

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.024

## 泥石流梁式格栅坝泥砂粒径调节试验研究\*

孙昊<sup>1,2</sup>, 游勇<sup>1</sup>, 柳金峰<sup>1</sup>, 刘道川<sup>1,2</sup>, 张莉<sup>1,2</sup>

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 梁式格栅坝是泥石流防治工程中一种常见的透过型拦砂坝,具有拦粗排细的独特功效。通过室内水槽模型试验,探究了梁式格栅坝对泥石流泥砂粒径的调节特性。研究表明,梁式格栅坝在试验工况下均表现出一定的粒径调节作用,但在不同条件下差异明显,对于水石难分的高容重泥石流难以达到较好的粒径调节效果。分析认为,透过型拦砂坝的粒径调节可能是其容重调节的原因,坝体拦截了大部分粗颗粒物,使泥石流体的结构变化,导致泥石流浆体能悬浮和输移的最大颗粒粒径变小。其次,提出了一种可用于透过型拦砂坝泥砂粒径调节效率的评价方法,并对比分析了该方法与现有常用评价方法的优势与合理性;基于模拟试验结果,通过多元非线性拟合,得到了新评价方法下考虑泥石流性质、过坝前运动状态和坝体尺寸的影响因素的泥砂粒径调节效率计算公式,可为梁式格栅坝设计中粒径调节效率的预测评估提供参考。此外,试验发现,梁式格栅坝泥砂粒径调节效果还受其拦截泥石流时的闭塞表现的影响。

**关键词:** 泥石流; 梁式格栅坝; 泥砂粒径调节; 水槽试验

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-1037-08

## Experimental Study on Sediment Size Regulating of Beam Type Debris Flow Check Dam

SUN Hao<sup>1,2</sup>, YOU Yong<sup>1</sup>, LIU Jinfeng<sup>1</sup>, LIU Daochuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Li<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Beam dam, which is an open-type check dam, has a good application in debris flow hazard mitigation. In this paper, a series of flume experiments were conducted to investigate the characteristics of the beam type debris flow check dam on sediment size regulating. The grain compositions before and after debris flow passing through the beam dam were obtained by the oven and vibrating screen. The experimental results reveal that the beam type debris check dam has high performance on size regulating. But it performs relatively low regulating efficiency for debris flow with high bulk density in which the water and blocks are difficult to be separated. Analysis result supports that the regulating capacity of the beam dam depends on the bulk density. Secondly, a new evaluation index consider-

\* 收稿日期:2018-09-05;修回日期:2018-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41772343)、中国科学院STS项目(KFJ-STS-ZDTP-015)、中科院山地所“十三五”项目(SDS-135-1701)资助

作者简介:孙昊(1993-),男,博士研究生。主要从事泥石流减灾理论与试验研究。Email:snghyro93@163.com

通讯作者:游勇(1964-),男,研究员,博导。主要从事泥石流运动机理及综合防治技术研究。E-mail:yyong@imde.ac.cn

ing grain size was proposed and compared with the common index in the previous studies. The analysis indicates that the regulating efficiency decreases first and then increases with the increase of relative opening, and reaches the minimum value at a relative opening of about 1.5. Furthermore, based on the experimental data, a calculated formula for sediment size regulation was obtained. It can provide a reference for practical engineering. Additionally, the regulating effect also was influenced by the blocking performance in the tests.

**Keywords:** debris flow; beam dam; sediment size regulation; flume experiment

## 引言

泥石流作为山区常见的一种自然现象,是介于挟沙水流和滑坡之间的土、水、气三相混合流<sup>[1-2]</sup>,具有爆发突然,流动速度差异悬殊,规模巨大,历时短暂,危害严重等特征<sup>[3]</sup>。通过泥石流防治工程措施可以有效地抵御泥石流灾害,拦砂坝作为调控泥石流运动的关键防治工程,在泥石流灾害治理中被广泛地应用<sup>[4-6]</sup>,其主要用于降低泥石流动力,抬高侵蚀面,增加沟床稳定性等<sup>[1]</sup>。通过半个多世纪的发展演化,泥石流拦砂坝根据结构形式一般可分为透过型(open-type)和非透过型(close-type),其中非透过型拦砂坝也称实体坝<sup>[2,7]</sup>。透过型拦砂坝最早在欧洲部分国家受到重视并投入工程使用,二十世纪五、六十年代以后在美国、日本等地得到较好的发展和广泛的应用<sup>[2,7]</sup>,根据溢流段采用的开放式结构的不同一般包括格栅坝、缝隙坝、梳齿坝、窗口坝等。

透过型拦砂坝的调控特性是指泥石流通过拦砂坝前后其性质和规模等发生一定变化的现象,主要体现在泥石流容重、洪峰流量以及土体颗粒组成等方面。韩文兵等<sup>[8]</sup>对比研究了不同透过型拦砂坝对泥石流龙头泥沙体积浓度的调节规律。贾世涛等<sup>[9]</sup>通过水槽模型试验,分析了坝体开孔率对泥石流拦砂坝调节性能,研究还表明透过型拦砂坝对稀性泥石流的拦粗排细效果最显著。赵彦波<sup>[10]</sup>提出临界粒径的概念,通过室内模型试验探究了窗口坝对不同容重泥石流泥砂粒径的调节效果。Y.H.Zou等<sup>[11]</sup>通过实际工程中窗口坝运行现状调查,分析建立了窗口坝群拦截泥石流效果的评价模型,提出了窗口坝群的坝体参数的设计方法,研究结果还表明窗口坝布置对其拦截效果有一定影响,呈上游至下游逐渐递减的趋势,而沟道坡度的影响则相对较小。H.Lien<sup>[12]</sup>基于物质守恒定律,以梳齿坝为研

究对象,推导了泥沙出库率与泥沙体积浓度比的关系式,提出了梳齿坝群的设计方法和流程。此后,杨子阜<sup>[13]</sup>、林基源等<sup>[14]</sup>、黄育珍等<sup>[15]</sup>分别对梳齿坝的拦截效果、颗粒分离效果等拦砂节流性能开展了相关的模型研究工作。X.Lin等<sup>[16]</sup>则通过模型试验研究了梳齿坝的拦截泥石流时的坝后堆积形态特征。C.Wendeler等<sup>[17]</sup>和M.Huo等<sup>[18]</sup>通过水槽模型试验研究了柔性网格坝对泥石流的拦截效果,C.Wendeler等<sup>[17]</sup>基于试验结果还给出了柔性网格尺寸设计的建议值。

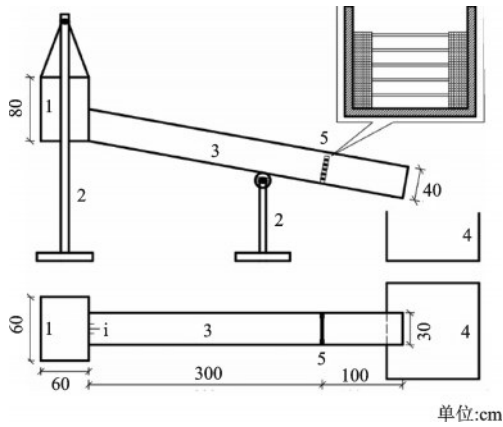
尽管目前的研究对透过型拦砂坝的实践应用有一定程度上的指导作用,而且透过型拦砂坝在泥石流防治中已经发挥了显著作用<sup>[19-20]</sup>,但是与大多数泥石流防治工程一样,由于泥石流与坝体相互作用的复杂性,以及拦砂机理尚不明晰,其设计仍然处于一个实践先于理论的阶段,关键设计参数和防治效果评价仍无定量化计算方法可供参考。设计规范中也仅是以相对开度1.5~2.0作为开口尺寸设计的推荐值,而且工程实践中多保守取值( $<1.0$ )。对于梁式格栅坝的拦粗排细功能也仅是停留在概念层面,对其特征与规律还认识不清。本文以梁式格栅坝为研究对象,选取泥石流容重和横梁间距为主要参数,通过室内水槽模型试验,探究不同组合条件下梁式格栅坝对泥砂粒径调节特征与效果,旨在降低梁式格栅坝在工程设计中的经验性,使其更好地发挥其拦排功效,以提高工程价值。

## 1 试验概况

### 1.1 试验装置与物料

本次水槽试验在中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室的泥石流模拟实验大厅进行。如图1所示,试验装置主要包括料斗(最大容积约0.25 m<sup>3</sup>)、水槽(400 cm×30 cm×40 cm)、尾料池(80 cm×80 cm×40 cm)等组成。梁式格栅坝模型与水

槽等宽,设计坝高为20 cm,两侧支墩宽度均为5 cm,中部过流段宽20 cm,横梁统一采用直径6 mm 钢筋;格栅坝布置于水槽3/4处(从料斗闸门口至水槽出口)。



1.料斗;2.支架;3.水槽;4.尾料池;5.模型坝

图1 试验水槽示意

Fig.1 Sketch of elevation and plan views of experiment flume

试验物料取自汶川震区某泥石流沟2012年爆发泥石流后未经扰动的堆积区原样<sup>[21]</sup>,并使用40 cm×40 cm 钢筛剔除大颗粒砾石,以满足文献[1]关于泥石流模型试验中水槽宽度不小于物料最大颗粒粒径5倍的基本要求。剔除大颗粒后的物料级配曲线如图2所示,最大粒径 $d_{max}=40$  mm,中值粒径 $d_{50}=7$  mm,不均匀系数 $C_u=39.17$ ,曲率系数 $C_c=4.54$ 。

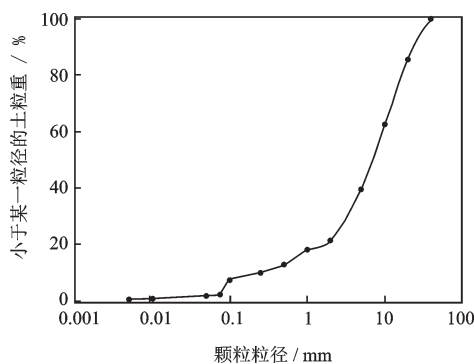


图2 试验物料级配曲线

Fig.2 Particle size composition of the experimental material

## 1.2 试验设计与流程

梁式格栅坝对泥石流的拦截是一个受多因素影响的复杂过程。横梁间距是梁式格栅坝最主要的坝体结构参数,容重则是表征泥石流性质的重要

参数,试验选取泥石流容重和横梁间距为两个主要参数,配置容重分别为1.3、1.5、1.7、1.9、2.1 g/cm<sup>3</sup>的试验泥石流,设置五个横梁间距 $b=11、22、33、44、55$  mm,均为横梁净间距,共进行了25次水槽模型试验。考虑到梁式格栅坝多修建于泥石流流域中下游沟段,沟床纵比降一般不大,试验设计纵坡为10.5%,以模拟宽缓沟道内梁式格栅坝对泥石流的调控过程。试验条件见表1。由于本次试验的主要目的是针对梁式格栅坝对泥石流的泥沙粒径调节过程的研究,因此试验设计中,并没有针对某一特定的梁式格栅坝实例进行严格的尺寸相似设计,而是保持试验模型与真实泥石流与梁式格栅坝作用原型弗洛德数的一致。

此外,为了便于对试验结果的分析,本文选取泥石流泥沙体积浓度和相对开度两个无量纲参数分别代表泥石流容重和横梁间距,其中泥沙体积浓度 $C_v = \frac{\rho_T - \rho}{\sigma - \rho}$ , $\rho_T$ 为泥石流容重, $\rho$ 为泥石流中水的容重, $\sigma$ 为泥石流中土的实体容重,一般为2.6~2.8 g/cm<sup>3</sup>,取样区岩性以片麻岩和花岗岩为主,本文取值为2.65 g/cm<sup>3</sup>;相对开度表示坝体开口尺寸与特征粒径的比值,关于特征粒径的选取不同学者在研究中也各不相同<sup>[8,10,12]</sup>,一般多选用 $d_{max}$ 、 $d_{95}$ 和 $d_{90}$ ,本文选取 $d_{90}$ (22 mm)作为特征粒径,即相对开度可表示为 $b/d_{90}$ 。

表1 试验条件

Table 1 Test conditions

泥石流容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	横梁间距/ mm	水槽纵 坡/%	泥石流 体积/L	有效坝 高/cm
1.3	11			
1.5	22			
1.7	33	10.5	90	20
1.9	44			
2.1	55			

试验过程中,先配置设计容重的泥石流流体并贮入料斗内搅拌均匀,迅速开启闸门至设计高度(15 cm),使泥石流平稳地有控制地放出,待泥石流通过梁式格栅坝,最终停止运动。将尾料池中过坝后泥石流流体搅拌均匀,取3~4 L置于托盘(图3),静置待充分沉降后滤水,放入烘箱中烘干并进行筛分,以获得过坝后泥石流颗粒级配曲线。



图3 过坝后泥石流样

Fig.3 Debris flow passed through the beam dam

## 2 试验结果分析

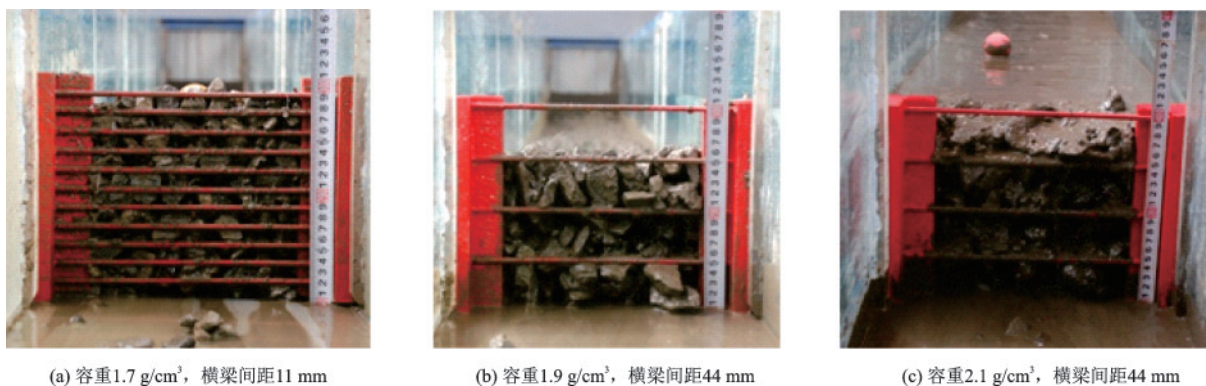
### 2.1 泥石流过坝前后颗粒粒径组成变化特征分析

拦粗排细、汰沙排水是梁式格栅坝等透过型坝体的独特优势。图4为泥石流通过梁式格栅坝时的拦排现象。本文根据水槽试验结果,分析泥石流过坝前后颗粒组成的变化特征,包括粗砾(40~10 mm)、中细砾(10~2 mm)、砂粒(2~0.075 mm)和粉粒(<0.075 mm)四个粒径范围。试验现象表明,梁式格栅坝的泥砂粒径调节效果与泥石流容重和横梁开口间距密切相关,间接反映在梁式格栅坝的闭塞表现和拦砂性能。如图5所示,在试验工况下,梁式格栅坝对泥石流土体颗粒粒径都有一定的调节作用,但拦粗排细效果差异明显。图5(a)、(b)分析表明,在拦截容重较大(2.1、1.9 g/cm<sup>3</sup>)的泥石流时,

梁式格栅坝虽然可以表现出一定的粒径调节效果,其主要原因是该工况下泥石流整体性较好,梁式格栅坝极易闭塞,拦砂效率较高,而且此时泥石流粘度大颗粒难以分离,基本上只有较小的砂粒和粉粒可以通过,特别是横梁间距较小时,表现出与实体坝相似的无选择性拦截,梁式格栅坝对泥石流的拦截主要依靠透过型格栅的闭塞,即过高的闭塞度将表现为较高的拦截效率,如图5所示,横梁间距为11 mm时,虽表现出一定的拦粗排细效果,但根据图4所示的拦排现象可知,当横梁间距较小时,透过型格栅结构易遭泥石流中固体物质堵塞,表现出全闭塞的情况以及过高的拦截效率而并未发挥梁式格栅坝有拦有排的功效。

大量的室内试验和野外实测现象均表明拦砂坝对泥石流容重有明显的调节作用。Y.Li等<sup>[22-24]</sup>认为泥石流颗粒组成与泥石流的容重存在密切联系。结合试验现象与分析结果可以认为,透过型拦砂坝对泥石流容重的调节可能是其对泥石流物质组成调节的结果。因为坝体拦截了大部分粗颗粒物质,粗颗粒物质的减少使得原有格架结构中的石块脱离粗粒浆体,格构结构被破坏进而向细粒浆体的网粒结构转化,甚至破坏网格结构,泥石流体的结构变化,导致泥石流浆体能悬浮和输移的最大颗粒粒径变小。

同时,根据分析结果可知,“拦粗排细”应该是一个相对的概念,坝体对泥石流体进行分选,并不是所有小于某粒径的固体颗粒都会被排泄至下游,或者大于某粒径的固体颗粒都会被坝体拦截于库内。对于透过型拦砂坝而言,坝体开口的闭塞是其拦截泥石流体的前提,是泥石流体中一个或多个大块石在开口边界处成拱作用(arch action)的结果<sup>[25-26]</sup>。在工程设计中,应首先确定拟拦截的最小



(a) 容重1.7 g/cm<sup>3</sup>, 横梁间距11 mm

(b) 容重1.9 g/cm<sup>3</sup>, 横梁间距44 mm

(c) 容重2.1 g/cm<sup>3</sup>, 横梁间距44 mm

图4 试验中泥石流通过梁式格栅坝时拦排现象

Fig.4 Intercepting of debris flow by the beam dam in experiments

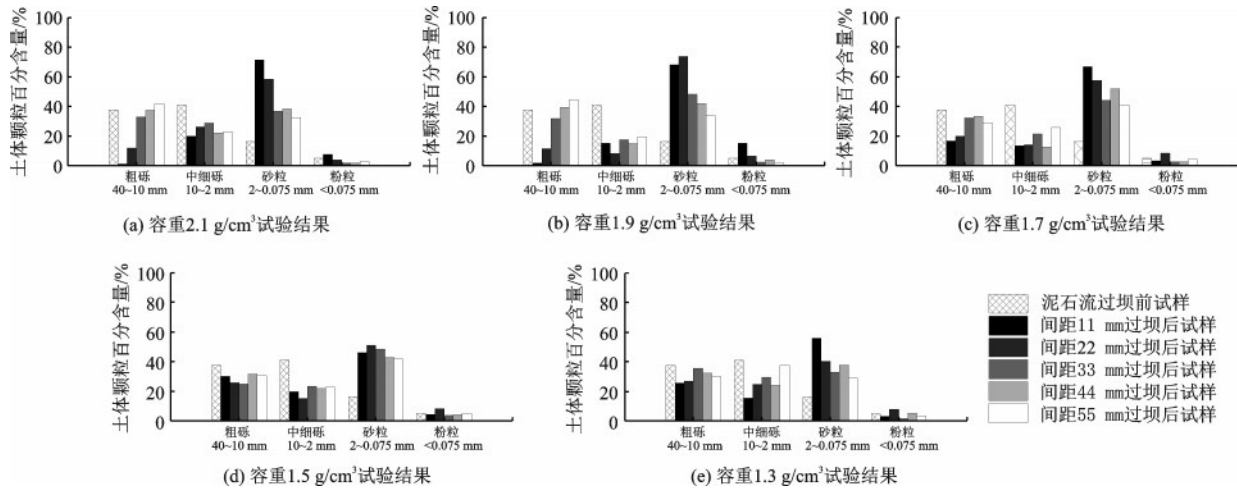


图5 泥石流过坝前后土体颗粒组成变化

Fig.5 Change of sediment size composition of debris flow before and after passing through the beam dam

颗粒粒径。

因此,透过型坝拦截泥石流流体可分为两个过程:首先,坝体开口未完全闭塞时,坝体允许小于可形成有效闭塞的颗粒粒径的固体物质排泄至下游;其次,当坝体开口闭塞后,则与实体坝类似,所有固体颗粒物质均被拦截,仅有浆体部分可能通过闭塞体间的空隙流出(此时闭塞体间的空隙与实体坝的排水孔类似),即透过型拦砂坝对泥石流流体粒径调节是这两个过程综合作用的结果。

## 2.2 泥砂粒径调节效率分析

前文已经分析了梁式格栅坝对泥石流中的土体颗粒物质存在一定的分选作用,拦粗排细效果是反映格栅坝对泥石流固体颗粒粒径调节作用的重要指标。为最大限度的拦截粗颗粒物质,排出小于某一特定粒径的细颗粒物质,从而充分利用有限的库容,提高工程效益,国内外学者进行了相关研究,但没有一个统一的方法对其拦粗排细效果进行合理有效的评价,目前研究者们一般选取过坝前后平均粒径 $d_m$ 或中值粒径 $d_{50}$ 的比值作为量化指标<sup>[15]</sup>,如式(1)为平均粒径比值,显然该参数很大程度上仅能反映过坝前后颗粒的细化或粗化程度。 $d_{84}$ 、 $d_{50}$ 和 $d_{16}$ 通常被认为可以有效刻画土体级配情况,一些学者在高含沙水流和泥石流等的研究中也把 $d_{84}$ 和 $d_{16}$ 作为粗细颗粒的上下界限粒径<sup>[27-29]</sup>,为探究梁式格栅坝对泥石流土体颗粒粒径的调节规律,本文提出一种新的量化评价指标参数,如式(2)所示,并对分析两种泥砂粒径调节效果评价方法。

$$R_m = \frac{d_{mp}}{d_{mo}} \quad (1)$$

式中, $R_m$ 为颗粒细化率; $d_{mp}$ 为过坝后泥石流平均粒径; $d_{mo}$ 为泥石流原始物料平均粒径。

$$\omega_p = \frac{d_{84p}/d_{84o}}{d_{16p}/d_{16o}} = \frac{d_{84p} \cdot d_{16o}}{d_{84o} \cdot d_{16p}} \quad (2)$$

式中, $\omega_p$ 为颗粒粒径调节效率,表征梁式格栅坝拦粗排细效果的指标参数; $d_{84o}$ 和 $d_{16o}$ 为泥石流原始物料土体颗粒累计百分含量小于84%和16%的对应粒径值; $d_{84p}$ 和 $d_{16p}$ 为过坝后泥石流土体颗粒累计百分含量小于84%和16%的对应粒径值; $d_{84p}/d_{84o}$ 表征梁式格栅坝的拦粗效果,即该比值越小,拦粗效果越好; $d_{16p}/d_{16o}$ 表征梁式格栅坝的排细效果,即该比值越大,排细效果越好。

因此颗粒粒径调节效率 $\omega_p$ 值越小表征梁式格栅坝的拦粗排细效果越好,但当 $\omega_p$ 值小于某一极小值时则表现为实体坝的无选择性拦截。

### 2.2.1 横梁间距对粒径调节效率的影响

由图6可知,梁式格栅坝在拦截高容重(2.1、1.9 g/cm<sup>3</sup>)的泥石流时,颗粒粒径调节效率随相对开度的增大而增大,其主要原因是,高容重泥石流整体性较好,流动状态基本呈现为层流,相同间距的格栅坝在拦截高容重泥石流时表现为高闭塞率和无选择性拦排,即对水石难分的高容重泥石流难以达到良好的拦粗排细效果;梁式格栅坝在拦截低容重(1.5、1.3 g/cm<sup>3</sup>)的泥石流时,颗粒粒径调节效率随相对开度的增大呈先减小后增大的趋势,在相对开度为1.5左右达最小值,即此时梁式格栅坝的拦粗排细效果最佳;而梁式格栅坝在拦截容重1.7

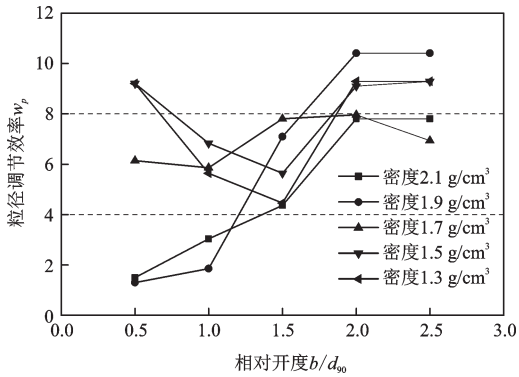


图6 粒径调节效率与相对开度关系对比

Fig.6 Relationship between regulating efficiency on sediment size composition and relative opening

$g/cm^3$ 的泥石流时,颗粒粒径调节效率值为6~8,此时梁式格栅坝的粒径调节效果一般,在相对开度为1.0时取得最小值。

### 2.2.2 泥石流容重对粒径调节效率的影响

试验结果表明,不同相对开度条件下,泥石流容重对粒径调节效率的影响规律差异较大。由图7分析可知,当在拦截体积浓度小于0.424(容重 $1.7 g/cm^3$ )的泥石流时,相对开度1.0和1.5的格栅坝粒径调节效率要明显优于相对开度0.5、2.0和2.5( $\omega_p$ 值越小,调节效率越好)。同时,试验还发现,相对开度较大(2.0和2.5)时,格栅坝调节容重 $1.7 g/cm^3$ 的泥石流效率最优,而相对开度1.5的格栅坝调节容重较大或者较小的泥石流时效果较好。此外,泥石流容重对粒径调节效率的影响不仅体现在泥沙体积浓度的差异,还受泥石流运动状态的影响,因为不同容重泥石流其运动状态也差异明显。

通过上述分析,本文所提出的梁式格栅坝拦颗

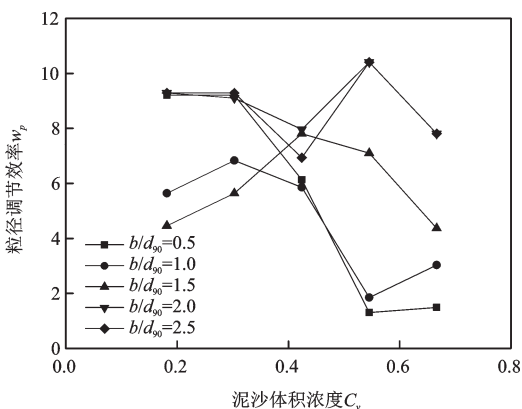


图7 粒径调节效率与泥沙体积浓度关系对比

Fig.7 Relationship between regulating efficiency on sediment size composition and sediment concentration

粒粒径调节效率 $\omega_p$ 能合理有效地表征梁式格栅坝在拦截泥石流过程时反映拦粗排细特征,能更科学地判断不同工况下梁式格栅坝对泥石流中泥砂粒径的调节效果。

梁式格栅坝对泥石流泥砂粒径的调节是一个受多因素影响的复杂过程,除了受泥石流容重和横梁间距两个主要因素影响外,泥石流过坝前的运动状态对该过程也有一定的影响,且各影响因素之间是相互耦合作用关系,因此梁式格栅坝的颗粒粒径调节效率可用如下函数形式表示:

$$\omega_p = f(b/d_{90}, C_v, F_r) = f(\chi = \alpha_0 (b/d_{90})^{\alpha_1} C_v^{\alpha_2} F_r^{\alpha_3}) \quad (3)$$

式中, $F_r = v/\sqrt{gh}$ 为泥石流过坝前的弗洛德数,表示泥石流过坝前的运动状态; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为待定系数; $\chi$ 为各因素综合影响的无量纲参数,系数绝对值的相对大小表示相应影响因素对颗粒粒径调节效率的重要程度,系数绝对值越大,相应因素影响就越大,反之则越小。

基于试验分析结果,根据式(3)通过最小二乘法确定得颗粒粒径调节效率计算式:

$$\omega_p = 4.3482 (b/d_{90})^{0.3872} C_v^{-0.3879} F_r^{-0.2671} \quad (4)$$

通过式(4)得到 $\omega_p$ 计算值,并与实验值进行比较,如图8所示,二者具有一定的吻合度,结果可为梁式格栅坝设计中粒径调节效率的预测评估提供参考。且当颗粒调节效率值 $\omega_p$ 小于6时,计算值要略高于试验值,而大于6时试验值要略高于计算值。此外,式(4)还表明,相对开度和泥沙体积浓度两者的影响要稍大于泥石流运动状态的影响。

由于梁式格栅坝对泥沙粒径的调节是一个受

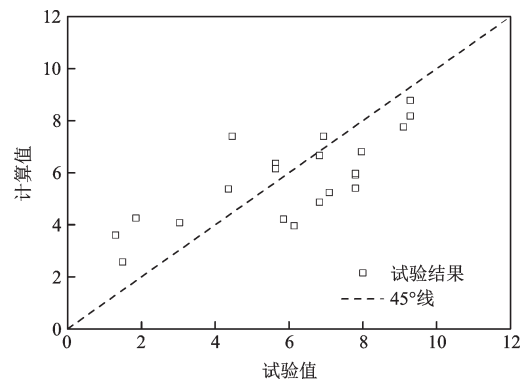


图8 计算值与实验值的对比

Fig.8 Comparison between calculated and experimental value of the regulating efficiency on size composition

多因素影响的复杂过程,本文仅考虑了其中的几个主要影响参数,此外,梁式格栅坝的闭塞表现具有一定的随机性,这一现象也将一定程度上影响其调节过程。

### 3 结 论

透过型拦砂坝对泥石流中泥砂粒径的调节是其拦排兼具的一个重要特征,通过室内水槽模拟试验,探究了梁式格栅坝的泥砂粒径调节特征与效果,分析得到以下结论:

(1)梁式格栅坝在试验工况下均表现出一定的粒径调节作用,但在不同条件下差异明显,当泥石流容重较大、横梁间距较小时,虽表现出拦粗排细的效果,但由于其过高的拦截效率仅有较细的砂粒和粉粒能通过而并未发挥梁式格栅坝有拦有排的功效。此外,相同横梁间距条件下,对水石难分的高容重泥石流也难以达到良好的粒径调节效果。透过型拦砂坝的粒径调节可能是其容重调节的原因,坝体拦截了大部分粗颗粒物质,使泥石流体的结构变化,导致泥石流浆体能悬浮和输移的最大颗粒粒径变小。

(2)提出了一种可用于透过型拦砂坝泥砂粒径调节效率的评价方法,并结合试验数据,对比分析了该方法与现有常用评价方法的优势与合理性,分析结果表明,相对开度较大(2.0和2.5)时,格栅坝调节容重 $1.7\text{ g/cm}^3$ 的泥石流效率最优,而相对开度1.5的格栅坝调节容重较大或者较小的泥石流时效果较好。

(3) $d_{84}$ 、 $d_{50}$ 、 $d_m$ 和 $d_{16}$ 通常被认为可以有效刻画土体级配情况,现有评价方法多采用 $d_{50}$ 或 $d_m$ 的单一粒径来表征过坝前后泥石流颗粒粒径组成的变化,而由于透过型拦砂坝的泥砂粒径调节主要体现在拦粗排细方面,且 $d_{84}$ 和 $d_{16}$ 在泥石流研究中可作为粗细颗粒的上下界限粒径,本文选取 $d_{84}$ 和 $d_{16}$ 来综合表征泥石流过坝前后粗细颗粒的变化,一定程度上能更好的刻画过坝前后泥石流颗粒粒径组成的变化。

(4)梁式格栅坝对泥石流泥砂粒径的调节是一个受多因素影响的复杂过程,基于模拟试验结果,通过多元非线性拟合,得到了新评价方法下考虑泥石流性质、过坝前运动状态和坝体尺寸的影响因素的泥砂粒径调节效率计算式,可为梁式格栅坝设计中粒径调节效果的预测评估提供参考。

(5)梁式格栅坝对泥砂粒径的调节与其拦排有关,而其拦排又受坝体闭塞的影响,试验发现,梁式格栅坝的闭塞表现具有一定的随机性,例如,在试验过程中,梁式格栅坝的格栅被堵塞后,由于后续不断来流淤高,部分堵塞体可能发生溃决,因此这一现象对其泥砂粒径调节也有一定影响,在后续的工作中有待进一步研究考虑。

### 参考文献:

- [1] 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.  
Zhou B F, Li D J, Luo D F, et al. Handbook of debris-flow prevention [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [2] 李德基. 泥石流减灾理论与实践[M]. 北京:科学出版社,1997.  
Li D J. Theory and practice of debris flow disaster mitigation [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 钟敦伦,谢洪,等. 泥石流灾害及防治技术[M]. 成都:四川科学技术出版社,2014.  
Zhong D L, Xie H, et al. Debris flow hazards and its controls [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2014. (in Chinese)
- [4] 康志成,李焯芬,马嵩乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004.  
Kang Zh Ch, Li Zh F, Ma A N, et al. Debris flow research in China [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [5] Jakob M, Hungr O. Debris-flow hazards and related phenomena [M]. Chichester: Praxis Publishing, 2005.
- [6] Mizuyama T. Structural countermeasures for debris flow disasters [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2008, 1(2): 38-43.
- [7] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京:清华大学出版社,2004.  
Fei X J, Shu A P. Debris flow kinematic mechanism and disaster prevention [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 韩文兵,欧国强. 单切口坝对稀性泥石流的拦砂性能——试验研究与比较分析[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(4): 152-158.  
Han W B, Ou G Q. Sediment-intercepting effect of silt dam on non-viscous debris flow: experimental study and comparative analysis [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(4): 152-158. (in Chinese)
- [9] 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]. 岩土力学与工程学报, 2011, 30(11): 2 338-2 345.
- 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) : 2 338-2 345.(in Chinese)
- [10] 赵彦波. 窗口坝拦挡泥石流性能实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- Zhao Y B. Experimental study of intercepting sediment capability of window-frame dam in preventing debris flow [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [11] Zou Y H, Chen X Q. Effectiveness and efficiency of slot-check dam system on debris flow control [J]. Journal Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015, 3(9): 5 777-5 804.
- [12] Lien H. Design of slit dams for controlling stony debris flows [J]. International Journal of Sediment Research, 2003, 18(1): 74-87.
- [13] 杨子阜. 坝体型式对土石流拦阻堆积特性之研究[D]. 中国台湾: 朝阳科技大学, 2005.
- Yang Z F. Study on characteristics of debris-flow retaining and deposition for various dam types [D]. Taiwan, China: Chaoyang University of Technology, 2005.(in Chinese)
- [14] 林基源, 陈冠宏, 洪政宏. 土石流浓度及细料对坝体拦阻特性影响之研究[J]. 朝阳学报, 2007, 3(12): 73-88.
- Lin J Y, Chen G H, Hong Zh H. Retaining characteristics of debris flows with various volumes of the sediment and fine-textured soil [J]. The Journal of Chaoyang University of Technology, 2007, 3(12): 73-88.
- [15] 黄育珍, 李锦浚, 李元智. 混凝土梳子坝拦阻功效之研究[J]. 水土保持科学, 2007, 39(1): 111-126.
- Huang Y Zh, Li J J, Li Y Zh. A study of trapping efficiency of concrete-made slit sabo dam [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 39(1): 111-126.
- [16] Lin X, Huo M, Zhou J W, et al. An experimental study on controlling post-earthquake debris flows using slit dams [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76 (22):780.
- [17] Wendeler C, Volkwein A. Laboratory tests for the optimization of mesh size for flexible debris-flow barriers [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2015, 15(12):2 099-2 118.
- [18] Huo M, Zhou J W, Yang X G, et al. Effects of a flexible net barrier on the dynamic behaviors and interception of debris flows in mountainous areas [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(10): 1 903-1 918.
- [19] 沈寿长, 王 韦. 铁路沿线泥石流灾害防治技术的进展与方向[J]. 铁道工程学报, 1996(2): 176-181.
- Shen Sh Ch, Wang W. Development of disaster mitigation technique against debris flow along Chinese railway lines [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1996 (2):176-181. (in Chinese)
- [20] 崔 鹏, 陈晓清, 柳素清, 等. 风景区泥石流防治特点与技术[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 172-180.
- Cui P, Chen X Q, Liu S Q, et al. Techniques of debris flow prevention in national parks [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 172-180. (in Chinese)
- [21] Liu S L, Yong Y, Zhang G Z, et al. Calculation of the ultimate depth of a scour pit after debris flow through drainage canal ribs [J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2):246-254.
- [22] Li Y, Zhou X, Su P, et al. A scaling distribution for grain composition of debris flow [J]. Geomorphology, 2013, 192(442):30-42.
- [23] Li Y, Huang C, Wang B, et al. A unified expression for grain size distribution of soils [J]. Geoderma, 2017, 288:105-119.
- [24] Wang B, Li Y, Liu D, et al. Debris flow density determined by grain composition [J]. Landslides, 2018, 15: 1 205-1 213.
- [25] Ishikawa N, Shima J, Matsubara T, et al. Trapping mechanism of debris flow by steel open dams[C]// Interpravent International Symposium, Nara: Universal Academy Press, 2014: 1-6.
- [26] Shima J, Moriyama H, Kokuryo H, et al. Prevention and mitigation of debris flow hazards by using steel open-type sabo dams [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2016, 9(3):135-144.
- [27] 曾耀生. 土石流通過梳子壩之水理特性研究[D]. 中国台湾: 台湾大学, 2005.
- Zeng Y Sh. The study of the hydraulic characteristics of debris flow passing through the slit dam [D]. Twniwan, China: Taiwan University, 2005.(in Chinese)
- [28] Mao L, Cavalli M, Comiti F, et al. Sediment transfer processes in two alpine catchments of contrasting morphological settings [J]. Journal of Hydrology, 2009, 364(1/2):88-98.
- [29] Cazzador O, Rainato R, Picco L, et al. Geomorphological characterization of rivers to detect sediment (dis) connectivity: the Rio Cordon Study Case [C]// EGU General Assembly, [S.l.]:[s.n.], 2017:19.

(本文责编: 池营营)