

文章编号: 1008-2786-(2015)1-116-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000016

鱼脊型泥石流水石分离结构的关键参数确定

谢涛^{1 2 3}, 韦方强^{1 2*}, 杨红娟^{1 2}, 谢湘平^{1 2 3}

(1. 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. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 鱼脊型水石分离结构是一种新型泥石流防治结构, 该结构能有效解决现有水石分离结构不能持续发挥水石分离功能的问题。在工程设计中, 为了使其具有最佳的运行效果, 必须确定结构的设计参数, 给出合理修建尺寸, 其中水石分离格栅坡度 θ 和肋梁与脊梁夹角 γ 是两个影响水石分离效果的关键参数。通过开展室内模型试验, 模拟泥石流在不同格栅坡度和肋梁与脊梁夹角下的水石分离过程; 通过对比试验, 探讨上述两个参数对水石分离的影响, 从而确定其合理取值。试验结果表明: 当格栅坡度 θ 为 $35^\circ \sim 38.7^\circ$ 、肋梁与脊梁夹角 γ 为 $70^\circ \sim 80^\circ$ 时, 不仅结构能有分选地将粗颗粒分离出来, 而且被分离的粗颗粒在重力下自动滑落到停积场, 不堵塞格栅开口。根据一般砾石或卵石的天然休止角, 以及结构的理想运行效果可知, 实际应用中水石分离格栅坡度可以取为泥石流固体颗粒的天然休止角, 肋梁与脊梁夹角的合理取值为 $70^\circ \sim 80^\circ$ 。

关键词: 泥石流; 水石分离; 泥石流防治; 结构尺寸; 模型试验

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

通常, 泥石流固相物质的粒度分布较为广泛, 并包含许多粗颗粒, 甚至是巨砾。这些粗颗粒的存在, 大大增强了泥石流的冲击破坏能力^[1]。因此, 对粗颗粒进行调控, 减少其含量, 能够有效减小泥石流的规模和破坏力, 降低泥石流的危害, 从而达到减灾目的。目前的泥石流减灾工程中, 用于调控粗颗粒的措施主要为各种透水型拦挡坝。根据其结构型式、受力特点以及选用的建筑材料, 可以将其分为混凝土立式刚性结构(缝隙坝、切口坝、梳子坝等)^[2-5]、钢制立式刚性结构(钢管格子坝、梁式格栅坝等)^[6-7]、卧式刚性结构(水平透水格栅)^[8]、立式柔性结构(柔性网格坝)^[9]。在运行初期, 这些结构均能较好发挥水石分离功能, 将粗颗粒从泥石流中分离出来, 其余泥石流流体透过结构开口, 继续沿着沟

道运动, 实现水石分离, 从而达到减少泥石流中的粗颗粒含量的目的。但是, 由于分离出的粗颗粒直接停留在结构体前或结构体上, 随着被分离的粗颗粒不断增多, 分离结构的开口被淤积堵塞, 最终失去水石分离功能^[10-14]。为了解决这一问题, 我们设计了一种新型的鱼脊型水石分离结构^[14], 该结构由引流坝、水石分离格栅、泄流槽、停积场 4 部分组成(图 1)。当泥石流从引流口流到水石分离格栅后, 大部分粒径大于格栅开口宽度的固体颗粒被分离出来, 并沿着格栅表面滑落到两侧的停积场, 而其余泥石流透过格栅落入泄流槽, 并继续沿着沟道排向下游。与之前所述的分离结构相比, 该结构不仅能分选地将粗颗粒分离出来, 而且分离出的粗颗粒在重力作用下自动滑落到两侧停积场, 不堵塞格栅开

收稿日期(Received date): 2014-04-12; 改回日期(Accepted): 2014-05-04。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑项目(项目编号: 2011BAK12B00)。[National Science and Technology Support Program (2011BAK12B00).]

作者简介(Biography): 谢涛(1986-), 男, 重庆黔江人, 博士研究生, 主要从事泥石流灾害防治研究。[Xie Tao (1986-), male, born in Qianjiang of Chongqing, majoring on debris flow prevention.] E-mail: xietaoimde@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 韦方强(1968-), 男, 汉族, 山东临沭人, 研究员, 博士, 主要从事山地灾害及其减灾技术研究。[Wei Fangqiang (1968-), male, undertaking research on theory and technology of mountain disasters mitigation.] E-mail: fqwei@imde.ac.cn

口,使结构的水石分离功能可以持续发挥。

Xie 等通过模型试验,对鱼脊型水石分离结构的分离效果进行了检验,试验结果表明:该结构的水石分离效果显著^[14],但未对影响水石分离效果的关键参数进行研究。为了使该结构具有最佳的粗颗粒分离效果,必须对水石分离格栅坡度 θ 和肋梁与脊梁夹角 γ 等(图2)影响水石分离效果的关键参数进行研究,确定其合理的取值范围,从而给出结构的合理修建尺寸。本文通过在室内开展模型试验,探讨格栅坡度 θ 和肋梁与脊梁夹角 γ 对水石分离的影响,从而确定其最佳的取值范围。

1 模型试验

1.1 试验装置

试验装置主要由料斗、水槽、尾料池3部分组成(图3)。料斗位于顶端,长80 cm、宽80 cm、高100 cm,用于盛装清水;水槽位于中部,分为两段,水槽I长400 cm、宽40 cm、高40 cm,用于铺设试验材料和形成泥石流,其末端设置成渐变段,使出流口宽度 b 为20 cm,用于模拟引流坝的引流口;水槽II长200 cm、宽80 cm、高80 cm,水石分离格栅模型安装在水槽II中,格栅模型边墙与水槽II侧壁组成停积场,用于停放分离出来的固体颗粒;尾料池位于最末端,长160 cm、宽100 cm、高50 cm,用于回收试验后透过格栅的泥石流体。在试验装置的正面和侧面均安装有摄像机,用于记录试验过程。

1.2 试验模型

水石分离格栅模型由钢材焊接而成(图4),试验中保持格栅长度 L 、格栅跨度 B 、格栅间距 D 不变

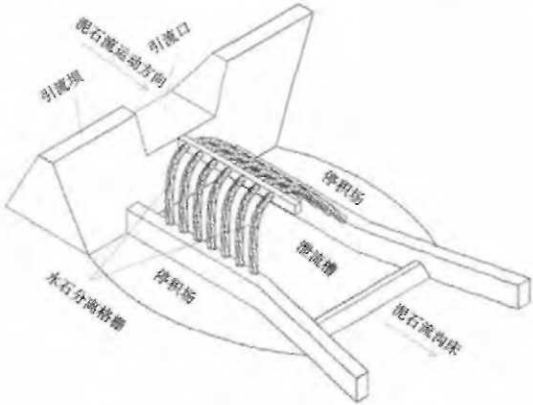


图1 鱼脊型水石分离结构示意图

Fig.1 The plan of herringbone water-sediment separation structure

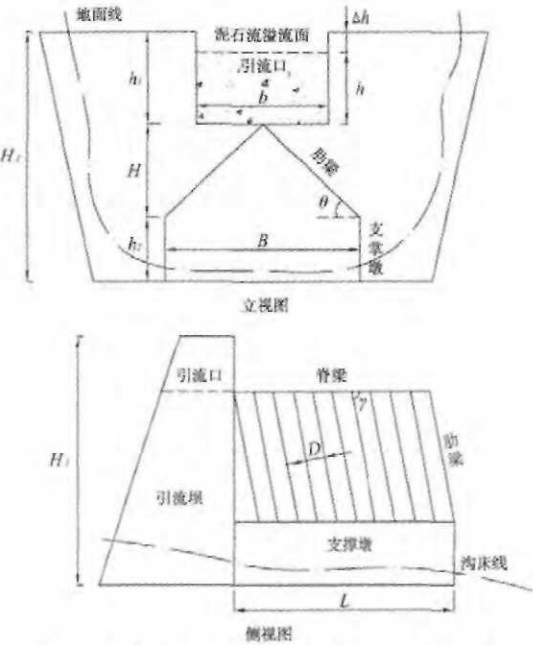


图2 鱼脊型水石分离结构的参数符号示意图

Fig.2 The schematic diagram of structural parameter of herringbone water-sediment separation structure

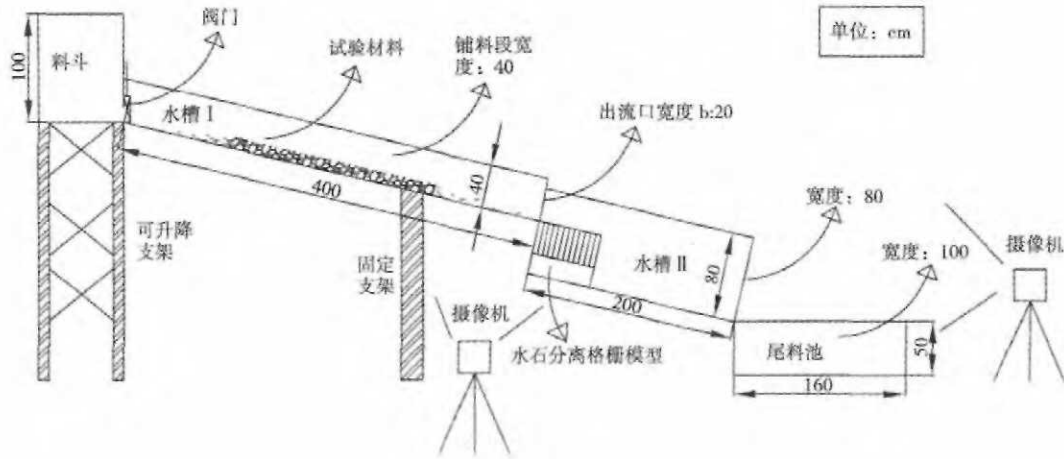


图3 试验装置示意图

Fig.3 Experimental equipment layout plan

(分别为 50 cm、32 cm、2 cm), 仅改变格栅坡度 θ 以及肋梁与脊梁夹角 γ 两个参数; 并保持单一变量原则, 在确定格栅坡度试验中, 肋梁与脊梁夹角 γ 为 90° , 格栅坡度 θ 分别为 31° 、 35° 、 37.8° 、 42° 、 45° , 用于模拟不同格栅坡度下的水石分离过程。在确定肋梁与脊梁夹角试验中, 格栅坡度 θ 为 45° , 肋梁与脊梁夹角 γ 分别为 60° 、 70° 、 80° 、 90° , 用于模拟不同肋梁与脊梁夹角下的水石分离过程。

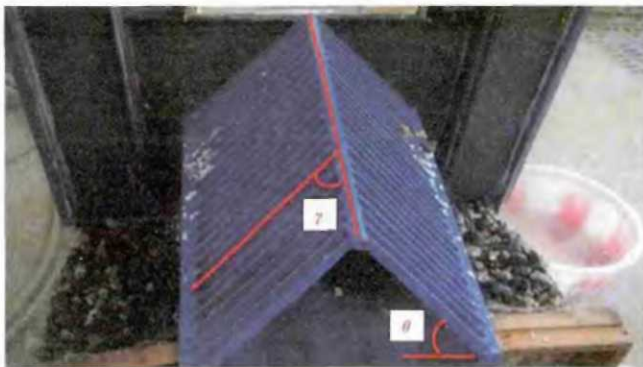


图 4 水石分离格栅模型 ($\theta = 45^\circ$, $\gamma = 80^\circ$)

Fig. 4 Water-sediment separation grid model ($\theta = 45^\circ$, $\gamma = 80^\circ$)

试验材料由天然砂人工配制而成, 粒径范围为 1 ~ 40 mm, 总重 40 kg (图 5)。

1.3 试验流程和量测指标

1.3.1 试验步骤

1. 将水石分离格栅模型安装于水槽 II 中, 并将试验材料均匀铺设在水槽 I 中。

2. 开启清水阀门, 使清水经料斗流出后挟带试验材料一起运动, 形成泥石流。

3. 泥石流流经水石分离格栅, 完成水石分离, 并在水槽正面和侧面均架设摄像机记录泥石流运动和

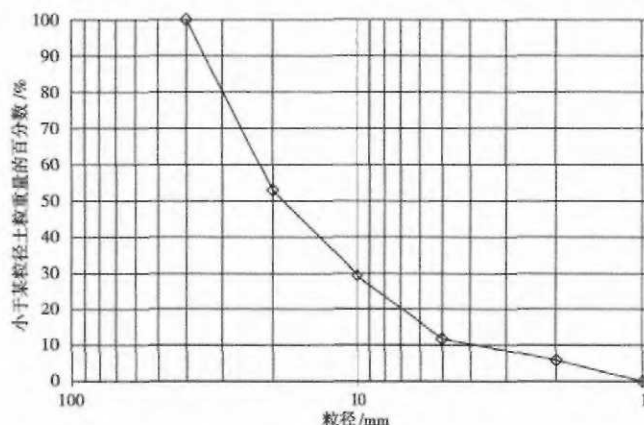


图 5 试验材料颗分曲线图

Fig. 5 Particle size distribution of experimental material

水石分离过程。

4. 待水石分离完成后, 关闭阀门, 并分别收集格栅表面和停积场中的固体颗粒, 风干后进行颗分。

1.3.2 测量项目

1. 通过电子天平测量试验后格栅表面和停积场的固体颗粒质量。

2. 通过筛分试验测量试验后格栅表面和停积场的固体颗粒粒径组成。

2 水石分离格栅坡度的确定

2.1 评价指标

水石分离格栅坡度影响格栅的倾斜程度, 如果格栅坡度太小, 固体颗粒易直接停留在格栅表面, 影响结构水石分离功能的持续发挥。因此, 我们通过分析停留在格栅表面的固体颗粒质量 (表 1), 得到格栅坡度的下限值。

表 1 格栅表面停留的固体颗粒质量

Table 1 Weight of sediment remaining on the surface of the grid

格栅坡度 Angle of the grid $\theta/^\circ$	≥ 20 mm kg	10 ~ 20 mm kg	< 10 mm kg	总重 Total weight m/kg
31.0	1.92	0.11	0.06	2.09
35.0	0.01	—	—	0.01
38.7	0.03	0.01	—	0.04
42.0	—	0.01	—	0.01
45.0	0.02	—	—	0.02

同时, 如果格栅坡度太大, 易导致泥石流在格栅上流速过大, 影响结构有分选地分离粗颗粒。因此, 利用式 1 计算粒径大于和小于设计分离粒径 (20 mm) 的固体颗粒分离到停积场的比例 p_1 和 p_2 (表 2), 通过分析分离比例 p_1 和 p_2 , 得到格栅坡度的上限值

$$p_i = \frac{m_i}{m_i + M_i} \quad (1)$$

式中 p_i ($i = 1, 2$) 分别为粒径大于和小于设计分离粒径的固体颗粒分离比例, m_i ($i = 1, 2$) 分别为停积场中粒径大于和小于设计分离粒径的固体颗粒质量, M_i ($i = 1, 2$) 分别为尾料池中粒径大于和小于设计分离粒径的固体颗粒质量。

2.2 实验结果分析

利用表 1 的数据, 得到停留在格栅表面的固体

颗粒总质量与格栅坡度之间的关系(图6)。从图中可以看出:当格栅坡度 $<35^\circ$ 后,停留在格栅表面的固体颗粒质量明显变大,同时通过观测试验录像也可以发现:格栅坡度为 31° 时,试验全过程均有部分固体颗粒直接停留在格栅表面。以上分析表明:当格栅坡度 $<35^\circ$ 后,固体颗粒易停留在格栅表面上,影响结构水石分离功能的持续发挥。

表2 粒径大于和小于设计分离粒径(20 mm)的固体颗粒分离比例

Table 2 Percentage of separated sediment which larger or smaller than design separated sediment in the experiment of determining incline angle of the grid

格栅坡度 Angle of the grid $\theta/^\circ$	≥ 20 mm 比例 Proportion $p_1/\%$	< 20 mm 比例 Proportion $p_2/\%$
31.0	58.18	15.06
35.0	86.03	30.69
38.7	85.07	34.89
42.0	91.50	48.30
45.0	97.29	54.91

利用表2的数据,得到分离比例 p_1 和 p_2 与格栅坡度之间的关系(图7)。从图7中可以看出:

1. 随着格栅坡度增大,分离比例 p_1 和 p_2 均逐渐增大。这主要是由于格栅坡度越大,泥石流在格栅上的流速越大,导致分离到停积场的固体颗粒明显增多。

2. 当格栅坡度 $<35^\circ$ 后,分离比例 p_1 和 p_2 明显

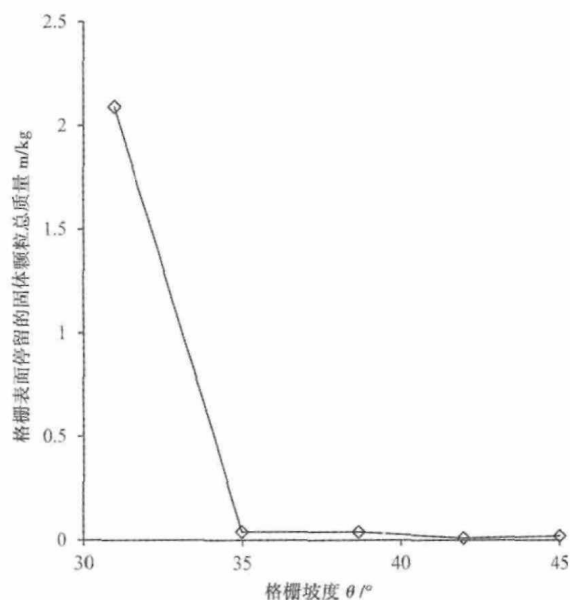


图6 格栅表面停留固体颗粒质量与格栅坡度的关系

Fig. 6 Relationship between inclined angle of the grid and weight of sediment remaining on the surface of the grid

变小。这主要是由于试验全过程均有部分固体颗粒堆积在格栅表面,产生雍堵效应,导致泥石流流速明显减小,导致分离到停积场的固体颗粒明显减少。

3. 当格栅坡度介于 $35^\circ \sim 38.7^\circ$ 时,分离比例 p_1 和 p_2 分别为85%和30%左右,说明此时结构不仅能将大多数粒径大于设计分离的粗颗粒分离出来,而且绝大多数粒径小于设计分离粒径的细颗粒能顺利透过格栅,结构能有分选地分离粗颗粒。

4. 当格栅坡度 $>38.7^\circ$ 后,虽然分离比例 p_1 有所增大,但是分离比例 p_2 也明显增大(40%以上),说明此时格栅坡度太大,部分粒径小于设计分离粒径的细颗粒来不及透过格栅,便随着粗颗粒一起滑落到停积场,结构不能有分选地分离粗颗粒。

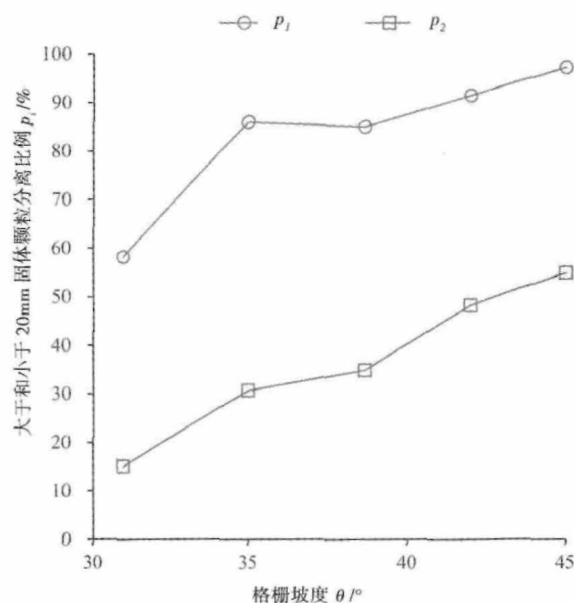


图7 粒径大于和小于设计分离粒径固体颗粒分离比例 p_1 和 p_2 与格栅坡度 θ 的关系

Fig. 7 Relationship between inclined angle of the grid and percentage of separated sediment which is larger and smaller than design separated sediment

2.3 取值范围确定

根据以上的试验结果分析可知,为了使固体颗粒不停留在格栅表面,同时结构具有良好的水石分离效果,即结构有分选地分离粒径大于设计分离粒径的固体颗粒,试验中水石分离格栅坡度的合理取值为 $35^\circ \sim 38.7^\circ$ 。同时,由土力学的知识可知,一般砾石或卵石的天然休止角为 $35^\circ \sim 40^\circ$ ^[15-16],因此实际应用中,只需使水石分离格栅坡度等于固体颗粒的天然休止角,泥石流便不会停留在格栅表面,同时也不会由于泥石流在格栅上的流速过大造成水石分离不充分。

3 水石分离格栅肋梁与脊梁夹角的确定

3.1 评价指标

由之前的分析可知,肋梁与脊梁夹角影响格栅开口的倾斜方向,从而影响结构的水石分离效果。因此,同样利用式 1 计算分析分离比例 p_1 和 p_2 (表 3),得到肋梁与脊梁夹角的合理取值。

表 3 粒径大于和小于设计分离粒径的固体颗粒分离到停积场的比例

Table 3 Percentage of separated sediment which larger or smaller than design separated sediment in the experiment of determining intersection angle between ribbed beams and ridge beam

试验重复次 Number of experiments	肋梁与脊梁夹角 Beam angle ribs and ridge $\gamma / ^\circ$	≥ 20 mm 比例 Proportion $p_1 / \%$	< 20 mm 比例 Proportion $p_2 / \%$
1	60	78.11	15.80
	70	89.05	23.75
	80	91.07	28.61
	90	95.64	37.13
2	60	85.92	16.15
	70	92.77	24.24
	80	92.67	31.93
	90	97.56	40.29
3	60	72.10	15.66
	70	83.53	23.06
	80	89.16	28.88
	90	93.57	38.27

3.2 实验结果分析

利用表 3 中的数据,得到分离比例 p_1 和 p_2 与肋梁与脊梁夹角之间的关系(图 8 和图 9),从这两张图可以看出:

1. 随着肋梁与脊梁夹角的增大,分离比例 p_1 和 p_2 均逐渐增大;

2. 当肋梁与脊梁夹角为 60° 时,虽然分离比例 p_2 最小(15%左右),但是分离比例 p_1 也最小,不利于结构分离粒径大于设计分离粒径的粗颗粒;

3. 当肋梁与脊梁夹角介于 $70^\circ \sim 80^\circ$ 时,分离比例 p_1 和 p_2 分别介于 80% ~ 90% 和 20% ~ 30%,说明此时不仅绝大多数粒径大于设计分离粒径的固体颗粒被结构分离出来,而且仅少部分粒径小于设计分离粒径的固体颗粒被结构分离出来,结构能有分

选地分离粗颗粒;

4. 当肋梁与脊梁夹角为 90° 时,分离比例 p_1 和 p_2 均最大,分别为 95% 和 40% 左右,停积场中粒径小于设计分离粒径的细颗粒明显增多,结构不能有分选地分离粗颗粒。

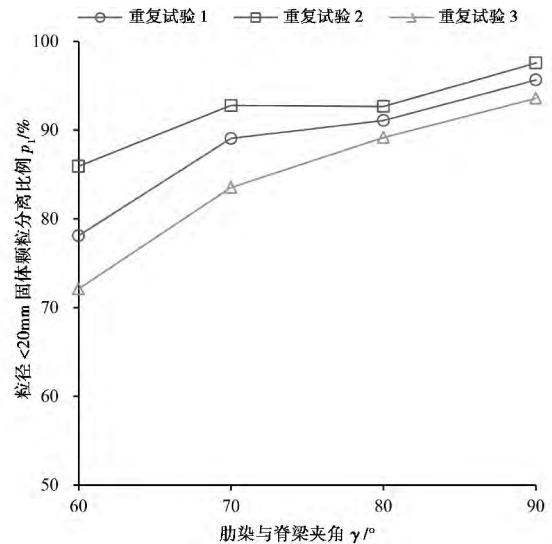


图 8 粒径大于设计分离粒径固体颗粒分离比例 p_1 与肋梁与脊梁夹角 γ 的关系

Fig. 8 Relationship between intersection angle between ribbed beams and ridge beam and percentage of separated sediment which is larger than design separated sediment

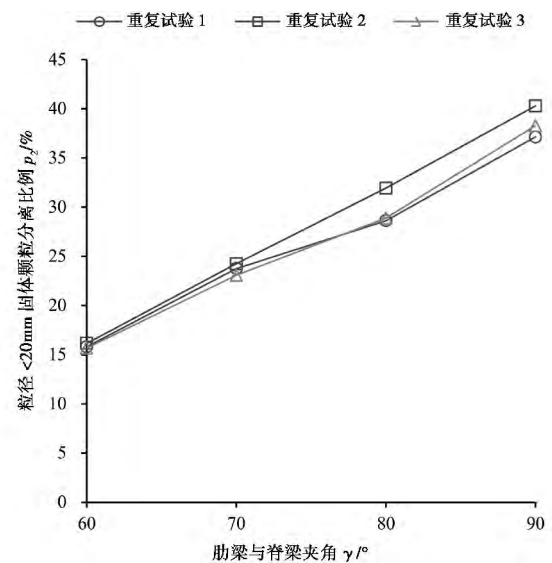


图 9 粒径小于设计分离粒径固体颗粒分离比例 p_2 与肋梁与脊梁夹角 γ 的关系

Fig. 9 Relationship between intersection angle between ribbed beams and ridge beam and percentage of separated sediment which is smaller than design separated sediment

3.3 取值范围确定

根据之前的试验结果分析可知,为了使结构具有良好的水石分离效果,即结构有分选地分离粒径大于设计分离粒径的粗颗粒,肋梁与脊梁夹角的取值可取为 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。

4 结论

鱼脊型水石分离结构是一种新型泥石流防治结构,本文通过室内模型试验,探讨了水石分离格栅坡度 θ 以及肋梁与脊梁夹角 γ 两个参数对水石分离的影响,得到以下结论:

1. 水石分离格栅坡度 θ 影响泥石流是否停留在格栅上,当格栅坡度 $\theta < 35^{\circ}$ 后,分离出的固体颗粒易直接停留在格栅表面,堵塞格栅开口,不利于结构水石分离功能的持续发挥。

2. 水石分离格栅坡度 θ 还影响结构的水石分离效果,随着格栅坡度增大,停积场中粒径大于和小于设计分离粒径的固体颗粒均逐渐增多,从有分选地分离粗颗粒的角度考虑,水石分离格栅坡度的合理取值为 $35^{\circ} \sim 38.7^{\circ}$ 。

3. 对比格栅坡度的合理取值与一般砾石或卵石的天然休止角可知,实际应用中水石分离格栅坡度可取为泥石流固体颗粒的天然休止角。

4. 水石分离格栅肋梁与脊梁夹角 γ 对水石分离效果有影响,随着肋梁与脊梁夹角增大,停积场中粒径大于和小于设计分离粒径的固体颗粒均逐渐增多,从有分选地分离粗颗粒的角度考虑,实际应用中肋梁与脊梁夹角的合理取值为 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。

参考文献 (References)

[1] Chen Xiaoping, Cui Peng, You Yong, et al. Layout methods of control works preventing large scale debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 586-593 [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]

[2] Zhou Bifan, Li Deji, Luo Defu, et al. Guidelines for the prevention and treatment of debris flow [M]. Beijing: Science Press, 1991. [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] Han Wenbing, Ou Guoqiang. Experimental study on effect of intercepting sediment of slit dam [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 286-287 [韩文兵, 欧国强. 水石流梳子型切口坝拦砂性能试验研究 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(3):

286-287]

[4] Han Wenbing, Ou Guoqiang. Experimental study of configuration of intercepted sediments by comb dam [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(3): 258-265 [韩文兵, 欧国强. 梳子坝淤砂形态特征试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(3): 258-265]

[5] Huebl J, Fiebigler G. Debris-flow mitigation measure [G]//Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Jakob M and O. Hunger O. 2005, Springer, 18: 445-487

[6] You Yong. Characteristics of intercepting sediment of debris flow check dam [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 113-115 [游勇. 泥石流梁式格栅坝拦砂性能试验研究 [J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 113-115]

[7] Takahashi T. A review of Japanese debris flow research [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2009, 2(1): 1-14

[8] Mizuyama T. Structural countermeasures for debris flow disasters [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2008, 1(2): 38-43

[9] He Yongmei, Cheng Ming. Research on the application of flexible system to mitigation of mudflow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 292-299 [贺咏梅, 成铭. 柔性防护技术在泥石流防护中的应用及研究进展 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 292-299]

[10] Ono GI, Mizuyama T, Matsumura K. Current practices in the design and evaluation of steel sabo facilities in Japan [J]. Proceedings of the INTERPRAEVENT International Symposium, 2004, VII: 253-264

[11] Volkwein A, Wendeler C, Guasti G. Design of flexible debris flow barriers [J]. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2011, DOI: 10.4408/IJEGE.2011-03.B-118

[12] Gonda Y. Function of a debris flow brake [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2009, 2(1): 15-21

[13] Kim Y, Nakagawa H, Kawaike K, et al. Numerical and experimental study on debris flow breaker [J]. Disaster Prevention Research Institute Annals, 2012, 55(B): 471-481

[14] 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, DOI: 10.1007/s10064-014-0585-9

[15] Chen Xizhe. Research on the strength of the coarse grained soil and the interlocking force [J]. Engineering Mechanics, 1994, 11(4): 56-63 [陈希哲. 粗粒土的强度与咬合力的试验研究 [J]. 工程力学, 1994, 11(4): 56-63]

[16] Wang Chenghua, Zhang Xiaogang, Que Yun, et al. Formation and basic characteristics of sand-sliding slope composed of granular clasts: Part I of sand-sliding slope series [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 29-35 [王成华, 张小刚, 阙云, 等. 粒状碎屑溜砂坡的形成和基本特征研究(溜砂坡系列研究之一) [J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 29-35]

Optimal Value of Structural Parameters in a New Water-sediment Separation Structure for Debris Flow Defense

XIE Tao^{1,2,3}, WEI Fangqiang^{1,2}, YANG Hongjuan^{1,2}, XIE Xiangping^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new water-sediment separation structure with a herringbone water-sediment separation grid has been developed for debris flow defense. Compared to existing structures, this structure can continuously maintain its water-sediment separation function. In the design of the structure, the incline angle of herringbone water-sediment separation grid θ and intersection angle between ribbed beams and ridge beam γ should be determined. In this paper, in order to determine optimal value of the above parameters, a series of model experiments were developed. The experimental results show that the structure can only separate coarse particles, and the separated coarse particles can automatically leave the grid, when the grid incline angle θ and intersection angle between ribbed beams and ridge beam γ were $35^\circ \sim 38.7^\circ$ and $70^\circ \sim 80^\circ$ respectively. According to structural optimum efficiency and the natural angle of repose of sediment, the grid incline angle θ can be equal to the natural angle of repose of sediment, and the intersection angle between ribbed beams and ridge beam γ can be $70^\circ \sim 80^\circ$.

Key words: debris flow; water-sediment separation; debris flow defense; structure dimension; model test