

堰塞坝漫顶溃决与演变水槽试验指标初探

杨 阳^{1,2}, 曹叔尤²

(1. 工程泥沙交通行业重点实验室 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;
2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘 要:水槽试验是研究堰塞坝体溃决机理的有效手段之一,但现有试验研究中合理的设计准则尚不多见。通过理论分析和水槽试验对堰塞坝漫顶溃决的试验设计进行了研究。基于总结分析,探讨了影响坝体溃决的因素以及堰塞坝漫顶溃决条件下溃口发展的一般进程。通过分析推导,提出了溃口发展过程中流深 d 的概念,并建立了用于确定模型试验比尺的指标 d_0/D_{90} 。根据这一指标所确立的相似准则,设计并完成了模型试验;通过与原型堰塞湖溃决过程的对比,试验结果初步印证了这一指标的合理性。该成果可以为后续的堰塞坝溃决水槽试验研究提供借鉴和参考。

关键词:堰塞坝;漫顶;水槽试验;流深;相似准则

中图分类号:TV142.1

文献标志码:A

Preliminary Study on Similarity Criteria of the Flume Experiment on the Breach Process of the Landslide Dams by Overtopping

YANG Yang^{1,2}, CAO Shuyou²

(1. Key Lab. of Eng. Sediment, Tianjin Research Inst. for Water Transport Eng. of Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

2. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: The overtopping of the landslide dams was studied by means of theoretical analysis and flume tests. The factors that impact the dam breach were discussed and the fundamental procedure of the dam breach development by overtopping was stated. A new concept “flow depth” d as well as the criterion d_0/D_{90} was carried out to establish the scales for the flume model. Based on the similarity criterion derived, a series of flume experiments were conducted. The experimental result showed a general agreement with the prototype data which on some degree identifies the rationality of definition of the criterion in the present study. The results could be applied as reference for the subsequent relevant researches.

Key words: landslide dams; overtopping; flume experiment; flow depth; similarity criterion

在河流的上游地区,地震形成的大量松散碎屑物质富集于山体坡面,极端的暴雨天气(或由地震本身)提供动力致使碎屑物质以崩塌、滑坡、泥石流等形式进入河道,阻塞河流形成堰塞湖。堰塞湖溃决洪水被认为是最为严重的次生灾害之一。

无论是有效地预防和降低堰塞湖造成的次生灾害,还是明确堰塞湖存在和演变对河流健康稳定产生的影响以期进行河流修复,其核心问题都是弄清堰塞坝溃决演变过程中的水沙相互作用,其机理涉及水力

学、土力学、泥沙运动力学等多门学科。越来越多堰塞湖的产生使这一科学问题成为国内外学者关注的焦点。然而由于堰塞湖形成、演变的特殊性和复杂性,目前对于堰塞坝溃决演变过程的认识尚不深入,相关研究成果有限,比较有代表性的有 Costa 和 Schuster^[1]、Ermini 和 Casagli^[2]、Coleman^[3]、Yang^[4]、张婧^[5]、岳志远^[6]、牛志攀^[7]等。与此相对的是,对于人工土石坝(堰塞坝为天然土石坝)溃决演变的研究成果则要丰富很多,比如 Fread^[8]、Singh 和

Scarlato^[9]、Powledge 等^[10]、Visser^[11]、Chinnarasri 等^[12],以及欧洲 IMPACT 计划项目^[13]和中国“十一五”国家科技支撑项目“水库大坝安全保障关键技术研究”的相关成果^[14]。由于堰塞坝与人工土石坝有着一定的相似性,因此对于人工土石坝溃决演变的认识可以得以借鉴。然而应当指出的是,堰塞坝经过自然堆积形成、结构松散,组成物质多为非黏性颗粒,粒径级配分布宽而不均匀,较之人工土石坝没有专门防渗排水设施等等,这些不同之处都将导致其冲刷演变过程中水沙作用机理与人工土石坝存在差异。

同一物理过程的研究主要有原型观测、数值模拟以及模型试验 3 种方式。就堰塞湖溃决过程而言,原型观测往往难以实施,原型资料收集也不甚可靠;而基于应用和预报的数值模拟其理论基础尚不成熟、用以率定数值模型的资料也很少。可见模型试验是现阶段深入研究堰塞坝溃决演变水沙相互作用机理的较为可行的方式。文献[3-7]的研究成果即是基于模型试验。

模型试验的关键在于相似准则的确立;如果相似条件缺失,则不能保证试验成果与客观情况匹配,那么进一步基于试验的深入探讨也就失去了基础。前述这些研究中除了 Coleman 等^[3]论述了水槽试验与原型溃口水流应当满足重力相似准则(亦即弗洛德数比尺 $\lambda_{Fr} = 1$)外,其他试验在试验条件参数设计上均较为概化。在均质人工土坝(主要为黏性土)溃决模型试验研究方面,李云等^[14]给出了相似准则;而对于非黏性的堰塞坝体来说这一方面的论述尚不多见,模型试验的条件选取也缺乏相应的理论基础。

作者通过对前人研究工作的总结和独立的水槽试验,探讨了堰塞坝漫顶溃决条件下溃口发展的一般进程;基于分析和推导提出了用于确定模型试验比尺的指标 d_0/D_{90} ;并通过模型试验与原型堰塞湖溃决过程的对比,初步印证了这一指标的合理性。

1 影响坝体漫顶溃决因素

堰塞坝溃决方式主要分为漫顶溃决和渗透溃决两种,其中绝大部分坝体是由于漫顶而溃决。由于溃决本身是一个复杂的多过程物理现象,影响溃坝的因素主要有上游来流条件、坝体的物质组成(以及形成时是否分层分选)、坝体的几何外形、坝体的体量等等。其中,上游来水的大小不仅决定了堰塞湖内水位的变化快慢,还通过渗流或者坡面流直接

影响到坝体的侵蚀过程。而对于坝体物质组成而言,组成坝体“骨架”的粗颗粒的含量直接影响到坝体的抗侵蚀能力;级配的连续性也决定了坝体的渗透特性。坝体的几何外形对坝体溃决的影响则体现在:下游坝坡的陡缓决定了坝坡的渗透稳定性;坝高与坝顶长度之比决定了坝体渗透平均坡降的大小;而坝体的绝对高度控制着潜在漫顶溃决洪峰流量的大小;坝顶的绝对长度对坝体的溃决历时又影响很大。坝体的体表征着演变过程中坝体状态的“惯性”,体量越大,处于破坏中的坝体将加速溃决,可能造成的灾害也成倍放大;而处于相对稳定状态的坝体,体量越大反而稳定性越好。最后,坝体物质在形成过程中是否分选成层则会影响到后续渗透侵蚀或者坡面冲刷,从而对整个溃决进程产生影响。这些因素对于溃坝过程的影响往往并不是单一的,各因素起到的作用可能是协同的也可能是此消彼长的。

特别地,针对堰塞坝漫顶溃决过程根据已有的认识可以归纳为——当河道被阻塞形成堰塞湖后,水位不断上涨直至超过坝顶,水流自坝顶顺流而下。由于坝体结构松散,溃决并不是瞬间发生而是逐步进行的。水流首先会在坝体上方切出一条过流通道,即为初始溃口;在水流的冲刷作用下溃口进一步展宽与下切,从而最终导致坝体溃决破坏;溃口不断发展和湖内剩余库容的调整使过坝水流始终处于非恒定状态(图 1)。

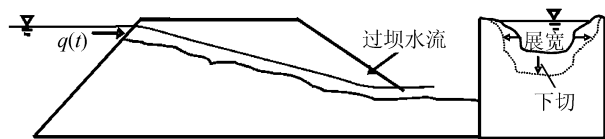


图 1 坝体溃口发展示意图

Fig.1 Sketch of the development of the dam breach

应当指出的是,自然条件下坝体漫顶溃决过程同时不可避免地会有部分水量通过坝体渗透的方式输送到下游,但渗流对于坝体漫顶溃决的贡献主要是在初始溃决点的形成时期,对于溃决流量的贡献为小。

图 2 给出了这一过程中水沙相互作用的一般性描述。可以看到,坝体的漫顶溃决事实上是一个水沙相互作用的连锁反应,在一定的初始边界条件下,一旦触发便按照自身规律侵蚀、演变和发展,环环紧扣。无论是形成溃口,溃口放大,过流通道展宽下切等每一环节的具体现象虽然不同,但非恒定高速急变流输沙机理贯穿始终。这其中水流提供了破坏坝

体的动力,而坝体泥沙特别是不容易被水流带走的粗颗粒泥沙则成为抵抗侵蚀的主要因素,二者在整个溃决演化过程中体现了拮抗作用。

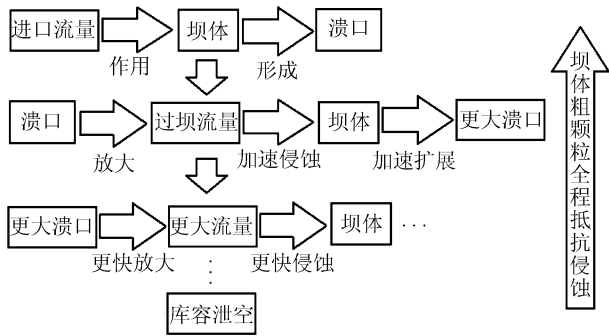


图2 坝体溃决过程中水沙相互作用的进程图

Fig.2 Procedure of the water-sediment interaction during the breach process

2 堰塞坝漫顶溃决与演变水槽试验指标推导

如图1所示,水流从溃口泄下,由于坡陡流急,不会出现缓流壅水,因此可以认为溃口流量的变化只与溃口变形和上游来流相关(此时溃口即是一个堰的形态和堰顶水深均不断耦合变化的堰流)。事实上,任一时刻从溃口涌出的流量 $q(t)$ 可以对应等于某一坝前水深的坝体瞬时溃决时坝址处的流量(图3)。根据 Ritter 基于理想流体的圣维南方程给出的平床半无限水库瞬时溃坝波(图3)的理论解^[15]可知,在坝址($x = 0$)处有:

$$q^*(0, t) = \frac{q(0, t)}{\sqrt{g \cdot d^3}} = \frac{8}{27} \quad (1)$$

其中, d 为原坝前水深, g 为重力加速度, $q(0, t)$ 为 $x = 0$ 处单宽洪水流量, $q^*(0, t)$ 为无量纲单宽流量。式(1)说明瞬时溃决坝址处洪水流量 $q(0, t)$ 实际上为常数,只与原坝前水深 d 相关,不随时间变化而变化。

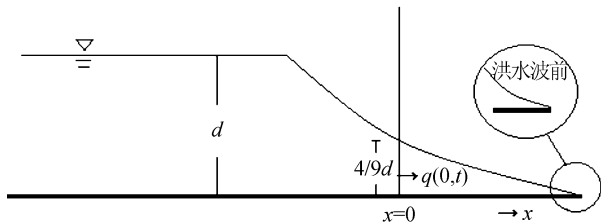


图3 Ritter 解描述的瞬时溃坝示意图

Fig.3 Sketch of Ritter's solution of the instantaneous dam break

进一步由式(1)得到:

$$d = \frac{9}{4} \sqrt[3]{\frac{q(0, t)^2}{g}} \quad (2)$$

其中, $q(0, t)$ 为溃坝单宽流量。此处将 d 定义为“流深”,作为流量的一种度量,它具有长度的量纲;即对任一时刻溃口流量都有这样的一个特征长度与之对应。这样处理的好处是将溃坝过程的动力(水流)、阻力(大粒径泥沙颗粒)因素的拮抗作用化作无量纲数 d/D ,其中, d 为流深, D 为坝体粗颗粒物质的特征粒径,一般可选用 D_{90} 作为特征粒径。另外还可以看到, d/D 与讨论明渠恒定流水流阻力的相对水深因子一致,旨在描述水流阻力。

有了流深及相对水深的概念,便可以从相似性的角度来确定漫顶溃决水槽试验的水沙参数。既然在整个漫顶溃决过程中水沙的相互作用贯穿始终,那么水槽模型坝体为了保证与天然堰塞坝溃决演变过程相似,应满足 $\lambda_{d/D} = 1$ 。同样,取 $\lambda_g = 1$,则有:

$$\lambda_{d/D} = 1 = \frac{\lambda_d}{\lambda_D} = \frac{\sqrt[3]{\lambda_q^2/\lambda_D}}{\lambda_g} = \sqrt[3]{\frac{\lambda_q^2}{\lambda_L^3}} = \frac{\lambda_q}{\lambda_L^{1.5}} \quad (3)$$

进一步,由 $\lambda_q = \lambda_v \cdot \lambda_h$, $\lambda_h = \lambda_L$, 式(3)还可以推出:

$$\lambda_v = \lambda_L^{0.5}; \lambda_L = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} = \lambda_L^{0.5} \quad (4)$$

由式(3)、(4)进一步通过换算可以得到 $\lambda_{Fr} = 1$,这与 Coleman 等^[3]选用的相似准则完全一致。Coleman 等认为模型试验与原型过程水流应当满足弗洛德数相似,从而推出各比尺关系;作者则是通过分析溃坝过程中水沙拮抗作用,认为模型试验与原型过程水沙相互作用进程应当一致,进而推出各比尺关系。就实际意义而言,作者直接考虑水沙作用关系,比 Coleman 等仅从水流考虑出发,更为深入和符合实际。

如前文所述, d/D 是一个过程变量,在一旦发生即不可中止的溃决过程中无法加以控制。考虑到(如图2所示),溃决过程任一时刻的溃口流量可以认为是下一时刻的“初始进口流量”;上一时刻的坝体状态和过流条件即是下一时刻溃决进一步发展的触发条件,坝体组成、几何外形、溃决初始触发条件一致情况下,坝体能够遵循自身的冲刷变形规律重复遍历整个溃决过程。试验研究的目的是通过在水槽中对溃决过程观测进一步认识坝体溃决演变机理,因此水槽模型试验中较为可行的处理方法是,在尽量保证坝体材料级配、坝体外形等与原型近似的条件下,满足初始触发条件与原型一致, $\lambda_{d_0/D} = 1$ (其中, d_0 为初始进口流量所对应的流深)。实际上, $\lambda_{d_0/D} = 1$ 是坝体溃决演变相似的一个必要条件。

3 模型试验

3.1 试验概况

作者开展了一系列的模型试验验证所推得的比

尺关系式的合理性。试验是在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点试验室泥沙大厅长 16 m, 宽 0.3 m 的玻璃水槽中进行。水槽底坡由钢板铺成, 比降为 0.3%, 试验布置如图 4 所示。

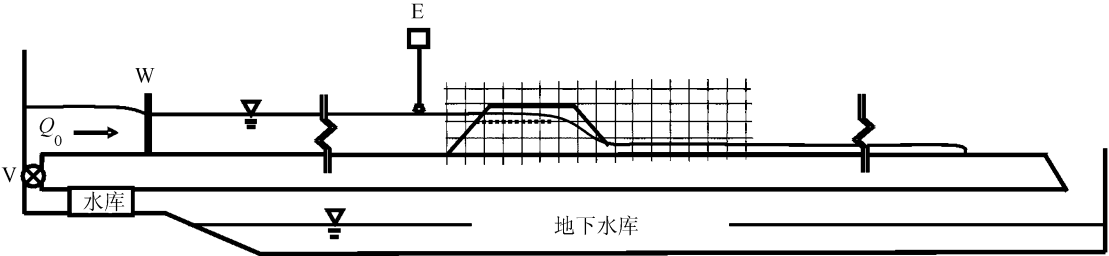


图 4 试验装置布置图

Fig.4 Layout of the experimental setup

其中, W 为量水堰; E 为自动水位计, 测量频率为 1 次/s; 试验用水由水泵从地下水库抽取, 进口流量 Q_0 由控制阀门 V 控制; 流经试验段的水流在水槽末端回到地下水库, 形成自循环系统。试验全过程由放置在水槽侧面、下游和顶部的 3 台数码摄像机记录(图 5)。为了便于观察和辅助测量, 在水槽边壁、下游断面以及顶部画(设)有 5 cm $\times$ 5 cm 的栅格。

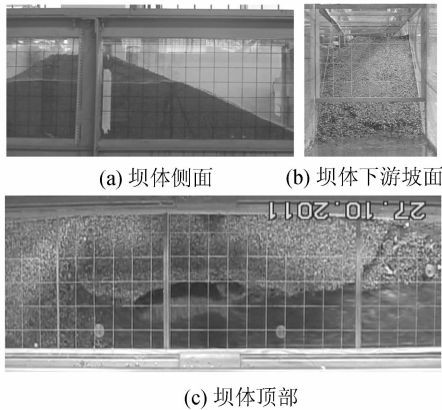


图 5 溃决过程中坝体的不同侧面

Fig.5 Different perspective of the dam in breaching

表 1 典型堰塞湖溃决不同阶段泄流槽尺寸、流量及床面 D_{90} 值

Tab.1 Parameters of the typical landslide dams in different breach stages

堰塞坝	初始泄流槽				最大流量溃口			
	平均槽宽/ m	入库流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	河床 D_{90} / mm	$d_0 : D_{90}$	平均溃槽 宽 /m	过坝流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	河床 D_{90} / mm	$d_0 : D_{90}$
唐家山	12.5	118	550	8.54	140	约 6 500	900	15.25
小岗剑	10	20	200	8.35	80	约 3 000	800	14.72

水槽试验中, 由于受到水槽宽度的限制, 模型在宽度方向上一般难以满足几何相似, 因此考虑单宽相似。除此以外, 模型在长度方向和高度方向以及上、下游坡度应尽量保证与原型相似, 也就是说从几何外形上讲, 模型坝体应当尽量满足 H/L_m 、 S_u 和 S_d

3.2 试验参数

3.2.1 进口流量和泥沙级配

试验模拟堰塞坝从蓄满到漫顶破坏的全过程。选取唐家山堰塞湖和小岗剑堰塞湖作为原型参考, 将它们溃决(人工引导冲刷泄流)各个阶段的泄流槽(溃口)尺寸、流量、床面粗颗粒粒径等关键参数列于表 1^[16]。

根据表 1 数据可以计算出, 初始开挖泄流槽时, 唐家山堰塞湖和小岗剑堰塞湖槽内 d_0/D_{90} 值在 8.35 ~ 8.54 之间。为保证 $\lambda_{d_0/D} \sim 1$, 作者试验选取 d_0/D_{90} 的范围为 6.28 ~ 8.82 之间(d_0 为进口流深)。参考文献[4-5], 选取 $D_{90} = 6.7$ mm, 按照图 6 级配选用天然砂(密度 ρ_s 约为 2 650 kg/m³) 制备试验用沙, 使坝体级配组成与对照的天然坝体较为一致。选取进口流量 Q_0 范围为 0.6 ~ 1.03 L/s。

3.2.2 坝体几何尺寸

坝体的几何尺寸主要包括坝高 H 、坝顶长度 L_m (顺流向)、坝顶宽度 B 以及上、下游坝坡 S_u ($S_u = H/L_u$)、 S_d ($S_d = H/L_d$) 等(图 7(a)), 其中, L_u 、 L_d 分别为上、下游坡面长度的水平投影。

等无量纲参数与实际坝体相近。表 2 列出了汶川地震形成的几处典型堰塞坝的几何特征尺寸^[16-17]。由表 2 可以计算得出 H/L_m 值在 0.26 ~ 3.5 之间, S_u 在 1 : 2.75 ~ 1 : 3.08 之间, 而 S_d 在 1 : 1.19 ~ 1 : 3.73 之间。

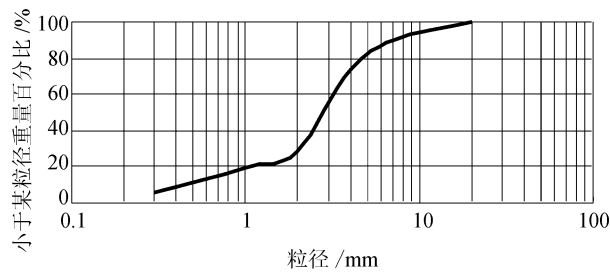


图6 试验用砂级配图

Fig.6 Grain size distribution of the sediment for experiments

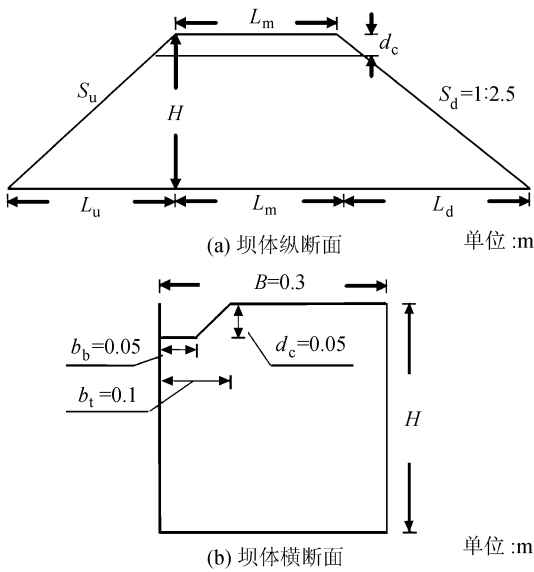


图7 试验坝体尺寸

Fig.7 Dimensions of the experimental dams

表2 典型堰塞坝的几何特征尺寸

Tab.2 Characteristic dimensions of the typical landslide dams

堰塞坝	H/m	L_m/m	S_u	S_d	备注
唐家山	82 ~ 124	约 300	1:2.75 ~ 1:3.08	1:1.19 ~ 1:1.43	坝体顺河长 803 m
老鹰岩	130	240	—	1:1.88	—
小岗剑 70(最高)	20	20	1:2.75	1:1.73	坝体顺河长 300 m
杨家沟	50 ~ 60	160	1:2.75	1:2.75 ~ 1:3.73	—

由于溃决通常从下游坡面开始发展^[1,2-7],试验中上游坝坡对试验结果的影响可以忽略不计,为便于试验布置和观测,可以适当调整模型坝体的上游坝坡 S_u 。另一方面,堰塞坝体是由非黏性的散体碎屑构成,自然堆积下坡面应满足休止条件。天然情况下,一般散体颗粒的休止角在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 左右(棱角分明、可以相互咬合的碎屑物质休止角会更大),且在空气中和水下差别不大^[4],换算成坡比为 $1:1.19 \sim 1:1.73$;为满足休止

条件试验中模型坝体的上游坝坡 S_u 取为 $1:1.5 \sim 1:2$ 。下游坝坡 S_d 取 $1:1.19 \sim 1:3.73$ 的平均,为 $1:2.5$ 。在坝高与坝顶长度比值的取值方面,考虑到坝顶长度的变化可能会对坝体溃决产生影响,试验中选取了6组 H/L_m ,范围为 $0.5 \sim 1.5$ 。虽然比表2所列范围略小,但仍不失代表性。

对于坝体高度,相似准则的推导主要关注的是水沙相互作用的坝体部分。一般的堰塞坝漫顶溃决中坝体也并非完全溃决,而是会因为当时当地的水(来流)、沙(坝体自身)条件残余相当一部分。因此, H 的取值只要保证坝体不会溃至槽底即为合理。图7描绘了试验坝体的几何外形及尺寸。

3.2.3 筑坝

筑坝过程中坝体均匀碾压,每组试验通过控制坝体干密度($\rho_d \approx 1\,610\text{ kg/m}^3$)来保证坝体压实度一致。需要说明是实际堰塞坝坝体结构包括级配及密度分布均较为随机,压实度相关的具体参数难以获得,文中水槽试验采用了概化处理,其目的是保证各试验工况间成果的参照对比性。

坝体完成后,在坝顶靠近观测壁面一侧开挖一条上宽 $b_t = 0.1\text{ m}$,底宽 $b_b = 0.05\text{ m}$,深 $d_c = 0.05\text{ m}$ 的倒梯形导流槽(模拟唐家山、小岗剑堰塞坝的泄流槽,如图7(b))。导流槽的开挖可以引导水流沿边壁附近漫顶溃决。此时可以认为试验模拟的是以边壁为中心对称面的一半坝体的溃决过程(本试验忽略玻璃边壁阻力的影响)。

表3中列出了本试验各工况的参数设置。其中, Q_0 为进口流量, D_{50} 为试验沙样的均值粒径, σ_g 为沙样的几何标准偏差, ρ_s 为颗粒密度, φ_0 为泥沙水下休止角, P_s 为坝体孔隙度, L_m 为顺流向坝顶长度, S_u 、 S_d 分别为上、下游坝坡。

3.3 分析与探讨

限于篇幅溃坝试验的过程及现象分析参见文献[18]。现将试验中溃决洪峰时刻各特征参数与唐家山堰塞湖和小岗剑堰塞湖溃决洪峰时刻各参数合列于表4。

由表4可以看出本试验溃决洪峰时刻 d/D_{50} 为 $11.59 \sim 15.10$,与唐家山堰塞坝和小岗剑堰塞坝溃决洪峰时刻的 $14.72 \sim 15.25$ 非常相近,说明试验中洪峰时刻溃口的冲刷状态与参考的原型堰塞坝在洪峰时刻的冲刷状态基本一致。由此,可以推断由于本试验选取的试验参数之间协调性较好,使得后来因自然演变、不加以人工干预的坝体溃决洪峰过程也与原型堰塞湖较为一致。另一方面,由于本试验

参数的选取是基于推导所得的比尺关系,这也印证了所推导的比尺关系式能够基本真实地反映坝体溃决过程中各物理量之间的相互关系。

表 3 试验工况参数表

Tab.3 Experimental operation arrangements and relevant parameters

工况	$Q_0/(L \cdot s^{-1})$	D_{50}/mm	D_{90}/mm	σ_g	$\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	$\phi_0/(^{\circ})$	P_o	L_m/m	S_u	S_d
1	0.60	2.85	6.7	2.63	2 650	35.6	0.39	0.2	1:1.5	1:2.5
2	0.60	2.85	6.7	2.63	2 650	35.6	0.39	0.3	1:1.5	1:2.5
3	0.60	2.85	6.7	2.63	2 650	35.6	0.39	0.4	1:1.5	1:2.5
4	0.60	2.85	6.7	2.63	2 650	35.6	0.39	0.5	1:1.5	1:2.5
5	0.90	2.85	6.7	2.63	2 650	35.6	0.39	0.6	1:2.0	1:2.5
6	0.98	2.85	6.7	2.63	2 650	35.6	0.39	0.5	1:2.0	1:2.5
7	1.03	2.85	6.7	2.63	2 650	35.6	0.39	0.6	1:2.0	1:2.5

表 4 溃决洪峰时典型堰塞坝和试验坝体各参数对照表
Tab.4 Summary of the parameters from experiments and typical prototypes at the flood peak moment

原型,试验	平均溃槽 宽度/m	过坝流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	河床 D_{90}/mm	$d: D_{90}$
唐家山	140	约 6 500	900	15.25
小岗剑	80	约 3 000	800	14.72
工况 1	0.25	0.006 7	6.7	14.00
工况 2	0.23	0.005 4	6.7	12.80
工况 3	0.22	0.004 5	6.7	11.74
工况 4	0.22	0.004 4	6.7	11.59
工况 5	0.20	0.004 3	6.7	12.19
工况 6	0.19	0.005 7	6.7	15.10
工况 7	0.19	0.004 8	6.7	13.36

注:本试验中由于洪峰流量时刻床面泥沙不分选,所以 D_{90} 仍为 6.7 mm。

由表 4 还应当看到,试验模拟的精度有待提高。究其原因,主要包括 2 个方面:一是,影响坝体溃决过程的因素考虑不足;二是,试验条件的限制。由于坝体溃决快慢、洪峰强弱不仅取决于溃口发展进程中的溃口水流-坝体粗颗粒泥沙相互作用这一主要矛盾,而且还与原始库容、来流情况、坝体结构等因素相关。因此在今后的研究中,这些因素的影响需要逐步加以考虑,使得试验模拟更加完善。此外就试验条件而言,试验设计时还应当保证初始坝前库容尽可能比拟原型;在泥沙级配的选取上使试验能够再现原型泄流槽(溃槽)床面泥沙粗化的现象;再者试验尽量选用较宽的水槽以保证坝体溃槽的横向变形不受边壁限制影响等等。

4 结 论

通过理论分析和水槽试验对堰塞坝漫顶溃决的试验设计开展研究,主要结论如下:

1) 总结并探讨了堰塞坝漫顶溃决条件下溃口发展的一般进程,得出溃口水流-坝体粗颗粒相互作用决定了坝体侵蚀过程。

2) 分析并提出了“流深” d 的概念,推导得出用于确定模型试验比尺的指标 d_0/D_{90} 。

3) 基于所建立的指标,设计并完成了模型试验,通过模型试验与原型堰塞湖溃决过程的对比,初步印证了这一指标的合理性。

参考文献:

[1] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7): 1054-1068.

[2] Ermini L, Casagli N. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(1): 31-47.

[3] Coleman S E, Andrews D P, Webby G. Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments[J]. Journal of Hydraul Engineering, ASCE, 2002, 128(9): 829-838.

[4] Yang F G, Zhou X Q, Liu X N, et al. Experimental study of breach growth processes in sand dams of quake lakes [J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2011, 5(5): 445-459.

[5] Zhang Jing, Cao Shuyou, Yang Fengguang, et al. Experi-

- mental study on outlet and scour of blocked dam[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(5): 191 – 196. [张婧, 曹叔尤, 杨奉广, 等. 堰塞坝泄流冲刷试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(5): 191 – 196.]
- [6] Yue Zhiyuan. Mechanisms on dam break process of natural dams and numerical simulation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. [岳志远. 自然坝体溃决机理与水沙动力学过程——试验与耦合数学模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.]
- [7] Niu Zhipan. Experimental study on cascade dam breach process of landslide dams[D]. Chengdu: Sichuan University, 2012. [牛智攀. 堰塞坝溃决及梯级连锁作用的试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2012.]
- [8] Fread D L. BREACH: An erosion model for earthen dam failures[R]. Silver Springs: National Weather Service, 1988.
- [9] Singh V P, Scarlatos P D. Breach erosion of earthfill dams and flood routing: BEED model[R]. Research Triangle Park: Army Research Office, 1985: 131.
- [10] Powledge G, Ralston D, Miller P, et al. Mechanics of overflow erosion on embankments. Part II: Hydraulic and design considerations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(8): 1056 – 1075.
- [11] Visser P J. Breach growth in sand-dikes[D]. Delft: Delft University of Technology, 1998.
- [12] 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.
- [13] Dupont E, Dewals B J. Experimental and numerical study of the breaching of an embankment dam[C]//Proceeding of 32nd Congress of IAHR Venice. Madrid: IAHR, 2007, 1(178): 1 – 10.
- [14] Li Yun, Wang Xiaogang, Xuan Guoxiang, et al. Similarity criteria of homogeneous embankment failure due to overtopping flow[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(2): 270 – 276. [李云, 王晓刚, 宣国祥, 等. 均质土坝漫顶溃坝模型相似准则研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2010, 25(2): 270 – 276.]
- [15] Ritter A. Die fortpflanzung der wasserwellen[J]. Vereine Deutscher Ingenieure Zeitschrift, 1892, 36(2): 947 – 954.
- [16] Chang D S, Zhang L M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2010, 10(4): 933 – 946.
- [17] Qiao Lu, Yang Xingguo, Zhou Hongwei, et al. Quick identification of risk degree of dammed lake by fuzzy AHP[J]. Yangtze River, 2009, 40(22): 51 – 53. [乔路, 杨兴国, 周宏伟, 等. 模糊层次分析法的堰塞湖危险度判定——以杨家沟堰塞湖危险度综合评价为例[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 51 – 53.]
- [18] Yang Yang, Cao Shuyou. Experimental study on breach growth mechanisms of natural barrier dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012(22): 60 – 67. [杨阳, 曹叔尤. 堰塞坝溃决机理试验研究[J]. 水利学报, 2012(增刊2): 60 – 67.]

(编辑 张 琼)