

## 高海拔地区宽级配泥石流冲击拦砂坝试验研究

何胜庆, 郑达, 张文

### Experimental study on the impact of wide graded debris flow on check dam in high altitude area

HE Shengqing, ZHENG Da, and ZHANG Wen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211009>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation

侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友, 李阳光, 郑浩 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 143-151

#### 德钦县城直溪河泥石流成灾模式及运动过程模拟

A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County

王俊豪, 管建军, 魏云杰, 高培强, 梅傲霜, 张东伟 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 187-195

#### 泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究

A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density

黄海, 刘建康, 杨东旭 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 161-168

#### 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征

Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet

高波, 张佳佳, 王军朝, 陈龙, 杨东旭 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 144-153

#### 滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the landslide-debris flow impact guiding structure

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊, 杨海龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 161-168

#### 滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 148-148



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211009

何胜庆, 郑达, 张文. 高海拔地区宽级配泥石流冲击拦砂坝试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 123-134.  
HE Shengqing, ZHENG Da, ZHANG Wen. Experimental study on the impact of wide graded debris flow on check dam in high altitude area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 123-134.

## 高海拔地区宽级配泥石流冲击拦砂坝试验研究

何胜庆<sup>1</sup>, 郑 达<sup>1</sup>, 张 文<sup>2</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;  
2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

**摘要:** 在高海拔地区, 由于山高谷深, 坡表物质受物理风化严重, 物源级配宽度范围大, 泥石流的发育频率高, 冲击力大, 导致拦砂坝损毁严重。为研究高海拔地区宽级配泥石流对拦砂坝的冲击规律, 以西藏地区发育的泥石流为原型, 建立宽级配泥石流冲击拦砂坝的物理试验模型, 选取泥石流容重、水槽坡度与泥石流固相最大粒径为变量, 进行 27 组水槽试验, 研究冲击力特征。结果表明: (1) 宽级配泥石流在冲击拦砂坝过程中经历“冲击爬高、旋滚回流、堆积回淤”3 个接触演化阶段, 泥石流容重越小, 爬高越大, 冲淤过程的阶段性表现越明显; (2) 拦砂坝的坝前冲击力随宽级配泥石流容重的增大而减小, 在相同坡度和级配的条件下, 容重越大, 水流携带固体物源运动越困难, 泥石流流速降低, 泥石流的冲击力减小; (3) 拦砂坝的坝前冲击力随沟槽坡度增大而增大, 沟槽坡度越大, 宽级配泥石流的流速和流深越大, 泥石流冲击力就越大, 并且泥石流固相粒径越大, 坡度对冲击力的影响效果越明显; (4) 拦砂坝的坝前冲击力随宽级配泥石流固相最大粒径增大而增大, 且变化趋势较泥石流容重及沟槽坡度条件改变时更加显著, 最大粒径与泥石流流速、流深没有明显规律关系。研究成果将为宽级配泥石流防治和研究提供一定的数据参考。

**关键词:** 宽级配; 泥石流; 拦砂坝; 冲击特性; 物理模拟试验

中图分类号: TV144; P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0123-12

## Experimental study on the impact of wide graded debris flow on check dam in high altitude area

HE Shengqing<sup>1</sup>, ZHENG Da<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan 611734, China)

**Abstract:** The impact force of debris flow is the main cause of damage and destruction of check dam. In high altitude area, due to high mountains and deep valleys, serious physical weathering of surface materials, a wide range of source materials gradation, high frequency of debris flow occurrence and high impact force, the damages induced by debris flow to the check dam are significant. To study the impact characteristics of the wide graded debris flow on check dam in high altitude area, the debris flow developed in Tibet is taking as a prototype. A

收稿日期: 2022-11-03; 修订日期: 2023-02-24

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 西藏自治区自然资源厅项目(藏财采[2020]0890-1); 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2020Z008)

第一作者: 何胜庆(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: [2486681236@qq.com](mailto:2486681236@qq.com)

通讯作者: 郑达(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害评价防治及高边坡稳定性教学与研究。E-mail: [da.zheng@cdu.edu.cn](mailto:da.zheng@cdu.edu.cn)

physical test model of the impact check dam of wide graded debris flow is established. The unit weight of debris flow, the slope of flume and the maximum particle size of debris flow solid are selected as variable factors. 27 groups of flume tests were carried out to study the characteristics of impact force. The results show that: (1) Wide-graded debris flow mainly undergoes three contact evolution stages during the process of impact retaining dam, i.e. impact climbing-rolling return flow-accumulation and silting. The smaller of the debris flow volume weight could lead to a higher climbing distance, and more obvious stage performance of sourcing and slitting process. (2) The impact force in front of the dam decreases with the increase of the bulk weight of wide-graded debris flow. Under the same slope and gradation, a larger the bulk weight of debris flow materials lead to a lower velocity of the debris flow materials and less impact force, because it is more difficult to carry solid material sources. (3) The impact force in front of the dam increases with the increase of the groove gradient. The larger the groove gradient, the greater the flow velocity and flow depth of wide-graded debris flow, the greater the impact force of debris flow. The larger the particle size of solid phase of debris flow, the more significant the impact of slope on impact force. (4) The impact force in front of the sand bar increases with the increase of the maximum particle size of the solid phase of the wide graded debris flow, and the change trend is more significant than when the volume density of the debris flow and the slope conditions of the groove change. The maximum particle size has no obvious regular relationship with the velocity and depth of the debris flow. The research results will provide certain data reference for the prevention and research of wide graded debris flows.

**Keywords:** wide grading materials; debris flow; check-dams; impact characteristics; physical simulation test

宽级配泥石流是指形成泥石流的物源级配范围大,既有直径大于数米的块石,也有小于 0.005 mm 的黏粒<sup>[1]</sup>。宽级配泥石流在高海拔地区广泛发育,相较于普通山地泥石流灾害的冲击力更大,对防护工程的要求也更高<sup>[2-5]</sup>。西藏深切割沟谷地貌与较大的沟床纵坡比,为泥石流水源的汇聚及固体物源的积累提供了良好的条件。同时,由于受到冰川侵蚀、融雪径流侵蚀与冻融泄流等作用,泥石流物源岩性种类多,颗粒粒径差异大,块石最大直径可以达到数米<sup>[6]</sup>。

为合理防控泥石流灾害,西藏地区采用“拦砂坝+防护堤+排导槽”的工程形式进行治理。但由于宽级配泥石流冲击力较大,拦砂坝在拦挡蓄淤过程中受冲击损伤非常严重,往往修建不久就出现损毁的现象。设计人员发现,对于高海拔地区的宽级配泥石流的防治,采用常规的设计规范无法达到防控的效果。

为了给拦砂坝结构设计提供可靠的依据,许多学者借助物理试验和数值模拟分析泥石流对拦砂坝的冲击作用,揭示泥石流的容重、坡度等因素对冲击力的影响,并尝试建立冲击力大小与各个因素之间的关系,已有较深入的研究<sup>[7-8]</sup>。张睿骁等<sup>[9]</sup>利用离散元模拟再现碎屑流冲击拦挡坝过程, Song 等<sup>[10]</sup>在离心实验中通过对比刚性与柔性拦砂坝受冲击力情况,得出柔性机构更能抵抗泥石流冲击。同时众多学者通过水

槽试验进行室内泥石流冲击过程模拟:于献彬等<sup>[11]</sup>进行了黏性泥石流对拦砂坝冲击力大小的影响研究;赵海鑫等<sup>[12]</sup>对泥石流浆体冲击荷载进行了试验计算,试验结果表明泥石流容重、流速与沟床坡度是影响其冲击力的关键因素;樊圆圆等<sup>[13]</sup>也据此对泥石流启动机理进行相关分析研究。然而,专门针对高海拔地区宽级配泥石流研究目前还不够深入,还处在初步探索阶段,比如王翔等<sup>[14]</sup>通过数值模拟分析,认为藏西南区域发育的宽级配泥石流较普通沟谷泥石流的流速更快;向灵芝等<sup>[15]</sup>基于都汶公路沿线沟谷泥石流与甘肃舟曲泥石流沟的研究,获得了宽级配泥石流的发生与含水率变化的关系;王洋等<sup>[16]</sup>通过水槽冲击试验比较均质沙与宽级配沙的冲击特征,发现泥石流的龙头高度随粒径的增加表现出先增后减的趋势。上述对宽级配泥石流的研究成果主要集中在宏观冲击特征方面,并且仅考虑了单一因素对泥石流冲击的影响。此外,由于高海拔地区泥石流发育环境复杂,尚不能完全揭示宽级配泥石流冲击力与各个影响因素的量化关系,特别是多个因素叠加对泥石流冲击力的共同作用效果。因此,开展高海拔地区宽级配泥石流的试验研究十分必要。

基于前人对泥石流冲击特征的研究成果,针对泥石流物源级配宽,粗颗粒直径大且含量多等特点,选择影响冲击力的坡度、容重、级配作为试验变量,通



过水槽物理试验模拟泥石流冲击拦砂坝过程, 揭示各个因素对泥石流冲击力的影响程度。

## 1 西藏高海拔地区泥石流发育特征

基于收集到的西藏高海拔地区 172 条泥石流沟的勘察资料及部分现场调查资料, 总结出该区域内泥石流的发育特征。

### (1) 物源粒径大, 级配宽度大, 粗颗粒含量多

泥石流物质来源条件较好, 能够以多种方式实现物源的积累, 坡面侵蚀型物源、沟道累积型物源、崩滑型物源均有发育。如图 1 所示, 泥石流固体物源级配宽度大, 从黏粒、粉砂到卵石、漂石等各种粒径均有分布, 且以大于 2 mm 的推移质为主。



图 1 区内典型沟道物源

Fig. 1 The typical channel provenance in the area

### (2) 泥石流沟床比降大, 动力条件好

对区内 164 条沟谷泥石流的平均纵比降统计发现, 区内泥石流沟流通区的纵比降多介于 280‰ ~ 372‰ (15.64° ~ 20.41°) 之间, 明显大于其他地区, 可以为泥石流的运动提供更加充足的动力条件。

### (3) 泥石流发育类型单一

通过对区内泥石流容重的统计(图 2), 发现该地区发育的稀性泥石流(容重介于 1 300 ~ <1 800 kg/cm<sup>3</sup>) 数量达 169 处, 占比高达 98.26%, 黏性泥石流发育较少, 占比仅为 1.74%。说明该区域发育泥石流的水源条件丰富, 稀性泥石流占绝对优势。

### (4) 泥石流冲击力度大

研究区泥石流灾害多为暴雨激发, 在较大水动力的作用下, 泥石流中夹杂的砾石等固体物质具有较大的冲击力与磨蚀能力, 使得研究区的泥石流防治工程受冲击破坏影响严重(图 3)。

综上所述, 结合实地勘察以及前人相关研究, 西藏高海拔地区泥石流拥有物源丰富、级配宽、固相粒径大以及沟床坡度大的特点, 使得泥石流的冲击力更大<sup>[7]</sup>。为探究不同因素对泥石流冲击力的影响, 选取

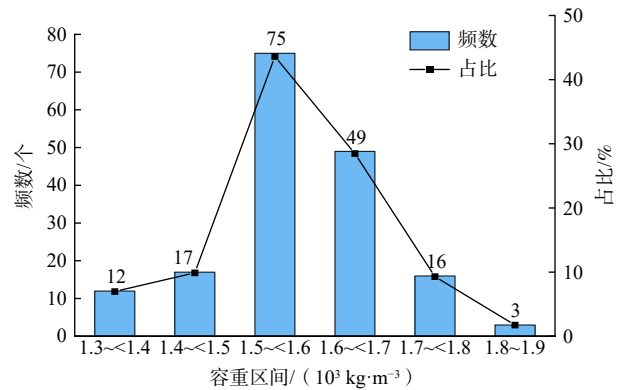


图 2 泥石流重度分布频数直方图

Fig. 2 Distribution frequency histogram of debris flow severity



图 3 区内拦砂坝受冲击破坏损毁

Fig. 3 A check dam in the area was damaged by impact

泥石流的容重、固相最大粒径与沟槽坡度 3 个变量进行水槽试验, 尝试获得其与泥石流冲击力大小的关系。

## 2 泥石流冲击拦砂坝物理模拟试验

### 2.1 试验方法

研究采用传统的水槽试验对泥石流进行模拟。通过控制颗粒级配、黏粒含量以及固相体积分数等, 分析泥石流的流体特征、运动速度与淤积高度与泥石流冲击力的相关性。

在冲击力数据采集方面, 首先按一定比例浇筑拦砂坝模型, 通过在坝前安装冲击力传感器, 得到拦砂坝受泥石流冲击的数据, 以便更好地模拟拦砂坝在运行过程中所受泥石流冲击作用。

### 2.2 试验装置与量测系统

试验装置包括试验水槽和拦砂坝模型, 量测系统包括试验数据量测系统和试验过程记录系统。

#### (1) 试验水槽

试验采用地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的多功能实验水槽(图 4)。水槽长 800 cm, 宽 30 cm, 高 35 cm, 由料斗、水槽、物料回收区 3 部分组成。水槽坡度可在 10° ~ 21° 间调整, 水槽两侧为透



图 4 泥石流水槽试验装置  
Fig. 4 Debris flow tank test device

明钢化玻璃, 便于进行光学测量与视频记录。

(2) 拦砂坝模型

拦砂坝模型在参考现实拦砂坝形状尺寸的基础

上, 根据试验槽宽度按比例缩小, 并采用混凝土浇筑的方式制作, 同时坝体表面预留安装冲击力传感器的孔洞以保证冲击力测量的准确性与稳定性。模型坝形状参数如图 5 所示。

(3) 数据量测系统

数据量测系统包括计算机、冲击传感器、数据采集仪、电子倾角仪、直尺等, 泥石流冲击力的测量由冲击传感器与数据采集仪实现。冲击力传感器测量泥石流冲击拦砂坝时的冲击力, 冲击传感器型号为 NOS-F306, 量程为 0 ~ 100 kPa, 冲击传感器布设如图 5 所示。数据采集仪记录泥石流瞬时冲击信号, 采集仪型号为 DH5902, 参考何晓英等<sup>[18]</sup> 对冲击力的研究成果, 选择采样频率为 1 000 Hz。

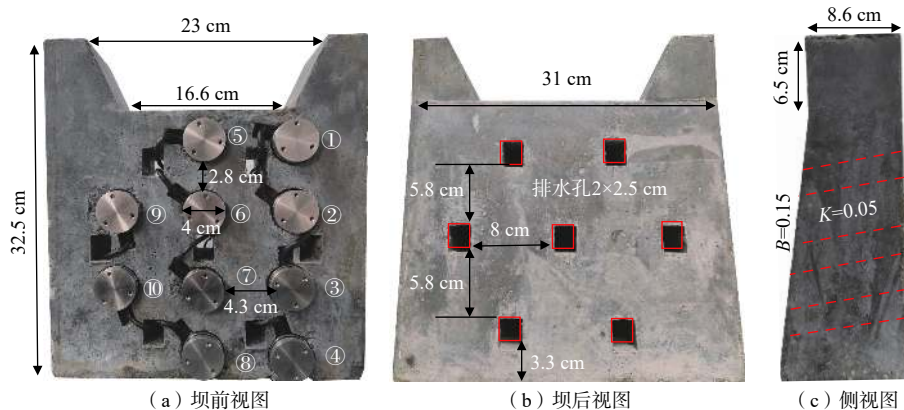


图 5 拦砂坝模型参数  
Fig. 5 Model parameters of check-dam

(4) 试验过程记录系统

试验过程记录系统主要包括相机、高速摄像机及其他高帧率摄像设备等。两台高速摄影机型号为 GS3-U3-23S6M-C, 分别设置于水槽上部及侧面, 用以记录不同角度泥石流冲击拦砂坝的作用过程, 并且可以通过视频图像逐帧分析的方式反算出不同性质泥石流的平均流速。数码照相机型号为 EOS-750D, 在每一组次试验结束后, 从不同角度记录泥石流的堆积形态。

2.3 试验材料

试验土样的原始颗粒级配曲线以研究区内拦砂坝受冲击破坏最为严重的乃卡村宽级配泥石流物源作为参照。根据前人的试验研究, 为了使试验更具有科学性, 泥石流水槽试验中固体物源的颗粒级配除了需要与原始物料的级配相似, 同时还要满足试验水槽的宽、高均大于最大颗粒粒径的 5 倍<sup>[19]</sup>。试验用水槽

宽 30 cm, 高 35 cm, 为满足对土样最大粒径要求, 选取 40 mm 作为泥石流试验最大粗颗粒粒径。

所以在原始级配曲线的基础上将大于 40 mm 的土颗粒用 40 mm 以内的颗粒代替, 就得到满足试验要求且最大粒径为 40 mm 的级配曲线<sup>[19]</sup>。再根据土工试验规程以及前人经验<sup>[20]</sup> 对最大粒径为 40 mm 的级配曲线中 30 ~ 40 mm 粒径范围的土颗粒用 30 mm 以内的颗粒等量替代就得到了最大粒径为 30 mm 的级配曲线, 按同样方法也能得到最大粒径为 20 mm 的级配曲线。该方法可以保证泥石流宽级配特性的同时, 也让同一容重的泥石流具有相同的固体颗粒质量, 用于试验的级配曲线如图 6 所示。

2.4 相似设计

本次研究的泥石流模型为具有两相流特征的稀性泥石流, 起主导作用的力是重力, 通常采用弗洛德准则来表征泥石流模型试验的动态相似性<sup>[21-22]</sup>, Armanini

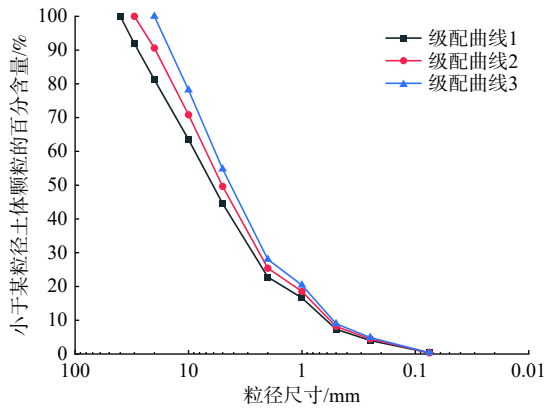


图6 试验土样粒径累计曲线

Fig. 6 Cumulative curve of particle size of experimental soil samples

等<sup>[23]</sup>通过试验证明弗洛德数( $Fr$ )是衡量泥石流对结构影响的关键无量纲参数,Choi等<sup>[24]</sup>推荐的明渠两相流中弗洛德数的计算公式运用最为广泛,见式(1)。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{ghk \cos \theta}} \quad (1)$$

式中: $k$ ——土压力系数,根据文献<sup>[25]</sup>,取 $k=1$ ;

$\theta$ ——水槽内通道倾角/(°);

$v$ ——泥石流龙头流速/( $m \cdot s^{-1}$ );

$g$ ——重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ );

$h$ ——近似流深/m。

根据式(1),在一定倾角的水槽中,通过控制泥石流的流速及泥深,可将弗洛德数控制在一定范围内。

考虑到试验的控制条件及试验目的,采用式(1)对泥石流模型进行相似控制。试验中坝前流速1.89~4.07 m/s,流深2.2~5.0 cm,计算所得弗洛德常数为3.15~6.95。对比前人实验成果中弗洛德常数范围,Cui等<sup>[26]</sup>提出在模型试验中控制弗洛德数在2.5~5.9范围内,Zhou等<sup>[27]</sup>进行水槽实验过程中控制弗洛德数在1.65~6.96范围内。本次泥石流模型的弗洛德数在合理范围,满足相似要求。

## 2.5 试验方案

根据现场调查发现,区内宽级配泥石流对拦砂坝冲击力大小与其固相物质、容重以及坡度变化有着紧密的联系,故选取颗粒级配的最大粒径、泥石流容重以及沟槽坡度作为变量条件来进行试验。

变量参数的范围根据研究区内高海拔宽级配泥石流的发育特征确定。通过对区内发育的172条泥石流进行统计,发现研究区典型泥石流沟流通区的坡度多介于15.64°~20.41°之间。泥石流容重多介于1300~1800  $kg/m^3$ 之间,占总数的98.26%。故试验沟槽坡

度考虑17°、19°、21°等3个角度,泥石流容重采用1400,1600,1800  $kg/m^3$ 。对于泥石流的颗粒级配,既要满足与原始物源相似又要符合沟槽尺寸要求,所以试验选用级配曲线如图6所示,级配中最大粒径分别选取为20,30,40 mm。

综上所述,本次试验共选取3组不同最大粒径的土样、3种泥石流容重、3个水槽坡度共进行27组试验。试验进行前利用清水冲击传感器,检查其是否正常工作及采集数据的准确性,试验分组情况见表1。

表1 试验组次设计

Table 1 Design of experimental groups

序号	颗粒级配	泥石流容重/( $kg \cdot m^{-3}$ )	沟槽坡度/(°)	试验次数
1	清水	1000	17, 19, 21	3
2	最大粒径40 mm	1400, 1600, 1800	17, 19, 21	9
3	最大粒径30 mm	1400, 1600, 1800	17, 19, 21	9
4	最大粒径20 mm	1400, 1600, 1800	17, 19, 21	9

## 3 试验结果

使用高速摄影机记录泥石流冲击拦砂坝的全部过程,待泥石流静止稳定后,停止记录,清理水槽重复实验。通过分析各个组次的泥石流冲击过程,得到以下现象及特点。

(1)研究区泥石流冲击拦砂坝过程,实际上就是泥石流发生水石分离与流体消能的过程。由于泥石流的级配宽度大,细颗粒土与水混合快速移动而与粗颗粒分离,最后水与细颗粒混合物首先冲击坝体,较粗颗粒物质在坝前堆积。该过程受到泥石流容重的影响,表现出较大的差异,容重越大,水石分离效果越明显。沟槽坡度与固相最大粒径改变对该过程影响较小,容重相同时,不同沟槽坡度或颗粒级配条件下均表现出相似的过坝特征。

(2)泥石流冲击拦砂坝时,均可明显观察到泥石流经历冲击爬高、旋滚回流、堆积回淤3个阶段。以沟槽坡度17°,最大粒径30 mm的试验组次对试验现象进行分析描述。图7为容重1400  $kg/m^3$ 时泥石流在空库状态下冲击拦砂坝的触坝演化过程。

①冲击爬高:以泥石流龙头距离拦砂坝10 cm时为“0”时刻,龙头流速2.98 m/s,流深为3.1 cm,泥石流在冲淤过程中首先到达拦砂坝趾位置,随后泥石流撞击拦砂坝并沿坝爬升,产生水跃消能。

②旋转回流:在 $t=0.32$  s时,向上的速度减为0,爬升流体在拦砂坝的拦挡作用下产生旋滚回流,回流部分与后续来流交接产生流速梯度而发生强烈的紊动



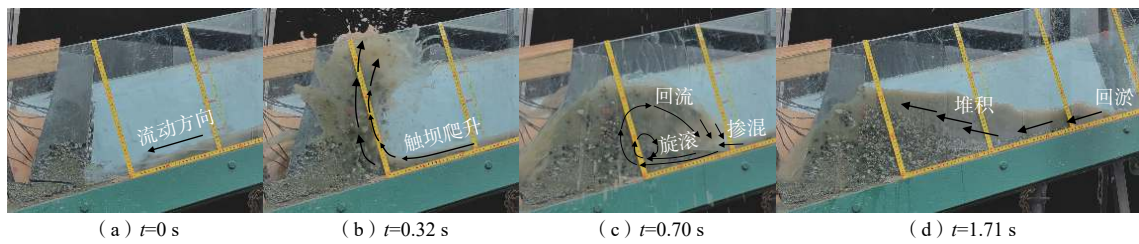


图 7 容重 1 400 kg/m<sup>3</sup>、沟槽坡度 17° 泥石流过坝特征

Fig. 7 Characteristics of debris flow through the dam with a bulk density of 1 400 kg/m<sup>3</sup> and a groove slope of 17°

掺混现象( $t=0.7\text{ s}$ ), 由于拦砂坝排水效率低于来流的蓄积速度, 坝前蓄水。

③堆积回淤: 在  $t=1.702\text{ s}$  时, 泥石流龙头完全回流至坝前, 后续来流中的固体物质在已形成的淤坡上部堆积、回淤, 并在一定程度上继续抬高坝前淤积体的高度, 最终稳定后形成弧状表面的近楔形堆积体。

(3)在其他条件不变的情况下, 不同容重泥石流

在冲击拦砂坝的过程中的差别主要表现在泥石流冲起高度的变化, 以及冲淤过程结束后物源在坝前淤积形态两个方面。图 8 与图 9 为容重 1 600 kg/m<sup>3</sup> 和 1 800 kg/m<sup>3</sup> 的泥石流冲淤拦砂坝过程, 可以看出泥石流的爬高及坝前淤积高度随泥石流容重的增大而降低, 回淤长度随容重的增大而增加。从 3 种泥石流的过坝过程可以看出, 空库状态下拦砂坝对泥石流都能起到较好的拦淤排水作用。

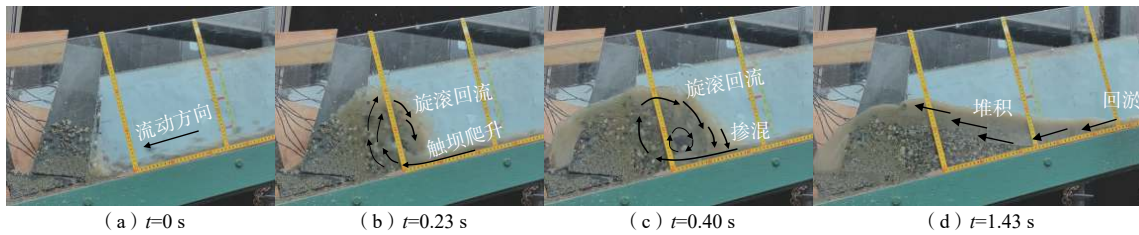


图 8 容重 1 600 kg/m<sup>3</sup>、沟槽坡度 17° 泥石流过坝特征

Fig. 8 Characteristics of debris flow through the dam with a bulk density of 1 600 kg/m<sup>3</sup> and a groove slope of 17°

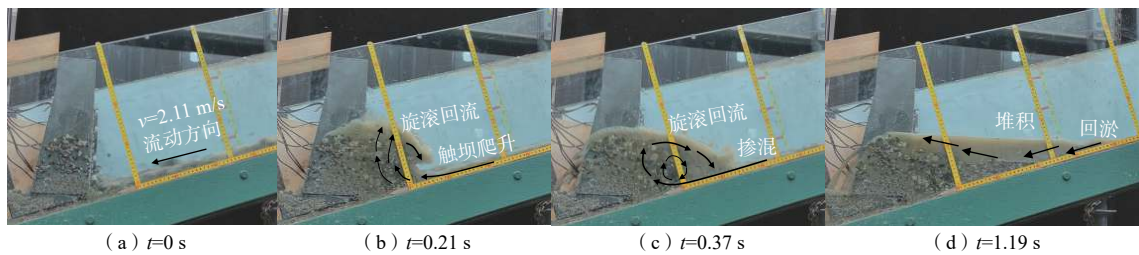


图 9 容重 1 800 kg/m<sup>3</sup>、沟槽坡度 17° 泥石流过坝特征

Fig. 9 Characteristics of debris flow through the dam with a bulk density of 1 800 kg/m<sup>3</sup> and a groove slope of 17°

由于泥石流模型宽级配的特点, 每个组次中均含有一些 20 ~ 40 mm 的大粒径物源, 所以泥石流在冲击拦砂坝过程中, 在沟槽中的运动过程具有较大的随机性, 冲击坝体的部位也有差别, 对泥石流冲击力的分析计算带来了不确定性。为降低对试验结果的影响, 通过比较单个传感器采集值及多个传感器采集的平均值, 发现涉及的传感器越多, 泥石流的随机性越不明显, 冲击力随变量的规律性越强。进一步还发现泥石流冲击试验过程中, 下部两排传感器位置是主要受

泥石流冲击的部位。考虑到传感器布设的对称性, 在数据处理时使用 3 号、4 号、7 号、8 号 4 个传感器采集的平均冲击力进行分析, 部分试验数据见表 2。

### 4 试验结果分析

#### 4.1 泥石流容重对冲击力的影响

泥石流容重是决定流速、流量、一次冲出量、冲击力等参数的基础物理量<sup>[28]</sup>。通过对 27 组试验结果进行组合分析发现, 在 1 400 ~ 1 800 kg/m<sup>3</sup> 的容重范围

表 2 试验结果

Table 2 Summary of experimental results

组号	容重/ (kg·m <sup>-3</sup> )	坡度/ (°)	最大粒径/ mm	流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	流深/ cm	弗洛德数	平均冲击力/ kPa
1	1 400	17	20	3.08	2.90	5.91	15.08
2	1 400	17	30	2.98	4.10	4.80	30.30
3	1 400	17	40	3.12	3.50	5.44	45.58
4	1 400	19	20	3.38	2.90	6.52	10.50
5	1 400	19	30	3.53	3.40	6.29	30.71
6	1 400	19	40	3.87	3.50	6.80	76.03
7	1 400	21	20	3.58	4.10	5.85	25.91
8	1 400	21	30	3.93	3.50	6.95	42.06
9	1 400	21	40	4.07	5.00	6.01	86.73
10	1 600	17	20	2.03	2.90	3.90	8.65
11	1 600	17	30	2.24	3.60	3.86	24.41
12	1 600	17	40	2.07	2.90	3.97	37.59
13	1 600	19	20	2.40	3.20	4.41	11.32
14	1 600	19	30	2.76	4.00	4.53	25.09
15	1 600	19	40	2.47	3.60	4.28	70.68
16	1 600	21	20	2.93	3.60	5.10	23.22
17	1 600	21	30	3.33	3.80	5.65	28.95
18	1 600	21	40	3.64	4.50	5.67	82.35
19	1 800	17	20	1.89	2.80	3.69	5.53
20	1 800	17	30	2.31	2.20	5.08	19.59
21	1 800	17	40	2.89	3.10	5.36	28.56
22	1 800	19	20	2.05	2.50	4.26	7.90
23	1 800	19	30	2.18	3.10	4.07	17.90
24	1 800	19	40	1.92	4.00	3.15	35.25
25	1 800	21	20	2.35	3.30	4.28	9.25
26	1 800	21	30	2.45	3.10	4.60	19.53
27	1 800	21	40	2.47	3.30	4.50	63.81

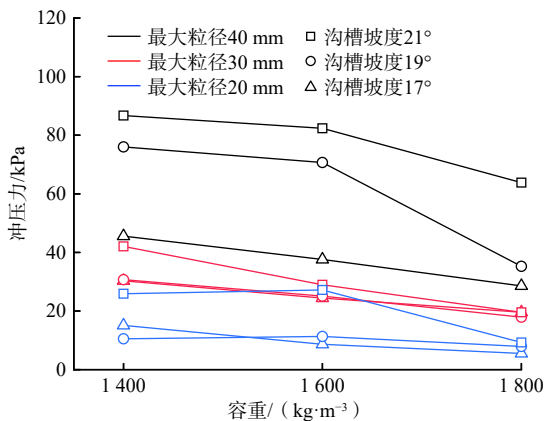


图 10 泥石流容重对坝前冲击力的影响

Fig. 10 Influence of bulk density of debris flow on impact force in front of dam

内, 3 种沟槽坡度及 3 组最大粒径的结果基本表现出坝前冲击力随泥石流容重的增加而降低的变化规律, 如图 10 所示, 试验结果与西藏地区多条宽级配泥石流的实际情况是相互吻合的。泥石流案例显示, 容重

较大、坡度较缓的泥石流爆发后, 对拦砂坝的冲击破坏并不严重。

为进一步研究容重变化对冲击力影响中, 物源最大粒径与沟槽坡度所起的作用, 建立了冲击力随泥石流容重变化柱状图, 如图 11 所示。可以看出, 同样的容重变化区间下, 容重由 1 800 kg/m<sup>3</sup> 降低到 1 600 kg/m<sup>3</sup> 时的冲击力降幅普遍大于容重由 1 600 kg/m<sup>3</sup> 降低到 1 400 kg/m<sup>3</sup> 时的冲击力降幅, 均值分别为 15.97%、33.79%。说明在 1 400 ~ 1 800 kg/m<sup>3</sup> 的容重区间内, 坝前冲击力随泥石流容重的增大而减小, 其中沟槽坡度 17° 时规律性最强, 泥石流冲击力随容重的减小而增加, 沟槽坡度 19°、21° 时规律性略有降低。对冲击力大小的结果而言, 沟槽坡度较小时, 宽级配泥石流容重对坝前冲击力的影响更大, 随着坡度的增大逐渐弱化了容重对坝前冲击力的影响。

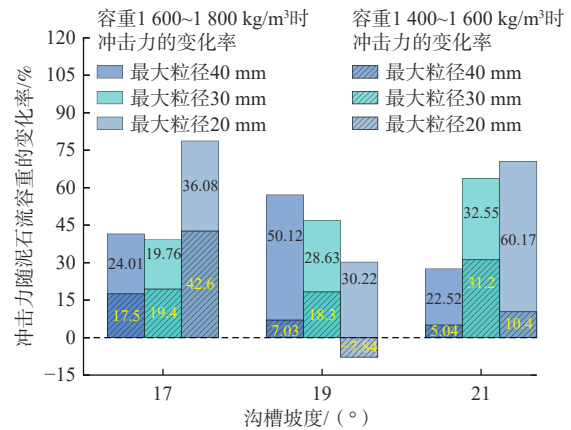


图 11 泥石流容重改变时坝前冲击力的变化率

Fig. 11 The change rate of impact force in front of dam with the changing volume density of debris flow

根据泥石流冲击力相关研究, 泥石流冲击力主要受泥石流容重、泥石流流速、龙头流深等因素的影响, 王东坡等<sup>[29]</sup> 通过泥石流冲击弧形拦挡坝试验建立了与弗洛德数的冲击力计算式, 见式(2)。

$$p' = \frac{1}{R} + \frac{2}{R} \cdot \frac{Fr^2}{\cos \alpha} \quad (2)$$

式中:  $p'$ ——无量纲冲击力;

$R$ ——弧线拦挡坝圆弧段半径/m;

$Fr$ ——弗洛德数;

$\alpha$ ——泥石流沟道纵坡坡度/(°)。

式(2)表明弧形拦挡坝受到的冲击力值与泥石流弗洛德数  $Fr$  呈二次关系, 且与泥石流沟道纵坡坡度  $\alpha$  的余弦值成反比<sup>[29]</sup>。

为进一步研究宽级配泥石流的容重如何影响坝前



冲击力大小,以沟槽坡度 19°为例分析泥石流流容重与流速、流深、弗洛德数的关系。

如图 12 的结果所示:3 种颗粒级配的条件下,宽级配泥石流流速、弗洛德常数与泥石流容重之间都具有相似的变化趋势,规律较为明显,泥石流流速、弗洛德常数都随容重的增大而减小;相同沟道长度与物源释放条件下,泥石流容重与泥石流流深之间规律性不强。结合宽级配泥石流容重与坝前冲击力的变化关系可知,在运动长度不变的情况下,容重对坝前冲击力的影响主要体现在流速的变化上,与赵海鑫等<sup>[12]</sup>针对不同容重泥石流进行的水槽实验结果基本一致。泥石流的运动速度随着泥石流的容重增加明显降低。说明在相同条件下,当宽级配泥石流的容重较大时,水流携带固体物源移动困难,流速降低,泥石流冲击力降低,而当坡度增加时,泥石流的动能增加,泥石流携带固体物源的能力增强,容重对流速的减弱效果降低,对冲击力影响减弱。

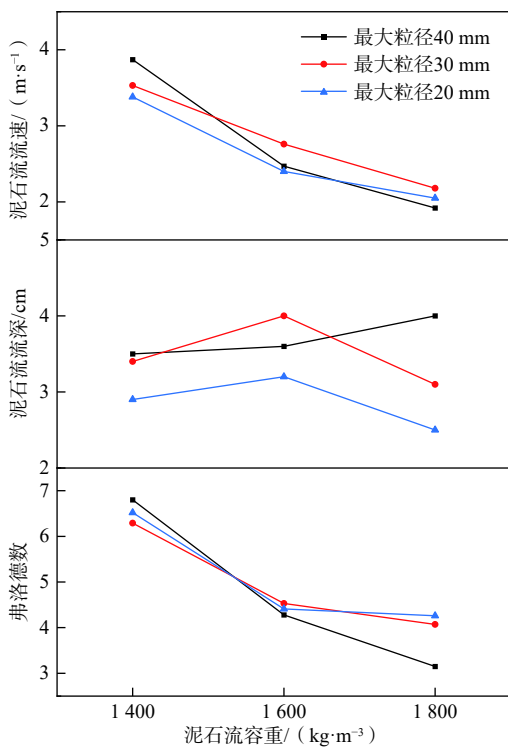


图 12 19°沟槽坡度泥石流容重与其他特征参数的关系

Fig. 12 Relationship between debris flow bulk density and other characteristic parameters of 19° groove slope

### 4.2 沟槽坡度对冲击力的影响

图 13 为不同容重及最大粒径条件下坝前冲击力随沟槽坡度的变化关系。较陡的坡道带来更大的冲击力,多组试验均表现出坝前冲击力随沟槽坡度的增

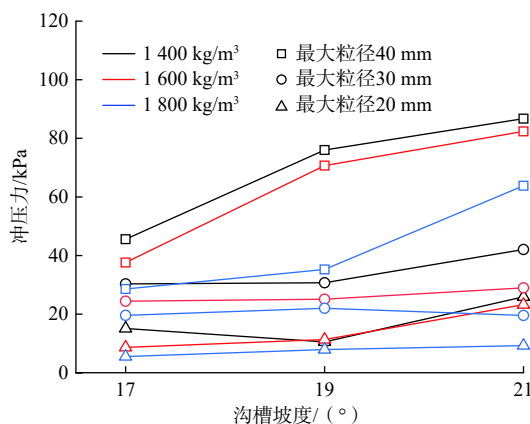


图 13 沟槽坡度对坝前冲击力的影响

Fig. 13 Influence of groove slope on impact force in front of the dam

加而增大的特点。

图 14 为改变沟槽坡度条件下坝前冲击力的变化率。可以看出,沟槽坡度由 17°变化至 19°、19°变化至 21°的过程中,坝前冲击力的变化表现出一定的随机性,整体趋势随沟槽坡度的增大而增大。孙兴伟等<sup>[30]</sup>在冲击试验中也得到相类似的结论:重度相同情况下泥石流沟道坡度越大,冲击力与之呈非线性的上升关系。其中当固体物源中的粒径较小时,坝前冲击力的变幅较小,变幅随泥石流固相的最大粒径增大而增大。最大粒径为 40 mm 的冲击力随坡度增大的趋势最为明显。说明对于物源粒径大的宽级配泥石流,沟槽坡度是影响其冲击力大小的重要因素。

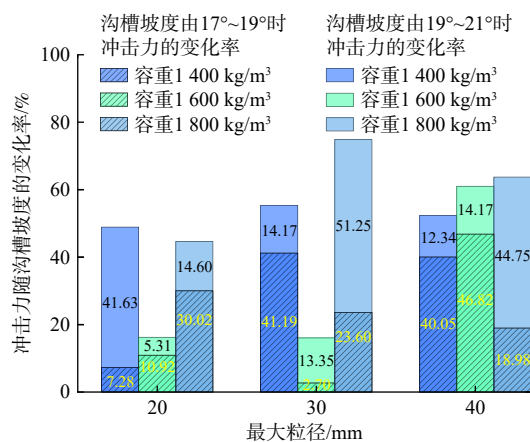


图 14 沟槽坡度改变时坝前冲击力的变化率

Fig. 14 The change rate of impact force in front of the dam with the changing slope of trench

以容重 1 600 kg/m<sup>3</sup> 的宽级配泥石流为例分析沟槽坡度与冲击力关系(图 15)。在 3 种固相最大粒径的条件下,泥石流流速、流深及弗洛德数在总体趋势

上均随沟槽坡度的增加而增大。其中, 最大粒径为 40 mm 时三者的变化趋势最为显著。结合目前对泥石流冲击的试验成果, 可知在泥石流运动长度不变的情况下, 沟槽坡度对泥石流运动过程中的影响主要体现在流速和流深的变化上<sup>[31]</sup>。说明沟槽坡度对坝前冲击力的影响, 是通过增加泥石流的动能, 使冲击力增大, 这就是为何对于物源粒径大的宽级配泥石流, 沟槽坡度对其冲击力的影响更为显著。

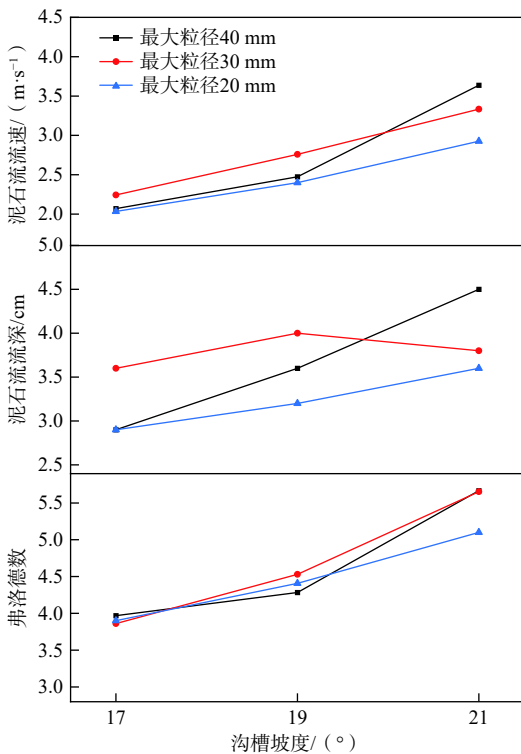


图 15 1 600 kg/m<sup>3</sup> 容重条件沟槽坡度与泥石流特征参数的关系  
Fig. 15 Relationships between groove slope and characteristic parameters of debris flow under the condition of 1 600 kg/m<sup>3</sup> bulk density

### 4.3 泥石流最大粒径对冲击力的影响

近年有关泥石流的研究中, 流体中粗颗粒粒径及含量对冲击力影响逐渐被重视, 实际对泥石流沟的调查也发现, 随着泥石流中粗颗粒粒径的增加, 泥石流的冲击力呈指数增加<sup>[32]</sup>。据此, 通过图 16 研究在不同容重与沟槽坡度的条件下, 坝前冲击力随泥石流固相最大粒径的变化关系。可以看出, 在 3 种泥石流容重及 3 种沟槽坡度条件下坝前冲击力均表现出随最大粒径的增大而增大。

图 17 为最大粒径改变冲击力变化柱状图, 最大粒径由 20 mm 增大到 30 mm、30 mm 增大到 40 mm 的过程中, 各变量条件下冲击力的变化率均表现出变幅

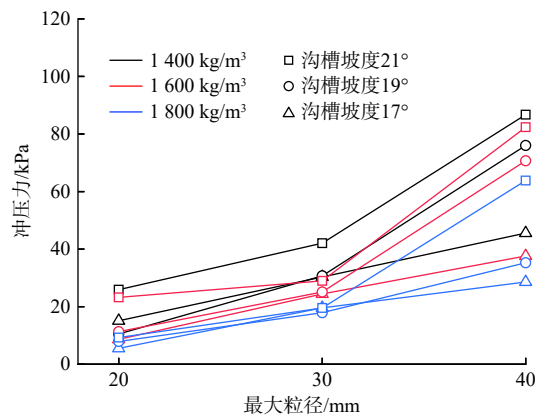


图 16 最大粒径对坝前冲击力的影响

Fig. 16 Influence of maximum particle size on impact force in front of the dam

大、变化幅值接近的特点, 变化率均值分别为 51.01%、52.67%。表明最大粒径对坝前冲击力增大具有直接影响, 对比试验中冲击力随泥石流容重及沟道坡度改变时的变化率, 最大粒径对宽级配泥石流坝前冲击力的影响较泥石流容重及沟槽坡度更加显著。

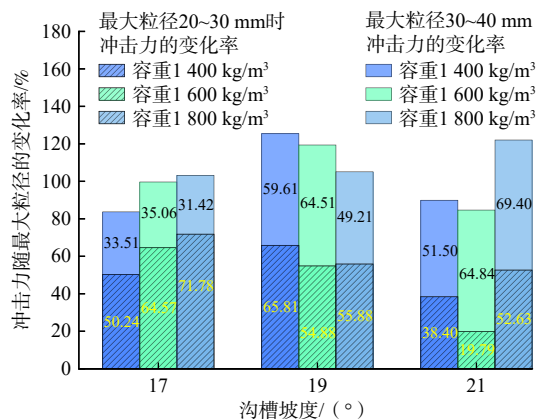


图 17 最大粒径改变时坝前冲击力的变化率

Fig. 17 The change rate of impact force in front of the dam when the maximum particle size changes

以容重为 1 600 kg/m<sup>3</sup> 的宽级配泥石流为例分析最大粒径与流速、流深、弗洛德数的关系。如图 18 所示, 21°的沟槽坡度下, 最大粒径与泥石流流速、流深以及弗洛德常数都呈正相关变化, 在沟槽坡度 17°、19°的条件下, 最大粒径与泥石流流速、流深以及弗洛德常数出现先增大后减小的变化趋势。但同改变坡度与泥石流容重引起的变化相比, 最大粒径的改变对于宽级配泥石流流速、流深与弗洛德参数的影响不明显, 规律性不强。说明宽级配泥石流固相最大粒径变化对冲击力的影响, 不是主要通过改变泥石流流速、流深以及弗洛德常数来实现。参考学者们对这方面

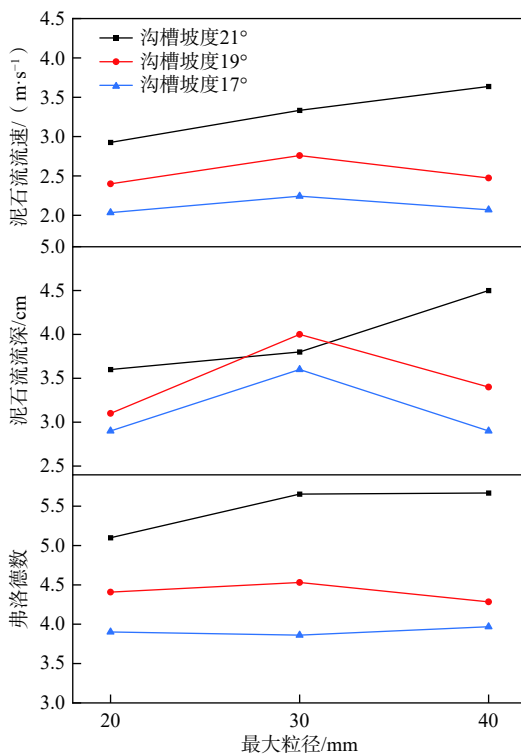


图 18 1 600 kg/m<sup>3</sup> 容重条件最大粒径与泥石流特征参数的关系

Fig. 18 Relationship between maximum particle size and characteristic parameters of debris flow under the condition of 1 600 kg/m<sup>3</sup> bulk density

所做的一些研究<sup>[33-34]</sup>,发现由于宽级配泥石流粗颗粒含量多、粒径大,冲击力分为泥石流浆体对拦砂坝整体冲击以及大块石局部冲击。而泥石流流速、流深与弗洛德参数主要影响泥石流浆体的冲击力,说明宽级配泥石流粗颗粒粒径增大是使块石对局部的冲击力增大,从而使泥石流整体的冲击力增大。

结合上述分析,宽级配泥石流的容重、固相最大粒径以及坡度都不同程度影响对拦砂坝冲击力的大小,但在其中泥石流固相最大粒径对冲击力的影响最大,粒径越大,泥石流冲击力也越大。在对西藏泥石流的实际调查中也发现受冲击破坏的拦砂坝多是局部损毁,说明对于高海拔地区宽级配泥石流,对坝体造成破坏的主要为流体中大块石的集中荷载。所以对于高海拔地区宽级配泥石流,固体物源的最大粒径对冲击力影响最为显著,设计拦砂坝时应重点考虑。

## 5 结论

(1)宽级配泥石流的触坝演化过程分为“冲击爬高-旋滚回流-堆积回淤”3个接触演化阶段。沟槽坡度与固相最大粒径变化对其触坝演化过程影响很小,泥石流冲击演化形态与容重的大小有关。其中泥石流

容重越小,冲击爬升高度越高,堆积回淤高度越低,演化的阶段性越明显。

(2)相同条件下,宽级配泥石流容重越大,流体携带物源移动越困难,泥石流流速减小,从而使拦砂坝受到的冲击力减小,在缓坡条件下减弱效果更明显。沟槽坡度增加,泥石流流速增大,流深增大,冲击力增大,并且粗颗粒越多、粒径越大对坡度对冲击力的影响越显著。固相最大粒径越大,泥石流冲击力越大,固相最大粒径变化与泥石流流速、流深以及弗洛德数 Fr 没有明显规律关系。

(3)与其他影响因素相比较,宽级配泥石流中固相最大粒径对其冲击力的影响效果最为显著,并且粒径越大,泥石流冲击力增大程度越明显。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 张文举,何昌荣.宽级配泥石流砾石土的动强度试验研究[J].四川水力发电,2003,22(1):66-69. [ZHANG Wenju, HE Changrong. Experimental study on dynamic strength of gravel soil with wide gradation debris flow[J]. Sichuan Hydro Power, 2003, 22(1): 66 - 69. (in Chinese) ]
- [ 2 ] 何坤,胡卸文,刘波,等.川藏铁路某车站泥石流群发育特征及对线路的影响[J].水文地质工程地质,2021,48(5):137-149. [HE Kun, HU Xiewen, LIU Bo, et al. Characteristics and potential engineering perniciousness of the debris flow group in one station of the Sichuan-Tibet Railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 137 - 149. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 赵志男,李滨,高杨,等.西藏然乌湖口高位地质灾害变形特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):25-32. [ZHAO Zhinan, LI Bin, GAO Yang, et al. Analysis of deformation characteristics of high geological disasters in Ranwuhukou, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 25 - 32. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 高波,张佳佳,王军朝,等.西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征[J].水文地质工程地质,2019,46(5):144-153. [GAO Bo, ZHANG Jijia, WANG Junchao, et al. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 144 - 153. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 罗荣章,徐则民.怒江东月各特大泥石流流域几何形态学特征[J].水文地质工程地质,2016,43(6):141-



147. [ LUO Rongzhang, XU Zemin. Basin morphology characteristics of the giant debris flow in the Dongyue gully near the Nujiang River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 141 - 147. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 徐腾辉, 冯文凯, 魏昌利, 等. 高寒高海拔山区南门关沟泥石流成因机制分析 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2015, 13(5): 90 - 96. [ XU Tenghui, FENG Wenkai, WEI Changli, et al. Formation mechanism of debris flows at nanmenguan gully in the area with high altitude and extremely cold climate[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2015, 13(5): 90 - 96. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 等. 基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟——以甘肃舟曲三眼峪沟泥石流拦挡坝为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 78 - 83. [ LIU Xingrong, WEI Xinping, CHEN Yujin, et al. Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 78 - 83. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] SCHEIDL C, CHIARI M, KAITNA R, et al. Analysing debris-flow impact models, based on a small scale modelling approach[J]. *Surveys in Geophysics*, 2013, 34(1): 121 - 140.
- [ 9 ] 张睿骁, 樊晓一, 姜元俊. 滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟 [J]. *水文地质工程地质*. 2019, 46(1): 148 - 155. [ ZHANG Ruixiao, FAN Xiaoyi, JIANG Yuanjun. Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology* 2019, 46(1): 148 - 155. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] SONG D, CHOI C E, NG C W W, et al. Geophysical flows impacting a flexible barrier: Effects of solid-fluid interaction[J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 99 - 110.
- [ 11 ] 于献彬, 陈晓清, 王道正, 等. 黏性泥石流浆体对拦砂坝冲击规律研究 [J]. *人民黄河*, 2017, 39(3): 37 - 44. [ YU Xianbin, CHEN Xiaoqing, WANG Daozheng, et al. Study on the impact rule of viscous debris flow to check dams[J]. *Yellow River*, 2017, 39(3): 37 - 44. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 赵海鑫, 游勇, 柳金峰, 等. 泥石流浆体冲击拦砂坝荷载计算的实验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(5): 756 - 762. [ ZHAO Haixin, YOU Yong, LIU Jinfeng, et al. Experimental study on debris flow slurry impact[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(5): 756 - 762. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 樊圆圆, 宋玲, 魏学利. 基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析——以中巴公路艾尔库然沟为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(1): 1 - 9. [ FAN Yuanyuan, SONG Ling, WEI Xueli. Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test: A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(1): 1 - 9. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 王翔, 陈果, 戴晓爱, 等. 藏西南典型危险性冰湖监测与泥石流溃决模拟 [J]. *山地学报*, 2021, 39(5): 687 - 700. [ WANG Xiang, CHEN Guo, DAI Xiaoi, et al. Typical monitoring of dangerous glacial lakes in southwestern Tibet, China and simulation of GLOF debris flow[J]. *Mountain Research*, 2021, 39(5): 687 - 700. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 向灵芝, 杨为民, 范玮佳. 典型地震扰动区泥石流堆积体工程特性及其启动机制 [J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(6): 176 - 182. [ XIANG Lingzhi, YANG Weimin, FAN Weijia. Discussion on engineering characteristics of debris flow deposits and its initiating mechanism in typical earthquake disturbance area[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6): 176 - 182. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 王洋, 崔鹏, 王兆印, 等. 泥石流龙头的形成及特征研究 [J]. *水利学报*, 2017, 48(4): 473 - 479. [ WAHNG Yang, CUI Peng, WANG Zhaoyin, et al. Study on the formation and characteristics of height of debris flow head[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(4): 473 - 479. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 刘佳, 赵海军, 马凤山, 等. 我国高寒山区泥石流研究现状. *工程地质学报*, 2020, 28(增刊 1): 77 - 85. [ LIU Jia, ZHAO Haijun, MA Fengshan, et al. Recent study status of debris flow in the frigid alpine mountain area in China. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(Sup 1): 77 - 85. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 何晓英, 陈洪凯, 唐红梅, 等. 泥石流龙头冲击特性模型实验研究 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(1): 85 - 89. [ HE Xiaoying, CHEN Hongkai, TANG Hongmei, et al. Experimental study on impacting characteristics of debris flow heads[J]. *Journal of*

- Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(1): 85 – 89. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 周必凡, 李德基, 罗德福, 等. 泥石流防治指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. [ ZHOU Bifan, LI Deji, LUO Defu, et al. Guide to debris flow prevention and control [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese) ]
- [20] 刘果. 岩土体参数与场地条件对泥石流堆积特征影响研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019. [ LIU Guo. Study on the influence of geotechnical parameters and site conditions on debris flow accumulation characteristics [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] LOBOVSKÝ L, BOTIA-VERA E, CASTELLANA F, et al. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 48: 407 – 434.
- [22] HELLER V. Scale effects in physical hydraulic engineering models [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2011, 49(3): 293 – 306.
- [23] ARMANINI A, LARCHER M, ODORIZZI M. Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wall [J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2011, 3: 1041 – 1049
- [24] CHOI C E, AU-YEUNG S C H, NG C W W, et al. Flume investigation of landslide granular debris and water runoff mechanisms [J]. *Géotechnique Letters*, 2015, 5(1): 28 – 32.
- [25] PUDASAINI S P, KRÖNER C. Shock waves in rapid flows of dense granular materials: Theoretical predictions and experimental results [J]. *Physical Review E*, 2008, 78(4): 041308.
- [26] CUI Peng, ZENG Chao, LEI Yu. Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(12): 1644 – 1655.
- [27] ZHOU G G D, HU H S, SONG D, et al. Experimental study on the regulation function of slit dam against debris flows [J]. *Landslides*, 2019, 16(1): 75 – 90.
- [28] 黄海, 刘建康, 杨东旭. 泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 161 – 168. [ HUANG Hai, LIU Jiankang, YANG Dongxu. A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 161 – 168. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 王东坡, 张小梅. 泥石流冲击弧形拦挡坝动力响应研究 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 3851 – 3861. [ WANG Dongpo, ZHANG Xiaomei. Study on dynamic response of debris flow impact arc-shaped dam [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 3851 – 3861. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 孙兴伟, 刘云鹏. 大古与街需水电站工程区泥石流基本特征及冲击力试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(2): 167 – 172. [ SUN Xingwei, LIU Yunpeng. Debris flow characteristics and its impact force test in the engineering areas of Dagu and Jiexu hydropower stations in Tibet [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(2): 167 – 172. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 李炳志, 潘华利, 邓其娟, 等. 动床条件下泥石流运动参数变化特征实验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(4): 850 – 858. [ LI Bingzhi, PAN Huali, DENG Qijuan, et al. Experimental study on variation characteristics of debris flow movement parameters under movable bed conditions [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(4): 850 – 858. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 渠敬凯, 杨为民, 申俊峰, 等. 甘肃岷县浑水沟泥包砾成因机制及其灾害意义 [J]. *地质力学学报*, 2022, 28(6): 1046 – 1058. [ QU Jingkai, YANG Weimin, SHEN Junfeng, et al. Genetic mechanism and disaster significance of muddy water ditch mud gravel in Min County, Gansu Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(6): 1046 – 1058. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 曾超, 苏志满, 雷雨, 等. 泥石流浆体与大颗粒冲击力特征的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1923 – 1930. [ ZENG Chao, SU Zhiman, LEI Yu, et al. An experimental study of the characteristics of impact forces between debris flow slurry and large-sized particles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1923 – 1930. (in Chinese with English abstract) ]
- [34] 柳春, 余志祥, 骆丽茹, 等. 含大块石泥石流冲击作用下混凝土拦挡坝的动力学行为研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(14): 161 – 168. [ LIU Chun, YU Zhixiang, LUO Liru, et al. Dynamic behavior of a concrete dam impacted by debris flows with rock [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(14): 161 – 168. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 王支农