

卡口地形段泥石流堵塞效应分析

黄杰, 党超

Blocking effect of debris flow in the segment of bayonet terrain: A case study at the Huatoujian gully of Shefang, Sichuan

HUANG Jie and DANG Chao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202207011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析

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

樊圆圆, 宋玲, 魏学利 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 1-9

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39

基于遗传规划的泥石流多因子融合预测方法

Multi-factors fusion method of debris flow prediction based on genetic programming

翟淑花, 冒建, 南, 刘欢欢, 王云涛, 王强强, 熊春华, 王艳梅 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 111-115

基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral

张静, 田述军, 侯鹏鹏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16

北京市密云区典型泥石流侵蚀过程分析

Erosion process on a debris flow in Miyun County, Beijing

马超, 王玉杰, 王彬 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 10-16



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202207011

黄杰, 党超. 卡口地形段泥石流堵塞效应分析——以四川什邡桦头尖泥石流沟域为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 48-57.

HUANG Jie, DANG Chao. Blocking effect of debris flow in the segment of bayonet terrain: A case study at the Huatoujian gully of Shefang, Sichuan[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 48-57.

卡口地形段泥石流堵塞效应分析 ——以四川什邡桦头尖泥石流沟域为例

黄杰¹, 党超^{1,2}

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002;

2. 三峡大学地质灾害教育部重点实验室, 湖北宜昌 443002)

摘要: 泥石流在流经卡口段沟道时常出现暂时堵塞现象, 并伴随着流量放大效应。文章通过典型卡口段泥石流野外调查和室内水槽试验, 研究卡口段泥石流堵塞效应的影响因素与成因机制。研究显示: 卡口段泥石流堵塞效应引起的流量放大或因松散固体物源堆积而产生的流量衰减, 均与卡口部位的几何条件、泥石流流体、沟域特征、是否存在附加松散物源有关。单纯卡口的存在多为泥石流流量衰减的正面因素, 而是否有松散物源的加入则是卡口段泥石流的堵塞效应发生的关键因素。此研究对认识泥石流在微地貌突变、堆积规律, 完善泥石流防治技术规程方面都具有重要的理论意义和应用前景。

关键词: 泥石流; 卡口; 水槽试验; 堵塞效应; 地质灾害防灾减灾

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)03-0048-10

Blocking effect of debris flow in the segment of bayonet terrain: A case study at the Huatoujian gully of Shefang, Sichuan

HUANG Jie¹, DANG Chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: The temporary block-breach phenomena tend to occurrence when debris flows run through bayonet segment, accompanying with instant scale-amplified effect. By the way of field investigations as well as indoor flume tests, the influence factors and formation mechanisms of the block-breach effect were studied herein. Results showed that the flow amplification caused by the blocking effect of debris flow or the flow attenuation caused by the accumulation of solid materials in the bayonet segments, were related to the geometric conditions of the bayonet, the debris flow fluid and trench features, and whether there was additional loose material. The existence of bayonet was mostly a positive factor for the flow attenuation of debris flow, and whether there was the addition of loose materials was the key factor for the blocking effect of debris flow in bayonet segments. This study provided theoretical significance and application prospects for understanding the motion and deposited regularities of debris flow in where micro-topography abruptly changed, and improving the technical regulations of natural hazard

收稿日期: 2022-07-10; 修订日期: 2022-11-09

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41701013)

第一作者: 黄杰(1996-), 男, 四川资阳人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害成因机理方面的研究。E-mail: 2654394880@qq.com

通讯作者: 党超(1982-), 男, 山东滕州人, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害成因机理方面的研究。E-mail: dangchao1982@126.com

prevention and mitigation.

Keywords: debris flow; bayonet; flume test; blocking effect; geo-hazard prevention and mitigation

0 引言

堵塞效应在泥石流运动过程中是一种常见的现象,当泥石流流量不足以克服其阻力运动时,只有通过流量的积累以克服阻力,便产生了泥石流堵溃效应^[1]。主支沟交汇^[2-3],沟道地形突变^[4-6]以及沟道内的崩滑堆积体^[7-9]均可使泥石流在局部产生堵溃效应,其宏观表现形式为沟道短暂断流与阵流现象^[10-12]。汶川地震以后,由于沟道内大量崩滑体堵塞沟道,沟道断面束窄形成局部卡口地貌,泥石流的堵溃效应加显著,泥石流的堵塞系数相比震前显著增大^[13],泥石流堵塞系数取值范围由 1~2.5 增大到 2.0~5.5^[14],在计算泥石流防治工程设计流量时,胡卸文等^[15]建议堵塞系数取值至少取值 1.5,最大值可达 4.0 以上。崔鹏等^[16]把震后泥石流堵塞系数普遍提高的主要原因归结于沟道微地貌的突变,主沟串珠状崩滑堰塞体级联溃决以及沟道束窄形成的卡口效应是导致泥石流发生堵溃效应和规模放大的核心因素^[17]。另外,是否有支沟泥石流汇入或卡口处巨石堵塞也是泥石流规模放大的关键因素^[18-19]。近几年以来,部分学者开始对堵溃效应及其产生的流量放大效应进行研究^[20-21],从冲刷系数、泥石流流量与流速、地形突变段长度以及泥石流级配对泥石流堵溃效应的影响等方面开展了理论探讨和试验研究。

天然泥石流沟道为一系列弯道与顺直段,宽窄相同的地貌组合,尤其在构造活动强烈,岩性软硬相间的地质条件下,更有利于卡口这种微地貌的形成。宽窄组合的卡口地形特征,更易引发泥石流的局部堵塞与溃决现象,从而产生泥石流流量放大效应^[22-25],泥石流造成的危害也更加严重。泥石流堵塞系数是表征泥石流堵溃效应的特征参数,也是泥石流防治工程勘察设计规范中

配方法计算泥石流流量的关键参数。现行规范中往往以卡口的多少作为泥石流堵塞程度的判定依据,具有明显的经验性,未考虑泥石流流体性质、泥石流的运动特征以及卡口微地貌形态对卡口堵溃效应和堵塞系数的影响,导致泥石流流量计算存在较大的不确定性,从而影响泥石流防治工程的效果与运行安全。

文中尝试通过模型试验的方法,探索不同卡口地形和泥石流特征条件下,泥石流发生堵溃的临界条件,分析卡口段泥石流流量的放大效应,对于完善泥石流防灾减灾技术规程,提高对泥石流运动堆积过程的认知,具有重要的理论意义和应用前景。

1 泥石流卡口堵溃试验设计

1.1 桦头尖泥石流概况

1.1.1 气象与水文条件

什邡市位于四川盆地边缘及边缘山区,属亚热带湿润季风气候,区内气候随地势变化差别较大。总体特征是天气温湿、雨量充沛、四季分明。夏季多暴雨;秋季气温降幅大,多连绵阴雨;冬季长,气温低日照少,常有低温、冰雹等自然灾害发生。

根据什邡市气象站多年观测资料,区内多年平均气温 13.6 °C。年最冷为 1 月,平均气温 3.7 °C,极端最低气温 -8 °C(1984 年);最热为 7—8 月,平均气温 23 °C,极端最高气温 35.5 °C(1996 年)。多年平均月最大降水量为 254.36 mm,多年平均月最小降水量 4.49 mm(表 1),年均总降水量 938.9 mm。每年降雨多集中在 5—8 月,占全年降水量的 76%。降雨分配极度不均匀,局部地段暴雨频繁,且随地势增高,降雨量明显增加,山区降雨和平原区形成较大差异。

表 1 什邡市多年平均月降水量统计表(1971—2002 年)

Table 1 Statistical table of annual average monthly precipitation in Shifang City (1971—2002)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水量/mm	11.85	20.34	44.58	75.81	114.67	254.36	202.44	141.69	36.31	15.77	4.49	11.85

根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》所附暴雨量等值线图,什邡市红白镇地区的 1/6 h、1 h、24 h 多年最大暴雨量平均值分别为 8.3 mm、20 mm、60 mm,变异系数分别为 0.51、0.35、0.48,查皮尔逊 III 型曲线得到不同频率下模比系数并求得不同频率下的雨强值统

计见表 2。

四川山区泥石流激发雨量一般为一次雨量 48~50 mm 或 10 min 雨量 8~12.2 mm。由于地震后,桦头尖沟内不良地质现象发育,松散物源量大增,其激发雨量还可能更低。桦头尖沟区域内降雨较丰沛,且雨量集

表 2 研究区不同频率下雨强值计算表

Table 2 Calculation table of rain intensity values at different frequencies in the study area

频率/%	10 min雨强				1 h雨强				6 h雨强				24 h雨强			
	平均值 /mm	变异 系数	模比 系数	设计雨强 /mm												
1			2.31	28.88			2.11	94.95			2.74	274.00			3.1	496.00
2	12.5	0.4	2.08	26.00	45	0.35	1.92	86.40	100	0.5	2.42	242.00	160	0.58	2.69	430.40
5			1.78	22.25			1.67	75.15			1.99	199.00			2.16	345.60
10			1.53	19.13			1.47	66.15			1.66	166.00			1.75	280.00

中,其雨强完全可以满足激发泥石流的条件,暴雨是该泥石流的主要引发因素。

桦头尖沟为常年流水溪沟,主要接受大气降水补给,流量受降水量控制,冬春季节有融雪补给,但融雪补给水量较少,泥石流均为雨季暴发,融雪不构成泥石流主要水源。

1.1.2 地质环境条件

桦头尖沟流域属深切构造侵蚀低山和中山地形,“V”型谷,沟谷平面上较为顺直,沟道总体比较狭窄,一般在 5~10 m,出山口后沟道有所展宽,在 10~20 m。主沟长 1.6 km,流域内最高点高程为 1 720 m,沟口与唐家河交汇处高程为 1 096 m,相对高差 624 m,主沟平均纵坡降 392.3%,其中上游沟道陡峻,切割深度较大,平均纵坡 400%以上,下游沟段纵坡略缓,平均纵坡 190%~310%。地形陡峻,地形临空条件发育,为流域内崩塌、滑坡等不良地质现象的发育,以及为泥石流松散固体物源的汇集提供了有利条件。特别是在 5.12 地震后,沟内新产生了大量的崩滑等不良地质体,为泥石流的发育提供了大量松散固体物源。

沟道上游,沟谷较为狭窄,纵坡较陡,水流湍急,且动态变化较大,具陡涨陡落的山溪沟谷特征。森林植被在地震中遭到严重破坏,覆盖率有所降低,地震中不良地质现象极其严重,松散堆积层覆盖较厚,主要为基岩斜坡崩塌堆积物,可参与泥石流活动的松散物源量相对较多。

沟道中游,两侧岸坡陡峻,为砂岩、粉砂岩泥岩互层,岸坡坡度一般 50°~60°,局部沟道直立甚至反角;沟内发育多处陡坎和深潭,沟床基岩出露,沟床粗糙,沟内有巨石和携带的树木堆积以及茂密的灌丛,植被覆盖较好;崩滑不良地质体较为发育,主要为第四系残坡积滑坡及坡面侵蚀堆积物;沟道堆积物主要为巨大漂石,大部分沟床基岩裸露;崩滑体发育处沟道堵塞严重,堆积物厚 1~3 m。

沟道下游,为泥石流和冲洪积堆积扇形地,形状比较规则,保存较好。堆积扇前缘有唐家河通过,沟口距

唐家河高差约为 20 m。

1.2 试验装置

试验水槽装置主要由三部分组成:泥石流供料箱、试验水槽及集水池(图 1)。



图 1 试验装置图

Fig. 1 Graph of the test apparatus

供料箱:位于顶部,为横截边长 50 cm 的正方形,高 80 cm,供料箱上部设置最大开度 20 cm 的闸门与试验水槽相接,下部焊接锥形漏斗,最大供料体积 150 L。每次试验时,记录供料箱内物料的高度,从而计算出泥石流的流量过程。

试验水槽:位于中部,为双面钢化玻璃水槽,长 4.5 m,横截面高 40 cm,宽 30 cm,纵坡可通过龙门架在 6°~12°之间调节,水槽卡口部位两侧贴透明网格纸,通过高速摄像机记录泥石流的运动参数。

集水池:位于尾部,为长 80 cm、宽 80 cm、高 60 cm 的砖砌水池,用以收集泥石流堆积体。

供料箱及集水池通过水位传感器记录水位变化,并通过体积法分别计算入口和出口处泥石流的流量,其中 Q_0 ($L \cdot s^{-1}$) 为入口流量, Q ($L \cdot s^{-1}$) 为出口流量。

1.3 卡口模型的制作

卡口模型采用混凝土制作,并使用模具制作成不同的形态,在试验中共制作了 3 中不同形态的卡口,即

V形卡口、矩形卡口和梯形卡口,并通过卡口宽度(w)和倾角(α)控制卡口的大小,卡口以水槽中轴线对称布置于水槽出口处上游1/3处。

1.4 泥石流试样的配制

泥石流试样模型砂的配制主要参考桦头尖2011年4种不同泥石流堆积物的级配特征,并按照1:100的几何相似性比尺进行缩放;考虑到颗粒级配的连续性与分形相似性,试验中选取粒径小于20 mm的部分进行试验;同时,为了在试验中能够更好地观测松散颗粒的堵塞和运动过程,对不同粒径组的泥沙颗粒分别进行染色处理。泥石流试样的容重采用称重法确定,试验中采用的模型砂级配曲线如图2所示。

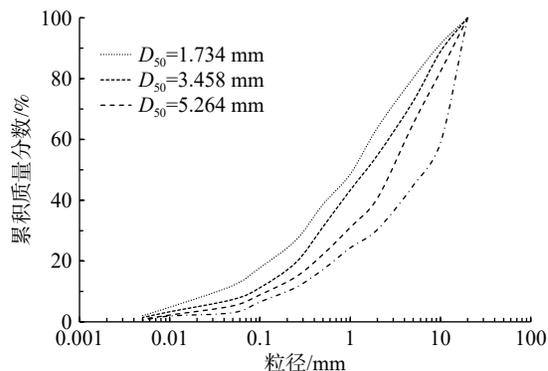


图2 试验砂级配图

Fig. 2 Sands grading used in the tests

1.5 试验方法和步骤设计

利用水槽试验,探讨沟域特征和不同性质下的泥石流,通过不同的形态卡口时泥石流的堵溃过程与流量放大效应。试验步骤如下:

①按照预定级配与泥石流容重,分别对模型砂与水进行称重,通过搅拌机充分,然后通过标准工具测量容重;

②调整水槽坡度至试验预定值;

③准备好所有测量仪器与记录装置;

④首先不设置卡口,分析顺直沟道泥石流的运动过程。

a. 试验开始时利用数码摄像机录制试验过程,以测量泥石流泥深,龙头流速及流态,并记录床沙启动过程;

b. 使用数码摄像机和水位计记录集水池的水位变化以获得泥石流的流量过程,并于未设置卡口时的流量过程进行对比分析;

c. 测量水槽内泥石流的冲淤测量,摄影并绘制冲蚀—堆积关系图。

d. 对水槽内的泥石流冲蚀—堆积物进行取样,送试

验室分析。

⑤在试验水槽设置卡口,重复④a—d;

⑥改变其他试验条件,重复①—④。

卡口段泥石流堵溃过程试验从2020年6月开始至2021年10月,共进行试验9组31次。其中无卡口对比试验6次(SY0-1—SY0-6),正式试验8组25次,各组分次试验参数如表3所示。其中变量为卡口宽度(w)、卡口扩展角(α)、束窄率(A_r)、卡口长度(L)、颗粒中值粒径(D_{50})、泥石流容重(γ_d)、松散物源(V_s)。

2 卡口段泥石流堵溃过程的影响因素

卡口段泥石流的堵塞与溃决过程与卡口的几何形态、泥石流流体特征以及沟域特征有密切的关系,文章通过单因素试验的方法,探讨上述因素对卡口段泥石流运动与堆积过程的影响。

2.1 卡口几何形态

泥石流流经卡口段时,泥石流的运动状态与参数发生明显改变,且与卡口形态和卡口束窄率具有较大的相关性。

2.1.1 洪峰流量衰减

泥石流流经卡口段时,由于沟道过流断面变小,在卡口内存在急流冲刷现象,但在卡口段上游大量堆积物从泥石流流体中析出,固体颗粒大量沉积,

泥位变大,并有显著表面粗化现象;通过卡口后,泥石流的固体物质出现轻微分选,出口处泥石流峰值流量相对于无卡口段时,出现了显著的衰减(图3)。为了探讨泥石流通过卡口段流量的变化大小,定义无量纲参数流量比 Q_{pr} :

$$Q_{pr} = Q_{po}/Q_{pi} \quad (1)$$

式中: Q_{po} ——闸门出口处泥石流峰值流量/($L \cdot s^{-1}$);

Q_{pi} ——料箱泥石流流出峰值流量/($L \cdot s^{-1}$)。

不同类型的卡口对泥石流通过卡口前后峰值流量的影响有所不同,矩形卡口流量比0.512~0.765,V形卡口流量比0.534~0.844,梯形卡口流量比0.788~0.909。同时,试验结果表明,卡口段泥石流流量的衰减与卡口断面的束窄率呈负相关关系,即卡口处断面相对于上游沟道变窄程度越大,泥石流流量衰减程度越高,可近似采用线型关系表示(图4):

$$Q_{pr} = -0.95A_r + 1.26, R^2 = 0.94 \quad (2)$$

$$A_r = 1 - \frac{A_k}{A_g} \quad (3)$$

式中: A_r ——卡口束窄率;

表 3 试验组次安排表
Table 3 Schedule of test groups

组次	卡口形态				泥石流特征		沟域特征	松散物源 (10^{-3}m^3)	
	卡口形状	卡口宽度 /cm	卡口扩展角 ($^{\circ}$)	束窄率	卡口长度 /cm	颗粒中值 粒径/mm	泥石流容重 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)		沟道纵坡 ($^{\circ}$)
SY0-1						3.458	18.27	6	无
SY0-2						3.458	18.27	9	无
SY0-3						3.458	18.27	12	无
SY0-4						3.458	18.27	6	无
SY0-5						3.458	18.27	9	无
SY0-6						3.458	18.27	12	无
SY1-1	矩形	12.5	—	0.250	30	3.458	18.27	9	无
SY1-2		10	—	0.333					
SY1-3		7.5	—	0.417					
SY2-1	V形		60	0.268	30	3.458	18.27	9	无
SY2-2			45	0.413					
SY2-3			30	0.567					
SY3-1	梯形	(10,20)		0.5	30	3.458	18.27	9	无
SY3-2		(10,10)		0.67					
SY4-1	梯形				20	3.458	18.27	9	无
SY4-2		(10,20)		0.5	30				
SY4-3									
SY5-1	梯形				30	3.458	16.85	9	无
SY5-2		(10,20)		0.5			18.27		
SY5-3							19.62		
SY5-4							20.35		
SY6-1	梯形				30	1.734	18.27	9	无
SY6-2		(10,20)		0.5		3.458			
SY6-3						5.264			
SY6-4						9.935			
SY7-1	梯形				30	3.458	18.27	6	无
SY7-2		(10,20)		0.5				9	
SY7-3								12	
SY8-1	梯形				30	3.458	18.27		3.37
SY8-2		(10,20)		0.5				9	6.74
SY8-3									10.11

注: (10, 20) 分别代表梯形卡口底宽与顶宽。

A_k ——卡口段水槽横断面面积/ cm^2 ;

A_g ——无卡口水槽断面面积/ cm^2 。

从试验结果可知, 泥石流流经卡口微地形时, 泥石流流量会发生衰减, 且卡口处地形断面相对于沟道上游断面变化越大, 则流量越易产生衰减。

2.1.2 洪峰展平

相对于无卡口时, 各组次试验泥石流通过卡口后, 流量过程线均出现洪峰展平的现象(图 3), 一次泥石流过程持续时间延长, 洪峰出现时刻延后, 且延后时间(T_d/s)与流量比以及卡口断面束窄率呈正相关关系, 即卡口处断面束窄程度越大, 泥石流峰值流量滞后时间越长, 可近似采用指数关系表示(图 5):

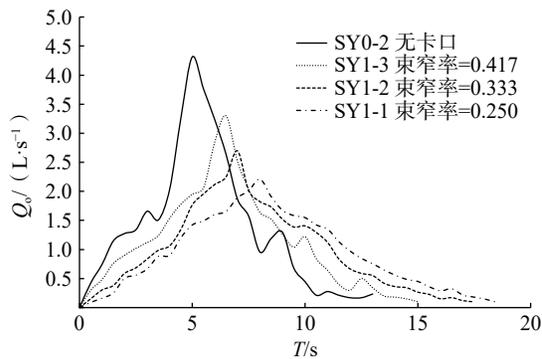
$$T_d = 0.37e^{2.58A_r}, R^2 = 0.91 \quad (4)$$

试验中采用了三种不同纵向长度的卡口, 用以探讨卡口段长度的变化对泥石流运动参数的影响, 试验结果显示: 卡口的长度的增加会增大泥石流流量衰减的过程, 会减缓峰值流量出现时时刻, 但不同卡口段长度时, 泥石流通过卡口段的流量过程线并无明显区别, 卡口段长度对泥石流运动参数的影响较小(图 6)。

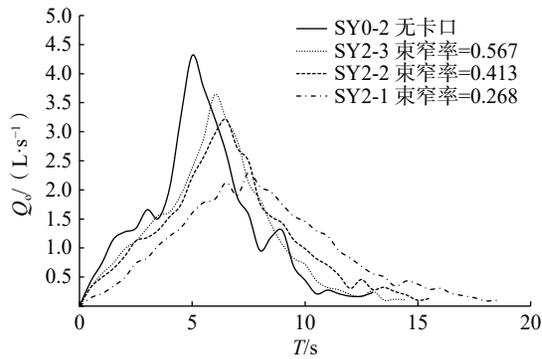
2.2 泥石流流体特征

2.2.1 泥石流容重

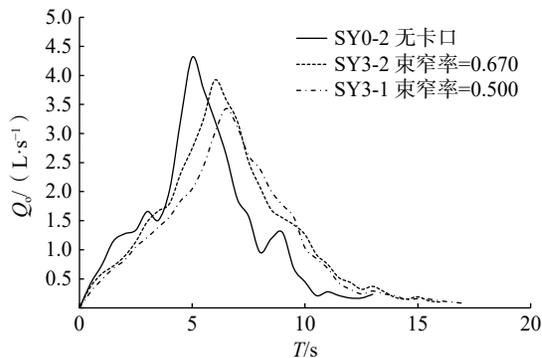
试验结果表明(图 7), 泥石流容重与固体颗粒体积比浓度越大, 其运动阻力越大, 流速越慢, 泥石流在遭遇卡口段时, 越易产生堆积作用, 泥石流在卡口段的流量衰减过程越显著; 同时, 随着泥石流容重的增大, 泥石流峰值流量出现时刻也越晚, 洪峰展平的现象也越显著。



(a) 矩形



(b) “V”型



(c) 梯形

图 3 不同形态卡口条件下泥石流的流量过程线

Fig. 3 Discharge hydrograph of debris flow through different bayonets

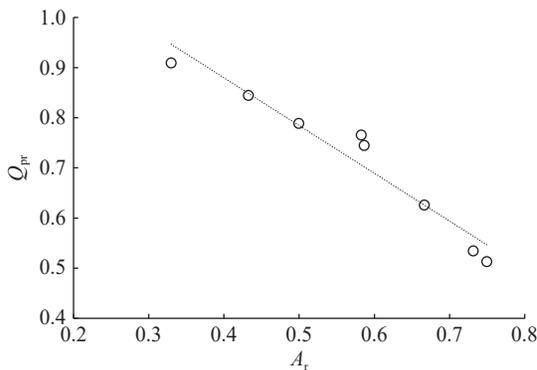


图 4 卡口束窄率与流量比的关系

Fig. 4 The relation between narrowing rate of bayonet and discharge ratio

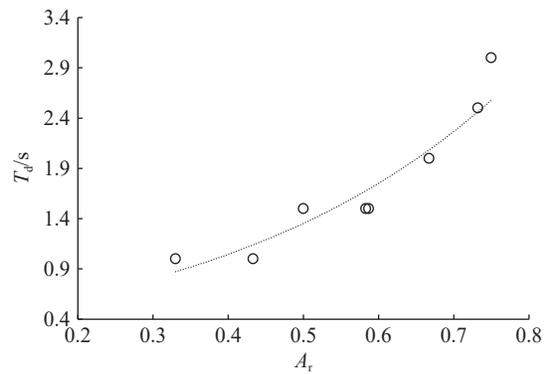


图 5 卡口束窄率与峰值流量延迟时间的关系

Fig. 5 The relation between narrowing rate of bayonet and delay time of peak discharge

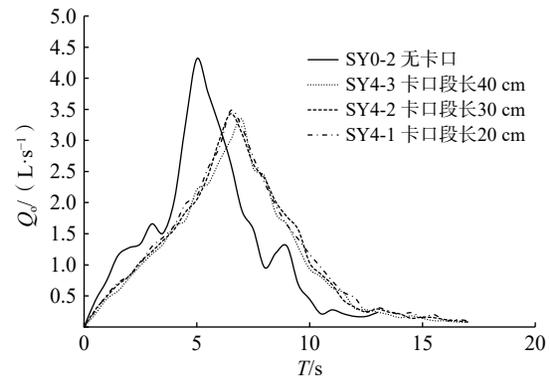


图 6 不同卡口长度的泥石流流量过程线

Fig. 6 Discharge hydrograph of debris flow with different bayonet lengths

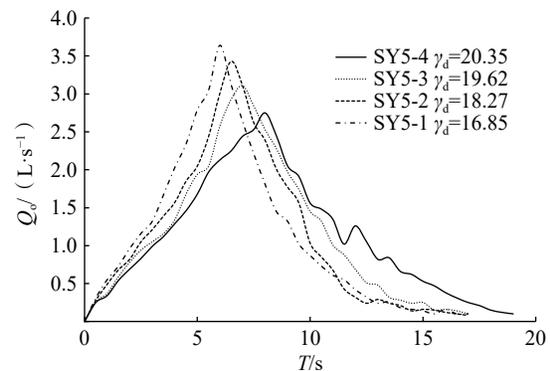


图 7 不同容重泥石流通的流量过程线

Fig. 7 Discharge hydrograph of debris flow with different bulk density

2.2.2 泥石流级配

泥石流颗粒级配对卡口段的泥石流运动过程也有较大影响(图 8)。颗粒粒径越粗,同等水力条件下,遭遇到卡口后,卡口上游段泥石流固体可以更易发生堆积作用,致使通过卡口段的泥石流流量发生衰减,泥石流过流总量减小,但泥石流级配对卡口处泥石流峰值流量

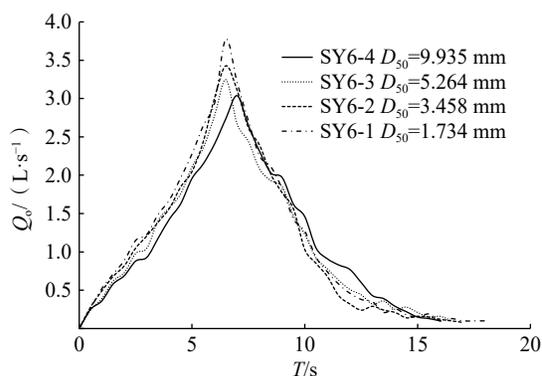


图 8 不同级配泥石流的流量过程线

Fig. 8 Discharge hydrograph of debris flow with different gradation

出现时刻的无较明显影响。

2.3 沟域特征

从试验结果来看,水槽纵坡较大时,如图 9(a), $J=12^\circ$),泥石流排泄速度越快,卡口的存在对泥石流的运动过程影响较小,泥石流流量过程线越趋向于尖瘦型,泥石流固体物质在卡口段前不易发生堆积作用,卡口处出现急流冲刷现象,相应的泥石流通过卡口段时的流量衰减越小,卡口段前后流量比也越大,洪峰展平现象越不显著;水槽纵坡较小时,如图 9(c)中曲线 $J=6^\circ$,卡口的存在致使一次泥石流持续时间延长,卡口段前部固体物质大量堆积,峰值流量出现时刻显著延后,洪峰展平现象也更为显著。通过分析不同坡度条件下,卡口段泥石流峰值流量的衰减率,可以发现:泥石流峰值流量的衰减与沟道坡度负相关、如图 10 所示,即沟道坡度越大,越不易产生流量衰减,相应的沟道坡度越小,则越易产生沟道局部堵塞的现象。

同时,水槽纵坡也会影响峰值流量延迟的时间,坡度越大延迟时间越短,泥石流流量过程洪峰展平的现象也越不显著。

2.4 沟道堆积物

野外调查表明,卡口段泥石流的堵溃过程与流量放大效应与滑坡堆积体、支沟泥石流堆积扇等坡地重力作用形成的半堵塞、全堵塞沟道密切相关,松散堆积物常堆积与沟道一侧,沟道多向对岸偏移或沟道局部侵蚀基准面抬高,从而形成堆积型卡口。试验中在水槽两侧堆放不同体积的堆积物,按照长度为 20 cm 的 V 形卡口布置于试验水槽卡口段,模拟堆积型卡口对泥石流堵溃作用的影响。

从试验结果来看(图 11),当沟道内存在堆积型卡口时,虽然堆积型卡口的存在会耗散泥石流运动的动能,但由于堆积物大量进入泥石流浆体,泥石流流量有

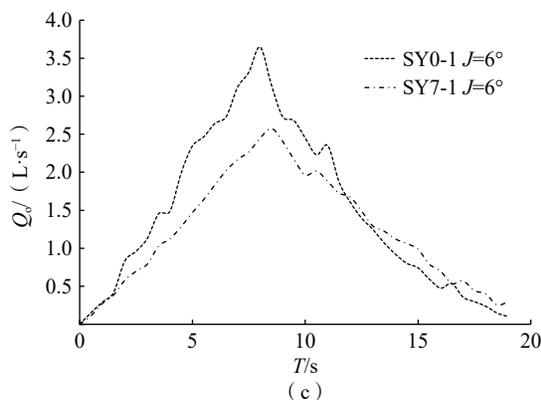
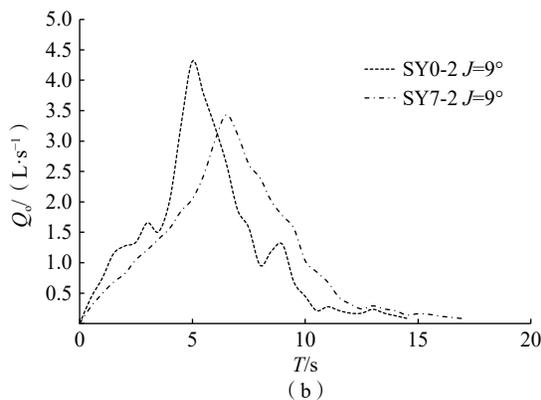
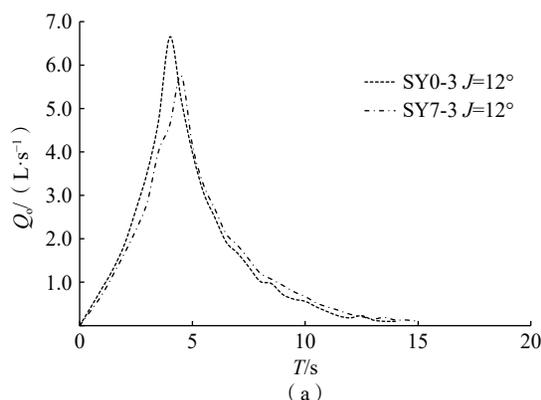


图 9 不同坡度条件下泥石流的流量过程线

Fig. 9 Discharge hydrograph of debris flow with different inclination

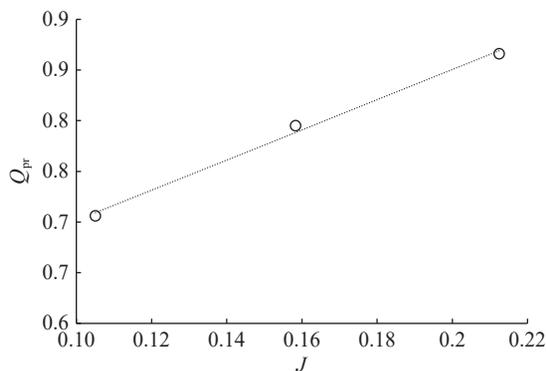


图 10 $J-Q_{pr}$ 关系图(弧度表示法($360^\circ=2\pi$))

Fig. 10 $J-Q_{pr}$ relation

显著增大的趋势, 峰值流量出现时刻延后, 一次泥石流总量也显著增大。

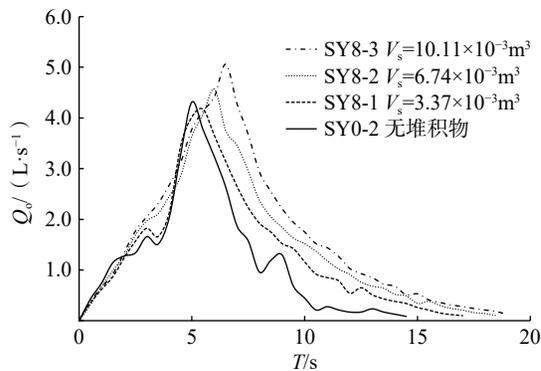


图 11 不同体积的堆积型卡口段的流量过程线

Fig. 11 Discharge hydrograph through sediment bayonet with different volumes

3 卡口段泥石流的流量比

试验结果表明, 泥石流流经卡口段时, 若沟道内无松散物源的补给, 则会产生流量衰减过流, 泥石流峰值流量出现时刻延后, 洪峰过程线展平; 泥石流通过卡口段时其流量比主要与以下 3 个无量纲参数有关: γ_s/γ_d 、 w/D_{50} 、 J/A_r , 定义无量纲参数 K 综合表示, 通过试验数据回归分析, 卡口段泥石流流量比 Q_{pr} 可表示为(图 12):

$$Q_{pr} = 0.47K^{0.22}, \quad K = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \cdot \frac{w}{D_{50}} \cdot \frac{J}{A_r}, \quad R^2 = 0.71 \quad (5)$$

式中: γ_s/γ_d ——泥石流相对容重;

w/D_{50} ——泥石流固体颗粒代表粒径与卡口的相对大小;

J/A_r ——泥石流潜在动能与卡口段能量耗散之间的比值;

K ——无量纲参数。

对于单位宽度、单位长度的水体在单位时间内所

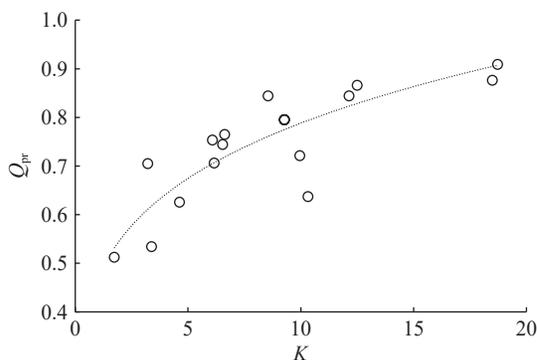


图 12 $K-Q_{pr}$ 关系图

Fig. 12 $K-Q_{pr}$ relation

泥石流运动所提供的能量 W 可以表示为:

$$W = \gamma_d q J \quad (6)$$

式中: γ_d ——泥石流的容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

q ——单宽流量/($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$);

J ——能坡/($^\circ$)。

沟床床面的输沙浓度与水流提供的功率存在线性关系, 即:

$$S_v = k(W - W_e) \quad (7)$$

式中: S_v ——以干容重计的单宽输沙率;

k ——输砂常数;

W_e ——特定粒径泥砂的启动功率, 当坡度条件不变时, 泥砂的启动功率为常数。

从式(6)可以得出, 当泥石流流经卡口段时, 沟道断面的突变, 必然会引起由于克服卡口阻力而产生能量耗散, 泥石流输砂浓度减小, 泥石流固体物质析出, 导致峰值流量衰减, 因此式(5)中的 K 值实质上表征了泥石流流体动能与固体颗粒启动或堆积时的能量耗散之间的相互关系。

4 结论

(1)文中通过试验分析了泥石流通过卡口段时, 泥石流运动参数的变化以及卡口的堵塞效应。文中通过试验发现, 泥石流通过卡口地形时, 泥石流流量出现堵塞效应而产生的流量放大, 或因为固体物质堆积而出现流量衰减, 均与卡口部位的几何条件、泥石流特征、沟域特征、是否存在附加松散物源有关。当卡口附近无附加松散物源时, 改变其他 3 个试验条件时, 均出现了流量衰减的现象, 即流量比 $Q_{pr} < 1$; 而堆积型卡口, 由于有附加堆积物的, 泥石流体积比浓度与一次泥石流总量的增大, 3 次试验中, 有 2 次出现了流量的放大作用, 即流量比 $Q_{pr} > 1$ (即试验 S8-1—S8-3)。

(2)泥石流通过卡口段时, 由于过流断面的减小, 卡口上游段必然产生涌塞, 局部流速减小, 泥石流固体物质析出而堆积于沟道之上, 致使泥石流通过卡口后出现流量衰减。从能量耗散的角度来看, 卡口地形改变了泥石流运动的边界条件, 导致能量的耗散; 当无附加能坡或固体物质时, 则必然会出现流量衰减的现象。

(3)泥石流流量计算方法的研究最早始于 20 世纪 30 年代, M.斯里勃内依采用雨洪修正法计算泥石流流量, 并采用附加流量表示沟道堵塞效应, 或通过堵塞系数表征泥石流流量的这种叠加效应, 并在我国泥石流研究与防治工程设计中广泛应用。但对于某一具体流域

的堵塞系数仍然是未知数,在定量取值上有很大的主观性和不确定性,目前一般认为泥石流的堵塞系数取值范围为 1.0~3.0。文中所定义的流量比 Q_{pr} 实质上即为泥石流在特定断面的堵塞系数,其取值在很多条件下并不是大于 1 的;因此,在沟道纵坡较小,卡口束窄率较大,而沟道内又无较多可活动物源的情况下,笼统地将堵塞系数取值大于 1,缺乏合理性,容易引起泥石流防治工程超标设计,造成极大的投资浪费。

(4)卡口段泥石流堵塞现象成因复杂,本试验以野外试验成果级配构成基本试验参数,在野外调配基本浆体,但野外调配级配时并未考虑泥石流规模和固体物质来源方式与大颗粒物等因素的影响,试验数据因大颗粒物含量过少,明显的堵溃与冲淤现象在试验组次中相较野外原型可能存在数量变少的情况,从而对推导流量比产生间接影响。但通过文中的试验现象揭露,卡口的存在多为泥石流流量衰减的正面因素,而是否存在松散物质的加入则是卡口段泥石流的堵塞效应发生的关键因素。因此,在泥石流调查研究和防治工程勘查设计时,应更加侧重于堆积型卡口的形态、规模以及参与泥石流活动的方式,以期获得更加合理的泥石流运动参数。

参考文献(References):

- [1] 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 Xiangjun, SHU Anping. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 吴积善,程尊兰,耿学勇.西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J].山地学报,2005,23(4):4399-4405. [WU Jishan, CHENG Zunlan, GENG Xueyong. Formation of dam from debris flow in the southeast Tibet [J]. Journal of Mountain Research, 2005, 23(4): 4399-4405. (in Chinese with English abstract)]
- [3] DANG Chao, CUI Peng, CHENG Zunlan. The formation and failure of debris flow-dams, background, key factors and model tests: Case studies from China [J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(8): 1901-1910.
- [4] LIU C N, DONG J J, PENG Y F, et al. Effects of strong ground motion on the susceptibility of gully type debris flows [J]. *Engineering Geology*, 2009, 104(3/4): 241-253.
- [5] YU B, LI L, MA Y, et al. Research on topographical factors in the formation of gully type debris flows [C] //River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [6] 朱渊,余斌,亓星,等.地形条件对泥石流发育的影响:以岷江流域上游为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(1):268-277. [ZHU Yuan, YU Bin, QI Xing, et al. Topographical factors in the formation of gully type debris flows in the upper reaches of Minjiang River [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 268-277. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘希林,唐川,陈明,等.泥石流危险范围的模型实验预测法[J].自然灾害学报,1993,2(3):67-73. [LIU Xilin, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. The model experiment forecast on the risk range of debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 1993, 2(3): 67-73. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 庄建琦,崔鹏,胡凯衡,等.沟道松散物质起动形成泥石流实验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):230-236. [ZHUANG Jianqi, CUI Peng, HU Kaiheng, et al. Research on debris flow initiation due to bed failure after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 230-236. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 许强.四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J].工程地质学报,2010,18(5):596-608. [XU Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 596-608. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郭晓军,苏鹏程,崔鹏,等.7月3日茂县棉簇沟特大泥石流成因和特征分析[J].水利学报,2012,43(增刊2):140-146. [GUO Xiaojun, SU Pengcheng, CUI Peng, et al. Research on the giant debris flow hazards in miancu gully, Mao County on July 3, 2011 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(Sup 2): 140-146. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 谢洪,刘维明,赵晋恒,等.四川石棉2012年“7·14”唐家沟泥石流特征[J].地球科学与环境学报,2013,35(4):90-97. [XIE Hong, LIU Weiming, ZHAO Jinheng, et al. Characteristics of Tangjiagou debris flow in Shimian of Sichuan in July 14, 2012 [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013, 35(4): 90-97. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 胡桂胜,陈宁生,游勇,等.“7·10”连山大桥泥石流运动特征与沟道堵溃分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2015,42(6):641-648. [HU Guisheng, CHEN Ningsheng, YOU Yong, et al. Analysis of dynamic characteristic parameters and block and burst characteristics of Lianshan bridge debris flow in Wenchuan, Sichuan on July 10, 2013 [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2015, 42(6): 641-648. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 覃浩坤,张海泉,张波.汶川震区震后七盘沟多级堵溃泥石流形成条件分析[J].工程地质学报,2016,24(增刊1):100-107. [QIN Haokun, ZHANG Haiquan, ZHANG Bo. Analysis of formation conditions of multi-level debris flow in Qipangou after the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(Sup 1): 100-107. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 游勇,柳金峰,陈兴长.“5·12”汶川地震后北川苏保河流域泥石流危害及特征[J].山地学报,2010,28(3):358-366. [YOU Yong, LIU Jinfeng, CHEN Xingchang. Debris flow and its characteristics of subao river in Beichuan County after “5·12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(3): 358-366. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等.汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):10-19. [CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHEN Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 10-19. (in Chinese with English abstract)]
- [17] CUI P, ZHOU G G D, ZHU X H, et al. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures [J]. Geomorphology, 2013, 182: 173-189.
- [18] 张勇.凹槽土体失稳启动泥石流的力学机制与规模放大过程[D].北京:中国科学院大学,2020. [ZHANG Yong. Mechanical mechanism and scale-up process of debris flow initiated by groove soil instability [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李俊,陈宁生,赵苑迪.溃决型黏性泥石流冲击下大颗粒堰塞坝溃决流量计算方法研究[J].水利水电技术,2018,49(12):169-176. [LI Jun, CHEN Ningsheng, ZHAO Yuandi. Study on method for calculation of breaching discharge of large particle-sized landslide-dam under impact of breaching and viscous debris flow [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(12): 169-176. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 赵琰鑫.沟道泥石流运动—淤塞—堵溃数值模拟研究[D].武汉:武汉大学,2012. [ZHAO Yanxin. Dynamic characteristics and numerical modelling for debris flows in natural channels [D]. Wuhan: Wuhan University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 朱兴华.泥石流沟道的沿程侵蚀特征及演进过程研究[D].北京:中国科学院大学,2013. [ZHU Xinghua. Study on erosion characteristics and evolution process of debris flow along the gully [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 游勇,陈兴长,柳金峰.汶川地震后四川安县甘沟堵溃泥石流及其对策[J].山地学报,2011,29(3):320-327. [YOU Yong, CHEN Xingzhang, LIU Jinfeng. Dam-breaking debris flows and its countermeasures of Gangou gully following the Wenchuan earthquake in Anxian County, Sichuan [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(3): 320-327. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李睿祺,胡桂胜,杨志全,等.都汶高速公路银杏坪沟大规模泥石流运动特征与堵溃分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2020,47(5):625-634. [LI Ruiqi, HU Guisheng, YANG Zhiqian, et al. Analysis on the large-scale debris flow movement and its characteristics of debris block and collapse at Yinxingping ditch near the Duwen Expressway, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, 47(5): 625-634. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 胡华,吴轩,张越.基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(5):92-97. [HU Hua, WU Xuan, ZHANG Yue. Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 92-97. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 陈林万,张晓超,裴向军,等.降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验[J].水文地质工程地质,2021,48(6):151-160. [CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 151-160. (in Chinese with English abstract)]