

引用格式: 谢湘平, 王小军, 谭懿飞, 张宇航, 黄宏鑫. 组合式格栅装置解决泥石流重力式拦砂坝的淤积问题 [J]. 山地学报, 2023, 41(2): 228-242.

XIE Xiangping, WANG Xiaojun, TAN Yifei, ZHANG Yuhang, HUANG Hongxin. Combined metal grid device designed to desilting gravity-type check dam [J]. Mountain Research, 2023, 41(2): 228-242.

## 组合式格栅装置解决泥石流重力式拦砂坝的淤积问题

谢湘平, 王小军, 谭懿飞, 张宇航, 黄宏鑫

(安阳工学院 土木与建筑工程学院, 河南 安阳 455000)

**摘 要:** 重力式拦砂坝因坝后淤积、库容不足, 泥石流拦蓄作用失效, 后续翻坝泥石流坠砸下游坝基, 是拦砂坝损毁的主要成因之一。采用工程措施清淤调库, 提高拦砂坝淤积满库后的可持续利用, 是泥石流防治工程设计中面临的实际问题。本文通过理论分析、模型实验等研究方式分析了重力式拦砂坝的满库状态, 设计了鱼脊型格栅装置或组合格栅装置, 构建新型拦砂坝体系, 研究了泥石流的调控效果。结果表明: (1) 重力式拦砂坝库容内的泥沙堆积体形成的缓坡段与组合式格栅装置共同作用可实现对泥石流的调控; 在小流量的水石流情况下缓坡段的自然分选作用明显, 而在流量较大的稀性泥石流条件下组合格栅的拦粗排细作用效果显著; (2) 组合格栅的拦粗排细率与其作用的泥石流固体物质颗粒级配参数  $f_c$  呈先增大后减小的抛物线关系; 在水石流和泥石流条件下,  $f_c$  分别达到 41.5% 和 36.9% 时, 拦粗排细率达到最大, 即组合格栅的拦粗排细效果最优; (3) 新型拦砂坝体系对泥石流泥沙总分离率与粗颗粒分离率均与形成泥石流的固体物质颗粒级配参数  $f_c$  呈正比关系; 泥石流初始容重越大, 调控后容重减小越明显。本研究为继续发挥满库后的重力式拦砂坝的泥石流调控作用提供了方案, 具有重要的工程实践意义。

**关键词:** 泥石流; 重力式拦砂坝; 可持续利用; 组合式格栅装置

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

泥石流拦砂坝可分为重力实体坝和开口型拦砂坝两大类, 包括重力坝、格栅坝、拱坝等类型, 其中重力坝占 85% 以上<sup>[1]</sup>。泥石流拦砂坝能起到拦蓄泥沙、调节泥石流固体物质总量、削弱泥石流的直接作用, 以及稳沟固坡、改变沟道比降、减小泥石流重度和性质, 从而抑制泥石流的形成和发展<sup>[1]</sup>。关于泥石流拦砂坝的研究主要集中在以下几方面: (1) 拦砂坝调控成效分析及结构设计优化。例如, 对比分析重力式拦砂坝、缝隙坝、格栅坝、窗口坝等各类传统结构泥石流拦砂坝的调控性能<sup>[2-5]</sup>; 针对拦砂坝排水孔堵塞问题, 提出以调节泥石流流量的排水口优化策略<sup>[6]</sup>; 优化设计溢流口形态、尺寸及相关参

数<sup>[6-7]</sup>, 增加拦砂坝溢流口的排泄能力; 优化设计柔性防护网受力及调控性能<sup>[8]</sup>。(2) 新型拦砂坝体系。如针对大型泥石流灾害特点, 从泥石流防治体系层面提出了新的规划设计原理和防治方法<sup>[9]</sup>, 研发抵御特大泥石流冲击破坏的泥石流防治工程新技术和新结构<sup>[10]</sup>; 为实现水石分离的泥石流调控功能, 研发了鱼脊型水石分离结构、屋脊型结构, 提出了新结构的适用条件并给出了结构参数的计算方法<sup>[11-19]</sup>。(3) 综合评价区域泥石流拦砂坝等防治工程成效<sup>[20-26]</sup>。

重力式拦砂坝常因泥沙淤积、库容丧失而失去调控泥石流作用。例如, 在中国四川汶川地震区, 震

收稿日期 (Received date): 2023-02-04; 改回日期 (Accepted date): 2023-04-18

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金青年基金 (41907258); 安阳工学院博士科研启动基金 (BSJ2019011); [National Natural Science Foundation of China (41907258); Doctoral Research Start-Up Fund of Anyang Institute of Technology (BSJ2019011)]

作者简介 (Biography): 谢湘平 (1987-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 山地灾害防灾减灾。[XIE Xiangping, female, Ph. D., lecturer, research on theory and geohazard prevention and mitigation] E-mail: xxp\_imde@163.com

后滑坡、泥石流极其活跃,七盘沟、板子沟等 18 条泥石流沟 46 座拦砂坝,多数已处于半库或满库状态<sup>[22]</sup>;在白龙江中游地区,拦砂坝坝型单一,多为实体重力坝,受拦砂坝坝型及地形条件的限制,震后泥石流的拦蓄库容存在不足<sup>[23]</sup>。由于地震区泥石流物源丰富,地形陡峭,前期修建的拦砂坝淤满失效后,后续泥石流翻坝冲击,造成更严重的灾害,如文家沟泥石流<sup>[24]</sup>、卧龙幸福沟泥石流等<sup>[25-26]</sup>。

针对高频泥石流沟拦砂坝满库后如何实现其可持续利用,目前还未见相关报道。本文通过理论分析、模型实验等研究方式分析了重力式拦砂坝的满库状态,提出基于已有拦砂坝增加附属结构装置来激活拦砂坝对泥石流的调控功能。本研究为重力式拦砂坝的可持续利用提供了方案。

## 1 新型拦砂坝体系

重力式拦砂坝库容淤满后基本失去了对泥石流的直接调控作用。后续泥石流的漫坝过流将对拦砂坝产生冲刷、掏蚀作用<sup>[27]</sup>,对下游产生淤埋、冲击等直接危害作用。为了使这些拦砂坝能继续发挥对泥石流的直接调控作用,可利用已有拦砂坝提供的势能及存在的溢流口条件,在已有拦砂坝下游设置一附属结构装置来激活拦砂坝对泥石流的调控功能,形成新的拦砂坝体系。

### 1.1 鱼脊型格栅装置

有学者提出了一种鱼脊型水石分离结构<sup>[11-14]</sup>,该结构由引流坝、鱼脊型格栅、支撑墩及停淤场组成。该结构将过坝的泥石流通过倾斜的鱼脊型格栅进行水石分离,将分离出的固体颗粒堆积在两侧的停淤场,粗颗粒分离率可达 80% 以上<sup>[11-12]</sup>,泥沙总分离率最高可达 80% 左右<sup>[12-13]</sup>,具有良好的水石分离效果。然而,鱼脊型水石分离格栅发挥作用对引流坝高度、溢流口开口有一定要求,各参数之间紧密联系。在已有的拦砂坝溢流口的宽度、高度以及整体坝高确定的条件下,是否适合安装鱼脊型格栅需满足式(1)~(5)的要求:

$$B_{0\min} \geq B_{hg} \text{ 且 } H_0 \geq H_{hg} \quad (1)$$

$$B_{hg} = k(h_0 \sin \theta + b_0) \quad (2)$$

$$H_{hg} = h_1 + h_2 \quad (3)$$

$$h_1 = \frac{B_{hg}}{2} \tan \theta \quad (4)$$

$$h_2 = \frac{Q_c'}{Bv_0} \quad (5)$$

其中,  $B_{hg}$  为鱼脊型格栅跨度(m);  $B_{0\min}$  为已有拦砂坝后鱼脊型格栅长度范围内沟道最小宽度(m);  $H_{hg}$  为鱼脊型格栅所需拦砂坝高度(m);  $H_0$  为已有拦砂坝高度(m);  $h_0$  为已有拦砂坝溢流口高度(m);  $b_0$  为已有拦砂坝溢流口宽度(m);  $k$  为经验修正系数,试验条件下取 1.53;  $h_1$  为鱼脊型格栅竖向高度(m);  $h_2$  为支撑墩高度(m);  $\theta$  为泥石流固体颗粒休止角( $^\circ$ ); 为经鱼脊型格栅调控后的泥石流流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),具体计算方法可见文献[13];  $v_0$  为泥石流过坝流速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

### 1.2 组合式格栅装置

鱼脊型格栅结构的停淤场位于结构两侧,导致鱼脊型格栅的应用受到地形条件的限制。当原有拦砂坝溢流口过宽、坝高过高或过低、坝后沟道宽度较小等情形时,可能不能满足鱼脊型格栅结构的设置条件。为此,本文提出了一种组合式格栅装置,该装置由正面斜格栅、正面水平格栅、侧面斜格栅和侧面水平格栅以及底部支撑墩等部分组成,如图 1 所示。

组合式格栅装置的工作原理为:满库的拦砂坝坝后堆积体纵坡降显著减小,形成一缓坡段,泥石流在此段流速减小,缓坡段能对泥石流体进行一定的自然分选;随后排泄后的流体通过安装在溢流口后的倾斜格栅进行分选。粒径大于格栅间距的粗颗粒将沿着斜格栅滚落至水平停淤格栅。小于格栅间距的细颗粒及浆体部分则通过下方的过流通道向下游排泄。与鱼脊型格栅结构不同的是,组合式格栅主要利用倾斜格栅装置进行分选,水平格栅可进一步分选并发挥停淤功能,且停淤格栅同时利用了两侧及下游的空间,增大了停淤能力。

## 2 组合式格栅装置调控泥石流的实验研究

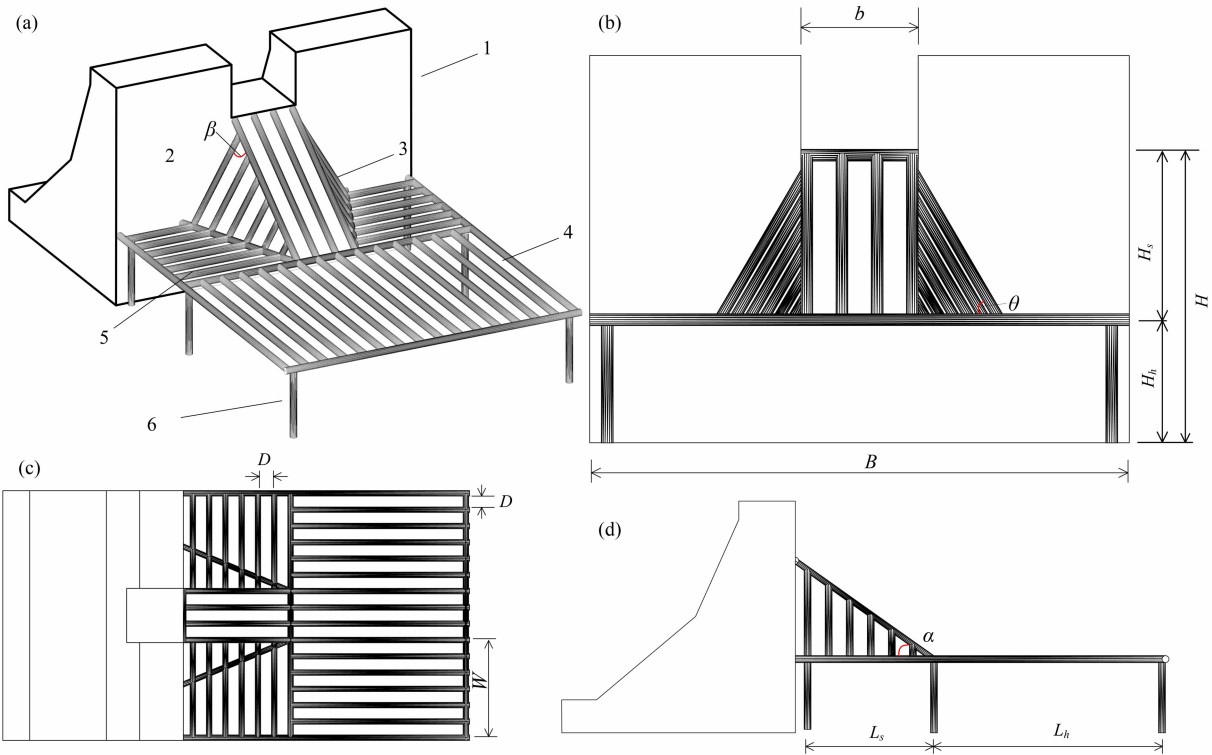
### 2.1 试验装置及材料

本试验采用的水槽装置如图 2 所示,水槽分为两部分。水槽 I 长、宽、高分别为 8 m、40 cm、50 cm,坡度为 14.0 $^\circ$ ,从下游往上 1.5 m 范围采用混凝土制作了缓坡段以模拟拦砂坝后的泥沙堆积段(下文简称缓坡段),缓坡段坡度为 9.8 $^\circ$ 。为便于砂石物

料尽可能多的排泄至组合格栅,从下游往上 50 cm 做成喇叭状束口,最终形成开口宽度为 10 cm 的溢流口。水槽Ⅱ长、宽、高分别为 2 m、43 cm、50 cm,坡度为 5.0°,水槽Ⅱ比水槽Ⅰ整体低 24 cm。组合式格栅装置置于水槽Ⅱ中,与水槽Ⅰ尾部的溢流口相接。格栅装置模型由钢筋焊接而成,装置结构参数如表 1 所示,装置模型如图 3 所示。

本试验考虑了组合格栅对不同性质流体(水石

流、不同容重的稀性泥石流)的调控效果。水石流采用清水冲刷固体物质堆积体的方式形成,砂石物料总质量为 20 kg,试验所用水量为  $1.6\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $3.9\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,放水时间分别为 90 s 和 40 s、60 s,采用水泵抽水。稀性泥石流采用水与黏性颗粒配制好的泥浆冲刷砂石堆积体的方式形成,砂石物料总量为 30~50 kg。本试验所采用的砂石材料颗粒级配如图 4 所示,具体试验工况如表 2 所示。



1 - 重力式拦砂坝;2 - 正面斜格栅;3 - 侧面斜格栅;4 - 正面水平格栅;5 - 侧面水平格栅;6 - 支撑墩; $\beta$  - 侧面斜格栅与正面斜格栅之间的夹角; $H$  - 已有拦砂坝溢流口距沟底的高度; $H_s$  - 正面斜格栅垂直高度; $\theta$  - 侧面斜格栅坡度; $B$  - 泥石流沟道宽度; $D$  - 格栅开口间距; $W$  - 侧面水平格栅宽度; $\alpha$  - 正面斜格栅坡度; $L_s$  - 正面斜格栅水平长度; $L_h$  - 正面水平格栅长度。

图 1 新型拦砂坝体系中的组合式格栅装置:(a) 三维图;(b) 正视图;(c) 俯视图;(d) 侧视图

Fig. 1 Combined metal grid structure of the new barrier system: (a) 3D view; (b) front view; (c) top view; (d) side view

表 1 组合式格栅结构模型参数

Tab. 1 Parameters of the combined metal grid structure models

模型编号	$D/\text{cm}$	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\theta/(\text{^\circ})$	$\beta/(\text{^\circ})$	$H_h/\text{cm}$	$H_s/\text{cm}$	$L_s/\text{cm}$	$L_h/\text{cm}$	$w/\text{cm}$
I	2	35	60	60	10	14	24	20	33
II	1	35	60	60	10	14	24	20	33

表 2 试验工况

Tab. 2 Experiment conditions

工况编号	流体类型	实测流体平均容重/ $(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	砂石级配编号	固体物质总质量/kg	液体量/L	组合结构编号
W01~W03	水石流	1.16	S1~S3	20	234	
W1~W9	水石流	1.28	S1~S3	20	144、156、234	GI、GII
D1~D5	泥石流	1.45~1.77	S4	30~50	20~30	GII

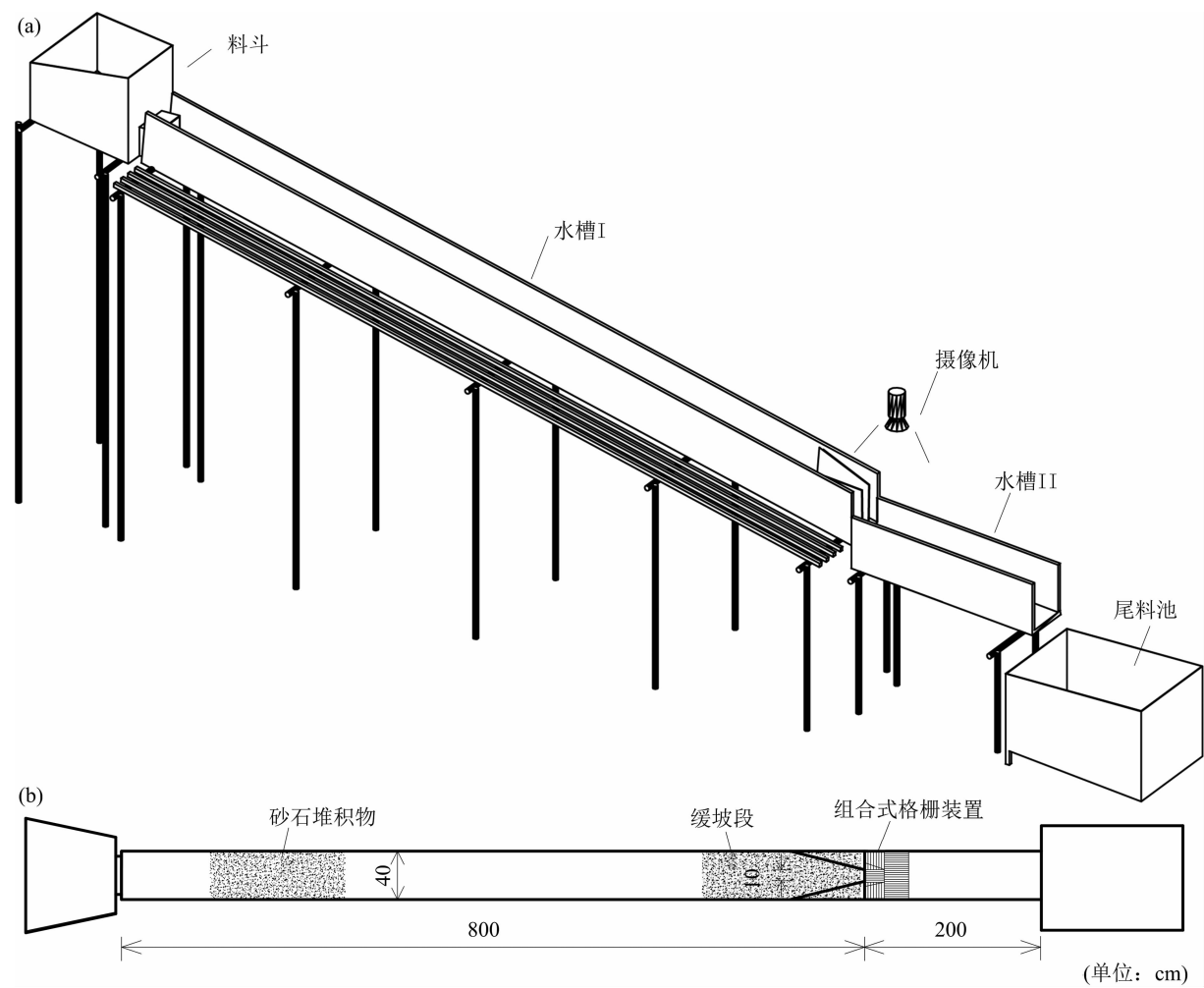


图2 水槽试验装置示意图:(a)三维图;(b)平面图  
Fig. 2 Schematic diagram of experimental device: (a) 3D view; (b) plain view

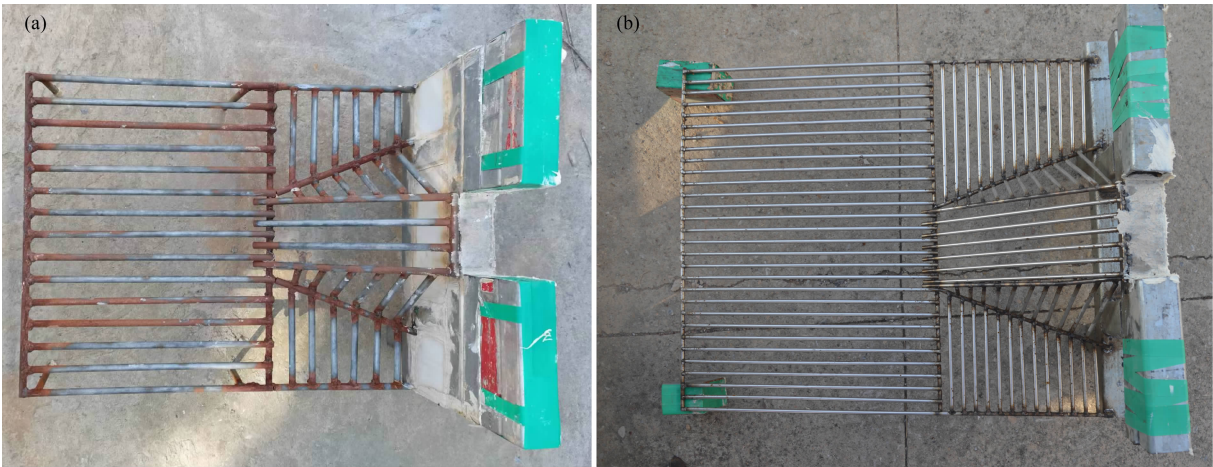


图3 组合式格栅装置模型:(a)GI格栅;(b)GII格栅  
Fig. 3 Model of the combined metal grid structure: (a) GI; (b) GII

2.2 试验测量参数

本试验测量参数包括:泥石流经缓坡段和组合

式格栅结构调控前后的容重、流速、流量,启动段残余的沙石量、缓坡段堆积的沙石量以及格栅结构分



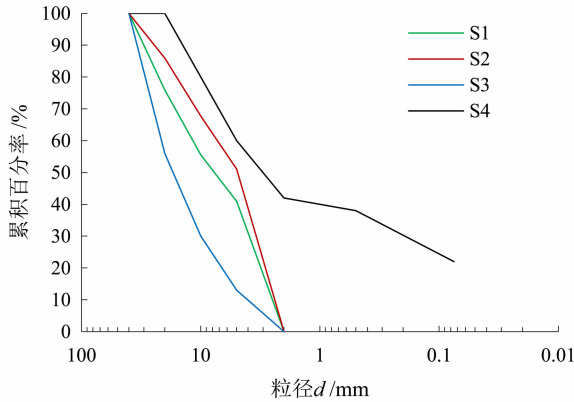


图 4 试验用砂石物料颗粒级配

Fig. 4 Grain size distribution of sediment

离出的沙石量以及这些沙石量的颗粒级配。其中,容重的测量利用带刻度的量杯接一定量的流体,测得相应的质量与体积,根据式(6)计算得出,并且在整个泥石流流过程中,测量不同时刻的泥石流容重。

表面流速采用乒乓球浮标法经图像解译后得出。根据液相浆体流量与容重之间的关系采用式(7)计算得出泥石流流量。在格栅装置顶部安装摄像机,记录格栅装置的整个工作过程。

$$\gamma_c = \frac{m}{v} \quad (6)$$

$$Q_c = \frac{\gamma_s - \gamma_1}{\gamma_s - \gamma_c} Q_1 \quad (7)$$

式中,  $\gamma_c$  为泥石流容重 ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$  或  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\gamma_s$  为固体颗粒重度 ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$  或  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\gamma_1$  为液相浆体的重度 ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$  或  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $m$  为流体样品的质量 ( $\text{g}$ );  $V$  为流体样品的体积 ( $\text{cm}^3$ );  $Q_c$  为泥石流流量 ( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$  或  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Q_1$  为液相浆体的流量 ( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$  或  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )。

## 2.3 试验结果

### 2.3.1 泥沙调控评价指标

图 5a、5b 为不同组合式格栅结构对同样条件下



图 5 拦沙坝满库及组合式格栅装置对水石流总的泥沙调控情况:(a) W1 工况下 G1 格栅对泥沙的分选情况;(b) W7 工况下 GII 格栅对泥沙的分选情况;(c) W9 工况下缓坡段对水石流的堆积情况;(d) D5 工况下缓坡段对泥石流的堆积情况

Fig. 5 Regulation effect of the combined grid structure on water-stony flow:

- (a) separation effect of G1 under the condition of W1; (b) separation effect of GII under the condition of W7;
- (c) deposition along the depositing area behind check dam under the condition of W9;
- (d) deposition along the depositing area behind check dam under the condition of D5

的水石流泥沙拦截情况。从照片可以直观看出组合式格栅结构对泥石流中的固体颗粒有一定的分选作用,分离物主要停积在正面水平格栅上,斜格栅上基本无固体物质堆积。GI 号格栅条件下 ( $D = 20 \text{ mm}$ ),停积在水平格栅上的固体颗粒基本为粒径大于  $20 \text{ mm}$  的粗颗粒,停淤总量较少;而 GII 号格栅 ( $D = 10 \text{ mm}$ ) 上停淤物质总量显著增大,且堆积物中肉眼可见很多粒径小于  $10 \text{ mm}$  的细颗粒。这说明同样泥石流条件下,保持结构其他参数不变,格栅开口的大小对调控效果有显著的影响。

图 5c、5d 显示的是拦砂坝后缓坡段固体物质堆积情况,不同性质的流体在缓坡段均呈现不同程度的堆积,说明缓坡段的自然分选作用不可忽略。

采用缓坡段堆积物占总分离物的比值  $\lambda$ 、泥沙总分离率  $P_t$ 、粗颗粒总分离率  $P_c$ 、格栅结构的泥沙分离率  $P_{gt}$ 、格栅结构的粗颗粒分离率  $P_{gc}$ 、格栅结构的拦粗排细率  $P_g$  来评价满库的拦砂坝及组合式格栅装置对泥沙的调控效果,分别如式 (8) ~ (13) 式所示。

$$\lambda = \frac{m_d}{m_d + m_g} \quad (8)$$

$$P_t = \frac{m_d + m_g}{M} \times 100\% \quad (9)$$

$$P_c = \frac{m_c}{M} \times 100\% \quad (10)$$

$$P_{gt} = \frac{m_g}{M_g} \times 100\% \quad (11)$$

$$P_{gc} = \frac{m_{gc}}{M_g} \times 100\% \quad (12)$$

$$P_g = \frac{1}{2} \left( \frac{m_{gc}}{M_{gc}} + \frac{m_{gt}}{M_{gt}} \right) \times 100\% \quad (13)$$

式中,  $m_d$  为缓坡段堆积物总量 (kg);  $m_g$  为组合格栅分离物总量 (kg);  $m_c$  为  $m_d$  和  $m_g$  中大于格栅开口宽度的粗颗粒物料总量 (kg);  $m_{gc}$  为  $m_g$  中大于格栅开口宽度的粗颗粒物料总量 (kg);  $m_{gt}$  为格栅排泄物料中粒径小于格栅开口间距的细颗粒物料总量 (kg);  $M$  为实际参与形成泥石流的固体物质总量 (kg);  $M_g$  为进入格栅的固体物质总量;  $M_{gc}$  为  $M_g$  中大于格栅开口宽度的粗颗粒物质总量 (kg);  $M_{gt}$  为  $M_g$  中小于格栅开口宽度的细颗粒物质总量 (kg)。

上述指标中,  $P_t$ 、 $P_c$  考查的是缓坡段和组合格栅组成的整个系统对泥石流固体物质的整体分选性以及粗颗粒分选性;  $P_{gt}$ 、 $P_{gc}$  则是针对组合格栅结构,考查其对进入到格栅范围内的泥石流固体物质的整体分选性以及粗颗粒分选性;  $\lambda$  是考查缓坡段的自然分选效果对总的分选效果的贡献。  $P_g$  是由粗颗粒分离比与细颗粒排泄比两部分组成,考查了组合格栅在拦粗和排细两方面的综合表现,该值越大,说明其拦粗排细的整体效果越好。

### 2.3.2 水石流条件下的调控效果

图 6 显示,不同水石流条件下,缓坡段及组合格栅对泥石流固体物质总分离率  $P_t$  不同: W1 ~ W3 为清水流量较小 ( $1.68 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 情况下,大部分物质堆积在坝后缓坡区,分离率  $P_t$  及  $\lambda$  比值均最大; W4 ~ W6 为大流量 ( $3.9 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 且所用格栅为 GII ( $D = 20 \text{ mm}$ ) 的工况,因流量较大且格栅开口大,导致固体物质总分离率最小,  $\lambda$  比值大于 0.8,说明缓坡堆积对分离率的贡献相对更大; W7 ~ W9 以及 W10 ~ W12 分别为  $3.9 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  的大流量作用不同时长 (40 s 及 60 s) 条件下缓坡段及 GII 号格栅分离物情况,可以看出随着清水作用时间增强,总分离率相

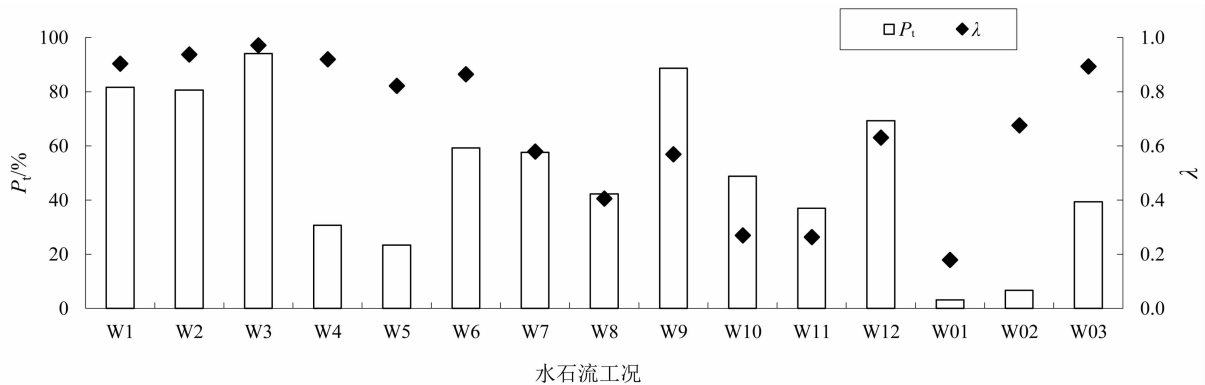


图 6 组合式格栅构成的新型拦砂坝体系对泥石流调控效果

Fig. 6 Regulation effect of the new barrier system formed by combined grid structure on water-stone flow

对减小,且 $\lambda$ 比值也减小,这是因为缓坡段堆积的固体物质分选性较差,在后续流体侵蚀下,很多细小的颗粒会被再次启动进入格栅,格栅对其进行二次分选,格栅分选后的分离物则不容易被启动,更加稳定,在总分离率中贡献更大。W01 ~ W03 为  $3.9 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  流量作用 60 s 无组合格栅条件下缓坡段及整个水槽 II 内的堆积情况,可以看出无格栅结构作用下,总分离率显著减小,特别是 W01、W02 (固体物料颗粒级配分别为 S1、S2) 条件下,总分离率  $P_t$  分别为 3.2% 和 6.4%,也即意味着大部分固体物质被排泄至下游,停积在缓坡段和水槽 II 中的固体物质非常少,如图 7 所示。从图 6 还可以看出, W3、W6、W9 和 W12 的总分离率和  $\lambda$  比值均高于同组其他工况,这是因为这四组对应的固体物料颗粒级配为 S3,其粗颗粒明含量多,平均粒径偏大,同样的流体条件下对其搬运能力偏弱,导致其主要堆积于缓坡段;相应的对照组 W03 的总分离率比上述几组有结构时显著减小,则说明组合格栅的存在能对泥石流起到较好的补充分选作用。



图 7 水石流对照组 W03 缓坡段及水槽 II 内泥沙堆积情况  
Fig. 7 Sediment deposition along both the gentle gravel slope behind check dam and flume II under the condition of W03

图 8a、8b 分别显示了泥沙总分离率  $P_t$  和格栅对进入其范围内的泥沙分离率  $P_{gt}$  与泥沙颗粒级配参数  $f_c$  和  $f'_c$  之间的关系,其中:  $f_c$  为形成水石流的泥沙颗粒中大于格栅开口宽度的粗颗粒含量占总量的百分率;  $f'_c$  为实际进入格栅作用的泥沙物质中大于格栅开口宽度的粗颗粒占其总量的百分率,反映了不同水力条件对不同颗粒级配的泥沙搬运情

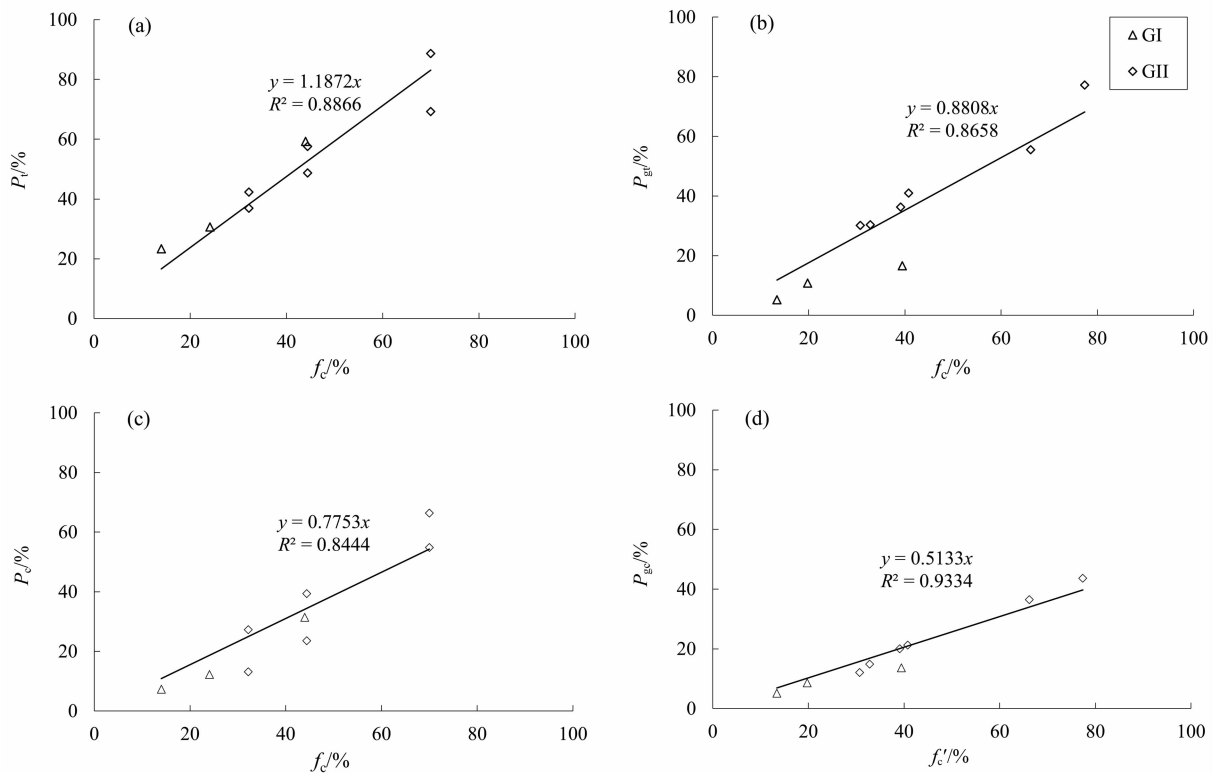


图 8 组合格栅结构对水石流泥沙调控效果:

(a) 泥沙总分离率; (b) 格栅对泥沙的分离率; (c) 粗颗粒总分离; (d) 格栅对粗颗粒的分离率

Fig. 8 Sediment regulation effect of the combined metal grid structure on water-stone flow: (a) total separation rate  $P_t$ ;

(b) separation rate of grid  $P_{gt}$ ; (c) total coarse separation rate  $P_c$ ; (d) coarse separation rate of grid  $P_{gc}$ .



况。从图 8a、8b 可以看出,  $P_t$  与  $f_c$  以及  $P_{gt}$  与  $f_c'$  均呈正比关系。其中,  $P_t$  与  $f_c$  的比例系数为 1.187 (图 8a), 这说明分离物中有大量小于格栅开口的细颗粒存在; 而  $P_{gt}$  与  $f_c'$  的比例系数为 0.881 (图 8b), 其中 GI 号格栅对应的比例系数仅为 0.4, 而 GII 号格栅对应的比例系数达到 0.94, 这说明合适的格栅开口宽度对泥沙调控效果影响显著。图 8c、8d 则反映了粗颗粒总分离率  $P_c$  与  $f_c$  以及格栅的粗颗粒分离率  $P_{gc}$  与  $f_c'$  之间也存在线性关系, 比例系数分别为 0.775 和 0.513, 这说明水石流中至少一半以上的粗颗粒可通过缓坡段的自然分选和格栅的分选作用被分离出来。

图 9a 表明组合格栅结构在水石流条件下的拦粗排细率  $P_g$  变化很大, 最大达到 85.8% (W10 工况), 最小为 42.8% (W9 工况)。统计分析表明  $P_g$  与  $f_c'$  之间存在先增大后减小的抛物线关系, 在  $f_c' = 41.5\%$  时达到最大。这是因为当  $f_c'$  过小时, 也即意味着格栅开口宽度相对水石流固体物质颗粒粒径过大, 其排细效果好但拦粗效果差, 如本试验中的工况 W4 ~ W6; 反之, 当  $f_c'$  过大时, 则是拦粗效果好但排细效果差, 如本试验中的 W9 工况。该组所用格栅结构为 GII, 格栅开口宽度为 10 mm, 原始物料颗粒级配为 S3, 其  $f_c = 70\%$ , 经过缓坡段堆积后, 进入格栅的固体物质  $f_c'$  达到 77.4%, 大量固体物质被分离出来布满了整个格栅堆积区 (图 9b), 从而影响了细颗粒的排泄。因此, 根据拦粗排细率  $P_g$  指导组合格栅结构的开口宽度取值能同时考虑拦粗和排细的效果, 具有很好的科学依据。根据试验分析结果, 当取实际进入格栅的固体物质颗粒级配参数  $f_c' = 50\%$

左右时对应的颗粒粒径作为组合格栅的开口宽度值, 能达到较好的拦粗排细效果。

### 2.3.3 泥石流条件下的调控效果

在泥石流条件下, 组合格栅的调控效果随泥石流容重的变化而变化。从图 10 可以看出, 与水石流条件相比, 泥沙总分离率  $P_t$ 、粗颗粒总分离率  $P_c$  相对较低, 均值分别为 43.1% 和 24.8%。原因在于: 配置泥石流的泥沙颗粒级配为 S4, 其最大粒径为 10 ~ 20 mm, 缺少水石流中 20 ~ 40 mm 的粒径段, 物源颗粒级配参数  $f_c = 20\%$ 。根据水石流试验结果,  $P_t$  与  $P_c$  与  $f_c$  呈正比关系。因此, 当泥石流对应的  $f_c$  小于水石流时,  $P_t$  与  $P_c$  的值自然比水石流的小, 但从  $P_t$  与  $f_c$  比例系数来看, 泥石流条件下达到 2.0 左右, 大于水石流条件下的 1.18, 从这个角度来说, 泥石流条件下的整体分选性要优于水石流条件。

图 10 还表明泥沙总分离率  $P_t$ 、粗颗粒总分离率  $P_c$  以及缓坡段分选比例  $\lambda$  值均随着泥石流容重  $\gamma_c$  的增大呈先增大后减小的抛物线关系。经拟合分析得到, 当泥石流容重  $\gamma_c = 1.61 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  时  $\lambda$  值达到最小, 而当  $\gamma_c = 1.54 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 泥沙总分离率  $P_t$  最小。这说明当  $\gamma_c$  在  $1.54 \sim 1.61 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 组合式格栅构成的新型重力式拦砂坝体系对泥石流总的调控效果最弱, 但格栅结构发挥的作用相对最大。当泥石流容重大于该范围后, 缓坡区发挥的分选作用越来越明显, 这是因为随着泥石流容重增大, 其在缓坡区就更容易堆积, 进入到格栅结构的泥石流很少, 尤其是粗颗粒。不同容重的泥石流经缓坡区分选后, 泥沙总量及粗颗粒含量显著减小, 导致组合格

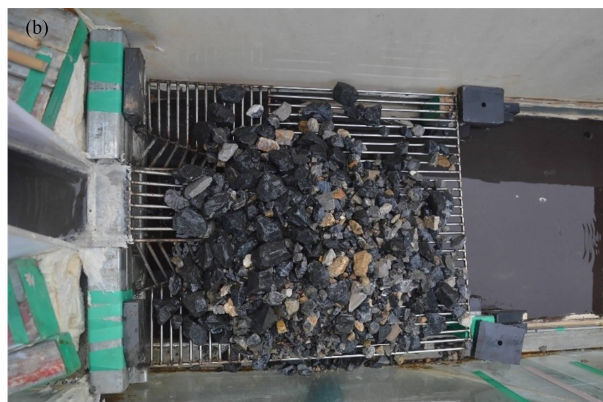
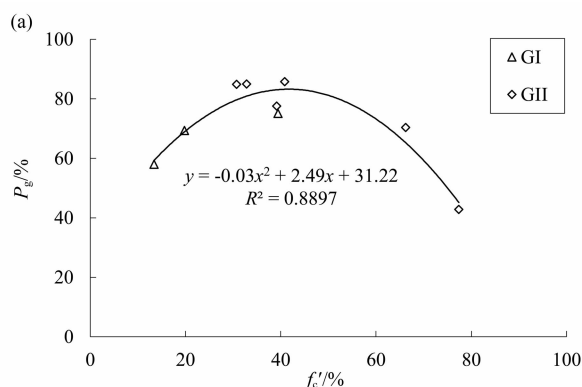


图 9 组合格栅结构的拦粗排细效果: (a) 拦粗排细率  $P_g$  与  $f_c'$  的关系; (b) W9 工况下组合格栅分离物布满停淤区

Fig. 9 Effect of trapping coarse and discharging fine by the combined metal grid structure:

(a) relationship between  $P_g$  and  $f_c'$ ; (b) separated sediment depositing on grid under the condition of W9



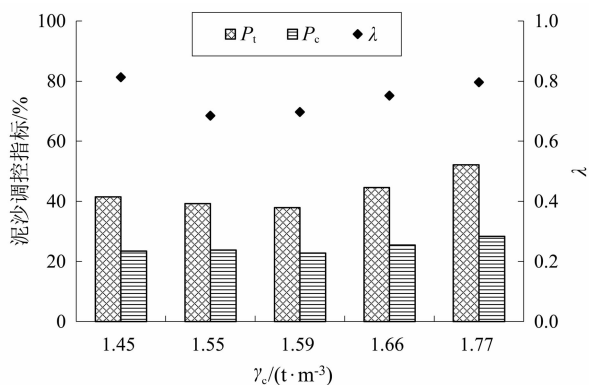


图 10 新型拦砂坝系统对不同容重的泥石流的调控效果

Fig. 10 Regulation effect of the new barrier system on watery debris flow with different density

栅的泥沙分离率  $P_{gt}$  和  $P_{gc}$  平均水平较低,分别为 10.8% 和 15.8%,但拦粗排细率  $P_g$  均达到 70% 以上,如图 11a 所示。泥石流条件下  $P_g$  与  $f_c'$  之间同

样存在先增大后减小的抛物线关系,当  $f_c' = 36.9\%$  时,  $P_g$  达到最大(图 11b),这说明泥石条件下同样可以根据进入格栅的实际固体颗粒级配进行格栅开口宽度的设置。

### 2.3.4 流体性质变化情况

无论是水石流还是泥石流,在经过缓坡段和格栅结构的调控后,流体容重发生显著变化。定义容重变化率  $n_\gamma$  来表征泥石流的变化情况,如下所示:

$$n_\gamma = \frac{\gamma_c - \gamma_c'}{\gamma_c} \quad (14)$$

式中,  $n_\gamma$  为泥石流容重变化率;  $\gamma_c'$  分别为经缓坡段及组合格栅调控后的流体容重 ( $t \cdot m^{-3}$  或  $g \cdot cm^{-3}$ )。

图 12a 表明随着流体容重增加,容重变化率逐渐增大,当泥石流容重为  $1.77 t \cdot m^{-3}$  时,经调控后容重减为  $1.42 t \cdot m^{-3}$ ,容重减小率为 24.3%。图

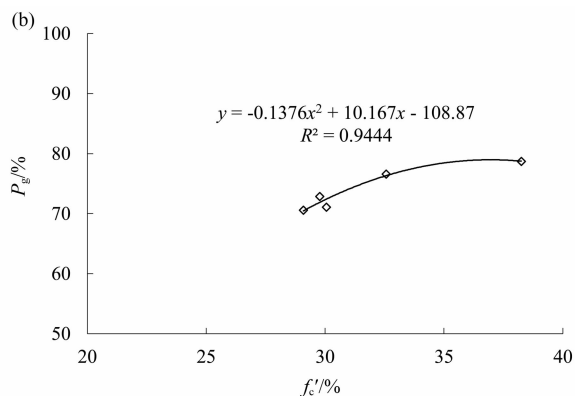
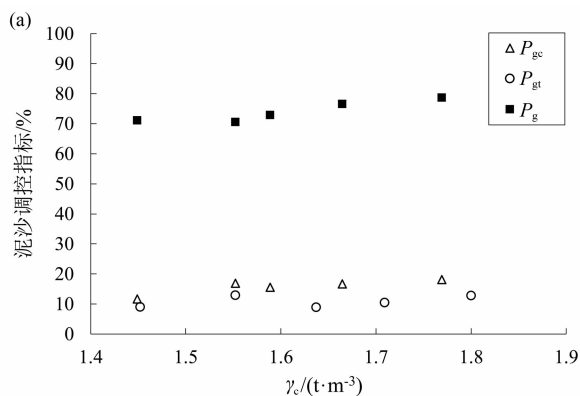


图 11 组合格栅对泥沙的调控效果:(a) 泥沙调控指标与泥石流容重之间的关系;(b) 拦粗排细率与  $f_c'$  的关系

Fig. 11 Sediment regulation effect of the combined metal grid structure on debris flow;

(a) relationship between sediment regulation parameters and debris flow density  $\gamma_c$ ; (b) relationship between  $P_g$  and  $f_c'$

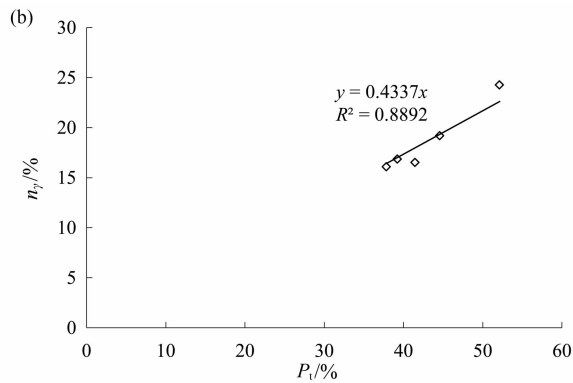
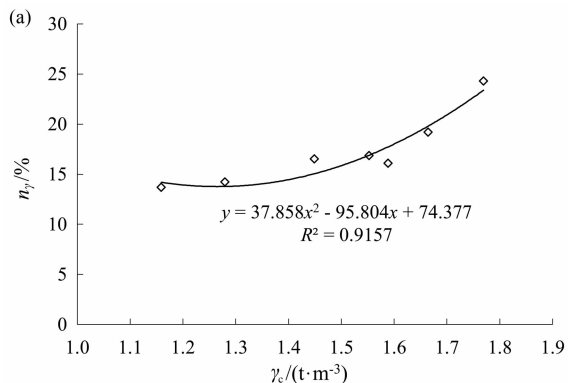


图 12 泥石流容重变化情况:(a) 容重变化率与流体初始容重的关系;(b) 容重变化率与泥沙分离率的关系

Fig. 12 Change of debris flow density before and after regulation of the new barrier system;

(a) relationship between the change rate of debris flow density and initial debris flow density;

(b) relationship between the change rate of debris flow density and sediment separation rate

12b 表明流体容重的改变主要是流体中泥沙固体物质含量的减小所致,容重变化率与泥沙总分离率之间存在良好的线性关系,随着泥沙分离率增大,容重变化率也逐渐增大。

根据鱼脊型水石分离格栅调控后的泥石流容重计算公式<sup>[15]</sup>(式(15)),利用本试验数据进行验证发现该式同样适用经缓坡段自然分选和组合式格栅结构调控后的泥石流容重计算,如图 13 所示。

$$\gamma_c' = \frac{\gamma_c - P_t \cdot C_v \cdot \gamma_s}{1 - P_t \cdot C_v}$$

(15)

式中,  $C_v$  为经缓坡段和格栅结构调控前的流体泥沙体积浓度。

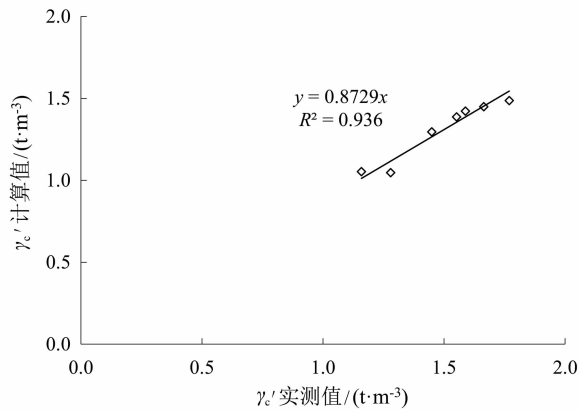


图 13 组合式格栅构成的新型拦砂坝体系调控后的泥石流容重计算公式验证

Fig. 13 Verification of the calculation method of debris flow density after regulation by the new barrier system formed by combined grid structure

根据试验结果,可以总结出满库拦砂坝及组合式格栅结构装置具有以下功能:

(1) 拦粗排细和水石分离功能。通过拦砂坝后拦截的泥沙形成的缓坡段,通过自然分选停淤一部泥沙固体物质,剩余的固体物质经过组合格栅设置,进一步将大于格栅开口粒径的粗颗粒分离出来,使小于格栅开口的细颗粒和液体通过格栅下方的通道向下游排泄,从而使已经满库的拦砂坝重新具备了拦粗排细功能,更好发挥泥石流减灾效果。

(2) 能有效减小泥石流容重,减小排泄流体对下游沟道的侵蚀。根据水石流对照试验可以看出,设置组合格栅情况下后的泥沙总分离率和粗颗粒分离率均显著大于未设置组合格栅时的量。泥沙总量

及粗颗粒均被组合格栅结构有效分离,使得排泄至下游的流体侵蚀能力减弱。

3 讨论

3.1 格栅装置适用的地形地貌条件

泥石流拦挡工程可分为以稳沟固坡为主的谷坊坝和拦砂削峰为主的拦砂坝<sup>[28]</sup>。谷坊坝多为修建在泥石流形成区的小型拦砂坝群,一般高度 3 ~ 5 m<sup>[28]</sup>,加之形成区的沟道坡度陡而狭窄,不适宜格栅装置的使用。以拦砂削峰为主的拦砂坝主要修建在流通区的中下游,坝高 5 m 以上,一般而言,流通堆积区的平均沟道坡度为 5° ~ 17°,拦砂坝为了具备较大的库容,往往选址在上游地形开阔、坡度较缓的部位以获得较大的库容<sup>[28]</sup>,当拦砂坝下游地形也较开阔时即适宜安装格栅装置。其次,格栅装置特别适用于固体物质储量丰富的高频泥石流沟。研究表明,汶川地震区内地震产生的松散物源约为 4 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,震后泥石流年均输沙量为 1800 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup><sup>[29]</sup>,部分泥石流沟的松散物质动储量达到 200 × 10<sup>4</sup> ~ 700 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 不等<sup>[30]</sup>,如桃关沟、磨子沟、七盘沟等(表 3),而拦砂坝库容一般按一次泥石流冲出总量来设计,一次泥石流过后库容淤满,而这些区域内依然残留大量的固体物质,在合适的降雨水源条件下必然会导致后续泥石流多次暴发。因此,在这些高频泥石流地区,设置坝后格栅装置来调控后续泥石流携带的泥沙不失为一种可行的策略。

表 3 都汶高速沿线 2013 年“7·10”典型泥石流沟一次冲出固体物质总量与物源动储量情况<sup>[30]</sup>

Tab. 3 Total amount of solid material stored and flushed out at a debris flow event along the Dujiangyan-Wenchuan Expressway on July 10, 2013

泥石流沟名称	一次泥石流冲出量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	松散物质动储量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
桃关沟	108	413
磨子沟	67	171
七盘沟	133	684
华溪沟	12	200
羊岭沟	19	114
安夹沟	15	106
锄头沟	60	167

虽然,拦砂坝库容内的淤积体会形成一定区域的缓坡段,后续泥石流流经过该区域会产生一定程度的自然分选沉积。而拦砂坝后的回淤纵坡与坝高及沟床纵坡有关,沟床坡度越大,回淤比降越大;坝体越高,回淤比降越小<sup>[31-32]</sup>。本文研究结果表明,在泥石流流量较大的情况下,拦砂坝淤积体缓坡段通过自然分选的固体物质总量以及粗颗粒物质分离率均有限,依然有大量的固体物质特别是粗颗粒越坝而下,通过不设和设置格栅装置的对比试验看出,无格栅装置时大部分越坝的固体物质继续向下游排泄,而格栅装置则能显著分离固体物质及粗颗粒,对泥石流起到良好的调控作用。因此,即使是在坡度平缓的地区,如果地形条件适宜,也可在拦砂坝后安装格栅装置以增强对泥石流的调控作用。

### 3.2 格栅装置适用的泥石流条件

不同性质的泥石流其运动堆积特征不同。一般而言,稀性泥石流运动过程中呈现强烈的紊动状态,作为搬运介质的泥浆其悬浮能力比清水更大,因此在相同的紊动强度下,稀性泥石流的搬运能力比清水更强,其搬运的石块多呈滚动、越移或平移,流速较大时可产生猛烈的撞击<sup>[33]</sup>。稀性泥石流的堆积过程呈现明显的分选性,随着运动速度减小,泥石流中的粗大颗粒开始逐渐沉积,随着流速进一步减小,细小颗粒也逐渐堆积直至泥深为零<sup>[34]</sup>。黏性泥石流容重一般大于  $1.8 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ,浆体黏滞性强,泥石流呈现较好的结构性和整体性,在运动过程中,大块石多于浆体同速流动,近似呈层流运动,在堆积过程中呈现混杂堆积,缺乏分选性<sup>[34]</sup>。特别是容重大于  $2.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  以后,在低速运动过程中呈结构性蠕动,停积后向运动方向呈明显的环状结构<sup>[28]</sup>。

因此,当坝后淤积体形成的缓坡段足够平缓或长度足够长时,稀性泥石流可能通过自然分选作用实现分选停积。然而,现实情况下,仅靠自然分选作用实现泥石流调控的能力有限,汶川震区同一泥石流沟多次发生的泥石流事件足以证明<sup>[35-36]</sup>,本研究试验结果也表明与格栅结构的调控效果相比,缓坡段的自然停淤效果相对较小,特别是在后续泥石流规模较大的情况下,大部分固体物质会越坝而过,对下游造成较强的冲击、侵蚀和淤埋作用。研究表明鱼脊型格栅装置对于不同容重下的泥石流均有较好的固体物质总分离率及粗颗粒分离率,特别是对于小于  $1.9 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  泥石流,在不同流速条件下经过鱼

脊型格栅结构调控后粗颗粒分离率能达到 90% 以上,且泥石流密度显著降低<sup>[12]</sup>。究其原因,这是由于格栅装置作用原理即利用粗颗粒的重力作用及格栅的倾斜构造和开口设置决定的。因此,可以合理推断对于固体物质储量丰富的稀性泥石流沟和亚黏性泥石流沟,在满库拦砂坝后安装格栅装置可取得良好的调控效果。考虑到实际条件下拦砂坝满库后的淤积缓坡段可能致使黏性泥石流产生大量的堆积,若泥石流规模较大,部分泥石流仍可越过拦砂坝进入下游。因此,对于黏性泥石流沟,可以根据实际情况,对泥石流发生概率及规模进行判定后再决定是否需要安装格栅装置。

### 3.3 格栅装置的经济适用性

泥石流携带的大量沙石被拦砂坝拦截后,若能将其进行有效分离,则能为建筑工程提供重要的砂石来源。然而,目前针对泥石流拦砂坝泥沙综合性利用的报道并不多见。究其原因可能有:(1)对于大部分泥石流拦挡工程,其可达性差,坝后拦截的泥沙并未得到有效利用,仅有少量工程考虑到了对泥沙的回收利用而设置了相应的通道,如盐井沟、冕宁沟的拦挡坝<sup>[37]</sup>;(2)传统拦砂坝拦截的泥沙分选性相对较差,对其回收利用需要花费较大的经济代价,性价比不高。研究表明鱼脊型水石分离结构分离物的分选系数显著高于泥石流携带的原始固体物质的分选系数,分离物的分选性相比原始固体物质至少提高一个等级,且在多级鱼脊型格栅结构作用下分离物的分选性从上游至下游逐渐改善<sup>[38]</sup>,格栅结构分离物良好的分选性为分离物的回收利用提供更多可能。

## 4 结论

本研究基于重力式拦砂坝满库条件,提出了在拦砂坝后安装格栅装置形成新型拦砂坝体系以继续发挥拦砂坝对泥石流的直接调控作用,并通过理论分析、试验验证等方法总结了不同格栅结构的使用条件和试验条件下的泥石流调控效果,得出如下结论:

(1)已有重力式拦砂坝与格栅装置共同组成新的拦砂坝体系发挥泥石流直接调控作用。当已有重力式拦砂坝满足坝高大于鱼脊型格栅设置所需引流坝高度且坝后沟道宽度大于鱼脊型格栅跨度时,可

首选鱼脊型格栅装置;当不满足上述条件时,可采用组合式格栅装置。

(2)组合式格栅装置由连接溢流口的正面斜格栅、正面水平格栅、侧面斜格栅和侧面水平格栅组成。经试验证明:组合格栅结构的存在具有良好的拦粗排细功能,拦粗排细率可以有效表征该功能。拦粗排细率越大,拦粗排细效果越好。拦粗排细率与组合格栅作用的泥石流固体物质颗粒级配参数 $f_c'$ 呈先增大后减小的抛物线关系。在水石流和稀性泥石流条件下, $f_c'$ 分别达到41.5%和36.9%时,拦粗排细率达到最大。

(3)拦砂坝库容内的泥沙堆积体形成的缓坡段对泥石流的自然分选作用不能忽略。特别是在小流量的水石流和泥石流条件下发挥重要的分选作用,其对泥沙总分离率的贡献可达80%以上。

(4)组合式格栅结构形成的新型拦砂坝体系对泥石流泥沙总分离率与粗颗粒分离率均与形成泥石流的固体物质颗粒级配参数 $f_c$ 呈正比关系。

(5)泥石流通过缓坡段及组合式格栅的共同作用后,流体容重显著下降,初始流体容重越大,调控后容重减小率越大;容重变化率与泥沙总分离率呈正相关,泥沙分离率越高,容重变化率越大。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈宁生,周海波,卢阳,等. 西南山区泥石流防治工程效益浅析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, **40**(1): 50 – 58. [CHEN Ningsheng, ZHOU Haiibo, LU Yang, et al. Analysis of benefits of debris flow control projects in southwest mountain areas of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2013, **40**(1): 50 – 58] DOI: 10.3969/j. issn. 1671 – 9727. 2013. 01. 008
- [2] 孙昊,游勇,柳金峰. 泥石流梁式格栅坝调控性能试验研究[J]. 铁道学报, 2019, **41**(3): 163 – 168. [SUN Hao, YOU Yong, LIU Jinfeng. Experimental study on regulative performance of debris flow beam dam [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, **41**(3): 163 – 168] DOI: 10.3969/j. issn. 1001 – 8360. 2019. 03. 022
- [3] 孙昊,游勇,柳金峰,等. 泥石流梁式格栅坝泥沙粒径调节试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, **40**(6): 1037 – 1044. [SUN Hao, YOU Yong, LIU Jinfeng, et al. Experimental study on sediment size regulation of beam type debris flow check dam [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, **40**(6): 1037 – 1044] DOI: 10.13409/j. cnki. jdpme. 2020. 06. 024
- [4] 刘曙亮,游勇,柳金峰,等. 窗口坝拦截泥石流性能试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015, **32**(8): 40 – 44. [LIU Shuliang, YOU Yong, LIU Jinfeng, et al. Experimental study on performance of window-frame dam intercepting debris flow [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, **32**(8): 40 – 44] DOI: 10.3969/j. issn. 1001 – 5485. 2015. 08. 007
- [5] 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 Xiaojun, CHEN Xiaoqing, XIE Xiangping, 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] DOI: 10.3969/j. issn. 1671 – 1815. 2016. 09. 005
- [6] 陈华勇,柳金峰,赵万玉. 束流型拦砂坝溢流口及其关键参数确定[J]. 水科学进展, 2016, **27**(5): 743 – 750. [CHEN Huayong, LIU Jinfeng, ZHAO Wanyu. Experimental investigation on the lateral contraction spillway and its key parameters determination [J]. Advances in Water Science, 2016, **27**(5): 743 – 750] DOI: 10.14042/j. cnki. 32. 1309. 2016. 05. 012
- [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 Xueping, YOU Yong, LIU Jinfeng, 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] DOI: 10.13577/j. jnd. 2015. 0102
- [8] 乔少南. 泥石流柔性网防护优化设计与应用[D]. 西安: 西北大学, 2020: 71 – 72. [QIAO Shaonan. Optimization design and application of debris flow flexible network [D]. Xi'an: Northwest University, 2020: 71 – 72]
- [9] 陈晓清,崔鹏,游勇,等. 汶川地震区大型泥石流工程防治体系规划方法探索[J]. 水利学报, 2013, **44**(5): 586 – 593. [CHEN Xiaoqing, CUI Peng, YOU Yong, et al. Layout methods of control works preventing large scale debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Shui Li Xue Bao, 2013, **44**(5): 586 – 593] DOI: 10.13243/j. cnki. slxb. 2013. 05. 003
- [10] 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. [CHEN Xiaoqing, YOU Yong, CUI Peng, et al. New control methods for large debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, **45**(1): 14 – 22] DOI: 10.15961/j. jsuese. 2013. 01. 004
- [11] XIE Tao, YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, et al. A new water-sediment separation structure for debris flow defense and its model test [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, **73**: 947 – 958. DOI: 10.1007/s10064 – 014 – 0585 – 9
- [12] 谢涛,谢湘平,韦方强,等. 鱼脊型泥石流分水石分离结构适用性的模型试验研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(11): 1 – 9. [XIE Tao, XIE Xiangping, WEI Fangqiang, et al. Applicability experiment of herringbone water-sediment separation structure for debris flow prevention [J]. Shui Li Xue Bao, 2014, **45**(11):



- 1-9] DOI: 10.13243/j.cnki.slbx.2014.11.000
- [13] 谢涛, 韦方强, 杨红娟, 等. 鱼脊型泥石流水石分离结构的关键参数确定[J]. 山地学报, 2015, **33**(1): 116-122. [XIE Tao, WEI Fangqiang, YANG Hongjuan, et al. Optimal value of structural parameters in a new water-sediment separation structure for debris flow defense [J]. Mountain Research, 2015, **33**(1): 116-122] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000016
- [14] 谢湘平, 韦方强, 杨红娟, 等. 基于漂木分离效果的鱼脊型水石分离结构参数优化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(1): 55-63. [XIE Xiangping, WEI Fangqiang, YANG Hongjuan, et al. Herringbone water-sediment separation structure parameters optimization based on the water-wood separation effect [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48**(1): 55-63] DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.01.009
- [15] XIE Xiangping, WEI Fangqiang, WANG Xiaojun, et al. Determination of optimal grid opening width for herringbone water-sediment separation structures based on sediment separation efficiency [J]. Journal of Mountain Science, 2019, **16**(3): 619-629. DOI: 10.1007/s11629-018-5038-7
- [16] 谢湘平, 韦方强, 王小军, 等. 鱼脊型水石分离结构对泥石流的物质与能量调控效果试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, **51**(5): 49-59. [XIE Xiangping, WEI Fangqiang, WANG Xiaojun, et al. Regulation effect of herringbone water-sediment separation structure on the substance and energy properties of debris flow [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, **51**(5): 49-59] DOI: 10.15961/j.jsuese.201900131
- [17] 吴佳俊, 杨兴国, 周宏伟, 等. 新型屋脊式拦砂坝拦挡输移性能试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, **29**(4): 85-90. [WU Jiajun, YANG Xingguo, ZHOU Hongwei, et al. Experimental study of preventing debris flow by weir type debris dam [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, **29**(4): 85-90] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.04.12
- [18] LIANG Yufeng, LIANG Chuan, ZHOU Hongwei, et al. New permeable structure for controlling debris flows in the Wenjiagou Gully [J]. Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil Engineering, 2018, **22**(5): 4293-4305. DOI: 10.1007/s12205-018-1038-y
- [19] JIANG Rui, WU Jiajun, FEI Wenping, et al. Experimental study on the structural parameters of an optimized sloping roof grill barrier for the prevention of debris flows in Yanmen Gully [J]. Engineering Geology, 2020, **277**(1): 105751. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105751
- [20] 高守义, 史正涛, 崔炳田. 马槽沟泥石流工程治理及效益分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, **9**(1): 135-137 + 139-141. [GAO Shouyi, SHI Zhengtao, CUI Bingtian. An approach on controlling works and their benefits of debris flow in Macaogou Gully, Wudu [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, **9**(1): 135-137 + 139-141] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.1998.01.026
- [21] 张勇, 陈宁生, 胡桂胜, 等. 城镇泥石流综合治理效果评估——以四川黑沙河沟泥石流工程为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, **29**(2): 9-15. [ZHANG Yong, CHEN Ningsheng, HU Guisheng, et al. Analysis on effectiveness of urban debris flow control works: A case study at Heishahhe Gully [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, **29**(2): 9-15] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.02
- [22] 张文涛. 泥石流防治岩土—生态工程综合治理效果分析与评价[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021: 12-24. [ZHANG Wentao. Analysis and evaluation of comprehensive treatment effect of geotechnical and ecological engineering for debris flow [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021: 12-24]
- [23] 周文兵, 柳金峰, 袁东, 等. 白龙江中游泥石流拦砂坝防治效果分析[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(9): 64-70. [ZHOU Wenbing, LIU Jinfeng, YUAN Dong, et al. Control effect of check dams on debris flow in the midstream of Bailong River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(9): 64-70] DOI: 10.11988/ckyyb.20180205
- [24] 亓星, 许强, 余斌, 等. 汶川震区文家沟泥石流治理工程效果分析[J]. 地质科技情报, 2016, **35**(1): 161-165. [QI Xing, XU Qiang, YU Bin, et al. Treatment effects in Wenjia Gully, Wenchuan earthquake area [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, **35**(1): 161-165]
- [25] 张文涛, 柳金峰, 游勇, 等. 泥石流岩土防治工程治理效果分析与评价——以四川汶川卧龙幸福沟为例[J]. 灾害学, 2021, **36**(3): 208-214. [ZHANG Wentao, LIU Jinfeng, YOU Yong, et al. Analysis and evaluation of the treatment effect of the geotechnical engineering of debris flow: Case of Xingfu Gully in Wolong [J]. Journal of Catastrophology, 2021, **36**(3): 208-214] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.036
- [26] 曾庆铭, 薛强, 徐继伟. 都江堰市龙池镇黄夹沟泥石流特征与防治工程效果分析[J]. 西北地质, 2014, **47**(3): 192-199. [ZENG Qingming, XUE Qiang, XU Jiwei. Analysis on the debris flow characteristics and effectiveness of prevention projects in Huangyang Gully in Longchi town of Dujiangyan city [J]. Northwestern Geology, 2014, **47**(3): 192-199] DOI: 10.3969/j.issn.1009-6248.2014.03.025
- [27] 潘华利, 欧国强, 黄江成. 泥石流坝后侵蚀坑内部边坡规律实验研究[J]. 泥沙研究, 2009(6): 1-5. [PAN Huali, OU Guoqiang, HUANG Jiangcheng. Experimental study on the interior slope of scour pit below debris flow sabo dams [J]. Journal of Sediment Research, 2009(6): 1-5] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2009.06.002
- [28] 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: 2-4 + 133-134. [ZHOU Bifan, LI Deji,

- LUO Defu, et al. Guidelines for debris flow control [M]. Beijing: Science Press, 1991: 2-4 + 133-134]
- [29] HUANG Runqiu, FAN Xuanmei. The landslide story [J]. Nature Geoscience, 2013, **6**: 325-326. DOI: 10.1038/ngeo1806
- [30] 胡卸文, 韩玫, 梁敬轩, 等. 汶川地震灾区泥石流若干关键问题[J]. 西南交通大学学报, 2016, **51**(2): 331-340. [HU Xiewen, HAN Mei, LIANG Jingxuan, et al. Some key problems on debris flow in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, **51**(2): 331-340] DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2016.02.012
- [31] 吴鑫, 马东涛, 杨敏. 粘性泥石流坝后回淤比降的实验[J]. 山地学报, 2013, **31**(5): 594-600. [WU Xin, MA Dongtao, YANG Min. Experiment on siltation gradient of viscous debris flow behind gravity check-dam [J]. Mountain Research, 2013, **31**(5): 594-600] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2013.05.012
- [32] 赵静静, 崔佳慧, 关辉, 等. 黏性泥石流拦砂坝坝后回淤坡度试验[J]. 西南科技大学学报, 2018, **33**(2): 37-40. [ZHAO Jingjing, CUI Jiahui, GUAN Hui, et al. Experimental study on the sedimentation gradient of viscous debris flow behind check dam [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2018, **33**(2): 37-40] DOI: 10.3969/j.issn.1671-8755.2018.02.007
- [33] 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: 22-34. [FEI Xiangjun, SHU Anping. Mechanism of debris flow movement and disaster prevention [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 22-34]
- [34] 崔鹏, 邓宏艳, 王成华, 等. 山地灾害[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018: 208-219. [CUI Peng, DENG Hongyan, WANG Chenghua, et al. Mountain Hazards [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018: 208-219]
- [35] 余斌, 马煜, 吴雨夫. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(6): 827-836. [YU Bin, MA Yu, WU Yufu. Investigation of severe debris flow hazards in Wenjia Gully of Sichuan province after the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6): 827-836] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.06.003
- [36] 李文鑫, 王兆印, 王旭昭, 等. 汶川地震引发的次生山地灾害链及人工断链效果——以小岗剑泥石流沟为例[J]. 山地学报, 2014, **32**(3): 336-344. [LI Wenxin, WANG Zhaoyin, WANG Xuzhao, et al. Secondary mountain disaster chain induced by the Wenchuan earthquake and the result of chain-cutting engineering in the Xiaogangjian Gully [J]. Mountain Research, 2014, **32**(3): 336-344] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2014.03.009
- [37] 陈宁生, 余德彬. 基于弃渣综合利用的矿山泥石流灾害防治新模式——以冕宁盐井沟泸沽铁矿为例[J]. 山地学报, 2019, **37**(1): 78-85. [CHEN Ningsheng, SHE Debin. A new approach to debris flow disaster control based on comprehensive utilization of waste slag: A case study of Lugu Iron Mine at the Yanjing Valley of Mianning county, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2019, **37**(1): 78-85] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000401
- [38] 谢湘平. 基于粗颗粒调控效应的多级鱼脊型水石分离系统设计方法实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 39-41. [XIE Xiangping. The control effect of multi-herringbone water-separation system to debris flow and its design method based on experimental research [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 39-41]

## Combined Metal Grid Device Designed to Desilting Gravity-Type Check Dam

XIE Xiangping, WANG Xiaojun, TAN Yifei, ZHANG Yuhang, HUANG Hongxin

(Anyang Institute of Technology, Civil and Architecture engineering collage, Anyang 455000, Henan, China)

**Abstract:** Gravity-type check dams built in the valleys with high occurrences of debris flow are inclined to fail in regulating of debris flows after heavy silting and decreasing storage capacity occurring in the dams; subsequent overturning of debris flows fall on the downstream dam foundation, quite often resulting in dam damages, even broken-down. The use of engineering measures to remove sediment and improve the sustainable use of check dams after full reservoir is a practical problem in the design of debris flow prevention and control engineering.

In this study, it investigated the performance of gravity-type check dams by theoretical analysis, model

experiment and other research methods, and then a fish-ridge type metal grid structure (a herringbone water-sediment separation structure) or a combination metal grid structure was introduced to build up a new type of barrier system for regulation of debris flow, and the control effect of the system was examined.

We have the following results: (1) Gentle gravel slope behind dam formed by sediment accumulation because of debris flow transportation in the reservoir of check dam and the combined metal grid structure can jointly realize the regulation of debris flow. (2) Under entrainment of water-stone flow, evidently the gentle gravel slope had an active role in grain sorting and sieving, whereas under relatively larger erosion of watery debris flow, it was remarkable in the effect of trapping coarse debris and discharging fine particles. (3) The particle grade parameter ( $f_c'$ ) of solid component in an occurrence of debris flow after being sorted and sieved by our advocated structure of combination metal grid described a parabolic curve of first increasing and then decreasing, and it stood for its drainage effect. In case subjected to water-stone flow and watery debris flow,  $f_c'$  could reach 41.5% and 36.9% respectively, with a maximum drainage effect, the best function of trapping coarse debris and discharging fine particles. The separation efficiency for a bulk of debris flow sediment or its coarse component by a combined metal grid structure were directly proportional to the particle grade parameter ( $f_c$ ) of the original solid component of debris flow. The greater the initial bulk density of debris flow, the more obvious the reduction of bulk density after regulation was.

This study provides a scheme for further exploiting gravity-type check dam with full reservoir in regulating debris flow discharge. It is engineering practical.

**Key words:** debris flow; gravity-type check dam; sustainable utilization; combined metal grid structure

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)