

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201906052

窗口坝对黏性泥石流的流量调控性能研究*

周文兵^{1,2}, 柳金峰¹, 王 栋³, 张广泽³, 孙 昊^{1,2}, 焦 亮^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中铁二院地勘岩土工程设计研究院, 四川 成都 610031)

摘要: 基于水槽试验, 探讨了窗口坝对黏性泥石流的流量调控特性, 并结合数值模拟对其调控过程进行了初步分析。结果表明: 窗口坝对黏性泥石流的流量调控作用不仅表现在窗口坝对黏性泥石流峰值流量的削减能力上, 还表现在对泥石流过流的延时效应上; 不同工况条件下, 窗口坝对黏性泥石流的调控能力不同, 泥石流峰值流量削减率与窗口坝相对开口宽度、高宽比、开口率整体呈负相关, 与泥石流容重整体呈正相关, 但对容重较低的泥石流, 窗口坝的调控作用较小; 窗口坝对黏性泥石流的调控作用是窗口坝实体部分和开口部分共同作用的结果: 窗口坝通过实体部分拦挡泥石流, 降低泥石流的流速, 并使泥石流于窗口坝库内发生流速“重分布”, 再利用窗口坝大开口对其进行有控制的排导, 以此来发挥窗口坝对黏性泥石流的调控效果。

关键词: 窗口坝; 泥石流; 流量过程; 水槽试验; 数值模拟

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1120-09

Study on Regulating Discharge Process of Viscous Debris Flow by Window-frame Dam

ZHOU Wenbing^{1,2}, LIU Jinfeng¹, WANG Dong³, ZHANG Guangze³, SUN Hao^{1,2}, JIAO Liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS/Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, a series of flume experiments were conducted to investigate the regulating characteristics of discharge of window-frame dam on viscous debris flow, and the control process is preliminarily analyzed by numerical simulation. The results show that the discharge regulation effect of the window-frame dam on viscous debris flow is reflected in reducing the peak discharge of debris flow and the delay effect. Under different working conditions, the control ability of the window-type dam to viscous debris flow differs. The reduction rate of peak discharge of debris flow is negatively correlated with the relative opening width, aspect ratio, area ratio, as well as the slop of flume, and positively correlated with the bulk density of debris flow. However, the window-frame dam has little influence on debris flow with low density. The discharge regulation effect of the window-frame dam on viscous

* 收稿日期: 2019-06-23; 修回日期: 2019-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772343)、中国科学院“西部之光”人才培养引进计划、四川省委组织部“西部之光人才专项”“川藏铁路冰水型泥石流防治关键技术研究项目”(2018)资助

作者简介: 周文兵(1993—), 男, 硕士研究生。主要从事山地灾害实验与防治工程研究。E-mail: zhouwb1993@foxmail.com

通讯作者: 柳金峰(1979—), 男, 研究员。主要从事山地灾害实验与防治工程研究。E-mail: liujf@imde.ac.cn

debris flow results from the interaction between the solid part and the opening part of the window-frame dam. The window-frame dam blocks debris flow through the solid part and reduces the velocity of debris flow, which causes the velocity of debris flow to be “redistributed” in the reservoir, and then the opening of dam can be used to drain the flow in a controllable way. Under this mechanism, the discharge control effect of the window-frame dam on the viscous debris flow is exerted.

Keywords: window-frame dam; debris flow; discharge regulation process; flume experiment; numerical simulation

引言

泥石流拦砂坝是修建于泥石流形成区或形成一流通区内的一种横断沟床的人工建筑物,是泥石流防治工程中的主要工程措施之一,其目的是通过拦砂坝拦砂节流,抬高局部沟床的侵蚀基准,控制沟道重力侵蚀,从而达到抑制泥石流发育的作用^[1]。透过型拦砂坝是将拦砂坝设置成半透过型,利用拦砂坝坝体开口对泥石流颗粒进行有选择性的拦排,以此发挥拦砂坝对泥石流的调控功能。

对泥石流流量的调节是透过型拦砂坝的主要功能之一。国内外很多学者都曾开展过相关方面的研究,M. Wantabe 等^[2]首先提出将透过型拦砂坝削减泥石流洪峰流量、延缓泥石流到达时间作为评价泥石流防治工程效果的主要指标,并通过试验证实梳子坝可以降低泥石流峰值流量达 50% 以上;T. Mizuyama 等^[3]通过格子坝拦挡水石流的试验,发现格子坝的拦挡效率除了与坝体开口的最小相对开度有关外,还与泥沙体积浓度有关;李明晃等^[4]通过水槽试验,给出了立体型格子坝拦挡水石流时峰值流量削减率、粗颗粒分离效率以及拦砂率的经验公式;韩文兵^[5]通过对比各种透过型拦砂坝,发现缝隙坝和切口坝都具有明显削减泥石流龙头流量,延缓洪峰到达时间的作用;贾世涛等^[6]通过改变坝身开口率、一次泥石流过流总量、泥石流容重等条件,发现拦砂坝坝体开孔率对泥石流的流量变化起主要作用,而其他因素影响较小。林雪平等^[7]基于理论推导给出了泥石流过拦砂坝溢流口过流能力的计算公式,并通过水槽试验建立了流量系数的经验公式,但该公式仅适用于实体坝;N. Kim 等^[8]基于数值分析,建立了单因素下泥石流通过实体坝时的溢流公式,并通过模型实验进行了验证;M. Silva 等^[9-10]结合水槽实验和数值模拟结果,分析了不同平面布置情况下桩林对水石流流量的调节效果,但没有对其

适用条件进行分析;王小军等^[11]利用 Flow-3d 软件分析了不同断面形态的拦砂坝排泄孔对不同性质泥石流的排泄效果,但该研究只针对排泄孔的开口形态进行了研究,没有分析排泄孔开口尺寸对泥石流排泄效果的影响。

窗口坝是近年来发展的一种新型透过型拦砂坝,是在实体坝上开设一些大开孔,已在我国泥石流防治工程中得到了广泛使用。但目前有关窗口坝的研究依旧很少,其关键开口参数的设计依据更是缺乏,导致窗口坝在设计过程中具有很大的主观性和经验性,而难以发挥预期效果。为此,本文以窗口坝为研究对象,通过水槽试验分析了窗口坝对黏性泥石流流量的调节特征与调控效果,并利用数值模拟对泥石流过流过程进行了初步分析,通过本文研究结果,以期能为今后窗口坝开口参数的设计提供基础数据支撑,降低窗口坝在实际工程设计中的经验性,为防灾减灾所服务。

1 试验概况

1.1 试验用料

本试验物料取自四川省绵阳市平武县刘家坪乡碓窝梁沟未经扰动的泥石流堆积区原样。经现场调查发现,该地区泥石流土样中细颗粒含量丰富,所爆发的泥石流也主要以黏性泥石流为主,为泥石流中最常见也是危害最大的类型^[12-13]。为满足试验所用物料与野外原型流体物理力学性质的相似性^[14],本试验也以研究黏性泥石流为主,泥石流容重为 18.0~21.2 kN/m³。试验土样为在泥石流原样的基础上,剔除原样中 40 mm 以上的粗颗粒。物料中最大粒径 $d_{\max}=40.00$ mm, $d_{84}=16.23$ mm, $d_{50}=2.70$ mm, $d_{16}=0.12$ mm, 不均匀系数 $C_u=56.89$, 曲率系数 $C_c=0.084$, 泥石流颗粒级配曲线如图 1 所示。

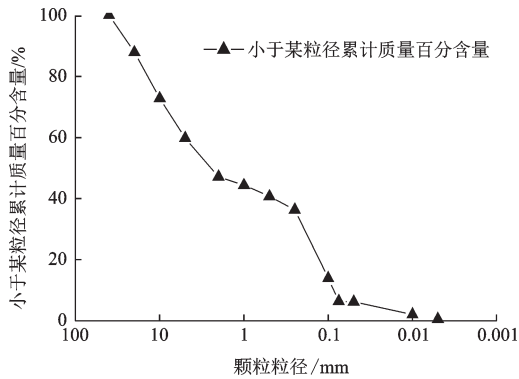


图1 试验物料级配曲线

Fig.1 Particle gradation curve of the debris flow material

1.2 试验装置

试验装置主要由物料斗、水槽、尾料池、窗口坝、数据获取装置等组成(图2)。物料斗最大容量约为 0.6 m^3 ,料斗下部前侧开口,以便于拌合样能完全从物料斗出流。水槽全长为 500 cm ,宽为 50 cm (满足试验水槽的宽度应等于或大于试验流体中最大石块粒径5倍的要求^[14]),高 80 cm ,水槽坡度变化范围为 $6^\circ \sim 20^\circ$ 。窗口坝坝体中心线距上游 3.0 m ,下游 2.0 m ,以保证泥石流流的正常过流和泥石流流过流数据的准确获取。为减小泥石流流过流过程中因泥石流回淤以及飞溅对监测数据的影响,摄像机和泥位计安装于窗口坝距上游 150 cm ,下游 200 cm 处,以记录窗口坝对泥石流流的调控过程并获取相应断面处的流速、泥位数据,从而获取相应断面处的流量数据。

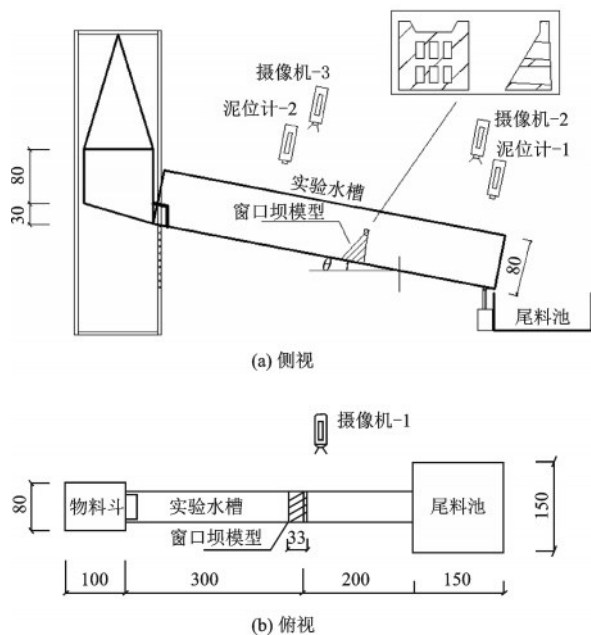


图2 试验水槽模型侧视和俯视

Fig.2 Side view and top view of experiment flume

1.3 窗口坝开口参数设计

试验所用窗口坝模型采用PVC板制作,外部轮廓依照实体坝尺寸进行设计^[14],坝体宽为 50 cm (垂直于水槽方向),最大坝高为 50 cm ,有效坝高为 42 cm ,坝顶宽为 6 cm (平行于水槽方向),底宽 33 cm ,迎水面坡比 0.6 ,背水面坡比 0.05 ,开口底面纵坡为 3° 。受材料加工条件影响,本研究只考虑矩形开口。与其它透过型拦砂坝设计方式不同,窗口坝是在实体坝上开孔,其开口参数不仅受开口宽度、高宽比、开口率的影响,还与窗口的开口个数、位置等参数有关。由于影响窗口坝开口参数的因素较多,本研究中只分析窗口坝开口宽度、高宽比、开口率等开口参数对试验结果的影响。通过开展前期预实验,可得到窗口坝开口参数的设计范围。窗口坝模型开口尺寸参数设计如图3所示。

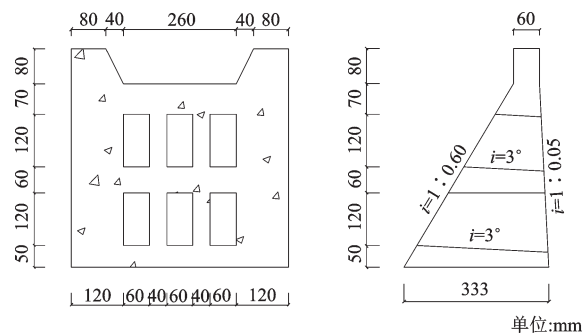


图3 窗口坝模型示意图

Fig.3 Sketch of dimension of the window-type dam model unit: mm

1.4 试验组次设计

窗口坝对黏性泥石流的流量调控是一个受多因素影响的过程,根据研究目的,本研究主要以窗口坝相对开口宽度(窗口坝开口宽度与物料中最大粒径的比值)、高宽比(窗口坝开口高度与开口宽度的比值)、开口率(窗口坝开口面积与有效坝高以下横断面面积的百分比)以及泥石流容重为主要研究参数,试验时,保证其他参数不变,每组实验只改变一个变量。本实验主要研究的是当泥石流过流流量接近窗口坝设计流量时窗口坝对泥石流的调控作用,为保证本试验能较为完整的模拟泥石流过窗口坝时的过流过程,本试验固定一次泥石流过流总量为 0.35 m^3 ,采用固定开口方式出流,以模拟一次泥石流的阵流过程。除预实验外,共设计实验 41 组,其具体试验组数设计见表1。

表 1 试验变量及组次设计

Table 1 Related parameters and conditions

组别	容重 $\gamma_c / (\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	相对开口宽度 b/d_{\max}	高宽比 h/b	开口率 $\lambda/\%$	坡度 $\theta/(\text{°})$	试验组次
1	18.0, 19.6, 21.2	1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2	2	20	11	41
2	18.0, 19.6, 21.2	1.5	0.9, 1.6, 2.0, 2.3, 2.9	20	11	
3	18.0, 19.6, 21.2	1.5	2	10, 14, 20, 25, 30	11	
4	18.0, 18.8, 19.6, 20.4, 21.2	1.5	2	20	11	

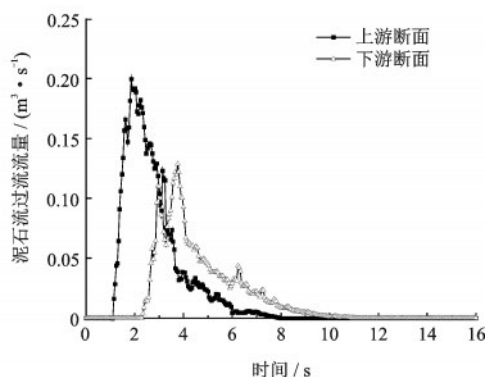
2 试验结果分析

2.1 窗口坝调控黏性泥石流的流量过程分析

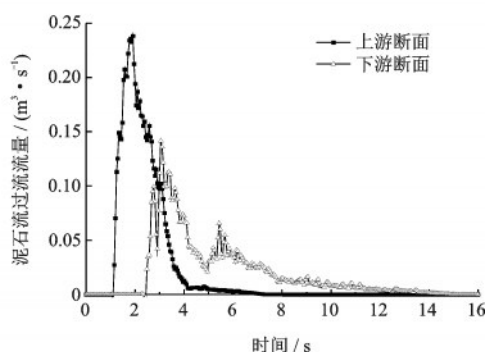
泥石流过流流量是泥石流防治工程结构设计中的重要依据。泥石流流量过程曲线是泥石流过流过程的最直观反映,通过泥石流流量过程曲线不仅可以直接得到拦砂坝对泥石流峰值流量的调控情况,还能通过其曲线过程揭示拦砂坝对泥石流的流量调控特征,从而为拦砂坝在泥石流防治体系中合理有效的使用提供科学参考,对分析拦砂坝对泥石流的防治效果有十分重要的作用。受实验测量条件限制,以往的研究中主要是对泥石流的峰值流量进行分析,而较难得到泥石流的流量过程。本研究利用泥位计可获取泥石流过流时的实时泥位,并结合视频解译获取泥石流的过流流速,即可得到泥石流的流量过程曲线。根据水槽实验结果,本文绘制了不同工况条件下,泥石流过窗口坝的流量过流曲线,并对窗口坝上下游的流量过程进行了对比分析。

研究表明,窗口坝对黏性泥石流的流量调控效果与泥石流性质以及窗口坝的开口参数都有密切关系,且直接反映在泥石流流量过程曲线的峰值流量削减效果和延时效应上。如图4~图7所示,在试验条件下,窗口坝对黏性泥石流的流量过程都起到了一定的调节作用,但受泥石流性质、窗口坝开口参数等因素影响明显。

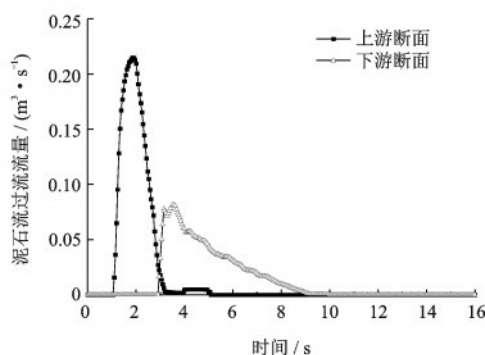
图4给出的是窗口坝拦挡不同性质泥石流时的流量过程曲线。由图分析可知,在曲线形态上,泥石流容重越高,泥石流流量过流曲线更趋于平滑;不同容重的泥石流其泥石流峰值流量也有较大差异,上游峰值流量主要随泥石流容重的增加呈现先增加后减小趋势,而下游流量则主要呈减弱趋势,且容重越大,窗口坝上下游泥石流峰值流量差值越



(a) 容重为18.0 kN/m³的泥石流流量过程线



(b) 容重为19.6 kN/m³的泥石流流量过程线



(c) 容重为21.2 kN/m³的泥石流流量过程线

图4 不同容重泥石流的流量过程曲线

Fig.4 Discharge with different debris flow density

注: $b = 60 \text{ mm}$, $h/b = 2$, $\lambda = 20\%$, $\theta = 11^\circ$

大,即窗口坝对泥石流的峰值流量削减情况越明显。分析认为泥石流容重影响的是泥石流的整体

性,泥石流容重越低,泥浆与块石胶结作用越弱,运动时泥石流飞溅作用强烈,故其流量曲线更为紊乱;而随着泥石流容重的增加,泥石流整体性增强,与窗口坝作用后受窗口坝阻碍作用也更大,因而流量降低情况更明显。

图5~7为不同开口参数情况下,容重为21.2 kN/m³的泥石流的流量过程变化情况。如图所示,随着窗口坝相对开口宽度、高宽比、开口率的增加,窗口坝下游泥石流峰值流量整体呈增加趋势,但受其开口参数影响,其延时效应有较大差异,且主要反映在过流历时上。如当窗口坝相对开口宽度为1.0时(图5),窗口坝虽表现出较高的峰值流量削减效果,下游峰值流量仅为0.028 m³/s,但其过流历时很短,仅为2 s左右,结合现场视频解译发现,这是因为泥石流在过流时窗口坝发生了全闭塞,即泥石流一过流,窗口坝开口即被泥石流所淤满,导致泥石流无法通过窗口坝开口排出,由于该种开口条件下窗口坝开口无法对泥石流进行有效排泄,因而可认为其综合调控效果较差;而当窗口坝开口高宽比为

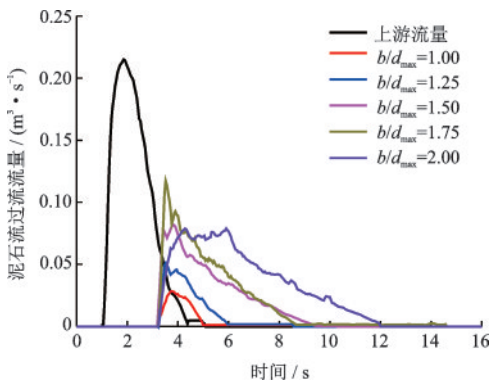


图5 不同相对开口宽度条件下泥石流流量过程线
Fig.5 Discharge curve of different relative opening width

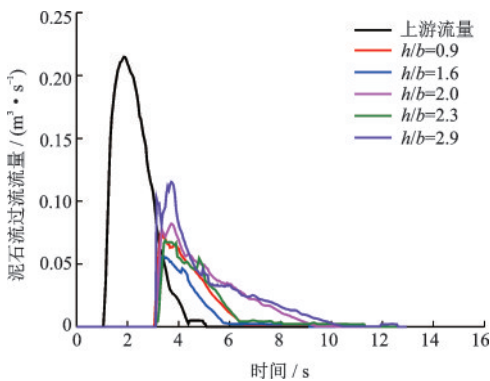


图6 不同开口高宽比条件下泥石流流量过程线
Fig.6 Discharge curve of different aspect ratio

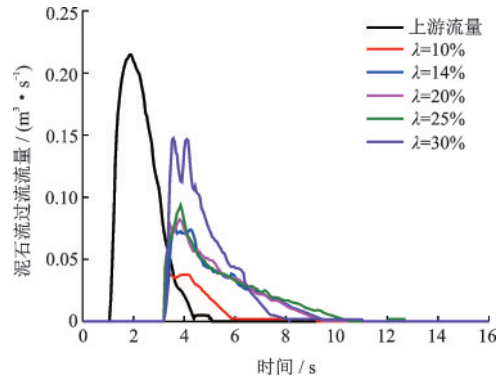


图7 不同开口率条件下泥石流流量过程线
Fig.7 Discharge curve of different area ratio

2时(图6),虽然其峰值流量仍然较高,峰值流量可达0.082 m³/s,但由于其能保持较高的过流历时,过流历时可达6 s,结合现场试验结果,此时窗口坝为半闭塞,多数窗口坝开口处于可过流状态,故窗口坝仍然具有较强调控后续泥石流的能力,故其综合流量调控能力较好。

2.2 窗口坝调控黏性泥石流的效应分析

通过上文分析可以看出,窗口坝对黏性泥石流的流量调节作用主要表现在对泥石流峰值流量的调节和延时效果两个方面上,由于窗口坝对泥石流的延时界限较难准确界定,故本部分只对泥石流峰值流量调控效果进行分析。为进一步探究窗口坝对泥石流峰值流量的调控效果,本文结合前人的研究成果^[3],以泥石流峰值流量削减率为评价指标,对不同条件下的泥石流峰值流量削减率进行了研究,泥石流峰值流量削减率由下式表示:

$$\delta = \frac{Q_f - Q_b}{Q_f} \times 100\% \quad (1)$$

式中, δ 为泥石流峰值流量削减率; Q_f 为泥石流过坝前固定监测断面处的流量; Q_b 为泥石流过坝后固定监测断面处的流量。峰值流量削减率 δ 值越大,说明泥石流过坝后其峰值流量降低情况越明显,即窗口坝对泥石流的峰值流量调控作用也越明显。

2.2.1 窗口坝开口参数对泥石流峰值流量削减率的影响

试验结果表明,不同开口参数的窗口坝对黏性泥石流的峰值流量均能起到较大程度的削减作用,且首先表现在窗口坝的开口宽度上(图8),在拦挡黏性泥石流时,泥石流峰值流量削减率随窗口坝相对开口宽度的增加呈减小趋势,但当窗口坝开口宽度大于1.5时,窗口坝开口宽度对泥石流峰值流量

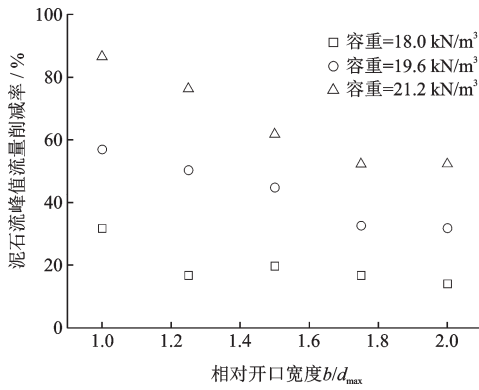


图8 峰值流量削减率与相对开口宽度关系

Fig.8 Relationship between the peak discharge reduction rate and relative opening width

的削减影响减弱,且在较低容重时,窗口坝开口宽度对泥石流峰值流量削减率的影响不明显。分析认为,窗口坝的开口宽度主要限制泥石流中粗颗粒的过流,当窗口坝开口宽度较小时,泥石流易对窗口坝开口形成闭塞,导致窗口坝有效出流面积减小,此时窗口坝虽表现有较高的峰值流量削减效果,但由于窗口坝较高的闭塞情况而易影响后续泥石流的过流,因而其调控效果一般,这也与前文2.1节分析结果有较好对应。而当窗口坝开口宽度增大到一定程度时,泥石流对窗口坝开口引起的闭塞作用减弱,此时限制泥石流过流的主要是窗口坝的开口面积,故单纯增大窗口坝开口宽度对泥石流峰值流量削减情况影响不明显。

图9为泥石流峰值流量削减率与窗口坝开口高宽比之间的关系。结果表明泥石流峰值流量削减率与窗口坝开口高宽比整体也呈负相关,但在高容重时表现出随泥石流容重的增加而呈现先增加后减小的趋势。分析认为,在保证开口宽度不变的前

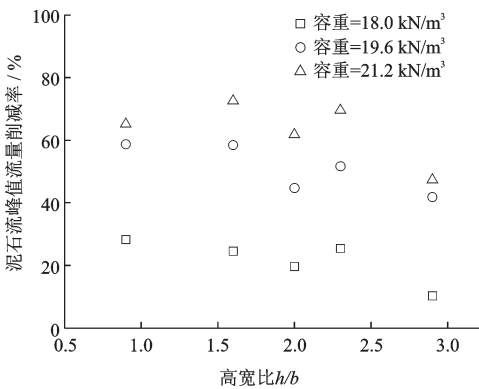


图9 峰值流量削减率与开口高宽比关系

Fig.9 Relationship between the peak discharge reduction rate and aspect ratio

提上,窗口坝开口高宽比主要改变的是泥石流过流时的竖向约束,当窗口坝开口高宽比很低时,同样会引起窗口坝开口的高度闭塞情况,导致窗口坝有效出流面积减小,泥石流越坝溢流现象加剧,从而出现泥石流峰值流量削减率减小的现象。

窗口坝开口率对泥石流峰值流量的影响研究是在不改变窗口坝开口宽度和高宽比的情况下,通过改变窗口坝的开口个数来达到限制泥石流的过流情况。图10表明泥石流峰值流量削减率与窗口坝开口率呈现显著的线性负相关。改变窗口坝开口率影响的只是窗口坝的有效过流面积,而不影响泥石流在单个开口中的过流情况,窗口坝开口率越大,则单位时间内泥石流通过窗口坝的过流流量也越大,从而导致泥石流峰值流量削减率也随之减小。

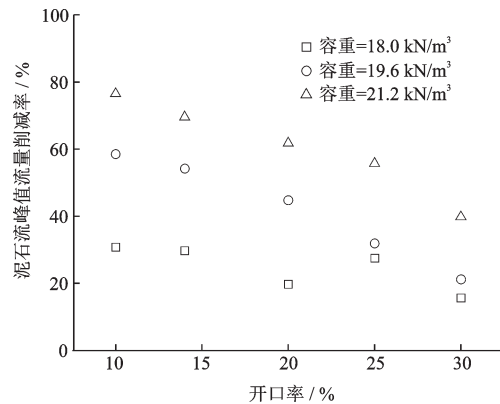


图10 峰值流量削减率与开口率的关系

Fig.10 Relationship between the peak discharge reduction rate and aperture opening ratio

2.2.2 泥石流容重对泥石流峰值流量削减率的影响

泥石流容重也是泥石流防治工程在设计过程中需重点考虑的因素。为分析泥石流容重对泥石流峰值流量削减率的影响,该部分保证窗口坝开口参数不变,配置了容重为18.0、18.8、19.6、20.4、21.2 kN/m³的泥石流进行了试验。

试验结果表明(图11),容重越大,泥石流峰值流量削减率越高。分析认为,泥石流容重对泥石流峰值流量的影响主要取决于两个方面。一方面,泥石流容重越高,泥石流中细颗粒与块石的胶结作用也越强,从而增大泥石流中固体颗粒的表观尺寸,造成窗口坝闭塞程度增加,可出流面积减小,进而影响峰值泥石流流量削减;而另一方面,增大泥石流容重,也增强了泥石流的整体性,泥石流整

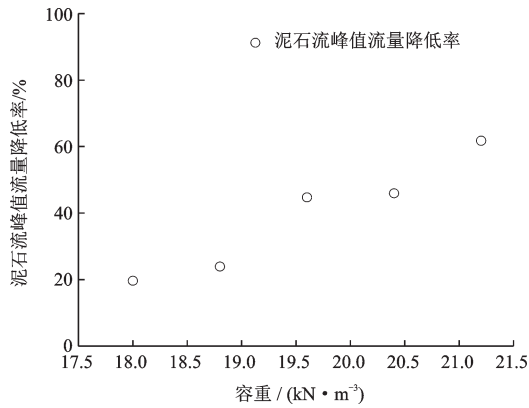


图 11 峰值流量削减率与泥石流容重的关系

Fig.11 Relationship between the peak discharge reduction rate and debris flow density

体性越强,其需要克服自身阻力(主要是黏聚力)运动也更为困难,试验中发现,随着泥石流容重的增加,泥石流初始过流流速也呈先增大后减小的趋势,且高容重泥石流与窗口坝碰撞后基本不产生飞溅现象,流速迅速降低,消能作用明显。

2.3 窗口坝对黏性泥石流调控过程的数值模拟分析

窗口坝对黏性泥石流的调控不同于传统的透过型拦砂坝,传统的透过型拦砂坝主要是利用坝体内部设置的格栅破坏泥石流颗粒间胶结的整体性,从而对泥石流颗粒粒径起到调节作用。而对于黏性泥石流而言,由于其整体性强,采用传统的透过

型拦砂坝进行拦挡易发生堵塞现象,故其调控作用不明显^[16]。而窗口坝由于开口一般较大,对泥石流中一定粒径以下的颗粒基本不起拦挡作用^[17],主要是利用窗口坝坝身的实体部分,通过对来流泥石流进行拦挡使其于坝后淤积,再通过窗口坝开口对泥石流进行有控制过流,从而达到对黏性泥石流的调控效果。为进一步探究窗口坝对黏性泥石流的内在调控机制,本文以容重为 19.6 kN/m³的泥石流过相对开口宽度为 1.5、高宽比为 2、开口率为 20% 的窗口坝的为例,利用 Flow-3d 软件对该工况条件下的泥石流的过流过程进行了模拟,并对泥石流过窗口坝时的细部过流参数进行了初步分析。

图 12、13 给出的即为不同时刻窗口坝中轴面和窗口坝上游 2 cm 正断面处泥石流的流速矢量图。由图分析可知,泥石流经窗口坝实体部分的拦挡碰撞后,泥石流过流流速急剧衰减(图 13, $t=1.4$ s),泥石流龙头被分成两部分(图 12, $t=1.4$ s),一部分泥石流直接爬高越坝出流,而其他部分则主要通过窗口坝开口出流,受窗口坝坝高以及开口等消能结构影响,两部分出现过流时差,使得泥石流龙头部分错峰出流。故窗口坝主要是通过其实体部分拦挡消能,分离泥石流过流龙头,并使其出现过流时差,从而达到削减泥石流峰值流量的效果。而当泥石流爬高后,受后续泥石流来流动能不足的影响,泥石流于坝后淤积回水(泥石流向水槽上游运动),出

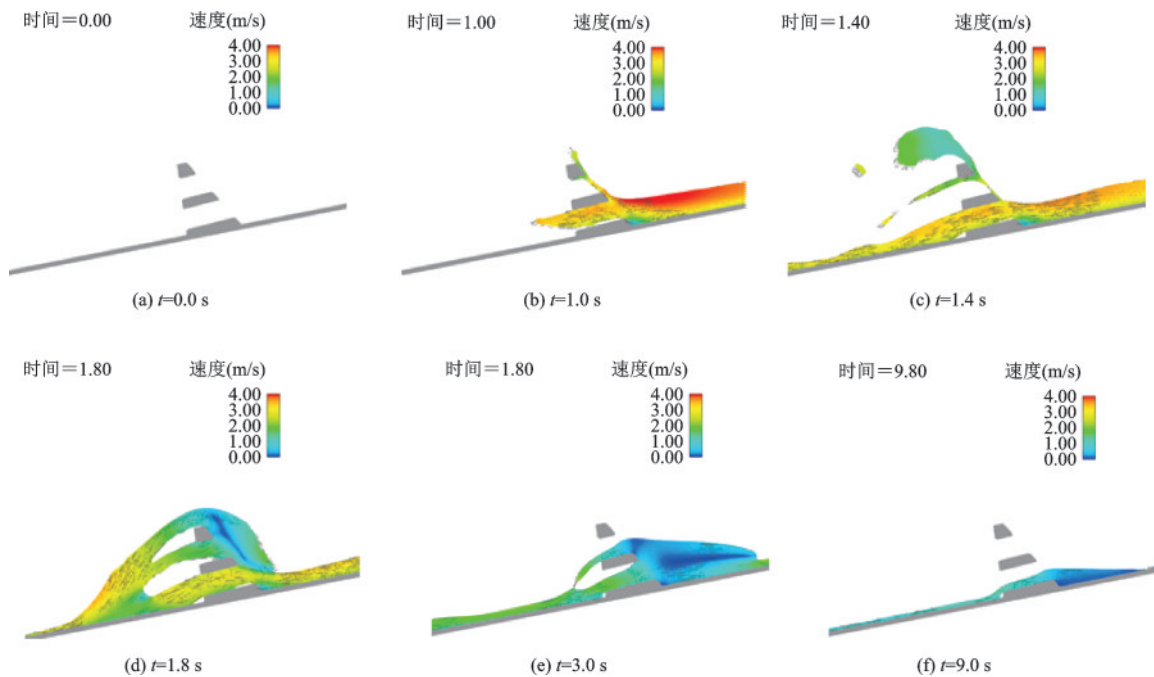


图 12 不同时刻窗口坝侧部泥石流流速矢量过程

Fig.12 The velocity vector process of debris flow at different time in side view of the dam

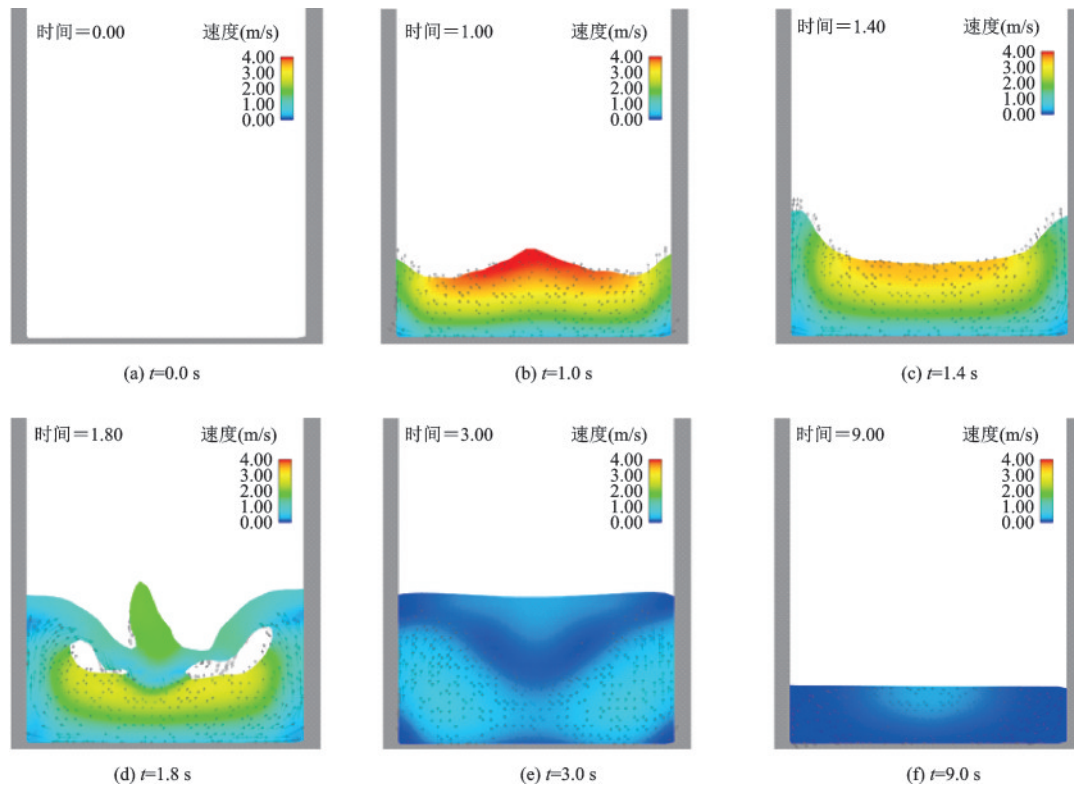


图 13 不同时刻窗口坝上游泥石流流速矢量过程断面

Fig.13 The velocity vector process of debris flow at different time in front view of dam

现“负流速现象”(图 13, $t=1.8\text{ s}$, 3.0 s),之后泥石流在窗口坝库内稳定淤高,并出现流速“重分布”(图 13, $t=3\text{ s}$),此时库内泥石流流速几乎为 0,在重力作用下,窗口坝通过开口将泥石流进行有控制排出。为此,窗口坝对泥石流流量的调控主要在于窗口坝具有较大库容,当泥石流来流时,窗口坝利用其实体部分对上游来流泥石流进行拦挡,降低泥石流过流流速,分离龙头,并经坝库调节后利用其开口对泥石流进行有序排出,以此来达到削减泥石流洪峰流量,延长泥石流过流历时的效果。

3 结论与讨论

通过模型试验并结合数值模拟结果,对窗口坝对黏性泥石流的流量调控特征及过程进行了研究,得到以下结论:

(1)窗口坝对黏性泥石流的流量调控效果不仅表现在对黏性泥石流峰值流量的调节能力上,还作用在窗口坝对黏性泥石流过流的延时效应上,且其延时效应与窗口坝开口的闭塞程度有关。

(2)不同开口参数的窗口坝对不同性质的泥石流的峰值流量均能起到一定的调节作用。泥石流

峰值流量削减率与窗口坝相对开口宽度、高宽比、开口率整体呈负相关,与泥石流容重整体呈正相关,但窗口坝对较低容重泥石流的峰值流量调控效果不明显。

(3)窗口坝调控黏性泥石流是一个复杂的动力学过程。基于数值模拟,初步探讨了窗口坝对黏性泥石流的内在调控过程。分析认为,窗口坝对黏性泥石流的流量调控过程是窗口坝实体部分和开口部分共同作用的结果。窗口坝通过其实体部分拦挡泥石流,能减低泥石流流速,分离泥石流龙头,形成过流时差,并使泥石流于窗口坝库内发生流速重分布,最后再利用窗口坝开口对泥石流进行有控制的排导,从而发挥窗口坝对黏性泥石流的峰值流量削减调控作用和延时效果。

(4)窗口坝对黏性泥石流的流量调控过程是一个多因素共同作用的结果,除本文所研究的开口宽度,高宽比、开口率等参数外,其开口位置、开口个数都对泥石流的过流过程产生较大影响。

参考文献:

[1] 李德基.泥石流减灾理论与实践[M].北京:科学出版

- 社,1997:150-169.
- Li D J. Theory and practice of debris flow disaster mitigation[M]. Beijing: Science Press, 1997:150-169. (in Chinese)
- [2] Watanbe M, Mizuyama T, Uehara S. Review of debris flow counter measure facilities[J]. Journal of the Japan Erosion Control Engineering Society, 1980,115:40-45.
- [3] Mizuyama T, Kobashi S, Mizuno H. Control of passing sediment with grid grid-type dams [J]. Journal of the Japan Erosion Control Engineering Society, 1995, 47(5): 8-13.
- [4] 李明晃,江永哲. 立体格子坝防治土石流功效之研究[J]. 农林学报,1989,38(2):191-216.
- Li M H, Jiang Y Zh. Study on the efficiency of stereo grid dam in controlling earth-rock flow [J]. Journal of Agriculture and Forestry, 1989, 38(2): 191-216. (in Chinese)
- [5] 韩文兵. 泥石流缝隙坝拦砂性能基础研究[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所,2007.
- Han W B. Fundamental study on intercepting sediment capability of silt dam in preventing debris flow [D]. Chengdu: Graduate University of Chinese Academy of Science,2007. (in Chinese)
- [6] 贾世涛,崔鹏,陈晓清,等. 拦沙坝调节泥石流拦挡与输移性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(11):2338-2345.
- Jia Sh T, Cui P, Chen X Q, et al. Experiment study of regulating barrage and transportation properties of debris flow by silt-trap dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2338-2345. (in Chinese)
- [7] 林雪平,游勇,柳金峰,等. 泥石流拦砂坝溢流口过流能力实验研究[J]. 自然灾害学报,2015,24(1):9-14.
- Lin X P, You Y, Liu J F, et al. Experimental study on discharge capacity of spillway of check dam for debris flow[J]. Journal of Natural Disasters,2015,24(1):9-14. (in Chinese)
- [8] Kim N, Nakagawa H, Kawaike K, et al. Estimation of debris flow discharge coefficient considering sediment concentration[J]. International Journal of Sediment Research, 2018,34(1):1-7.
- [9] Silva M, Costa S, Cardoso A H. Effect of plan layout on the sediment control efficiency of slit-check dams for stony type debris flows mitigation[J]. River Basin Management, 2015,197: 259-270.
- [10] Silva M, Costa S, Canelas R B, et al. Experimental and Numerical Study of Slit-check Dams [J]. 2016, 1(2): 107-118.
- [11] 王小军,陈晓清,谢湘平,等. 泥石流拦砂坝排泄孔优化及其数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(9):28-34.
- Wang X J, Chen X Q, Xie X P, et al. The optimization of debris flow check dam drainage hole and its numerical simulation research [J]. Science Technology and Engineering. 2016, 16(9): 28-34. (in Chinese)
- [12] 余斌. 黏性泥石流的平均运动速度研究[J]. 地球科学进展,2008,23(5):524-532.
- Yu B. Study on the mean velocity of viscous debris flow [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 524-532. (in Chinese)
- [13] 舒安平,费祥俊. 黏性泥石流运动流速与流量计算[J]. 泥沙研究,2003,3:7-11.
- Shu A P, Fei X J. Calculation for velocity and discharge of the viscous debris flow [J]. Journal of Sediment Research, 2003,3:7-11. (in Chinese)
- [14] 周必凡,李德基,罗德富. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社,1991:96-178.
- Zhou B F, Li D J, Luo D F, et al. Debris flow mitigation guide[M]. Beijing: Science Press, 1991: 96-178. (in Chinese)
- [15] Itoh T, Horiuchi S, Mizuyama T, et al. Hydraulic model tests for evaluating sediment control function with a grid-type Sabo dam in mountainous torrents[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(4):511-522.
- [16] 蒋忠信. 震后泥石流治理工程设计简明指南[M]. 成都:西南交通大学出版社,2014:71-121.
- Jiang Zh X. The brief guide to the post-earthquake debris flow control engineering design [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press,2014:71-121. (in Chinese)
- [17] Huebl J, Fiebiger G. Debris-flow mitigation measures [M] Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 445-487.
- (本文责编:周小潭)