

文章编号: 1008-2786-(2011)2-217-09

堰塞湖溃决人工结构体滞洪效果实验研究

陈晓清¹, 赵万玉^{1,2}, 高全^{1,2}, 贾世涛³, 朱兴华^{1,2}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 汶川地震后唐家山、小岗剑等堰塞湖的应急处置中都采用了开挖泄流槽这一措施,但出现了溃决流量超过了下游城镇防洪标准的危险情景。为控制堰塞湖排泄洪水超过下游区域的防护能力,排泄后期在泄流槽中加入人工结构体可能是一种有效的措施。通过室内模型实验,在泄流槽排泄后期抛投不同型式的人工结构体进行流量调控,包括四面体实体结构、四面体实体结构串、四面体实心框架结构和四面体实心框架结构串 4 种型式。通过抛投人工结构体与未抛投人工结构体的对比实验,发现: 1. 前者比后者溃决洪峰流量减小了 26.6% ~ 61.7%,说明人工结构体在控制溃决洪峰流量方面有显著效果; 2. 通过流量综合分析,提出人工结构式优选次序为:四面体实心框架结构串、四面体实体结构串、四面体实心框架结构、四面体实体结构; 3. 从残留体高度上看,未抛投人工结构体的坝体残留高度为原始坝高的 1/3,堰塞体后部基本上是冲刷到底,而抛投了人工结构体的坝体残留高度为原始坝高的 1/2,说明人工结构体控制堰塞坝下切侵蚀方面有较显著的效果。且从制作工序、制作时间和制作成本三方面,探讨了四面体实体和四面体实心框架结构的适用性,在施工条件许可的情况下,使用四面体实心框架结构更为理想。

关键词: 堰塞湖; 溃决; 人工结构体; 滞洪

中图分类号: P512.2

文献标识码: A

堰塞湖作为山区常见的山地灾害类型之一,对下游的居民造成严重的威胁和危害。汶川地震诱发约 257 处堰塞湖^[1],对汶川地震灾区造成严重的威胁,曾一度成为国内外关注的焦点^[2]。唐家山堰塞湖、绵远河小岗剑(上)等诸多堰塞湖采取开挖泄流明渠进行应急排险^[3-5],从没有造成人员伤亡角度来看,可以算是堰塞湖应急处置成功的典型案例;但是就排泄后期溃决洪峰流量过大、并对下游造成洪水淹没灾害而言,堰塞湖应急处置工程措施还有待于进一步改进^[6]。为了充分保障堰塞湖下游区域的安全,急需在堰塞湖溃决后期采取措施控制洪峰流量。

目前,国内外还没有一套措施应用于堰塞湖溃决后期洪峰流量控制。针对这一问题,陈晓清等鉴

于水利水电工程施工截流方面的设计和经验^[7-9],提出了在堰塞湖排泄后期加入人工结构体来控制洪峰流量的初步构想^[6,10]。本文尝试将人工结构体应用于堰塞湖应急排泄的后期洪峰调控,通过人工结构体的堰塞湖溃决滞洪实验,初步验证其滞洪效果,为人工结构体在堰塞湖溃决后期调控洪峰流量的应用设计提供基础数据,为将来堰塞湖工程处置取得更好效果提供参考。

1 人工结构体在堰塞湖后期滞洪的可行性分析

1.1 人工结构体在截流中的启示

截流是水利水电工程施工中的关键性项目,堵

收稿日期(Received date): 2010-07-28; 改回日期(Accepted): 2010-12-20。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划“973”计划(2008CB425802)和国家自然科学基金(41072270)资助。[This research is supported by 973 Program (2008CB425802) and the National Science Foundation Project(41072270).]

作者简介(Biography): 陈晓清(1974-),男,四川遂宁人,博士,研究员。主要从事山地灾害防治理论研究。[Chen Xiaqing (1974-), male, born in Suining of Sichuan, P. H. D., majoring on research on mountain hazard mitigation.] E-mail: xqchen@imde.ac.cn

截河水迫使其流向预定通道的工程措施。向流水中抛投料物填筑戗堤称之为进占,两岸进占后预留的河道泄流口称为龙口^[7]。龙口处单宽流量大,流速高,场地狭窄,抛投强度受限制,难度较大。历史上利用梢料、麻袋、石料、土粒,南方常用卵石竹笼、砾石和杓槎等材料进行堤防堵口及截流^[8]。在现代截流工程中多使用大块石和混凝土异形体等人工结构体,利用大型自卸汽车及推土机进行施工。在大中型水电工程截流时,常采用人工结构体作为截流的抛投材料。人工结构体一般采用混凝土六面体、四面体、四脚体以及混凝土构架等(图1)。我国使用最广泛的截流材料是混凝土四面体结构,在葛洲坝大江截流、三峡工程导流明渠截流等工程中曾采用过这种形式的截流材料^[11]。

堰塞湖溃决后期与截流有许多相似之处,其中最大相似处在于水流进入泄流槽时进口与截流时龙口具有相似的水力条件——流速快、流量大。而不同之处在于:截流时通过人工结构体的充填龙口逐渐缩小,水流的流量逐渐减小、流速先增加后逐渐降低,直至完全没有出流;堰塞湖溃决后期在溃决洪水的强烈侵蚀作用下,溃决口不断扩大、加深,流量快速增加至最大值,当库容快速下降后,流量才逐渐下降至入库流量值,相应流速也是经历一个增加达到最大值然后逐渐降低的过程。鉴于此,在堰塞湖溃决后期可以往泄流槽中加入人工结构体,控制溃决洪水的下切侵蚀作用、稳定排泄槽底,从而控制流量的快速增长,使堰塞湖溃决洪峰流量不超过下游的防护能力,这一思路总体是可行的。

目前,截流使用的人工结构体中以四面体实体结构的研究和应用最为广泛。早在20世纪50年代前苏联就将透水框架四面体应用于河道护岸^[12];杨火其模拟研究了四面六边框架群在涌潮作用下的抗

冲稳定性^[13];唐洪武、姚仕明等都通过试验表明,六边四面透水框架具有较好的促淤效果^[14-15];李学海等研究了高落差、大流速情况下四面体实体结构的稳定特性^[16]。这些研究和应用表明,四面体结构有较高稳定性,在堰塞湖后期溃决流量控制中有望发挥良好的效果。

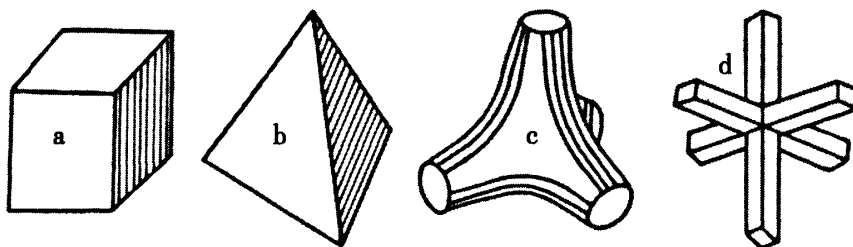
1.2 四面体结构滞洪原理

文献[14]详细阐述了抛投材料稳定性的相关因素分析,例如确定稳定标准、止动和起动、滑动和滚动、与抛投材料相接触的边界条件、单体和群体、抛投体稳定与水流作用的关系等问题。国际上,首次建立抛投材料稳定性关系的是前苏联水力学学者S. V. Isbash教授^[17],他根据戈尔瓦河等截流实验整理出的半理论半经验公式——伊兹巴斯公式

$$V = K \cdot \sqrt{2g \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \cdot D} \quad (1)$$

式中 V 为起动流速; K 为综合稳定系数; γ_s 为抛投材料重度; γ_w 为水重度; D 为抛投材料化引为球体时的直径; g 为重力加速度。

该公式在目前截流计算中广泛应用。四面体实体结构的抗冲稳定性主要以起动流速为判别标准,起动流速越大说明该四面体结构在水流中的稳定性越好,由式(1)可见其与结构体重度、综合稳定系数和等效球体尺寸大小等条件有着密切的关系,这与河流泥沙动力学中推移质泥沙起动原理相同^[18-19]。正四面体实体结构四个面是全等的正三角形,它的重心到每个面的距离都相等,因此在水流的冲击作用下不容易发生滚动。四面体实体结构的体形决定了它通常是以三角形的底边着地,顶点朝上的姿势受力。由于具有尖角,单个四面体实体结构即使发生滚动时,它也能够出现在河床面上出现一角嵌入床面的姿势稳定下来^[20]。当连续抛投时,四面体可以相



a. 混凝土六面体, b. 混凝土四面体, c. 混凝土四脚体, d. 钢筋混凝土构架

图1 截流材料^[11]

Fig. 1 Material for river closure

互重叠,而且还改变了一个顶点朝上的受力姿势,可以卡入其他的四面体实体结构中,使之产生了四面体实体结构群。这样,起动整个的四面体实体结构群需要更大的起动流速,只有把结构群冲散才能够把单个的四面体实体结构冲走。当成串抛投时,效果比起单个结构体可能更为理想,在水流的作用下,若能够起动单个四面体实体结构发生滑动或者滚动,而串在一起的其他四面体实体结构会阻止单个四面体结构发生滑动,即使能够滑动,但滑动距离不远,这样就增加了结构体的稳定性。

因此,四面体型式的人工结构体应该堰塞湖溃决后期控制流量的优选结构类型之一。

2 实验设计

2.1 设计思路

基于上述人工结构体控制堰塞湖溃决后期流量的可行性及四面体结构在截留中的优越性,开展四面体结构调控堰塞湖溃决洪峰室内模拟实验,在排泄流量增长到较高水平时抛掷不同构型的四面体结构,通过观测坝库内水位变化,结合高清数码录像观测,比较不同构型四面体结构调控排泄流量的效果,验证四面体结构的滞洪效果,并初步优选出最优结构型式。

为了使试验结果在应用中有更高的适用性,本次模拟实验以唐家山堰塞湖为原型,根据试验场地、控制装置、测试设备、模拟坝体材料等因素综合考虑,进行近似定量实验。

2.2 实验装置

堰塞湖溃决模型试验尚处于探索阶段,参照水

力学相似原理与模型试验设计方法^[9],以唐家山堰塞湖为原型,设计室内模型实验。经过比较几何比尺为1:100、1:200、1:250、1:500和1:1000下的流量比尺、坝体颗粒级配,并结合场地条件、供流设施、测试设备等条件,比较优缺点,最终选用几何比尺1:250、流量比尺1:988 212的模型比尺。由此,模拟堰塞体概化为底长2.8 m、顶长1 m、宽1 m、高0.6 m,上、下游坝坡坡比均为1:1.5;参考唐家山堰塞湖最大库容 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$,概化模拟库容 20.22 m^3 ,实验实际最大库容 16.50 m^3 ;照考唐家山20 a一遇洪峰流量 $3\,920 \text{ m}^3/\text{s}$,概化为 3.97 L/s 的模型流量,为了密弥补最大库容的差距,实验中入库流量小幅放大到 4.43 L/s 。

模拟实验在中国科学院东川泥石流观测研究站进行,实验装置由供流装置、蓄水池、水槽实验段、尾水池4部分组成(图2)。供流装置包括进水管、水位调节装置、前池和三角堰,其中前池的尺寸为长1.8 m、宽2.2 m、高1.4 m;紧接蓄水池,其尺寸为长6.0 m、宽4.0 m、高1.4 m;下接模拟河道的水槽,其尺寸为长8.5 m、宽1 m、高0.9 m,槽底纵比降为1%,其中在水槽中间设置观测断面,观测断面安装钢化玻璃;水槽末端设立尾水池,其尺寸为长4.0 m、宽4.0 m、高0.5 m。

图2中①②为数码摄像机,摄像机①俯拍实验全景,包括堰塞体溃决、泄流过程以及抛投人工结构体的有关情况;摄像机②用于正面拍摄堰塞体溃口变化情况。

2.3 实验物料配制

试验场所在蒋家沟,是典型的泥石流流域,位于云南省的东北部,系长江上游金沙江一级水系小江右

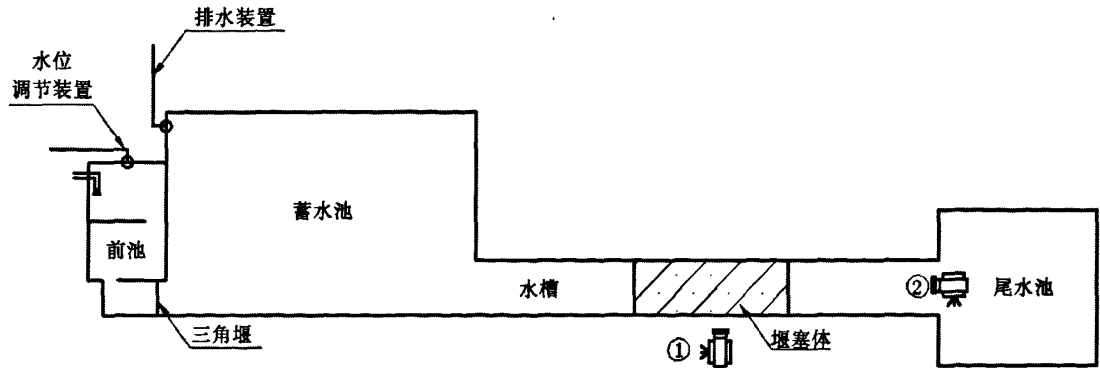


图2 实验模型平面图
Fig.2 Aerial view of model test

岸的一条支流。蒋家沟内的砾石土,级配很宽,包含了粘粒、粉粒、砂砾和砾石等组分,其中 $>2\text{ mm}$ 的成分占整个重量的50%以上,粘粒成分占3%~20%,其余为粉粒和砂粒。

由于唐家山堰塞坝的主要物质组成为含粒径较大块石的砾石土,其中粒径较大的块石占有比例为30%~40%。按照模型比尺进行缩小后,为中细颗粒含量较多的砾石土。在实验中,参照唐家山堰塞坝的土体颗粒级配,保证实验堰塞体中20~50 mm粒径的含量约占30%, $<20\text{ mm}$ 的土体直接采用蒋家沟泥石流堆积土体的 $<20\text{ mm}$ 土样。

2.4 实验内容

实验采用目前截留中广泛采用的四面体实体结构外,还采用陈晓清等提出的一种四面体实体结构的改进型——四面体实心框架结构^[21],该型结构针对堰塞湖排泄槽在溃决期间洪水侵蚀作用、沟床急剧变化而凹凸不平、一般的四面体实体结构稳定性不是最佳的情况进行改进的。

主要内容是抛投四面体实体结构、四面体实体结构串、四面体实心框架结构、四面体实心框架结构串等4种型式的人工结构体,从溃决流量的削减程度分析不同类型的人工结构体对堰塞坝溃决后洪峰流量的控制效果。

实验过程中采用了两种四面体结构,一种是由水泥制作的四面体实体结构,边长12 cm,平均质量为365 g(图3);另一种是由4根圆钢焊接而成的四面体实心框架结构(图4),其一段固定在一端,另一端在空间上组成等三棱锥的4个顶点。圆钢直径22 mm,长度为8 cm,平均质量为982 g。结构串由相应4个单体结构串联而成。

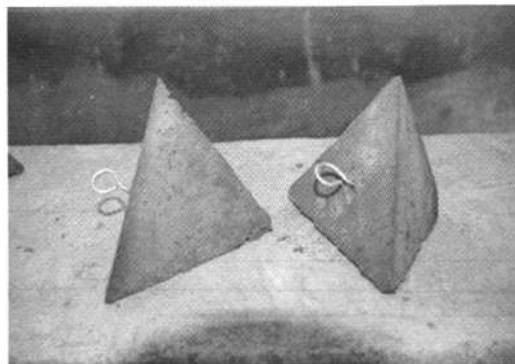


图3 四面体实体结构

Fig. 3 Tetrahedral solid structure

为了比较人工结构体在堰塞湖溃决后期控制洪峰流量的效果,除了4组抛投不同结构体形式的实验外,还实施1组未抛投人工结构体的实验。实施的5组实验均为开挖人工泄流槽的形式泄流,泄流槽横断面形状为梯形断面,具体的断面尺寸为上底宽35 cm,下底宽12 cm,深度10 cm,实验条件尽量保持一致,包括堰塞坝体物质组成和颗粒级配、入库流量、测量仪器及其采样频率、泄流槽断面尺寸等。

2.5 实验流量调试与溃决流量观测

预先进行实验流量调试,设置合适的流量,避免因流量过大导致没有采集数据使堰塞体迅速溃决,或者因流量小使堰塞体溃决时间过长。实验入库流量采取固定流量,通过直角三角形薄壁堰流量公式计算得出入库流量 $Q_i = 4.43\text{ L/s}$ 。

溃决流量是本实验最为关键的参数之一,由于溃决流量在坝后很难观测,实验采用间接测量法来进行估算。在坝前库底埋置高精度的孔隙水压力传感器监测坝前水位,在实验过程中实时测量水压力,计算出不同时刻的水位高度值,同时可以计算得到不同时刻的库容。堰塞坝溃决流量通过堰塞湖水量平衡方程^[22]计算

$$\frac{dW}{dt} = Q_i - Q_o \quad (2)$$

式中 W 为堰塞湖库容; t 为时间; Q_i 为入库流量; Q_o 为通过溃口的出流量。

3 实验流程

3.1 实验准备阶段

选取云南东川蒋家沟内砾石土,将其进行 <20

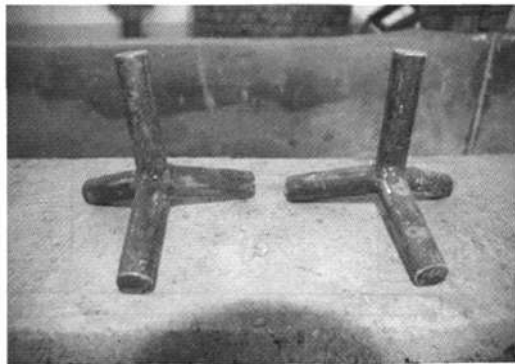


图4 四面体实心框架结构

Fig. 4 Tetrahedral frame structure

mm 和 20 ~ 50 mm 颗粒筛分,按照一定的比例进行配置。为了防止水流沿侧壁及底板渗流,在侧壁及底板设置 3 道截水墙,然后在主槽内堆积堰塞体,堆积方式为每隔一定厚度进行洒水击实。

3.2 实验阶段

1. 在完成堆积堰塞体之后,在坝前库底埋置 1 个孔隙水压力传感器监测库水水位,孔隙水压力监测数据采集通过电脑来记录。实验开始,打开水阀,先启动抽水装置将水抽入供流装置前池,水流充满前池后通过直角三角形薄壁堰进入蓄水池,水流逐渐流向堰塞体。同时,孔隙水压力传感器开始采集数据。

2. 在坝前水位达到 35 cm 时停止供水,浸泡 2 h,模拟唐家山堰塞湖水位上涨缓慢程度,水位线以下土体处于饱和状态。期间孔隙水压力传感器采集频率为 5 s 一次,记录水位上涨情况,仪器精度为 1 mm。

3. 2 h 之后,打开水阀继续供水,设置孔隙水压力传感器采集频率为 1 s 一次。待水流开始通过预先开挖的泄流槽时,堰塞湖开始溃决,观察堰塞体溃决情况,记录坝前水位下降过程以及溃决全部过程,包括坝体出现裂缝的时间、位置、尺寸、玻璃侧壁的渗透情况以及流速(采用浮标法)等内容。摄像机①俯拍堰塞坝过流、溃决过程以及抛投人工四面体结构的有关情况;摄像机②正面拍摄堰塞坝溃口变化过程,并辅助拍照,以确保准确记录实验的全过程,为后期实验数据处理提供直观依据。

4. 目测坝前水位下降速度比较快时,选择时机抛投人工四面体结构,用来控制溃决流量。

5. 待水流冲刷坝体达到冲刷稳定时,即坝前水位不会发现明显下降时,停止供水。同时,孔隙水压力传感器停止采集,然后测量水流冲刷后纵剖面比降,以坝底长度为测量范围。

6. 抛投不同类型的人工结构体,如实心四面体结构、实心四面体结构串、四面体框架结构、四面体框架结构串,重复操作实验,操作步骤如前。

4 实验结果分析

4.1 溃决流量

溃决洪峰流量是本实验中最重要参数之一,所有实验按照 60 s 采样一次计算溃决流量,以水流完全通过泄流槽的时刻点作为坐标系原点,绘制 5

组溃决实验的流量过程曲线(图 5),其中竖线为抛投相应人工结构体的时间。

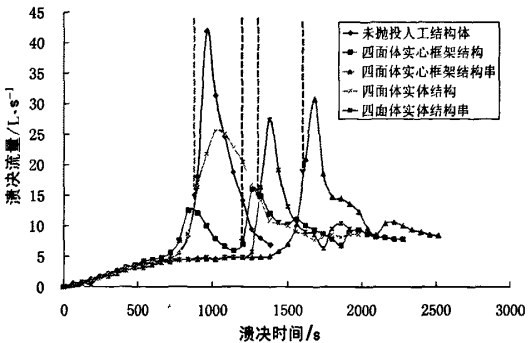


图5 不同类型人工结构体的堰塞坝溃决流量过程线
Fig.5 Outburst discharge hydrograph of different types of artificial structure

由图 5 可以发现,抛投人工结构体 4 组实验的溃决流量峰值,与未抛投人工结构体实验溃决流量峰值相比,减小了 26.6% ~ 61.7%。表明在堰塞湖溃决后期抛投人工结构体控制洪峰流量的措施是可行的。

表 1 列出了不同形式人工结构体的相对于溃决原点的抛投时间、最大溃决流量、抛投后流量放大倍数(该值为抛投人工结构体后的最大洪峰流量/抛投时刻对应溃决流量)以及抛投人工结构体后出现的洪峰点与抛投点的时间差。由表 1 知,由于各型式的人工结构体的抛投时间不同、抛投时刻对应的溃决流量不同,难以简单优选出何种结构型式对于溃决洪峰流量最优。

如果简单地以最大溃决流量为依据判断各人工结构体的溃决洪峰控制效果,必须以抛投时间相同或者抛投时溃决流量相当为基本条件,否则判识结果意义不大。由表 1 知,两大基本条件均不满足,因此这里就不作这样的判识。

抛投后流量放大倍数反映了抛投人工结构体后该结构体控制溃决洪水的能力大小,因此,该参数可以作为判断各人工结构体溃决洪峰控制效果的依据。对比 4 种人工结构体对堰塞湖溃决洪峰控制效果,以抛投人工结构体后流量放大倍数越小越优为标准,则从最好到一般依次为:四面体实心框架结构串、四面体实体结构串、四面体实体结构、四面体实心框架结构。但是四面体实心框架结构与四面体实心结构的抛投后流量放大倍数非常接近,难以分辨何种更优。

表 1 不同人工结构体的相关参数

Table 1 Experimental parameters of different man-made structures

人工结构体型式	相对于溃决原点的 抛投时间/s	对应溃决流量 /L·s ⁻¹	最大溃决流量 /L·s ⁻¹	抛投后流量 放大倍数	洪峰点与抛投点 时间差/s
四面体实心框架结构	1 201	6.97	16.06	2.38	59
四面体实心框架结构串	1 614	19.93	30.78	1.54	66
四面体实体结构	861	11.29	25.51	2.26	159
四面体实体结构串	1 310	14.59	27.35	1.87	70

洪峰点与抛投点时间差反映了抛投人工结构体后该结构体控制溃决洪水在时间方面的效率高低,因此,该参数可以作为判断各人工结构体溃决洪峰控制效果的依据。对比 4 种人工结构体对堰塞湖溃决洪峰控制效果,以抛投人工结构体后洪峰点与抛投点时间差越小越优为标准,则从最好到一般依次为:四面体实心框架结构、四面体实体结构串、四面体实心框架结构串、四面体实体结构。但是四面体实体结构串和四面体实心框架结构串的洪峰点与抛投点时间差非常接近,难以分辨何者更优。

上述不同的比较分析结果,从侧面反映了抛投

时机不同导致人工结构体的溃决洪峰效果不同。基于同一结构型式下结构串的控制效果应该优于单个结构体的控制效果这一基本常识,综合而言,从溃决流量来看,人工结构体型式优选型式依次为:四面体实心框架结构串、四面体实体结构串、四面体实心框架结构、四面体实体结构。

4.2 残留体高度

残留坝体高度也是人工结构体对堰塞湖溃决洪峰控制效果的重要评价参数之一。对 5 组实验,在溃决到坝体基本稳定后测量泄流槽的纵断面形态,图 6 是堰塞坝溃决后残留体泄流槽的纵剖面图。

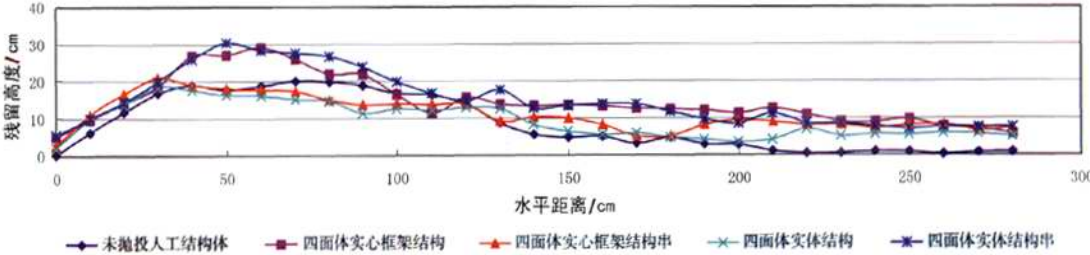


图 6 堰塞坝溃决后的残留高度示意图

Fig. 6 Sketch map of scallop height after dam-break of barrier lake



图 7 四面体结构滞洪效果图

Fig. 7 Typical photos of flood detention of tetrahedral structure

由图6,未对后期溃决流量采取措施进行控制时,坝体残留高度约为坝高的 $1/3$,并且在坝体后半部分基本上冲刷到底;而抛投了4种不同类型的人工结构体后,坝体的残留高度则不同,抛投位置均在上游边坡与坡度较小的下游边坡转折处。通过分析发现,人工结构体都能够在一定程度上控制堰塞坝的下切侵蚀,堰塞坝后半部分的残留高度均远远高于未抛投人工结构体的残留高度。

单个四面体实心框架结构和四面体实体结构串稳定沟床效果更为理想,堰塞坝的残留高度约为实际坝高的 $1/2$,单个四面体实心框架结构进入河道之内,以三点着地、顶点朝上的姿势嵌入河床,很容易保持稳定(图7)。而四面体实心框架结构串和单个四面体实体结构的效果欠佳,主要原因可能在于四面体实心框架结构串的抛投方法欠妥,成串抛投时,应与水流方向保持一致,而不能垂直于水流方向,在溃决流量较大时不排除有整体向前滚动的可能性;单个四面体实体结构的重量较轻,并且迎水面较大,在水流湍急的河道中,没有保持稳定的状态就可能被冲走了。

5 施工技术

水利工程中截流时所用四面体结构主要是由混凝土加重后浇灌而成,三峡工程截流时所用等四面体结构单边长 2.5 m ,单个块体重达 20 t ,截流龙口平均流速达 7 m/s 以上, 20 t 重量的块体也会被冲走^[20]。因此在结构体内增加了一定比例的废钢材来增加重量,等四面体结构是截流中极具代表性的抛投材料。在堰塞坝应急和常规排险中,四面体结构将作为永久性和一次性的结构,因此在制作过程中需要考虑诸多因素,可以从制作工序、制作时间和制作成本3方面来考虑。

四面体实体结构采用混凝土浇筑,需要加工大量的模板,在达到一定强度之后才能够拆模使用,而且制作工序复杂、制作时间较长,不便于控制时间,并且堰塞坝体也不适合开展大规模的加工厂。相对而言,混凝土的四面体实体结构成本较低,但是制作的模板需要耗费大量的材料,在完工之后无法回收利用;四面体实心框架结构的4根杆件采用钢筋混凝土结构,可以预先制作4根杆件的交接处,然后可在现场拼装或者现场浇筑,施工比较方便,并且施工时间便于控制,但成本相对较高。

四面体实体结构和四面体实心框架结构不仅体积大而且重量也很大,因此装运和抛投也比较困难。施工过程中采用自卸汽车运输,并且都需要用吊装设备装车。四面体实体结构占用空间大,自卸汽车的空间不能够合理利用,增加工作量;四面体实心框架结构在装运时可以叠放,提高工作效率。

抛投时可采用装载机直接推入河道,但排险过程中危险性较大,而且在道路受阻的情况下,施工设备很难进入施工现场。可以考虑将结构体放置在泄流槽两侧,随着下切侵蚀和侧蚀程度的加深,溃口不断地扩大,让其自动进入泄流槽控制流量。因此,需要合理计算结构体排放在离泄流槽中心位置多远的距离时,进入泄流槽的溃决流量为最大流量。

6 结论

本文通过室内模型实验,分析了堰塞湖溃决流量、残留体高度等方面的特征,对堰塞湖溃决人工结构体的滞洪效果进行探讨,并且对人工结构体施工技术进行了初步探讨。初步分析得出以下结论:

1. 通过抛投人工结构体与未抛投人工结构体的流量过程曲线对比,前者比后者溃决洪峰流量减小了 $26.6\% \sim 61.7\%$,说明人工结构体在堰塞湖溃决后期能够发挥显著的滞洪效果;通过流量综合分析,对于堰塞湖溃决后期滞洪效果而言,人工结构体型式优选次序为:四面体实心框架结构串、四面体实体结构串、四面体实心框架结构、四面体实体结构。

2. 从残留体高度上来看,未抛投人工结构体的残留高度约为坝高的 $1/3$,堰塞体后部基本上是冲刷到底;而抛投了人工结构体的残留高度为坝高的 $1/2$,说明人工结构体在控制堰塞坝下切侵蚀作用方面有较显著的成效。

3. 从制作工序、制作时间和制作成本等三个方面来考虑实心四面体结构和四面体框架结构的适用性。在可施工的条件下,使用四面体实心框架结构更为理想。

本文仅对堰塞湖溃决人工结构体的滞洪效果问题进行了初步实验尝试,还存在一些问题,如实验组数较少、实验人工结构构型较少等;还有许多问题有待于进一步深入研究,如人工结构体的抛掷时机、不同尺寸人工结构块体的滞洪效果、人工结构体的快速施工方法等。希望更多的同行参与本研究,为堰塞湖工程处置规范制定提供科学依据。

致谢:本实验从设计到实施得到了中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所李德基研究员和游勇研究员的指导,在实施过程中得到了中国科学院东川泥石流观测研究站洪勇副站长及全体工作人员的大力支持,在此一并感谢!

参考文献 (References)

- [1] Peng Cui, Yingyan Zhu, Yongshun Han, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation [J]. *Landslides*, 2009, 6:209–223
- [2] Stone, R. Wenchuan earthquake: Scientists race against the clock to gauge landslide risk [J]. *Science*, 2008, 320 (5882): 1408–1408
- [3] Liu Ning, Zhang Jianxin, Lin Wei, et al. Draining Tangjiashan Barrier Lake after Wenchuan earthquake and the flood propagation after the dam break [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(4):801–809
- [4] Qiu Chixing, Li Shujian. Emergency treatment of Xiaogangjian barrier lake, Mianyu River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2008, 39(8):36–38 [邱炽兴, 李书健. 绵远河小岗剑(上)堰塞湖应急排险处理 [J]. *水利水电技术*, 2008, 39(8):36–38]
- [5] Li Huzhang, Liu Songlin. Review of successful treatment of Tangjiashan barrier lake [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2008, 39(8):15–18 [李虎章, 刘松林. 唐家山堰塞湖成功排险综述 [J]. *水利水电技术*, 2008, 39(8):15–18]
- [6] Chen Xiaoping, Cui Peng, Zhao Wanyu, et al. A discussion of emergency treatment of dammed lake caused by “5.12” Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 26(6):733–738 [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——以唐家山为例 [J]. *山地学报*, 2010, 26(6):733–738]
- [7] Yuan Guangyu. *Hydraulic engineering construction* (Third edition) [M]. Beijing: China Waterpower Press, 1996:30–36 [袁光裕. 水利工程施工 (第三版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996:30–36]
- [8] Zhou Keji, Lu Zhiyong. *Hydraulic engineering construction* (Second edition) [M]. Beijing: Central Radio & University Press, 2006:27–33 [周克己, 鲁志勇. 水利工程施工 (第二版) [M]. 北京: 中央广播电视大学出版社, 2006:27–33]
- [9] Wu Chigong. *Hydrology* (No. 3 edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003 [吴持恭主编. 水力学 (第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003]
- [10] Chen Xiaoping, Cui Peng, You Yong, et al. An artificial approach of controlling drainage discharge of barrier lake [P]. China: 200910216148.8, 2009–11–5 [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 [P]. 中国: 200910216148.8, 2009–11–5 申请]
- [11] Cai Qilong, Yan Yi, Liu Jinbi. Discussion on tetrahedron concrete for river closure [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(6):62–65 [蔡启龙, 严毅, 刘锦碧. 关于混凝土四面体截流材料的探讨 [J]. *水利水电科技进展*, 2006, 26(6):62–65]
- [12] Xu Xirong, Liu Gang, Xu Songnian, et al. Experimental study on flood and bank protection by tetrahedron permeable frames [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(5):65–68 [徐锡荣, 刘刚, 徐松年, 等. 透水框架四面体防洪护岸试验研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27(5):65–68]
- [13] Yang Huoqi, Wang Wenjie. Experimental study of profiled-block stability in Qiantangjiang estuary [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, 18(2):19–22 [杨火其, 王文杰. 钱塘江河口异性块体抗冲稳定特性试验研究 [J]. *长江科学院院报*, 2001, 18(2):19–22]
- [14] Tang Hongwu, Li Futian, Xiao Yang, et al. Experimental study on effect of scour prevention and sedimentation promotion of bank protection of tetrahedron penetrating frame groups [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2002, 344(9):25–28 [唐洪武, 李福田, 肖洋, 等. 四面体框架群护岸型式防冲促淤效果试验研究 [J]. *水运工程*, 2002, 344(9):25–28]
- [15] Yao Shiming, Lu Jinyou, Luo Hengkai. Experiment study on new material and technology of revetment works in middle and lower Yangtze [J]. *Yangtze River*, 2006, 37(4):79–80 [姚仕明, 卢金友, 罗恒凯. 长江中下游护岸工程新材料新技术试验研究 [J]. *人民长江*, 2006, 37(4):79–80]
- [16] Li Xuehai, Tang Xiangfu, Liu Lizhong. Stability research on dumped blocks of open channel closure [J]. *China Three Gorges Construction*, 2002, 10:26–27 [李学海, 唐祥甫, 刘力中. 明渠截流抛投体稳定性研究 [J]. *中国三峡建设*, 2002, 10:26–27]
- [17] Xiao Huanxiang. Estimation Research on Riprap Grain Size for Closure by Vertical Blockade [J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 2000, 16(1):1–7 [肖焕雄. 立堵截流抛石粒径计算研究 [J]. *水电站设计*, 2000, 16(1):1–7]
- [18] Qian Ning, Wan Zhaohui. *Mechanics of sediment transport* [M]. Beijing: Science Press, 1983:123–132 [钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983:123–132]
- [19] Qin Rongyu, Wang Chonghao. Motion theory and application of bed load in river [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1996:61–69 [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, 1996:61–69]
- [20] Zhou Daixin, Huangximin. Stability analysis of artificial Concrete blocks for closure [J]. *Pearl River*, 1995, 1:18–24 [周代鑫, 黄希敏. 截流人工块体稳定性分析 [J]. *人民珠江*, 1995, 1:18–24]
- [21] Chen Xiaoping, Cui Peng, You Yong, et al. Artificial structure in scour resistance of debris flow and barrier dam and its application [P]. China: 200910167888.7, 2009–10–14 [陈晓清, 崔鹏, 游勇, 等. 一种用于泥石流和堰塞坝防冲刷的人工结构体及其应用 [P]. 中国: 200910167888.7, 2009–10–14 申请]
- [22] Kuang Shangfu, Wang Xiaogang, Huang Jinchi, et al. Risk analysis and impact assessment of dam-break in barrier lake [J]. *China Water Resources*, 2008, 16:17–21 [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, 16:17–21]

Experimental Research on Effect of Man-made Structure Controlling Dam-break Flood

CHEN Xiaoqing¹, ZHAO Wanyu^{1,2}, GAO Quan^{1,2}, JIA Shitao³, ZHU Xinghua^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, China Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Barrier lake is a very common geo-hazard in mountain area and open channel can be usually utilized to cope with the dammed lake emergency response, such as Tangjiashan and Xiaogangjian dammed lake after Wenchuan earthquake. But the released discharge in these cases may exceed the standard of flood control of the cities downstream, which can be still cause severe disaster to the people downstream. Indoor flume model experiments, in which such four different treatments is used as single tetrahedral solid structure (TSS), chain of TSS, single tetrahedral frame structure (TFS), and chain of TFS, are conducted to study the effect of tetrahedral structure on controlling the outburst discharge. Some conclusions can be drawn as follows: (1) when artificial tetrahedral structure is used in the tests, the peak discharge can be effectively reduced by 26.6% ~ 61.7%, ie, tetrahedral structure may have effect on controlling the peak discharge; (2) the preference order of these four structures could be: chain of TFS – chain of TSS – TFS – TSS; (3) the dam body with artificial structures remains half the original height, whereas it remains only one third without tetrahedral structures, which makes it clear that tetrahedral structures are effective in controlling downward erosion of dam body. In addition, the application of TSS and TFS is also discussed under different conditions of making process, time and cost, and if possible, linked TFS has more priorities.

Key words: barrier lake; dam-break flood; tetrahedral structure; flood detention

作者: [陈晓清](#), [赵万玉](#), [高全](#), [贾世涛](#), [朱兴华](#), [CHEN Xiaoping](#), [ZHAO Wanyu](#), [GAO Quan](#), [JIA Shitao](#), [ZHU Xinghua](#)

作者单位: [陈晓清, CHEN Xiaoping \(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川, 成都, 610041\)](#), [赵万玉, 高全, 朱兴华, ZHAO Wanyu, GAO Quan, ZHU Xinghua \(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川, 成都, 610041; 中国科学院研究生院, 北京, 100049\)](#), [贾世涛, JIA Shitao \(西南交通大学土木工程学院, 四川, 成都, 610031\)](#)

刊名: [山地学报](#) **ISTIC PKU**

英文刊名: [JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)

年, 卷(期): 2011, 29(2)

参考文献(22条)

1. [Peng Cui;Yingyan Zhu;Yongshun Han](#) [The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes:distribution and preliminary risk evaluation](#) 2009
2. [Stone R](#) [Wenchuan earthquake:Scientists race against the clock to gauge landslide risk](#)[外文期刊] 2008(5882)
3. [Liu Ning;Zhang Jianxin;Lin Wei](#) [Draining Tangjiashan Barrier Lake after Wenchuan earthquake and the flood propagation after the dam break](#)[期刊论文]-[Science China\(Technological Sciences\)](#) 2009(04)
4. [邱炽兴;李书健](#) [绵远河小岗剑\(上\)堰塞湖应急排险处理](#)[期刊论文]-[水利水电技术](#) 2008(08)
5. [李虎章;刘松林](#) [唐家山堰塞湖成功排险综述](#)[期刊论文]-[水利水电技术](#) 2008(08)
6. [陈晓清;崔鹏;赵万玉](#) [5.12汶川地震堰塞湖应急处置措施的讨论—以唐家山为例](#) 2010(06)
7. [袁光裕](#) [水利工程施工\(第三版\)](#) 1996
8. [周克己;鲁志勇](#) [水利工程施工\(第二版\)](#) 2006
9. [吴持恭](#) [水力学\(第三版\)](#) 2003
10. [陈晓清;崔鹏;游勇](#) [一种人工调控排泄流量的堰塞湖处置方法及其应用](#) 2009
11. [蔡启龙;严毅;刘锦碧](#) [关于混凝土四面体截流材料的探讨](#)[期刊论文]-[水利水电科技进步](#) 2006(06)
12. [徐锡荣;刘刚;徐松年](#) [透水框架四面体防洪护岸试验研究](#)[期刊论文]-[水利水电科技进步](#) 2007(05)
13. [杨火其;王文杰](#) [钱塘江河口异性块体抗冲稳定特性试验研究](#)[期刊论文]-[长江科学院院报](#) 2001(02)
14. [唐洪武;李福田;肖洋](#) [四面体框架群护岸型式防冲促淤效果试验研究](#)[期刊论文]-[水运工程](#) 2002(09)
15. [姚仕明;卢金友;罗恒凯](#) [长江中下游护岸工程新材料新技术试验研究](#)[期刊论文]-[人民长江](#) 2006(04)
16. [李学海;唐祥甫;刘力中](#) [明渠截流抛投体稳定性研究](#)[期刊论文]-[中国三峡建设](#) 2002(10)
17. [肖焕雄](#) [立堵截流抛石粒径计算研究](#)[期刊论文]-[水电站设计](#) 2000(01)
18. [钱宁;万兆惠](#) [泥沙运动力学](#) 1983
19. [秦荣昱;王崇浩](#) [河流推移质运动理论及应用](#) 1996
20. [周代鑫;黄希敏](#) [截流人工块体稳定性分析](#)[期刊论文]-[人民珠江](#) 1995
21. [陈晓清;崔鹏;游勇](#) [一种用于泥石流和堰塞坝防冲刷的人工结构体及其应用](#) 2009
22. [匡尚富;汪小刚;黄金池](#) [堰塞湖溃坝风险及其影响分析评估](#)[期刊论文]-[中国水利](#) 2008(16)

本文读者也读过(10条)

1. [严祖文. 魏迎奇. 蔡红. 王福义. YAN Zu-wen. WEI Ying-qi. CAI Hong. WANG Fu-yi](#) [堰塞湖天然坝安全性状评估研究](#)[期刊论文]-[水利水电技术](#)2009, 40(2)

2. [张文煊](#), [吴新霞](#), [ZHANG Wen-xuan](#), [WU Xin-xia](#) [堰塞湖抢险爆破对坝基及保留堰体的液化影响分析](#)[期刊论文]-[工程爆破](#)2008, 14(3)
3. [刘建军](#), [段玉忠](#), [LIU Jian-jun](#), [DUAN Yu-zhong](#) [唐家山堰塞湖抢险施工总结](#)[期刊论文]-[水利水电技术](#) 2008, 39(8)
4. [张建新](#), [程琳](#), [王光谦](#), [高洁](#) [堰塞湖最大库容及库容曲线分析计算](#)[期刊论文]-[水文](#)2009, 29(5)
5. [陈晓清](#), [赵万玉](#), [高全](#), [贾世涛](#), [朱兴华](#), [CHEN Xiaoqing](#), [ZHAO Wanyu](#), [GAO Quan](#), [JIA Shitao](#), [ZHU Xinghua](#) [人工结构体控制堰塞湖溃决洪峰的试验与设计](#)[期刊论文]-[西南交通大学学报](#)2011, 46(2)
6. [乔路](#), [杨兴国](#), [周宏伟](#), [林媛媛](#) [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](#)[期刊论文]-[人民长江](#)2009, 40(22)
7. [吴国如](#), [岳曦](#), [WU Guo-ru](#), [YUE Xi](#) [唐家山堰塞湖应急抢险施工技术](#)[期刊论文]-[水利水电技术](#)2008, 39(8)
8. [涂云](#), [詹登民](#), [方盛](#), [龚军仓](#) [唐家山堰塞湖成功排险的探索与思考](#)[期刊论文]-[水利水电技术](#)2008, 39(8)
9. [李虎章](#), [刘松林](#), [LI Hu-zhang](#), [LIU Song-lin](#) [唐家山堰塞湖成功排险综述](#)[期刊论文]-[水利水电技术](#)2008, 39(8)
10. [任馨](#), [李晶瑜](#), [REN Xin](#), [LI Jing-yu](#) [青川县堰塞湖应急排险施工安全管理](#)[期刊论文]-[水利水电技术](#)2008, 39(8)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdxh201102011.aspx