝规律研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2010. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Hazards in dam of reservoir and study on the law of dam-break [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [11] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 261-289. (ZHANG Wen-tong. Advanced course of SPSS for statistical analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 261-289. (in Chinese))
- [12] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1993: 99-135. (XIE Ren-zhi. Dam-break hydraulics[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1993: 99-135. (in Chinese))

Discriminant analysis for earth-rock dams' stability under the condition of exceeding standard flood*

LI Yun^{1,2}, WANG Xiao-gang¹, ZHU Long¹, XUAN Guo-xiang^{1,2}, LIU Huo-jian¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: Climate extremes occur frequently and dam breach occasionally happens at present. It's very significant to present a fast and efficient discriminant method for earth-rock dam's stability under conditions of exceeding standard flood. However, this task is difficult because of the complex structure of dams and too many uncertain factors. In this paper by reference to the analysis methods for nature dam's safety, the discriminant analysis method was applied for earth-rock dam and the results showed it's feasible. The discriminant analysis and Casagli and Ermini's discriminant index I_{DB} are better than the other methods. Both of them have high discriminant accuracy which reach 90 percent based on the samples in this paper.

Key words: barrier lake dams; earth-rock dams; discriminant analysis; dam-break; exceeding standard flood

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. 201001033).