

文章编号:1000-582X(2010)05-114-06

## 泥石流冲击特性模型试验

陈洪凯<sup>1,2</sup>, 唐红梅<sup>1,2</sup>, 鲜学福<sup>1</sup>, 张玉萍<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆交通大学 岩土与地质工程系, 重庆 400074)

**摘要:**针对沟谷泥石流,建立了泥石流冲击试验模型,选定0.3~0.8 cm、0.8~15 cm和1.5~3.0 cm等3种固相粒径组和0.02、0.08、0.16、0.20、0.25等5种固相比,拟定了15种水石流试验工况;实施了40余组模型试验,采用Fastcam-ultima1024型高速摄像机、HS200型动态应力传感器和多通道动态应变仪等测试仪器获得了85 000多个测试数据。试验结果表明,低固相比时,泥石流脉动特征显著,泥石流阵流特性随着固相比增大逐渐显现,且随着泥石流中固相颗粒粒径增大,出现初始阵流的时间提前;随着固相比及固相颗粒粒径的增大,泥石流冲击力具有非线性增加趋势;泥石流沟口的平均流速随着固相比增大具有降低趋势。成果可为系统实施不同浆体粘度及不同固相比泥石流冲击特性试验及理论研究提供科学借鉴。

**关键词:**泥石流;冲击特性;模型试验;固相比;颗粒粒径

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

## Experimental model of debris flow impact features

CHEN Hong-kai<sup>1,2</sup>, TANG Hong-mei<sup>1,2</sup>, XIAN Xue-fu<sup>1</sup>, ZHANG Yu-ping<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory For the exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Department of Geological & Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

**Abstract:** This paper develops the physical experimental model for the valley-shaped debris flow, and draw up 15 operating modes in accordance with three sets of particle solids at 0.3~0.8 cm, 0.8~15 cm and 1.5~3.0 cm in diameter and fluid at the solid to liquid (RSL) rate of 0.02, 0.08, 0.16, 0.20 and 0.25. It conducts more than 40 simulations, and obtained 85 000 data using the new test methods such as Fastcam-ultima1024 typed CCD camera, HS200 typed dynamic transducer and multi-channel strain instrument. The experimental results show that the debris flow fluctuation becomes obvious at low RSL, the debris flow surge gradually embodies with the increase of RSL and the initial surge appears ahead of time with the increase of particle diameter. The impact forces of debris flow trend to increase nonlinearly with the increase of RSL and particle diameter, however, the flow speed at the mouth of debris flow valley trend to decrease with RSL increase. The studies may produce some valuable enlightenment in debris flow impact simulations and theory basis for various slurry viscosity and RSL.

**收稿日期:** 2009-11-30

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50678182);重庆市重点自然科学基金资助项目(2008BA0015);中国博士后科学基金资助项目(20080430095);高校博士点基金资助项目(20060618001);中国博士后科学基金资助项目(200902288)

**作者简介:** 陈洪凯(1964-),男,重庆交通大学教授,博士后,博士生导师,主要从事动力地貌学、山地灾害演变、安全警报与减灾技术方向的研究。(Tel)023-62652719; (E-mail)chk\_cq@163.com。

**Key words:** debris flow; impact features; experimental model; ratio of solid to liquid; particle diameter

泥石流冲击力是指泥石流在运动过程中对所接触物体所产生的动荷载<sup>[1]</sup>,是泥石流地区道路、桥涵毁损破坏的主要外动力。由于泥石流属于固液混合的特殊流体,其冲击荷载的确定多年来一直是泥石流科学研究中的重点和难点,是泥石流流动力学研究中最薄弱的环节之一<sup>[2-4]</sup>。20世纪70年代以来,中国开始进行泥石流冲击荷载的野外测试工作<sup>[3]</sup>;根据云南东川蒋家沟泥石流1974-1975年的冲击观测资料,吴积善等初步建立了泥石流冲击动压力计算公式,并将泥石流冲击力概化为锯齿形脉冲、矩形脉冲和尖峰形脉冲三种谱型<sup>[2,5]</sup>;刘雷激等将泥石流中巨砾的撞击力概化为矩形脉冲谱,将浆体的冲击力概化为三角脉冲谱<sup>[6]</sup>;魏鸿等通过室内水槽试验结果,提出了泥石流龙头对坝体冲击力的计算公式<sup>[7]</sup>;张宇等基于动量守恒原理,通过引入泥石流微元体概念,采用Hilbert变换实现了对实测冲击数据的信号处理<sup>[8]</sup>;Kaitna等将垂直旋转水槽和圆球测试系统相结合,获得了Bingham流变模型和Herschel Bulkley流变模型的流变参数<sup>[9]</sup>;Valentino等进行了颗粒流水槽试验,采用摄像法记录了颗粒流形成及运动过程,并借助于离散元软件PFC2D系统模拟了颗粒流水槽试验,获取颗粒流冲出距离和冲击力频谱特性<sup>[10]</sup>;Armento等认为冲出距离、速度和流变特性的精细预测是泥石流防灾减灾的重要基础,针对意大利Cortina d'Ampezzo地区的泥石流,运用一维DAN-W模型分析了泥石流的动力特性,运用二维FLO-2D模型分析了泥石流在沉积扇上的迁移变化规律<sup>[11]</sup>;陈洪凯等提出了泥石流龙头压胀效应<sup>[12]</sup>;Takahashi认为泥石流头部的纵剖面形态可用单斜波理论进行分析<sup>[13]</sup>;基于室内物理模型试验和现场观测,陈洪凯等初步建立了泥石流中固液分相冲击力计算方法<sup>[1,4,14-16]</sup>。然而,前述研究目标均集中在采用拟静方式获取泥石流最大冲击荷载方面,未考虑泥石流冲击荷载的动态变化效应,未揭示泥石流冲击荷载的频谱关系,限制了泥石流防治结构及路基、桥涵在泥石流冲击作用下动力破坏机制研究。

针对沟谷泥石流,进行不同固相粒径和不同固相比组合泥石流模型试验,探索泥石流冲击荷载的变化规律,为实施泥石流灾害的工程治理提供科学依据。

## 1 试验模型设计

### 1.1 试验模型

在重庆交通大学泥石流动力模型试验场建造沟谷泥石流试验模型(图1、2)。试验模型主沟长度9.0 m、高差3.6 m、沟床平均坡度26°;泥石流沟由水泥砂浆现场浇筑而成,沟槽较光滑;沟源为水源箱A,尺寸1.0 m(长)×1.0 m(宽)×1.5 m(高),储水量1.5 m<sup>3</sup>,并设置补偿水源箱B;水源箱出口处设置碎石漏斗,其高度0.5 m,顶部直径0.6 m,底面直径0.4 m,漏斗底部阀门设置为抽板式,开口大小可以根据试验中固相比进行调整;泥石流沟口安置HS200型动态应力传感器。

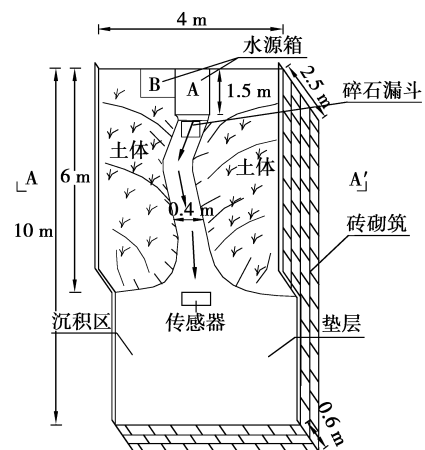


图1 试验模型设计



图2 泥石流试验模型

### 1.2 试验工况

重点进行不同固相粒径和不同固相比组合条件

下泥石流的冲击室内模型试验。固相粒径分 A(粒径 0.3~0.8 cm)、B(粒径 0.8~1.5 cm)、C(粒径 1.5~3.0 cm)3 组,固相比分 0.02、0.08、0.16、0.20 和 0.25 共 5 种情况,按照正交组合方式拟定 15 种试验工况(表 1)。

表 1 泥石流冲击试验工况

| 固相比 | 0.02 | 0.08 | 0.16 | 0.2 | 0.25 |
|-----|------|------|------|-----|------|
| A 组 | A-1  | A-2  | A-3  | A-4 | A-5  |
| B 组 | B-1  | B-2  | B-3  | B-4 | B-5  |
| C 组 | C-1  | C-2  | C-3  | C-4 | C-5  |

### 1.3 观测仪器及方法

1)将 Fastcam-ultima1024 型高速摄像机安置在模型坡脚前方 4 m 处,测试精度选用 300 fps,用以量测泥石流流速。采用与 HS200 型动态应力传感器匹配的多通道动态应变仪连续量测泥石流冲击力。

2)开启高速摄像机和动态应变仪,采用摄像机内置时间记录模型试验进程。

3)开启泥石流沟后部水源箱阀门,控制出水量,并根据设计方案,打开碎石漏斗阀门,确保进入泥石流沟流通区内的泥石流具有试验工况所需的固相粒径及固相比。

4)高速摄像机连续记录泥石流运动过程,动态应变仪连续记录泥石流冲击荷载变化过程。

## 2 试验结果分析

### 2.1 清水试验

清水试验目的在于揭示泥石流冲击荷载变化的本底特性。按照试验设计,利用小孔出流原理,采用稳定水源箱水压的方式提供稳定水流进行冲击,测得纯液相清水的冲击荷载曲线图(图 3),采用高速摄像小球跟踪方法测试水流平均速度。

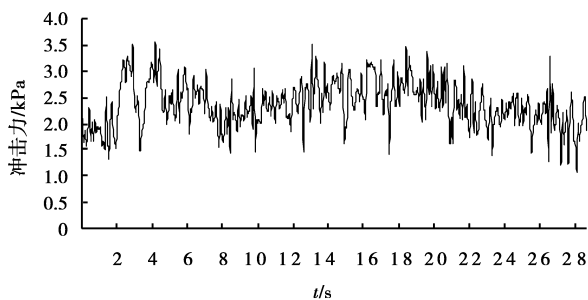
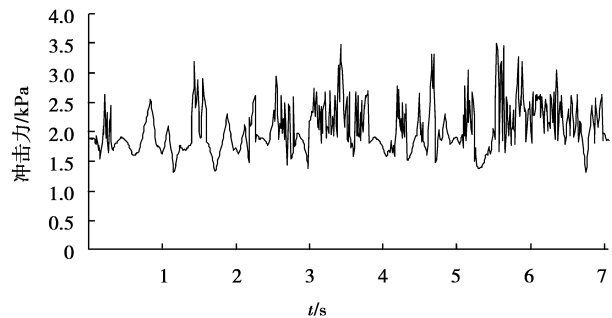


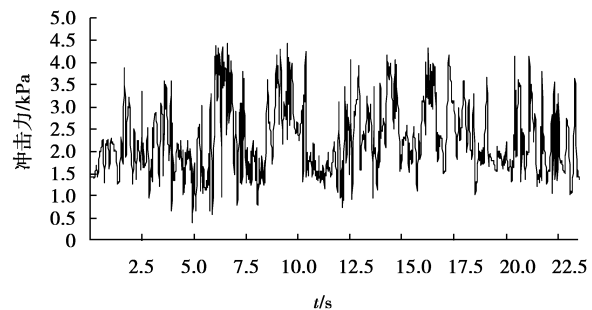
图 3 清水流冲击力

### 2.2 泥石流冲击荷载曲线

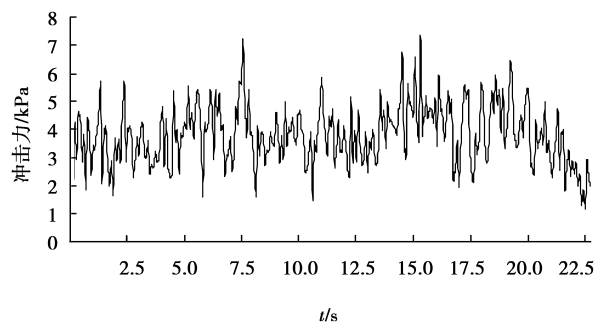
基于 15 种试验工况,共实施了 40 余组室内模型试验,获得了 85 000 多个测试数据,A、B、C 3 组固相比泥石流代表性冲击试验曲线分别见图 4-6。可见,当固相比仅为 0.02 和 0.08 时,冲击曲线与清水冲击曲线相似。固相比和固相粒径对于泥石流阵流出现时间及冲击力大小具有控制作用,即随着固



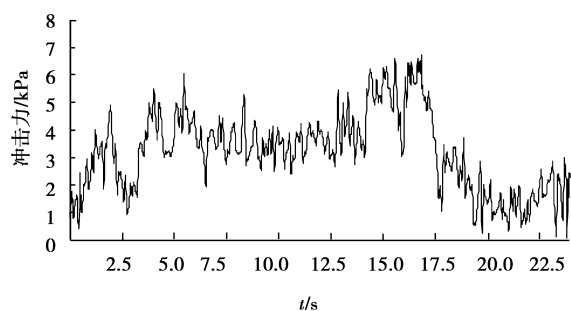
(a) A-1组



(b) A-2组



(c) A-3组



(d) A-4组

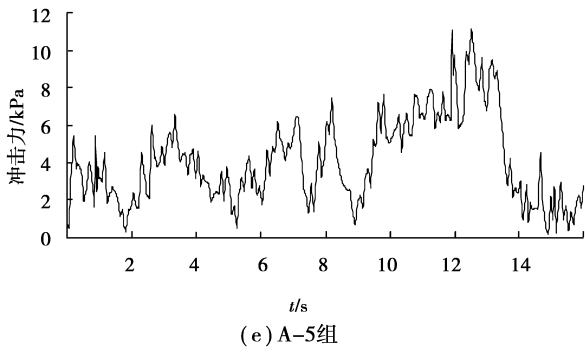


图 4 A 组固相比冲击压力

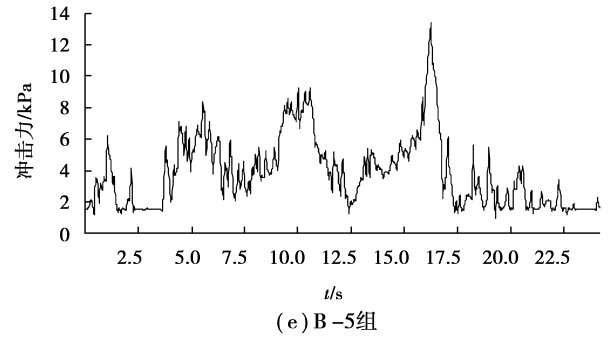
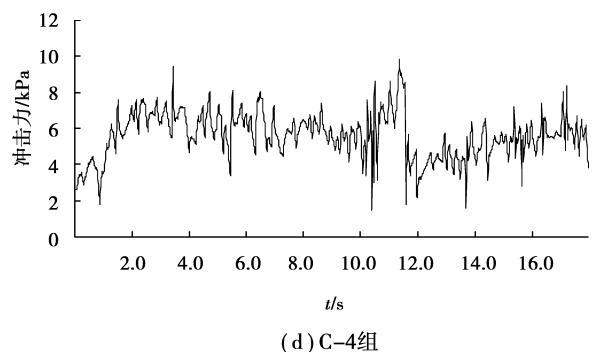
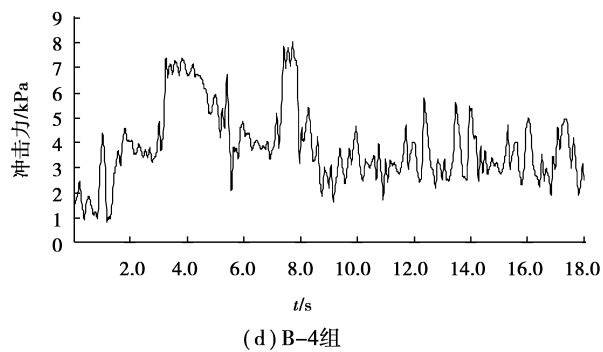
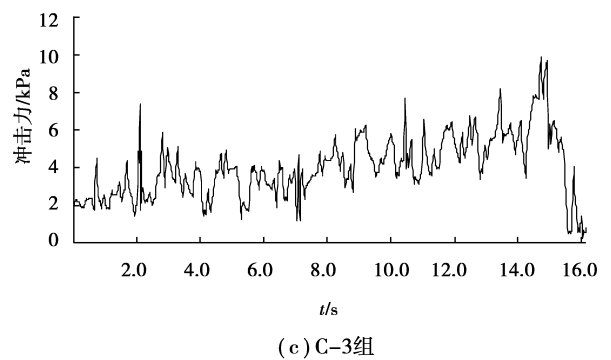
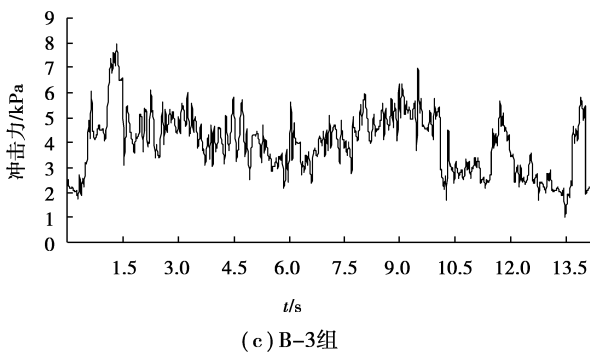
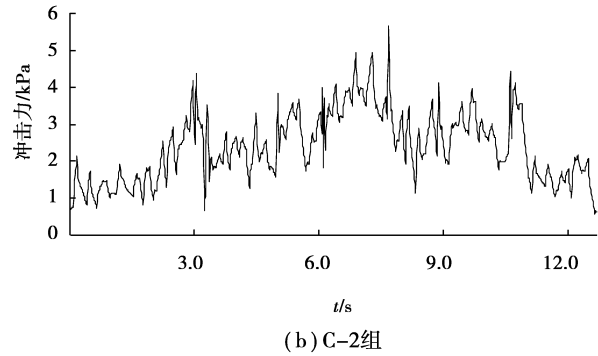
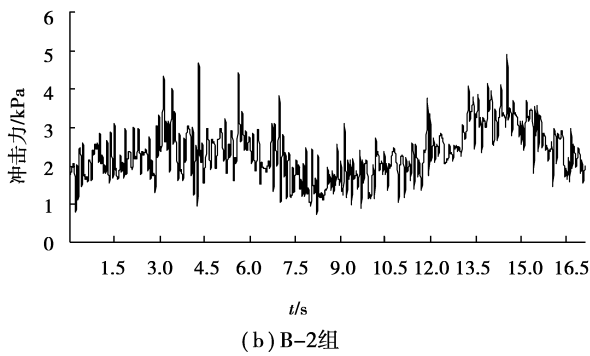
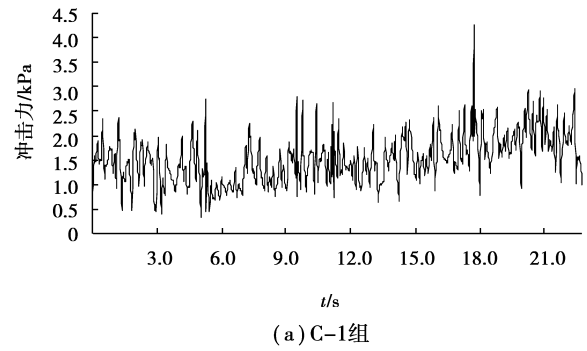
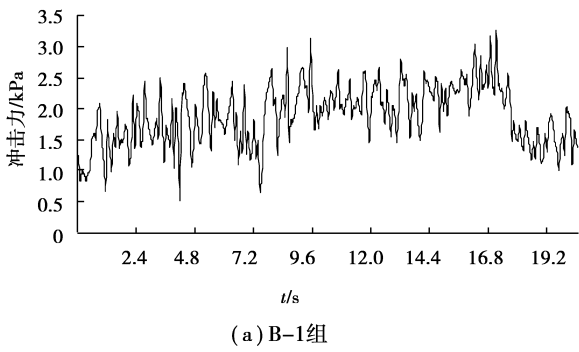


图 5 B 组固相比冲击压力



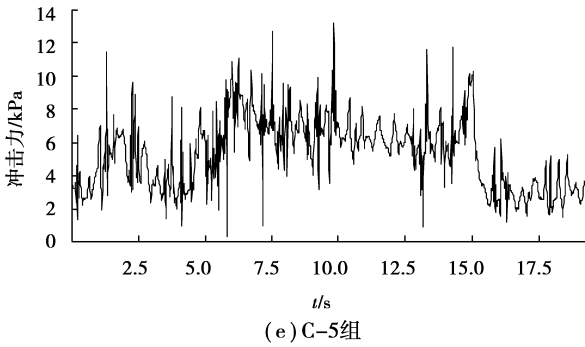


图 6 C 组固相比冲击压力

相比的增加,泥石流冲击力逐渐增大,冲击特性从脉动曲线逐渐变化为显著的阵性冲击曲线,固相比超过 0.16 后,泥石流阵性波动特征凸显;随着泥石流中固相颗粒粒径增大,出现初始阵流的时间提前。

### 2.3 泥石流冲击力

针对前述 3 组代表性泥石流冲击试验曲线,采用峰值冲击荷载得到不同固相粒径及固相比泥石流平均冲击力的变化趋势(图 7)。可见,泥石流冲击力随固相比的增大而增加,固相比较小时冲击力增幅缓慢,仅 10% 左右;固相比从 0.08 增加到 0.16 时,冲击力增幅较大,可超过 100%;固相比超过 0.16 后冲击力增幅总体较慢,甚至有降低现象。而从固相粒径分析,在中小固相比时,3 组固相粒径的冲击力变化趋势相近,仅在固相比超过 0.16 后不同固相粒径的泥石流冲击力变化的离散性增强,但仍然存在粒径较大冲击力较大的总体趋势。

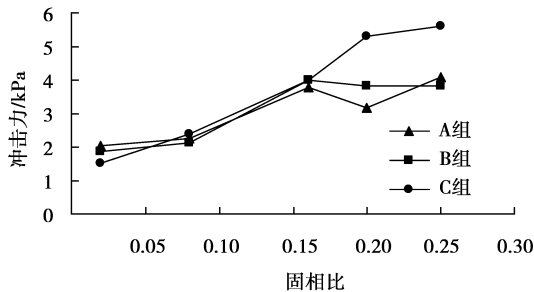


图 7 泥石流冲击力变化趋势

### 2.4 泥石流流速

试验模型泥石流沟口平均流速观测结果见图 8。泥石流流速随固相比增大总体趋势降低,但在低固相比( $<0.08$ )和高固相比( $>0.16$ )时流速降幅较小,在 7% 左右;仅在中固相比(0.08~0.16)之间降幅较大,可及 24%。此外,泥石流中固相颗粒粒径较大时流速降幅相对较小。

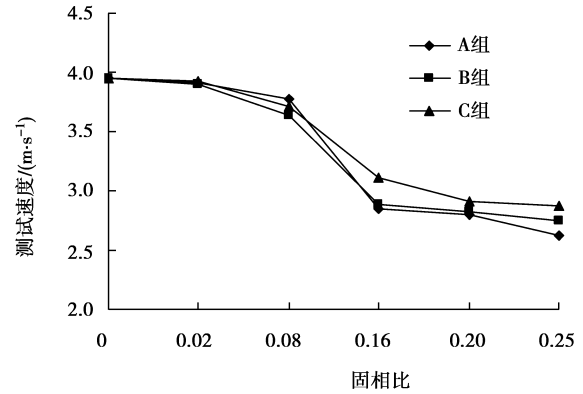


图 8 泥石流沟口平均流速变化趋势

## 3 结 论

1) 试验基本揭示了水石流运动的基本规律,即固相颗粒浓度增加,可以显著增大泥石流流体容重,进而在水体运动过程中必然将部分势能用于克服颗粒之间及颗粒与沟床壁面之间的摩擦作用,摩擦耗能越多,用于驱动泥石流运动的能量便减少,宏观上泥石流流速便具有降低趋势。

2) 清水及水石流运动均具有脉动特征,只有固相比超过 0.16 后泥石流的阵流特性才逐渐显现,且随着泥石流中固相颗粒粒径增大,出现初始阵流的时间提前。

3) 随着固相比及固相颗粒粒径的增大,泥石流冲击力具有非线性增加趋势。

4) 进一步研究中,应全面实施不同浆体粘度和不同固相比组合下的粘性泥石流冲击模型试验,并通过小波消噪及频谱分析提取经典泥石流冲击频谱,为建立涵盖不同类型泥石流的冲击力计算方法提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,陈野鹰.公路泥石流力学[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] 吴积善,田连权,康志成,等.泥石流及其综合治理[M].北京:科学出版社,1993.
- [3] 章书成.泥石流研究述评[J].力学进展,1989,19(3): 365-375.  
ZHANG SHU-CHENG. A review on the research of debris flow[J]. Advanced in Mechanics, 1989,19(3): 365-375.
- [4] 陈洪凯,唐红梅,叶四桥.中国公路泥石流研究[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(1):1-5.  
CHEN HONG-KAI, TANG HONG-MEI, YE SI-

- QIAO. Study on debris flows along highways in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(1):1-5.
- [5] 吴积善. 云南蒋家沟泥石流观察研究[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [6] 刘雷激,魏华. 泥石流冲击力研究[J]. 四川联合大学学报:工程科学版,1997,1(2):99-102.  
LIU LEI-JI, WEI HUA. Study of impact of debris flow[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 1997,1(2):99-102.
- [7] 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 HONG. Experimental study on impact force of debris flow heads[J]. China Railway Science, 1996, 17(3):50-62.
- [8] 张宇,韦方强,王青. 基于动量守恒的粘性泥石流冲击力计算[J]. 泥沙研究,2006(3):23-26.  
ZHANG YU, WEI FANG-QIANG, WANG QING. Impact force calculation of viscous debris flow based momentum conservation [J]. Journal of Sediment Research, 2006(3):23-26.
- [9] KAITNA R, RICKENMANN D, SCHATZMANN M. Experimental study on rheologic behaviour of debris flow material[J]. Acta Geotechnica, 2007,2(2):71-85.
- [10] Valentino R, Barla G, Montrasio L. Experimental analysis and micromechanical modelling of dry granula flow and impacts in laboratory flume tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41 (1): 153-177.
- [11] ARMENTO M C, GENEVOIS R, TECCA P R. Comparison of numerical models of two debris flows in the Cortina d' Ampezzo area, Dolomites, Italy [J]. Landslides, 2008, 5 (1):143-150.
- [12] 陈洪凯,杜榕桓,唐红梅,等. 泥石流龙头压胀机理探析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(5): 790-793.
- CHEN HONG-KAI, DU RONG-HENG, TANG HONG-MEI, et al. Study on blasting mechanism of high pressure core in debris flow [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2008,27(5): 790-793.
- [13] TAKAHASHI T. Debris flow on prismatic open channel [J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1980, 106(HY3)
- [14] CHEN H K, TANG H M, WU S F. Research on abrasion of debris flow to high-speed drainage structure [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(11):1257- 1264.
- [15] 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. Method to calculate impact force and impact time of two-phase debris flow [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006,19(3):19-23.
- [16] CHEN H K, TANG H M. Essential principle of debris flow dynamics [J]. Wseas Transactions on Fluid Mechanics, 2006,10(1): 932-936.
- [17] 王协康,方铎. 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 XIE-KANG, FANG DUO. Study on laws of debris model similarity [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2000,32(3): 9-12.
- [18] 徐永年,梁志勇,苏晓波,等. 水石流概化水槽试验相似律的探讨[J]. 自然灾害学报,2000,9(4):105-110.  
XU YONG-NIAN, LIANG ZHI-YONG, SU XIAO-BO, et al. Physical modeling of debris flow in the experimental flume[J]. Journal of Natural Disasters, 2000,9(4):105-110.

(编辑 赵 静)