

DOI: CNKI: 32-1309/P. 20110313. 2241. 020

无粘性均质土石坝漫顶溃决试验研究

张大伟, 黄金池, 何晓燕

(中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究所, 北京 100038)

摘要: 针对当前土石坝溃决机理试验研究中泥沙粒径取值偏小、各砂样粒径相差不大的现状, 采用粒径对比明显的两组砂样进行了土石坝漫顶溃决试验。试验表明, 在给定的较强的初始冲刷条件下, 粗细两种颗粒坝体的溃决过程基本一致, 均是以水流的下切侵蚀为主, 在坝顶下缘位置有溯源冲刷现象出现。整个溃决过程可明显分为 3 个阶段, 第 1 阶段为坝顶下缘处陡坎形成阶段; 第 2 阶段为陡坎坍塌, 冲刷加剧阶段; 第 3 阶段为出现逆行沙垄的冲刷终止阶段。试验还发现, 下游坝坡对溃决过程的影响比较显著, 坝坡越陡, 坝顶侵蚀速率越快, 洪峰值越大。另外, 由于粗颗粒抗冲刷性强, 同等条件下粗颗粒坝体溃决洪水过程偏矮胖, 洪峰值偏小, 但是值得注意的是, 相比于较大的颗粒粒径差距而言, 其洪峰值的差异并不是太大。

关键词: 土石坝; 水槽试验; 漫顶; 溃决过程

中图分类号: TV139.16

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2011)02-0222-07

由于大坝溃决机理的复杂性及其后果的严重性, 该问题被提出至今一直是学术界和工程界关注的热点和难点问题。近几年, 随着堰塞湖等自然现象的频发, 溃坝问题再一次成为研究的焦点问题。对于土石坝以及堰塞坝来讲漫顶溃决是其最常见的溃决方式, 弄清其溃决机理对于准确的预测溃口出流过程具有重要意义。

早期的溃坝模型试验以研究溃坝洪水为主, 20 世纪 90 年代以来主要以研究溃坝机理为主^[1]。目前, 很多学者采用水槽试验的手段对土石坝的溃决机理进行了研究, 得出了很多有价值的结论。如欧盟在 2001~2004 年完成了 IMPACT 项目, 对土石坝的溃决机理进行了大量的模型试验研究, 取得了丰硕的成果^[2]。牛志攀等^[3]通过模型试验方法, 研究了堰塞湖从沿程冲刷到溯源冲刷的过程。另外, 还有一些学者进行了大尺度土石坝实体模型溃决试验, 如 Hoeg 等^[4]采用的坝高为 6 m, Zhang 等^[5]采用的土坝则高达 9.7 m。在已有的土石坝溃决模型试验中, 虽然对无粘性坝体溃决试验研究不少, 但是试验所选用的泥沙粒径一般偏小, 各砂样之间的区分度不高, 对粗颗粒坝体溃决研究较少。如 Coleman 等^[6]所选用的泥沙颗粒 D_{50} 的取值范围为 0.5~2.4 mm; Rozov 选用的泥沙颗粒的 D_{50} 取值为 0.34 mm^[7]; Chinnarasri 等^[8]所选用的两种非粘性泥沙颗粒的 D_{50} 的取值为 0.36 mm 和 0.86 mm。粗颗粒由于其自身重量使得其抗冲刷性明显高于细颗粒, 因此, 在同样的试验条件下, 粒径差别明显的粗颗粒和细颗粒坝体的漫顶溃决现象有何异同是非常值得关注的。本文采用水槽试验的手段研究了两种粒径相差较大的砂样堆成的坝体漫顶溃决现象, 得出了一些有价值的结论。

1 模型试验设计

1.1 试验设备

试验设备的顶端为一 5.0 m × 5.0 m 的方形蓄水池, 深 2.4 m, 下端连接一水槽, 该水槽长 17 m, 宽 1.2 m, 槽顶到地面的高度 2.4 m, 水槽深度 1.5 m, 水槽底部坡度为 0。水槽的右侧 (迎水流方向) 边壁为透明

收稿日期: 2010-05-12; 网络出版时间: 2011-03-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110313.2241.020.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目 (200701015)

作者简介: 张大伟 (1980-), 男, 山东滕州人, 博士后, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: zhangdw@iwhr.com

的玻璃材料做成,以利于观察坝体的整个溃决过程,水槽的其余部分为钢板做成。

上部进水管从供水水箱取水,在进水管上安装电磁流量计控制入库流量大小,进水管末端为自由出流。为保持入库流量恒定,供水水箱内装有平水阀,使得水箱水位始终保持恒定状态。水槽的末端修筑沉砂池以回收试验用砂。在库区内布置有自计水位传感器,自动记录坝前水位的起涨过程。在坝体的下方和侧面布置高清的 CCD 摄像机,从不同角度记录坝体的漫顶溃决过程。整个物理模型的平面布置如图 1 所示。

1.2 试验设计

针对当前水槽试验砂样粒径偏小的现状,试验中采用两种粒径相差较大的无粘性砂作为坝体材料,两种砂的 D_{50} 取值分别为 3.77 mm 和 28.70 mm。为方便分析和比较试验结果,将两种泥沙颗粒分别称为细颗粒和粗颗粒,其级配曲线如图 2 所示。

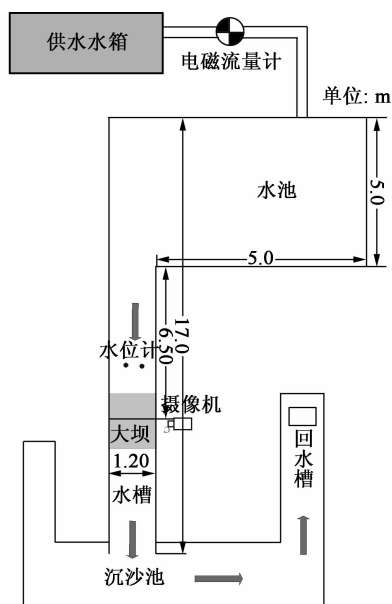


图1 水槽模型试验布置平面图

Fig. 1 Plane view of the flume experiment

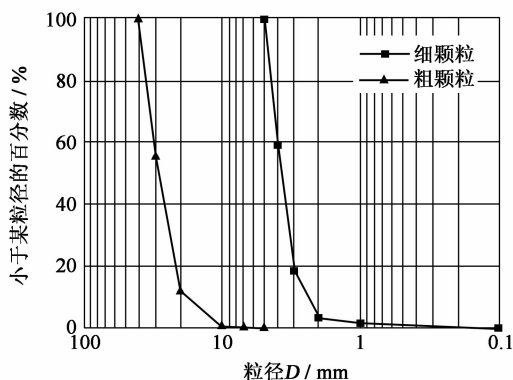


图2 试验用砂级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution of sands

试验中坝高设定 1.20 m, 顶宽 0.20 m, 上游坝坡为 1:1.25, 下游给定两种坡度分别为 1:3 和 1:2, 这样两种砂样共有 4 组试验方案, 各方案中上游的来流量均给定为 20 L/s。为确保压实度, 在堆坝时采取分层施工的办法, 每 20 cm 为一层, 每堆加一层夯实一次, 为保证坝体的均匀性, 每次夯实的次数一致。为保证大坝漫顶时下游坡面冲刷均匀, 在坝顶布置一 0.10 m 高的挡板, 当库区水位与挡板上缘齐平后, 快速提起挡板, 由于有 0.10 m 的水头差存在, 在漫顶之初水流已具备了很强的冲刷能力。为了避免坝体渗水对试验效果的影响, 需要在坝坡的迎水面采取防渗措施。目前该类试验的防渗措施共有两类, 一类为在上游坡面布置防渗材料^[8,9]; 另一类为在水槽底部布置排水设施^[6,10]。考虑到本文试验设备的特点, 采用第一类方法在坝体上游面铺设一层防渗纸, 纸张要求具有较好的防水性能, 但韧性不能太强, 随着溃坝的发生, 该纸张可以轻易被水流撕碎带走。

2 漫顶溃决过程

通过观察试验现象发现, 在给定的试验条件下, 各组试验的溃决过程总体上来说比较类似。下游坡面冲刷以下切侵蚀为主, 在坝顶下缘位置存在溯源冲刷现象。图 3 为本次试验完全漫顶溃决物理过程示意图, 总体来看, 整个溃决过程大致可分为 3 个阶段。其中, 图 3(a)、图 3(b)为第 1 阶段, 图 3(c)、图 3(d)为第 2 阶段, 图 3(e)、图 3(f)为第 3 阶段, 各阶段的具体特征解释如下:

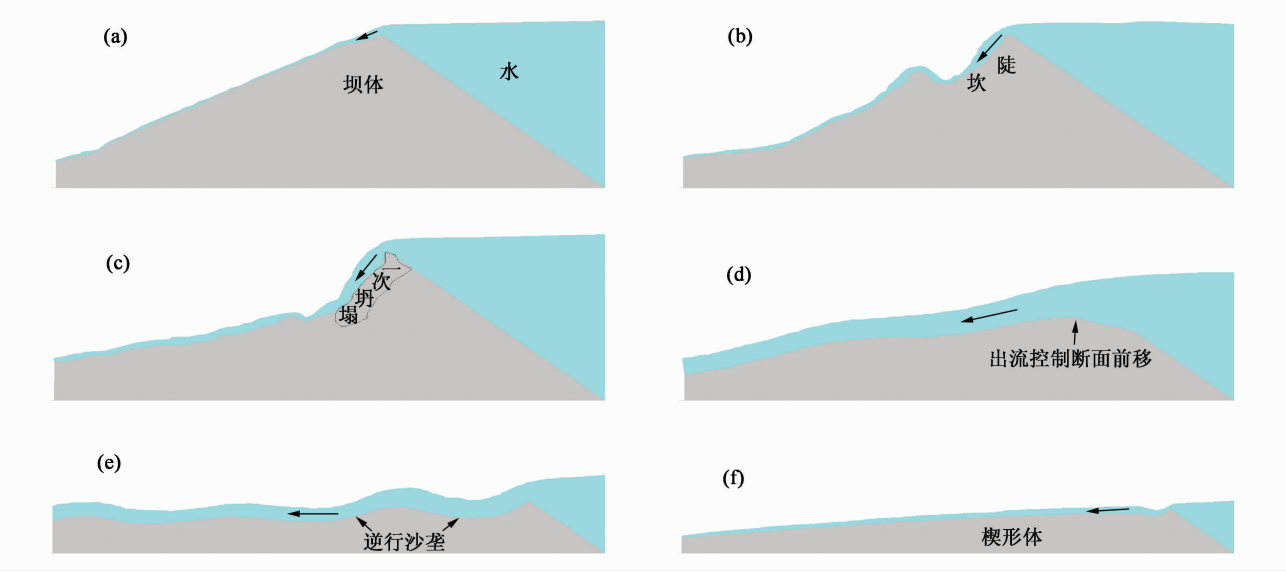


图 3 漫顶溃决过程示意图
Fig. 3 Sketch of overtopping breaching process

(1) 第 1 阶段 挡板提起后，坝顶下缘位置的泥沙颗粒首先被卷起冲向下游，对于同种几何形状的坝体而言，细颗粒坝体漫顶后水流冲到下游面坡脚的速度要快于粗颗粒坝体。图 4 为同种坝体尺寸下粗细两种泥沙颗粒组成的坝体在挡板提起 5s 后下游坡面的冲刷形态，由图可以很明显的看出水流在细颗粒床面上的运动速度要明显快于水流在粗颗粒床面上的运动速度，分析原因认为一方面这是由于粗颗粒表面的孔隙较大，水流漫顶后会形成较强的下渗现象，水流渗入到坝体的内部，减缓了水流的运动速度；另一方面，粗颗粒坝体下游面的抗冲刷性较强，水流运动的阻力较大，这也会减缓水流冲向下游的速度。由于细颗粒的抗冲刷性较弱，一部分泥沙颗粒被水流卷起一起冲向下游。

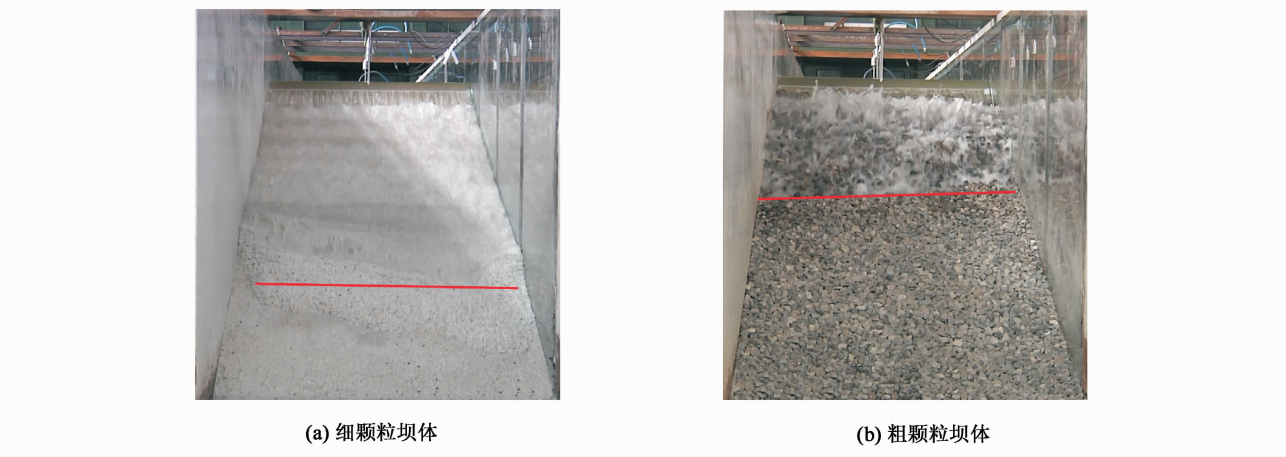


图 4 漫顶 5 s 后两组坝体下游坡面形态
Fig. 4 Downstream bed form after flooding dam for 5 seconds

随着坝顶下缘位置泥沙颗粒不断被水流带向下游，在该位置处逐渐发展成一个陡坎，如图 3 (b) 所示。随着陡坎高度的增加，水头落差变大，陡坎的坡度变陡，水流的冲刷强度变得越来越剧烈，带动陡坎面上的泥沙剧烈冲刷，使得陡坎面不断向上游推进，同时陡坎的底部也在不断地被掏蚀冲刷，此处水流紊动剧烈，有反向旋流出现，被水流卷起的泥沙颗粒很快被冲向下游。

(2) 第 2 阶段 随着陡坎下游跌水面基础的不不断刷深以及陡坎侵蚀面的不断前移，使得陡坎越来越不

稳定, 最终失稳形成坍塌, 见图 3(c)。陡坎坍塌后, 溃口控制断面处的水头会突然增加, 溃口流量突然增大, 冲刷活动加剧, 通常会伴随着二次坍塌的现象发生。随后整个下游坡面上会形成比较均匀的冲刷现象, 由于水头高、流速快, 床面的剪切力较大, 因而冲刷速度较快, 溃口控制断面不断向上游发展, 如图 3(d) 所示。该阶段水流流态复杂, 下游坡面主要呈现急流流态特征, 并伴有水波的破碎现象产生, 整个溃坝流量过程的洪峰值就出现在该过程之中。

(3) 第3阶段 坝顶的水头差已没有第2阶段时大, 随着第2阶段的剧烈冲刷, 泥沙颗粒被带向下游后使得整个坝体的下游坡面延长, 同时坡面变缓, 流速减慢, 水流的冲刷侵蚀能力降低, 坝体的侧面形状呈波浪状, 从外形看为一个向上游运动的逆行沙垄, 如图 3(e) 所示, 在 Chinnarasri et al 的试验研究中也发现了类似的现象^[8]。随着上游水头的进一步降低, 逆行沙垄现象逐渐消失, 整个下游坡面的冲刷速度变得越来越慢, 直至冲刷终止, 床面达到最终的稳定状态, 在原坝体的基础上形成了一个坡度很小的平整的楔形堆积体, 此时的水面线平行于堆积体的坡面, 如图 3(f) 所示。该阶段的历时相对较长, 但水流形态变化比较平稳, 从防洪的角度考虑, 该阶段洪水对下游危害不大。

由于泥沙的抗冲刷性不同, 因此, 最终残留的楔形体高度也有所不同。图 5 为下游坝坡为 1:3 的粗细两种颗粒坝体残留的楔形体, 由该图可以很明显看出粗颗粒坝体的残留高度明显高于细颗粒坝体, 粗颗粒坝体残留高度为 0.55 m, 细颗粒坝体为 0.31 m。同种材料下, 对于下游边坡为 1:2 的坝体而言, 其坝体残留高度要略低一些。

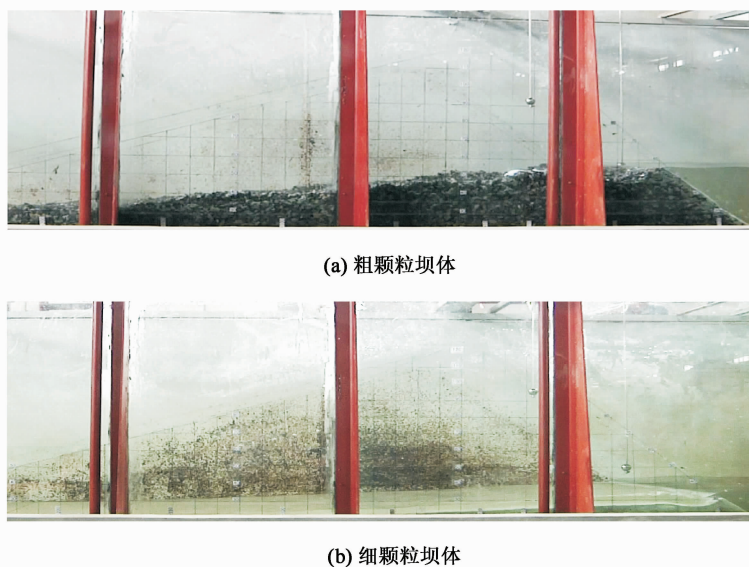


图5 坝体溃决后残留的楔形体

Fig. 5 Residual wedge block after dam-break

3 坝顶侵蚀速率

图 6 为各工况下坝顶泥沙侵蚀速率的变化过程, 坝顶侵蚀速率指的是坝顶中轴线位置被侵蚀下降的速率。由该图可以明显看出, 在水流漫顶后不久, 各工况侵蚀速率均会出现一个明显的峰值, 由前面的分析可知, 该值出现是由于坝顶处形成的陡坎出现突然的坍塌造成的。同时由该图还可以看出一个非常明显的规律, 对于同种材料的坝体而言, 下游坡度对整个漫顶侵蚀过程有比较明显的影响, 下游坝坡越陡, 侵蚀速率的峰值越大; 对于同一种几何尺寸的坝体来讲, 颗粒的抗冲刷性以及颗粒固有的其它属性起着非常重要的作用, 细颗粒坝体的坝顶侵蚀速率峰值要大于粗颗粒坝体的坝顶侵蚀速率峰值, 并且峰值的出现时间也要早一些, 分析认为由于细颗粒的抗冲刷性较弱, 陡坎的形成时间要比粗颗粒坝体早, 同时由于细颗粒在吸水后表

现出一定的粘性特质, 因此形成的陡坎的最大高度要高于粗颗粒坝体形成的陡坎高度, 结果细颗粒坝体陡坎坍塌形成的坝顶侵蚀速率峰值要早于和大于粗颗粒坝体的坝顶侵蚀速率峰值。

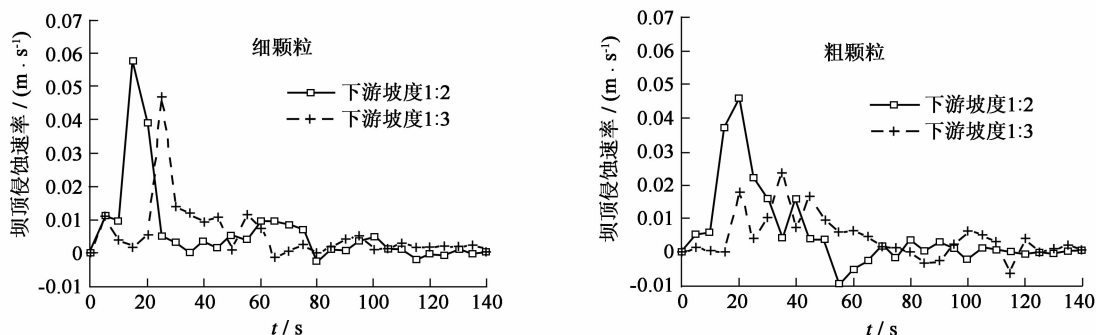


图 6 各工况坝顶侵蚀速率随时间变化过程示意图

Fig. 6 Degradation rate of the crests in various test conditions

在坝顶侵蚀速率的峰值过后, 坝顶处的冲刷速率逐渐降低, 在这个过程中, 坝顶冲刷侵蚀速率有负值出现, 这是由于随着溃口出流控制断面的前移, 坝前所携带来的泥沙在坝顶处堆积造成的。最后坝顶侵蚀速率趋于稳定, 整个冲刷过程基本停止。

4 溃决流量过程

由于溃坝水流水位起涨剧烈, 采用传统的薄壁堰测流存在着较大的误差。因此在本试验中采用水量平衡的办法来计算实际的溃口出流过程, 水量平衡公式如下:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_b - Q_s \quad (1)$$

式中 V 为水库容积; Q_{in} 为水库上游来流量; Q_b 为溃坝流量; Q_s 为坝体的渗流量。由于坝体上游面采取了防渗措施, 因此渗流量基本可以忽略不计。另外对于矩形的水库断面形状, 上式可以写为

$$A_s \frac{dZ}{dt} = Q_{in} - Q_b \quad (2)$$

式中 A_s 为水库的平面面积; $Z(t)$ 为坝前库水位变化过程, 由布设在库区的水位传感器自动记录。

各工况条件下的溃口出流过程如图 7 所示。由该图可以看出, 同种材料的坝体, 上游坡度相同的情况下, 下游坡度越陡, 其洪峰值越大, 峰现时间越早, 峰形越尖瘦。而对于相同几何尺寸不同材料的坝体而言, 抗冲刷性能越强, 则其洪峰值越小, 流量过程线越矮胖, 在本次试验中, 粗颗粒坝体的抗冲刷性要明显

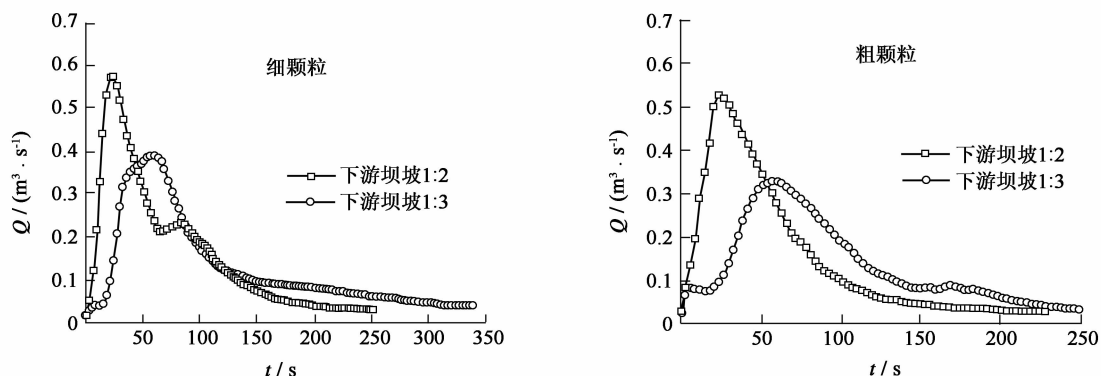


图 7 各工况溃口实测出流过程

Fig. 7 Measured breach hydrographs in various test conditions

强于细颗粒坝体,因此在坝体几何尺寸相同的情况下,粗颗粒坝体的洪水过程矮胖,洪峰值也偏小。但是值得一提的是,虽然粗颗粒的粒径是细颗粒的近8倍,但是洪峰值差别却不是太大,对于细颗粒坝体,下游坝坡1:2时,洪峰值为 $0.578\text{ m}^3/\text{s}$,下游坝坡为1:3时,洪峰值为 $0.390\text{ m}^3/\text{s}$,粗颗粒坝体对应的洪峰值分别降低了8.82%和15.9%。黄金池采用数学模型对溃口出流过程进行粒径的敏感性分析时也曾得出类似的结论^[11]。该实测流量过程可以作为溃口出流数学模型验证的依据。

5 结 论

采用两种粒径相差较大的砂样进行了无粘性均质坝漫顶溃决试验。试验结果表明,在给定的初始冲刷强度较高的试验条件下,细颗粒坝体和粗颗粒坝体的溃决过程整体上非常相似,两种坝体均是以下切侵蚀为主,在坝顶的下缘位置有溯源侵蚀现象出现。整个过程可分为3个阶段,第1阶段为坝顶处陡坎形成阶段;第2阶段为陡坎坍塌,冲刷加剧阶段;第3阶段为出现逆行沙垄和冲刷终止阶段。坝体下游面坡度对大坝的溃决有非常明显的影响,在条件一定的情况下,坝体下游面越陡,坝体越容易溃决,形成的洪水流量过程越尖瘦,洪峰值也越大。因此,从工程安全的角度讲,土石坝下游坡面宜设计的缓一些。由于粗颗粒坝体的抗冲刷性能要优于细颗粒坝体,在坝体几何尺寸一致的前提下,粗颗粒坝体溃决时形成的陡坎高度比细颗粒坝体形成的陡坎低,陡坎坍塌时间也比细颗粒坝体晚,形成的溃口洪水过程偏矮胖,洪峰值偏低。值得一提的是虽然粗颗粒的平均粒径是细颗粒的近8倍,形成的洪峰值有所差别,但是差别却不是非常显著。另外,溃坝结束后粗颗粒坝体残留坝体高度要明显高于细颗粒坝体的残留高度。试验结果对于认识无粘性坝体的漫顶溃决机制具有一定的帮助作用,试验数据也可作为溃口模型验证的依据。由于本文的试验是针对无粘性的均质散粒体进行的,因此试验结论的适用性会有一些限制。

本文水槽试验还存在着需要完善的地方,大坝的漫顶溃决往往是从坝顶某一薄弱垭口部位率先溃决,而后向两侧展宽、刷深,初始冲刷强度并不是太高,而本文重点关注的则是整个坝体完全漫顶溃决的状态,因此,在垭口漫顶溃决模式下两种颗粒的坝体溃决过程有何异同则是非常值得关注的,这也是笔者下一步工作的重点。

致谢: 本次试验得到了中国水利水电科学研究院水力学研究所张东教授级高级工程师、高建标高级工程师等的指导与帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 李云,李君.溃坝模型试验研究综述[J].水科学进展,2009,20(3):304-310. (LI Yun, LI Jun. Review of experimental study on dam-break[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3):304-310. (in Chinese))
- [2] MORRIS M W, HASSAN M A A, VASKINN K A. Breaching formation: field test and laboratory experiments[J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(extra):9-17.
- [3] 牛志攀,许唯临,张建民等.堰塞湖冲刷及溃决试验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(3):90-95. (NIU Zhi-pan, XU Wei-lin, ZHANG Jian-min, et al. Experimental investigation of scour and dam-break of landslide dam[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(3):90-95. (in Chinese))
- [4] HOEG K, LOEVOLL A, VASKINN K A. Stability and breaching of embankment dams: Field tests on 6 m high dams [J]. International Journal on Hydropower & Dams, 2004, 11(1):88-92.
- [5] ZHANG Jian-yun, LI Yun, XUAN Guo-xiang et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 39(11):1881-1886.
- [6] COLEMAN S E, ANDREWS D P, WEBBY M G. Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(9):829-838.
- [4] ROZOV A L. Modeling of washout of dams[J]. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(6):565-577.
- [8] CHINNARASRI C, TINGSANCHALI T, WEESAKUL S, et al. Flow patterns and damage of dike overtopping[J]. International Journal of Sediment Research, 2003, 18(4):301-309.

- [9] Dupon E, Dewals B J, Archambeau P, et al. Experimental and numerical study of the breaching of an embankment dam[C]// Proc 32nd IAHR Congress. Venice, Italy, 2007: 1-10.
- [10] SCHMOCKER L, HAGER W H. Dike breaching due to overtopping[C]// 33rd IAHR Congress. Water Engineering for a Sustainable Environment. Vancouver: ASCE, Canada, 2009: 3896-3903.
- [11] 黄金池. 堰塞坝漫顶溃口流量变化过程的数值模拟[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1235-1240. (HUANG Jin-chi. Numerical modeling of flow through breach of landslide dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1235-1240. (in Chinese))

Experimental study on overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankment dams*

ZHANG Da-wei, HUANG Jin-chi, HE Xiao-yan

(Department of Water Hazard Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Most experimental studies on overtopping breaching of embankment dams use small-sized sediment grains and little differences in the diameter profile of sand specimens. Aiming at the issues of sediment sizes, two distinct types of sediments are used in this experimental study. The experiment reveals that the breaching processes of two types of dams are basically identical under relatively strong erosion conditions. During the overtopping event, the down cutting phenomena are most likely observed and the backward erosion phenomena occur only near the crest of the dam. The entire breaching process can be divided into three stages. In the first stage, a headcut is formed near the lower margin of the dam crest. In the second stage, the headcut collapses and the erosion actions become violent. In the third stage, antidunes occur and the erosion actions terminate. Experiments also detect that the downstream slope of the dam has a significant effect on the breaching process. The steeper the slope is, the faster the degradation rate of the crest is and the larger the flood peak discharge is. Moreover, a flat hydrograph is produced by the embankment dam-breach flood, which contains coarse sand particles. The corresponding value of the flood peak tends to be smaller compared to that of resulting from small-sized materials. However, it is worth mentioning that a large difference in sediment sizes will have a limited effect on the peak discharge.

Key words: Embankment dam; flume experiment; overtopping; breaching process

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No.200701015).