

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.03.001

陈生水, 赵天龙, 钟启明. 堰塞坝溃坝数学模型研究与应用[J]. 水利水电工程学报, 2015(3): 1-8. (CHEN Sheng-shui, ZHAO Tian-long, ZHONG Qi-ming. Dam-break numerical model for a barrier dam and its application[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(3): 1-8.)

堰塞坝溃坝数学模型研究与应用

陈生水, 赵天龙, 钟启明

(南京水利科学研究院 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: 针对堰塞坝坝体土石料的宽级配特性, 引入与水流方向垂直的附加作用力来考虑粗颗粒对细颗粒的阻拦、遮蔽作用以及细颗粒对粗颗粒的包围、填实作用, 提出了一个可模拟堰塞坝漫顶溃决过程溃口发展规律与流量过程的数值模型和相应的计算方法, 利用该模型对唐家山堰塞坝泄流过程进行了模拟, 得出的泄流槽发展规律与洪水流量过程与实测资料接近, 验证了该模型和计算方法的合理性。进一步, 利用笔者建议的数学模型及数值计算方法, 比较分析了唐家山堰塞坝除险过程中泄流槽断面型式对堰塞坝泄流过程的影响, 发现堰塞湖在采用泄流槽引流除险时, 泄流槽深度与断面型式对其泄流过程具有重要影响, 增加泄流槽深度, 可明显提高泄流效率, 但堰塞湖下游将承受更大的风险。对于同样深度的梯形泄流槽, 如果将槽底部断面减小, 形成复合梯形泄流槽, 不仅可减少开挖工作量, 而且没有明显降低泄流效率, 同时后者的泄流过程更为平缓, 最大洪峰流量减小, 出现的时间滞后, 堰塞湖下游承受的风险也将降低。

关键词: 堰塞坝; 溃坝; 数学模型; 泄流槽; 唐家山

中图分类号: TV122⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)03-0001-08

堰塞坝作为自然作用的产物, 其几何特征、物质组成和工作条件与人工土石坝具有明显不同。在坝体形态上, 堰塞坝堆积体往往呈不规则形状, 沿河流运动方向大多较人工坝长, 且堰塞体内局部区域薄弱, 坝顶凹凸不平, 破坏一般首先在这些薄弱区域发生; 在坝体结构上, 因没有人工填筑过程, 大部分堰塞坝结构松散, 不均匀性强, 堰塞体土石料的级配变化范围大, 而且堰塞坝没有泄洪设施, 当上游持续来水使得堰塞湖水位超过坝顶时, 很可能导致堰塞坝发生漫顶溃决^[1-2]。据统计^[3], 绝大多数堰塞坝最终都将发生溃决, 大约20%的堰塞坝在形成后1 d内溃决, 50%在10 d内溃决, 80%在6个月内溃决, 90%在1年内溃决。因此, 为减轻或避免堰塞坝溃决所造成的损失, 必须及时采取应急处置措施。

堰塞坝应急处置措施主要采取工程措施和非工程措施相结合的方式。工程除险一般采取分层爆破和开挖泄流槽, 以此来降低堰塞坝坝顶溢流高程, 尽可能地降低堰塞湖水位和库容^[4]。对于库容相对较小的堰塞湖, 可采用分层爆破法进行排险, 2008年“5·12”汶川地震中形成的马鞍石^[5]堰塞湖就是采用上述方法成功处置的典型实例; 对于库容大的堰塞湖, 为降低风险, 一般在堰塞坝顶低凹处开挖泄流槽提前引流, 利用水流自身的冲蚀能力来冲深和加宽泄流槽, 实现堰塞体的逐步溃决, 最终达到除险的目的, 2008年“5·12”汶川地震中唐家山^[6]、肖家桥^[7]堰塞湖就是采用上述方法成功处置的典型实例。

需要指出的是, 尽管我国已成功处置多座堰塞坝, 但针对堰塞坝溃决机理与溃坝过程模拟的理论研究水平还落后于工程实践。因此, 有必要深入研究堰塞坝的溃决机理, 提出能合理模拟其溃坝过程, 优化堰塞坝应急处置方案的数学模型和相应数值计算方法, 以进一步提升我国堰塞坝应急处置水平。

收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109141, 51379129, 91215301, 51209140)

作者简介: 陈生水(1962—), 男, 江苏高淳人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事土石坝工程科学研究和技术咨询工作。E-mail: sschen@nhri.cn

1 堰塞坝溃坝数学模型

目前,国内外学者已提出了一系列土石坝溃坝数学模型,并已应用于实际工程^[4],但与土石坝相比,堰塞坝除了工作条件与土石坝存在明显差别外,其材料级配宽泛,最大粒径和最小粒径相差很大,有必要提出能较为合理计算其冲蚀率的经验表达式。要合理计算水流对宽级配材料的冲蚀率,首先要给出其临界起动流速。土体颗粒在坝坡上的受力^[8]一般有浮重力 W ,水流拖曳力 F_d ,水流对土颗粒的上举力 F_l (如图 1),其表达式为:

$$W = \frac{\pi}{6}(\gamma_s - \gamma_w) d_{50}^3, F_d = \frac{\pi}{8g} C_d d_{50}^2 \gamma_w v^2 = \frac{\pi}{20g} d_{50}^2 \gamma_w v^2, F_l = \frac{\pi}{8g} C_l d_{50}^2 \gamma_w v^2 = \frac{\pi}{80g} d_{50}^2 \gamma_w v^2 \quad (1)$$

式中: γ_s 和 γ_w 分别为土体颗粒和水的重度; d_{50} 为土体颗粒平均粒径; F_d 和 C_d 分别为水流对土颗粒的拖曳力和拖曳力系数(一般取 0.4^[9]); v 为水流流速; C_l 为上举力系数(一般取 0.1^[9])。

考虑到粗、细颗粒间的阻拦、遮蔽、包围和填实作用,将其概化为与水流方向垂直的作用力 R (如图 1),假定该作用力与土颗粒的平均剪力成比例^[10-13],即:

$$R = \varphi \tau_s d_{50}^2, \tau_s = K_m M (\gamma_s - \gamma_w) d_{50} \quad (2)$$

式中: τ_s 为土颗粒的平均剪应力; K_m 为无因次系数; φ 为比例系数与土体颗粒面积系数的乘积。由此可得:

$$R = KM (\gamma_s - \gamma_w) d_{50}^3 \quad (3)$$

式中: $K = \varphi K_m$,可通过不均匀颗粒的起动流速试验资料以及天然河道实测资料确定,一般取 0.785~1.727,本文取值 1.3^[11]; M 为紧密系数^[11],主要反映土体颗

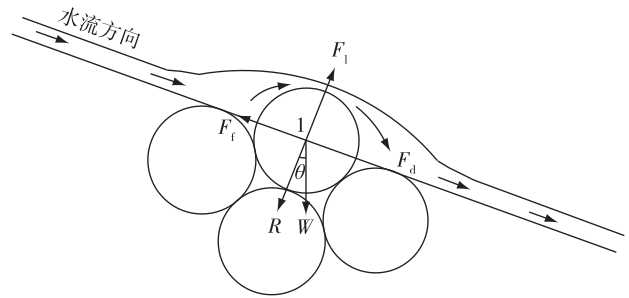


图 1 土体颗粒受力分析

Fig. 1 Forces acting on a soil particle

粒的不均匀程度和细颗粒对粗颗粒的填实程度, $M = 0.75 - \frac{0.65}{2 + C_u}$, C_u 为不均匀系数。于是,式(3)可写为:

$$R = 1.3M (\gamma_s - \gamma_w) d_{50}^3 \quad (4)$$

起动时,土体颗粒所受摩擦力 F_f (如图 1) 可表示为:

$$F_f = \tan \varphi (R + W \cos \theta - F_l) + \frac{c\pi}{2} \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right) d_{50}^2 = \left[(\gamma_s - \gamma_w) \left(1.3M + \frac{\pi}{6} \cos \theta \right) d_{50} - \frac{\pi}{80g} \gamma_w v^2 \right] d_{50}^2 \tan \varphi + \frac{c\pi}{2} \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right) d_{50}^2 \quad (5)$$

式中: φ 为土体颗粒间的内摩擦角; θ 为冲槽底与水平面夹角; c 为土体黏聚力。通过对土体进行受力分析可知,土颗粒 1 的临界起动条件为:

$$F_d + W \sin \theta = F_f \quad (6)$$

将式(1),(4),(5)代入式(6),可以得到土颗粒在下游坝坡的临界起动流速为:

$$v_c = \sqrt{\frac{80g d_{50} (\gamma_s - \gamma_w) \left[\left(1.3M + \frac{\pi}{6} \cos \theta \right) \tan \varphi - \frac{\pi}{6} \sin \theta \right]}{\pi \gamma_w (4 + \tan \varphi)} + \frac{40gc \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right)}{\gamma_w (4 + \tan \varphi)}} \quad (7)$$

在溃坝水流作用下,堰塞坝顶溃口及下游坝坡将发生冲蚀,针对坝料宽级配的特点,建议采用一个计算堰塞坝冲蚀率 Q_s 的经验表达式:

$$Q_s = 0.25 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} B \sec \theta \frac{v_* (v_b^2 - v_c^2)}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)} \quad (8)$$

式中:溃口处底流速 $v_b = \frac{\bar{v}}{6} \left(\frac{d_{90}}{H - H_c} \right)$, 摩阻流速 $v_* = \sqrt{g(H - H_c)J} = \bar{v}N \sqrt{g(H - H_c) - \frac{1}{3}}$, 平均流速 $\bar{v} = \frac{Q_b}{B(H - H_c)}$, d_{90} 和 d_{30} 为不同颗粒粒径, 下标分别表示粒径小于 d_{90} 或 d_{30} 的颗粒的质量占总质量的 90% 或 30%; B 为溃口宽度; θ 为冲槽底与水平面夹角; H_c 和 H 分别表示溃口底部高程及坝前库水位高程; N 为溃口处糙率系数; J 为水力梯度。

假设初始溃口形状为梯形, 参照 BREACH 模型溃口发展规律假定^[14], 可导出时间增量 Δt_i 内溃口下切深度增量为:

$$\Delta H_{ci} = \frac{\Delta t_i Q_s}{B_i L (1 - n)} \quad (9)$$

式中: $\bar{B}_i$ 为溃口平均底宽; L 为坝顶宽及下游坝坡长度之和(如图 2(a)); n 为堰塞体孔隙率。 Δt 时间间隔内水流下切深度增量为:

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \Delta H_{ci} \quad (10)$$

若忽略溃口边坡失稳和坍塌引起的溃口横向扩展, 溃口底部的冲蚀速率应与溃口边坡的冲蚀速率大致相当, 因此假定溃口的深度和宽度以同样的速率发展^[14]。则水流对坝体溃口两侧的直接冲蚀形成的溃口宽度增量 ΔB (如图 2(b)) 可表示为:

$$\Delta B = \sum_{i=1}^n (\Delta B_i + \Delta B_i) = \sum_{i=1}^n 2\Delta B_i = 2\Delta H_c \quad (11)$$

溃口在漫坝水流的连续冲蚀作用下不断发生垂向下切及横向扩展, 溃口两侧边壁也随之越来越陡, 当垂向下切达到临界深度时, 溃口两侧边壁将发生间歇性失稳坍塌(如图 2(b)), 其临界深度可通过土体的极限平衡方法求得^[14]:

$$H_s = \frac{4c \sin \beta_k \cos \varphi}{\gamma_s [1 - \cos(\beta_k - \varphi)]} \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (12)$$

式中: β_k 为溃口边坡发生失稳坍塌的临界坡角。

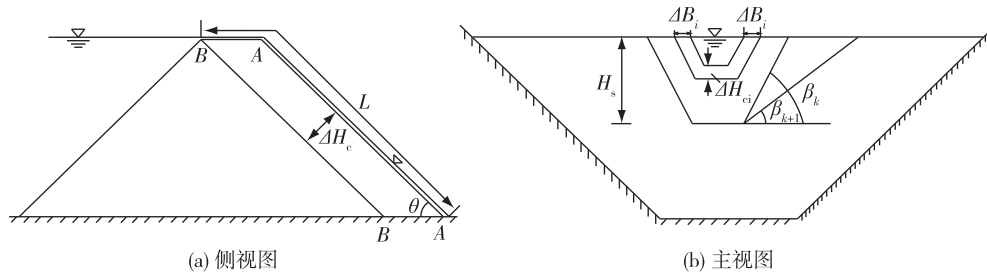


图2 土石坝漫顶溃决溃口发展示意

Fig. 2 Sketch of earth-rock dam break process due to overtopping failure

该模型采用以下宽顶堰公式计算溃口流量:

$$Q_b = mB\sqrt{2g}(H - H_c)^{\frac{3}{2}} + 2m\sqrt{2g}\tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)(H - H_c)^{\frac{5}{2}} \quad (13)$$

式中: m 为流量系数, 此处可取 0.5^[15]; H_c 为溃口底部高程。 Δt_i 时间内库水位的变化量为:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n |(Q_{in} - Q_b) \Delta t_i / S_a| \quad (14)$$

式中: S_a 为库水位为 H 时所对应的库面面积; Q_{in} 为入库流量。

2 堰塞坝溃坝数学模型验证

采用 2008 年四川汶川“5·12”地震形成的唐家山堰塞湖处置过程中获得的相关数据来验证笔者建议的堰塞坝数学模型和计算方法。

据刘宁等^[16-17]提供的相关资料,唐家山堰塞坝坝体材料主要为碎砾石,其物理力学指标为: $d_{50} = 0.03 \text{ m}$, $c = 10 \text{ kPa}$, $M = 0.75$, $\theta = 13.5^\circ$, $\varphi = 30^\circ$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\gamma_w = 9.8 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_s = 26 \text{ kN/m}^3$ 。将上述参数代入式(7),可得唐家山堰塞坝坝体材料临界起动流速 $v_c = 2.58 \text{ m/s}$,与现场测量得到坝体材料颗粒的起动流速约为 2.4 m/s ^[16]较为接近,进而验证了本文提出的宽级配料颗粒临界起动流速计算式的合理性。

四川汶川“5·12”地震后,通过人工开挖明渠泄流除险,截至 2008 年 6 月 1 日,唐家山堰塞坝坝顶开挖出一条梯形断面泄流槽。泄流槽两侧边坡为 1:1.5,堰底高程 740.00 m,底宽 8 m,深 13 m,总长 695 m,泄流槽材料主要为似层状碎裂岩体(如图 3)。

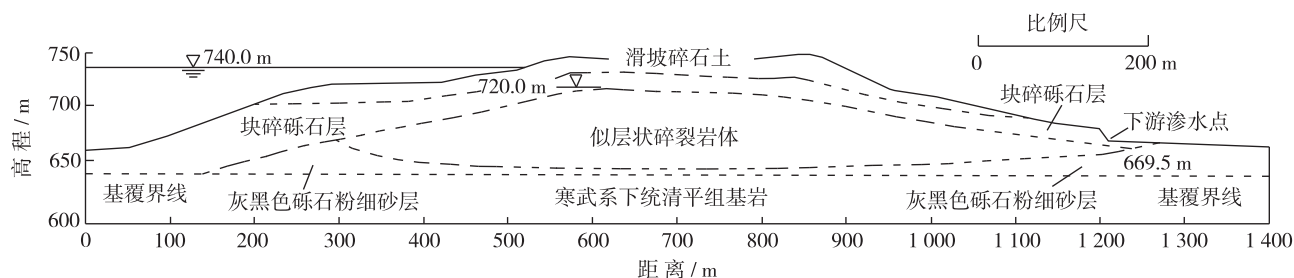


图 3 唐家山堰塞坝工程地质纵坡面(顺河方向)

Fig. 3 Engineering geological longitudinal slope map (along the river) of Tangjiashan barrier dam

根据遥感监测图像结合 DEM 计算^[18],得到唐家山坝前水位、回水面积、库容关系曲线如图 4。

采用分时段迭代的计算方法对堰塞坝泄流过程进行数值模拟,选取迭代计算时间步长 $\Delta t = 0.005 \text{ h}$,计算从 2008-06-10T06:00 泄流槽中土石颗粒起动开始,计算时间设定为 20 h,计算参数见表 1。

根据唐家山堰塞坝泄流槽现场实测资料,计算时初始泄流槽条件选取顶宽 47 m,底宽 8 m,深度 13 m,边坡坡比 1:1.5,计算得到的泄流槽发展过程如图 5 所示,泄流槽最终顶宽 170.6 m,底宽 121.6 m,深 61.2 m。由文献[6]可知,堰塞坝泄流后,泄洪槽在断面形态上呈上宽下窄的“倒梯形”,其开口宽 145~225 m,底宽 100~145 m,坡高 10~60 m。计算结果与实测值基本一致,从而验证了模型在泄流槽发展过程计算方面的合理性。

表 1 唐家山堰塞坝泄流过程模拟计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of Tangjiashan barrier dam release process simulation

H/m	W/m	L/m	B_t/m	B_0/m	H_{C0}/m	$Q_0/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	d_{50}/m	d_{90}/d_{30}	n	$\gamma_s/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi/^\circ$	$\theta/^\circ$	c/kPa	m	N
75	0	695	47	8	13	90	0.03	34	0.3	26	36	13.5	30	0.5	0.045

图 6 为计算得出的泄流过程值与实测泄流过程的比较,可以看出,计算得到峰值流量为 $6\,231 \text{ m}^3/\text{s}$,出现时间为泄流后 6.06 h,下泄水量 $1.85 \times 10^8 \text{ m}^3$;而实测峰值流量为 $6\,500 \text{ m}^3/\text{s}$,出现时间泄流后 6.5 h,下泄

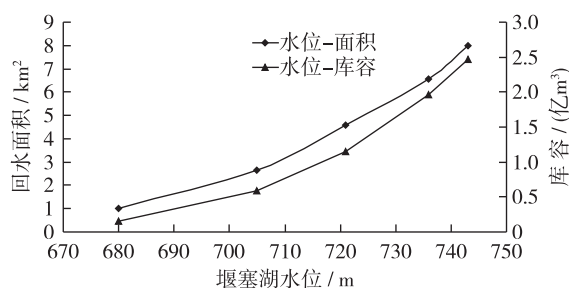


图 4 唐家山堰塞湖水位与水面面积和库容的关系

Fig. 4 Relationships between water level and surface area and storage capacity of Tangjiashan dammed lake

水量 $1.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。计算结果与实测值基本一致,从而验证了模型在流量过程计算方面的合理性。

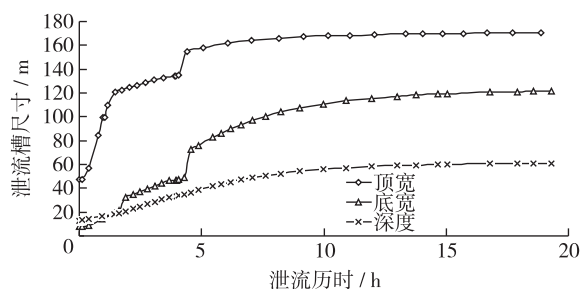


图5 泄流槽发展过程

Fig. 5 Development process of drainage channel

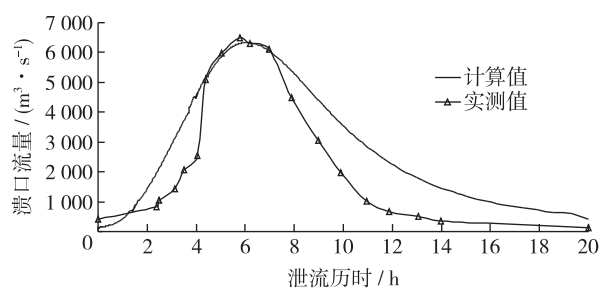


图6 计算泄流过程值与实测泄流过程的比较

Fig. 6 Comparison between calculated and measured values of discharge process

3 泄流槽断面型式对泄流过程的影响

堰塞湖的除险实践^[19-21]表明,泄流槽的底高程、断面形状和结构型式对安全高效泄流具有重要影响。为了研究泄流槽断面型式对堰塞坝泄流过程的影响,下面以唐家山堰塞坝为研究对象,采用笔者建议的数学模型和数值计算方法研究不同泄流槽型式对唐家山堰塞湖泄流过程的影响。

梯形槽(泄流槽 I)与复合梯形槽(泄流槽 II)断面如图 7(a)和(b)所示,显然复合梯形槽与梯形槽相比,开挖工作量有所减少。

计算得出的两种型式泄流槽发展过程和泄流量变化过程对比见图 8。

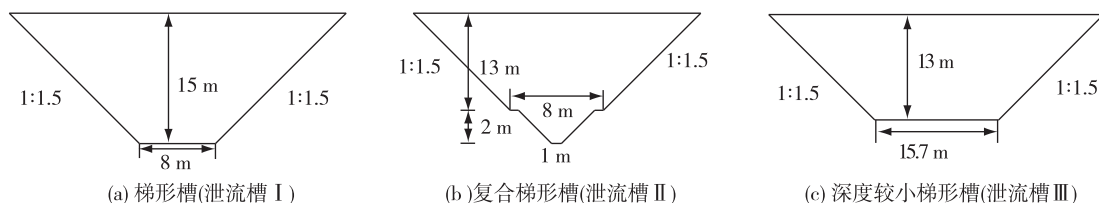
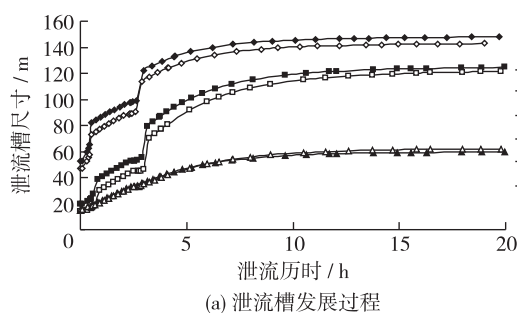
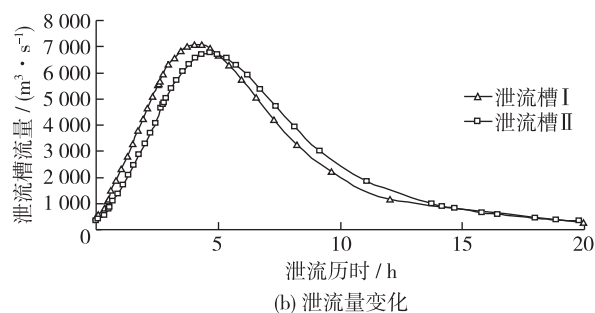


图7 梯形与复合梯形泄流槽断面型式

Fig. 7 Sketch of discharge channel section types of trapezoid and composite trapezoid



(a) 泄流槽发展过程



(b) 泄流量变化

图8 泄流槽发展和泄流量变化过程(泄流槽 I vs. 泄流槽 II)

Fig. 8 Comparison of development process and discharge process between discharge channels No. I and No. II

可见,两种泄流槽的溃口发展规律大体一致,最终形状和尺寸相差不大,梯形泄流槽最终顶宽 148.0 m,底宽 124.7 m,深度 61.9 m,复合梯形槽最终顶宽 142.9 m,底宽 121.4 m,深度 62.1 m。但采用梯形泄流槽进行泄流时,其峰值流量为 $7\,098 \text{ m}^3/\text{s}$,出现在泄流后 4.10 h,下泄水量 $1.88 \times 10^8 \text{ m}^3$,采用复合梯形泄流槽

进行泄流时,其峰值流量为 $6\,755\text{ m}^3/\text{s}$,出现在泄流后 4.68 h ,下泄库容 $1.89\times 10^8\text{ m}^3$ 。显然,尽管复合梯形槽的开挖工作量较梯形泄流槽小,但两者最终下泄水量接近,且前者的泄流过程较后者平缓,最大洪峰流量较后者小,出现的时间较后者迟,对下游的危害相对较轻。

梯形泄流槽Ⅲ与泄流槽Ⅰ断面面积相同,即开挖工作量相同,但开挖深度较小(如图7(c))。计算得出两种型式泄流槽发展和泄流量变化过程见图9。可见,泄流槽Ⅲ的溃口顶宽和底宽的发展明显快于泄流槽Ⅰ,其最终顶宽达 179.5 m ,最终底宽 136.7 m ,明显大于泄流槽Ⅰ,但泄流槽Ⅲ的最终下切深度仅 52.1 m ,明显小于泄流槽Ⅰ的最终下切深度 61.9 m 。泄流槽Ⅲ的洪峰泄流流量为 $6\,581\text{ m}^3/\text{s}$,出现在泄流后 3.90 h ,下泄库容 $1.71\times 10^8\text{ m}^3$;较泄流槽Ⅰ峰值流量减小 $517\text{ m}^3/\text{s}$,峰值流量到达时间提前 0.2 h ,下泄库容减少 $1.7\times 10^7\text{ m}^3$ 。显然,尽管泄流槽Ⅲ与泄流槽Ⅰ的断面积相同,但泄流效率前者明显低于后者。

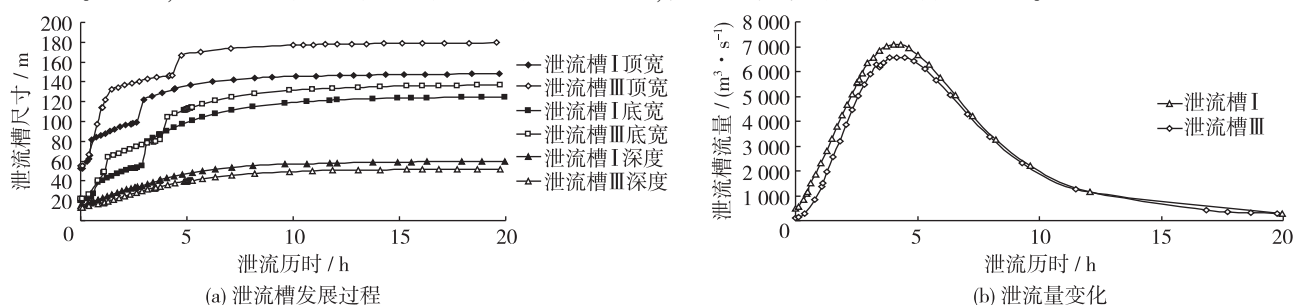


图9 泄流槽发展和泄流量变化过程(泄流槽Ⅰ vs. 泄流槽Ⅲ)

Fig. 9 Comparison of development process and discharge process between discharge channels No. I and No. III

通过以上计算发现,堰塞湖在采用泄流槽引流除险时,泄流槽深度与断面型式对其泄流过程具有重要影响,增加泄流槽深度,可明显提高泄流效率,但堰塞湖下游将承受更大风险。对于同样深度的梯形泄流槽,如果将槽底部断面减小,形成复合梯形泄流槽,不仅可减少开挖工作量,而且泄流效率没有明显降低,同时后者的泄流过程更为平缓,最大洪峰流量减小,出现的时间滞后,堰塞湖下游承受的风险也将降低。

4 结 语

针对堰塞坝坝体土石料的宽级配特性,本文提出了一个可模拟堰塞坝漫顶溃决过程溃口发展规律与流量过程的数值模型和相应的计算方法,利用该模型对唐家山堰塞坝泄流过程进行模拟,得出的泄流过程和泄流槽发展规律与实测资料接近,验证了模型和计算方法的合理性。另外利用该模型比较分析了唐家山堰塞坝除险过程中泄流槽断面型式对堰塞坝泄流过程的影响,对比发现增加泄流槽深度,可明显提高泄流效率,但堰塞湖下游将承受更大风险。对于同样深度的梯形泄流槽,如果将槽底部断面减小,形成复合梯形泄流槽,不仅可减少开挖工作量,而且泄流过程更为平缓,洪峰流量更小,峰现时间延后,而泄流效率没有明显降低,堰塞湖下游所承受的风险可相应降低。研究成果可为优化堰塞坝应急处置方案、提升我国堰塞坝应急处置水平提供技术支持。

参 考 文 献:

- [1] 严祖文,魏迎奇,蔡红. 堰塞坝形成机理及稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 55-59. (YAN Zu-wen, WEI Ying-qi, CAI Hong. Formation mechanism and stability analysis of barrier dam[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(4): 55-59. (in Chinese))
- [2] 任强,陈生水,钟启明,等. 堰塞坝的形成机理与溃决风险[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 30-34. (REN Qiang, CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, et al. Formation mechanism and breaching failure risk of barrier dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 30-34. (in Chinese))

- [3] SCHUSTER R L, COSTA J E. A perspective on landslide dams[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1986: 1-20.
- [4] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (CHEN Sheng-shui. Mechanism and process simulation of earth-rock dam break[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [5] 罗宗伟. 抛掷爆破技术在马鞍山堰塞湖应急排险处置中的应用[J]. 水利水电技术, 2008, 39(8): 31-35. (LUO Zong-wei. Application of casting blast to emergency treatment of risk-elimination of Maanshi landslide dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(8): 31-35. (in Chinese))
- [6] 刘宁, 张建新, 林伟, 等. 汶川地震唐家山堰塞引流除险工程及溃坝洪水演进过程[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(8): 1359-1366. (LIU Ning, ZHANG Jian-xin, LIN Wei, et al. Draining Tangjiashan barrier lake after Wenchuan earthquake and the flood propagation after the dam break[J]. Science in China(SerE: Technological Sciences), 2009, 39(8): 1359-1366. (in Chinese))
- [7] 徐文杰, 陈祖煜, 何秉顺, 等. 肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 933-942. (XU Wen-jie, CHEN Zu-yu, HE Bing-shun, et al. Research on river-blocking mechanism of Xiaojiaqiao landslide and disasters of chain effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 933-942. (in Chinese))
- [8] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. Mechanics of sediment transport[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [9] 韩其为, 何明民. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京: 科学出版社, 1999. (HAN Qi-wei, HE Ming-min. Incipient motion rule and starting velocity[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))
- [10] 李荣, 王迎春. 非均匀沙起动规律研究[J]. 泥沙研究, 1999(2): 27-32. (LI Rong, WANG Ying-chun. Study on laws of threshold motion for non-uniform sediment[J]. Journal of Sediment Research, 1999(2): 27-32. (in Chinese))
- [11] 秦荣昱, 王崇浩. 河流推移质运动理论及应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996. (QIN Rong-yu, WANG Chong-hao. River bed load movement theory and application[M]. Beijing: China Railway Press, 1996. (in Chinese))
- [12] 王协康, 敖汝庄, 方铎. 泥沙起动条件及机理的非线性研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 39-41. (WANG Xie-kang, AO Ru-zhuang, FANG Duo. Nonlinear study on sediment incipient motion condition and its mechanism[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 39-41. (in Chinese))
- [13] 杨具瑞, 方铎, 何文社, 等. 非均匀沙起动规律研究[J]. 水利学报, 2002(10): 82-86. (YANG Ju-rui, FANG Duo, HE Wen-she, et al. Study on laws of incipient motion for non-uniform sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(10): 82-86. (in Chinese))
- [14] SINGH V P. Dam breach modeling technology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [15] 李家星, 赵振兴. 水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001. (LI Jia-xing, ZHAO Zhen-xing. Hydromechanics [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2001. (in Chinese))
- [16] LIU Ning, CHEN Zu-yu, ZHANG Jian-xin, et al. Draining the Tangjiashan barrier lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(11): 914-923.
- [17] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181-189. (HU Xie-wen, HUANG Run-qi, SHI Yu-bing, et al. Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 181-189. (in Chinese))
- [18] 丁志雄, 王义成. 基于遥感与 GIS 的堰塞湖库区淹没分析与灾害评估[J]. 水利水电技术, 2008(10): 116-120. (DING Zhi-xiong, WANG Yi-cheng. Analysis of submergence and disaster assessment on landslide-dammed lake reservoir area based on remote sensing and GIS[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008(10): 116-120. (in Chinese))
- [19] 周宏伟, 杨兴国, 李洪涛, 等. 地震堰塞湖排险技术与治理保护[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 96-101. (ZHOU Hong-wei, YANG Xing-guo, LI Hong-tao, et al. Risk-elimination techniques and management of earthquake lakes [J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 96-101. (in Chinese))
- [20] 赵万玉, 陈晓清, 高全. 地震堰塞湖人工排泄断面优化初探[J]. 灾害学, 2010, 25(2): 26-29. (ZHAO Wan-yu, CHEN Xiao-qing, GAO Quan. Preliminary discussion on optimizing artificial drainage sections of earthquake dammed lakes[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25(2): 26-29. (in Chinese))
- [21] 赵万玉, 陈晓清, 高全, 等. 不同横断面泄流槽的地震堰塞湖溃决实验研究[J]. 泥沙研究, 2011(4): 30-37. (ZHAO Wan-yu, CHEN Xiao-qing, GAO Quan, et al. Experimental study of dam-break of earthquake barrier lake with different cross sections of drainage channel[J]. Journal of Sediment Research, 2011(4): 30-37. (in Chinese))

Dam-break numerical model for a barrier dam and its application

CHEN Sheng-shui, ZHAO Tian-long, ZHONG Qi-ming

(*Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Considering the wide gradation characteristics of barrier dam materials, an additional force perpendicular to the water flow direction is introduced into the model to consider the block function and bridging effect of coarse particles on fine particles, and the way in which fine particles surround and fill coarse particles. A numerical model with a calculation method describing the discharge process and breach development due to overtopping failure of a barrier dam is proposed. The model and the calculation method have been used to calculate and analyze the discharge process of Tangjiashan barrier dam. The calculated results are close to the observed data, which indicates that the model and the calculation method are reasonable. A comparative analysis on the influences of the discharge process of the Tangjiashan barrier dam with different cross sections of a drainage channel is carried out, and it is found that the depth and the cross section of the drainage channel have a major impact on the discharge process. With the increase in drainage channel depth, the discharge efficiency is improved significantly, but the risk of the downstream would be higher. For the trapezoid drainage channels with the same depth, if the cross section is changed to compound section by decreasing the bottom width, the excavation work decreases without causing a considerable decrease in the discharge efficiency. In addition, the discharge curve is flatter, indicating a lower peak discharge and a longer time to reach peak discharge, and therefore it will diminish a risk for the downstream of the dammed lake.

Key words: barrier dam; dam-break; numerical model; drainage channel; Tangjiashan