

堤坝溃口特征参数预测研究

张美满^{1,2}, 张友明³, 崔健健⁴, 徐津^{1,2}, 雷天宇³, 朱海^{1,2}, 王玲玲^{1,2}

(1. 河海大学流域水循环与水安全全国重点实验室, 江苏 南京, 210098; 2. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京, 210098; 3. 江苏省防汛防旱抢险中心, 江苏 南京, 211500; 4. 歙县水利工程建设管理站, 安徽 黄山, 245200)

摘 要: 堤坝溃口特征参数的快速预测对防洪抢险具有重要意义。本研究主要针对水库型堤坝溃口, 通过对国内外溃坝/溃堤案例的广泛收集整理, 形成了包含7个参数(坝高、溃口底部以上水深、溃口最终深度、水库库容、溃口底部以上库容、峰值流量和溃口宽度)的溃坝/溃堤数据库。首次使用层次聚类方法分析获得了7个参数的相关性, 在此基础上, 选用相关性强的参数组合, 构建了峰值流量和溃口宽度的预测公式。选取3个国内外典型溃坝案例对预测公式进行验证, 证明了预测公式的实用性和合理性。与国内外常用溃坝溃口特征参数预测公式相比, 本研究的预测公式具有更高的精度。本研究成果可为水库型堤坝溃决应急决策提供理论支持, 也可为河道型堤坝溃口参数预测提供参考。

关键词: 堤坝; 溃口参数; 层次聚类方法; 预测公式

Title: Study of parameter prediction of dam/embankment breach// by ZHANG Meiman, ZHANG Youming, CUI Jianjian, XU jin, LEI Tianyu, ZHU Hai and WANG Lingling// State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, Hohai University

Abstract: The prediction of breach parameters is of great significance for downstream rescue and disaster relief. This study mainly focuses on the breach of reservoir dams. Through extensive collection and organization of domestic and foreign dam/embankment failure cases, a dam/embankment failure database has been formed, which includes seven dam breach parameters, namely dam height, height of water above breach bottom, height of breach, reservoir storage, volume of water above breach bottom, peak discharge and final breach average width. The correlation between the parameters is obtained based on the hierarchical clustering method. Moreover, the prediction equations for peak discharge and breach width are established by the correlation. Three typical dam breach cases are selected to verify the new prediction equation, which proves the practicability and rationality of the prediction equation, and it is found that the prediction equation proposed in this paper has better performance than commonly used equations both domestically and internationally for predicting characteristic parameters of dam breaches. The results can provide theoretical support for emergency decision-making up on reservoir dam failure, and can also provide reference for river embankments.

Key words: dam; breach parameter; hierarchical clustering method; prediction equation

中图分类号: TV122

文献标志码: B

文章编号: 1671-1092(2026)02-0018-04

0 引 言

我国大量河、湖、圩垸以土石材料填筑堤坝, 在防洪减灾、兴利除害方面发挥了巨大作用。但在长期服役过程中, 土石类堤坝容易出现裂缝、滑坡、渗透破坏等问题, 特别是遭遇超标准洪水时, 可能

会发生漫堤险情。堤坝一旦溃决, 将引发洪水, 严重威胁堤防保护区内人民生命财产安全及工农业生产生活。以经济发达的江苏省为例, 其堤坝总长约 50 000 km, 其中 3 级以下堤防占比约 90%。这类堤防大多为均质土堤坝, 遭遇大洪水特别是超标准洪水时, 可能发生溃堤。由于堤坝溃决的

突发性和抢险环境的复杂性,溃口发展态势往往难以预料,增加了抢险救灾的难度,纵然抢险物资、设备和队伍能够及时到位,现场抢险方案的科学性和可靠性往往也难以保证。因此,堤坝溃口特征参数(如峰值流量、溃口宽度与深度等)的预测成为防汛救灾科研领域及工程界的重要研究热点。

我国各类大坝溃坝约3 500余次,其中绝大部分为土石坝溃坝。国内外学者针对溃决机理和溃坝过程开展了大量研究工作。针对均质土坝漫顶溃决机理,南京水利科学研究院进行了最大坝高9.7 m的实体坝溃决试验^[1]。针对坝坡失稳问题,韩瑞芳^[2]提出了坝坡失稳危险度的定义和评价模型。此外,针对堤坝溃口特征参数,目前已提出了多个溃口预测公式,如Walder^[3]、Zhong^[4]等创建的预测公式。然而现有的溃坝参数预测公式大多通过简单的数据拟合方法获得,预测精度相对较低。

堤坝溃口上游水体的形态特征对溃口发展过程及其特征参数类型具有显著影响。根据上游水体形态特征可将堤坝溃口分为水库型和河道型两类。水库型堤坝溃口上游通常为封闭/半封闭的水域,溃决发生后,上游水库中的高水位开始冲刷溃口,对溃口扩展和演变产生强烈的推动作用,导致溃口在短时间内迅速扩大,进而影响堤坝的稳定性。与水库型堤坝不同,河道型堤坝位于自然河道中,其溃口扩展通常较为缓慢,溃口形态与河道水动力、流场特征相关联^[5]。本研究主要针对水库型堤坝溃口。

本研究收集整理了国内外溃坝/溃堤案例的相关数据,形成了包含7个参数(坝高、溃口底部以上水深、溃口最终深度、水库库容、溃口底部以上库容、峰值流量和溃口宽度)的溃坝/溃堤数据库。依托该数据库,利用层次聚类方法研究获得了溃坝参数间的相关性,然后针对具有较强相关性的参数组,通过统计回归方法构建了溃口峰值流量、溃口宽度等特征参数的预测公式。选取3个国内外典型溃坝案例对预测公式进行验证,证明了预测公式的实用性和合理性。与国内外现有预测公式相比,本研究的预测公式精度有明显提升。在传统回归方法的基础上结合聚类方法预测溃口的特征参数可以为堤坝防汛、抢险、救灾等工作提供技术支持。

1 溃坝/溃堤数据库的建立

溃堤溃口发展全过程的完整监测数据较为匮乏,而土石坝溃决机理研究相对成熟,相关实测数据较完整。因此,本研究基于土石坝溃坝数据库来预测水库型堤坝溃口参数。

水库型堤坝溃口横断面、纵断面及相关参数如图1所示。其中, h_d 为坝高, h_w 为溃口底部以上水深, h_b 为溃口最终深度, V_w 为溃口底部以上库容, B_{ave} 为溃口宽度。

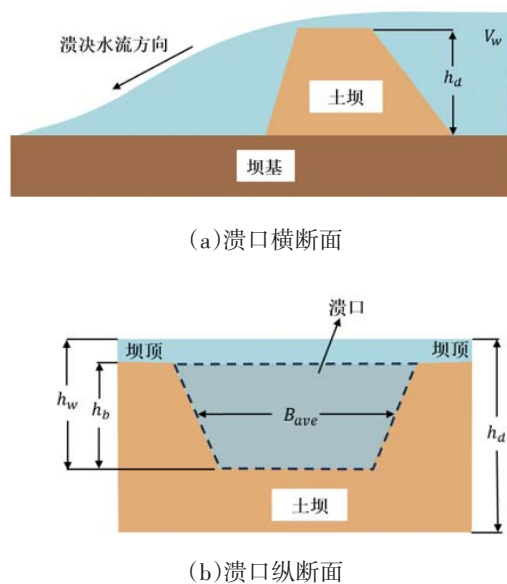


图1 堤坝溃口形状及其参数

Fig. 1 The shape and parameters of dam breach

通过收集整理国内外堤坝溃决数据和水利部大坝安全管理中心的溃坝案例资料^[4,6-7],形成了溃坝/溃堤数据库,包含参数完整的40个案例。各案例的7个参数汇总如图2所示,参数物理含义详细描述见表1。

2 溃口特征参数聚类研究

利用本研究的数据库,通过拟合方法即可获得溃口宽度等参数的预测表达式,但该类表达式可能包含较多变量(最高可达6个),且部分变量与待预测参数之间并无显著的相关性。为了获得数据库7个溃坝参数之间的相关性,达到简化预测表达式的目的,首先采用层次聚类方法研究7个参数的相关性。

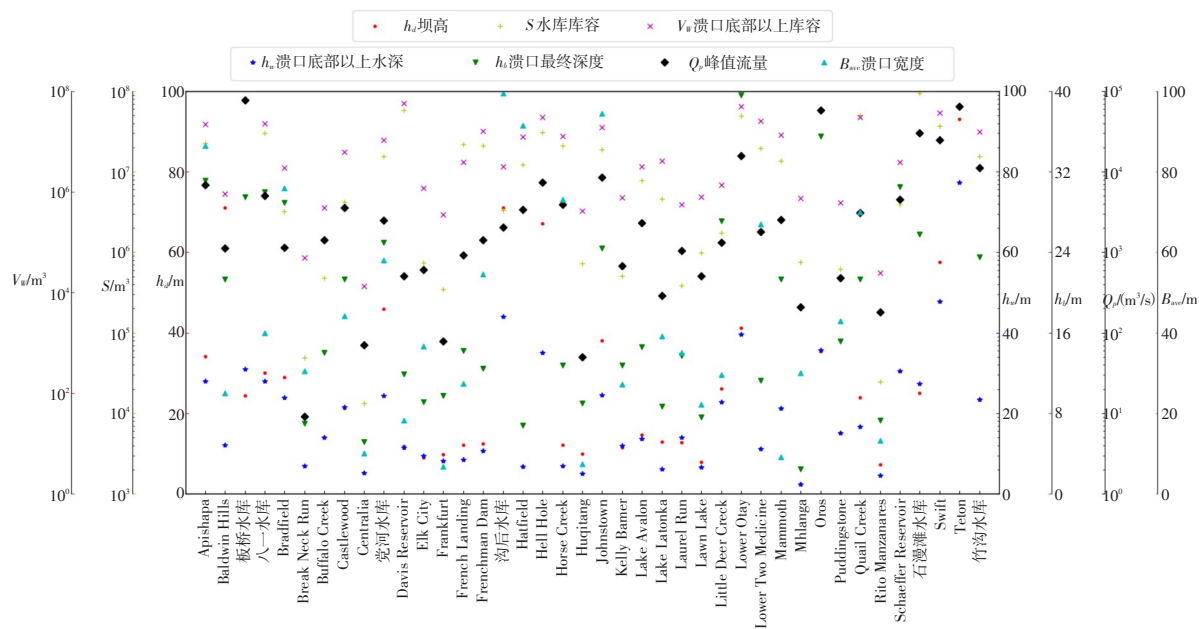


图2 溃坝/溃堤案例参数分布
Fig. 2 Parameter distribution in dam/embankment failure cases

表1 溃坝/溃堤数据库主要参数描述
Table 1 Description of main parameters of dam/embankment failure database

参数	参数描述
坝高 h_d/m	坝顶最低点与原始河床最低点的垂直高差
溃口底部以上水深 h_w/m	水位与最终溃口最低点的高差
溃口最终深度 h_d/m	溃口处坝顶和溃口最低点的高差
水库库容 S/m^3	正常蓄水位对应的水量
溃口底部以上库容 V_w/m^3	最终溃口底部高程以上的水量
峰值流量 $Q_p/(m^3/s)$	溃口处流量最大值
溃口宽度 B_{ave}/m	最终溃口顶部和底部宽度的平均值

该方法的主要思想是:先将每个参数视作一个类,计算每个类之间的欧氏距离以构建距离矩阵,再合并距离最小的两个类,然后使用 Ward 连接计算新类与各类之间的类间距离,更新距离矩阵,不断重复直到只存在一个类。裁切树状图时可根据组间离差平方和增量来决定类的数量,当类数从 $n+1$ 到 n 时,增加的组间平方和记为 Δw_n ,当类数从 n 到 $n-1$ 时,增加的组间平方和记为 Δw_{n-1} ,若满足 Δw_{n-1} 远大于 Δw_n ,则可在类数为 n 时裁切树状图得到聚类结果^[8]。

采用层次聚类方法,得到7个参数的最终聚类结果,如图3所示。图3树状图的横轴表示7个溃坝参数及其类间距离;纵轴表示7个溃坝参数,按

聚类结果排列顺序。由图可见7个参数可分成两大类, h_b 、 h_w 、 h_d 、 B_{ave} 为一类, V_w 、 S 、 Q_p 为另一类,此时两类距离为3,显著大于其他参数及其类间距离,表明聚类效果最好:类内参数相关性较强,类间参数相关性较弱。

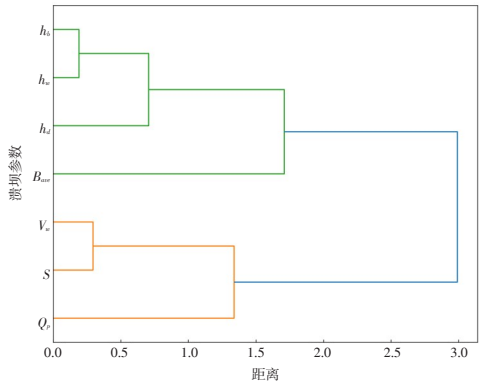


图3 溃坝/溃堤参数聚类分析树状图
Fig. 3 Dendrogram of clustering analysis for dam/embankment failure parameters

3 预测公式建立及结果分析评估

3.1 预测公式的构建与评估

根据聚类分析结果,将溃坝峰值流量、溃口宽度由具有较强相关性的类内变量表示:

$$\begin{cases} Q_p = f(S, V_w) \\ B_{ave} = f(h_d, h_w, h_b) \end{cases} \quad (1)$$

采用传统的最小二乘法,基于溃坝/溃堤案例数据库,可构建峰值流量和溃口宽度的预测公式^[5]:

$$\begin{cases} Q_p = 0.16V_w^{0.83}S^{-0.19} \\ B_{ave} = 7.21h_d^{-1.91}h_w^{4.23}h_b^{-1.42} \end{cases} \quad (2)$$

可决系数 R^2 常被用来衡量预测值与实际值的吻合程度,表征预测公式的预测性能及精度。可决系数越大,表明预测精度越高。可决系数计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_p - X_m)^2}{\sum_{i=1}^n (X_o - X_m)^2} \quad (3)$$

式中, X_o 为溃坝参数真实值; X_p 为预测值; X_m 为所有样本真实值的平均数; n 为样本数量。针对本研究的40个溃坝案例,分别利用预测公式(2)与国内外常用预测公式进行精度对比,结果见表2~3。由表2可见,式(2)具有较高的可决系数,峰值流量的预测具有较高的精度。而表3显示目前溃口宽度的预测精度普遍不高,可决系数最低值仅为0.241,式(2)的可决系数相对较高,用于工程实际仍有缺陷。

表2 峰值流量预测公式计算效果比较

Table 2 Comparison of prediction effect of peak discharge

预测公式	R^2
$Q_p = 0.607(V_w)^{0.295}(h_w)^{1.24}$	0.499
$Q_p = 0.031(g)^{0.5}(V_w)^{0.47}(h_w)^{0.15}(h_b)^{0.94}$	0.636
$\frac{Q_p}{V_w g^{0.5} h_w^{-0.5}} = e^{-4.55 \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right)^{-1.58} \left(\frac{h_w}{h_b} \right)^{-0.76} \left(\frac{h_d}{h_0} \right)^{0.1}}$	0.691
$Q_p = 0.16V_w^{0.83}S^{-0.19}$	0.894
$Q_p = 0.11V_w^{2.15}S^{-1.5}$	0.936

注: g 为重力加速度, m/s^2 ; h_0 为单位高度,设定为1 m。

3.2 预测公式修正

考虑到数据库中Hatfield、石漫滩和Mhlanga个溃坝案例的个别参数值远超其他案例,属于异常值,可能对预测公式的精度影响较大,因此剔除上述3个溃坝案例,对剩余的37个溃坝/溃堤案例重新进行回归拟合,得到修正后的峰值流量与溃口宽度预测公式。

$$\begin{cases} Q_p = 0.11V_w^{2.15}S^{-1.5} \\ B_{ave} = 0.98h_d^{-2.48}h_w^{2.14}h_b^{1.78} \end{cases} \quad (4)$$

表3 溃口宽度预测公式计算效果比较

Table 3 Comparison of prediction effect of dam breach width

预测公式	R^2
$B_{ave} = 3h_w$	0.241
$B_{ave} = 0.180 3K_0(V_w)^{0.32}(h_b)^{0.19}$	0.407
$\frac{B_{ave}}{h_b} = e^{-0.90 \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right)^{0.84} \left(\frac{h_w}{h_b} \right)^{2.30} \left(\frac{h_d}{h_0} \right)^{0.06}}$	0.477
$B_{ave} = 7.21h_d^{-1.91}h_w^{4.23}h_b^{-1.42}$	0.513
$B_{ave} = 0.98h_d^{-2.48}h_w^{2.14}h_b^{1.78}$	0.739

修正公式(4)的可决系数与公式(2)相比有明显增加。修正后溃口宽度公式的 R^2 达到了0.739,提升了44.1%;修正后峰值流量公式的 R^2 达到了0.936,增幅仅为4.7%。由此可见,剔除数据库中的极端或异常数据能提升模型性能,尤其对溃口宽度预测公式的提升效果更好。

3.3 实例验证

选取国内外3个水库大坝实际溃坝案例进行预测精度验证:中国的板桥水库、美国的Apishapa水库和Centralia水库。3个案例的坝高、坝型及溃坝方式均不同,采用预测公式(4)对溃口峰值流量、溃口宽度进行预测,结果见表4。由表4可见,公式(4)具有较强的预测能力,预测值相对误差约25%,实际应用价值较好。

4 结 语

基于国内外溃坝/溃堤案例,建立了样本丰富、包含7个参数的溃坝/溃堤数据库,构建了峰值流量和溃口宽度的预测公式。主要结论如下:

(1)利用层次聚类方法研究溃口特征参数的相关性,表明将7个参数分为两类是最优组合。由于采用了层次聚类方法,类内变量相关性较强,因此所建立的溃口峰值流量和溃口宽度预测公式具有相对较少的变量数,同时具有较高的预测精度。

(2)通过国内外3个典型溃坝案例,验证本研究预测公式对不同坝高、坝型、溃决方式的土石类堤坝案例均具有良好的预测能力。

(3)本研究溃堤参数预测公式主要适用于水库

(下转第27页)

(3)掺入一定量的废胶粉和消石灰改性剂均有助于降低沥青混凝土的斜坡流淌值,改善其热稳定性,且消石灰的改善效果更显著。

(4)掺入一定量的废胶粉和消石灰改性剂均有助于提升沥青混凝土的水稳定性。

(5)综合考虑沥青混凝土的抗渗性、低温性能、高温性能及工程经济性,在本试验采用材料及配合设计的前提下,推荐掺入3%的消石灰和10%的废胶粉制备改性沥青混凝土。

本研究样本还不够丰富,特别是没有选择更多的沥青混凝土配合比展开试验,后续研究可选择更多参数和不同的材料样本展开,以获得通用性更高的结论,为工程建设和理论研究提供参考。

参考文献:

[1] 陈帅军,董成鹏,杨武.填料掺量对水工沥青混凝土力学性能影响的研究[J].吉林水利,2025(3):13-17.
[2] 宁逢伟,毛春华,隋伟,等.寒区防渗层SBS改性沥青混凝土

土抗弯性能及三轴静动力特性研究[J].水电与抽水蓄能,2024,10(5):100-108,114.
[3] 方伟,李洋,贺晶晶,等.水工沥青混凝土裂缝愈合特性研究[J].水利与建筑工程学报,2024,22(4):35-41.
[4] 付涵,柴军瑞,许增光,等.变温条件下胶粉改性沥青混凝土抗裂特性研究[J].水力发电学报,2024,43(6):53-62.
[5] 靳平超,张祖莲,谢道春,等.配合比对沥青混凝土刚度和强度的影响研究[J].中国水运,2023,23(24):141-143.
[6] 余梁蜀,李加明,庞渊,等.水工沥青混凝土粘弹性特性试验研究[J].水电能源科学,2023,41(9):139-142,179.
[7] 次仁云旦,王柳江,扎西顿珠,等.温度对水工沥青混凝土强度及剪胀特性的影响试验研究[J].长江科学院院报,2024,41(1):190-195.
[8] 邹长根,余浩,闫小虎,等.沥青高温性能对防渗层沥青混凝土斜坡流淌的影响[J].建材世界,2022,43(6):47-51.

收稿日期:2025-06-26;修回日期:2025-09-09

作者简介:葛士磊(1990—),男,江苏扬州人,工程师,主要从事水利水电工程咨询工作。

作者邮箱:gejujie7700966@163.com

(上接第21页)

表4 典型溃坝案例溃口参数预测结果

Table 4 Prediction results of breach parameters of typical dam failure cases

溃坝名称	溃坝模式	坝型	坝高/m	Q_p/m^3			B_{max}/m		
				实测值	计算值	相对误差	实测值	计算值	相对误差
板桥水库	漫顶	心墙坝	24.5	78 100	77 417	0.87%	291	225.8	22.4%
Apishapa 水库	管涌	均质坝	34.1	6 850	6 423	6.22%	86.5	87.9	1.63%
Centralia 水库	漫顶	均质坝	5.2	71	52.7	25.8%	10.1	10.5	4.22%

型堤坝(包括湖泊堤防),研究方法对河道型堤坝溃口参数预测有参考意义。

参考文献:

[1] 陈生水,陈祖煜,钟启明.土石坝和堰塞坝溃决机理与溃坝数学模型研究进展[J].水利水电技术,2019,50(8):27-36.
[2] 韩瑞芳,康秀宝.土石坝下游坝坡失稳危险度分析[J].大坝与安全,2014(1):9-11.
[3] Walder J S,O'Connor J E.Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams[J].Water Resources Research,1997,33(10):2337-2348.
[4] Qiming Z,Shengshui C,Zhongzhi F,et al.New empirical model for breaching of earth-rock dams[J].Natural Hazards Review,2020,21(2):1-5.
[5] 段文刚,刘备,黄卫.非黏性堤防溃口发展过程计算模型

[J].长江科学院院报,2024,41(2):67-75.
[6] Froehlich D C.Peak outflow from breached embankment dam[J].Journal of Water Resources Planning and Management,1995,121(1):90-97.
[7] 盛金保,李宏恩,盛韬桢.我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J].水利水运工程学报,2023(1):1-15.
[8] 何玉花,张东水,韩用顺,等.基于Ward系统聚类方法的黄河上游干流地区滑坡分类及其特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(1):46-53.

收稿日期:2024-11-26;修回日期:2025-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52479062、52309086);江苏省水利科技项目(2024009、2023013)

作者简介:张美满(1996—),男,浙江瑞安人,博士,主要从事水力学及河流动力学研究工作。

作者邮箱:zhangmeiman@hhu.edu.cn