

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2017.05.009

# 泥石流浆体冲击拦砂坝荷载计算的实验研究\*

赵海鑫<sup>1,2,3</sup>, 游 勇<sup>1,2</sup>, 柳金峰<sup>1,2</sup>, 杨东旭<sup>1,2,3</sup>

(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:** 泥石流冲击力大小是泥石流灾害防治工程设计最重要的参数之一, 但到目前为止, 泥石流对拦砂坝的冲击力计算还存在很大争议。本文通过在拦砂坝上安装冲击力传感器测量冲击力值, 详细分析不同容重泥石流, 不同沟道坡度及不同拦砂坝迎水面倾角等因素下泥石流对拦砂坝坝体的冲击作用。研究表明, 影响泥石流浆体冲击力大小的主要因素有泥石流容重、沟床坡度和泥石流流速; 在沟道坡度和泥石流总量相同时, 泥石流浆体冲击力大小随泥石流容重的增加而降低; 在泥石流容重不变时, 随沟道坡度的增加而增加; 泥石流容重和沟道坡度的影响主要反映到泥石流流速的变化中, 推导出新的泥石流浆体冲击力大小计算公式; 该公式表明, 泥石流浆体冲击力大小同泥石流表面流速呈正比例关系, 而比例系数因泥石流容重的不同而不同。分析比较了新公式同原有公式的差异, 并举例说明了新计算公式的实用价值, 为泥石流防治工程设计提供技术支撑。

**关键词:** 泥石流; 防治工程; 浆体冲击力; 水槽实验

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2017)05-0756-07

## Experimental Study on Debris Flow Slurry Impact

ZHAO Haixin<sup>1,2,3</sup>, YOU Yong<sup>1,2</sup>, LIU Jinfeng<sup>1,2</sup>, YANG Dongxu<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, CAS, Chengdu 610041, China;  
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;  
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The debris flow impact size is one of the most important parameters for designing debris flow hazards prevention project, but so far, there is a dispute of the calculation of debris flow impact. This paper analyzes the different debris impacts on the debris dam under different densities of debris flow, channel slope and the angle of debris dam to meet the water through the indoor flume experiment testing. This research shows that the main factors influencing the debris flow impact size is debris flow density, channel slope, and debris flow velocity; Other factors are equal. Debris flow impact size decreases with increasing of debris flow density, increases with the increase of channel slope; Debris flow density and the channel slope mainly reflect the influence of the change of debris flow velocity. We deduces a new formula of debris flow impact size. The formula shows that the debris impact size has a linear relation with debris flow velocity, and the linear coefficient varies because of the debris flow density. This paper compares the differences of the new formula with the original formula and illustrates the practical value and provides a technical support to new designing prevention projects of debris flow.

**Keywords:** debris flows; prevention engineering; slurry impact force; flume experiment

\* 收稿日期:2016-05-10;修回日期:2016-08-05

基金项目:国家科技支撑计划课题(2014BAL05B01)、中国科学院 STS 项目(KFJ-EW-ST5-094)资助

作者简介:赵海鑫(1991-),男,硕士研究生。主要从事山地灾害实验与防治工程研究。Email:zhaohaixin1@126.com

通讯作者:游 勇(1964-),男,研究员。主要从事山地灾害实验与防治工程研究。Email:yyong@imde.ac.cn

## 引言

泥石流冲击力由浆体冲击力和巨石冲击力两部分组成,是防治工程结构验算,包括抗滑、抗倾覆等计算的力学依据<sup>[1]</sup>。泥石流冲击拦砂坝过程中,浆体冲击力大小是拦砂坝设计最重要的参数之一。但到目前为止,泥石流运动机理还有待进一步研究,冲击力值的准确计算是当前拦砂坝等防治工程设计急需解决的技术问题。

国内外学者们在冲击力方面做了大量理论分析与模拟实验研究工作,从不同的角度出发,建立了泥石流冲击力计算模型。费祥俊等<sup>[2-4]</sup>以弹塑性理论为基础,提出了常见几类泥石流防冲结构的大石块冲击力计算方法。陈洪凯等<sup>[5]</sup>通过泥石流冲击模型实验,分析得到了不同固相比下的泥石流冲击特性,同时对实验信号采用小波去噪处理,揭示了泥石流冲击脉动荷载概率分布特性。魏鸿<sup>[6]</sup>在总结前人经验的基础上通过水槽实验研究,分析冲击荷载峰值的组成,运用压力波理论建立了龙头冲击力的计算方法,并计算了龙头在冲击坝时的作用力垂向分布。Aronne Armanini 等<sup>[7]</sup>基于动量守恒分析研究了泥石流冲击力,提出了相应的冲击力计算公式。苏联学者 С. М. фпейцман 给出设计刚性拦砂坝的不同规模的泥石流的总冲击应力,考虑了泥石流规模,最大泥深和石块最大粒径等的影响,但均有一定的局限性<sup>[8]</sup>。

在泥石流浆体冲击力计算方面,国内外学者针对不同的防治工程或是不同类型泥石流,分析得到了许多半理论半经验性或纯经验性的计算公式(表1)。表1均是基于能量法的理论公式进行修正的,修正系数(经验系数)根据考虑的因素不同而有所差异。基于的理论公式是由水力学推导而来,对于一般均匀流较适用,但对像泥石流这样的非均匀质流体,其冲击力值同的泥石流流速的平方不一定呈正相关,即不一定可以通过简单的添加修正系数即可得到冲击力准确值,还需采用其他方法进行讨论分析。

本文采用统计学单因素分析方法,通过将冲击力传感器直接布置在拦砂坝坝体上测量泥石流对拦砂坝的冲击力大小,分析不同容重泥石流,不同沟道坡度及不同拦砂坝迎水面坡比等因素下泥石流对拦砂坝坝体的冲击作用。研究表明,影响泥石流浆体冲击力大小的主要因素有泥石流容重、沟床坡度和

表1 国内外泥石流浆体冲击力公式

Table 1 Debris flow slurry impact formula at home and abroad

编号	泥石流冲击力公式	引用文献
1	$F_f = \alpha \cdot \rho_d \cdot h_d \cdot U_d^2 / g$	文献[9]
2	$F_f = \rho \cdot h_d \cdot u^2 / g$	文献[10]
3	$P = 2 \cdot b \cdot h \cdot \gamma_m \cdot u^2 / g + K_a \cdot H \cdot \gamma_0$	文献[11]
4	$P = \lambda \cdot \gamma_c \cdot V_c^2 / g \cdot \sin \beta$	文献[12]
5	$F_f = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \sin \beta$	文献[13]
6	$P = 5 \cdot \rho \cdot v^{0.8} \cdot (g \cdot h)^{0.6}$	文献[14]
7	$P = k \cdot \gamma_c \cdot V_c^2 / g$	文献[15-16]
8	$P = 5.3 \cdot F_f^{-1.45} \cdot \rho_m \cdot v^2$	文献[17]

注:  $U_d$  同  $u$ 、 $V_c$ 、 $v$  均为泥石流流速;  $P$  同  $F_f$  均为泥石流浆体冲击力;  $\alpha$  和  $k$  均为经验系数;  $\rho_d$  同  $\rho$ 、 $\rho_m$  均为泥石流密度;  $\gamma_m$  同  $\gamma_c$  均为泥石流容重;  $F_r = v / (g l)^{0.5}$  为弗洛德数;  $h_d$  同  $h$  均为泥石流泥深;  $\beta$  为泥石流冲击角度;  $g$  为重力加速度;  $\lambda$  为建筑物形状系数;  $K_a$  为主动土压力系数;  $H$  为坝后堆积高度;  $A$  为泥石流横断面积;  $b$  为泥石流宽度;  $\gamma_0$  为坝后堆积物容重

泥石流流速;在其他因素相同时,泥石流浆体冲击力大小随泥石流容重的增加而降低,随沟道坡度的增加而增加;泥石流容重和沟道坡度的影响主要反映到泥石流流速的变化中,推导出新的泥石流冲击力大小计算公式;该公式表明,泥石流浆体冲击力大小同泥石流流速呈正比例关系,其系数因泥石流容重的不同而改变。分析比较了新公式同原有公式的差异,并举例说明了新计算公式的实用价值,为泥石流防治工程设计提供技术支撑。

## 1 实验概况

### 1.1 实验模型

本实验在中国科学院成都山地所动力模拟实验室进行,实验模型包括料斗(长 50 cm,宽 40 cm,高 85 cm),可装载泥石流约 0.1 m<sup>3</sup>,与水槽固定连接,连接处通过闸门控制流量大小;流通区为长 400 cm,宽 30 cm,高 40 cm 的钢架水槽,坡度可自由调节,倾动角度 0°~20°,侧面为钢化玻璃,接尾料池以回收尾料。

在坝体位置安装传感器,坝体前缘距闸门口距离为 3.6 m,以充分保证泥石流流速稳定。本文采用传感器型号为 QSY-8213,量程为 0~100 kPa,灵敏度为 0.1%。该传感器为应力传感器,可直接测得作用于传感器表面圆心位置处泥石流冲击力值,该值用应力单位 kPa 表示。并通过数据采集仪采集传感器接收到的信号,采集频率为 2 K,采样时间为 32 s,通过计算机处理得到冲击力数据。

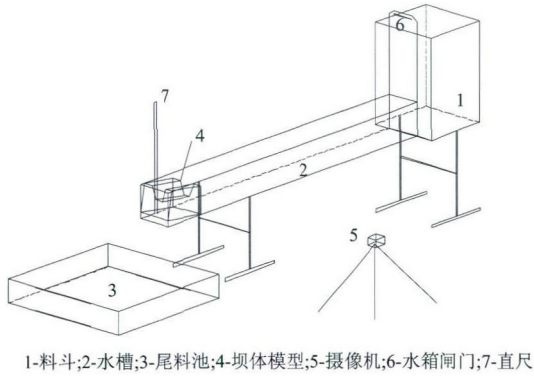


图 1 模型示意

Fig. 1 Schematic diagram of the test model

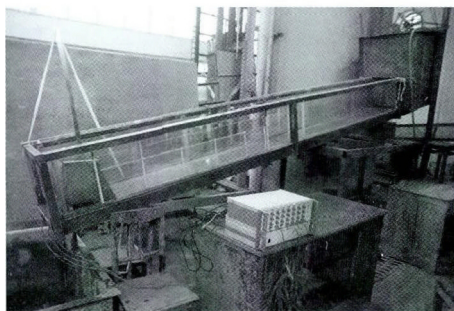


图 2 实验模型

Fig. 2 The testing model of the debris flow

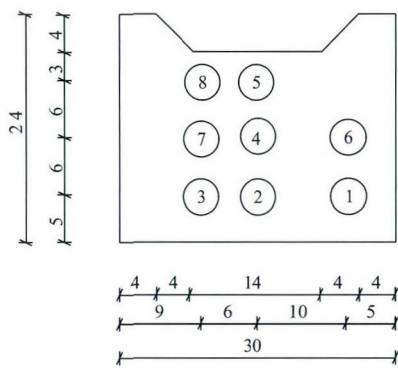


图 3 坝上传感器布置点位示意

Fig. 3 Placement of sensor on debris dam

1.2 实验物料

本次实验物料取样地点为云南省境内某泥石流沟(103°08' E, 26°14' N), 2012年8月18日夜, 该沟曾爆发大型泥石流灾害, 本实验物料即为该次泥石流堆积区未经扰动的原样筛除大颗粒而得到的。取样具体位置处于泥石流沟道出口堆积扇右侧, 取样时首先用铁铲铲除表面堆积体, 取下部未经扰动的土体并使用 20 mm×20 mm 的钢筛剔除大颗粒砾石, 取 20 mm 以下作为泥石流原样, 实验前

抽取五组样品进行颗粒级配分析, 得到级配曲线如图 4 所示。

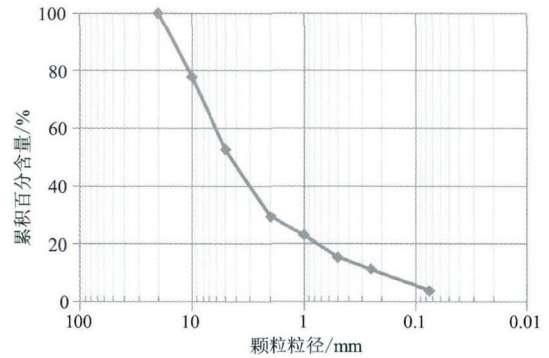


图 4 某泥石流沟原样级配曲线

Fig. 4 Particle gradation for the material used in the experiment

1.3 实验方案

按如下表 2 中的参数变化范围考虑正交分配法进行实验。

表 2 实验方案

Table 2 The experimental scheme

泥石流容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	总量/L	水槽坡度/(°)	迎水面 坡比
13, 15, 17, 19, 21	60	7, 10, 11, 13, 15	2/1
13, 17	60	9	2/1, 4/1, 1/0
17, 19	60, 90, 120	13	2/1

2 实验分析

2.1 与原有公式的对比分析

通过理论分析可知, 泥深范围内泥石流流速越大, 冲击力值越大, 故泥深范围内表面冲击力值为最大; 而泥深范围以上的坝体受冲击力为雍起泥石流冲击力, 其值小于表面位置处的冲击力值。本试验中泥深在 6 cm 左右, 1# 2# 3# 传感器在泥深范围内且接近泥石流表面, 同时中间位置处泥石流流速比两边流速快, 故选取 2# 传感器所测得的冲击力值进行比较分析。试验中通过高分辨率摄像机拍摄泥石流冲击拦砂坝的试验影像, 解析泥石流平均流速值, 代入陈光曦公式 [12], 周必凡等 [15-16], 曾超 [17] 计算公式与试验实测冲击力数据进行对比, 如下图 5 所示。

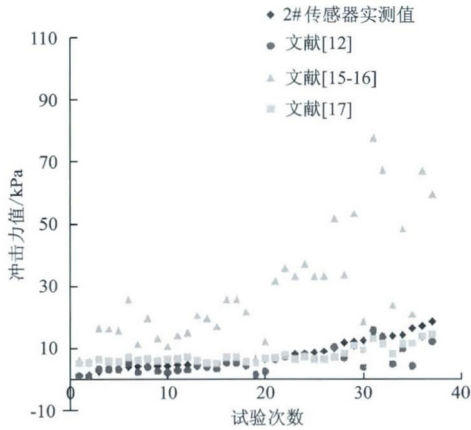


图 5 冲击力比较值

Fig. 5 The contrast of impact

由上图 5 可以发现, 试验实测冲击力结果与周必凡等<sup>[15-16]</sup>公式计算值偏差较大, 与陈光曦公式<sup>[12]</sup>, 曾超<sup>[17]</sup>公式计算值相关性较好, 主要原因在于周必凡等<sup>[15-16]</sup>公式是根据蒋家沟 1974-1975 年冲击力实测资料修正的结果, 该资料没有去除大块石的影响, 修正结果应用于泥石流浆体冲击力明显偏高。进一步分析发现, 冲击力实测值在一定界限值以下同陈光曦公式<sup>[12]</sup>相关性较好, 而在一定界限值以上比陈光曦公式<sup>[12]</sup>计算值大, 且存在明显的离散趋势。因而通过试验结果比较, 采用乘以修正系数的方法计算冲击力仍存在一定局限性。

### 2.2 泥石流容重对冲击力大小的影响分析

控制拦砂坝迎水面坡比不变, 在此情况下, 分析相同规模的泥石流(总量相同), 沟道特性相同(水槽坡度相同)在不同性质( $\gamma_c$  不同)情况下泥石流冲击力值的变化情况。由 2# 传感器试验结果可知, 在不考虑流速的前提下, 控制沟道特性( $J$  相同), 受力结构特性(拦砂坝迎水面坡比相同), 泥石流容重越大, 对坝体的冲击力值不一定越大。如图 6 所示, 水槽坡度为  $15^\circ$  时, 泥石流容重从  $13-17 \text{ kN/m}^3$  变化过程中, 冲击力值逐渐降低; 从  $17-21 \text{ kN/m}^3$  变化过程中, 冲击力逐渐变大。主要是因为泥石流容重从  $13-17 \text{ kN/m}^3$  变化过程中随着泥石流容重的增加, 泥石流运动速度明显降低。从  $17-21 \text{ kN/m}^3$  变化过程中, 随着泥石流容重的增加, 泥石流对坝体的冲击力又逐渐增大, 呈勾形。且水槽坡度较大时勾形较明显。水槽坡度为  $15^\circ$  时冲击力随容重变化曲线的勾型明显大于  $13^\circ$  和  $11^\circ$  时的冲击力值随容重变化曲线。

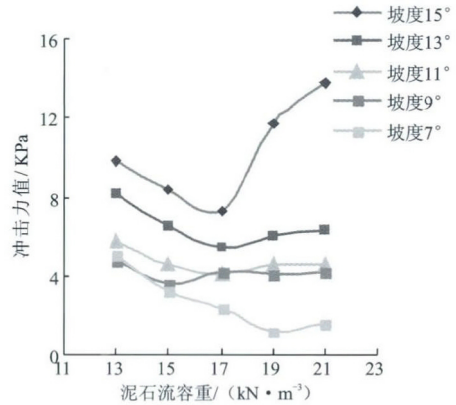


图 6 泥石流冲击力同泥石流容重的关系

Fig. 6 Relationship between debris flow impact and debris flow density

### 2.3 泥石流沟道坡度对冲击力大小的影响分析

同上相同办法, 控制拦砂坝迎水面坡比不变, 在此情况下, 分析相同规模的泥石流(总量相同), 性质相同( $\gamma_c$  相同), 沟道特性不同(水槽坡度不同)情况下泥石流冲击力值的变化情况。由试验结果可知, 在不考虑流速的前提下, 控制泥石流性质(主要通过控制泥石流重度  $\gamma_c$ ), 受力结构特性(拦砂坝迎水面坡比相同), 泥石流沟道坡度越大, 对坝体的冲击力值越大。这主要是因为随着泥石流沟道坡度的增加, 泥石流运动速度明显增加。随着泥石流沟道坡度的增加, 泥石流冲击力先增加, 再放缓, 再继续增加, 呈有阶梯增加的趋势。且这一趋势随泥石流容重的增加而越明显。将水槽坡度同泥石流冲击力值的变化绘制于图 7。如图 7 容重  $21 \text{ kN/m}^3$  所示, 泥石流沟道坡度从  $7^\circ$  上升到  $9^\circ$  过程呈明显增大趋势, 而  $9^\circ, 11^\circ, 13^\circ$ , 冲击力呈缓慢增大趋势, 从  $13^\circ$  到  $15^\circ$  呈迅速增大趋势。

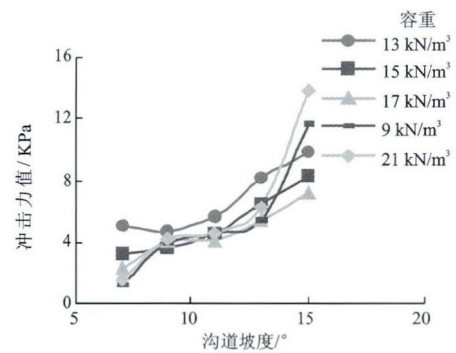


图 7 泥石流冲击力同沟道坡度之间的关系

Fig. 7 Relationship between debris flow impact and longitudinal slope of gully

### 2.4 泥石流流表面流速对冲击力大小的影响分析

比较图 6 和图 7 可以发现,无论是泥石流容重,还是沟道坡度,都不能单独反映泥石流冲击力的变化特点,而这两个主要性质主要对泥石流流速产生重要的影响。因而控制拦砂坝迎水面坡比不变,在此情况下,分析相同规模的泥石流(总量相同),性质相同( $\gamma_c$  不同),表面流速不同情况下泥石流冲击力值的变化情况,如图 8 所示。由试验结果可知,比较发现,在相同容重条件下,泥石流冲击力同流速呈线性相关,可采用线性模型:

$$P = a \cdot v \tag{1}$$

将同一容重的泥石流冲击力值按流速从小到大拟合得到下图 8:

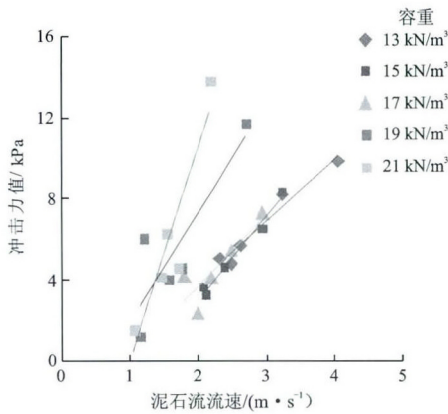


图 8 泥石流冲击力同泥石流流速的关系

Fig. 8 Relationship between debris flow impact and debris flow velocity

将不同容重下的系数  $a$  同容重  $\gamma_c$  拟合得到:

$$a = 0.44e^{0.14\gamma_c} \tag{2}$$

将系数  $a$  值带入公式(1)可以得到冲击力同表面流速  $v$  的拟合公式:

$$P = 0.44e^{0.14\gamma_c} \cdot v \tag{3}$$

式中,  $P$  为泥石流浆体冲击力,单位为 kPa;  $\gamma_c$  为泥石流容重,单位为  $\text{kN/m}^3$ ;  $v$  为泥石流表面流速,单位为  $\text{m/s}$ 。

与其他浆体冲击力计算公式不同之处在于,该公式较好的反映了同一容重下泥石流冲击力值同泥石流表面流速呈正比的试验规律;同时又对泥石流容重变化对冲击力值影响有较好的刻画;采用泥石流原样进行试验得到的试验结果同野外真实值有一定相似性。

### 2.5 迎水面倾角对冲击力大小的影响分析

同上相同方法,在泥石流总量不变,泥石流容重  $\gamma_c$  选取  $13 \text{ kN/m}^3$  和  $17 \text{ kN/m}^3$ ,水槽坡度固定为  $13^\circ$ ,只改变拦砂坝迎水面坡比的条件下(分别取  $2/1, 4/1, 1/0$ ),分析试验结果,如下图 9 所示。试验数据表明拦砂坝坡度变化对泥石流冲击力大小影响不明显。对于容重为  $13 \text{ kN/m}^3$  的泥石流冲击力,在拦砂坝迎水面坡比为  $2/1$  时为  $8.2 \text{ kPa}$ ;迎水面坡比变为  $4/1$  时,冲击力增加了  $0.8 \text{ kPa}$ ;而当迎水面坡比变为  $1/0$ ,即拦砂坝迎水面垂直于泥石流运动方向时,泥石流冲击力比拦砂坝迎水面坡比为  $4/1$  时的冲击力值下降了  $0.3 \text{ kPa}$ ;对于容重  $17 \text{ kN/m}^3$  的泥石流却表现为随着拦砂坝迎水面坡比增加,冲击力值先下降  $0.1 \text{ kPa}$ ,再增加  $0.2 \text{ kPa}$  的变化;变化值的范围在泥石流冲击力值的  $10\%$  以内。产生这一现象主要同泥石流物质组成的不均匀性有关,泥石流内固体颗粒分散的不均匀性导致泥石流与拦砂坝作用时各微粒对坝面的撞击方向并不相同,是随机分布的,故产生的作用力同拦砂坝迎水面坡比坡度无必然相关,因而在拦砂坝迎水面坡比不是泥石流冲击力主要考虑因素。

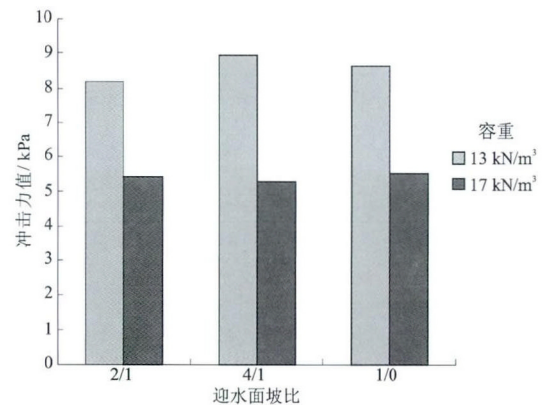


图 9 泥石流冲击力同拦砂坝迎水面倾角的关系

Fig. 9 Relationship between debris flow impact and angle of debris dam

### 2.6 不同总量对冲击力大小的影响分析

同上相同方法,在拦砂坝迎水面坡角不变( $2/1$ ),泥石流容重  $\gamma_c$  选取  $17 \text{ kN/m}^3, 19 \text{ kN/m}^3$ ,水槽坡度固定为  $15^\circ$ ,只改变泥石流总量的条件下(分别取  $60 \text{ L}, 90 \text{ L}, 120 \text{ L}$ ),分析试验结果,如下图 10 所示。试验数据表明泥石流冲击力大小随总量变化总体上呈线性正相关,即总量越大,泥石流冲击

力越大。如图 10 中泥石流容重为  $17 \text{ kN/m}^3$  的冲击力值随泥石流总量由 60 L 到 90 L 再到 120 L 变化过程中分别增大了 5 kPa、5.5 kPa; 而对泥石流容重为  $19 \text{ kN/m}^3$  的泥石流冲击力值随泥石流总量由 60 L 到 90 L 再到 120 L 变化过程中分别增大了 2 kPa、4 kPa。造成这一现象的主要原因是总量不同的条件下会改变泥石流泥深值, 不同泥深值对泥石流流速造成很大的影响, 故总量的影响也可以用泥石流流速表征。

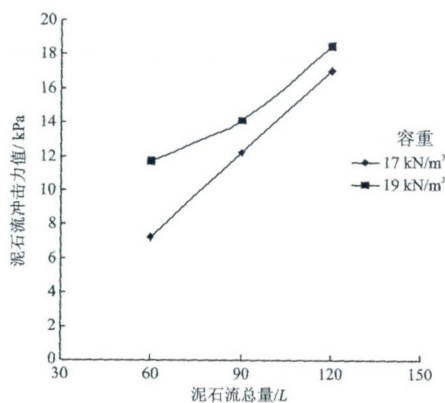


图 10 泥石流冲击力同泥石流总量的关系

Fig. 10 Relationship between debris flow impact and debris flow scale

## 4 实例应用

如公式(3)所示, 泥石流浆体冲击力的快速计算公式可由泥石流容重  $\gamma_c$  和泥石流流速  $v$  确定。本举例以拟建工程说明式(3)在泥石流防治工程设计中的应用。

某泥石流沟位于云南省昆明市东川区北部, 流域面积是  $48.6 \text{ km}^2$ , 主沟沟长  $13.9 \text{ km}$ , 最高海拔  $3269 \text{ m}$ , 最低海拔为  $1042 \text{ m}$ 。该沟泥石流活动频繁, 给当地人民群众生产生活带来很大影响。

为了减轻泥石流危害, 拟在该沟泥石流源区修建拦砂坝, 以达到固源降低泥石流危害的目的。通过现场调查和该沟泥石流观测历史数据确定该泥石流为粘性泥石流, 且该区域无较大块石, 容重  $\gamma_c = 22 \text{ kN/m}^3$ , 泥石流最大流速为  $10 \text{ m/s}$ 。依式(3)计算, 得到泥石流浆体冲击力值为  $96 \text{ kPa}$ , 即在拦砂坝上作用的冲击荷载按均匀分布的  $96 \text{ kPa}$  进行计算。

## 5 结论

根据本文所采用实验方法, 所得结论如下:

(1) 采用单因素分析的统计学方法, 详细分析了泥石流容重, 沟道坡度, 泥石流流速, 拦砂坝迎水面坡角及泥石流总量等的变化对泥石流浆体冲击力值的影响, 推导出泥石流浆体冲击拦砂坝过程中冲击力的计算公式, 与现有公式相比, 本文公式采用泥石流原样分析, 基于统计学原理, 反映了泥石流流速和容重对冲击力影响的变化规律, 计算结果更为精确。

(2) 该公式表明, 在单因素分析条件下, 泥石流容重越大, 泥石流浆体冲击力不一定越大, 呈先减小后增大的趋势; 泥石流沟越陡, 泥石流总量越大, 泥石流冲击力越大, 在一定范围内, 坡道变陡, 泥石流冲击力放缓, 其中总量同泥石流泥深有关; 泥石流流速越大, 泥石流冲击力越大; 拦砂坝迎水面倾角变化同泥石流冲击力变化不明显。

(3) 该公式可以用于不同规模的泥石流浆体冲击力计算, 为泥石流的减灾防灾提供依据。此外本文提出的公式是经验公式, 适用于工程实践的快速计算, 公式等号两边物理量的量纲不能匹配, 可通过添加修正系数进行平衡。

## 参考文献:

- [1] 钟敦伦, 谢洪. 四川境内成昆铁路泥石流致灾原因[J]. 山地研究, 1990, 8(2): 101-106.  
Zhong D L, Xie H. The disaster causes for debris flows along Chengdu-Kunming railway in Sichuan Province[J]. Mountain Research, 1990, 8(2): 101-106. (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. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 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, 8: 1664-1669.  
He S M, Li X P, Wu Y. Calculation of impact force of outrunner blocks in debris flow considering elastoplastic deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 8: 1664-1669. (in Chinese)
- [4] 王强, 何思明, 张俊云. 泥石流防撞墩冲击力理论计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(4): 423-426.  
Wang Q, He S M, Zhang J Y. Theoretical method for calculating impact force on debris flow protection piers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation En-

- gineering, 2009,29(4):423-426. (in Chinese)
- [5] 陈洪凯,唐红梅,鲜学福,等. 泥石流冲击脉动荷载概率分布特征[J]. 振动与冲击, 2010, 8: 124-127, 247.  
Chen H K, Tang H M, Xian X F, et al. Probability distribution features of fluctuating impact force of debris flow[J]. Journal Of Vibration and Shock, 2010, 8: 124-127, 247. (in Chinese)
- [6] 魏 鸿. 泥石流龙头对坝体冲击力的试验研究[J]. 中国铁道科学, 1996, 17(3): 50-62.  
Wei H. Experimental study on impact force of debris flow head[J]. China Railway Science, 1996, 17(3): 50-62. (in Chinese)
- [7] Armanini A, Scotton P. On the dynamic impact of a debris flow on structures[C] // Proceedings of XXV Congress of IAHR. Technical Session B, Debris Flows and Landslides, 1993, 203-210.
- [8] 吴积善,田连权,唐志成,等. 泥石流及其综合治理. 北京: 科学出版社, 1993.  
Wu J Sh, Tian L Q, Zhang Zh Ch, et al. Debris flow and its comprehensive control. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)
- [9] 杨子阜. 坝体型式对土石流拦阻堆积特性之研究[D]. 中国台湾: 朝阳科技大学, 2005.  
Yang Z F. Study on characteristics of debris-flow retaining and deposition for various dam types[D]. Taiwan, China: Chao Yang University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [10] 水山高久. 砂防ダムに対する土石流衝擊力算定とその問題点[J]. 新砂防, 1979, 32(1): 40-43.  
Mizuyama T. Computational method and some considerations on impulsive force of debris flow acting on dams[J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 1979, 11(2): 40-43. (in Japanese)
- [11] 林弘群. 不同型式拦砂坝所受土石流冲击力之研究[D]. 中国台湾: 台中, 国立中兴大学, 1994.  
Lin H Q. The study of impact force of debris flow upon model dams of different types[D]. Taichong, Taiwan, China: National Taichung University of Education, Taichong: 1994. (in Chinese)
- [12] 陈光曦,王继康,王林海,等. 泥石流防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.  
Chen G X, Wang J K, Wang L H, et al. Debris flow disaster prevention[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983. (in Chinese)
- [13] Hungr O, Morgan G, Kellerhals C. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(4): 663-667.
- [14] Hübl J, Holzinger G. Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke für die Geschiebewirtschaftung in Wildbächen; Kleinmaßstäbliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern[R]. Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2003.
- [15] 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.  
Zhou B F, Li D J, Luo D F, et al. Debris-flow prevention guide[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [16] 李德基. 泥石流减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 158-169.  
Li D J. Theory and practice for hazard reduction of debris flow[M]. Beijing: Science Press, 1997: 158-169. (in Chinese)
- [17] 曾 超. 泥石流作用下建筑物易损性评价方法[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.  
Zeng Ch. Vulnerability assessment of building to flow hazard[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)