

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700828

土石坝溃坝参数模型研究

梅世昂¹, 陈生水^{1,2}, 钟启明^{1,2}, 阎志坤¹

(1.南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2.水利部 土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘 要:通过对国外土石坝文献中溃坝案例数据信息进行校验整理,并补充收集到的相关国内溃坝案例,形成了一个包含154个溃坝案例的基础数据库。在此基础上,针对均质坝和心墙坝两种坝型,对模型输入变量进行无量纲化处理,选择库容形状参数、水位比参数及坝高参数等作为自变量进行回归分析,建立了可模拟土石坝溃口峰值流量、溃口最终平均宽度和溃坝历时的数学表达式。该溃坝参数经验模型可反映坝型、溃坝方式、溃坝时库容、水位、坝高、溃口深度等参数对溃口峰值流量、溃口最终平均宽度和溃坝历时的影响。此外,通过对国内外常用的溃坝参数经验模型的统计分析发现,本文模型相较于已有的模型,依据的土石坝溃坝案例数据库信息更为翔实,输入变量较易获取,对溃坝参数的影响因素考虑更加全面,特别是能更好地反映坝体特征和当前水力条件对溃坝参数的影响。针对数据库中的相关案例,使用本文模型与常用经验模型进行计算验证,通过整体均方根误差和可决系数的计算,发现本文模型在整体上具有更好的适应性、计算精度和拟合效果。再基于不同的坝型和溃坝方式,选取4组国内外典型案例进行分析,发现本文模型在整体上计算结果较为准确,进一步验证了本模型的合理性和优越性。

关键词:土石坝;溃坝数据库;溃坝参数模型;模型对比

中图分类号:TV122; TV631

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)02-0060-07

Parametric Model for Breaching Analysis of Earth-rock Dam

MEI Shiang¹, CHEN Shengshui^{1,2}, ZHONG Qiming^{1,2}, YAN Zhikun¹

(1.Nanjing Hydraulic Research Inst.,Nanjing 210029,China; 2.Key Lab. of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques,Ministry of Water Resources,Nanjing 210029,China)

Abstract: After collecting and analyzing the data of existing dam failure cases summarized in foreign references,as well as extra cases in China,a basic database containing 154 dam breaching cases with detailed information is constructed.Taking dam type,reservoir shape coefficient, ratio of water level to breach depth and dam height,which are all expressed in dimensionless forms,as independent variables into account,the regression analysis is adopted to establish dimensionless formulas for calculating peak outflow discharge,final average breach width and failure time.The new empirical model considers the influences of dam type,failure type,storage capacity,water level,dam height and breach depth.Comparing to the existing models for dam breaching parameters,the present model has the advantage of using larger database,easier acquisition of input variables,and including more influence factors of dam breaching parameters,in particular,the dam characteristics and current hydraulic conditions.Then,for all the dam breach cases collected in the database,the calculation using different models is carried out.The result shows that the present model has better adaptability and prediction accuracy based on the statistics of overall computing error,the value of root-mean-squared error and coefficient of determination,by comparing to the previous models.Furthermore,four typical breach cases of different dam types and failure types are selected to verify the rationality and superiority of the present model,and the calculation results of present model are more accurate in most of the cases than those of the other models.

Key words: earth-rock dam;database of dam breach;parametric model for dam breaching;model comparison

据中国水利部大坝安全管理中心普查资料统计^[1], 年均57.9座,且溃决大坝中98%以上是土石坝。因此自1954~2014年,中国有3 529座水库大坝发生溃决, 有必要研究可模拟土石坝溃决过程的数学模型,合

收稿日期:2017-10-09

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2017YFC0404805);国家自然科学基金资助项目(51379129)

作者简介:梅世昂(1990—),男,博士生.研究方向:土石坝坝料特性基础理论和溃坝. E-mail: 670938267@qq.com

网络出版时间:2018-03-20 16:22:31 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180320.1622.010.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

理反映各溃坝要素之间的相互关系,为溃决模拟提供参数依据。

按照目前常用的分类标准^[2],土石坝溃坝数学模型大致可分为2类:第1类是参数模型基于收集得到的溃坝案例数据进行统计回归,得出计算溃坝相关参数的表达式,模型主要采用经验公式直接计算出相关溃坝参数,如溃口峰值流量、溃口最终平均宽度和溃坝历时等变量;第2类是基于物理过程的溃坝模型,即通过综合水力学、土力学、泥沙侵蚀与输运理论等各学科知识建立起来的数学模型,通过不同的数值计算方法,获取溃口发展过程与溃口流量过程。

显而易见,基于物理过程的溃坝模型更能合理反映土石坝的溃坝过程,但由于溃坝过程牵涉到复杂的水土耦合过程,不同的基于物理过程的溃坝模型存在各自的优劣,且预测精度有待于进一步的提高,尚缺少能够被广泛接收的数学模型^[2-4]。另外,虽然参数模型大多无法考虑土石坝筑坝材料的物理力学特性,但由于参数模型公式简单、计算快速,因此也常用于溃坝致灾后果的预测。

随着近年来对溃坝案例调查工作的深入开展,溃坝数据的可靠度也得到提升。作者主要介绍国内外常用的土石坝溃坝参数模型,通过收集整理国外溃坝案例的相关数据,并增加国内具有可靠调查数据的溃坝案例,遴选出154个具有翔实资料的土石坝溃坝案例,构建了相关的溃坝数据库。依托该数据库,通过统计回归分别构建了土石坝溃口峰值流量、溃口最终平均宽度和溃坝历时等相关参数的表达式,并与国内外常用的参数模型进行比较,验证模型的合理性和先进性。

1 土石坝溃坝数据库

通过对国内外文献中已有的溃坝数据^[4-8]进行核实,并根据水利部大坝安全管理中心的资料补充了相关的国内溃坝案例,形成了一个包含154个溃坝案例的基础数据库。其中,中国溃坝案例83例,国外71例,美国占了59例。值得一提的是,国内外已溃土石坝基本上为均质坝与心墙坝,混凝土面板堆石坝的数量极少。截止目前为止,国内外共发生过5例面板堆石坝溃坝事故,其中,美国3例,阿根廷1例,中国1例,且有3例年代久远。为了充分考虑样本的数量与可靠性,未对混凝土面板堆石坝溃坝案例进行统计。数据库主要包括如下信息:国别、溃坝模式、坝型、坝高(h_d)、溃坝时溃口底部以上水深(h_w)、溃口最终深度(h_b)、水库库容(S)、溃坝时溃口底部以上水库库容(V_w)、溃口峰值流量(Q_p)、溃口最终平均宽度(B_{avg})和溃坝历时(T_f),典型的溃口形状及参数如图1

所示。其中,溃坝模式包括漫顶和渗透破坏,坝型包括均质坝和心墙坝,最多的是均质坝的漫顶破坏,占到总数的67.5%。而且这些溃决的坝主要集中在0~40 m的中低坝,高坝的溃决案例相对较少。

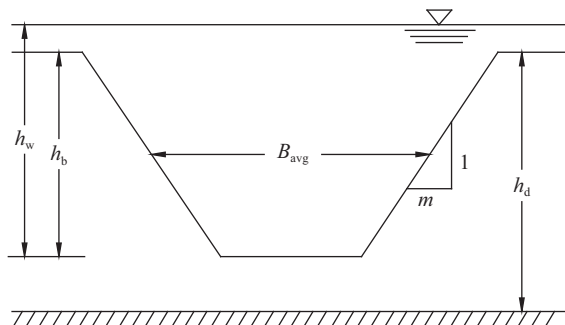


图1 典型溃口示意图

Fig.1 Typical breach shape

2 土石坝溃坝参数模型

通过土石坝溃坝数据库可以发现,溃决的土石坝主要为均质坝或心墙坝,最终破坏模式一般表现为漫顶或者渗透破坏。为了充分考虑坝型、溃决模式、水库特征和溃口特征,选取溃坝时溃口底部以上水库库容(V_w)、溃坝时溃口底部以上水深(h_w)、坝高(h_d)、溃口最终深度(h_b)等参数,并对各参量进行无量纲化处理,采用统计回归的方法,获取溃口峰值流量、溃口最终平均宽度及溃坝历时等结果。

对于坝型,模型基于溃坝数据库,采用不同的表达式分别模拟均质坝与心墙坝的溃决;对于溃决模式,模型利用溃坝时溃口底部以上水深(h_w)这一参数统一考虑了漫顶与渗透破坏。为了体现溃坝时水库的特征和溃口的特征,并实现各参量的无量纲化,选取($V_w^{1/3}/h_w$)作为库容形状参数表征溃坝时的库容与水位的关系;选取(h_w/h_b)作为水位比参数表征溃口溃坝时的水位与溃口最终深度的关系,间接体现了坝料的抗冲蚀能力与溃坝模式;选取(h_d/h_0)表征土石坝的坝高,其中, h_0 为单位高度,设定 $h_0=1$ m。溃口峰值流量、溃口最终平均宽度和溃坝历时均采用上述3个参量构建表达式。

对于溃口峰值流量 Q_p ,也采用同样的方法进行无量纲化处理,选取($Q_p/(V_w g^{0.5} h_w^{-0.5})$)表征土石坝溃口峰值流量与溃坝时溃口以上库容及水位的关系,其中, g 为重力加速度。则土石坝溃口峰值流量可表示为:

$$\frac{Q_p}{V_w g^{0.5} h_w^{-0.5}} = \begin{cases} \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right)^{-1.58} \left(\frac{h_w}{h_b} \right)^{-0.76} \left(\frac{h_d}{h_0} \right)^{0.10} e^{-4.55}, & \text{均质坝;} \\ \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right)^{-1.51} \left(\frac{h_w}{h_b} \right)^{-1.09} \left(\frac{h_d}{h_0} \right)^{-0.12} e^{-3.61}, & \text{心墙坝} \end{cases} \quad (1)$$

对于溃口最终平均宽度 B_{avg} , 也进行无量纲化处理, 选取 (B_{avg}/h_b) 表征土石坝溃口最终平均宽度与最终深度之间的关系。则土石坝溃口最终平均宽度可表示为:

$$\frac{B_{\text{avg}}}{h_b} = \begin{cases} \left(\left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{0.84} \left(\frac{h_w}{h_b}\right)^{2.30} \left(\frac{h_d}{h_0}\right)^{0.06}\right) e^{-0.90}, & \text{均质坝;} \\ \left(\left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{0.55} \left(\frac{h_w}{h_b}\right)^{1.97} \left(\frac{h_d}{h_0}\right)^{-0.07}\right) e^{-0.09}, & \text{心墙坝} \end{cases} \quad (2)$$

对于溃口历时 T_f , 也进行无量纲化处理, 选取 (T_f/T_0) 表征土石坝溃口历时, 其中, T_0 为单位时间, 取值为1 h。则土石坝溃口最历时可表示为:

$$\frac{T_f}{T_0} = \begin{cases} \left(\left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{0.56} \left(\frac{h_w}{h_b}\right)^{-0.85} \left(\frac{h_d}{h_0}\right)^{-0.32}\right) e^{-0.20}, & \text{均质坝;} \\ \left(\left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{1.52} \left(\frac{h_w}{h_b}\right)^{-11.36} \left(\frac{h_d}{h_0}\right)^{-0.43}\right) e^{-1.57}, & \text{心墙坝} \end{cases} \quad (3)$$

选择土石坝数据库中具有相关实测参数的案例对模型各表达式进行验证, 由表1所示, 对于本文建立的参数模型, 可用于计算溃口峰值流量的案例共计119个, 可用于计算溃口最终平均宽度的案例共计63个, 可用于计算溃坝历时的案例共计39个。

表 1 各输出结果计算结果统计

输出结果	案例数	E_{rms}	R^2	F 值	P 值
溃口峰值流量	119	0.419	0.929	107	0
溃口最终平均宽度	63	0.227	0.770	19.6	0
溃坝历时	39	0.331	0.460	6.4	0

选择均方根误差(E_{rms})和可决系数(R^2)2个指标衡量本文参数模型计算结果的误差, 2个指标的表达式分别为:

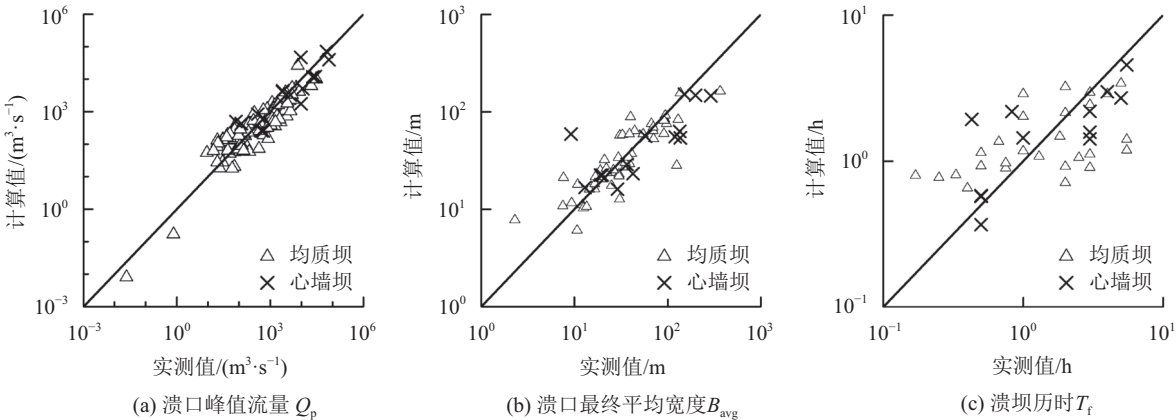


图 2 参数计算值与实测值对比
Fig.2 Comparison between calculated and measured values

由表1和图2可以看出: 对于溃口峰值流量 Q_p (图2(a)), 可决系数较大, 表明模型的拟合程度较

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{A_{i,\text{计算值}}}{A_{i,\text{实测值}}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{A_{i,\text{计算值}}}{A_{i,\text{实测值}}} \right) \right]^2}{\sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{A_{i,\text{实测值}}}{A_{\text{平均值}}} \right) \right]^2} \quad (5)$$

式中, n 为样本数, $A_{i,\text{计算值}}$ 为第 i 个样本的计算值, $A_{i,\text{实测值}}$ 为第 i 个样本的实测值, $A_{\text{平均值}}$ 为所有样本实测值的平均值。均方根误差是用于衡量模型计算值与实测值之间的偏差, 均方根误差越小, 模型计算精度越高; 可决系数用于衡量模型计算值与实测值的拟合程度, 可决系数越大, 模型拟合程度越高。

再利用 F 检验和 P 值判定回归模型显著性:

$$F = \frac{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^n (A_{i,\text{计算值}} - A_{\text{平均值}})^2}{\frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^n (A_{i,\text{实测值}} - A_{i,\text{计算值}})^2} \quad (6)$$

式中, k 代表回归模型自变量个数。

P 值为计算得到的检验统计量小于或等于实际观测样本数据的概率, 表达式为:

$$P = P(F \leq F_{\text{critical}} | \mu = \mu_0) \quad (7)$$

式中, F_{critical} 为显著性水平0.05时的 F 值, 可通过查表获得。若 $F > F_{\text{critical}}$, 且 $P < 0.05$, 则此回归方程在显著性水平0.05上是显著的, 则参数选取合理, 样本具有代表性。

本文模型的各输出结果计算结果统计见表1, 各输出参数的计算值与实测值的对比如图2所示。

高, 均方根误差偏大, 表明模型计算值与实测值之间存在一定的偏差, 究其原因, 应为少数案例的溃口峰

值流量偏差较大所致。对于溃口最终平均宽度 B_{avg} (图2(b)), 均方根误差较小, 表明模型计算值与实测值之间的偏差较小, 但溃口最终平均宽度的可决系数较峰值流量的有所降低。对于溃坝历时 T_f (图2(c)), 均方根误差的结果介于溃口峰值流量与溃口最终平均宽度计算结果之间, 但可决系数偏低, 表明模型计算结果的拟合效果较差, 究其原因: 一方面在于溃坝时极少有亲历者, 因此溃坝历时的统计可能存在较大误差; 另一方面, 样本数偏少也是导致拟合程度偏低的一个因素。而通过查表得到3个参数的 F_{critical} 分别为2.68、2.76和2.87, 均远小于其相应的 F 值, 且其相应的 p 值均很小, 接近于0, 如表1所示, 满足 $p<0.05$ 。

表 2 不同模型溃口峰值流量计算效果比较

Tab.2 Fitting effort comparison of different peak outflow discharge models				
模型	表达式	案例数	E_{rms}	R^2
Kirkpatrick ^[9]	$Q_p = 1.268(h_w + 0.3)^{2.5}$	119	0.619	0.845
Soil Conservation Service ^[10]	$Q_p = 16.6(h_w)^{1.85}$	119	0.809	0.735
Singh等 ^[11]	$Q_p = 13.4(h_d)^{1.89}$	119	0.798	0.743
	$Q_p = 1.776(S)^{0.47}$	116	0.792	0.756
MacDonald等 ^[12]	$Q_p = 1.154(V_w h_w)^{0.412}$	119	0.664	0.822
Costa ^[13]	$Q_p = 0.981(h_d S)^{0.42}$	116	0.661	0.830
Evans ^[14]	$Q_p = 0.72(V_w)^{0.53}$	119	0.821	0.751
U.S.Bureau of Reclamation ^[15]	$Q_p = 19.1(h_w)^{1.85}$	119	0.850	0.708
Froehlich ^[16]	$Q_p = 0.607(V_w)^{0.295}(h_w)^{1.24}$	119	0.527	0.888
Walder等 ^[17]	$Q_p = 0.031(g)^{0.5}(V_w)^{0.47}(h_w)^{0.15}(h_b)^{0.94}$	119	0.536	0.884
Xu等 ^[4]	$Q_p = 0.175(g)^{0.5}(V_w)^{5/6}(h_d/h_r)^{0.199}(V_w^{1/3}/h_w)^{-1.274}e^{B_4}$	43	0.425	0.817
Pierce等 ^[18]	$Q_p = 0.0176(V_w h_w)^{0.606}$	119	0.465	0.913
	$Q_p = 0.038(V_w)^{0.475}(h_w)^{1.09}$	119	0.429	0.926
de Lorenzo等 ^[19]	$Q_p = 0.321(g)^{0.258}(0.07V_w)^{0.485}(h_b)^{0.802}$ (漫顶), $Q_p = 0.347(g)^{0.263}(0.07V_w)^{0.474}(h_b)^{-2.151}(h_w)^{2.992}$ (渗透破坏)	119	0.556	0.875
Hooshyaripor等 ^[20]	$Q_p = 0.0212(V_w)^{0.5429}(h_w)^{0.8713}$	119	0.449	0.918
	$Q_p = 0.0454(V_w)^{0.448}(h_w)^{1.156}$	119	0.432	0.925
Azimi等 ^[21]	$Q_p = 0.0166(gV_w)^{0.5}h_w$	119	0.456	0.916
本文模型	式(1)	119	0.419	0.929

表 3 溃口最终平均宽度计算效果对比

Tab.3 Fitting effort comparison of different average breach width models				
模型	表达式	案例数	E_{rms}	R^2
U.S.Bureau of Reclamation ^[15]	$B_{\text{avg}} = 3h_w$	63	0.305	0.585
von Thun等 ^[22]	$B_{\text{avg}} = 2.5h_w + C_b$	63	0.296	0.609
Froehlich ^[23]	$B_{\text{avg}} = 0.1803K_0(V_w)^{0.32}(h_b)^{0.19}$	63	0.240	0.742
Xu等 ^[4]	$B_{\text{avg}} = 0.787(h_b)(h_d/h_r)^{0.133}(V_w^{1/3}/h_w)^{0.652}e^{B_3}$	47	0.326	0.514
Froehlich ^[24]	$B_{\text{avg}} = 0.27k_M(V_w)^{1/3}$	63	0.246	0.730
本文模型	式(2)	63	0.227	0.770

表 4 溃坝历时计算效果对比

Tab.4 Fitting effort comparison of different failure time models

模型	表达式	案例数	E_{rms}	R^2
MacDonald等 ^[12]	$T_f = 0.0179(0.0261(V_w h_w)^{0.769})^{0.364}$	39	0.566	-0.581
U.S.Bureau of Reclamation ^[15]	$T_f = 0.011B_{avg}$	39	0.689	-1.34
Froehlich ^[23]	$T_f = 0.00254(V_w)^{0.53}(h_b)^{-0.9}$	39	0.575	-0.627
Xu等 ^[4]	$T_f = 0.304T_r(h_d/h_r)^{0.707}(V_w^{1/3}/h_w)^{1.228}e^{B_5}$	34	0.295	0.591
Froehlich ^[24]	$T_f = 63.2(V_w/(gh_b^2))^{0.5}/3600$	39	0.541	-0.441
本文模型	式(3)	39	0.331	0.460

表3是常见最终溃口平均宽度模型对溃坝数据库数据的计算结果。由表3可以看出，本文模型关于溃口最终平均宽度计算结果的均方根误差最小，可决系数最大，验证了本文模型在计算溃口最终平均宽度方面的优越性。

表4是常见溃坝历时模型对本文数据库数据计算效果的比较。由表4可以看出：对于均方根误差和可决系数，Xu等^[4]的计算结果比本文模型更小，但数据库中可用于此模型的溃坝案例数为34，需要对坝料的冲蚀特性进行判断（冲蚀率高、中、低的坝料选取的参数不同），该模型也没有给出相应的判别标准，因此其可靠性还有待于进一步验证，在应用中也存在一定的困难。而对于其他模型，溃坝历时都不能很好地反映，均方根误差较大，拟合效果也很差，可决系数都出现负数，相对而言，本文模型则合理得多。

通过与国内外常用的溃坝参数模型比较后发现，本文模型在计算精度和拟合效果的整体表现上更优越，且计算参数更易获取，验证了本文模型的合理性和先进性。

4 实例验算

本文提出的模型主要针对均质坝与心墙坝，希望在坝体出现溃坝可能时，及时预测其可能的致灾后果，为防治和应对提供参考。在预测还未发生的坝体溃决后的溃坝参数时，因溃口最终深度无法确定，而其他参数和溃坝参数都受到其影响，可以通过假定不同溃口深度预测相应的溃坝峰值流量、平均溃口宽度及溃坝历时，提出相应致灾应对方式。而相应的 V_w 及 h_w 都可以通过当时的库容曲线直接获得，参数获取较为容易。

下面针对不同坝型及溃坝方式，选取几组较为有名的溃坝案例，即Elk City、Frenchman Creek、Lower Two Medicine和Teton水库，进行本文模型验证，应用本文模型所得具体计算结果及在95%置信区间的结果预测范围如表5所示，其中Lower Two Medicine水库没有溃坝历时的记录，故没有在此讨论，不过利用本文模型可以计算出其溃坝历时为2.23 h，这可以为后续的洪水演进和致灾后果研究提供一定参考。

表 5 典型溃坝案例模型预测结果

Tab.5 Predictions of breaching parameters for typical breach cases

溃坝名称	溃坝模式	坝型	坝高/m	$Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$			B_{avg}/m			T_f/h		
				实测值	计算值	95%预测区间	实测值	计算值	95%预测区间	实测值	计算值	95%预测区间
Elk City	漫顶	心墙	24.5	610	616	79~4 777	36.6	28.8	6.4~201.4	0.83	2.19	0.67~7.05
Frenchman Creek	渗透	均质	12.5	1 420	1 571	230~10 726	54.6	59.2	23.0~152.6	3	2.4	0.42~14.2
Lower Two Medicine	漫顶	均质	11.28	1 800	1 608	234~11 034	67	75.9	29.7~193.5	—	2.23	—
Teton	渗透	心墙	93	65 100	72 433	14 718~356 285	151	151.7	52.8~766.5	4	3.0	1.00~8.82

从表5中可以看出：Elk City溃坝历时的计算结果虽然也在预测范围中，但计算结果较文献记录的值偏大很多，这可能是由于溃坝时极少有亲历者，溃坝历时的统计可能存在较大误差，且溃坝历时样本数偏少，得出模型对于某个案例可能会出现较大偏差。对于其他案例参数，本文模型能较好反映其溃决参

数，相对误差基本都在25%以内，具有一定的参考价值。

针对这4个溃坝案例，利用本文模型与表2~4中的其它模型进行计算，计算误差对比如图3~5所示，其中，图3由于溃口峰值流量计算公式较多，选取在表2中拟合效果较好且较新的5种模型与本文模型进行对比。

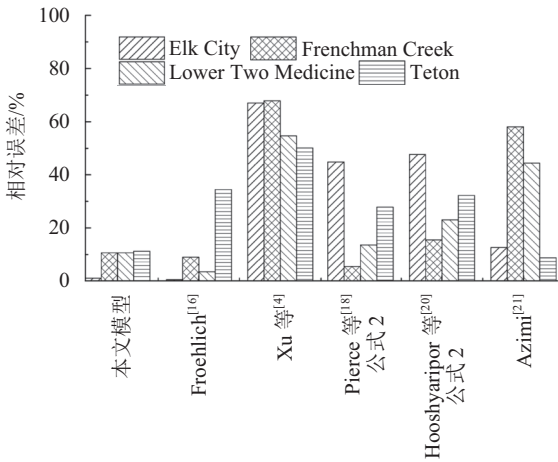


图3 不同模型溃口峰值流量计算误差比较

Fig.3 Calculation error comparison of different peak out-flow discharge models

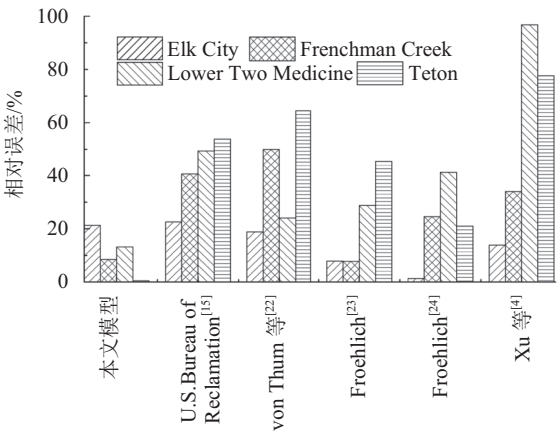


图4 不同模型平均溃口宽度计算误差比较

Fig.4 Calculation error comparison of different average breach width models

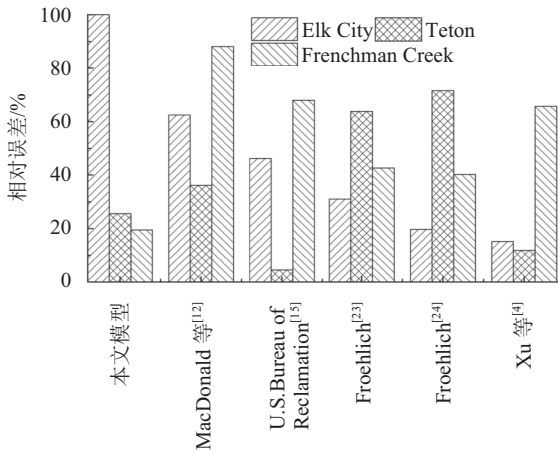


图5 不同模型溃坝历时计算误差比较

Fig.5 Calculation error comparison of different failure time models

从图3中可以看出,本文模型在计算Elk City水库溃口峰值流量时相对误差仅为1%,对于其他3个案

例,相对误差也都保持在10%左右,计算结果远好于其他模型。同样地,对于平均溃口宽度,本文模型计算效果误差也保持在合理范围内,总体上远好于其他5个模型,如图4所示。对于溃坝历时模拟,如图5所示,本文模型在计算Elk City水库案例时误差较大,超过了100%,这一定程度上是因为受限于溃坝历时获取困难和案例数较少,使得个别案例具有较大偏差。

整体来说本文模型除了在计算Elk City水库溃坝历时时计算值偏大,其他情况的计算效果较好,误差均在可接受范围内,在整体上则均好于其他计算模型。这说明本模型具有一定的先进性和适用性,但在个别案例计算时可能出现较大误差,这就需要继续扩大数据库案例数,减小个别数据偏差对整体公式拟合的影响,或进一步引入新的变量,建立更加全面考量的模型。

5 结 论

基于国内外溃坝案例,建立了土石坝溃坝案例数据库,在此基础上提出了可模拟溃口峰值流量、溃口最终平均宽度和溃坝历时的溃坝参数模型,主要结论如下:

1)对国外已有土石坝溃坝案例数据信息进行校验整理,并补充了相关的国内溃坝案例,形成了一个包含154个土石坝溃坝案例的基础数据库。

2)针对均质坝和心墙坝两种坝型,选取库容形状参数、水位参数以及坝高参数等作为自变量进行回归分析,建立了可用于计算土石坝溃口峰值流量、溃口最终平均宽度和溃坝历时等参数的无量纲表达式,该模型可反映坝型、溃坝方式、溃坝时库容、水位、坝高等参数对溃坝参数的影响,对溃坝影响因素考虑得更加全面。

3)通过与国内外常用的溃坝参数模型对比发现,本文模型计算结果上具有更小的均方差和更大的可决系数,且计算参数易获取,验证模型的合理性和先进性。

4)选取4个国内外典型溃坝案例对模型进行验证,发现除了Elk City坝溃坝历时计算结果与实际值相差较大,本文模型在整体上的计算结果较为准确,与实际值相差较小,进一步验证了模型的合理性和先进性。

由于溃坝历时获取困难、数据准确性较低、样本数较少,使得溃坝历时模型拟合度较差,在个别案例中具有较大偏差,所以还需进一步对溃坝数据进行收集整理,希望通过更先进的监测手段获取可信信息,继续扩大数据库案例数,减小个别数据偏差对整体公式拟合的影响,进一步引入更复杂的变量,建立更加全面考量的模型。

参考文献:

- [1] Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources. Dam breach register book of the national reservoirs[R]. Nanjing: Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, 2016. [水利部大坝安全管理中心. 垮坝登记册[R]. 南京: 水利部大坝安全管理中心, 2016.]
- [2] Wu W, Altinakar M S, Al-Riffai M, et al. Earthen embankment breaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(12): 1549–1564.
- [3] Zhong Q M, Wu W M, Chen S S, et al. Comparison of four simplified physically-based dam breach models[J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 1–34.
- [4] Xu Y, Zhang L M. Breaching parameters for earth and rock-fill dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1957–1969.
- [5] Wahl T L. Prediction of embankment dam breach parameters: A literature review and needs assessment[M]. Denver: U.S. Dept. of the Interior, 1998.
- [6] Pierce M W. Predicting peak outflow from breached embankment dams[D]. Fort Collins: Colorado State University, 2008.
- [7] O'Connor J E, Beebe R A. Floods from natural rock-material dams[M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [8] Xu Y. Analysis of dam failures and diagnosis of distresses for dam rehabilitation[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2010.
- [9] Kirkpatrick G W. Evaluation guidelines for spillway adequacy[C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1977.
- [10] Soil Conservation Service(CSC). Simplified dam-breach routing procedure[R]. Washington DC: U.S. Dept. of Agriculture, 1981.
- [11] Singh K P, Snorrason A. Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models[J]. Journal of Hydrology, 1984, 68(1/2/3/4): 295–310.
- [12] MacDonald T C, Langridge-Monopolis J. Breaching characteristics of dam failure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(5): 567–586.
- [13] Costa J E. Floods from dam failures[R]. Denver: United States Geological Survey, 1985.
- [14] Evans S G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23(3): 385–387.
- [15] U.S. Bureau of Reclamation. Downstream hazard classification guidelines[M]. Denver: U.S. Department of the Interior, 1988.
- [16] Froehlich D C. Peak outflow from breached embankment dam[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1995, 121(1): 90–97.
- [17] 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.
- [18] Pierce M W, Thornton C I, Abt S R. Predicting peak outflow from breached embankment dams[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15(5): 338–349.
- [19] de Lorenzo G, Macchione F. Formulas for the peak discharge from breached earthfill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(1): 56–67.
- [20] Hooshyaripor F, Tahershamsi A, Golian S. Application of copula method and neural networks for predicting peak outflow from breached embankments[J]. Journal of Hydroenvironment Research, 2014, 8(3): 292–303.
- [21] Azimi R, Vatankhah A R, Kouchakzadeh S. Predicting peak discharge from breached embankment dams[C]. The 36th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), Hague, 2015.
- [22] von Thun J L, Gillette D R. Guidance on breach parameters[R]. Denver: U.S. Dept. of the Interior, 1990.
- [23] Froehlich D C. Embankment dam breach parameters revisited[J]. American Society of Civil Engineers, 1995: 887–891.
- [24] Froehlich D C. Predicting peak discharge from gradually breached embankment dam[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(11): 04016041.

(编辑 张 琼)

引用格式: Mei Shiang, Chen Shengshui, Zhong Qiming, et al. Parametric model for breaching analysis of earth-rock dam[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(2): 60–66. [梅世昂, 陈生水, 钟启明, 等. 土石坝溃坝参数模型研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(2): 60–66.]