

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202000440



本刊网刊

“阶梯+消力墩”型排导槽调控泥石流流性能研究

栗 帅^{1,2,3}, 陈晓清^{1,2,3,4}, 陈剑刚^{1,2,4*}, 游 勇^{1,2}, 陈华勇^{1,2,4}, 赵万玉^{1,2}

(1.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 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘 要:排导槽在泥石流减灾防灾中扮演着重要角色,但以往的排导槽难以解决近些年出现的大坡降沟道泥石流灾害治理难题。为此,提出了一种“阶梯+消力墩”排导槽以期解决这一难题。通过水槽试验,从泥石流流态、密度、颗粒粒径、泥深、速度和冲击力等方面评估3种消力墩体型(正方形、梯形和三角形)排导槽调控泥石流的效果。结果表明:泥石流在排导槽内呈现波状流态,消力墩把泥石流挑向空中,对泥深产生了放大效应,且正方形消力墩放大效果最明显,梯形消力墩放大效应最弱,可以显著降低泥石流流速;泥石流经过“阶梯+消力墩”结构的调控后,在出口处的密度有所降低,固相颗粒粒径减小,且梯形消力墩表现出最强的拦粗排细能力;梯形消力墩上承受的冲击压强大于三角形消力墩上的冲击压强,第1个消力墩上冲击压强最大的体型为正方形消力墩体型,第2、3个消力墩上冲击压强最大的体型为梯形消力墩体型。

关键词:排导槽;泥石流;水槽试验;调控效果

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)03-0068-09

Regulation Performance of Debris Flow by “Step+ Baffle” Drainage Channel

LI Shuai^{1,2,3}, CHEN Xiaoqing^{1,2,3,4}, CHEN Jiangang^{1,2,4*}, YOU Yong^{1,2}, CHEN Huayong^{1,2,4}, ZHAO Wanyu^{1,2}

(1.Inst. of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2.Key Lab. of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3.Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sci., Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The drainage channel plays a key role in the mitigation of debris flow. However, the traditional drainage channels are difficult to consider the problem of debris flow management in a large slope gully occurred in recent years. Therefore, a type of “step + baffle” drainage channel was proposed to deal with this question. Three geometric shapes of baffles (square, triangle, and trapezoid) were designed to test their performances for regulating the flow patterns, flow density and depth, grain size, velocity, and impact pressure based on the flume experiments. The results showed that the debris flow was lifted into the air by the baffles, and a wavy flow pattern generated in the drainage channel. Although the amplification effect on the flow depth was produced by the baffles, it can significantly reduce the debris flow velocity. The amplification effect of the square baffles was the most obvious, and the trapezoidal baffles had the weakest amplification effect. After the regulation of “step + baffle” systems, the density of debris flow and the particle size of solid phase at the exit decreased, and the trapezoidal baffle showed the strongest ability of blocking coarse and discharging fine. The impact pressure on the trapezoidal baffles was larger than that on triangular baffles. The first baffle of square baffle drainage channel endured the largest impact pressure of debris flow. The impact pressures on the second and third baffles in trapezoidal baffle drainage channel were both the largest among the three types of drainage channels.

Key words: drainage channel; debris flow; flume test; regulation effectiveness

收稿日期:2020-05-27

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金项目(41925030);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23090403);四川省科技计划资助项目(2019YJ0009);中国科学院西部青年学者A类项目(Y9R2140148)

作者简介:栗 帅(1987—),男,副研究员,博士。研究方向:泥石流流体力学及防灾减灾工程。E-mail: lishuai@imde.ac.cn

*通信作者:陈剑刚, E-mail: chenjg@imde.ac.cn

网络出版时间:2021-04-13 13:32:00

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20210413.0845.002.html>

泥石流是山区常见的一种地质灾害,近年来,在气候变暖、极端降雨、地震频发的背景下,中国西南山区泥石流发生的频率和规模呈现出明显增加的趋势,对山区人民生命财产、道路桥梁、工程设施产生了极大的危害。开展泥石流防灾减灾工作对于中国西部地区经济社会发展是一项重要且紧迫的任务^[1]。排导槽作为泥石流综合治理“稳、拦、排”三大方针中“排”措施的主要载体,一直在治理中扮演着举足轻重的角色^[2-4],在治理泥石流的实践中得到了大量的应用(图1)。



(a) 云南省达朵沟



(b) 四川省罗家沟

图1 排导槽在泥石流治理实践中的应用

Fig. 1 Application of drainage channel in debris flow mitigation engineering

排导槽的首要功能是把泥石流约束在槽内并顺畅地排泄到下游地区,保护堆积区居民和设施免遭泥石流危害^[5]。基于这一原则,学者在多年的防灾减灾实践中做了大量的探索研究^[6],提出了著名的东川槽和V型槽。东川槽是一种带肋槛的软基消能型排导槽,以肋槛护底、固坡,利用泥石流与沟床物质的掺混达到消减能量的目的,主要适用于沟床冲刷严重,需要严格控制沟道形态的地区。V型槽是全断面衬砌型排导槽^[7-10],横断面具有窄、尖、深的特点,利用“束水攻砂”的理念快速排导泥石流,主要应用于沟谷狭窄、沟床易淤积且有广阔的停淤场或有足够输运能力的主河。这两种类型的排导槽在治理常规泥石流的实践中发挥了重要的作用,也取得了良好的效果。

由于泥石流具有显著的地域差异性,加上不断出现的一些新变化,如大坡降的沟道、高频率大型泥石流等^[11-12],对上述排导槽的治理效果产生了一定的影响^[13]。针对泥石流排导槽存在的问题,不同学者提出了多种排导槽型式,如以消能为理念的梯-潭型

排导槽^[14-15]及基于梯-潭系统的挡流式排导槽^[16]、箱体消能型排导槽^[17-18],兼顾消能特性和沟道上下游生物连通性的交错齿槛型排导槽^[19-20]与对称齿槛型排导槽^[21]等。针对这些新型排导槽,主要集中在研究了排导槽内泥石流运动特性(如泥深和流速),排导槽的断面设计、底部阻力、消能效率等方面,为泥石流的防治提供了重要参考价值。

受到这些新型排导槽研究的启发,借鉴水利工程中的台阶式溢洪道泄洪消能思路,作者提出了一种“阶梯+消力墩”型排导槽,并对其阶梯与消力墩表面的泥石流冲击力特征进行了初步研究^[22]。本文进一步对这种新型排导槽进行综合性研究,主要从排导槽内泥石流流态、密度、固相颗粒大小、泥深、运动速度和冲击压强等参数的变化,定量分析不同消力墩体型(梯形、三角形和正方形)在调控泥石流方面的表现,期望给出全面客观的评价。

1 模型试验方法

1.1 水槽试验装置及测试仪器

试验模型装置由储料箱、水槽、尾料池、钢管支架、钢化玻璃及摄影设备组成,如图2所示。水槽尺寸为长×宽×高=6.00 m×0.45 m×0.40 m,水槽两侧由钢化玻璃组成,水槽及料斗固定于钢管支架上;尾料池尺寸为长×宽×高=1.2 m×1.2 m×0.8 m;试验水槽坡度取8.5°。试验中拟选取梯形、三角形和正方形3种体型的消力墩(图2)。消力墩从水槽起始端以下1.80 m处开始以0.27 m的间距,依次布置5个(编号为1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]),并用螺栓固定于水槽底板上。

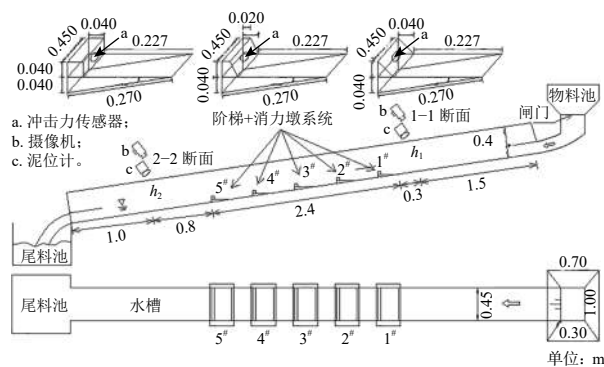


图2 试验装置布置

Fig. 2 Layout of experimental set-up

沿着泥石流的流动方向设置两个监测断面(图2),分别为水槽内的1[#]消力墩之前0.30 m处(1-1断面)和5[#]消力墩之后的0.80 m处(2-2断面)。在每个监测断面正上方分别安装摄像机(SONY FDR-AX40, 1 440×1 080 pixels, 25 fps)和激光泥位计(Leuze, ODSL 30/V-30M-S12, 10 Hz),分别用于记录泥石流的运动速度及泥深变化。在每个消力墩的迎水面上安装冲击力

传感器(LH-Y127B, 2 000 Hz), 编号依次为Pa1、Pa2、Pa3、Pa4、Pa5。

1.2 试验物料组成及方案

试验物料取自云南东川蒋家沟泥石流堆积区的松散堆积物原样, 经过晾晒干燥后, 试验前, 首先使用20 mm×20 mm的钢筛对土样进行筛分, 剔除直径大于20 mm的颗粒, 处理后的土样颗粒级配曲线($d_{50}=5.1$ mm)如图3所示。试验的泥石流物料是通过把固相土样与水混合制成, 在确保每组试验的固相物料质量不变的情况下, 改变含水量的大小, 考虑了5种泥石流密度(表1)。每组试验开始前, 把配置好的泥石流样品装入储料箱中, 并用手持式电动搅拌器充分搅拌, 确保均匀; 然后, 打开储料箱底部的闸门, 泥石流在重力的作用下, 自由流入水槽中。

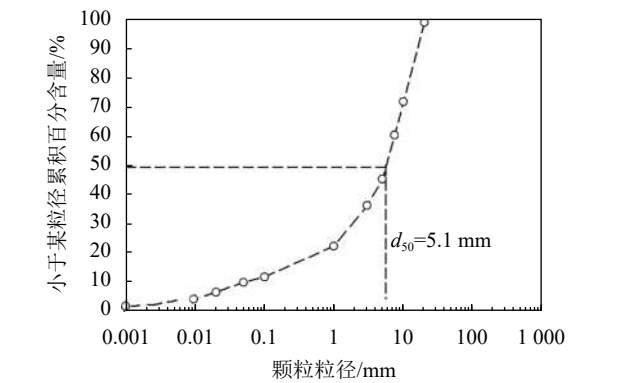


图 3 固相颗粒物质级配曲线
Fig. 3 Cumulative grain size distribution of the solids adopted

表 1 试验配置的泥石流样品参数
Tab. 1 Parameters of debris flow samples

编号	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	固相体积分数 C_s	弗鲁德数 F_r
M1	1833	0.48	3.34
M2	1891	0.51	3.29
M3	1959	0.55	3.26
M4	2037	0.59	3.18
M5	2129	0.65	2.89

1.3 比尺效应

实际排导槽中的泥石流运动是非常复杂的3维运动过程, 在多数情况下, 难以单纯用数理分析得出满意的结果, 因此必须依赖于试验。水槽模型试验是当前研究泥石流问题的有效手段之一, 其优点主要有: 可以控制主要试验变量而不受环境条件的限制与影响; 便于改变试验参数进行对比试验; 简便可操作性强且经济性好。模型试验的主要问题是存在比尺效应, 小尺度的水槽试验结果与野外真实泥石流事件有所差异^[23-24]。事实上, 水槽试验都是属于2维研究的范畴, 无法完全还原真实条件下的3维现象。

实践证明, 只要遵守模型试验规程, 选择合适的比尺和试验方法, 比尺效应所带来的误差是可控的, 对试验结果影响是有限的。

为了减小比尺效应问题, 常常通过几何相似、材料相似、动力相似等原则来约束小尺度水槽试验^[25-26]。本文主要研究排导槽对泥石流的调控作用, 并非某次泥石流事件的等价缩尺试验研究, 故以材料相似(固相物料来源于野外真实的蒋家沟泥石流堆积扇)为出发点, 考虑泥石流动力相似条件, 按照重力相似准则设计水槽模型。其中, 动力相似条件, 常采用表征流动物质的惯性力与重力比值的无量纲弗鲁德数 F_r 来衡量, 要求小尺度水槽试验的泥石流 F_r 与天然泥石流的 F_r 保持一致。 F_r 用式(1)表达:

$$F_r = v/(gh)^{0.5} \tag{1}$$

式中, v 为速度, g 为重力加速度, h 为流动深度。

根据文献^[27-28]的研究, 自然界中已发生的泥石流的 F_r 大都小于5.0。试验中, 水槽上游的1-1断面处的来流泥石流 F_r 值基本上处于 $2.8 < F_r < 3.4$ 的范围(表1), 均位于野外泥石流事件的 F_r 范围内, 意味着试验研究的成果在某种程度上具有一定的代表性。

2 试验结果分析

2.1 泥石流形态

泥石流在排导槽中的流态是衡量排导槽功能的基本指标之一, 以泥石流密度为 1833 kg/m^3 时的泥石流运动过程来阐述不同消力墩体型的排导槽对泥石流流态的调控情况(图4)。以泥石流流动到1-1断面的时间作为起始时刻 $t=0$, 描绘不同时刻的泥石流表面轮廓, 如图4中的红色虚线所示。

由图4可以看到: 对于3种不同体型的排导槽, 泥石流在 $t=0$ 时的流态是一致的; 当泥石流运动到1#消力墩时, 被其挑向空中, 越过一定数量的“阶梯+消力墩”后重新跌落到下游的消力墩上, 然后又被迫挤压抬升到一定的高度(但低于1#消力墩对泥石流的抬升高度), 再次跌落下来, 如此重复下去, 在排导槽内形成了强烈紊动的波状流动。这种由“阶梯+消力墩”引起的高度紊乱的流态, 往往使得泥石流翻越排导槽的边墙, 可能导致泥石流对排导槽外部区域的次生危害。这意味着“阶梯+消力墩”排导槽的边墙高度可能要比传统排导槽的边墙高度修建的更高一些, 才能避免泥石流翻越边墙而造成危害。

另外, 比较消力墩抬升泥石流的最大跃起高度, 可以发现: 正方形、三角形、梯形消力墩抬升泥石流的最高高度(以侧边墙顶部为基准)依次约为0.45、0.22和0.15 m。分析其原因, 可能是与消力墩迎水面

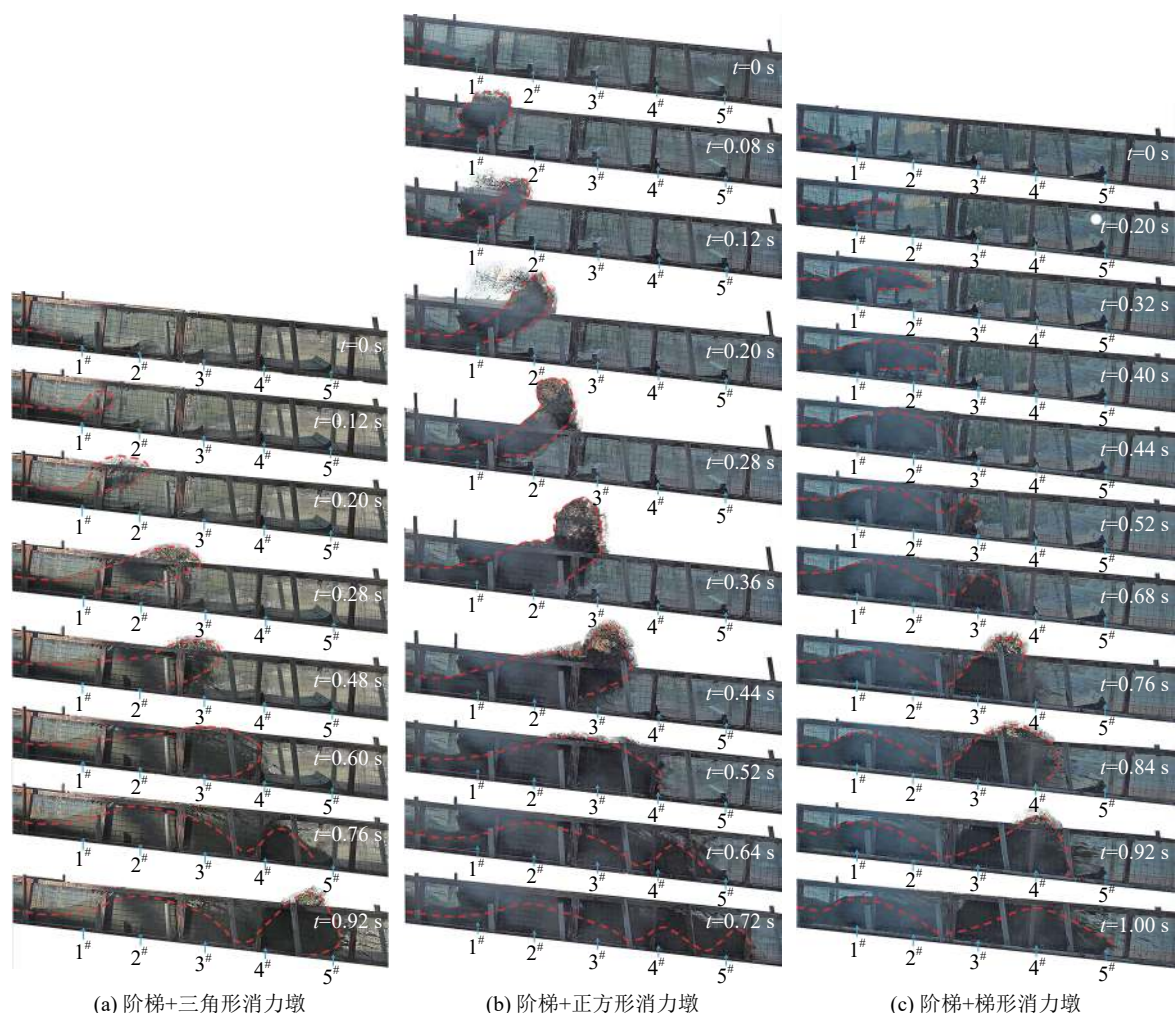


图4 泥石流密度为 $\rho=1833 \text{ kg/m}^3$ 时,不同“阶梯+消力墩”型排导槽内泥石流运动过程

Fig. 4 Progression profiles of debris flows ($\rho=1833 \text{ kg/m}^3$) in different types of drainage channels

角度有关(图5)。由图5可见:正方形消力墩的迎水面角度($\alpha=90.0^\circ$)最大,对泥石流的阻挡作用强,对泥石流的抬升主要沿着垂向向上挑起,使得跃起高度最大;梯形消力墩迎水面角度($\alpha=63.5^\circ$)比三角形消力墩迎水面角度($\alpha=45.0^\circ$)大,但泥石流遇到三角形消力墩时,流线更平滑,更容易向前跃升,导致较大的泥石流抬升高度。这种基于现象观察的推测,在“阶梯+消力墩”排导槽中强烈紊乱的泥石流流态变化过程中,还有待进一步验证。

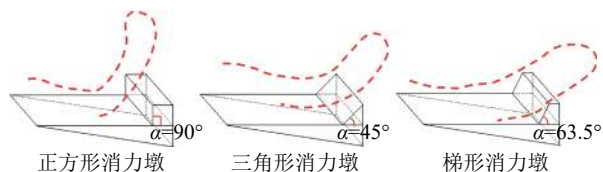


图5 3种消力墩体型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of three types of baffles

2.2 排导槽的输运能力

“阶梯+消力墩”型排导槽输运泥石流的过程,实

际上也是对泥石流本身进行再重塑的过程,主要体现在两方面:一是宏观层面的泥石流密度,二是微观层面的颗粒粒径。为此,在每组试验结束后,依次对沿程的5个“阶梯+消力墩”单元内的泥石流进行取样。采用量筒和台秤对样品进行体积和质量的测定,进而换算成密度;然后,将泥石流样品进行晾晒,并在高温烤箱(95°C)中进一步烘干;最后,按照《土工试验规程》(SL237—1999),使用符合试验筛国家标准(GB6003—85)的圆孔筛开展颗粒分析试验,绘制颗分图,插值计算得到特征粒径 d_{50} 。

不同消力墩体型排导槽对泥石流沿程密度的调控情况如图6所示。由图6可以看到:在沿程方向上,泥石流密度表现为先增大后减小的规律。 $1^\#$ 消力墩之前和水槽出口处的泥石流密度均小于初始的泥石流密度(位于图6中的虚线以下);在 $3^\#$ 和 $5^\#$ 消力墩之间的中部区域,泥石流密度均大于初始的泥石流密度(位于图6中的虚线以上)。这表明“阶梯+消力墩”排导槽对沿程运动的泥石流密度进行了重分配,降

低了上下游处的泥石流密度,增加了中部区域的泥石流密度,在总体上保持守恒的。对比不同体型排导槽,可以看到:“阶梯+三角形消力墩”型排导槽内的泥石流密度在位于1[#]消力墩之前和水槽出口处最大,

在3[#]和5[#]消力墩之间的中部区域的泥石流密度最小;“阶梯+梯形消力墩”型排导槽则表现出与“阶梯+三角形消力墩”型排导槽截然相反的泥石流密度调控效果。

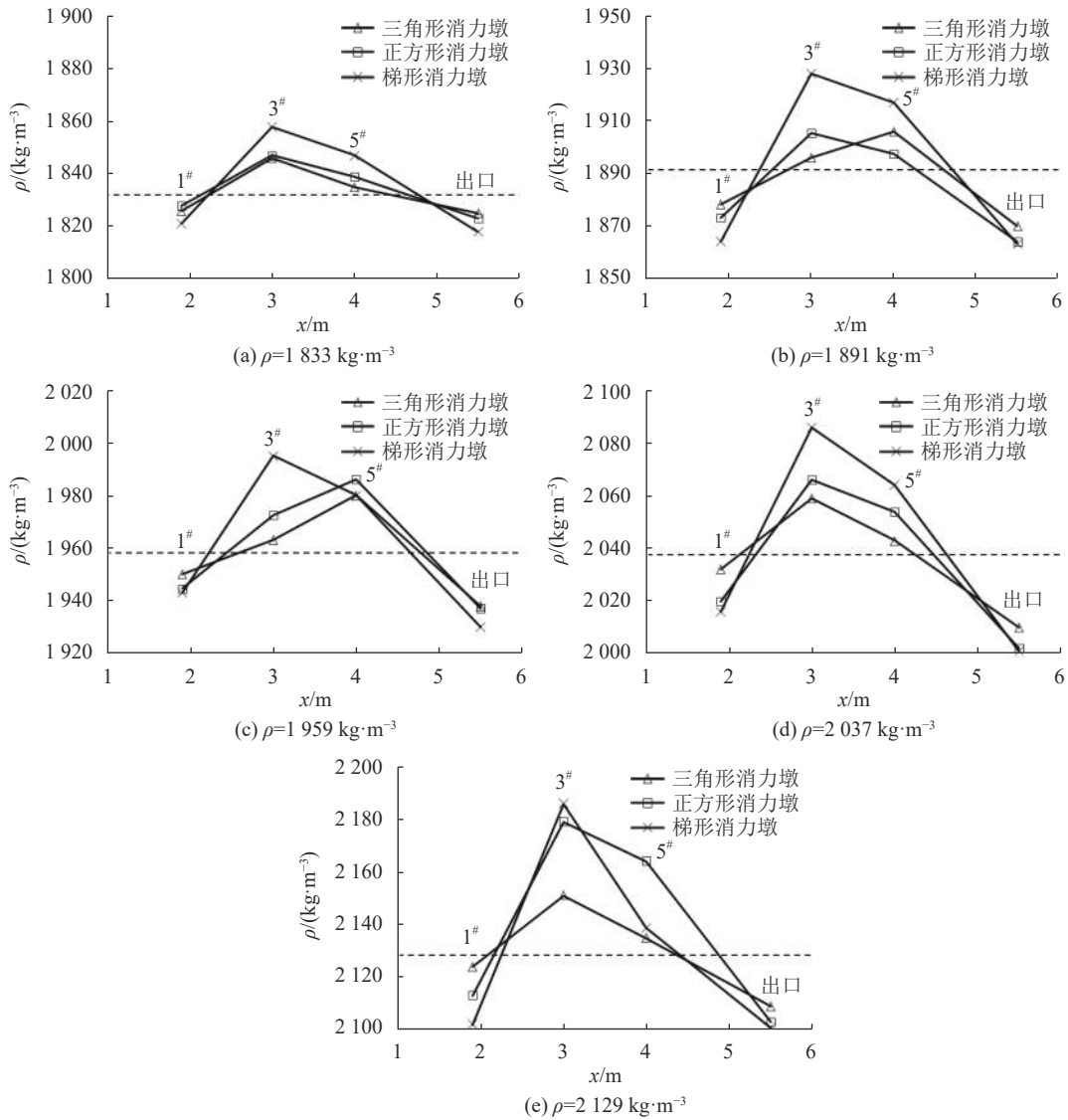


图 6 泥石流密度沿程变化情况

Fig. 6 Variation of debris flow density along the drainage channel

泥石流固液两相的组成特性,决定了其宏观密度大小受细观固液相组成比例的影响。因此,泥石流沿程不同部位的密度变化可能与排导槽对泥石流中固相物质组成的调控相关,有必要分析排导槽内沿程泥石流中的固相粒径分布情况。

引入特征参数 λ 表示排导槽对泥石流中颗粒粒径的调控情况, λ 的计算式为:

$$\lambda = \frac{d_{50}}{d_{50,ori}} \tag{2}$$

式中, d_{50} 和 $d_{50,ori}$ 分别为排导槽内不同部位采集的泥石流样品及原始泥石流中固体含量累计为50%对应

的颗粒粒径。当 $\lambda > 1$ 时,表示颗粒粗化; $\lambda < 1$ 时,表示颗粒细化。

根据式(2)计算得到的3种体型排导槽内沿程不同部位泥石流中固体颗粒特征粒径 d_{50} 的变化情况(以参数 λ 来量化)如图7所示。

由图7可知,沿泥石流的流动方向,排导槽内不同部位处的 λ 呈现先增大后减小的趋势。在1[#]消力墩之前和水槽出口处, $\lambda < 1$,表明颗粒细化;在3[#]消力墩和5[#]消力墩之间, $\lambda > 1$,意味着颗粒粗化。1[#]消力墩之前,泥石流中的粗颗粒减少,原因可能是消力墩的阻挡迫使泥石流跃离底床,发生固液分离现象,粗颗粒

的惯性作用力更大导致其跃向下游。水槽出口处粗颗粒减小的原因是由于泥石流经过沿程的消力墩调控后,泥石流中大部分粗颗粒被消力墩拦截了(从3[#]消力墩和5[#]消力墩之间颗粒粗化的结果得以佐证),流向出口的粗颗粒就相应减少了。

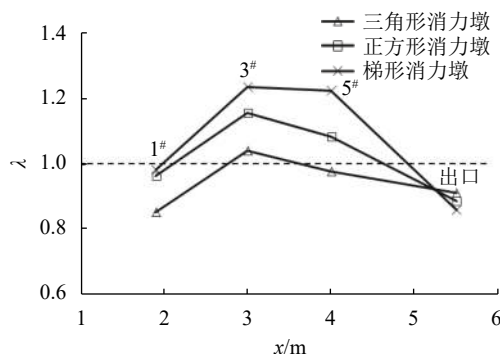


图7 泥石流的特征粒径(d_{50})沿程变化情况

Fig. 7 Variation of characteristic particle size (d_{50}) in debris flow along the path

此外,注意到:在5[#]消力墩之前, $\lambda_{\text{梯形消力墩}} > \lambda_{\text{正方形消力墩}} > \lambda_{\text{三角形消力墩}}$,表示在此范围内梯形消力墩的拦粗排细能力最强,正方形消力墩拦粗排细能力次之,三角形消力墩拦粗排细能力最弱;在水槽出口处, $\lambda_{\text{梯形消力墩}} < \lambda_{\text{正方形消力墩}} < \lambda_{\text{三角形消力墩}}$,表示三角形消力墩最终输移到下游的颗粒粒径最粗,正方形消力墩最终输移到下游的颗粒粒径次之,梯形消力墩最终输移到下游的颗粒粒径偏细。

综上所述,“阶梯+梯形消力墩”排导槽中部区域拦截的颗粒粒径较粗,而排放到下游的颗粒粒径较细;“阶梯+三角形消力墩”排导槽中部区域拦截的颗粒粒径较细,而排放到下游的颗粒粒径较粗。因此,从排导槽对颗粒粒径调控的角度看,“阶梯+梯形消力墩”排导槽的拦粗排细功能是最好的。

2.3 “阶梯+消力墩”结构对泥深和流速的调控

泥石流的泥深和运动速度在很大程度上与致灾程度相关,因此,排导槽对泥深和速度的调控效果在泥石流防灾减灾评价中非常重要。试验分别在排导槽的上游和下游各取一个断面(1-1断面和2-2断面,见图2)做对比研究,探讨“阶梯+消力墩”型排导槽对泥石流泥深和速度的调控情况。采用泥深比 η_d 和速度变化率 η_v 两个指标进行量化分析(图8和9):

$$\eta_d = h_{2-2}/h_{1-1} \quad (3)$$

$$\eta_v = (v_{1-1} - v_{2-2})/v_{1-1} \quad (4)$$

式中, h_{1-1} 、 v_{1-1} 和 h_{2-2} 、 v_{2-2} 分别为1-1断面和2-2断面的泥深与速度。此处的速度指泥石流龙头处的表面速度。

从图8中可以看到: η_d 几乎均大于1.0($\rho=2129 \text{ kg/m}^3$

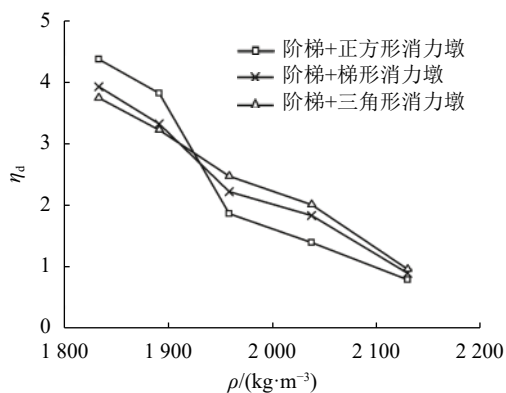


图8 排导槽对泥石流泥深的调控

Fig. 8 Regulation of debris-flow depth by drainage channel

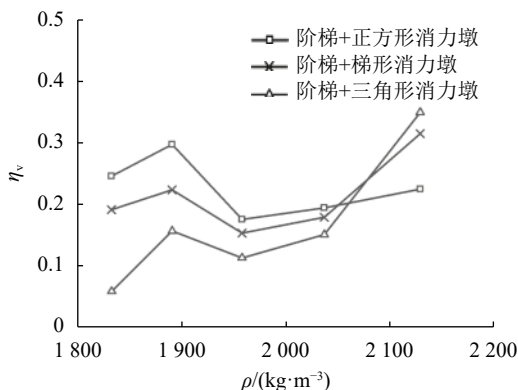


图9 排导槽对泥石流的速度调控

Fig. 9 Regulation of debris-flow velocity by drainage channel

时除外),表明泥石流经过“阶梯+消力墩”型排导槽的调控后,泥深显著增加;随着来流泥石流密度的增大,泥石流深度增加的程度逐渐降低;直至密度达到 $\rho=2129 \text{ kg/m}^3$ 时,下游处的泥深才小于上游泥深。“阶梯+消力墩”型排导槽对泥石流的泥深具有放大效应,有可能会加剧对下游的危害程度。另外,值得注意的是:当来流泥石流密度小于 1929 kg/m^3 时(稀性泥石流),“阶梯+正方形消力墩”型排导槽对泥深的放大程度最大,“阶梯+三角形消力墩”的放大效应最小;当密度大于 1929 kg/m^3 时(黏性泥石流),则出现了截然相反的结果。因此,在修建排导槽时,需要考虑不同类型的泥石流类型情况,采取相应的排导槽体型,不要期望用一种排导槽体型调控所有的泥石流类型。

本文提出的“阶梯+消力墩”型排导槽对泥石流泥深与速度的调控情况与其他型式的排导槽^[17-18,20-21]调控效果相比,具有两个显著的特点:挑流排导和加阻减速,泥深的放大效应偏大;速度的衰减程度更明显。这有助于控制泥石流流速与峰值流量,提高排导效率。

综上所述,“阶梯+消力墩”型排导槽在降低泥石

流速度的同时又会放大泥深,这是一对难以调和的矛盾。因此,在排导槽实践过程中,需要特别注意平衡这两方面的利害关系,根据泥石流流调控目标的不同,尽量做到合理取舍。

2.4 冲击压强特性

排导槽在排导泥石流的过程中,同样会遭受泥石流强烈的冲击作用,事关排导槽的安全运行寿命,

需要重点关注。根据排导槽的实践工程经验,推测在“阶梯+消力墩”型排导槽中,消力墩可能是受到泥石流冲击最大、也是最易破坏的关键部件。一般来讲,引起冲击破坏的主要动力来自于泥石流的峰值冲击压力,因此,本文以消力墩迎水面上的峰值冲击压强 P_a 来衡量“阶梯+消力墩”型排导槽在不同泥石流密度来流情况下的抗冲击特性,如图10所示。

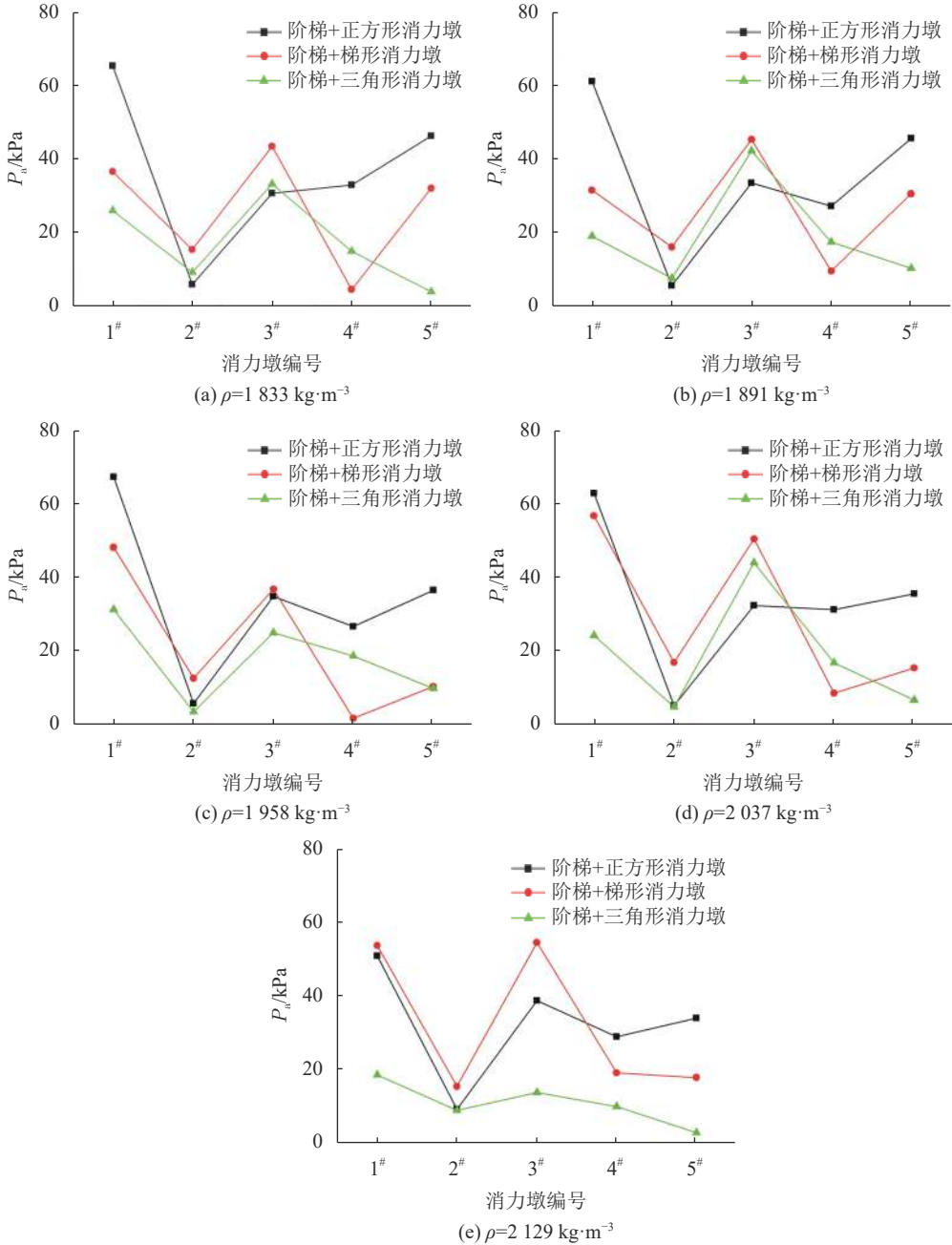


图 10 消力墩迎水面上的峰值冲击压强

Fig. 10 Peak impact pressure on the upstream face of baffles

由图10可见:沿程消力墩迎水面上的峰值冲击压强呈现出震荡衰减的特征,这与排导槽内泥石流的波状运动流态是吻合的。梯形消力墩迎水面上承受的冲击压强整体上高于三角形消力墩迎水面的冲

击压强约30%左右;与正方形消力墩上冲击压强相比较,梯形消力墩则表现出复杂的关系特点。具体来说,“阶梯+正方形消力墩”型排导槽的1#、4#、5#消力墩上冲击压强大于“阶梯+梯形消力墩”和“阶梯+三角

形消力墩”型排导槽消力墩上的冲击压强;“阶梯+梯形消力墩”型排导槽的2[#]和3[#]消力墩上冲击压强是最大的。

造成上述结果的原因可能与消力墩的迎水面角度有关(图5)。对于正方形消力墩($\alpha=90^\circ$)而言,其阻挡作用面几乎与泥石流的来流方向正交,承受了极大的泥石流冲击,这也就造成了“阶梯+正方形消力墩”型排导槽的1[#]消力墩上的冲击压强在3种体型的消力墩中是最大的(约63 kPa);对于梯形消力墩($\alpha=63^\circ$)和三角形消力墩($\alpha=45^\circ$)来说,泥石流以小于90°的交角冲击1[#]消力墩,被其挑向斜前方,飞跃2[#]消力墩,然后主要跌落在3[#]消力墩附近,造成了2[#]消力墩上冲击压强较小,3[#]消力墩上冲击压强较大的现象。总之,改变消力墩迎水面的角度可能会导致冲击压力的显著差异,也就是说,“阶梯+消力墩”型排导槽的抗冲击性能与消力墩体型有很大关系。

消力墩作为“阶梯+消力墩”型排导槽的关键性部件,在实际应用中首先应尽量保证足够高的结构强度,同时考虑添加防冲刷耐磨蚀性能材料,如掺超细矿渣粉水泥基材料、掺石粉超高性能混凝土、超细钢纤维等。其次,要确保消力墩基础埋置深度。如:对于稀性-过渡性泥石流,消力墩埋深一般不小于1.0~1.5 m;对于水石流-泥流,消力墩埋深一般不小于0.8~1.0 m。最后,结合流域综合治理,尽可能做到因地制宜、就地取材、优化设计消力墩断面形状。

3 结 论

通过水槽试验对“阶梯+消力墩”排导槽调控泥石流的效果进行了研究,探讨了3种消力墩体型(正方形、梯形和三角形)在不同泥石流密度情况下对泥石流流态、密度、固相颗粒粒径、泥深、流速的调控能力及抗泥石流冲击性能,主要结论如下:

1)“阶梯+消力墩”排导槽中泥石流流态呈现为强烈紊动的波状流,消力墩阻挡泥石流并将其挑向空中,且正方形消力墩抬升泥石流的高度最大,而梯形消力墩抬升泥石流的高度最小。抬升的泥石流会轻易地翻越排导槽的侧边墙,可能引起次生灾害,需要特别关注。

2)从排导槽输运泥石流的能力来看,位于出口处的泥石流密度减小,固相颗粒粒径细化,这有助于减缓泥石流对下游的致灾程度;但付出的代价是把粗颗粒拦截在排导槽的中部区域,容易对“阶梯+消力墩”系统造成淤埋危害,影响排导槽的排导能力。

3)“阶梯+消力墩”型排导槽可以显著降低泥石流的速度,最高减小幅度可达40%左右。与此同时,会对泥石流的流深产生放大效应,这种放大泥深的现象随着上游来流泥石流密度的增大而逐渐减弱。

4)从排导槽自身的安全性能来看,“阶梯+正方形消力墩”型排导槽的1[#]消力墩上冲击压强是最大的,而“阶梯+梯形消力墩”型排导槽的2[#]和3[#]消力墩上的冲击压强是最大的。梯形消力墩上承受的冲击压强比相应的三角形消力墩上的冲击压强大30%左右。也就是说,不同体型“阶梯+消力墩”排导槽的受到的冲击特性是存在差异的,且承受最大冲击压强的部位也是不同的。因此,需要采取差异化的抗冲击标准来评价排导槽不同位置处的安全性能。

试验结果表明,消力墩体型极大地影响着“阶梯+消力墩”排导槽调控泥石流的性能,对泥石流减灾的排导工程具有一定的参考意义。本文提出的排导槽体型仍处于试验室规模的理论研究阶段,特别是阶梯、消力墩结构的尺寸、布置型式等还需更多的试验,尤其是原位试验的验证。更多的研究工作需要从排导槽的排导能力(固相物质运输)、减灾功能(颗粒粒径调控)、消能特性(沿程能量耗散)、安全性能(抗冲击压强)和经济效益(工程造价)5个方面综合考虑,给出各项性能优先级的排序,并提出性价比较优的方案,更好地应用于泥石流防灾减灾。

参考文献:

- [1] Cui P, Chen X Q, Zhu Y Y, et al. The wenchuan earthquake (12 May 2008), Sichuan province, China and resulting geohazards[J]. *Nature Hazards*, 2011, 56: 19-36.
- [2] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991
- [3] 李德基. 泥石流减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 178-186
- [4] Cao Huachang. The role and design of drainage channels in the prevention of debris flow[J]. *Subgrade Engineering*, 1997 (5): 12-17. [曹华昌. 排导槽在泥石流防治中的作用及设计[J]. *路基工程*, 1997(5): 12-17.]
- [5] Zhang Kaiping. Study on diversion flume of debris flow and its optimization design[J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1997, 8(4): 73-77. [张开平. 泥石流排导槽及其优化设计研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1997, 8(4): 73-77.]
- [6] 王继康, 何克振, 黄荣鉴. V型槽防治泥石流[M]. 北京: 地质出版社, 1991
- [7] You Yong, Liu Jinfeng. The optimum cross-section design on the V-shaped drainage channel of debris flow[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(2): 218-222. [游勇, 柳金峰. 泥石流直墙V型排导槽横断面优化设计[J]. *山地学报*, 2008, 26(2): 218-222.]
- [8] Wang Jianqiang, Zhou Daoyin. A tentative study on the prevention and treatment of mud-rock flow disaster with V-shape drainage channel trough[J]. *Yunnan Geology*, 2007, 26(2): 207-212. [王健强, 周道银. V型排导槽防治泥石流灾害[J]. *云南地质*, 2007, 26(2): 207-212.]

- [9] Sun Xiaoyong, Chen Hongkai. Calculating method of v-shaped drainage channel in debris flow[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2010, 29(1): 142–146. [孙晓勇, 陈洪凯. 泥石流 V 型排导槽计算方法[J]. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 2010, 29(1): 142–146.]
- [10] Huang Runqiu, Li Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2585–2592. [黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2585–2592.]
- [11] Cui Peng, Wei Fangqiang, Chen Xiaoqing, et al. Geo-hazards in Wenchuan earthquake area and count-measures for disaster reduction[J]. *China Academy Journal*, 2008, 23(4): 317–323. [崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. *中国科学院院刊*, 2008, 23(4): 317–323.]
- [12] Chen Xiaoqing, Wang Shige, Li Deji. A comparison of two main types of debris flow drainage grooves[J]. *Journal of Catastrophology*, 2001, 16(3): 12–16. [陈晓清, 王士革, 李德基, 等. 两种主要泥石流排导槽的比较[J]. *灾害学*, 2001, 16(3): 12–16.]
- [13] Chen Xiaoqing, You Yong, Cui Peng, et al. New control methods of large debris flows in Wenchuan earthquake area[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(1): 14–22. [陈晓清, 游勇, 崔鹏, 等. 汶川地震区特大泥石流工程防治新技术探索[J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2013, 45(1): 14–22.]
- [14] Wang Zhaoyin, Qi Lijian, Wang Xuzhao. Debris flow control with energy dissipation structures—Experiences from Wenjiagou[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(3): 253–263. [王兆印, 漆力健, 王旭昭. 消能结构防治泥石流研究—以文家沟为例[J]. *水利学报*, 2012, 43(3): 253–263.]
- [15] 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所. 一种阶梯—深潭结构型泥石流排导槽及其应用: CN201410001807.7[P]. 2014–04–02.
- [16] Qu Xin, Yan Li, Yan Chunling. A debris flow drainage channel with block flow type based on step-pool energy dissipation system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(18): 257–262. [屈新, 闫利, 闫春岭. 基于梯—潭消能系统的挡流式泥石流排导槽[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(18): 257–262.]
- [17] Chen J G, Chen X Q, Li Y, et al. An experimental study of dilute debris flow characteristics in a drainage channel with an energy dissipation structure[J]. *Engineering Geology*, 2015, 193: 224–230.
- [18] Chen J G, Chen X Q, Zhao W Y, et al. Debris flow drainage channel with energy dissipation structures: Experimental study and engineering application[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(10): 06018012.
- [19] Wang T, Chen X, Li K, et al. Experimental study of viscous debris flow characteristics in drainage channel with oblique symmetrical sills[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 55–62.
- [20] Gao Quan, Chen Xiaoqing, Huang Kai. Preliminary study on debris-flow drainage channel with staggered indented-sill[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(2): 83–88. [高全, 陈晓清, 黄凯. 交错齿槛型泥石流排导槽研究初探[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(2): 83–88.]
- [21] Chen X Q, You Y, Chen J G, et al. Characteristics of a drainage channel with staggered indented sills for controlling debris flows[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(5): 1242–1252.
- [22] Li S, Peng C, Wu W, et al. Role of baffle shape on debris flow impact in step-pool channel: An SPH study[J]. *Landslides*, 2020, 17: 2099–2111.
- [23] Armanini A, Larcher M, Odorizzi M. Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wall[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Debris-Flow Hazards, Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment, Padua, Italy. Rome: Casa Editrice University La Sapienza, 2011: 1041–1049.
- [24] Hübl J, Suda J, Proske D. Debris flow impact estimation[C]//The 11th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering Conference. Ohrid: Macedonia, 2009: 1–4.
- [25] Wang Xiekang, Fang Duo. Study on laws of debris model similarity[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2000, 32(3): 9–12. [王协康, 方铎. 泥石流模型试验相似律分析[J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2000, 32(3): 9–12.]
- [26] Zhang Luohao, Zhang Hongwu, Zhang Jinfang, et al. Calculation method of debris flow velocity and debris flow model design[J]. *Yellow River*, 2015, 37(4): 18–24. [张罗号, 张红武, 张锦方, 等. 泥石流流速计算与模型设计方法[J]. *人民黄河*, 2015, 37(4): 18–24.]
- [27] Iverson R M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments[J]. *Geomorphology*, 2015, 244: 9–20.
- [28] Zhou G G D, Ng C W W. Dimensional analysis of natural debris flows[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(7): 719–729.

(编辑 张凌之)

引用格式: Li Shuai, Chen Xiaoqing, Chen Jiangang, et al. Regulation performance of debris flow by “step+baffle” drainage channel[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 68–76. [栗帅, 陈晓清, 陈剑刚, 等. “阶梯+消力墩”型排导槽调控泥石流性能研究[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(3): 68–76.]