

# 茂县宗渠堰塞湖漫顶溃决洪水演进规律模型试验研究

胡桂胜<sup>1,2,3</sup>, 陈宁生<sup>1,2</sup>, 邓明枫<sup>1,2,3</sup>, 邓虎<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;  
3. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 4. 成都理工大学, 成都 610059)

**摘要:** 5·12 汶川大地震诱发了大量堰塞湖, 这些堰塞湖一旦溃决, 溃决洪水将对下游居民的生命财产造成很大的威胁, 因此研究堰塞湖溃决洪水沿程水位变化规律对决策部门发布洪水预警, 组织撤离与逃生, 实施紧急救援等具有十分重要的意义。该文选取四川省茂县宗渠堰塞湖为原型进行野外模型试验, 通过在堰塞湖库区及其下游建立一套高清晰 DV 摄影为主, 辅以下游水位定点标记的模型试验方法, 研究了堰塞湖库区水位变化过程, 通过对时间差分推导出堰塞湖水量平衡方程, 进一步得到溃口流量随时间变化规律; 研究了下游水位变化过程揭示出堰塞湖漫顶溃决洪水的演进规律。溃口发展过程在纵向上主要以陡坎前进的方式推进, 而横向上主要由土体坍塌失稳引起。此结果也可为今后堰塞湖的应急排险, 溃决洪水的深入研究等具有参考价值。

**关键词:** 宗渠堰塞湖; 漫顶溃决; 洪水演进; 模型试验

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)03-0172-05

## Model Experiment Study of Evolution of Overtopping Outburst Flood for Zongqu Landslide Lake in Mao County

HU Gui-sheng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Ning-sheng<sup>1,2</sup>, DENG Ming-feng<sup>1,2,3</sup>, DENG Hu<sup>4</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Mountain

Hazards and Surface Process, CAS, Chengdu 610041, China; 4. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Large numbers of landslide lake are induced by the 5·12 Wenchuan earthquake. The outburst flood will be great threat to the lives and poverty downstream if these dammed lakes breach. Research for the variable rule of outburst flood has great significance in dealing with releasing the warning and organizing the evacuation to decision-making departments. We do some model experiments to select the Zongqu dammed lake of Maoxian county as prototype model. We studied the variable rule of water level and revealed the variable rule of outburst flood by using high-definition photography cooperated with positioning a group of water-marks on reservoir area and downstream of landslide lake. We obtained the rule that the burst flow changes with time through uilibrium equation. During these processes, the breach in the longitudinal way develops in the means of heatcut erosion, while in the cross way through soil mass collapse. This result can be used as guidance for emergency risk-elimination of the dammed lake and the study of outburst flood.

**Key words:** Zongqu landslide dam; overtopping burst; evolution of flood; model experiment

由于滑坡、地震、泥石流或火山熔岩等因素导致河道阻塞进而形成的湖泊称为堰塞湖<sup>[1]</sup>。5·12 汶川大地震诱发了大量的堰塞湖, 根据四川水利抗震救灾指挥部的汇总, 截至 2008 年 5 月 19 日, 共发现坝高 10 m 以上的堰塞湖 33 个<sup>[2]</sup>。堰塞湖对人类的最大威胁, 主要来自堰塞湖坝体突然溃决导致堰塞湖中

大量蓄水快速下泄而引发的洪水灾害<sup>[3]</sup>, 如 1933 年 8 月 25 日四川叠溪 7.5 级地震导致岷江叠溪段形成 3 处堰塞湖(大海子、小海子、叠溪海子), 使岷江断流 43 d, 江水回水长度达 20 余公里<sup>[4]</sup>。10 月 9 日(地震后 45 d)晚上 7 点发生第一次溃堤, 溃决洪峰流量达 10 500 m<sup>3</sup>/s, 最大水头高度达 70 m, 溃决洪峰到达下

游 150 km 的都江堰市,这次溃决洪水造成 12 500 人死亡,大量建筑被毁,财产损失巨大<sup>[5]</sup>。之后,在 1936 年 8 月 21 日、1986 年 6 月 15 日、1992 年 6 月 28 日又发生了三次溃坝,每次溃决都给下游人民带来了不同程度的祸害。据不完全统计,堰塞湖溃决洪水造成近万人员伤亡,次生灾害超过地震本身<sup>[6]</sup>。因此,在对堰塞湖安全处置、下游居民安全转移等决策过程中,科学预测堰塞湖溃坝风险及其洪水影响是关键<sup>[3]</sup>。

目前专门针对堰塞坝开展的溃坝研究还比较少见,大多是与人工土石坝的溃坝、水利工程土坝溃坝研究相结合,或借用人工土石坝溃坝模拟的研究成果。国内外学者对灾难性溃坝洪水做了大量的试验研究<sup>[7-10]</sup>,对洪水的演变进行了一系列的模型试验,有的研究者还进行了野外试验,前人的这些工作使溃坝洪水的研究有了很大进步<sup>[11]</sup>。Costa 等人统计了 73 处堰塞湖的溃决,发现溃决的主要方式为溢流,而管涌和边坡失稳引起的溃决只占很小比重<sup>[12]</sup>。许强等人统计了汶川地震后有一定规模和代表性的 32 处溃决堰塞湖,发现 84.4% 的堰塞湖溃决属于漫顶溃决<sup>[13]</sup>。但目前国内外针对地震堰塞湖漫顶溃决(漫顶可分为溢流漫顶和涌浪漫顶<sup>[14]</sup>)洪水演进的研究相对比较缺乏,本文选取四川省茂县宗渠沟堰塞湖为原型,通过野外模型试验模拟宗渠堰塞湖漫顶溃决过程,来揭示堰塞湖漫顶溃决洪水的演进规律,为今后更好地进行堰塞湖排险、溃决洪水的深入研究奠定良好的基础。

1 宗渠堰塞湖概况

宗渠堰塞湖位于宗渠沟两河口下游约 0.5 km 处。宗渠沟系岷江中游左岸的一级小支流,发源于龙门山中段九顶山。宗渠沟流域位于茂县石鼓乡境内,流域地理坐标为东经 103°48′17″-103°53′52″,北纬 31°33′31″-31°38′39″。流域形状呈扇形,河流走向大致东南流向西北。流域面积 34.5 km<sup>2</sup>,主沟长 10.7 km,河道平均比降 16.7%。在 5·12 汶川地震作用下,宗渠沟中游左岸的龙头包峰发生崩塌,总崩塌方量约为 150 万 m<sup>3</sup>,其中 120 万 m<sup>3</sup> 冲入宗渠沟内,形成一个高 60~80 m,宽 100 m,顺沟长度近 350 m 的堰塞坝,堵断宗渠沟正常水流,形成一个 35 m 最大水深,25 万 m<sup>3</sup> 库容的堰塞湖,堰塞体主要为崩塌堆积物,岩性为泥盆系层坚硬-半坚硬工程地质岩组,灰色厚层结晶灰岩与薄层石英千枚岩板岩,粗颗粒较多,块径一般 30~100 cm,最大粒径达 700 cm 以上。2009 年 3 月 21 日,由于茂县气温急剧升高,

堰塞体的左岸龙头包的前期积雪及九顶山脉积雪融化,龙头包坡面松散固体物质启动产生泥石流,部分泥石流进入湖体淤塞库区,同时主沟大量冰雪融水进入堰塞湖,该堰塞湖历时 310 d,于 2009 年 3 月 21 日发生漫顶溃决。

2 模型试验设计

2.1 模型试验原型选取

本文模型试验选取四川省茂县宗渠沟堰塞湖为原型,地点选为茂县宗渠沟堰塞湖下游约 1 km 处,如图 1 所示。宗渠堰塞湖是 5·12 汶川地震诱发的堰塞湖之一,而且是汶川地震后为数不多的没有经过应急处理的已溃堰塞湖,所以选取宗渠堰塞湖为模型试验原型具有一定的代表性。笔者曾先后三次到达过宗渠堰塞湖现场,获得了比较全面的基础资料,为模型试验的顺利进行奠定了良好的基础。

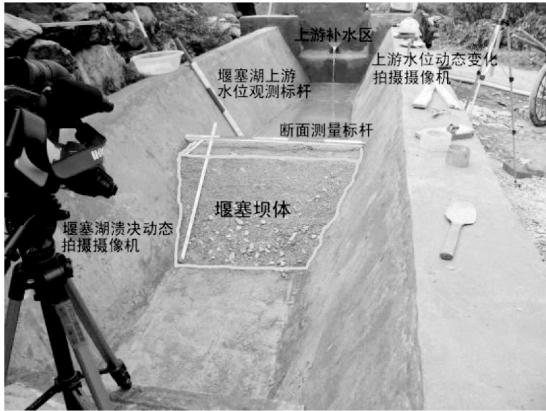


图 1 模型试验现场示意图

2.2 模型布置

整个模型试验区由三部分组成:供水和补水系统;坝体、库区模拟段;下游河道。模型试验布置图见图 2~3。

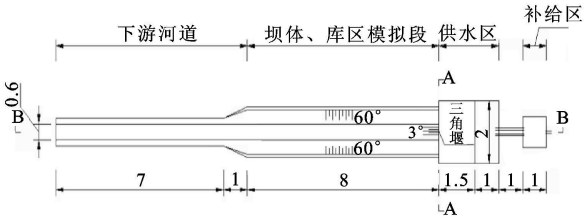


图 2 试验模型槽俯视图(单位: m)

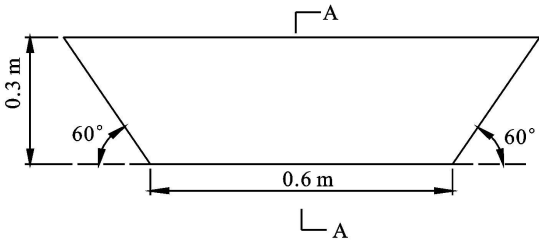


图 3 试验槽横断面图

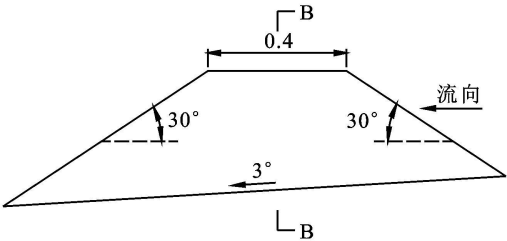


图 4 试验堰塞体纵剖面图

2.3 模型参数

笔者通过对四川省安县肖家桥堰塞湖、罐滩堰塞湖、茂县宗渠沟堰塞湖的现场调查，确定堰塞体的主要特征值，并参考以往的经验<sup>[15]</sup>，同时考虑试验场地的限制，确定模型参数见表 1，试验堰塞体纵剖面见表 1，图 4。

试验前通过颗分试验得到宗渠堰塞湖坝体的颗

粒级配，然后将大于 5 mm 的颗粒按 100：1 进行缩放后进行等质量替换，小于 5 mm 的颗粒保持原级配不变。等量代替后的级配仍保持原来的粗粒含量，细料含量和性质不变。试验用料为 2009 年 3 月 21 日宗渠堰塞湖溃决后冲刷到下游的堆积体。将堆积体进行人工筛分后按试验设计的颗粒级配配样。最终采用的颗粒级配见图 5。

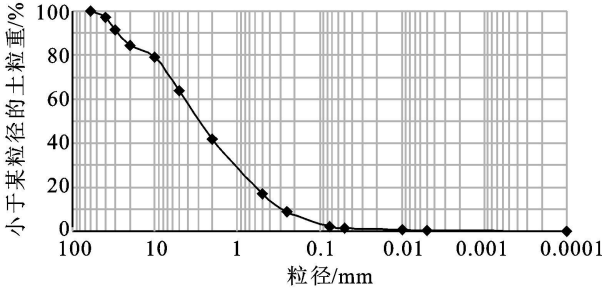


图 5 试验用料颗粒级配曲线

表 1 模型设计参数

坝高/ cm	坝顶宽/ cm	上下 坡角	断面 形状	沿槽坡度/ (°)	坝底宽/ cm	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	模型 比例	上游来水/ (cm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
30	40	30°	梯形	3	60	1.6	100: 1	448

3 试验过程与结果分析

3.1 试验过程

试验过程中，堰塞体溃口处通过 DV 摄像进行试验观测和进行溃口断面与流速测量，坝体下游 1~ 10 m 通过标记记录水位最大值(图 6)，坝体下游 10 m 处通过 DV 摄像记录水位随时间变化(图 7)。试验布

置完成后启动上游进水阀门，保持堰上水头 4 cm，按照直角三角堰流量计算公式<sup>[16]</sup>

$$Q = C_0 H^{5/2} \tag{1}$$

式中： $C_0$ ——直角三角堰的流量系数，一般取值为 1.4； $H$ ——堰上水头，对应的流量为 448 cm<sup>3</sup>/s。当水位逐渐上升到坝顶高程以上后，发生漫顶溃决破坏。

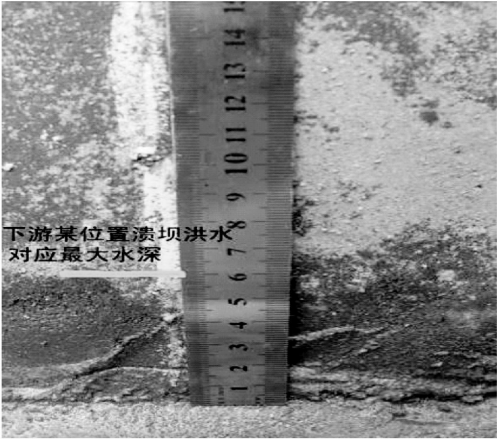


图 6 溃坝后下游某处最大水位图

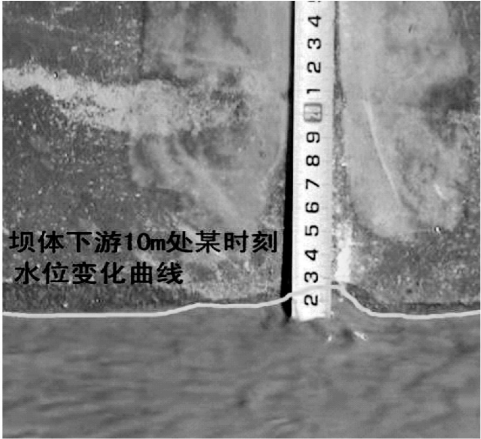


图 7 溃坝过程中下游 10 m 处水位变化

3.2 试验结果与分析

试验后整理溃决洪水最大水深观测值、下游 10 m 处水深随时间变化的 DV 摄影资料，从而得到溃决洪水最大水深随距离的变化关系(图 8)、下游 10 m 处水深随时间变化关系(图 9)、用 DV 记录整个过程中库区水位变化，通过对时间差分推导出堰塞湖水量

平衡方程：

$$\Delta V / \Delta t = Q_1 - Q_2 \tag{2}$$

式中： $V$ ——堰塞湖的蓄水量； $\Delta t$ ——考虑的时间段； $Q_1$ —— $\Delta t$  时间内堰塞湖的出库水量； $Q_2$ —— $\Delta t$  时间内堰塞湖的入库水量。得到溃决流量随时间变化关系如图 10 所示。

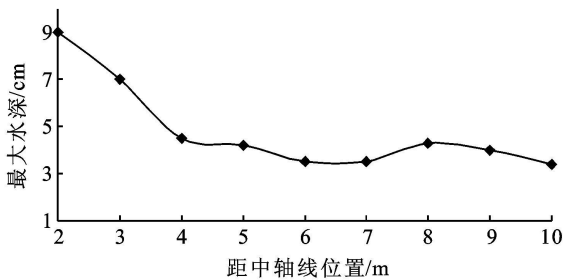


图 8 溃决洪水最大水深随距离变化曲线

由图 8 可见,下游 2~10 m 处溃决洪水最大水深随下游距离的增大呈波动变化,坝体中轴线下游起始 2 m 处最大水深值最大,而且总体上呈现较明显的下降趋势。笔者于 2009 年 11 月 7 日在当地村民唐树斌的陪同下对茂县宗渠沟堰塞湖溃决洪水演进过程进行实地调查,从堰塞湖溃口( $N31^{\circ}37'16.5''$ ,  $E103^{\circ}50'05.9''$ )出发,沿着溃决洪水下游 1 km 进行溃决洪

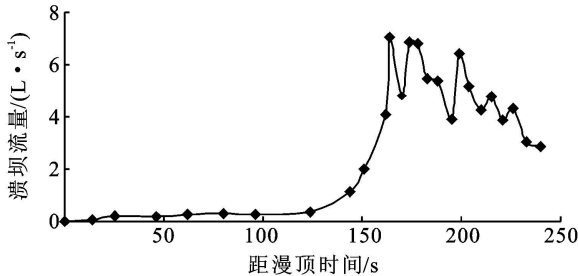


图 10 溃决流量随时间变化曲线

溃决流量是溃决过程中的一个重要参数,决定着下游的危险区范围,是堰塞湖漫顶溃决研究中的一个重要内容。按照库区水量平衡方程推导出不同时刻溃决洪水流量计算公式:

$$Q = \frac{(h_1 - h_2)(A_1 + A_2)}{2(t_2 - t_1)} + q \quad (3)$$

式中:  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  ——对应  $t_1$ ,  $t_2$  时刻库区水位与水面面积;  $q$  ——上游来水量。

根据库区水位视频录像,以坝顶过流为起点,对过流时间进行差分,读取某一时刻的标尺刻度,并换算得到库区水位。根据试验槽的几何规格确定对应水位时的水面面积。根据式(3)计算得到溃坝流量(图 10)。由于湖区标尺处水位在溃决过程中有波动现象,造成流量计算中水位取值存在误差,流量计算结果出现不规则突变,但溃决流量的总体趋势不会受到较大的影响。结合溃口发展与溃决流量过程,将溃决过程分为缓慢侵蚀和快速侵蚀两个阶段,二者以溃口发展到上游坡面为界。缓慢侵蚀段一般形成多个陡坎,陡坎分层分布,分层侵蚀。由于坝体挡住了所有库区水体,库区水量不变,仅有上游来水侵蚀溃口,水流作用水头低,流量小(图 10),陡坎发展缓慢;溃口发展到上游坡面之后,残余陡坎变成一个三角体,

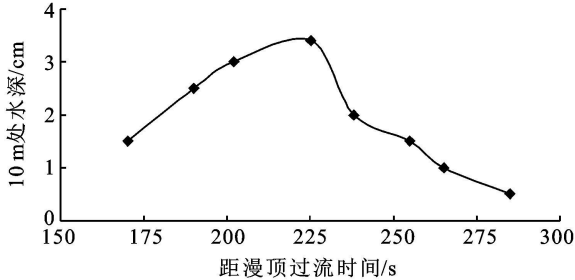


图 9 溃决过程中 10 m 处水深随时间变化曲线

水水位调查,其沿程最大水位变化见图 11。从图 11 中可以发现其最大水深变化趋势与模型试验所得到最大水深随距离变化的关系曲线较为接近。

由图 9 可见,溃决洪水水位在某处的变化呈现先增大后减小的规律,在溃决过程中某一时刻到达最大值(模型试验中这一时刻为漫顶过流后 225 s),这主要是由于溃坝流量先增大后减小。

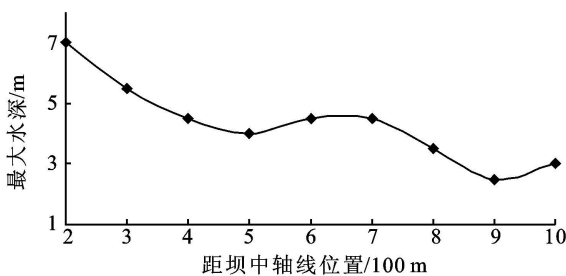


图 11 实地调查堰塞湖溃决洪水水位变化曲线

抗侵蚀能力变弱,陡坎高程加速下降,库区水体参与到溃口的侵蚀过程,作用水头(等于陡坎降低高度加上原坝上水头)增大,流量迅速增加,侵蚀速度明显加快。溃决完成后,坝体进入稳定常态化过程,在这个阶段内,坝体溃口与过坝流量保持不变。

从图 10 可以发现,过坝流量首先随着漫顶时间的增加逐渐增大;当漫顶时间达到一定值时(模型试验中这一值为距漫顶过流 124 s),过坝流量急剧上升继而到达最大值;当过坝流量达到最大值之后,流量随着漫顶时间的增加出现波动但总体趋势是减小。这是由于土体的冲刷破坏是水流运动时产生的剪应力超过土体的抗剪强度所造成的。由于堰塞体的颗粒大小不一,分布不均,各处的抗剪强度存在较大差异。细小颗粒间接触面小,抗剪强度低,最先发生剪切破坏,破坏后,小颗粒即被水流搬运;大颗粒与其他颗粒的接触面积大,抗剪强度较高,不易发生剪切破坏,它们只有在与之接触的小颗粒完全被搬运后才会发生运动。由此可见,土体强度的差异使水流表现出差异性侵蚀(即水流在大小颗粒接触面表现出不同的侵蚀能力),并使溃坝流量随时间呈现出波动特征。根据图 10 得到的溃决流量随时间的变化关系建议在堰塞湖排险过程中,排导槽应选择在巨石块比较集中

的部位或者固结程度更高的部位。由于大石块可视作局部的土体固结, 所以大石块集中的部位不易被水流侵蚀。实际操作中可运用地质雷达等手段得到土体密度更高或含更多大石块的部位, 从而设计出更加有效的排导槽, 更好地进行堰塞湖的人工排险。

## 4 结语

堰塞坝溃决过程与溃决流量变化是非常复杂的, 涉及到水文学、水力学、泥沙运动力学、河床演变学、土力学等多门学科。本试验针对地震堰塞湖漫顶溃决情况进行研究, 描述了溃坝洪水演进过程, 分析溃口发展过程及其溃口流量随时间的变化规律。

坝体漫顶溃决是水流与坝体相互作用的结果, 而漫顶情况下水流的主要作用区域在溃口, 因此, 溃口发展过程的实质是坝体漫顶溃决的过程。水流运动过程中侵蚀沟道形成陡坎, 水流在陡坎处形成跌水, 在陡坎底部出现旋流, 水流旋流产生较大的剪应力, 剪应力不断侵蚀陡坎, 使陡坎不断向前推进。陡坎向前推进后, 两岸形成陡立的临空面, 由于土体疏松, 强度较低, 加上土体饱和后, 滑动力增大, 强度降低, 两岸土体在重力作用下发生坍塌破坏, 小规模坍塌发生后, 坍塌土体中的细颗粒随即被水流冲刷, 粗大颗粒沉积在溃口表层; 而大规模坍塌发生后则有可能堵塞溃口, 阻止堰塞湖的进一步溃决。由此可见, 溃口在纵向上的发展主要以陡坎前进的方式推进, 而横向上主要由土体坍塌失稳引起。本模型试验较好地模拟了地震堰塞湖漫顶溃决洪水演进过程, 及其溃坝流量过程, 为今后类似研究和应急排险奠定了基础, 但由于堰塞坝体下游河道参数较为缺乏, 本试验未能进行模拟, 模拟结果准确性有待进一步提高, 其规律有待更深入的揭示, 这也是下一步的研究重点。

### 参考文献:

- [1] 牛志攀, 许唯临, 张建, 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.
- [2] 陈晓清, 崔鹏, 程尊兰, 等. 5·12汶川地震堰塞湖危险性应急评估[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 244-249.
- [3] 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]. 中国水利特别关注, 2008(16): 17-21.
- [4] 四川省地震局. 1933年叠溪地震[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1983.
- [5] Cheng Genwei, Wang Xiaodan, He Xiubin, et al. Outburst risk of barrier lakes in Sichuan, China[J]. Journal of Mountains Science, 2008(5): 189-193.
- [6] 程根伟, 范继辉, 程尊兰. 四川 5·12 地震灾区滑坡堰塞坝溃决灾害风险评估[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2008, 34(6): 1086-1090.
- [7] Soares-Feaz A O S, Grelle N L E, Spinewine S, et al. Dam-break induced morphological changes in a channel with uniform sediments: measurements by a laser-sheet imaging technique[J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(Extra Issue): 87-95.
- [8] Broich K. Computergestützte analyse des dammerosionsbruchs (computational analysis of the breaching of dams) [D]. Germany Munich: Munich University, 1997.
- [9] Brooks G R, Lawrence D E. The drainage of the lake Ha! Ha! Reservoir and downstream geomorphic impacts along Ha! Ha! River, Saguenay Area, Quebec, Canada[J]. Geomorphology, 1999, 28(1/2): 14-168.
- [10] Spinewine B, Zech Y. Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds[J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(Extra Issue): 73-86.
- [11] Morris M W, Hassan M A A M, Vaskinn K A. Breach formation: Field test and laboratory experiments[J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(Extra Issue): 9-17.
- [12] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100: 1054-1068.
- [13] Xu Qiang, Fan Xuan-mei, Huang Run-qiu, et al. Landslide dams triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, southwest China[J]. Bull Eng. Geol. Environ., 2009, 68: 373-386.
- [14] 孙文初, 刘霞, 李伦. 溃坝洪水流量计算方法浅析[J]. 广东水利水电, 1999(3): 3-6.
- [15] 游勇, 程尊兰. 西藏波密堆沟泥石流堵河模型试验[J]. 山地学报, 2004, 23(3): 288-293.
- [16] 吴持恭. 水力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [17] 晏鄂川, 郑万模, 唐辉明, 等. 滑坡堵江坝溃决洪水及其演进的理论分析[J]. 水文地质工程地质, 2001(6): 15-22.