

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201909019

桩林坝拦截泥石流流闭塞表现及其影响因素*

杨开成^{1,2,3}, 游勇^{1,2}, 柳金峰^{1,2}, 孙昊^{1,2,3}, 刘洋^{1,2,3}, 刘道川^{1,2,3}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 开口闭塞表现及其临界值判别是桩林泥石流拦砂坝设计中的关键因素,然而目前国内外对桩林坝的相关研究还较少。通过开展桩林坝拦截泥石流流试验,分析了泥石流流重度、坝体排数、排间距、横向开口宽度等因素对桩林坝闭塞表现的影响。研究表明:桩林坝闭塞存在全闭塞、半闭塞、不闭塞三种类型。泥石流流重度与桩林坝闭塞度呈正相关关系。当桩林排数从一排增加至两排时闭塞度有较大提高。排间距、开口宽度与桩林坝闭塞度成负相关关系。基于试验数据及多元回归分析提出了桩林坝闭塞度的经验计算公式。同时提出了桩林坝拦截泥石流流临界综合闭塞判据 F ,当 $F \leq 8.1$ 时,桩林坝表现为全闭塞类型; $8.1 < F < 27.5$ 时,桩林坝表现为半闭塞类型; $F \geq 27.5$ 时,桩林坝表现为不闭塞类型。

关键词: 桩林坝; 泥石流; 闭塞表现; 临界判据

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1350-08

The Blocking Performance of Pile-group Dam against Debris Flow and Its Influence Factors

YANG Kaicheng^{1,2,3}, YOU Yong^{1,2}, LIU Jingfeng^{1,2}, SUN Hao^{1,2,3}, LIU Yang^{1,2,3}, LIU Daochuan^{1,2,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China;

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

Abstract: The blocking performance and its critical criterion are important factors that should be considered in the design of pile-group dam, however, there are few researches on pile-group dam at home and abroad. The effects of debris flow bulk density, dam row number, row spacing and transverse opening width on the blocking performance of pile-group dam were analyzed by carrying out laboratory tests. The results show there are three blocking types of pile-group dam for intercepting debris flow including total-blocked type, part-blocked type and none-blocked type. The bulk density of debris flow is positively correlated to the blocking rate of dam. The blocking rate increases greatly when the number of pile rows increases from single to double. Row spacing and opening width are negatively correlated to the blocking rate of dam. The empirical formula for calculating the blocking rate of pile-group

* 收稿日期:2019-09-09;修回日期:2019-10-27

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23090403)、四川省应用基础研究项目(2019YJ0005)资助

作者简介:杨开成(1992—),男,硕士研究生。主要从事山地灾害减灾理论与技术研究。E-mail:kaicheng1992@139.com

通讯作者:游勇(1964—),男,研究员,博士生导师。主要从事山洪泥石流运动机理及综合防治技术研究。

E-mail:yyong@imde.ac.cn

dam was presented based on experimental data and multiple regression analysis. A critical comprehensive criterion for debris flow blocking performance of pile-group dam was presented. When $F \leq 8.1$, the pile-group dam manifests as total-blocked type, and when $8.1 < F < 27.5$, the dam shows part-blocked performance, otherwise the dam is none-blocked.

Keywords: pile-group dam; debris flow; blocking performance; blocking criterion; experimental study

引言

泥石流拦沙坝按其结构形式可分为实体坝、格栅坝和组合坝。桩林坝属于一种由立柱组成的格子型格栅坝,具有拦粗排细、受力条件好、节省材料等优点^[1]。我国第一座桩林坝于1937年在石太铁路娘子关车站建成^[2],之后在四川、西藏等泥石流易发区域桩林坝均得到了应用(图1)。李德基^[3]认为透过型拦沙坝的开口是决定坝体在使用中是否能有效节流输沙的关键因素,开口一旦被堵塞拦沙坝便不再拥有泥石流调控能力,因此在拦截泥石流时开口的闭塞表现是工程设计人员需要考虑的重要因素。目前国内外研究人员对桩林坝研究较少,已建桩林坝主要依靠工程人员的经验进行设计建造,在拦截泥石流时存在一定风险^[4-5]。如何使桩林坝结构尺寸参数设计有理可依,是目前急需解决的问题。



图1 北川县杨家沟桩林坝

Fig.1 Pile-group dam in Yangjiagou, Beichuan County

C. E. Choi等^[6-10]通过数值模拟及室内模型试验,探讨了桩林拦挡结构不同布置形式对泥石流能量耗散的影响。王秀丽等^[11]通过数值模拟研究了桩林坝拦截泥石流时的桩体动力响应。针对拦沙坝开口宽度取值及闭塞表现,N. Osanai^[12]认为相对开口宽度小于2时,格子坝能对泥石流进行拦蓄,但在实际操作中难以准确得到泥石流中最大块石的直径。M. Silva等^[13]通过模型试验,探讨了缝隙坝

拦砂效能与开口宽度之间的关系,并研究了两种布置形式(平面型、V型)对水石流拦挡效能的影响。H. P. Lien等^[14]通过理论研究和模型试验建立了梳子坝土砂流出率、泥砂体积浓度比、贮砂率与坝体相对开口宽度、开口密度之间的关系式。J. Shima等^[15]通过对日本已建格栅坝进行跟踪研究,发现块石存在相互推压成拱作用,即使开口宽度设置为1.4 m,也能拦截到0.5~1.0 m的块石和泥砂。游勇^[16]通过室内模型试验发现梁式格栅坝的闭塞有全部闭塞、临时闭塞、半闭塞和未闭塞4种类型。吕娟等^[17]通过野外调查及模型试验,建立了缝隙坝泥石流泥砂体积浓度和相对开口宽度、坝体开口密度、相对开口深度之间的数学表达式。孙昊等^[18]和D. Yuan等^[19]通过室内试验,分别探讨了梁式格栅坝和格子坝闭塞类型及其临界判别条件。

上述研究对坝体闭塞表现的研究主要集中于梁式格栅坝、平面型格子坝和缝隙坝等,且闭塞临界判别条件多基于相对开口宽度。而对于多层立体形式布置的桩林坝,闭塞表现及临界条件受多种因素的控制,已有研究结论不能很好地对桩林坝防治工程进行指导。本文通过对影响桩林坝拦截泥石流闭塞表现的相关参数进行研究,以期建立起桩林坝拦截泥石流闭塞表现的综合临界判据及闭塞度经验计算式,可以为桩林坝的设计建造提供一定的理论依据和参考。

1 试验方案

1.1 试验物料

试验用物料取自彭州市龙门山镇湔江上游甘沟泥石流堆积区原样。为满足试验需求,人工筛除直径大于40 mm的粗砾石,图2为泥石流土样颗粒分级配曲线。土样特征粒径 $d_{95}=28$ mm,中值粒径 $d_{50}=2.8$ mm、不均匀系数 $C_u=50.36$ 、曲率系数 $C_c=0.10$ 。随后将泥石流土样按一定比例加水配制为重度16、

18、20 kN/m³的泥石流流体,泥石流土样和水的比例可由泥石流泥沙体积浓度 C_v 计算:

$$C_v = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_s - \gamma_w) \quad (1)$$

式中, C_v 为泥石流泥沙体积浓度; γ_c 为泥石流流体重度,按试验设计取值为 16、18、20 kN/m³; γ_w 为泥石流中水的重度,取 $\gamma_w = 10$ kN/m³; γ_s 为泥石流流体中土的实体重度,根据本试验物料土体颗粒级配情况,取 $\gamma_s = 26$ kN/m³。

由式(1)计算得到,3个重度的泥石流流体对应的泥沙体积浓度 C_v 分别为 0.375、0.5、0.625,以该比例分别配制泥石流流体。

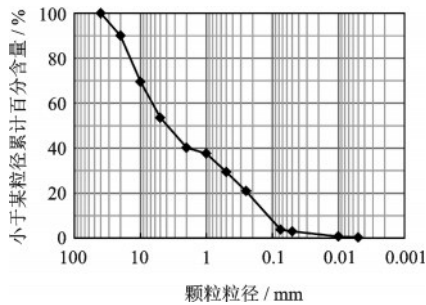


图2 泥石流原样颗粒级配曲线

Fig.2 Grading curve of original debris flow sample

1.2 试验装置

试验在中国科学院成都山地灾害与环境研究所泥石流模拟大厅进行。试验装置由玻璃水槽、装料斗和尾料池组成(图3)。玻璃水槽长为4 m、宽为0.3 m、高为0.4 m,为使泥石流有一定运动距离,且方便测量过坝时的相关参数,桩林坝模型设置于距水槽出口1.5 m处,水槽纵坡可调节角度为0°~20°;装料斗具有可控制开闭高度的闸门,最大容积为0.25 m³;尾料池用于收集过坝后泥石流。

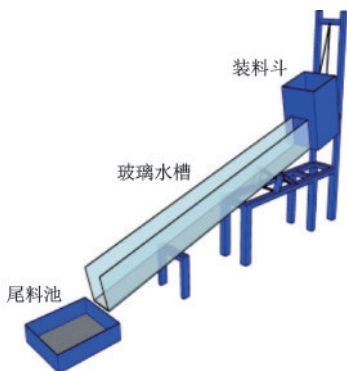


图3 试验装置示意

Fig.3 Sketch of experimental apparatus

1.3 桩林坝模型

桩林坝桩林坝单桩是直径为20 mm、长为200 mm的钢管,各单桩之间由上下两根长300 mm的薄铁连接梁连接,由桩体组合而成的桩林坝模型宽为300 mm(与水槽宽度相同)、高为200 mm。根据试验需求,设置桩林坝单排横向开口宽度 b 为30、40、50、60 mm,其中开口宽度 b 为桩体净间距。双排桩林坝由两个横向开口宽度相同的单排桩林组合而成,且桩体呈“品”字形交错布置(图4),设置纵向排净间距 l 为37、47、57、67 mm。

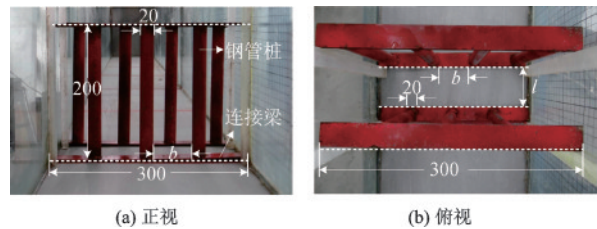


图4 桩林坝模型

Fig.4 Sketch of pile-group dam model

1.4 试验设计

泥石流模型试验的相似理论目前还处于探索阶段^[20]。本试验主要运用弗劳德重力准则进行设计,弗劳德数被广泛应用于描述水力学及沟道颗粒流的动力相似性问题。在泥石流试验中,弗劳德数也是一个描述试验动力相似性的关键无量纲参数,通过计算得到本试验中弗劳德数为1.5~2.0,符合野外观察到的实际情况,试验结果能为实际工程提供一定的理论依据和参考。

为研究不同条件下桩林坝拦截泥石流闭塞形态及其影响特征,本试验选取泥石流重度 γ 、桩林坝排数 n 、排间距 l 、横向开口宽度 b 为试验变量(表1);其中泥石流重度为16、18、20 kN/m³,分别代表稀性、过渡性、黏性泥石流;通过对日本已建格栅坝工程的研究,发现不含飘木的泥石流最佳拦截坡度为8°~10°,且根据孙昊等^[18]的研究成果,水槽坡度对拦沙坝闭塞类型的影响较小,因此本试验水槽纵坡坡度为9°、单次试验泥石流用料为0.09 m³。

试验分单排桩林坝及双排桩林坝进行:单排桩林坝试验($n=1$),不考虑排间距,通过改变3个泥石流重度和4个开口宽度,进行12组试验(表1);双排桩林坝试验($n=2$),改变3个泥石流重度,4个开口宽度,4个排间距,进行48组试验(表2)。因此本文

共开展多因素作用下桩林坝拦截泥石流试验60组。

表1 单排试验变量设置

Table 1 Experimental variables of single row pile-group dam

水槽坡度/(°)	规模/ m ⁻³	γ/ (kN·m ⁻³)	n	b/ mm	l/ mm
9	0.09	1.6	1	30	—
		1.8		40	
		2.0		50	
				60	

表2 双排试验变量设置

Table 2 Experimental variables of double row pile-group dam

水槽坡度/(°)	规模/ m ⁻³	γ/ (kN·m ⁻³)	n	b/ mm	l/ mm
9	0.09	1.6	2	30	37
		1.8		40	47
		2.0		50	57
				60	67

2 泥石流闭塞表现及其影响因素

2.1 桩林坝拦截泥石流闭塞表现

国内外研究学者主要通过闭塞度对坝体拦截泥石流闭塞类型进行定量分析。在本试验中,同样引入闭塞度对桩林坝不同闭塞类型及其影响因素进行研究。桩林坝闭塞度可由下式得到:

$$B = \frac{S_a}{S_b} \times 100\% \quad (2)$$

式中,B为桩林坝闭塞度;S_a为过流后桩林坝开口被泥石流堵塞面积;S_b为桩林坝有效过流面积。

对于双排桩林坝,由于上下游两排桩林开口宽度相同,在试验中上游侧桩林闭塞度均大于下游侧桩林,桩林坝堵塞后后续过流能力以最大闭塞程度为准,因此双排桩林坝闭塞度B、开口堵塞面积S_a、有效过流面积S_b均以上游侧桩林进行计算。

在部分试验中泥石流会发生越坝及飞溅现象,桩林坝顶部部分颗粒有几率会被冲起带往下游,试验结束后,坝体顶部会存在微小的孔隙,而此时桩林坝基本已丧失继续过流能力,因此当B≥90%时,表示桩林坝全闭塞,桩林坝丧失对后续泥石流调控

的能力;即使水槽中未设置拦砂坝,水槽底部仍有一定厚度泥石流淤积,因此认为B≤10%时桩林坝为不闭塞,在此闭塞区间内桩林坝不具备拦截泥石流的能力;当10%<B<90%时桩林坝即为半闭塞,桩林坝在具有一定泥石流拦蓄能力的同时,对后续来流也保持有持续的拦截调控能力。

2.1.1 单排桩林坝闭塞类型

为便于研究比较单排桩林坝与双排桩林坝的闭塞类型,本文选取d₉₅作为泥石流颗粒特征粒径,b/d₉₅为桩林坝相对开口宽度。

试验结果表明,单排桩林坝在拦挡重度为20 kN/m³的泥石流时,桩林坝可表现为全闭塞、半闭塞两种类型。当b/d₉₅≤1.07时,桩林坝表现为全闭塞;1.07<b/d₉₅≤2.14时,桩林坝表现为半闭塞。

当拦挡重度为18 kN/m³的泥石流时,桩林坝表现为全闭塞(图5(a),b=30 mm)、半闭塞(图5(b),b=40 mm)、不闭塞(图5(c),b=60 mm)三种类型。当b/d₉₅≤1.07时,桩林坝表现为全闭塞;1.07<b/d₉₅≤1.78时,桩林坝表现为半闭塞;当b/d₉₅>1.78时,桩林坝表现为不闭塞。

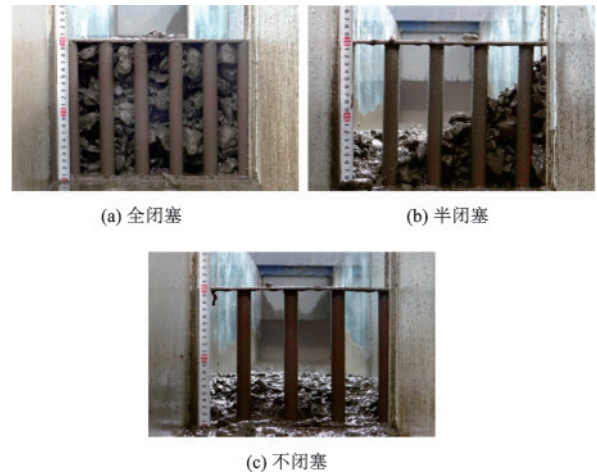


图5 单排桩林坝拦截泥石流闭塞类型

Fig.5 Debris flow blocking type of single row pile-group dam

拦挡重度为16 kN/m³的泥石流时,桩林坝表现为半闭塞和不闭塞两种类型。当b/d₉₅<1.78时,桩林坝主要表现为半闭塞;当b/d₉₅≥1.78时,桩林坝表现为不闭塞。

2.1.2 双排桩林坝闭塞类型

双排桩林坝在拦挡重度为20 kN/m³泥石流时,桩林坝表现为全闭塞、半闭塞两种类型。当b/d₉₅≤1.43,桩林坝表现为全闭塞;1.43<b/d₉₅≤2.14时,

桩林坝表现为全闭塞及半闭塞两种类型。

在拦截重度为 18 kN/m^3 泥石流时, 桩林坝可表现为全闭塞、半闭塞、不闭塞三种类型。当 $b/d_{95} \leq 1.07$, 桩林坝表现为全闭塞; 当 $1.07 < b/d_{95} \leq 1.78$ 时, 桩林坝表现为全闭塞及半闭塞两种类型; 当 $b/d_{95} > 1.78$ 时, 桩林坝主要表现为不闭塞类型。

在拦截重度为 16 kN/m^3 泥石流时, 桩林坝表现为全闭塞(图 6(a), $b=30 \text{ mm}$, $l=37 \text{ mm}$)、半闭塞(图 6(b), $b=40 \text{ mm}$, $l=37 \text{ mm}$)和不闭塞(图 6(c), $b=60 \text{ mm}$, $l=37 \text{ mm}$)三种类型。当 $b/d_{95} \leq 1.07$, 桩林坝表现为全闭塞及半闭塞两种类型; 当 $1.07 < b/d_{95} < 1.78$ 时, 桩林坝表现为半闭塞类型; 当 $b/d_{95} \geq 1.78$ 时, 桩林坝主要表现为不闭塞。

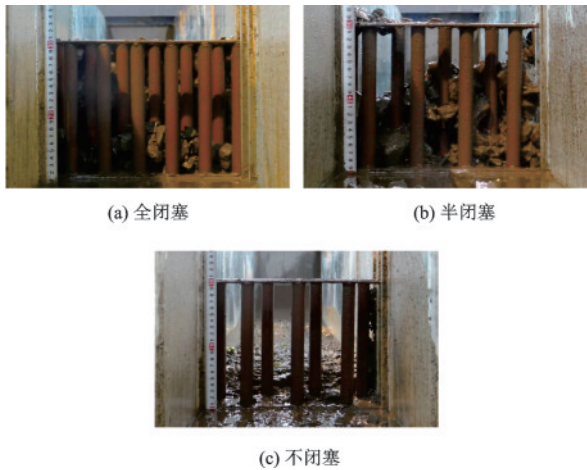


图 6 双排桩林拦截泥石流坝闭塞类型

Fig.6 Debris flow blocking type of double-row pile-group dam

2.2 桩林坝闭塞度影响因素分析

2.2.1 泥石流重度对桩林坝闭塞表现的影响

泥石流重度对单排及双排桩林坝闭塞度的影响特征是相同的, 因此选取单排桩林坝闭塞度随泥

石流重度变化规律进行分析。从图 7 中可以看出泥石流重度与桩林坝闭塞度成正相关关系。对于相同级配泥石流, 同等体积下重度越大, 泥石流整体性越好、粗颗粒含量越多、颗粒间相互间胶结作用越强, 在通过桩林坝时更容易堵塞开口。

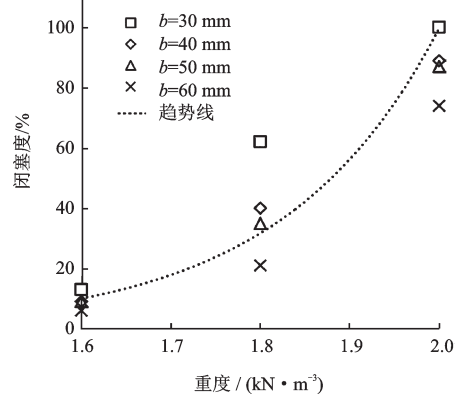


图 7 桩林坝闭塞度与泥石流重度关系

Fig.7 The relationship between blocking rate and debris-flow bulk density

2.2.2 排数对桩林坝闭塞表现的影响

图 8 为在相同试验条件下 ($b=50 \text{ mm}$, $l=57 \text{ mm}$, $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$) 单排及双排桩林坝拦截泥石流闭塞过程。在仅有一排桩林情况下, 由于横向开口较大, 泥石流顺畅的通过坝体; 在双排桩林情况下, 由于上下游两排桩体成“品”字型布置, 穿过上游侧桩林的泥石流刚好被下游桩体阻挡, 坝体在短时间内散失过流能力。从图 8(d) 和(h)可以看出, 当桩林排数由一排增加至两排, 坝闭塞程度有较大的提升; 且双排桩林坝上游侧桩林闭塞度大于下游侧桩林闭塞度。

2.2.3 排间距对桩林坝闭塞特征的影响

图 9 为拦截泥石流重度为 16 kN/m^3 时桩林坝

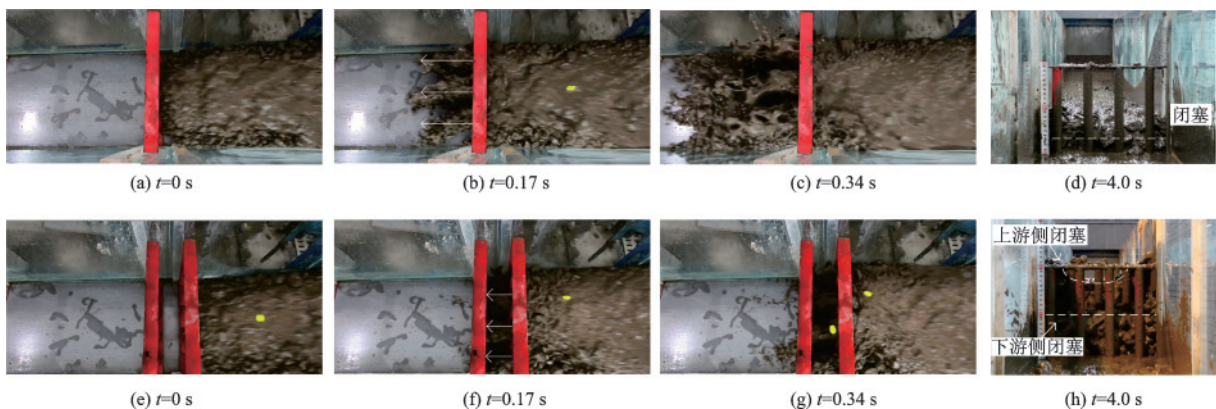


图 8 桩林坝拦截泥石流闭塞过程

Fig.8 The blocking process of pile-group dam in experiments

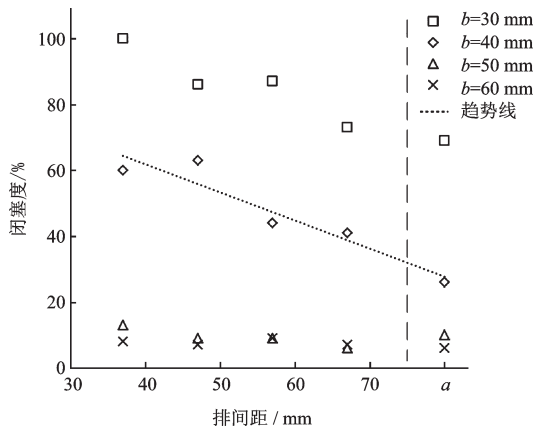


图9 桩林坝闭塞度与排间距关系

Fig.9 The relationship between blocking rate and row spacing

闭塞度随桩林排间距变化规律。可以看出,当横向开口较大时,第二排桩林的辅助作用不足以使坝体闭塞,只有横向开口宽度在一定范围内时,排间距对桩林坝闭塞特征有影响。排间距与桩林坝闭塞度成负相关关系,排间距越大,桩林坝闭塞度越小。当排间距 $\geq a$ 后,双排桩林作为一个拦砂坝的整体性遭到破坏,由双排桩林坝变为两个单排桩林坝,在此情况下增大排间距,桩林坝闭塞度不再变化,在数值上等于相同开口宽度的单排桩林坝闭塞度。

2.2.4 开口宽度对桩林坝闭塞表现的影响

图10为泥石流重度为 16 kN/m^3 时桩林坝闭塞度随开口宽度变化的规律。由排间距影响因素分析可知,当排间距 $l=a$ 时,单排桩林坝闭塞度等于相同开口宽度双排桩林坝。从图中可以看出,开口宽度与桩林坝闭塞度成负相关关系,闭塞度随桩林坝开口宽度增大而减小,当开口宽度大于某一值时,泥石

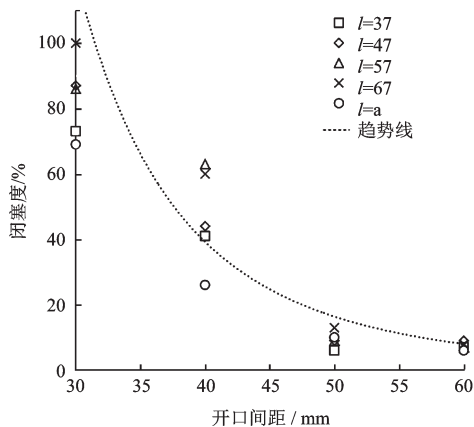


图10 桩林坝闭塞度与开口宽度关系

Fig.10 The relationship between blocking rate and opening size

流可以顺畅的通过桩林坝而不会堵塞开口。

2.3 桩林坝闭塞度计算

为确定各影响因素与坝体闭塞度的定量关系,利用量纲分析 π 定量,将影响桩林坝闭塞度的各参数无量纲化。由式(1)可知,对于相同级配泥石流,泥石流泥沙体积浓度 C_v 只与泥石流流体重度有关,为无量纲参数,而重度为非无量纲参数,因此利用 C_v 表征重度对桩林坝闭塞度的影响。建立了闭塞度与无量纲数 b/d_{95} 、 l/d_{95} 、 C_v 之间的关系式(3);其中将单排桩林坝视为双排桩林坝排间距等于临界值 a 的情况。

$$B = f(b, l, d_{95}, \gamma) = f(b/d_{95}, l/d_{95}, C_v) \quad (3)$$

式中, b/d_{95} 为桩林坝相对横向开口宽度; l/d_{95} 为相对排间距; C_v 为泥石流泥沙体积浓度。

从桩林坝闭塞度影响因素分析可以看出,在其它参数不变时,泥石流流体重度与闭塞度大致成指数正相关关系(图7);排间距与闭塞度大致成线性负相关关系(图9);开口宽度与闭塞度大致成幂指数负相关关系(图10)。基于以上分析建立桩林坝闭塞度回归模型:

$$B = \beta_1 + \beta_2 (b/d_{95})^{\beta_3} + \beta_4 (l/d_{95}) + \beta_5 e^{\beta_6 C_v} \quad (4)$$

式中, β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 、 β_6 为特征系数。

利用MATLAB软件对式(4)进行多元回归分析,得到了桩林坝闭塞度 B 与 b/d_{95} 、 l/d_{95} 、 C_v 的拟合关系式:

$$B = 111.8658 - 34.3067(b/d_{95})^{1.6764} - 17.6233(l/d_{95}) + 11.6769e^{3.02C_v} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.8879$$

图11为桩林坝闭塞度实际值与计算值关系对

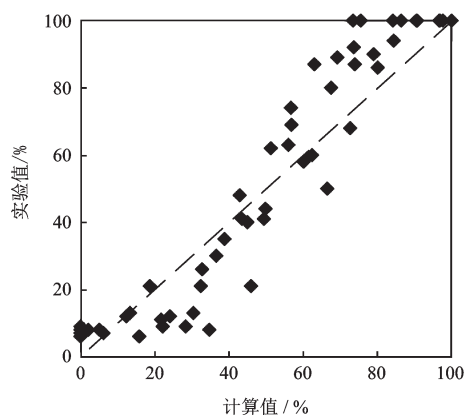


图11 桩林坝闭塞度试验值与计算值对比关系

Fig.11 Comparison between experimental and calculated results of the blocking rate of pile-group dam

比图,可以看出计算值与实际值整体比较吻合,该闭塞度经验计算式基本符合试验规律。

2.4 桩林坝临界闭塞综合判据

按几何形态分,桩林坝属于立体型透过性拦砂坝,而国内外研究人员对坝体闭塞度的研究主要集中于平面型拦砂坝,且一般基于单一参数 b/d_r 对拦砂坝闭塞类型进行判别。通过试验可以发现桩林坝闭塞表现与泥石流重度、开口宽度、桩林排数、排间距有关。基于试验分析,并结合前人研究成果,本文提出了一种综合考虑泥石流泥沙体积浓度 C_v 、开口宽度 b 、桩林排数 n 、排间距 l 、特征粒径 d_{95} 的桩林坝临界闭塞综合判别式:

$$F = f(\gamma, b, n, l, d_{95}) = f(C_v, b/d_{95}, n, l/d_{95}) = \frac{(b/d_{95})^2 e^{0.25(n-1)(l/d_{95})}}{C_v^2} \quad (6)$$

式中, F 为闭塞特征判别系数; γ 为泥石流重度; b 为开口宽度; n 为桩林排数,取值为1、2; l 为排间距; d_{95} 为特征粒径。

图12为桩林坝闭塞临界综合判据与试验值的匹配情况,可以看出试验数据规律性地分布在:全闭塞、半闭塞、不闭塞三个区域内,说明公式(6)可以较好的对桩林坝闭塞类型进行判别。当 $F \leq 8.1$ 时,桩林坝表现为全闭塞类型, $8.1 < F < 27.5$ 时,桩林坝表现为半闭塞类型, $F \geq 27.5$ 时,桩林坝表现为不闭塞类型。

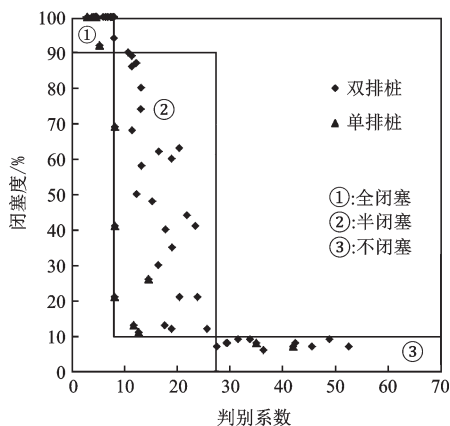


图12 桩林坝闭塞临界综合判据

Fig.12 The comprehensive critical criterion for debris flow blocking of pile-group dam

3 结论

(1)单排及双排桩林坝均存在全闭塞、半闭塞

和不闭塞三种类型。对于处于半闭塞及不闭塞类型的单排桩林坝,增加桩林坝排数,能显著改变坝体拦截泥石流的闭塞表现;对于全闭塞类型单排桩林坝,增加桩林排数,能降低全闭塞类型对应的开口宽度临界值。

(2)通过对试验数据的拟合得到了桩林坝闭塞度经验计算公式。开口宽度、排间距与闭塞度成负相关关系,泥石流泥沙体积浓度与坝体闭塞度成正相关关系,且开口宽度及体积浓度是影响桩林坝闭塞表现的主要因素,排间距为次要因素。

(3)基于试验数据及经验公式,并结合前人研究成果,提出了一种综合考虑泥石流泥沙体积浓度、开口宽度、桩林排数、排间距、泥石流颗粒特征粒径的桩林坝闭塞临界判别式 F 。当 $F \leq 8.1$ 时,桩林坝表现为全闭塞类型; $8.1 < F < 27.5$ 时,桩林坝表现为半闭塞类型; $F \geq 27.5$ 时,桩林坝表现为不闭塞类型。

参考文献:

- [1] 周必凡. 泥石流防治指南[M]. 北京:科学出版社, 1991.
Zhou B F. Handbook of debris-flow prevention[M]. Beijing: Science Press, 1991.(in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 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. The theory and practice of debris flow disaster mitigation[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [4] Wang G L. Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China [J]. Natural Hazards, 2013, 69(3): 1835-1847.
- [5] 余斌,杨永红,苏永超,等. 甘肃省舟曲8.7特大泥石流调查研究[J]. 工程地质学报, 18(4): 437-444.
Yu B, Yang Y H, Su Y Ch, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7, 2010[J]. Journal of Engineering Geology, 18(4): 437-444.(in Chinese)
- [6] Choi C E, Law R P H. Performance of landslide debris-resisting baffles[J]. HKIE Transactions, 2015, 22(4): 235-246.

- [7] Choi C E, Ng C W W, Song D R, et al. Flume investigation of landslide debris-resisting baffles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(5):540-553.
- [8] Fei M L, Sun Q C, Zhong D, et al. Energy dissipation of debris flow through pile group obstructions[J]. Proceedings of the 7th International Conference on Micro-mechanics of Granular Media-Sydney, Australia, 2013 (7):1262-1265.
- [9] Ng C W W, Choi C E, kwan J S H, et al. Effects of baffle transverse blockage on landslide debris impedance [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2014, 9: 3-13.
- [10] Ng C W W, Choi C E, Song D R, et al. Physical modeling of baffles influence on landslide debris mobility [J]. Landslides, 2015, 12(3):627-627.
- [11] 王秀丽, 关彬林, 李俊杰. 泥石流块石冲击下新型钢管混凝土桩林坝“品”单元动力响应分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(2):69-75.
Wang X L, Guan B L, Li J J. Dynamic response analysis of “trefoil”-shaped unit of concrete-filled steel tubular piles under impact of big stone in debris flow [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(2):69-75. (in Chinese)
- [12] Osanai N. Design standard of control structures against debris flow in Japan [J]. Journal of Disaster Research, 2010, 5(3):307-314.
- [13] Silva M, Costa S, Cardoso A H. Effect of plan layout on the sediment control efficiency of slit-check dams for stony type debris flows mitigation [C] // River Basin Management. UK: Wit Press, 2015:259-270.
- [14] Lien H P, Chai F W, Ke Z Z. The controlling efficiency of slit dam for debris flow disaster [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 8(1):52-58.
- [15] 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.
- [16] 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.
You Y. Characteristics of intercepting sediment of debris flow check dam [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1):113-115. (in Chinese)
- [17] 吕娟, 韩文兵. 泥石流缝隙坝对龙头泥砂体积浓度变化影响试验研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2):68-71.
Lyu J, Han W B. Experiment on variety of surge sediment volume concentration with debris flow passing through silt dam [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(2):68-71. (in Chinese)
- [18] 孙昊, 游勇, 柳金峰, 等. 泥石流梁式格栅坝堵塞临界判据及其拦砂性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4):125-134.
Sun H, You Y, Liu J F, et al. Experimental study on characteristic of blocking and trapping sediment of debris flow beam dam [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4):125-134. (in Chinese)
- [19] Yuan D, Liu J F, You Y, et al. Experimental study on the performance characteristics of viscous debris flows with a grid-type dam for debris flow hazards mitigation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(8):5763-5774.
- [20] 王协康, 方锋. 泥石流模型试验相似律分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(3):9-12.
Wang X K, Fang D. Study on laws of debris model similarity [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32(3):9-12. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)