

DOI: 10.11779/CJGE201710025

堰塞坝泄流槽断面型式离心模型试验研究

赵天龙^{1, 2}, 陈生水^{2, 3}, 付长静^{*1, 2}, 钟启明^{2, 3}, 侯英伟¹

(1. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029;

3. 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: 基于唐家山堰塞坝坝料级配曲线, 针对梯形、三角形和复式断面 3 种泄流槽断面型式, 开展了堰塞坝漫顶溢流离心模型试验研究。分析不同除险断面型式对堰塞坝的泄流过程、总泄流量以及泄流后残留坝体几何尺寸的影响规律, 并从水动力学的角度, 对该泄流过程中泄流槽不同部位的水流特征进行了研究。试验结果表明, 复式断面泄流槽不仅在初期泄流效率高、峰值流量小, 而且残留坝体较低, 总下泄水量最大, 流量过程曲线具有“矮胖型”的特征, 可迅速、最大程度的降低堰塞湖水位, 同时能够有效的减轻因堰塞坝泄流给下游河道造成的防洪压力, 是一种相对安全、高效的堰塞坝除险处置方法。

关键词: 堰塞坝; 离心模型试验; 泄流槽断面型式; 应急除险

中图分类号: TV698; TV13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2017)10 - 1943 - 06

作者简介: 赵天龙(1986 -), 男, 博士, 主要从事土石坝溃坝方面的研究工作。E-mail: Neo_3303@163.com。

Centrifugal model tests on section form of drainage channel of barrier dams

ZHAO Tian-long^{1, 2}, CHEN Sheng-shui^{2, 3}, FU Chang-jing^{1, 2}, ZHONG Qi-ming^{2, 3}, HOU Ying-wei¹

(1. Key Laboratory for Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074,

China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: The centrifugal model tests on barrier dams overtopping are carried out based on the grain composition of Tangjiashan landslide dam, and the influence laws on the discharge process, released water and the size of the residual dam section of the drainage channel with trapezoid, triangle and compound forms are acquired. The characteristics of the flow in different parts of the channel during the discharge process are analyzed from the point of view of water dynamics. The results show that the compound section form has the characteristics of higher initial discharge efficiency, lower peak flow, higher residual dam and larger released water, in which the flow curve is "chunky-type". It can decrease effectively the pressure of flood protection caused by barrier dam discharge and reduce the water level greatly in a shorter time. It is an effective and safe method for the emergency handling of barrier dams.

Key words: barrier dam; centrifugal model test; section form of drainage channel; emergency treatment

0 引言

堰塞坝是在一定的地质地貌条件下, 由于地震、降水等原因引发河道两侧山体发生滑坡、崩塌、泥石流而形成的阻塞河道的堆积体^[1]。堰塞坝由于其特殊的物质组成和结构特征, 极易发生溃决, 并且绝大多数堰塞坝最终都将发生溃决^[2-6]。为了减轻或防范堰塞坝溃坝给下游带来的洪水灾害, 需要对灾区堰塞坝进行风险评估, 并对高危堰塞坝进行及时除险处置^[7]。一般来讲, 堰塞湖在治理方法上常采取工程措施和下游人员转移避险相结合的方法来尽可能消除或降低堰塞坝对下游潜在的次生灾害威胁^[8]。对于库容较大的堰塞湖, 为降低溃坝风险, 一般在堰塞坝顶低凹处开

挖出满足设计过流要求的泄流槽, 达到降低堰塞湖水位, 提前引流、泄流, 降低堰塞坝整体溃决风险, 利用水流自身的冲蚀能力自然扩宽泄流槽, 控制下泄流量, 实现堰塞坝体逐步溃决, 最终达到排除险情的目的。

基于上述要求, 国内在堰塞湖应急排险方法研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709025, 51379129, 51539006); 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2015B09, SLK2016B07); 国家科技支撑计划项目(2015BAK09B01)

收稿日期: 2016 - 08 - 07

***通讯作者** (E-mail: nhri_fuchangjing@163.com)

中主要沿着“通过排泄纵断面和横断面的优化,设计出工程量最小、初期过流和下切能力最大为目标的泄流槽形式”的思路,开展了一系列模型试验^[9],对泄流槽的“最优断面”进行了探索。为优化泄流槽断面型式,提出堰塞湖人工可控的泄流槽设计依据,中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室赵万玉等^[10]、陈晓清等^[11]根据“5·12”汶川地震中诸多堰塞湖,特别是唐家山堰塞湖开挖泄流明渠泄流槽进行排险的启示,通过室内模型试验,研究了几种泄流槽断面型式对溃口发展过程及溃口洪水流量过程的影响。黄河水利科学研究院曹永涛等^[12]以四川某堰塞湖为原型,通过两组 1:50 正态模型试验模拟了堰塞湖的泄流过程,分别分析了水力冲刷形成的溢洪道与机械开挖溢洪道的泄水效果和溃决过程,认为通过水泵抽水在堰塞坝坝顶快速形成一定规模的溢洪道是可行的,并建议机械开挖溢洪道时应布置成 S 形并加以防护,以此来延缓溃决口门的贯通时间。陈晓清等^[13]通过对唐家山堰塞湖、小岗剑堰塞湖等的泄流过程及下游影响分析,初步提出了人工可控排泄的堰塞湖处置方法,建议在堰塞坝坝顶的凹槽部位开挖泄流槽,在泄流中期,对影响下切侵蚀发展的泄流槽中的巨石采取人工爆破或机械清除,在泄流后期,当泄流量达到设定阈值时,向泄流槽中加入人工结构体来稳定沟床并发挥控流作用,以此来控制沟床的快速下切。

近年来国内外学者针对漫顶溃坝问题已开展了大量卓有成效的试验工作,这些宝贵的研究成果为我国堰塞坝应急抢险处置与决策提供了重要的理论依据,但仍有以下问题值得进一步探讨:①国内外学者针对堰塞坝溃决机理与溃坝过程开展的模型试验大多为室内小比尺水槽试验,存在模型比尺小,相似关系不相容,应力水平与原型相差过大等问题,导致试验结果难以正确揭示堰塞坝溃决机理,无法重现堰塞坝真实溃坝过程;②堰塞坝应急除险处置工程措施通常为在坝顶开挖泄流槽来控制溃坝洪水,但迄今为止,泄流槽的底高程、断面形状和结构型式对安全、高效泄流影响如何,尚需深入系统研究。

由于土工离心机通过调整离心加速度,可大幅提高模型的应力水平,使得模型与原型的应力一致或接近,可以较正确地揭示由土石料构筑而成的建/构筑物

的破坏机理与破坏过程,因此本文拟采用土石坝溃坝离心模型试验,研究不同的泄流槽断面型式对堰塞坝泄流过程及除险效果的影响规律。

1 离心模型试验

1.1 试验仪器

模型试验是土石坝溃坝研究的重要手段。试验选用南京水利科学研究院400 g·t大型土工离心机。该机的最大半径为5.5 m,有效半径5.0 m,最大离心加速度200g,有效载重2 t,试验配备的专用模型箱内部有效尺寸为1.2 m×0.4 m×0.8 m(长×宽×高)。对于离心机的工作原理及相似准则的推导方法有相关文献[14~17]进行专门介绍,此处不做赘述。对于N倍离心加速度模型试验,常用物理量的相似比尺如表1。

1.2 物理模型设计与制作

考虑到堰塞坝坝体材料的宽级配特性,在进行试验坝料制备时,参考了唐家山堰塞坝坝体5个钻孔得到的级配曲线^[18],将试验材料最大粒径控制为20 mm,利用唐家山堰塞坝平均级配曲线,采用等量替代的方法,将20 mm以上的超粒径颗粒用0.075~20 mm砂土部分按比例等质量替换,缩尺后得到的模型坝料级配曲线如图1所示。

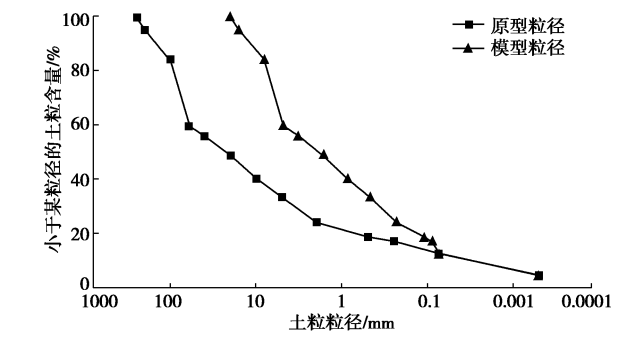


图1 模型坝级配曲线与唐家山堰塞坝平均级配曲线
Fig. 1 Gradation curves of model dam and average gradation of Tangjiashan barrier dam

根据模型坝坝料级配曲线可以得到坝料各粒组含量如表2所示,并对各粒组进行筛分,将各粒组土样按照表2所示含量组成进行称重后洒水搅拌并制作模型,模型坝坝料基本参数如表3。

表1 离心模型试验中常用物理量相似准则

Table 1 Similarity criteria of common physical quantity in centrifugal model tests									
物理量	加速度	长度	面积	体积	正应力	切应力	应变	渗透系数	弗劳德数
相似比	N	$1/N$	$1/N^2$	$1/N^3$	1	1	1	$1/N$	1
物理量	质量	流量	孔隙比	黏度	力	力矩	密度	时间(动力)	时间(渗流)
相似比	$1/N^3$	$1/N^2$	1	1	$1/N^2$	$1/N^3$	1	$1/N$	$1/N^2$

表 2 模型坝坝料各粒组含量
Table 2 Contents of model dam materials

粒组/mm	<0.075	0.075~0.2	0.2~1	1~2	2~5	5~10	10~20
含量/%	13	10	19	10	8	27	13

表 3 模型坝坝料基本参数

Table 3 Parameters of model dam materials

物理指标	值
中值粒径 d_{50}/mm	1.7
限制粒径 d_{60}/mm	4.9
干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.59
孔隙率 n	0.4

考虑到下游坝坡坡角对漫顶溃坝流量过程以及溃口发展有重要影响, 因此在充分利用模型箱内部有效空间的前提下, 模型坝体设计时考虑首先满足堰塞坝下游坝坡坡度小的要求。依据模型箱内部尺寸, 设计下游坝坡坡比为 1 : 3.5, 坝顶宽度 20 cm, 坝高 20 cm, 上游坡比 2 : 1。

由于模型箱下游矩形堰高度与设计坝高相仿, 为了防止试验过程中下游尾水深度过大, 被水流带走的坝体土石材料不能及时的排出模型箱外, 造成下游淤积进而影响下游坝坡及溃口的持续发展, 考虑对模型箱底部垫高 15 cm, 仅在坝体下游留 5 cm 尾水深度用于堰流计算。模型坝按照干密度 1.59 g/cm³ 分层填筑, 溃坝供水管道直通坝体上游底部, 为了防止供水水流对坝体上游坝坡造成直接冲刷, 管道出水口用纱布进行包裹。模型箱内部整体布置情况如图 2 所示。

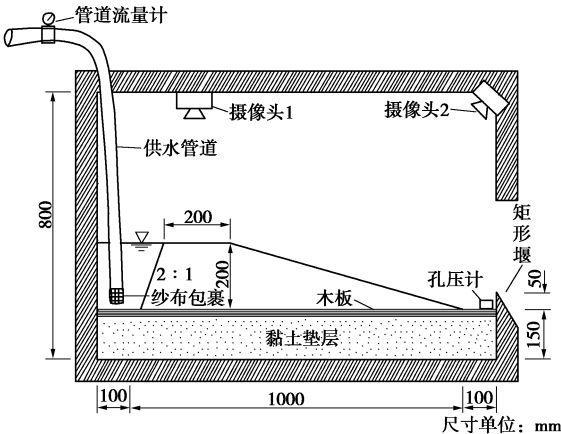


图 2 模型箱内部整体布置

Fig. 2 Overall layout inside test box

1.3 初始泄流槽的设置

开展堰塞坝除险处置方法离心模型试验, 利用土石坝溃坝离心模型试验系统, 分别进行梯形、三角形以及复式断面(具体尺寸参见图 3)泄流槽泄流过程试验, 3 种泄流槽具有相同的断面面积, 即 3 种泄流槽开挖工程量相同, 在此前提下重点比较分析不同除

险泄流槽断面型式对溃坝洪水流量过程及溃口发展影响规律, 提出安全、高效的堰塞坝除险处置方法。

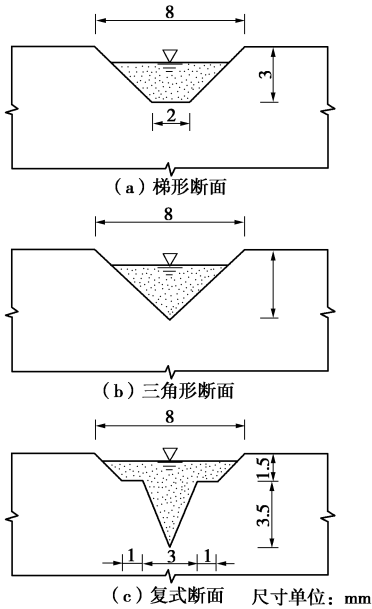


图 3 不同除险泄流槽断面型式

Fig. 3 Different section forms of drainage channel

模型制作时, 当坝体填筑结束后, 分别按照图 3 所示尺寸要求在坝顶中部开挖凹槽作为初始溃口, 在 30g 离心加速度条件下开展堰塞坝漫顶溃坝试验, 3 种槽型初始溃口如图 4 所示。



(a) 梯形断面泄流槽



(b) 三角形断面泄流槽



(c) 复式断面泄流槽

图4 3种断面型式的初始溃口

Fig. 4 Initial breach of three section forms

2 试验结果及分析

2.1 泄流槽断面型式对泄流过程的影响

本次试验的溃口流量过程是根据堰前水头计算获得的,而堰前水头是利用模型箱下游预设的孔压计监测得到的。量水堰是常重力试验中流量测量的常用装置,但在离心模型试验中的适用性鲜有文献进行相关介绍。中国水利水电科学研究院王秋生^[19]曾利用设有三角堰的模型箱进行溃坝离心模型试验研究,但由于箱中水位较接近模型箱顶部,并且模型箱并未加盖,试验过程中箱内水面受风场影响严重,水面波动较大,因此王秋生认为流量测量存在一定的误差。本次试验下游水位较低,受模型箱上部遮挡,试验过程中受离心机室风场影响较小,并且试验得到的堰前水头换算为原型尺寸大致为0.3~0.4 m,符合堰槽测流规范^[20]规定的矩形堰适用范围 $h>0.03$ m,因此认为本次试验所得结果较为可靠。

根据3种断面型式泄流槽的漫顶溃坝离心试验测得数据,可分别计算得到各工况下溃口流量过程曲线如图5,图中溃坝历时为模型坝前蓄水开始后计时,溃坝历时及溃口流量均按照离心加速度换算为常重力条件下对应数值进行分析。从图5中可以看出,泄流开始阶段,3种泄流槽对应的溃口流量较小,维持在 $1.5\text{ m}^3/\text{s}$ 左右。当泄流开始0.50 h后,复式泄流槽溃

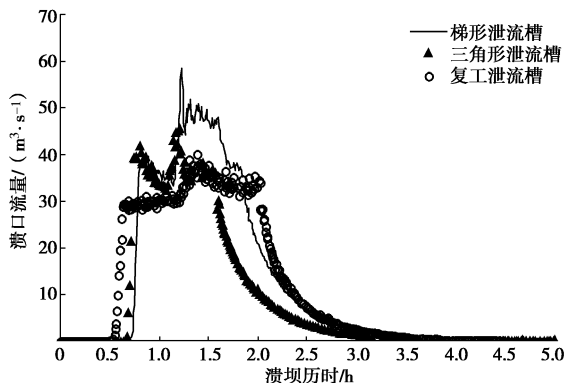


图5 不同断面型式的溃口流量过程

Fig. 5 Flow curves of different section forms of drainage channel

口流量出现陡增,增速为 $0.076\text{ m}^3/\text{s}^2$,泄流开始0.62 h后,复式槽溃口流量增速变缓。泄流0.65 h后,三角形槽的溃口流量开始快速增长,增速在 $0.20\text{ m}^3/\text{s}^2$,从图中可以看出此阶段增速较复式槽快。与此同时,梯形槽堰塞坝溃口流量也开始明显增加,不过与复式槽和三角形槽不同的是,梯形槽在开始的0.50 h内流量增速并不快,大致为 $0.0063\text{ m}^3/\text{s}^2$,随后流量开始逐渐增大,增速与三角形槽相当。分析原因是由于梯形槽、三角形槽和复式槽三种槽型底高程依次降低,因此复式槽和三角形槽流量增长开始时刻较早,而梯形槽流量增速缓慢。当泄流1.19 h后,三角形泄流槽出现流量峰值 $45.7\text{ m}^3/\text{s}$;梯形泄流槽峰现时间为泄流开始后的1.21 h,流量峰值为 $58.6\text{ m}^3/\text{s}$;复式泄流槽流量出现峰值时间最晚,为泄流后1.38 h,对应的峰值流量为 $40.1\text{ m}^3/\text{s}$ 。梯形、三角形及复式泄流槽所对应坝坡出现粗化,流量开始下降的时刻分别1.8, 1.6, 2.0 h。

综合考虑3种断面泄流槽的流量过程及总泄流量可以看出,复式泄流槽能够实现在较小的流量峰值条件下达到较大的总泄流量,流量过程曲线也体现出“矮胖型”的特点。与其他两种断面型式的泄流槽相比,复式断面泄流槽的泄流过程更加的安全、快速。

2.2 泄流槽断面型式对溃后残留溃口的影响

图6为3种断面泄流槽进行漫顶溢流溃坝试验后的残留溃口。需要说明的是,3种工况下溃口均在坝顶中部开槽,但漫顶溃坝过程中溃口右侧冲蚀强度明显高,造成溃坝结束后残留溃口靠近右侧坝肩。分析原因,是由于模型箱在吊篮中的放置方式使得坝体下游位于近心端,吊篮沿顺时针方向旋转时,对模型产



(a) 梯形断面泄流槽



(b) 三角形断面泄流槽



(c) 复式断面泄流槽

图 6 3 种断面型式泄流槽的溃后残留溃口

Fig. 6 Breach remaining of three section forms of drainage channel

生了一个方向指向坝左的较小的加速度导致。但由于加速度值较小，对试验结果的准确性不会造成明显影响。从图 6 中可以看出堰塞坝漫顶溃坝结束后，溃口呈现上宽下窄的“倒梯形”，3 种工况所对应的残留溃口具体尺寸见表 4。

表 4 3 种断面型式泄流槽残留溃口尺寸

Table 4 Sizes of breach remaining of three section types of discharge channel

断面形式	溃口顶宽/m	溃口底宽/m	溃口深度/m
梯形	9.3	8.1	1.6
三角形	7.5	4.8	2.4
复式	6.3	2.4	2.7

2.3 不同泄流槽断面形式残留溃口的水动力学分析

3 种泄流槽泄流开始阶段具有相同的溃口顶宽 2.4 m，由表 4 可以看出，溃坝结束后 3 种泄流槽宽度由大到小依次为：梯形、三角形以及复式断面。从明渠水动力学的角度来分析，对于矩形断面河道，渠道底部与两侧的流速基本相当，而水流的流速直接影响其土石冲刷能力，因此在初始泄流阶段，梯形泄流槽的横向展宽与下切速度较为一致，但是由于泄流槽底部边界流速相对较小，因此溃口下切能力相对较弱，最终残留溃口深度浅，而顶部和底部宽度则相对较大。对于三角形断面，渠道两侧流速较小，底部流速则明显大于两侧流速，因此渠道下部的冲刷强度远远大于两侧，此种断面形式下切速度更快，溃坝结束之后溃口宽度与梯形断面相比要小，而冲刷深度要大于梯形断面。复式泄流槽断面的流速分布与三角形槽比较类似，但复式断面底部流速更大，侧面边界流速与三角形槽相比更小，因此复式断面泄流槽溃口下切能力最强，溃坝结束后溃口残留深度最大，残留宽度在三种槽型中最小。

从土体冲刷规律角度进行分析，三角形与复式断面泄流槽的下部均为三角形，在相同的过流深度情况

下，三角形断面与复式断面具有较小的水土作用面积，增大了漫坝水流的冲刷强度，造成这两种工况下溃口的快速下切，因此这两种槽型均能够达到快速降低坝前库水的目的，但三角形泄流槽下切及展宽速度均较快，形成了较大的水头差，因此与复式槽相比，三角形泄流槽具有较大的流量峰值，不利于安全泄流。复式断面泄流槽开始阶段下切速度较快，有利于提高泄流初期的泄流效率，快速降低坝前库水位，而复式断面上部的梯形槽对于阻止溃口横向扩展速度过快作用明显，因此复式断面泄流槽在快速下切的同时对横向扩展速度进行限制，可以有效的降低溃口的流量峰值，在溃坝结束后具有较小的残留宽度以及较大的下切深度。

3 结 语

堰塞坝泄流槽的断面型式对其泄流过程和总下泄水量具有明显影响。本文基于唐家山堰塞坝坝料级配曲线，利用土石坝溃坝离心模型试验技术与分析方法，开展堰塞坝水流漫顶溃坝离心模型试验，研究了梯形、三角形和复式断面 3 种泄流槽断面形式对堰塞坝溃坝和泄流过程的影响。试验结果表明，复式泄流槽能够实现在较小的流量峰值条件下达到较大的总泄流量，流量过程曲线体现出明显的“矮胖型”的特点，实际工程中采用复式断面泄流槽进行堰塞坝紧急泄流除险，不仅能够提高泄流初期的泄流效率，而且能够明显降低泄流流量峰值，减小泄流给下游河道造成的防洪压力，同时复式断面所具有的较大的总下泄水量能够迅速、最大程度的降低坝前库水位，从而降低堰塞坝溃决风险，是一种相对高效、安全的堰塞坝应急除险方法。

参考文献:

[1] 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))

[2] 匡尚富. 天然坝溃决的泥石流形成机理及其数学模型[J]. 泥沙研究, 1993(4): 42 - 57. (KUANG Shang-fu. Formation mechanisms and prediction models of debris flow due to natural dam failures[J]. Journal of Sediment Research, 1993(4): 42 - 57. (in Chinese))

[3] 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))
- [4] SCHUSTER R L, COSTA J E. A perspective on landslide dams[C]// Landslide Dams: Processes, Risk, and Mitigation. Seattle, 1986.
- [5] MIZUYAMA T, TABATA S, MORI T, 等. 堰塞坝溃决及防范[J]. 水利水电技术, 2008, **39**(7): 97 - 99. (MIZUYAMA T, TABATA S, MORI T, et al. The dam break and prevention of barrier dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, **39**(7): 97 - 99. (in Chinese))
- [6] WAN Chi-fai, FELL R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(4): 373 - 380.
- [7] 王光谦, 傅旭东, 李铁建, 等. 汶川地震灾区堰塞湖应急处置中的计算分析[J]. 中国水土保持科学, 2008, **6**(5): 1 - 6. (WANG Guang-qian, FU Xu-dong, LI Tie-jian, et al. Analysis for emergency treatment of quake lakes in Wenchuan earthquake-hit regions[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, **6**(5): 1 - 6. (in Chinese))
- [8] 梁 军. 地震堰塞湖的形成及其治理方法[M]// 宋胜武. 汶川大地震工程震害调查分析与研究, 2009: 1056 - 1061. (LI Jun. Formation and its treatment method of quake lake[M]// SONG Shen-wu. Investigation and Analysis of Seismic Damage in Wenchuan Earthquake Engineering, 2009: 1056 - 1061. (in Chinese))
- [9] LIU N, CHEN Z, ZHANG J, et al. Draining the tangjiashan barrier lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **136**(11): 914 - 923.
- [10] 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): 29 - 37. (ZHAO Wan-yu, CHEN Xiao-qing, GAO Quan, et al. Experimental study of dam-break of earthquake barrierlake with different cross sections of drainage channel[J]. Journal of Sediment Research, 2011(4): 29 - 37. (in Chinese))
- [11] 陈晓清, 崔 鹏, 赵万玉, 等. “5·12”汶川地震堰塞湖应急处置措施的讨论——以唐家山堰塞湖为例[J]. 山地学报, 2010, **28**(3): 350 - 357. (CHEN Xiao-qing, CUI Peng, ZHAO Wan-yu, et al. A discussion of emergency treatment of dammed lake caused by “5·12” Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2010, **28**(3): 350 - 357. (in Chinese))
- [12] 曹永涛, 高 航, 夏修杰. 堰塞湖坝体处理及溃决模拟试验研究[J]. 人民黄河, 2010(12): 205 - 206. (CAO Yong-tao, GAO Hang, XIA Xiu-jie, et al. Experimental study on treatment and dam break simulation of landslide dam[J]. Yellow River, 2010(12): 205 - 206. (in Chinese))
- [13] 陈晓清, 崔 鹏, 游 勇, 等. 一种人工调控排泄流量的堰塞湖处置方法及其应用: 中国, 200910216148.8[P]. 2010-06-02. (CHEN Xiao-qing, CUI Peng, YOU Yong, et al. A lake disposal method of artificial regulation of discharge and its application: China, 200910216148.8[P]. 2010-06-02. (in Chinese))
- [14] 李忠生. 地震作用下滑坡稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2001. (LI Zhong-sheng. Study on the stability of landslide under the earthquake[D]. Xi'an: Chang'an University, 2001. (in Chinese))
- [15] 吴庆洲, 吴运江. 历史上四川地震堰塞湖水灾特点及减灾对策[J]. 新建筑, 2008(4): 112 - 114. (WU Qing-zhou, WU Yun-jiang. The characteristics of flood disasters and countermeasures of disaster reduction on historic barrier lakes in Sichuan[J]. New Architecture, 2008(4): 112 - 114. (in Chinese))
- [16] 匡尚富, 汪小刚, 黄金池, 等. 堰塞湖溃坝风险及其影响分析评估[J]. 中国水利, 2008: 17 - 21. (KUANG Shang-fu, WANG Xiao-gang, HUANG Jin-chi, et al. Risk analysis and impact assessment of dam -break in barrier lake[J]. China Water Resources, 2008: 17 - 21. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] 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))
- [19] 王秋生. 土石坝溃坝问题的离心模型试验研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2010. (WANG Qiu-sheng. Centrifuge model test on the dam break problem of earth rock dam[R]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [20] SL 24—91 堰槽测流规范[S]. 1992. (SL 24—91 Weir trough current specification[S]. 1992. (in Chinese))