

两种溃坝模型在唐家山堰塞湖溃决模拟中的对比

李相南,陈祖煜

(中国水利水电科学研究院岩土工程研究所,北京 100048)

摘要:基于唐家山堰塞坝溃决的实测数据,使用 BREACH 模型及中国水科院 DB-IWHR 模型,对唐家山堰塞坝溃决过程进行了反演分析,并对两种模型进行参数敏感性分析。研究表明:使用针对唐家山的参数,两种模型均可较好地反演唐家山溃决洪水的过程,BREACH 模型的下游坡比和孔隙率是对结果影响比较敏感的输入参数;DB-IWHR 模型在冲刷参数和下游水深计算两方面做了改善,较好地解决了这一问题;DB-IWHR 提供了一个 Excel 格式的计算软件,数值分析稳定性好,使用简洁客观,可供类似堰塞湖应急处置时参考。

关键词:堰塞湖;BREACH 模型;DB-IWHR 模型;溃坝洪水分析;唐家山

中图分类号:TV122⁺.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)02-0020-07

Comparison of two models for back analysis of dam breach of Tangjiashan Barrier Lake//LI Xiangnan, CHEN Zuyu(*Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China*)

Abstract: Based on measured data of the dam breach of Tangjiashan Barrier Lake, the process of the dam breach was analyzed using the BREACH model and the DB-IWHR model developed by the China Institute of Water Resources and Hydropower Research. A sensitivity analysis of the two models to different parameters was also performed. Results show that, using the parameters of the dam, the two models can both reflect the flooding process induced by the dam breach; the calculated results of the peak flow are more sensitive to the input parameters of the downstream slope and porosity in the BREACH model; the DB-IWHR model improves the calculation of the erosion parameter and downstream water depth, resulting in calculated results less sensitive to the input parameters; and the DB-IWHR model provides software in the Excel format, with a high stability in numerical analysis, which is transparent, self-explanatory, and friendly to practitioners.

Key words: barrier lake; BREACH model; DB-IWHR model; dam breach-induced flood analysis; Tangjiashan

近年来,由地震、泥石流等自然灾害形成的天然堰塞坝在库水位渗透作用或漫顶冲刷作用下,极易发生失控性溃坝,危害极大。较为准确地预测溃坝洪水流量,是做好应急预案工作的基本条件。但是溃坝洪水分析的理论 and 相应的程序还远不能满足安全防控的需要。在 2008 年汶川地震中,模拟预测唐家山堰塞湖溃决洪峰流量时,某一模型预测的最大峰值流量为 46 000 m³/s,而实测峰值流量仅有 6 500 m³/s^[1]。

目前对其模型研究主要包括统计模型、参数化模型和基于物理机理的模型^[2]。在实际工程应用中,通常采用基于物理机理的数学参数模型,通过考虑溃口的水流过程、溃口的冲刷侵蚀过程以及溃口的扩展过程,结合三者之间的相互影响建立了如 BREACH^[3]、BEED^[4]、MIKE11^[5]、HEC-RAS^[6]等堰

塞坝溃决计算程序。

陈祖煜等^[7]提出了基于物理机制的数学参数模型,在 Microsoft Excel 中开发了 DB-IWHR 模型,提出溃口侵蚀率的双曲线冲刷模型,引入了边坡稳定计算模拟溃口展宽。该模型采用速度增量形式直接求解控制方程,避免了数值迭代,其成果与唐家山的洪峰流量和洪峰时间吻合,且参数敏感性问题得到了较好的解决,相应的成果也在红石岩堰塞湖的应急处置中进行了应用^[8]。由 Fread 于 1988 年提出的 BREACH 模型是应用较为广泛的溃坝洪水分析程序,采用 Smart 修正的 Meyer-Peter & Mueller 公式计算冲刷过程,曾成功运用于提堂坝(Teton Dam)、草坪坝(Lawn Dam)、曼塔罗河堰塞坝(Mantaro Landslide Dam)、灵湖堰塞坝(Spirit Lake

Blockage) 的模拟和预测中^[3]。

鉴于溃坝洪水分析包含较大的不确定性,在实际工作中,工程技术人员偏向于采用多个模型和相应的程序,对计算结果进行综合分析,在此基础上进行工程决策。本文针对 2008 年唐家山堰塞湖溃决过程,通过对以上 2 个模型和相应程序对比分析,考察不同溃坝模型对洪峰流量和洪峰时间的反演结果,并通过敏感性分析,对各个模型的稳定性和适用性进行了研究,可供类似堰塞湖应急处置时参考。

1 溃坝模型对比

BREACH 和 DB-IWHR 模型均采用了宽顶堰公式作为溃坝洪水计算的基础方程,在不同的土石坝或堰塞坝的溃决洪水分析中,两个模型主要有以下几个共同点和差异点。

1.1 水力学计算

对于溃口流量计算,BREACH 模型和 DB-IWHR 均采用宽顶堰(图 1)流量公式:

Q = CB(H - z)^{3/2} (1)

式中:Q 为流入溃口通道的流量;B 为引流槽进口断面的宽度;H 为库水位;z 为引流槽进口处河床高程;C 为流量系数,陈祖煜等^[7]对唐家山实测资料反演得到的 C 值为 1.43 m^{0.5}/s。

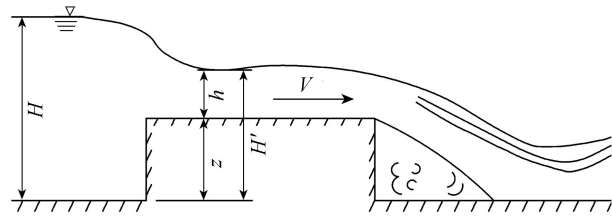


图 1 泄流槽入口处水力关系

1.2 冲刷计算

对溃口冲刷过程,BREACH 模型采用 Smart 修正的 Meyer-Peter & Mueller 公式^[9]:

Q_s = 3.64 \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^2 P \frac{D^{2/3}}{n} S^{1.1} (DS - \Omega) (2)

式中:Q_s 为单宽冲刷率;D 为水力半径;S 为下游坡度的倒数;P 为溃口的湿周;n 为曼宁系数;D_{30}、D_{90} 分别为含量 30% 和 90% 的颗粒粒径;\Omega 与临界剪应力有关,相关公式 Fread^[3] 在其文章中做了详细论述,在此不做赘述。

陈祖煜等^[7]在分析唐家山堰塞湖溃决过程中,发现指数形式的侵蚀率模型在流速较低的范围内,适用性较好,但当溃坝水流流速达到 5 ~ 10 m/s 时,溃坝洪峰计算结果受参数影响极为敏感,经常导致计算结果不收敛,因此在 DB-IWHR 模型中提出了双曲线型侵蚀率模型,其表达式为

\frac{dz}{dt} = \Phi(\tau) = \frac{v}{a + bv} (3)

其中

v = k(\tau - \tau_c)

式中:v 为剪应力与临界剪应力的差值;k 为在剪应力 \tau 范围内允许 dz/dt 接近其极值的单位变换因子,此处 k 取 100^[10];\tau_c 为临界剪应力;a、b 为参数。双曲线形式的侵蚀率模型具有实际的物理含义,该模型认为水流冲刷土石料时,土石料抵抗冲刷侵蚀的能力不应是无限限制的,而应具有一定的“强度”,即双曲线有一条当 v 接近无限值时的渐进线,即 \frac{dz}{dt}

的极值 1/b。1/a 表示 v=0 时曲线的斜率。图 2 为对唐家山实测参数进行拟合的成果,1/a、1/b 分别为 1.1 和 1.429。采用表 2 的参数,Meyer-Peter & Mueller 公式拟合曲线如图 2 中虚线所示。

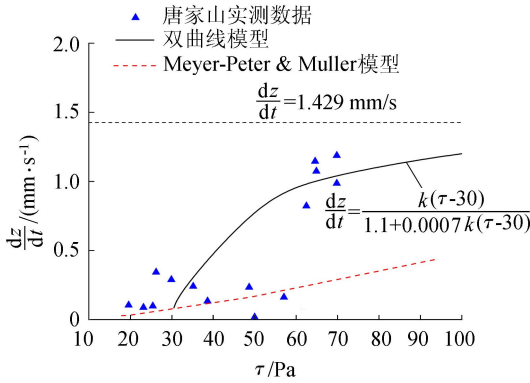


图 2 基于实测资料的双曲线和 Meyer-Peter & Muller 侵蚀率模型

1.3 溃口扩展计算

BREACH 模型假定溃口最初为矩形,当溃口的两边崩溃,最初的长方形通道就变成一个梯形通道,边坡与竖直方向夹角为 \alpha。随着边坡的变形破坏,采用梯形溃口进行边坡计算。当发生崩溃时,深度消减到达临界深度,大坝内摩擦角为 \varphi,黏聚力为 c,容重为 \gamma。溃口两侧边坡的稳定性与溃口下切深度相关,溃口下切至临界深度 H_k 时,溃口两侧边坡发生失稳坍塌,初始矩形溃口变为梯形溃口,即当溃口深度 H > H_k 时,边坡失稳坍塌,k 依次取 1、2、3 进行计算得到溃口深度(参见图 3(a))。BREACH 模型为

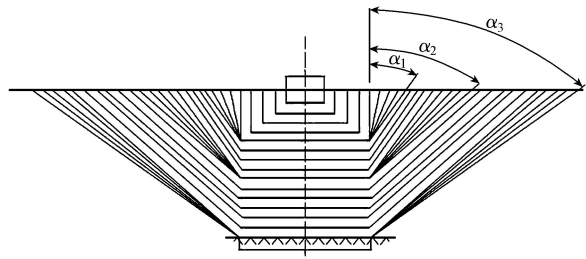
B_0 = B_r \gamma (4)

H_k = \frac{4c \cos \varphi \sin \theta_{k-1}}{\gamma [1 - \cos(\theta_{k-1} - \varphi)]} (5)

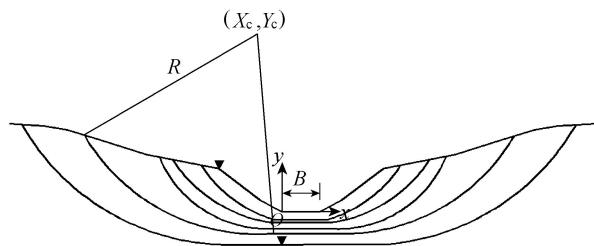
\theta_{k-1} = 90 - \alpha (6)

式中:\gamma 为溃口通道的流动深度;B_r 为线性参数,在漫顶溃坝时,B_r 取 2。

BREACH 模型另一个控制溃口宽度的机制是土体的边坡稳定性。在岩土工程中常用的是圆弧形式的边坡稳定分析方法,DB-IWHR 模型的溃口扩展



(a) BREACH模型溃口扩展过程



(b) DB-IWHR模型溃口扩展过程

图3 溃口扩展示意图

过程,即采用简化 Bishop 法^[11]自动搜索临界圆弧滑裂面,进行溃口扩展数值分析。通过搜索可能的滑裂面,找到临界滑裂面,从而得到下切深度,文献[12]详细介绍了相关原理和计算方法(图3(b))。

1.4 堰后水深计算

水流以宽顶堰形式泄流时,在堰口会发生一个跌落现象(图1)。确定堰后水深 h 是溃坝计算中需要独立解决的问题。BREACH 模型假定根据溃口流量,由曼宁公式可以得到溃口内水深:

$$h = \left(\frac{nQ}{BJ^{0.5}} \right)^{0.6} \quad (7)$$

式中: n 为曼宁系数; J 为下游坡度。经验表明,曼宁公式中的 J 对计算结果影响极大^[13]。陈祖煜等^[7]发现,如果将式(1)代入式(7),可得

$$h = \left(\frac{nQ}{BJ^{0.5}} \right)^{0.6} = \left[\frac{nC(H-z)^{1.5}}{J^{0.5}} \right]^{0.6} = \frac{n^{0.6}C^{0.6}(H-z)^{0.9}}{J^{0.3}} \quad (8)$$

式(8)中 $H-z$ 项的指数为0.9,DB-IWHR 模型将其近似取为1,定义 m 为水位跌落系数:

$$m = \frac{n^{0.6}C^{0.6}}{J^{0.3}} \quad (9)$$

则有 $h = m(H-z)$ (10)

式中 m 具有明确的物理意义和取值范围(一般在0.5~0.8之间),后文将作详细的敏感性分析,并与输入坡降 J 来确定 h 的方案相对比,说明计算的稳定性得到了明显提高。

1.5 数值计算方法

BREACH 在数值计算中,是通过给定的初始时间 t_0 和时间步长 Δt ,计算相应的水位增量 ΔH ,冲刷深度 Δz 和流速变化量 ΔV 。

DB-IWHR 模型以水流流速增量 ΔV 代替时间 Δt 为步长,给定初始流速 V_0 和流速增量 ΔV ,避免迭代数值计算。该模型在计算中有较好的稳定性,不会出现数值不收敛的情况。

2 唐家山溃坝过程模拟

2.1 唐家山溃决概况

2008年5月12日,中国四川省汶川发生8.0级大地震,受强烈地震的影响,位于四川通口河右岸、距北川县城6 km处的唐家山发生了巨大的滑坡,滑坡体下切堵塞了通口河,形成了地震中最严重的堰塞湖。根据资料^[14]唐家山堰塞坝的相关参数如下,坝顶高程741 m,坝底高程669 m,坝顶长度310 m,顺河向长803 m,横向最大宽度611 m,库容2.3亿 m^3 ,入库流量80 m^3/s ,启动流速2.6 m/s,平均粒径2~8 mm,初始溃口宽58 m,初始溃口深度0.18 m,溃口边坡1.5:1,最终溃口宽度131.2 m,最终溃口深度20.8 m,洪峰流量6480 m^3/s ,溃口发展时间6~15 h,唐家山堰塞坝溃后剖面如图4所示。

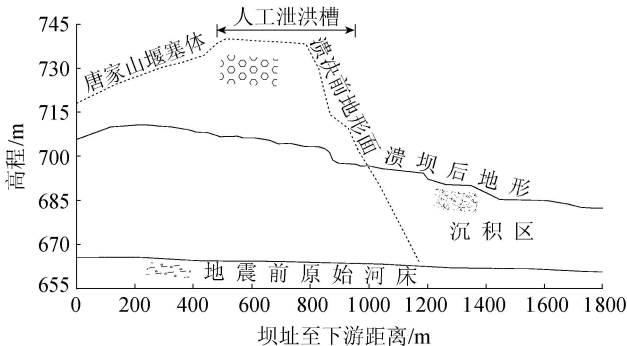


图4 唐家山堰塞坝溃后剖面^[14]

2.2 不同模型计算

不同模型计算参数如表1和表2所示。对唐家山采用此两种模型计算获得的流量、库水位、溃口宽度、溃口底高程如图5所示。

表1 BREACH 模型计算参数

参数分类	参数名称	参数取值
坝体几何特征	坝顶高程	740 m
	坝顶长度	310 m
	上游面坡比	2.75
	下游面坡比	11.1
初始条件	天然入流	80 m^3/s
	初始溃口底高程	740 m
	时间步长	0.01 h
坝体材料参数	中值粒径	0.01 m
	颗粒密度	2600 kg/ m^3
	孔隙率	0.2
	黏聚力	40 kPa
	内摩擦角	35°
	D_{90}/D_{30}	33

表2 DB-IWHR 模型计算参数

参数分类	参数名称	参数取值
天然入流	q	$80\text{ m}^3/\text{s}$
初始溃口宽	B_0	16 m
宽顶堰	C	1.43
	m	0.8
库容水位关系	a_1	0.063
	b_1	196.6
	c_1	44
	H_r	700 m
侵蚀率	V_e	2.7 m/s
	$1/a$	1.1
	$1/b$	0.0005

注:① B_0 基于泄流槽的几何参数以及 3 m 深的水流;②库容水位关系由公式 $W=a_1(H-H_r)^2+b_1(H-H_r)+c_1$ 拟合估算 ;③侵蚀参数为双曲线模型中的参数。

运用 BREACH 模型对唐家山堰塞湖溃决进行反演计算,可得到洪峰流量为 $6\,478\text{ m}^3/\text{s}$,溃决时间为 12:32 左右。对于溃口的形态,初始底部宽度设定为 14 m,已经达到其泄流槽开挖宽度,之后溃口以 14 m 为底边长从长方形溃口逐渐发展为梯形溃口,溃坝起始阶段,溃口的下切速度较快,当入库流量保持不变时,溃口顶部宽度也会一直发展,并不断下切。

运用 DB-IWHR 模型对唐家山进行分析计算,可以得到唐家山溃决的洪峰流量为 $7\,610\text{ m}^3/\text{s}$,溃决时间为 13:20 左右,流量过程和水位过程与实测结果差距不大,但洪峰流量到达时间相差较大。在达到洪峰流量之前,模拟结果与实测相近,洪峰流量之后则有了较明显的偏差。

通过模型反演计算可知,使用针对唐家山堰塞湖的参数,BREACH 模型和 DB-IWHR 模型均可较好地模拟唐家山的溃决过程。

3 溃坝模型敏感性分析

3.1 BREACH 模型

BREACH 模型计算溃坝时,主要参数包括坝体几何特征和坝体材料参数,由于天然堰塞坝土体材料复杂,在应急处置时,很难及时测得所有有效参数,只能通过现场地质勘探进行估测,在此选择坝体材料相关参数进行敏感性分析。

3.1.1 坝体模型参数

在实际模拟堰塞坝溃决计算中,需要不断调整坝体模型参数以得到良好的结果。对于天然堰塞坝,BREACH 模型需要输入坝体上下游坡比参数 Z_U, Z_D ,即上游面的坡比为 $1:Z_U$,下游面为 $1:Z_D$ 。此处, Z_D^{-1} 即为式(7)中的 J 。笔者在计算中发现上下游坡比值对结果影响极大,且程序设置要求下游坡度需大于 4($J<0.25$),否则计算无法实现,结果明显会出现较大的不合理性。

▲ 实测流量过程 — BREACH 模拟结果 - - - DB-IWHR 模拟结果

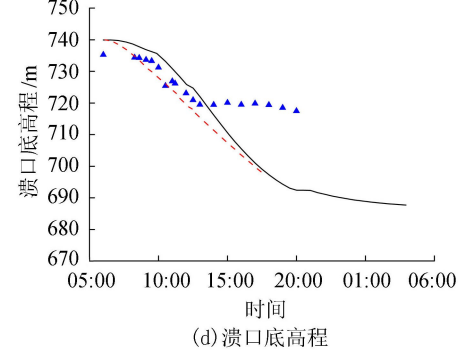
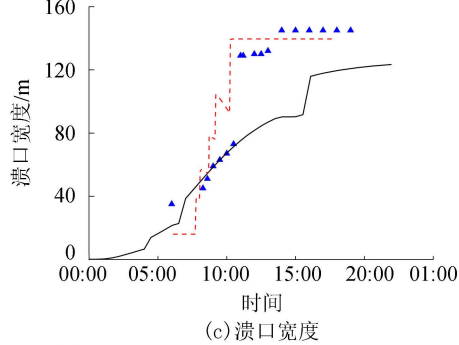
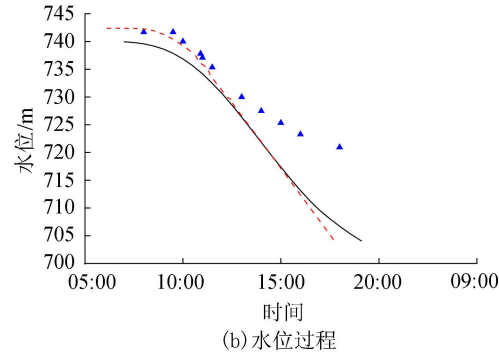
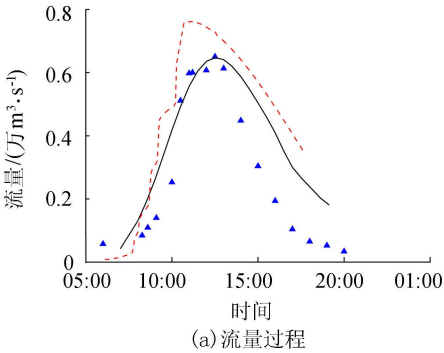
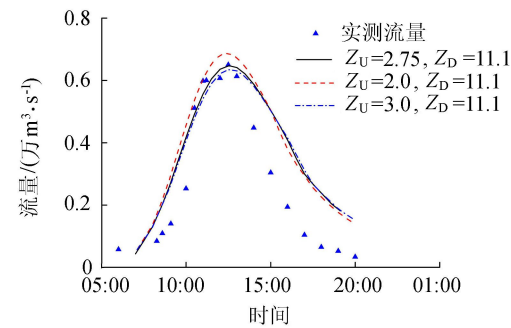


图5 唐家山堰塞湖两种模型模拟结果对比

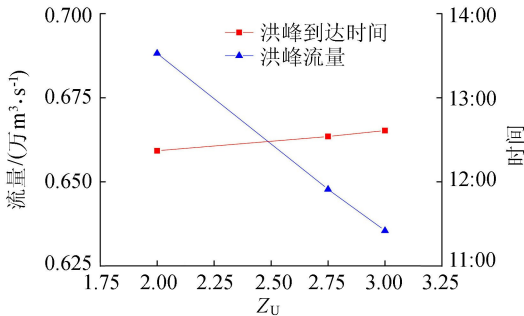
计算中选择 $Z_U=2.75, Z_D=11.1$, 现分别选取不同的 Z_U, Z_D 对模型进行分析。

针对不同 Z_U, Z_D 的结果分别如图 6、图 7 所示。可以明显发现,BREACH 模型中 Z_U 的变化对结果影响不大,而 Z_D 对结果影响较大,即改变堰塞坝不同的下游坡比,得到的结果差异性很大。分析中选取了 Z_D 分别为 6、9、10、11.1、12(即 J 为 $1/6, 1/9, 1/10, 1/11.1, 1/12$),洪峰流量从 $32\,370\text{ m}^3/\text{s}$ 变化到 $5\,288.8\text{ m}^3/\text{s}$,可见,BREACH 模型结果明显受曼

宁公式中 J 的输入值的影响。

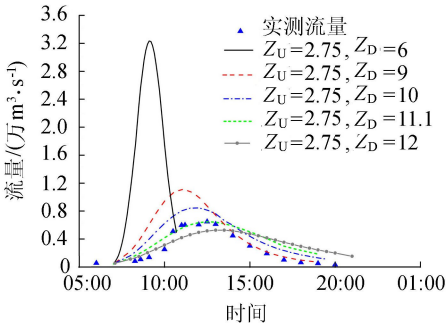


(a) 对流量过程线的影响

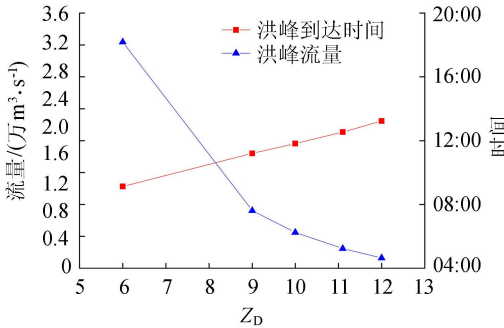


(b) 对峰值流量和洪峰到达时间的影响

图6 BREACH 模型 Z_U 敏感性分析



(a) 对流量过程线的影响

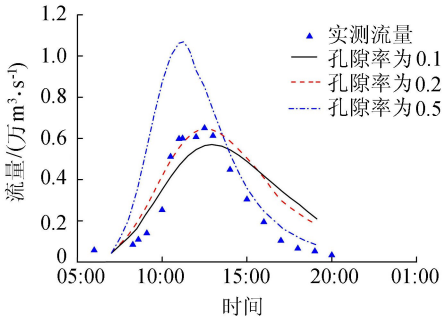


(b) 对峰值流量和洪峰到达时间的影响

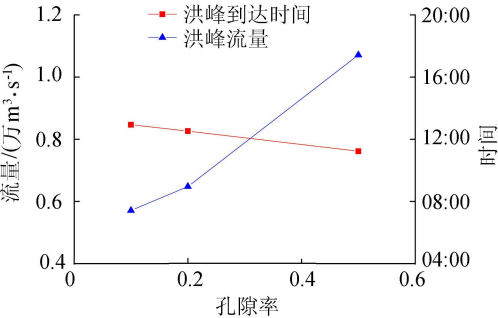
图7 BREACH 模型 Z_D 敏感性分析

3.1.2 坝体材料孔隙率

计算中分别将孔隙率取为 0.1、0.2、0.5 进行分析,得到流量过程线对比见图 8。从图 8 可以明显发现,坝体材料孔隙率对洪水过程影响较大。孔隙率取 0.1、0.2、0.5,随着孔隙率的增大,洪峰流量逐渐增大,而洪峰到达时间逐渐变小,洪峰流量分别是 $5\,707\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6\,478\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10\,712\text{ m}^3/\text{s}$,变化最大达



(a) 对流量过程线的影响



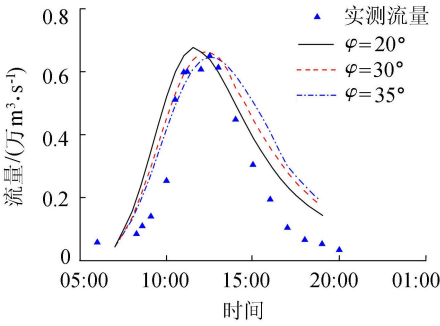
(b) 对峰值流量和洪峰到达时间的影响

图8 BREACH 模型孔隙率敏感性分析

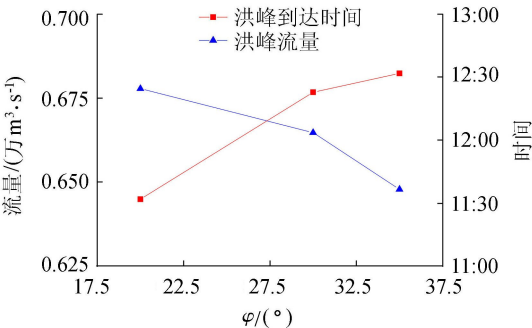
60%,选取孔隙率准确与否对模拟结果也有着重要影响。

3.1.3 坝体材料内摩擦角

计算中分别将内摩擦角 φ 取为 35° 、 30° 、 20° ,得到流量过程线对比见图 9。



(a) 对流量过程线的影响



(b) 对峰值流量和洪峰到达时间的影响

图9 BREACH 模型内摩擦角敏感性分析

从图 9 中可以发现,内摩擦角对溃坝流量过程影响不大。在到达洪峰流量之前,内摩擦角越小,溃口出流量增加越快,洪峰流量到达的时间越快,且洪

峰流量越大;而在到达洪峰流量之后,内摩擦角越小,溃口流量减小得也越快。

3.1.4 坝体材料黏聚力

计算中分别将黏聚力 c 取为 40 kPa、30 kPa、20 kPa,得到流量过程线对比见图 10。

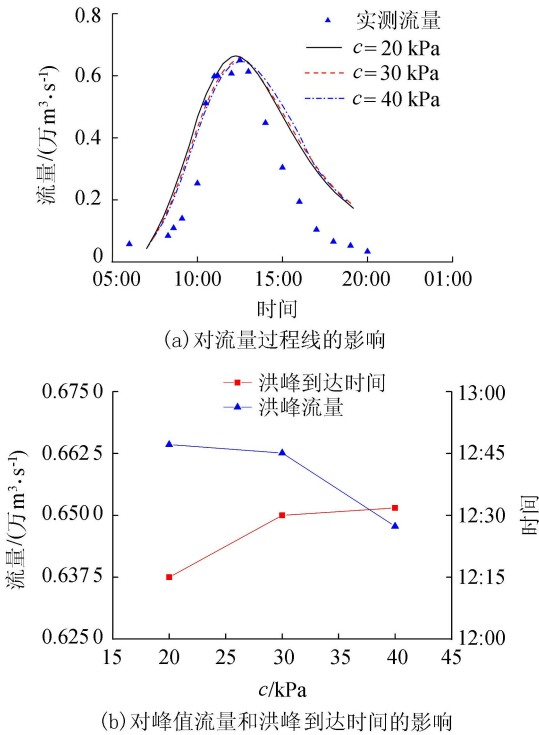


图 10 BREACH 模型黏聚力敏感性分析

从图 10 可以发现,黏聚力与内摩擦角对溃坝过程的影响类似,其对流量过程的敏感性也较小。

综上所述,BREACH 模型中材料的孔隙率和下游坡比 Z_D 两个输入参数是影响计算成果合理性的关键问题。

3.2 DB-IWHR 模型

3.2.1 跌落系数

如前所述,DB-IWHR 模型的一个主要改进是使用跌落系数 m 来取代 J 这个输入值,在典型工况计算时取 0.8,分别将跌落系数 m 取为 0.8、0.75、0.67,结果对比如图 11 所示。

从图 11 可知,跌落系数对洪峰流量到达时间几乎没有影响;对于洪峰流量,跌落系数取值从 0.8 变为 0.67,洪峰流量仅增加了 5.8%,利用跌落系数 m 来取代 J 来计算堰后水深具有明显的优越性。

3.2.2 冲刷临界启动速度

计算中分别将冲刷临界启动速度 V_c 取为 2.7 m/s、2.5 m/s、3 m/s,结果对比如图 12 所示。

从图 12(a)中可以看出,对于流量过程,调整启动流速,整体未发生明显变化;对于洪峰流量到达时间来看,启动流速从 2.5 m/s、2.7 m/s 到 3 m/s 变化,时间变化均不足 10%,影响很小。

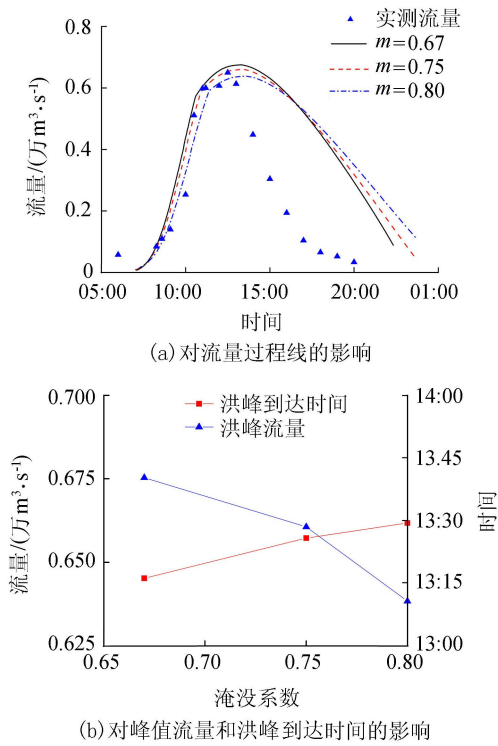


图 11 DB-IWHR 模型淹跌落系数敏感性分析

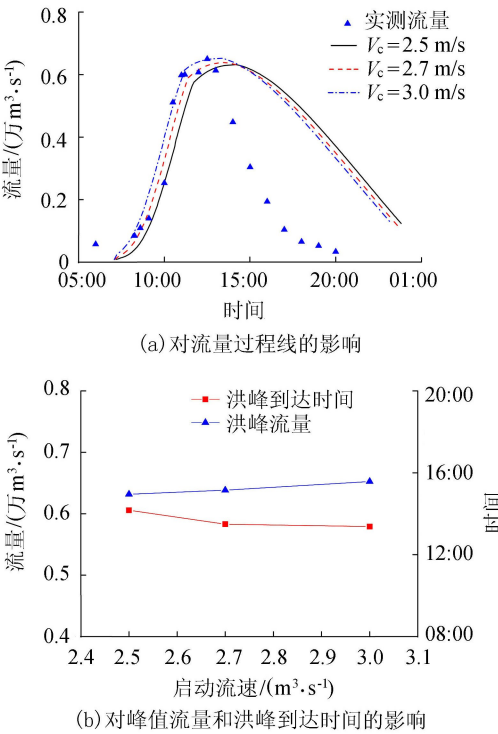


图 12 DB-IWHR 模型冲刷临界启动速度敏感性分析

陈祖煜等^[7]对 DB-IWHR 的强度参数 c 、 φ 进行了敏感性分析考察,结果表明模型中侧向扩展的边坡稳定分析方法对剪切强度参数并不敏感。

DB-IWHR 溃坝模型的主要参数对结果的影响都不敏感,且模型参数量少、简单易用,可以快速给出估算结果,在溃决洪水演进分析中,以及资料匮乏的初步分析阶段具有重要的实用价值。

3.3 数值计算稳定性

BREACH 模型在计算时,若下游坡度小于4 时,程序计算不收敛,无法得到结果。DB-IWHR 模型采用直接求解格式,不包含数值迭代,计算迅速、简明。

4 结 论

a. 本文比较了都使用宽顶堰模型基本形式的 BREACH 和 DB-IWHR 两种溃坝洪水计算模型。DB-IWHR 模型实际上是在 BREACH 模型理论框架下发展起来的,主要在以下几个方面做了改进:①采用双曲线冲刷模型代替了 Smart 修正的 Meyer-Peter & Muller 公式;②使用跌落系数取代曼宁公式计算堰后水深以解决坡降 J 对计算结果高度敏感的问题;③应用圆弧滑动模式较合理地模拟坝体溃决横向扩展;④应用速度积分代替时间积分,回避了非线性迭代计算,计算过程可以用简单的 Excel 表格实现。

b. 对唐家山堰塞湖溃决反演的计算表明,使用针对唐家山堰塞湖的参数,两种模型均可较好地模拟唐家山堰塞湖的溃决过程。

c. 对两种模型输入参数的敏感性分析表明:①在BREACH 模型中,孔隙率的影响比较敏感,在实际使用范围内取值,变动范围最大达到 60%;而在 DB-IWHR 的双曲线模型中,参数 $1/a$ 、 $1/b$ 需要通过大量冲刷实验积累经验进行取值。②堰后水深的确定, BREACH 模型对坡降 J 极其敏感, DB-IWHR 模型使用跌落系数 m 后,对结果影响很小。③横向扩展过程中, BREACH 模型和 DB-IWHR 模型中黏聚力 c 、内摩擦角 φ 对结果都不敏感。④对于数值计算稳定性, BREACH 模型在合理选取 J 的基础上计算稳定, DB-IWHR 模型则不会出现不稳定的情况。

参考文献:

- [1] 刘宁. 唐家山堰塞湖应急处置与减灾管理工程[J]. 中国工程科学, 2008, 10(12): 67-72. (LIU Ning. The emergency handling of Tangjiashan Barrier Lake and disaster reduction management project [J]. Engineering Sciences, 2008, 10(12): 67-72. (in Chinese))
- [2] LIU F, FU X D, WANG G Q, et al. Physically based simulation of dam breach development for Tangjiashan Quake Dam, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(4): 1081-1094.
- [3] FREAD D L. BREACH, an erosion model for earthen dam failures [D]. Silver Spring: Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, 1988.
- [4] SINGH V. Dam breach modeling technology [M]. Netherlands: Springer, 1996.

- [5] 周兴波,陈祖煜,陈淑婧,等. 基于 MIKE11 的堰塞坝溃决过程数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 23-27. (ZHOU Xingbo, CHEN Zuyu, CHEN Shujing, et al. Simulation of the barrier dam breaching process based on MIKE 11 [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(6): 23-27. (in Chinese))
- [6] Hydrologic Engineering Center of USACE. HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual version 4.1 [D]. Davis C A: US Army Corps of Engineers, 2010.
- [7] CHEN Z, MA L, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan Barrier Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 141(4): 1-14.
- [8] 王琳,李守义,于沐,等. 红石岩堰塞湖应急处置的关键技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(4): 284-289. (WANG Lin, LI Shouyi, YU Shu, et al. Key techniques for the emergency disposal of Hongshiyan Landslide Dam [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(4): 284-289. (in Chinese))
- [9] MEYER-PETER E, MULLER R. Formulas for bed-load transport [C]//Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research. Stockholm: IAHR, 1948: 39-64.
- [10] 周兴波,陈祖煜,李守义,等. 不同推移质输沙模型在溃坝洪水模拟中的对比分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1097-1108. (ZHOU Xingbo, CHEN Zuyu, LI Shouyi, et al. Comparison of sediment transport model in dam break simulation [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(6): 1097-1108. (in Chinese))
- [11] 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.
- [12] WANG Lin, CHEN Zuyu, WANG Naixin, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode [J]. Engineering Geology, 2016, 209: 70-81.
- [13] 陈淑婧. 土石坝漫顶溃决机理模型及数值模拟方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [14] LIU N, CHEN Z, ZHANG J, et al. Draining the Tangjiashan Barrier Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(11): 914-923.

(收稿日期: 2016-08-22 编辑: 郑孝宇)

