

判别分析法在土石坝稳定性快速判别中的应用

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

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029;
2. 南京水利科学研究院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 :为了在超标准洪水来临发生漫坝溢流时对土石坝坝体的稳定性进行快速判别,基于判别分析法,采用 27 座土石坝溃坝资料建立了坝体在超标准洪水条件下的稳定性快速判别模型。实际应用结果表明:所建模型交叉验证正确率最高可达 96.3%;与现有的各种坝体稳定性判别方法相比,判别分析法是相对有效的坝体稳定性判别方法,可很好地应用于超标准洪水条件下土石坝稳定性的快速判别。

关键词 :土石坝;超标准洪水;溃坝;判别分析

中图分类号 :TV641

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)03-0039-04

Rapid determination of earth-rock dam stability based on discriminant analysis//ZHU Long¹, WANG Xiao-gang¹, XUAN Guo-xiang^{1,2}, LI Yun^{1,2}, LIU Huo-jian¹ (1. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract : In order to conduct a fast and accurate discriminant analysis of the stability of an artificial earth-rock dam during a flood exceeding standard flood levels, a discriminant model was developed based on the discriminant method and data from 27 artificial earth-rock dams. The results of the practical applications indicated that the accuracy of the cross validation was up to 96.3%. Compared with the existing discriminant methods, this discriminant analysis was found to be more efficient and could easily be applied in the rapid discrimination of the artificial earth-rock dams' stability during floods exceeding standard flood levels.

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

受全球性气候变化影响,我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。我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,因此提出一种超标准洪水条件下快速判别土石坝稳定性的方法对于提升我国防洪决策水平,提高抗洪抢险能力具有重要的意义。

大量资料^[1-4]显示,影响土石坝稳定的重要参数包括集水面积、库容、坝高、坝宽(这里取坝体横断面平均宽)、坝长等,它们分别代表了影响坝体稳定性的水流主动力(集水面积、库容)和坝体抗力(坝高、坝宽、坝长)。考虑到库容与集水面积存在中高度相关性(27 座大坝资料分析显示,库容与集水面积具

有极高的相关度,其相关系数 R 可达 0.995,单尾鉴定显著性水平小于 0.001) 本文就收集到的 27 例国内外土石坝溃坝资料分别建立了集水面积、坝高、坝宽、坝长 4 个变量(组合 1)以及库容、坝高、坝长、坝宽 4 个变量(组合 2)的判别分析模型,对超标准洪水条件下土石坝的稳定性进行判别。

1 坝体稳定性常用判别方法

判定超标准洪水条件下土石坝发生漫顶时土石坝是否稳定需要考虑众多因素,如漫顶水深、漫顶持续时间、坝体材料强度、库容、坝高、坝长等,具有很大的难度^[5-6]。

当前,土石坝稳定性分析主要采用极限平衡法^[7],又分为圆弧滑动法和滑楔法。极限平衡法的

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201001033);“十一五”国家科技支撑计划(2006BAC14B00,2009BAK56B04);国家国际科技合作项目(S2012ZR0108)

作者简介:祝龙(1988—),男,河北邢台人,硕士,主要从事水工水力学研究。E-mail:longdechuanren82@163.com

主要思想是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^[8],从而对坝体的稳定性给出评价。李宗坤等^[9]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^[10]基于强度折减法对土石坝边坡稳定进行了分析和探讨。对于超标准洪水来临、洪水漫坝的情况下要求快速判别分析坝体的稳定性时,这些方法由于要求参数多,计算复杂等通常难以适用。

笔者在广泛查阅大量资料后发现,国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稳定性的方法,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。该类方法主要是从影响坝体稳定性的水流主动力与坝体抗力之间的对比关系出发,建立简单无因次指数关系对坝体稳定性进行判别分析^[11-12]。

1999年Ermini等用坝体体积分别除以集水面积及湖水体积然后取对数,得到两个参数——堆积指数 I_b (blockage index)和回水指数 I_i (impoundment index)。2003年Ermini等^[11]又提出新的指标——无量纲堆积指数 D_{BI} (dimensionless blockage index),该指标加入了坝高这个变量,同时利用该指标对全球84个天然坝(堰塞湖坝体)进行了分析,发现 D_{BI} 能够较好地判别天然坝的安全性。各参数指标计算公式为

$$I_b = \lg\left(\frac{V_d}{A_b}\right) \quad (1)$$

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

$$D_{BI} = \lg\left(\frac{A_b H_d}{V_d}\right) \quad (3)$$

式中: V_d 为坝体积; V_l 为堰塞湖体积; A_b 为集水区面积; H_d 为坝高。

2004年Korup^[12]针对堰塞湖天然坝稳定性提出了3个无因次判别指标:

$$I_s = \lg\left(\frac{H_d^3}{V_l}\right) \quad (4)$$

$$I_a = \lg\left(\frac{H_d^2}{A_c}\right) \quad (5)$$

$$I_r = \lg\left(\frac{H_d}{H_r}\right) \quad (6)$$

式中: A_c 为集水区面积; 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%,效果不理想。

2008年童煜翔^[2]基于判别分析方法,采用日本43座堰塞湖天然坝案例资料进行分析,同时利用Ermini等^[11]整理的全球84座堰塞湖天然坝资料进

行验证,得到了较好的效果。

鉴于该类判别指标方法对大坝参数数据量要求低、判断快速的特点,同时考虑我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稳定性的应急判别分析上,将各指标判别结果与判别分析法所建模型的预测结果进行对比,以期得到能较好预测土石坝稳定性的方法,为防洪预警提供理论依据。

2 判别分析法

判别分析是多元统计中判别样本所属类型的一种常用的方法^[13],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。即寻找判别变量 $x_1, x_2, \dots, x_j$ 的线性组合

$$y = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_i x_i + \dots + w_j x_j \quad (i = 1, 2, \dots, j) \quad (7)$$

的最佳权重 w_i ,使得检定群体组间的 y 值差异相对于组内的为最大。通常采用的判别分析方法有典型判别分析法与贝叶斯判别分析法^[13]。

2.1 判别分析法的基本原理

2.1.1 典型判别分析法

假设群体中样本由 p 个因子(变量)组成,构造一个似然函数:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_p) = y = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_i x_i + \dots + c_p x_p \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (8)$$

式中: x_i 为第 i 个变量; c_i 为变量的系数。假设样本中属于第一类的有 n_1 个,属于第二类的有 n_2 个。规定某一个定值 y_0 ,当把某样本的 p 项指标代入函数 y 中,如果有 $y > y_0$,判定它属于第一类;反之,则属于第二类。

在本研究实际计算时,将待判样本的数据代入判别函数得到 y ,之后比较 y 与 y_0 的大小关系即可得知其判别分类。

2.1.2 贝叶斯判别分析法

贝叶斯的基本思想是利用已知的先验概率去推证将要发生的后验概率,计算每个样本的后验概率及判错率,用最大后验概率来划分样本的分类并且使得期望损失达到最小。

假设随机变量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)^T$ 能够较好地服从正态分布,并且其总体均值为 $\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k)^T$,对应的联合概率密度函数为

$$f(x) = (2\pi)^{-k/2} |V_i|^{-1/2} \cdot$$

$$\exp\left[\frac{1}{2}(X - \bar{X})^T V_i^{-1}(X - \bar{X})\right] \quad (9)$$

式中: V_i 为第 i 个总体的协方差矩阵; k 为变量数。

假设 q_i 为第 i 个总体的先验概率, 事后概率通过化简可推导为

$$p(x \in i | x \in t) = \frac{\exp[y_i(x)]}{\sum_{i=1}^g \exp[y_i(x)]} \quad (i = 1, 2, \dots, g) \quad (10)$$

经简化及分析可得判别函数的简单形式:

$$y_i(x) = c_{0i} + c_{1i}x_1 + c_{2i}x_2 + \dots + c_{ki}x_k + \ln q_i \quad (i = 1, 2, \dots, g) \quad (11)$$

贝叶斯判别分析的判别准则如下: 把样本观测值代入式(11)中得到 $y_i(x)$, 共得到 g 个数据, 将这些计算所得值进行比较, 得到最大的 $y_i(x)$, 则样本就归属于该类别。对于土石坝的稳定性分析共有两个类别, 因此通过比较 y_1 与 y_2 的大小关系即可确定该样本的类别。

2.2 判别分析法的应用

运用判别分析法建立判别模型(判别函数式)时对样本数据有如下基本要求^[13]: 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, 且必须是事先已经确定的。③样本量大于自变量个数的 5 倍。④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。⑤所有自变量在各组间方差齐, 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。⑥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。

2.2.1 判别分析法对数据资料要求的验证

本文收集的具有完整资料的 27 座水库大坝(部分数据取自文献[14])为: 桥墩、黄山洞、槁树下、史家沟、李家咀、长茅、石漫滩、张拔、铁佛寺、板桥、奥罗斯(巴西)、李家大湾、三道河、黑龙滩、刘家洞、马河、前进、岩溪沟、流漓河、达底冲、红瓦房、长冲、上马坪、建国、关门田、中华、象山。部分大坝参数通过调研方式补充。为提高样本有效性, 所选用的训练样本中含有 16 组漫顶溃决的案例以及 11 组漫顶未溃决案例。

对于前 3 个基本要求, 数据资料能自动满足, 而对于后 3 个要求, 判别分析法显示出了很强的稳健性。这里对后 3 个要求进行检验。

运用 K-S 检定方法对自变量进行正态分布检验(K-S 检定的原假设为数据样本服从正态分布), 其结果如表 1 所示。由表 1 可知, 集水面积和库容在未进行对数变换前并不符合正态分布, 进行对数变换后能很好地满足正态分布的要求, 而坝长、坝宽、坝高在对数变换后更符合正态分布规律, 因此, 在本研究中对各变量均进行对数变换。

表 1 变量正态性 K-S 显著性检验结果

变量	原始参数 双尾检验 显著水平	对数转换后 双尾检验 显著水平	变量	原始参数 双尾检验 显著水平	对数转换后 双尾检验 显著水平
集水面积	< 0.001	0.968	坝宽	0.209	0.978
库容	< 0.001	0.153	坝高	0.589	1.000
坝长	0.296	0.878			

注: 显著水平达 0.05 以上者符合正态分布。

为判断自变量间是否存在多重共线性问题, 先求出自变量间的相关系数矩阵, 计算结果见表 2, 通常认为相关系数在 0.8 以上可能会有共线性问题, 超过 0.9 的变量在分析时将会存在共线性问题。由表 2 中相关系数可知, 组合 1 和组合 2 各变量之间相关系数均在 0.8 以下, 基本不会出现共线性的问题, 因此满足要求, 可以进行计算。

表 2 各变量相关系数

变 量	集水面积	库容	坝长	坝宽	坝高
集水面积	1.000	0.915	0.713	0.489	0.599
库 容	0.915	1.000	0.743	0.534	0.675
坝 长	0.713	0.743	1.000	0.348	0.354
坝 宽	0.489	0.534	0.348	1.000	0.789
坝 高	0.599	0.675	0.354	0.789	1.000

注: 各变量均进行了对数变换。

对于方差齐性分析的检验, 两种参数组合的计算结果均显示各自的显著性概率 $p < 0.001$, 拒绝了组间协方差齐的原假设。然而在实际的判别分析过程中依据方法的稳健性, 通常认为可以继续计算, 因此所取溃坝资料可以进行判别分析。

综上所述, 所搜集的溃坝数据资料符合判别分析法对样本数据的要求。

2.2.2 基于判别分析法的判别模型

对 27 组数据分别采用典型判别分析法和贝叶斯判别分析法进行建模。采用典型判别分析法, 选用组合 1 和组合 2 建立的模型分别为

$$y_1 = -0.624x_1 - 1.932x_2 + 3.782x_3 + 1.481x_4 - 10.8135 \quad (12)$$

$$y_2 = 0.041x_1 - 1.732x_2 + 3.892x_3 + 0.889x_5 - 7.96 \quad (13)$$

采用贝叶斯判别分析法, 选用组合 1 和组合 2 建立的模型分别为

$$y_1^* = -1.865x_1 - 5.771x_2 + 11.298x_3 +$$

$$4.423x_4 - 32.299 \quad (14)$$

$$y_2^* = 0.091x_1 - 3.887x_2 + 8.737x_3 + 1.996x_5 - 17.867 \quad (15)$$

式中： x_1 为坝长的对数值； x_2 为坝宽的对数值； x_3 为坝高的对数值； x_4 为集水面积的对数值； x_5 为库容的对数值。

判别结果分布如表 3 所示。由表 3 可知：典型判别分析法和贝叶斯判别分析法对于各组合的判别结果是一致的，只是所建立的判别模型在各变量的系数上存在差异。

表 3 判别分析结果

组合	判别方法	判别正确数	判别错误数	正确率/%
1	典型判别分析法	26	1	96.3
	贝叶斯判别分析法	26	1	96.3
2	典型判别分析法	23	4	85.2
	贝叶斯判别分析法	23	4	85.2

为了进一步检验上述模型的稳定性和有效性，对所建立的模型进行交叉验证(cross-validation)，即在给定的建模样本中，拿出大部分样本进行建模，留小部分样本用刚建立的模型进行预报，并求这小部分样本的预报误差，记录它们的平方和。这个过程一直进行，直到所有的样本都被预报了一次而且仅被预报一次。各模型判别分析的交叉验证正确率显示：组合 1(集水面积、坝长、坝宽、坝高 4 个变量)建立的判别模型式(12)和式(14)交叉验证正确率为 96.30%；而组合 2(库容、坝长、坝宽、坝高 4 个变量)建立的判别模型式(13)和式(15)交叉验证正确率为 77.80%。

综上可知，利用判别分析法建立的模型可以有效地判别土石坝在超标准洪水漫顶情况下的稳定性，在实际使用时可优先选择判别模型式(12)和式(14)，在缺乏集水面积资料时可考虑判别模型式(13)和式(15)。

2.2.3 判别模型中各变量重要性分析

在判别分析建模过程中，由典型判别分析所得各变量标准化判别函数系数绝对值(standardized discriminant function coefficient)的大小，可以判断各变量影响力的高低，参数标准化判别函数系数绝对值越大，则表明该变量对坝体稳定性影响权重越高。各判别模型变量标准化判别函数系数如表 4 所示。

表 4 标准化判别函数系数

组合 1		组合 2	
变量	标准化判别函数系数	变量	标准化判别函数系数
集水面积	0.997	库容	0.744
坝高	0.690	坝高	0.710
坝宽	-0.474	坝宽	-0.425
坝长	-0.229	坝长	0.015

由表 4 可知，对于组合 1，集水面积是影响坝体稳定性最重要的因素，而对于组合 2，库容则是影响坝体稳定性最重要的因素。就坝体结构自身参数而言，其影响重要性排序为坝高、坝宽、坝长。

3 与简单判别方法的比较

结合本文收集的 27 座土石坝溃坝资料，利用前文介绍的 I_b 、 I_i 、 D_{BI} 等无因次判别指标进行判别，判别结果见表 5。由表 5 可知，各指标正确率差异较大，相比而言，各指标判别优劣程度具体排序为 D_{BI} 、 I_b 、 I_i 、 $I_s(I_a)$ 。但是，这些简单判别指标均需要寻找一个判别临界值(如表 5 中 I_b 对应的临界值为 4.3)，且该判别临界值随着判别样本数量的不同而不同，缺乏唯一性。而利用判别分析法建立的模型物理意义明确，数学推导严谨，判断结果确定，判别结果正确率高，其优势不言而喻。

表 5 各指标判别标准及正确率

指标	稳定	不稳定或不确定	判别正确率/%
I_b	> 4.3	< 4.3	88.89
I_i	> -1.2	< -1.2	77.78
D_{BI}	< -3.0	> -3.0	92.59
$I_s(I_a)$			判别效果不佳

注：判别标准(临界值)根据样本数据定性确定。

4 结 语

将判别分析法应用于超标准洪水条件下土石坝稳定性判别分析是一种新的尝试。分析结果显示，判别分析法对于超标准洪水条件下快速判断土石坝稳定性准确性较高，难能可贵的是，该方法仅需要水库、坝体的最基本资料，这对于我国面广量大的小型水库、塘坝超标准洪水条件下的应急处置具有十分重要的意义。

比较现有的几种坝体稳定性判别方法，判别分析法组合 1 的判别结果明显优于其他判别指标的判别结果。尤为关键的是利用判别分析法建立的模型物理意义明确，数学推导严谨，判断结果确定，且能给出各参数的影响权重因子，对于认识坝体稳定性具有较大意义。

尽管判别模型取得了良好的效果，在土石坝稳定性判别分析方面依然有大量的工作亟待开展。由于当前国内外完整的溃坝资料非常匮乏，本文验证样本数依然偏少，各组合所涉及的变量均仅为 4 个，事实上应该考虑更多的参数，如漫顶水深、持续时间、坝体材料抗冲刷能力等影响坝体稳定性的重要指标，这将在笔者后续的工作中逐步完善。

(下转第 85 页)

[15] RINCÓN O.TROCÓNIS D ,SÁNCHEZ M ,et al. Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in iberoamerican countries :DURACON project/CYTED[J]. Corrosion Science ,2007 ,49(7) 2832-2843.

[16] IDEKER J H ,EAST B L ,FOLLIARD K J. The current state of the accelerated concrete prism test[J]. Cement and Concrete Research ,2010 ,40(4) 550-555.

[17] 金立兵.多重环境时间相似理论及其在沿海混凝土结构耐久性中的应用[D].杭州 :浙江大学 ,2008.

[18] 范志宏 ,杨福麟 ,黄君哲 ,等.海工混凝土长期暴露试验研究[J].水运工程 ,2005(9) 45-49.

[19] 杜宇 ,蒋林华 ,仇高山 ,等.膨胀混凝土延迟膨胀损伤模型[J].水利水电科技进展 ,2010 ,30(4) 4-7.

[20] 黄君哲 ,周欲晓 ,王胜年 ,等.海工混凝土结构表面涂层暴露试验及应用效果[J].中国港湾建设 ,2002(6) :71-74.

[21] 余红发 ,孙伟.混凝土氯离子扩散理论模型[J].东南大学学报 :自然科学版 ,2006 ,36(增刊 2) 68-77.

[22] ISHIDA T ,MAEKAWA K ,KISHI T. Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history[J]. Cement and Concrete Research ,2007 ,37(4) 565-578.

[23] 陈伟 ,许宏发.考虑干湿交替影响的氯离子侵入混凝土模型[J].哈尔滨工业大学学报 ,2006 ,38(12) :2191-2193.

[24] LI Chun-qiu ,LI Ke-fei ,CHEN Zhao-yuan. Numerical analysis of moisture influential depth in concrete during drying-wetting cycles[J]. Tsinghua Science and Technology ,2008 ,15(5) :696-701.

[25] 沈春华.水泥基材料水分传输的研究[D].武汉 :武汉理

(上接第 42 页)

参考文献 :

[1] 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.

[2] 童煜翔.山崩引致之堰塞湖天然坝体稳定性之量化分析[D].台北 :台湾中央大学 ,2008.

[3] 柴贺军 ,刘汉超 ,张俦元 ,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.

[4] 水库大坝病险与溃坝规律研究[R].南京 :南京水利科学研究院 ,2010.

[5] 李云 ,李君.溃坝模型试验研究综述[J].水科学进展 ,2009 ,20(2) 304-310.

[6] 李云 ,王晓刚 ,宣国祥 ,等.均质土坝漫顶溃坝模型相似准则研究[J].水动力学研究与进展 :A 辑 ,2010 ,25(2) :270-276.

[7] 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.

工大学 ,2007.

[26] KOICHI M , TETSUYA I , TOSHIHARU K. Multi-scale modeling of structural concrete[M]. London : Taylor & Francis ,2009.

[27] TETSUYA I ,KOICHI M ,TOSHIHARU K. Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history[J]. Cement and Concrete Research ,2007 ,37(4) 565-578.

[28] 陈伟 ,许宏发.确定混凝土中氯离子扩散系数的方法及适用性评价[J].混凝土 ,2004 ,12 :12-15.

[29] 李春秋 ,李克非 ,陈肇元.混凝土中水分传输的边界条件研究[J].工程力学 ,2009 ,26(8) 74-81.

[30] 沈春华 ,水中和 ,周紫晨.水泥基材料水分传输及动力学研究[J].武汉理工大学学报 ,2007 ,29(9) 85-88.

[31] FRANCOIS R ,MASO J C. Effect of damage in reinforced concrete on carbonation or chloride penetration[J]. Cement and Concrete Research ,1988 ,18(6) 961-970.

[32] LI Chun-qing. Corrosion initiation of reinforcing steel in concrete under natural salt spray and service loading-results and analysis[J]. ACI Materials Journal ,2000 ,97(6) :690-697.

[33] OH B H ,JANG S Y. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures[J]. Cement and Concrete Research ,2007 ,37(1) :47-53.

[34] PACK S W ,JUNG M S ,SONG H W. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment[J]. Cement and Concrete Research ,2010 ,40(2) 302-312.

(收稿日期 2011-09-22 编辑 :周红梅)

[8] 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.

[9] 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.

[10] 孙丽丽 ,李宗利.基于强度折减法的土石坝边坡稳定性分析与探讨[J].水资源与水工程学报 ,2009 ,20(5) :113-116.

[11] 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.

[12] KORUP O. Geomorph metric characteristics of New Zealand landslide dam[J]. Engineering Geology ,2004 ,73 :13-35.

[13] 张文彤.SPSS 统计分析高级教程[M].北京 :高等教育出版社 ,2004.

[14] 谢任之.溃坝水力学[M].济南 :山东科学技术出版社 ,1993.

(收稿日期 2011-10-13 编辑 :熊水斌)