

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1011

泥石流冲击桥墩动力相互作用物理模型试验

王东坡^{1,2}, 陈 政^{2,3}, 何思明^{2,3}, 陈克坚⁴, 刘发明⁴, 李明清⁴

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 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; 4. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘 要: 在我国西部山区地震、地质活跃带, 泥石流灾害对位于泥石流沟道、沟口等位置处的桥墩构成重大威胁。如何量化描述泥石流冲击桥墩的动力过程, 是泥石流减灾领域拟要解决的一个重要科学问题。以泥石流灾害威胁成兰铁路沿线桥墩的工程背景为基础, 依托大型泥石流模拟系统, 进行多组室内大比例泥石流冲击桥墩物理模型试验。研究泥石流流速、流深以及流体特征参数与泥石流冲击压力的相关性。试验结果表明: 冲击过程主要受到弗汝德数 Fr 和雷诺数 Re 两个无量纲数控制, 稀性泥石流冲击压力主要控制参数为 Fr , 而对于黏性泥石流则同时有 Fr 和 Re 的影响; 不论是对于峰值冲击力还是冲击功率谱, 不同类型泥石流差别显著; 在相同重度等条件下, 稀性泥石流具有更大的冲击能量; 此外, 各种类型泥石流通过临界 Fr 线得到了本质上的区分。研究成果将为桥墩抗泥石流冲击结构设计提供技术支持及科学依据。

关 键 词: 泥石流; 桥墩; 冲击; 物理模型试验

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 09-3363-10

Physical model experiments of dynamic interaction between debris flow and bridge pier model

WANG Dong-po^{1,2}, CHEN Zheng^{2,3}, HE Si-ming^{2,3}, CHEN Ke-jian⁴, LIU Fa-ming⁴, LI Ming-qing⁴

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The debris flows are recognised as a major threat to bridge piers located in mountainous gullies, especially in the areas of the active seismological and hydrologic region in Southwest China. It is important to build the dynamic evolution model and quantitatively describe the dynamic process of debris flow impacting bridge pier. In this study, all of the large-scale laboratory tests are conducted by using large multi-functional debris-flow simulation system. The main objectives of our experiments are to find the correlation between impacting pressures and variable factors including velocity, flow depth, and dimensionless characteristic parameters of fluid mechanics and to obtain the dynamic behaviour of bridge pier under the impact of debris flow. The experimental results and dimensionless analysis show that the dynamic process is mainly controlled by two dimensionless numbers of Froude number (Fr) and Reynolds number (Re). Generally, the dimensionless impact pressure is the function of Fr for the low-viscosity debris flows, while for the high-viscosity debris flows, it is the function of both Re and Fr . Different types of debris flows present significant differences in both the peak impacting pressure and impacting power spectrum. Under the same bulk density, the low-viscosity debris flow has greater impact energy than that of the high-viscosity debris flow. In addition, various types of debris flows are essentially distinguished by the critical Fr line. To provide technical support and scientific basis, we analysed the impact signals of different types of debris flows and discussed the mechanism of impact model.

Keywords: debris flows; bridge pier; impact; physical model experiment

1 引 言

桥梁是交通工程的重要组成部分及薄弱环节,

也是交通工程运营期间需要重点保护的对象。桥墩是桥梁的关键部位, 决定着桥梁结构的整体稳定。然而, 由于我国山区泥石流分布范围广、规模巨大,

收稿日期: 2018-06-11

基金项目: 国家重点研发计划(No.2017YFC1501003); 国家自然科学基金(No.41790433, No.41877266); 四川省教育厅科技项目(No.18ZA0043)。This work was supported by National Key R&D Program of China (2017YFC1501003), the National Natural Science Foundation of China (41790433, 41877266) and the Science and Technology Project of Sichuan Education Department (18ZA0043).

第一作者简介: 王东坡, 男, 1984 年生, 博士, 博士后, 副教授, 主要从事山地灾害冲击动力学方面的研究。E-mail: wangdongpo2014@cdut.edu.cn

众多桥梁难以一一跨越泥石流沟,大量桥墩不得不直接座落在泥石流沟内。近年来,伴随泥石流频发,尤其在我国西部山区的地震地质活跃带,泥石流灾害对位于泥石流沟道、沟口等位置处的桥墩构成重大威胁:高能量反复冲击作用,使得桥墩保护层破坏,甚至将桥墩的箍筋和主筋砸断,导致桥梁整体垮塌。这样的案例在国内外山区桥梁工程时有发生。例如:1981年7月9日凌晨1时30分,四川大渡河南岸利子依达沟暴发特大泥石流,泥石流冲毁成昆铁路尼日车站北侧,跨越利子依达沟口的利子依达大桥,导致422次直快列车跌入大渡河,造成240余人遇难、146人受伤,成昆铁路瘫痪372h,直接经济损失数以亿计,是世界铁路史上迄今为止由泥石流灾害引发的最严重的列车事故。更为普遍的案例,又如映(秀)—卧(龙)公路青岗坪鱼子溪大桥,在2013年“7·10”特大泥石流作用下,刚建好的桥墩受到严重冲击,外层包裹的钢板发生重度塑性变形,内层混凝土被击碎。未实施钢板包裹的桥墩,保护层已完全破坏,甚至箍筋已被砸断(图1),如不及时对受损桥墩进行修复,桥墩极有可能在下一季洪水期间发生整体冲击破坏,导致桥梁垮塌。



图1 映卧公路青岗坪鱼子溪大桥桥墩遭受泥石流冲击破坏
Fig.1 Damage of bridge pier by the impact of debris flow at Yuzixi, Qingpinggang, Yingwo highway

现场调查表明^[1-5]:泥石流对桥墩造成的危害主要表现为淤埋和冲击破坏,尤其以冲击破坏最为显著。因此,在实施泥石流桥墩防治工程时,最关键的问题是量化泥石流冲击力,它直接关系到防治结构的选用、防治结构尺寸拟定和结构设计等。国内外学者对泥石流冲击力做了大量的研究,在试验方面,基于室内小比例模型试验、现场原型试验提出泥石流冲击力静力和动力模型^[6-11]; Savage^[12]、

Atkin^[13]、Iverson^[14]、Denlinger^[15]等从连续介质力学的理论框架出发,通过深度积分得出了适用于颗粒流、泥石流的运动演化方程,从而使得建立基于动力过程的冲击力评价方法成为可能。国内学者在泥石流冲击动力特性方面也做了大量的研究^[16-17]。不少学者基于野外泥石流观测进行了统计回归分析、频谱特征分析、因子分析,获得了泥石流的冲击特征^[18-22];陈洪凯^[23-24]通过泥石流在结构表面产生的冲击压痕,导出泥石流冲击力的大小;魏鸿^[25]、王秀丽等^[26]研究了泥石流冲击坝体的压力特征和坝体的动力响应;何思明等^[27]以Hertz接触力学为基础,提出了泥石流大块石对桥墩冲击力计算方法;徐林荣等^[28]通过考虑桥隧工程使用功能的影响因素,建立了泥石流危害桥隧工程易损性评价方法。

目前,针对抗泥石流冲击桥墩的设计缺少理论计算方法,一般根据合理的论证和试验验证为主要手段,而试验分为室外大型泥石流试验和室内小比例模型试验,各具有自身的缺陷和优点。大型泥石流试验能够较好地反映泥石流的真实状态,且不需要过多考虑泥石流的缩放比例问题,但其变量因素不好控制、试验周期长、试验费用高昂、不可重复性等因素成为大型泥石流试验的缺点;对比于大型泥石流试验,具有易控性、易测性、高精度等特点的室内模型试验成为泥石流研究的首要选择。为此,本文以泥石流灾害威胁成兰铁路沿线桥墩的工程背景为基础,在大量野外调查资料的基础上,依托大型泥石流模拟系统,进行多组室内泥石流冲击桥墩物理模型试验,研究泥石流重度、速度、流体高度以及黏性与泥石流冲击力的相关性,获得泥石流对桥墩冲击力以及桥墩的动力响应机制,建立泥石流冲击指标和桥墩动力响应的模型,从而为桥墩抗泥石流冲击结构设计提供技术支持及科学依据。

2 泥石流冲击桥墩物理模型试验

在物理模型试验中,通过控制颗粒级配、黏粒含量以及固相体积分数等因素来分析泥石流的流体特征,研究泥石流类型、运动速度、流体重度、流体高度等因素与泥石流冲击力相关性。通过进行相似分析、频谱分析以及相关拟合,获得泥石流的冲击力特征以及桥墩的动力响应机制,建立泥石流冲击指标和桥墩响应的模型。

2.1 试验系统

2.1.1 泥石流模拟系统

本次研究的泥石流模拟系统由成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室大型泥

泥石流模拟系统改建而成,分为:物源区、流通区及堆积区,分别由两个料斗、两个有机玻璃水槽及堆积平台组成;可模拟泥石流启动、运移、堆积的全过程,各个区域如图2所示。物源区由1号料斗及2号料斗组成,1号料斗离地面高度约12 m,2号料斗离地面约6 m,具备足够的势能高度,满足冲击要求。1号料斗由直径为2.0 m、高为1.5 m的钢筒及筒内的4个搅拌叶片构成,容积约为4.71 m³。沟槽由两段组成,分别为1号槽和2号槽。本试验中,1号水槽与2号水槽的坡度分别为13.5°、6.5°,长度分别为8、10 m,均具有0.5 m高度的有机玻璃槽壁以及0.35 m宽度的底板。

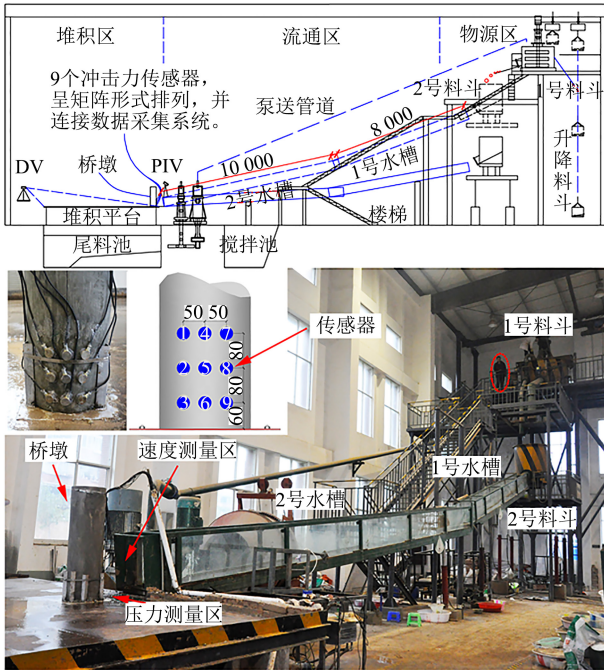


图2 室内多功能大型泥石流模拟系统(单位:mm)

Fig.2 Large multi-functional debris-flow simulation system(unit: mm)

2.1.2 测试系统

测量仪器由两部分构成,分别为力传感器和高速粒子成像仪(简称PIV)。PIV安装在2号水槽尾部,用于测量泥石流冲击桥墩的瞬时速度;力传感器为压阻式传感器,冲击量程为0~300 kPa,测量精度为0.05 kPa。采集系统采样频率为1 kHz,能够满足试验精度要求。于桥墩迎冲面安装9个压力传感器,传感器呈方阵排列,间距如图2所示。

2.2 试验模型与材料

桥墩截面为圆形,墩高为1 m,直径为30 cm。试验所用泥石流材料,取于野外泥石流沟,如图3所示。通过筛分试验获取固相颗粒级配,所有试验通过试验前重新筛分保持颗粒级配一致性。物源料中,最大粒径为60 mm,最小粒径为0.25 mm。其

中,泥石流裹挟大块石(40~60 mm)含量为1%,小于10 mm的细块石含量较大(71%)。此外,黏土颗粒粒径为0.002 mm。

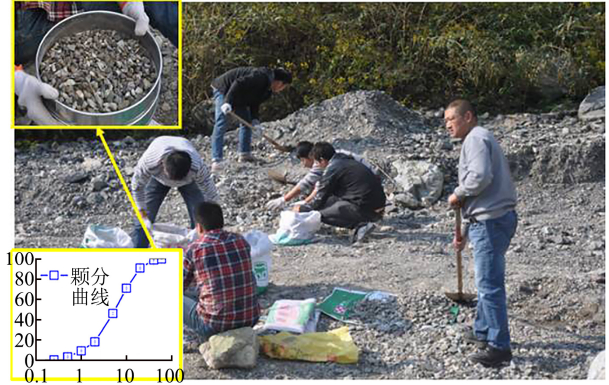


图3 泥石流物料现场取样

Fig.3 Experimental materials from a field debris-flow

2.3 相似分析

由于泥石流流动性质的复杂性,泥石流规模依赖于流体中固相和液相的相互作用,是较难突破点,常用的方法是根据流体力学、几何假设和简单的运动相似原理从模型到真实规模中进行推演。影响泥石流冲击压力的因素较多,既有泥石流自身的流体性质影响也有外部结构、边界条件的影响。总结起来有:冲击速度 v 、平均密度 ρ 、块石密度 ρ_s 、动力黏性系数 μ 、重力加速度 g 、桥墩弹性模量 E 、块石弹性模量 E_s 、桥墩泊松比 ν_p 、块石泊松比 ν_s 、沟槽坡度 α 、基底摩擦角 ϕ 、桥墩直径 l 、固相颗粒的特征直径 d 。

$$P = f(v, \rho, \rho_s, \mu, g, E, E_s, \nu_p, \nu_s, \alpha, \phi, l, d) \quad (1)$$

选取平均密度 ρ 、冲击速度 v 、桥墩直径 l 作为单位系统,冲击压力由流体动压度量,得

$$\frac{P}{\rho v^2} = f\left(\frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\rho v l}{\mu}, \frac{v^2}{g l}, \frac{\rho v^2}{E}, \frac{\rho v^2}{E_s}, \nu_p, \nu_s, \alpha, \phi, \frac{d}{l}\right) \quad (2)$$

在试验中,保持桥墩弹性模量 E 、块石弹性模量 E_s 、桥墩泊松比 ν_p 、块石泊松比 ν_s 、沟槽坡度 α 、基底摩擦角 ϕ 、桥墩直径 l 、固相颗粒的特征直径 d 等为常量参数。并定义:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}; Fr = \frac{v^2}{g l}; E^* = \frac{\rho v^2}{E}; E_s^* = \frac{\rho v^2}{E_s} \quad (3)$$

式中: Re 为雷诺数,表示流体惯性与黏性之比; Fr 为傅汝德数,表示惯性与重力之比; E^* 为桥墩破坏

数,可用于度量桥墩的破坏程度; E_s^* 为颗粒破坏数,可用于度量块石的破坏程度。

$$\frac{P}{\rho v^2} = f(\rho_s^*, Re, Fr, E^*, E_s^*) \quad (4)$$

式(4)表达了相似试验的条件,即若要在模型试验中泥石流无量纲冲击压力与原型泥石流无量纲冲击压力对应相等,则模型试验和原型需要之间满足条件: $(\rho_s)_m = (\rho_s)_p$, $(Re)_m = (Re)_p$, $(Fr)_m = (Fr)_p$, $(E^*)_m = (E^*)_p$, $(E_s^*)_m = (E_s^*)_p$ 。下标 m 表示模型,下标 p 为原型。块石和桥墩的材料参数很容易达到相似条件,但对于 Re 和 Fr 的同时满足很难达到,困难在于同时模拟黏性效应和重力效应。不难发现,要同时模拟黏性效应和重力效应,只有几何相似比达到 1,即模型放大到原型尺寸时。由于泥石流是一种由重力驱使的流体,我们认为在代表黏性效应的 Re 和代表重力效应的 Fr 之中,起决定性作用的是 Fr 。因此,在进行相似比分析时,可近似地用 Fr 作为联系模型和原型之间的桥梁。这里,原型桥墩选用成兰铁路在茂县段跨越泥石流沟所使用的桥墩,其特征直径为 3.88 m。

$$\lambda_l = \frac{l_p}{l_m} = 12.9 \quad (5)$$

$$\lambda_{Fr} = \frac{Fr_p}{Fr_m} = \frac{v_p^2 / (g_p l_p)}{v_m^2 / (g_m l_m)} = 1.0 \quad (6)$$

$$\lambda_v = \frac{v_p}{v_m} = \lambda_l^{\frac{1}{2}} = 3.6 \quad (7)$$

$$\lambda_q = \frac{v_p a_p}{v_m a_m} = \lambda_v \lambda_a = \lambda_l^{\frac{5}{2}} = 601.2 \quad (8)$$

式中: λ_l 为几何相似比; λ_{Fr} 为动力学相似比; λ_v 和 λ_q 为运动学相似比; q 为泥石流流量; a 为流体断面面积; λ_a 为面积相似比。

2.4 试验方案

不同浆体黏度的泥石流对桥墩结构的冲击力有着显著不同,故在试验中考虑 3 种泥石流类型:稀性、黏性与过渡性(中等黏性)。设计泥石流重度为 $10 \sim 19 \text{ kN/m}^3$,包括一组清水流(10 kN/m^3)、一组泥浆流(16 kN/m^3)用于试验对比。试验过程中,采用冲击力传感器及数据采集系统测量泥石流冲击力并获取冲击压力-时间曲线,利用 PIV 速度测量系统及高清摄影仪辅助测量泥石流流速、流体高度等特征。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

本次试验任务之一是为了得出冲击力与泥石流变量之间的相关性,包括流体性质(雷诺数 Re 与傅汝德数 Fr)、冲击速度、流体高度等。此外,分析泥石流的冲击信号特征也是物理模型试验的另外一个目的。泥石流作为一种重力作用下的质量流,其对不同结构形式的障碍物具有不同的冲击特征,目前泥石流冲击桥墩结构的研究相对较少。事实上,桥墩仅能阻挡部分泥石流物质,大部分泥石流携带的固相物质随着桥墩两侧排走,这也是造成泥石流冲击桥墩形式结构与冲击大坝产生不同冲击特征的原因之一。各组试验的参数如表 1 所示。

3.2 冲击、堆积形态

通过高速摄影仪可以清晰地观测到泥石流冲击桥墩过程变化情况以及最后的堆积形态。不同类型泥石流的运动形态随时间的变化过程如图 4 所示。计时起点为物料从 2 号斗释放到 1 号水槽的时刻,每组包含的 3 个时间点分别为泥石流冲击桥墩后 1、2、4 s。该图展示出了这 5 种不同类型的流体在堆积形态上的差异。这种差异主要来自于流体的黏度以及颗粒大小对流体性质的影响。

3.3 冲击信号分析

泥石流是一种包含连续介质和离散介质的多相流体,其在运移的过程所携带的块石会对结构物(桥墩、大坝等)产生频率较高且巨大的冲击力^[29-32]。尽管固相颗粒会受到浆体的拖曳、浮力等作用,固相颗粒仍会表现出强烈的非连续冲击,并形成许多的峰值冲击信号,加之环境噪声的影响,使得冲击信号呈现出比较复杂的状态。因此,我们对冲击信号进行了滤波处理。图 5 中蓝色震荡信号为原始信号,红色光滑曲线为滤波后信号。尖锐信号一般为块石冲击桥墩引起,滤波后曲线可视作浆体冲击曲线。如图 5 所示,一次典型泥石流的冲击压力-时间曲线可以分为 I、II、III 3 个阶段。初始的压力上升阶段(I),该阶段压力迅速增高且泥石流块石作用较弱;泥石流浆体与浆体中块石共同作用阶段(II),该阶段伴随着强烈的震荡信号,这是大量离散块石与桥墩表面相互作用的结果,也是造成桥墩破坏的主要威胁;压力下降阶段(III),该阶段压力持续降低,块石作用急剧减小。

稀性泥石流和黏性泥石流在平均功率谱上的巨大差别,同样也显示了这两种类型泥石流的冲击

表 1 试验结果
Table 1 Summary of experimental results

序号	流体类型	$\gamma /(\text{kN}/\text{m}^3)$	p_p / kPa	h/cm	$v /(\text{m}/\text{s})$	$m_c / \%$	$m_g / \%$	$\alpha_s / \%$	Fr
1	稀性泥石流	11.0	8.2	3.6	2.4	/	/	/	1.92
2	稀性泥石流	12.1	131.3	5.7	4.1	4.0	54.2	49.2	5.60
3	稀性泥石流	12.7	41.5	7.0	2.1	10.2	58.1	49.2	1.47
4	稀性泥石流	13.0	110.6	6.8	2.5	12.3	49.2	50.0	2.08
5	稀性泥石流	13.0	221.2	12.7	5.3	7.7	30.8	20.0	9.36
6	稀性泥石流	13.1	10.4	4.6	3.0	13.3	53.3	50.0	3.00
7	稀性泥石流	13.5	242.7	12.7	4.3	9.1	51.8	49.2	6.16
8	稀性泥石流	14.0	131.5	5.6	2.1	9.6	54.2	49.2	1.47
9	稀性泥石流	14.2	200.8	12.3	4.2	13.0	51.8	50.2	5.88
10	稀性泥石流	15.0	73.2	12.6	4.1	9.9	56.2	49.2	5.60
11	稀性泥石流	16.0	271.3	7.1	3.3	10.3	55.0	50.0	3.63
12	稀性泥石流	16.0	190.8	14.2	4.0	10.2	58.1	49.2	5.33
13	稀性泥石流	17.0	72.6	8.9	3.7	10.5	59.7	49.2	4.56
14	稀性泥石流	17.0	200.7	11.3	4.0	14.1	56.5	62.5	5.33
15	稀性泥石流	17.4	146.9	6.9	2.5	13.8	59.7	50.0	2.08
16	稀性泥石流	18.0	212.2	13.0	3.2	10.8	61.1	49.2	3.41
17	稀性泥石流	18.0	29.9	9.8	2.9	9.1	61.1	49.2	2.80
18	过渡性泥石流	15.0	214.2	14.6	2.8	13.3	53.3	50.0	2.61
19	过渡性泥石流	19.0	259.0	15.3	4.1	11.0	62.3	49.2	5.60
20	黏性泥石流	16.0	33.4	15.7	1.3	13.8	55.0	50.0	0.56
21	黏性泥石流	16.0	9.0	14.7	2.5	12.9	51.4	50.0	2.08
22	黏性泥石流	17.0	25.2	21.5	1.6	10.5	59.6	49.2	0.85
23	黏性泥石流	18.0	8.5	12.8	1.8	14.4	57.8	50.0	1.08
24	黏性泥石流	18.0	61.4	23.9	1.4	14.4	57.8	50.0	0.65
25	黏性泥石流	18.6	12.5	20.6	1.8	12.1	55.0	50.0	1.08
26	清水流	10.0	12.7	6.6	8.0	0.0	0.0	0.0	21.33
27	泥浆流	16.0	81.3	7.9	7.5	13.8	53.1	50.0	18.75

注：共计 27 组有效完成的试验。 γ 为泥石流重度， p_p 为峰值冲击力， α_s 为固相质量分数， h 为流体厚度， m_c 为黏土质量分数， m_g 为固体颗粒质量分数。值得说明的是，在相关流体特征参数相差不太的情况下，两组试验结果的冲击力相差却很大。该现象正是反映了泥石流流体的复杂性和随机性，加之桥墩迎冲面布置的传感器并未全覆盖桥墩表面，由块石造成的最大冲击信号可能并没能完全有压力传感器测到。

能量的巨大差别。在相同重度的条件下，稀性泥石流的冲击能量是黏性泥石流的近千倍（图 6）。图 6 中冲击力信号由 7 号传感器测量。重度和冲击速度分别为 $1\,900\text{ kN}/\text{m}^3$ 和 $4.14\text{ m}/\text{s}$ 。冲击压力-时间曲线上主要差异体现在冲击力峰值与块石作用频率。试验结果表明，在重度相同的条件下，流体速度、流体厚度、冲击力大小以及块石冲击频率均受泥石流黏度较大的影响。相比于黏性泥石流，稀性泥石流对桥墩的冲击力更大，产生更高的冲击频率并对桥墩结构造成更大的破坏作用。此外，从冲击力曲线可以看出，不论是稀性泥石流还是黏性泥石流，块石冲击力远大于浆体冲击力，对于稀性泥石流这种差距甚至可以达到 20 倍。因此，在泥石流冲击力研究中块石冲击作用不可忽视，可推测结构的破坏往往是由块石引起。

3.4 冲击分层特性

试验桥墩模型上安装有 9 个成矩阵排布的传感器，传感器分布高度、流体冲击高度大体相同，故一次试验的冲击力分布可以由不同高度的传感器进行测量。试验结果显示，对于黏性泥石流，其深度方向上具有不同的冲击特征，如图 7 所示。表层流体为水和细微颗粒组成的准浆体，该层冲击力-时间曲线由上排传感器获得，主要具有流体动力学特征；中间层的冲击力主要由固相颗粒与浆体组成，冲击力较表层大，块石作用较为强烈；底层相对表层和中间层则具有最大的冲击动量，且块石作用域更加宽广。

3.5 相关性分析

图 8 为泥石流流体速度和流体厚度的相关性曲线。图中红色的曲线表示临界弗汝德数线（ $Fr=1$ ），

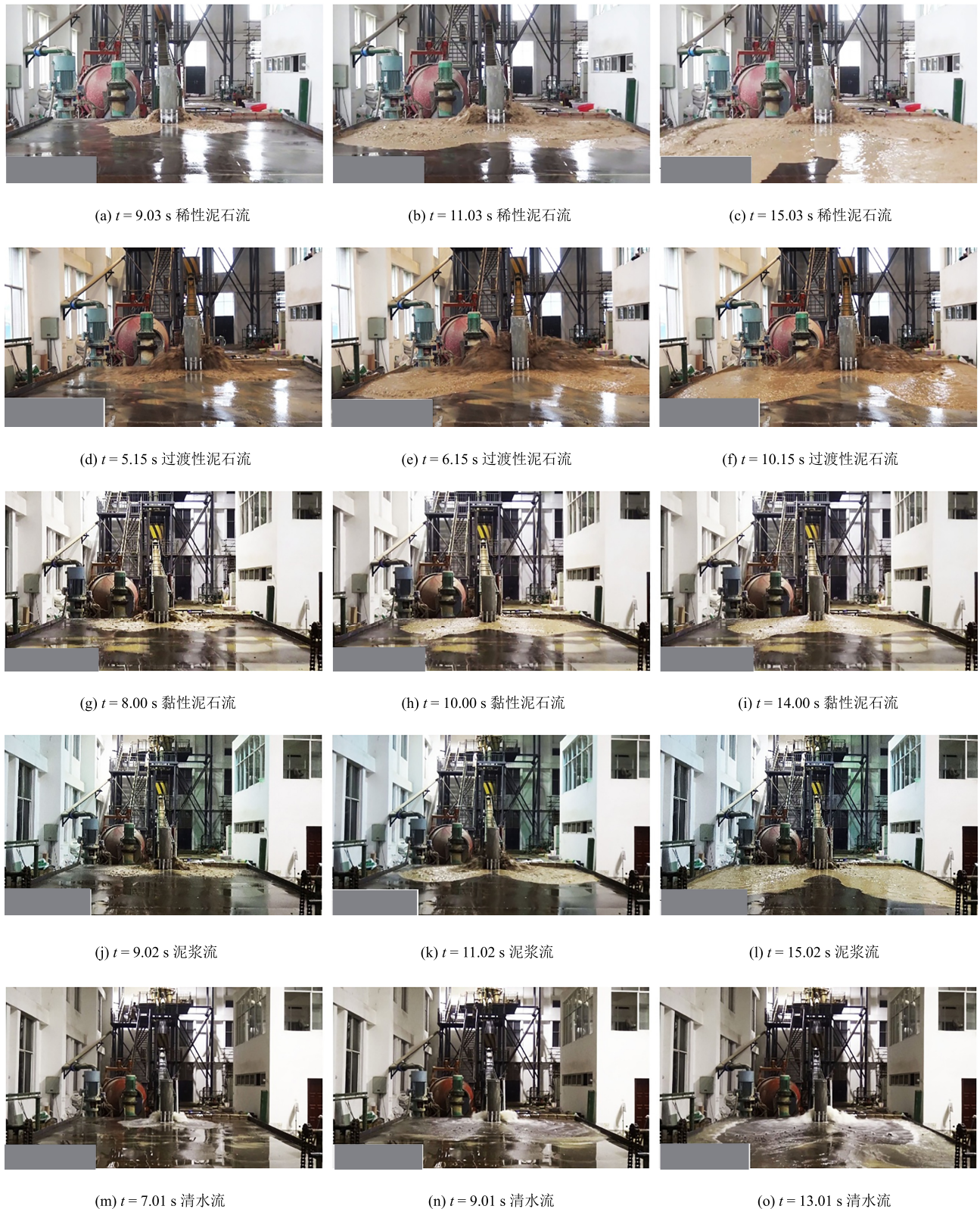


图4 泥石流冲击形态随时间的变化过程

Fig.4 Experimental processes of different types of debris flows

在该曲线之上可定义急流, 在该曲线之下则表示缓流。对于稀性泥石流来说, 其性质多为急流, 并且流体厚度和流体速度呈正相关; 对于黏性泥石流, 其性质趋近为缓流, 流体厚度与流体速度呈负相关。

此特征也可为从流体本质上区分稀性、黏性泥石流提供理论基础。

由于试验水槽最高点保持一定, 尽管每次试验所用料的总量不同, 但具有相同的势能高度。密度

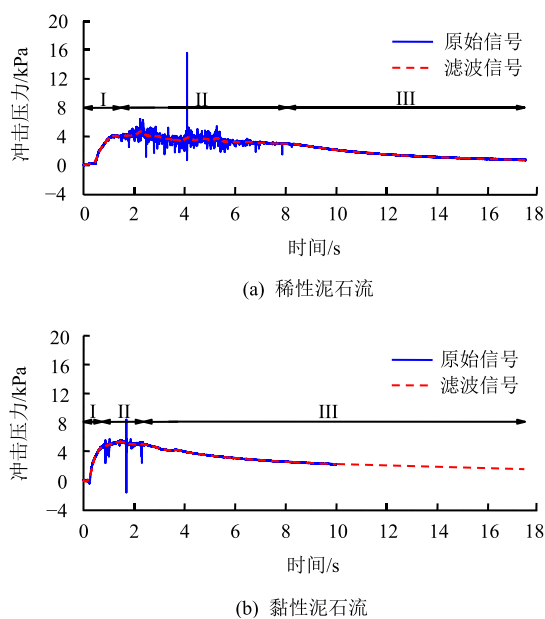


图5 稀性、黏性泥石流冲击压力-时间曲线

Fig.5 Impact pressure-time curves of low-viscosity and high-viscosity debris flows

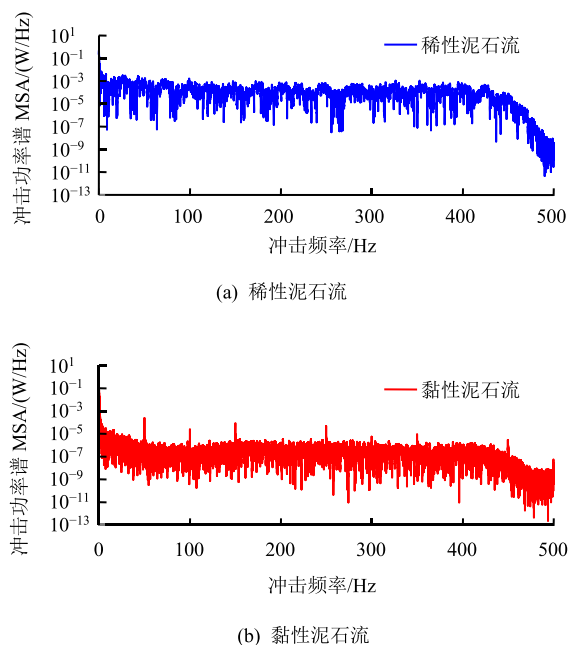


图6 稀性泥石流和黏性泥石流的功率谱密度

Fig.6 Power spectral densities of low-viscosity and high-viscosity debris flows

和速度会有一定的相互制约。因此, 仅仅用速度项来考察泥石流的冲击力显得不妥。此外, 从量纲分析角度, 定义流体动压为特征压力 ρv^2 较为合理, 并由此得到无量纲压力。Zanuttigh^[7]、Hübl^[33]、Cui^[34]等对泥石流冲击力进行了试验研究和理论分析, 并在公式形式上加入了流体力学特征参数弗汝德数 Fr 。本文通过相似理论, 得到泥石流冲击力与无量纲参数的函数形式。对于稀性泥石流考虑弗汝德数

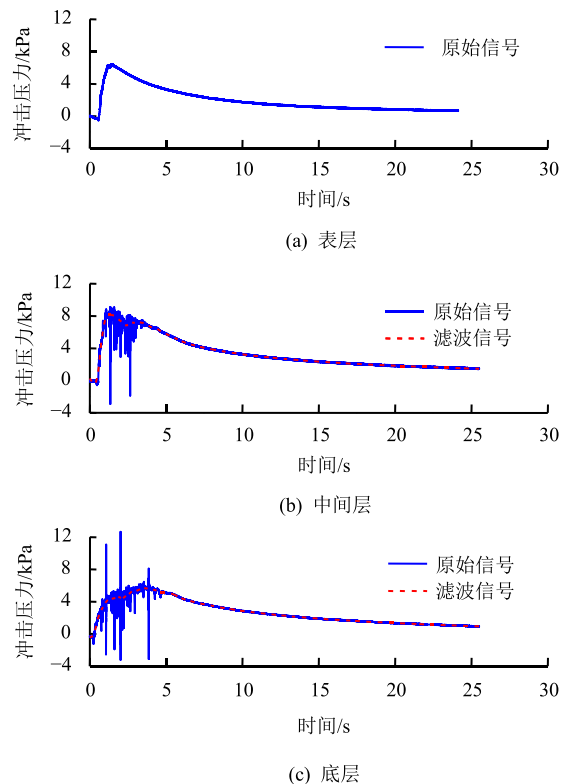


图7 泥石流分层特性

Fig.7 Properties of layers of debris flow

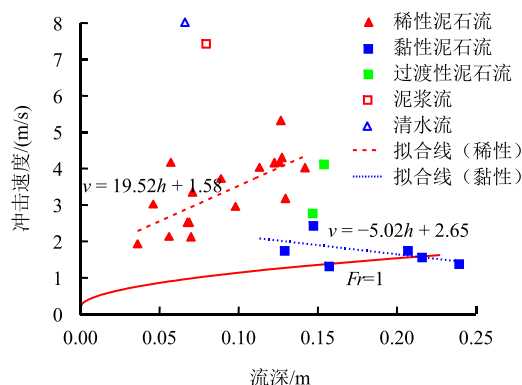


图8 泥石流流体厚度与流体速度的相关性

Fig.8 Correlation between flow height and velocity

Fr , 对于黏性泥石流同时考虑弗汝德数 Fr 与雷诺数 Re , 其中雷诺数 Re 采用似雷诺数 Re_c 代替, 似雷诺数为一个与黏土含量直接相关的参数。无量纲压力与无量纲数的相关性如图9~11所示。Hübl模型是基于不同学者的大量统计数据拟合而成的经验关系, 该模型具有普适性, 但由于数据来源不同, 所以对于不同类型泥石流无法辨识。本文的模型数据来源于相同的试验条件(相同的势能高度、相同的边界条件)下, 并对稀性和黏性泥石流的试验结果分别拟合, 得出了适用于不同类型泥石流的无量纲模型。

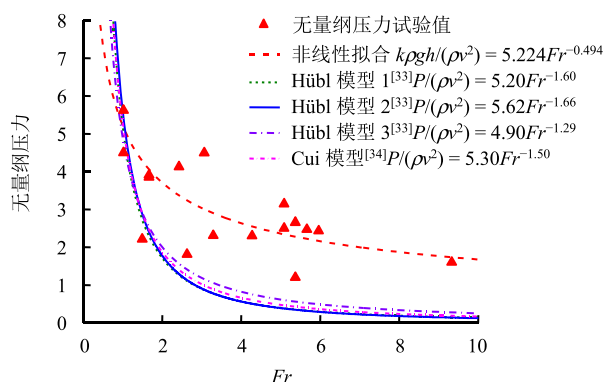


图9 稀性泥石流 $k\rho gh/(\rho v^2)$ 与 Fr 相关性曲线
Fig.9 Relationships between $k\rho gh/(\rho v^2)$ and Fr of low-viscosity debris flow

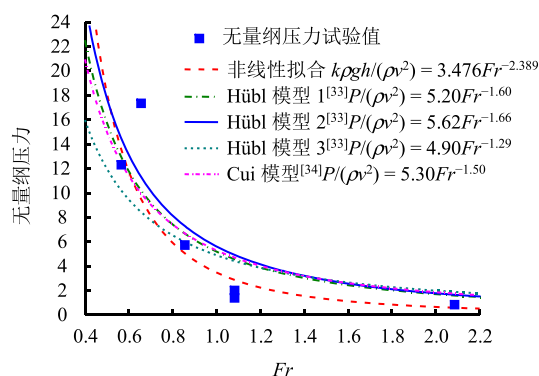


图10 黏性泥石流无量纲冲击压力与 Fr 的相关性曲线
Fig.10 Relationships between dimensionless pressure and Fr of high-viscosity debris flow

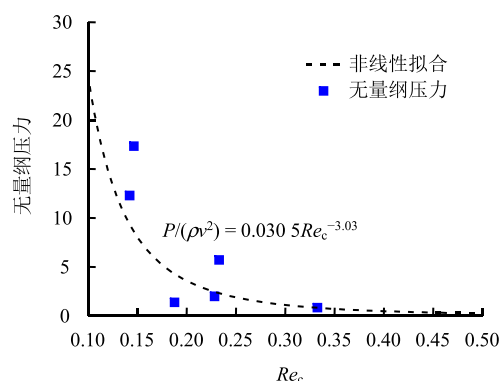


图11 黏性泥石流无量纲冲击压力与 Re_c 的相关性曲线
Fig.11 Relationship between dimensionless pressure and Re_c of high-viscosity debris flow

4 结 论

通过泥石流冲击桥墩物理模型试验,研究了不同类型泥石流的冲击、堆积特征,测量了冲击过程中泥石流流体速度、流深、冲击压力等参数。试验结果显示:不同类型泥石流其冲击压力-时间过程差别显著,主要受到 Fr 和 Re 两个无量纲数控制;冲击信号峰值常常由泥石流所携带的大块石所造

成。结论如下:

(1) 稀性泥石流与黏性泥石流其冲击桥墩过程,在峰值冲击压力、块石作用域宽、块石作用频率都呈现巨大差异;在相同的重度条件下,稀性泥石流与黏性泥石流的冲击能量具有巨大差异,稀性泥石流冲击能量远远大于黏性泥石流的冲击能量。

(2) 在流速-流深平面上,稀性泥石流与黏性泥石流呈现相反趋势,稀性泥石流随着流深的增大逐渐远离临界曲线,而黏性泥石流则相反,过渡性泥石流则居于这两者之间。

(3) 黏性泥石流在深度上,其冲击压力呈现分层特性,而稀性泥石流则无此特征,原因在于黏性泥石流的运动还受到雷诺数的控制。

(4) 对于无量纲压力与无量纲常数,两种泥石流均呈现负幂指数函数关系。

参 考 文 献

- [1] 侯秀丽. 桥梁工程重大坍塌事故调查与分析[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
HOU Xiu-li. Investigation and analysis of major collapse accidents of bridge engineering[D]. Changsha: Central South University, 2016.
- [2] 王林峰, 唐红梅, 陈洪凯. 泥石流区桥墩损毁机制与控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(3): 353—357.
WANG Lin-feng, TANG Hong-mei, CHEN Hong-kai. Study on damage mechanism and control of piers in debris flow area[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering*, 2012, 32(3): 353—357.
- [3] 周小彬. 泥石流对桥梁工程的危害及其防治[D]. 上海: 同济大学, 2006.
ZHOU Xiao-bin. Debris flow's harm to bridge engineering and its prevention[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [4] 谭沸良. 泥石流区桥梁的防灾减灾设计原则初步研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
TAN Fei-liang. Preliminary study on design principles of disaster prevention and mitigation of bridges in debris flow district[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [5] 崔鹏, 杨坤, 朱颖彦, 等. 西部山区交通线路的泥石流灾害及减灾对策[J]. 山地学报, 2004, 22(3): 326—331.
CUI Peng, YANG Kun, ZHU Ying-yan, et al. Debris flow disasters and countermeasures of disaster reduction for traffic lines in western mountain area[J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(3): 326—331.

- [6] SCOTTON P, DEGANUTTI A. Phreatic line and dynamic impact in laboratory debris flow experiments[J]. **American Society of Civil Engineers**, 1997, 10: 777—786.
- [7] ZANUTTIGH B, LAMBERTI A. Experimental analysis of the impact of dry avalanches on structures and implication for debris flows[J]. **Journal of Hydraulic Research**, 2006, 44(4): 522—534.
- [8] TIBERGHIE D, LAIGLE D, NAAIM M, et al. Experimental investigation of inter-action between mudflow and Obstacle[M]//Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Rotterdam: Mill Press, 2007.
- [9] WENDELER C. Murgangsrukhalt in wildbabarrieren grundlage zur planung und berechnung von flexible barrieren[D]. Federal: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2008.
- WENDELER C. Debris retention in torrents: basics for planning and calculating flexible barriers[D]. Federal: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2008.
- [10] MORIGUCHI S, RONALDO I B, ATSUSHI Y, et al. Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction[J]. **Acta Geotechnica**, 2009, 4(1): 57—71.
- [11] BUGNION L, W MCARDELL B, BARTELT P, et al. Measurements of hill slope debris flow impact pressure on obstacles[J]. **Landslides**, 2012(2): 179—187.
- [12] SAVAGE S B, HUTTER K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2006, 199(1): 177—215.
- [13] ATKIN R J, CRAINE R E. Continuum theories of mixtures: basic theory and historical development[J]. **The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics**, 1976, 29(2): 209—244.
- [14] IVERSON R M. The physics of debris flows[J]. **Reviews of Geophysics**, 1997, 35(3): 245—296.
- [15] DENLINGER R P, IVERSON R M. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1 theory and computation[J]. **Journal of Geophysical Research Earth Surface**, 2004, 109(F1): 1—14.
- [16] 王友彪, 姚昌荣, 刘赛智, 等. 泥石流对桥墩冲击力的试验研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(2): 616—623.
- WANG You-biao, YAO Chang-rong, LIU Sai-zhi, et al. Experimental study of debris flow impact forces on bridge piers[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 616—623.
- [17] 曾超, 苏志满, 雷雨, 等. 泥石流浆体与大颗粒冲击力特征的试验研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(7): 1923—1930.
- ZENG Chao, SU Zhi-man, LEI Yu, et al. An experimental study of the characteristics of impact forces between debris flow slurry and large-sized particles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(7): 1923—1930.
- [18] 吴积善. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- WU Ji-shan. Observation on debris flow in Jiangjia gully, Yunnan[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [19] HONG Y, WANG J P, LI D Q, et al. Statistical and probabilistic analyses of impact pressure and discharge of debris flow from 139 events during 1961 and 2000 at Jiangjia ravine, China[J]. **Engineering Geology**, 2015, 187: 122—134.
- [20] 刘雷激, 魏华. 泥石流冲击力研究[J]. **四川联合大学学报**, 1997, 1(2): 99—102.
- LIU Lei-ji, WEI Hua. Debris flow impact study[J]. **Journal of Sichuan United University**, 1997, 1(2): 99—102.
- [21] 胡凯衡, 韦方强, 洪勇. 泥石流冲击力的野外测量[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(增刊 1): 2823—2829.
- HU Kai-heng, WEI Fang-qiang, HONG Yong. Field survey of impact of debris flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Suppl.1): 2823—2829.
- [22] 张宇, 韦方强, 崔鹏. 砖混建筑在泥石流冲击作用下的破坏形态模拟[J]. **自然灾害学报**, 2005, 14(5): 61—67.
- ZHANG Yu, WEI Fang-qiang, CUI Peng. Deformation morphology simulation of brick-concrete structure under the action of debris flow[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2005, 14(5): 61—67.
- [23] 陈洪凯. 泥石流冲击荷载的时频分析方法及应用[J]. **防灾减灾工程学报**, 2011, 31(3): 255—260.
- CHEN Hong-kai. Time-frequency analysis method of debris flow impact loading and its application[J]. **Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering**, 2011, 31(3): 255—260.
- [24] 陈洪凯. 泥石流冲击特性模型试验[J]. **重庆大学学报(自然科学版)**, 2010, 33(5): 115—119.
- CHEN Hong-kai. Debris flow impact model test[J]. **Chongqing University Journal(Natural Science Edition)**, 2010, 33(5): 115—119.
- [25] 魏鸿. 泥石流龙头对坝体冲击力的实验研究[J]. **中国铁道科学**, 1996, 17(3): 50—62.

- WEI Hong. Experimental study on impact force of debris flow faucet on dam body[J]. **China Railway Science**, 1996, 17(3): 50—62.
- [26] 王秀丽, 黄兆升. 冲击荷载下泥石流拦挡坝动力响应分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 61—65.
- WANG Xiu-li, HUANG Zhao-sheng. Analysis of dynamic response of debris flow dams under impact load[J]. **Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2013, 24(4): 61—65.
- [27] 何思明, 李新坡, 吴永. 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1664—1669.
- HE Si-ming, LI Xin-po, WU Yong. Calculation of impact force of mudstone flow considering elastoplastic deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1664—1669.
- [28] 徐林荣, 陈舒阳, 曹禄来. 泥石流危害桥隧工程易损性评价[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2642—2650.
- XU Lin-rong, CHEN Shu-yang, CAO Lu-lai. Debris flow hazards assessment of bridge and tunnel engineering vulnerability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2642—2650.
- [29] PITMAN E B, LE L. A two-fluid model for avalanche and debris flows[J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, 2005, 363(1832): 1573—1601.
- [30] 倪晋仁, 王光谦. 泥石流的结构两相流模型, I : 理论[J]. 地理学报, 1998, 53(1): 1—7.
- NI Jin-ren, WANG Guang-qian. Two-phase flow model of debris flow, I : theory[J]. **Journal of Geographical Sciences**, 1998, 53(1): 1—7.
- [31] 倪晋仁, 王光谦, 熊育武. 泥石流的结构两相流模型 II : 应用[J]. 地理学报, 1998, 53(1): 77—85.
- NI Jin-ren, WANG Guang-qian, XIONG Yu-wu. Two-phase flow model of debris flow, II : application[J]. **Journal of Geographical Sciences**, 1998, 53(1): 77—85.
- [32] 陈洪凯, 唐红梅. 泥石流两相冲击力及冲击时间计算方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 19—23.
- CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Two-phase impact force and impact time calculation method for debris flows[J]. **China Journal of Highway Engineering**, 2006, 19(3): 19—23.
- [33] HÜBL J, HOLZINGER G. Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung Kronenöffener Bauwerke für die Geschiebemanagement in Wildbachen: Kleinmassstabliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern[R]. [S. l.]: Institute of Mountain Risk Engineering, 2003.
- HÜBL J, HOLZINGER G. Development of principles for the dimensioning of crown-open structures for the management of debris in Wildbachs: small-scale model experiments on the effectiveness of mortar crushers[R]. [S. l.]: Institute of Mountain Risk Engineering, 2003.
- [34] CUI P, ZENG C, LEI Y. Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow[J]. **Earth Surface Processes and Landforms**, 2015, 40(12): 1644—1655.
- 上接第 3362 页
- [63] NG C W W, SHI C, GUNAWAN A, et al. Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay[J]. **Geotechnique Letters**, 2014, 4: 310—316.
- [64] PASTEN C, SANTAMARINA J C. Thermally induced long-term displacement of thermo-active piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2014, 140(5): 70—75.
- [65] NG C W W, GUNAWAN A, SHI C, et al. Centrifuge modelling of displacement and replacement energy piles constructed in saturated sand: a comparative study[J]. **Geotechnique Letters**, 2016, 6(1): 1—5.
- [66] KNELLWOLF C, PÉRON H, LALOUI L. Geotechnical analysis of heat exchanger piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(10): 890—902.
- [67] SURYATRIYASTUTI M E, MROUEH H, BURLON S. A load transfer approach for studying the cyclic behavior of thermo-active piles[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 55: 378—391.
- [68] 费康, 戴迪, 洪伟. 能量桩单桩工作特性简化分析方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 70—80.
- FEI Kang, DAI Di, HONG Wei. A simplified method for working performance analysis of single energy piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 70—80.
- [69] SURYATRIYASTUTI M E, BURLON S, MROUEH H. On the understanding of cyclic interaction mechanisms in an energy pile group[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2016, 40(1): 3—24.
- [70] MURPHY K D, MC CARTNEY J S, HENRY K S. Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations[J]. **Acta Geotechnica**, 2013, 10(2): 179—195.