

# “东川型”排导槽结构对泥石流流速影响的实验研究

黄海<sup>1,2</sup>, 马东涛<sup>1,3\*</sup>, 王显林<sup>1,2</sup>

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:** 消能肋槛和排导槽纵比降是控制“东川型”泥石流排导槽内流体运动的两个关键因素。泥石流流速是反映排导槽工程输移力及对排导槽的冲刷淤积破坏的重要参数之一。通过实验, 对固定配比的泥石流流体在不同的肋槛组合下的排导槽中的流速进行了研究, 结果表明: (1) 肋槛间距从 40 cm 增加至 60 cm 时, 泥石流流速先增加后减少, 在间距 50 cm 时达到最大值; (2) 肋槛高度对泥石流流速的影响非常复杂, 在不同的肋槛间距和纵比降下表现不同的相关关系; (3) 纵比降对排导槽内的泥石流流体基本呈正相关; (4) 得到了肋槛间距与肋槛高度之比值  $N$  与泥石流流速  $V$  之间关系的数学表达式:  $V = 0.0341N + C$ , 其中  $C$  为常量。

**关键词:** “东川型”排导槽; 泥石流; 流速; 肋槛; 纵比降

**中图分类号:** P642.23

**文献标识码:** A

“东川型”排导槽是我国前辈泥石流专家从 20 世纪 60 年代中期开始在云南东川进行泥石流沟的治理中, 经过多年探索, 逐步由排洪沟向泥石流排导槽过渡, 创建的软基消能的泥石流排导槽。其在我国泥石流排导工程中得到了广泛的应用, 是目前最为常见的泥石流排导槽形式之一<sup>[1]</sup>。东川槽在城镇、农田、工矿、铁路、公路、水电等部门的泥石流防治工程实践中, 取得了良好的效果<sup>[2]</sup>。其软基消能排导原理是通过饱含碎屑物的泥石流与沟床质的激烈搅拌, 消耗掉运动余能, 以维持均匀流动。肋槛保持消力塘中碎屑物体积浓度, 使冲淤达到平衡, 基础不被掏空<sup>[1]</sup>。通过槛后落差消长, 自动调整泥位纵坡和流速, 使得沿程阻力和局部阻力协调, 保持泥石流容重和输移力的恒定<sup>[3,4]</sup>。在“东川型”泥石流排导槽的设计中, 排导槽的纵坡和过流断面的组合型式至关重要。在泥石流灾害的治理工程实践中, 排导槽的纵比降受沟口堆积扇地形的约束非常大, 因

此, 在一定的纵坡条件下, 过流断面的结构形式是影响排导槽输移力和冲淤平衡的关键, 而其中的关键部位就是排导槽中的肋槛消能工, 即肋槛的间距和肋槛的断面形式的组合<sup>[5]</sup>。

泥石流流速是反映排导槽工程输移力及对排导槽的冲刷淤积破坏的重要参数之一。在“东川型”泥石流排导槽中, 消能肋槛和排导槽纵比降是控制槽内泥石流流体运动的两个关键因素。本实验通过对固定配比的泥石流流体在不同的肋槛组合下的排导槽中的流速进行了实验研究, 揭示了实验室条件下肋坎高度、肋坎间距、排导槽纵坡对泥石流流速的影响规律。在泥石流运动模型的计算公式中, 涉及到的流速一般指泥石流的断面平均流速。本实验中, 由于测量手段的限制, 无法直接测量得到实验槽内泥石流的断面平均流速。通过浮标标记测量得到的流速为泥石流的表面流速, 若需得到断面流速, 还需通过相应的计算公式计算。本文只进行不同状况

收稿日期 (Received date): 2009-03-05; 改回日期 (Accepted): 2009-06-15.

基金项目 (Foundation item): 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目 (GZ2007-15). [State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvironment Protection Fund(GZ2007-15).]

作者简介 (Biography): 黄海, (1984-), 男, 湖南醴陵人, 在读硕士, 研究方向为地质灾害防灾减灾工程理论和实践。[Huang Hai (1984-), male, major in geohazards prevention theory and engineering] E-mail: hha84@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding Author): 马东涛, (1965-), 男, 陕西武功人, 博士, 教授, 硕导, 主要从事地质灾害基础理论和防灾减灾工程。[Ma Dongtao (1965-), male, prof & Dr., major in geohazards prevention theory and engineering] E-mail: dmta@imde.ac.cn

下泥石流流速的对比,不涉及到流速的数值计算,因此,只对泥石流的表面流速进行分析。

## 1 实验设备及实验流程

### 1.1 实验设备

本实验是 2008 年利用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的泥石流流动力

模拟装置进行的,在实验槽上安装肋槛及肋槛固定构件来模拟“东川型”泥石流排导槽。实验装置由泥石流料斗、泥石流过流槽、水循环系统、支撑结构、纵坡调节构件、肋槛、泥沙收集槽等构成,实验排导槽长 8 m,宽 30 cm,深 35 cm,可调纵坡比降为 5.37% ~ 22.0%,如图 1(a)。肋槛长 30 cm,宽 4 cm,高度分别为 2 cm、4 cm 和 6 cm,肋坎间距分别为 40 cm、50 cm 和 60 cm,如图 1(b)。



(a) 排导槽实验装置



(b) “东川型”实验槽内消能工布设

图 1 排导槽实验装置实物图

Fig 1 The sketch of experimental devices of Dongchuan debris flow channel

### 1.2 实验内容

在实验槽内布设好肋槛,肋槛间距固定,从排导槽尾部向头部布设。肋槛间距通过野外的实际工程调查,由肋槛类型以及肋槛高度来确定,以泥石流流动时不淤积冲刷为基准;在矩形断面肋槛、选定排导槽纵比降的情况下,测量排导槽内泥石流在不同测量断面的流速,泥深;调整肋槛间距及肋槛高度,测量排导槽内泥石流在上述测量断面的流速,泥深。

### 1.3 实验流程

实验过程如图 2。首先将实验槽的纵比降及肋槛按照实验方案固定好,然后将泥石流流体在料斗内配置好。打开料斗出口阀门,使得流体在实验槽内流动,通过对槽内的泥石流流体取样及两台摄像机摄像,以获取一次实验过程中的数据,重复上述实验 3 次;按照实验方案实验槽的纵比降和肋槛组合,重复上述实验内容。

### 1.4 量测内容

实验测量内容包括:(1)实验槽内泥石流流体的表面流速;(2)槽内泥石流流体的流深;(3)实验槽的纵比降;(4)取样分析泥石流的容重;(5)录像,准确记录整个实验的过程。量测内容中,表面流速

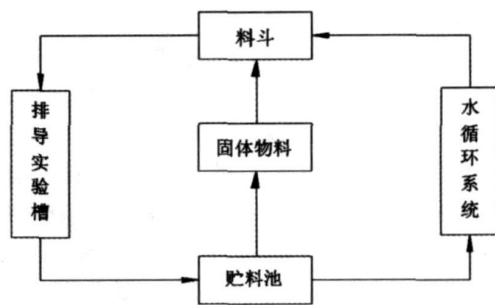


图 2 排导槽实验流程图

Fig 2 The outline of Dongchuan channel experimental processes

和流深均通过摄像机录像,然后在电脑中解译视频获取。

### 1.5 泥石流流体的固体物料配合

为了获取与实际工程中流动的泥石流尽可能类同的土石材料,实验选择天然河相卵石、天然河沙、高岭土为实验的土石材料,按表 1 中的配合比配制固定的泥石流固体物质,从而对不同边界条件下的实验成果进行对比。固体物质的粒径及配合比例见表 1。

表 1 实验材料配合比

Table 1 The compositional proportion of experiment materials

相似材料	粒径 (mm)	配合比
卵石 河沙 高岭土	$\geq 15 \geq 10 \geq 5 \geq 1 \geq 0.005$	2: 2: 2: 2: 1

## 2 排导槽结构对泥石流流速的影响

### 2.1 排导槽纵比降对流速的影响

泥石流运动的动力主要源自流体的势能, 在稀性和粘性泥石流的各种流速计算经验公式中, 纵比降与流速是指数 0.5 的幂函数<sup>[3]</sup>。根据实验取得的流速数据, 分析在不同的肋槛组合情况下流速与纵比降之间的关系, 分析结果如图 3。

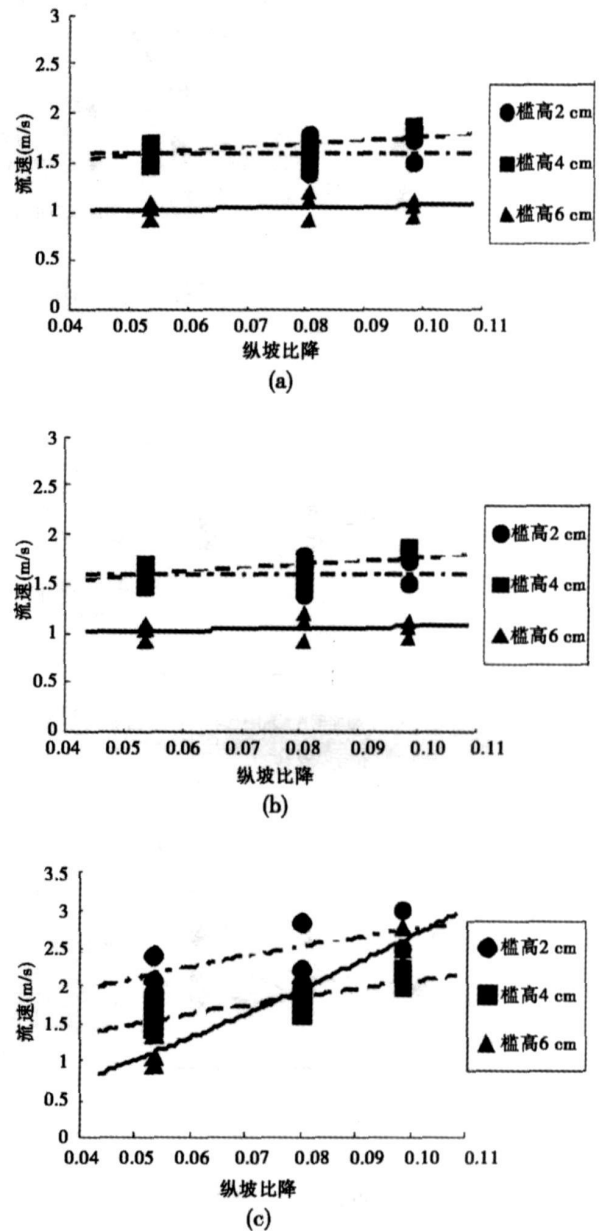
试验结果表明, 排导槽的纵比降与泥石流速度之间基本呈正相关关系。流速与纵比降之间的关系还受到肋槛高度与肋槛间距的影响。

这些复杂的变化关系, 主要是为排导槽提供阻力的肋槛结构和提供泥石流运动动力的纵比降这两种对立的力量消长造成的。从排导槽的输移能力来考虑, 泥石流的流速一定程度上与输移力正相关。因此, 从实验结果可以看出增大纵比降必然会增加排导槽的输移力。但是这种因动力的增加导致输移力增加的幅度还与消能工的结构相关。如消能工结构为肋槛间距 50 cm、高度 2 cm 和肋槛间距 40 cm、高度 6 cm 时, 单纯靠增加排导槽的纵比降, 并不能快速的提高排导槽的输移力。

### 2.2 肋槛间距对流速的影响

肋槛是排导结构中造成流体运动过程中受到的局部水头损失的关键部件。肋槛间距主要是控制单位长度内, 肋槛个数的多少, 即局部水头损失的大小。实验得到的肋坎间距与流速之间的关系如图 4 所示。

分析发现: 泥石流流速随肋槛间距增加呈现先减小, 后增加的趋势, 且大多数情况下, 减小的幅度要小于增加的幅度。流速变化的趋势还与纵比降有一定关系, 纵比降越大, 关系曲线前段减小的幅度越小。从泥石流运动过程中受到外界阻力方面来考虑, 随着肋槛间距的增加, 单位长度排导槽布设的肋槛个数则减少, 理论上讲, 流体运动受到的阻力则减小, 反映到流体运动特征上来则是泥石流的流速增大。而在实验中, 肋槛间距从 40 cm 增加至 50 cm 时, 泥石流流速不增反减, 主要是因为肋槛间距较小时, 流体运动过程中的水跌和水跃不完全, 严重影响



(a) 肋槛间距 40 cm 的试验 (b) 肋槛间距 50 cm 的试验  
(c) 肋槛间距 60 cm 的试验

图 3 实验槽内泥石流流速与纵比降之间的关系

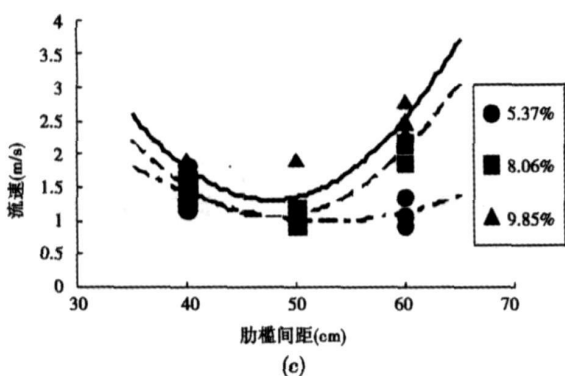
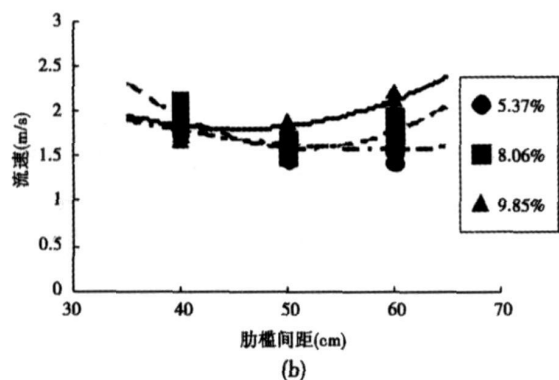
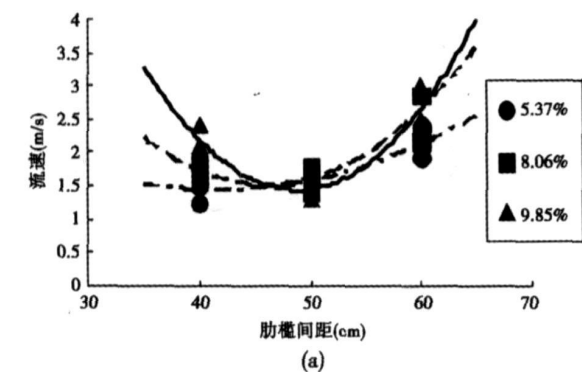
Fig. 3 The relationship between the gradient and the debris flow velocity

到两种流体状态下的消能效果, 从而导致了流速变化的反常现象。

### 2.3 肋槛高度对流速的影响

肋槛高度主要影响泥石流流动过程中形成的水跌和水跃, 肋槛高度越高, 其水跌和水跃越明显, 消能效果越好, 反之, 则消能效果较差。根据实验结果分析的肋槛高度与流速之间的关系如图 5 所示。

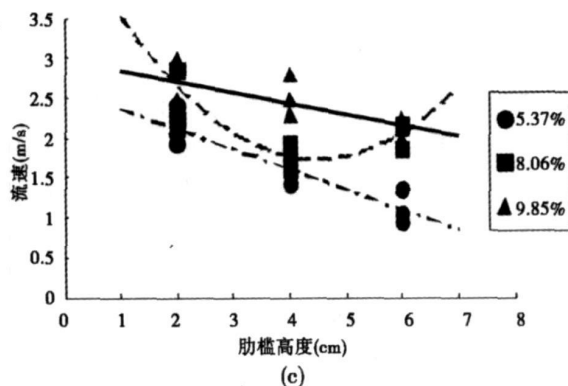
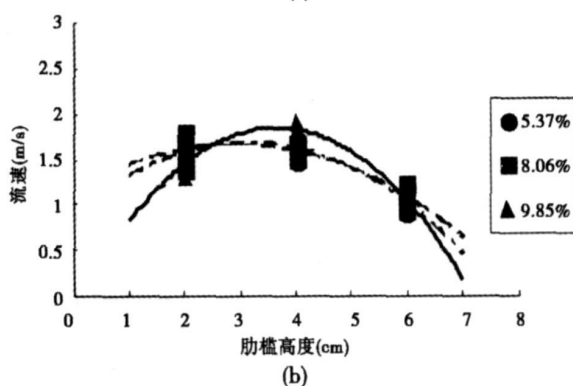
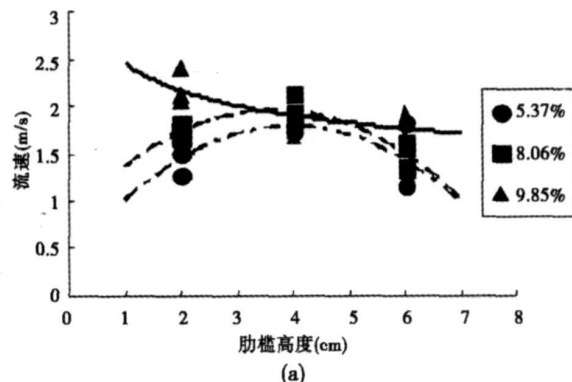
从图 5 可看出, 肋槛高度对泥石流流速的影响关



(a) 肋槛间距 40 cm 的试验 (b) 肋槛间距 50 cm 的试验  
(c) 肋槛间距 60 cm 的试验

图 4 实验槽内泥石流流速与肋槛间距之间的关系

Fig. 4 The relationship between threshold spacing and debris flow velocity



(a) 肋槛间距 40 cm 的试验 (b) 肋槛间距 50 cm 的试验  
(c) 肋槛间距 60 cm 的试验

图 5 实验槽内泥石流流速与肋槛高度之间的关系

Fig. 5 The relationship between threshold height and debris flow velocity

系较为复杂, 规律性不强, 即使在同一个肋槛间距下, 不同纵比降下的流速-肋槛高度关系也不一样。从理论上分析, 肋槛越高, 水跌和水跃的效能效果越好, 能量耗散越大则泥石流流速越小。因此, 图中这种复杂的变化关系是肋槛高度与纵比降共同作用的结果。

### 3 肋槛间距-高度比对泥石流流速的影响

以上仅从单因素分析了肋槛高度与间距对泥石

流流速的影响, 由分析来看, 均难得出较规律性的关系。因此, 下面综合分析间距和高度两者的组合对流速的影响, 以消除单一因素分析带来的误差。本文引入肋槛间距与肋槛高度的比值  $N$  来度量肋槛的组合作用,  $N$  与流速之间的关系如图 6 所示。

分析结果表明: 虽然从单因素分析发现肋槛间距和肋槛高度对泥石流流速的影响规律性都不强, 但是两者的组合影响, 即间距与高度之比  $N$  与流速基本呈线性关系, 且与实验槽的纵比降的关系也较为

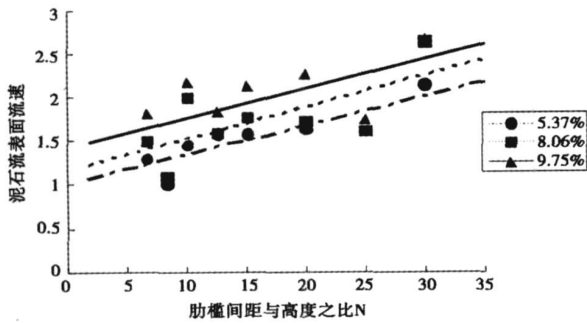


图 6 实验槽内流体流速与肋槛间距与高度比值  $N$  的关系  
Fig 6 The relationship between the ratio of threshold spacing to height  $N$  and debris flow velocity

吻合。  
从图 6 可知, 三个纵比降下的关系曲线的斜率基本一致, 且在数值上有着流速随纵比降增加而增加的正比关系。随着纵比降的增加, 比值  $N$  与流速  $V$  之间的线性相关减小。三个纵比降下趋势线的相关性及异常点分布如表 2。

在纵比降为 5.37% 时, 趋势线的相关系数  $R^2 = 0.72$  相关性非常好, 数据点基本处于趋势线附近, 无偏移很大的异常点; 而当纵比降为 8.06% 和 9.85% 时, 趋势线的相关系数  $R^2$  均较小, 相关性一般, 数据点基本处于趋势线两侧且对称分布, 在  $N$  为 8.33 和 25 时, 数据点明显与趋势线偏移较大。因为无法从试验中测出流体中固体颗粒的运动形式, 因此, 很难鉴别这种数据偏移现象是试验测量误差还是流体运动过程本身造成的。这有待于今后通过实验和实际工程的对比分析来进一步确定。

综合分析三条曲线的关系式发现, 三条曲线的斜率基本一致, 因此, 将三条曲线的斜率平均, 可以用一个统一的关系式来描述泥石流流速  $V$  与比值  $N$  之间的关系

$$V = 0.0341N + C$$

式中  $C$  表示为一常量, 其值与排导槽的纵比降有关, 纵比降越大,  $C$  的值越大, 本实验中,  $C$  值在 1.01 ~ 1.41 之间。

## 4 结论与讨论

1. 排导槽内泥石流流速与纵比降呈正相关, 由于肋槛消能结构的存在, 纵比降对流速影响有所削弱, 从实验结果看, 在合适的肋槛间距下 (如实验中的 50 cm 的间距), 纵比降的增加对流速的影响非常小。表明在泥石流灾害防治实践中, 仅增加排导槽的纵比降并不一定增加泥石流流速, 应同时考虑肋槛结构的影响。

2. 在单因素分析中, 肋槛高度、肋槛间距和泥石流流速之间的关系都较为复杂, 从关系图上看, 规律性不是很强。因此, 分析泥石流流速与排导结构之间的关系时, 必须综合考虑各个因素的影响。

3. 本文引入肋槛间距与肋槛高度比值  $N$  来表征肋槛结构对流速的综合影响, 从分析结果中可知,  $N$  与泥石流流速之间成线性关系, 流速随着  $N$  值的增加而增加, 即流速随着纵比降增加而增加。通过统计分析, 可以得到  $N$  与流速之间的关系式:  $V = 0.0341N + C$ , 其中  $C$  为一常量, 由纵比降决定。因此, 在工程实践中, 流速可以从肋槛间距与肋槛高度的比值并综合考虑纵坡比降来分析, 也可以参照上述公式来计算分析。

由于目前国内外对泥石流在人工建筑物中运动过程及动力模型研究较少, 尤其是有关“东川型”排导槽的野外观测和室内模拟试验研究尚属空白。本文仅是对实验数据的初步分析, 据此探讨了排导槽结构对泥石流流速的影响, 但限于试验平台的不足、数据测量的手段落后及自身水平不足等, 还需对以下问题进行更深入的研究:

1. 本文的模拟实验仅限肋槛结构对流速的影响, 而对于泥石流流体中的泥沙颗粒的运动对泥石流流体整体运动的影响未能进行研究, 且外部结构对床底的泥沙颗粒的运动的的影响也未能进行分析。因此, 对排导槽的消能结构对泥石流流体运动的机理有待进一步研究。

表 2 流速与  $N$  值的相关性及异常数据点分布表

Table 2 The relevance between debris flow velocity and  $N$  and the distribution of abnormal points

排导槽纵比降	$N$ 与流速之间的关系式	相关系数 $R^2$ 的值	异常点的 $N$ 值
5.37%	$V = 0.0343N + 1.4098$	0.7232	无
8.06%	$V = 0.0345N + 1.1836$	0.456	8.33, 25
9.75%	$V = 0.0335N + 1.0169$	0.364	8.33, 25

2. 要对观测的实验数据进行数据的拟合处理, 就需要进行大量的试验, 而本文所做的实验所得到的数据远远不够用来拟合得到相应的公式。因此, 对于本试验中设计的试验还需要进行更多次数的重复试验, 以期得到相应的关系曲线。

3. 由于实验平台的限制, 本次仅开展了相关的模拟实验, 实验排导槽及其结构与实际工程的相似性较差, 因此限制了实验结果在防治工程中的应用。今后必须加强“东川型”泥石流排导槽相关的调查采样和现场观测试验, 再联系实验结论进行更深入的对比分析, 从而得出优化排导槽设计的参数和计算公式。

**致谢:** 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所李德基研究员、游勇研究员、谢洪研究员和王士革研究员对论文提出了宝贵的意见和建议, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所林明安、何海江、矫震和成都理工大学土木工程学院马煜、梅岩参加了排导槽试验, 在此一并致谢。

## 参考文献 (Reference)

- [1] Li Deji Debris Flow Channel in Dongchuan Yunnan [A]. In Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy. Debris Flow (4) [C]. Beijing Science Press 1995 62~66 [李德基. 云南省东川市泥石流排导槽 [A]. 见: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 泥石流 (4) [C]. 北京: 科学出版社, 1995 62~66]
- [2] Zeng Siwei Li Honglian The Highway Engineering in the Debris Flow Area [M]. Beijing The Press of People's Communications 1981 [曾思伟, 李鸿琨. 泥石流地区公路工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1981]
- [3] Li Deji Theory and Practice for Hazard Reduction of Debris Flow [M]. Beijing Science Press 1997 184~185 [李德基. 泥石流减灾理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 1997 184~185]
- [4] Shen Shoudang Zhang Meng Li Fuxiang Debris Flow along the Railway in China [A]. In Proc of the International Symposium on Debris Flow and Flood Hazard, Volume A [C]. Beijing Earthquake Press 1991: 1~2 [沈寿长, 张盟, 李福祥. 中国铁路沿线泥石流 [A]. 见: 泥石流及洪水灾害防御国际学术讨论会论文集, A 卷 [C]. 北京: 地震出版社, 1991 1~12]
- [5] Zhou Bifan, Li Deji Luo Defu et al Guide to Prevention of Debris Flow [M]. Beijing Science Press 1991: 125~129 [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 125~129]

# Experimental Study on the Relationships between the Velocity of Debris Flow and Structure of the Dongchuan Debris Flow Channel

HUANG Hai<sup>1,2</sup>, MA Dongtao<sup>1,3</sup>, WANG Xianlin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes the Chinese Academy of Sciences Chengdu 610041, China)

**Abstract** The debris flow velocity is one of important parameters to describe the transport capacity, deposition and erosion damage of debris flow channel. The Dongchuan debris flow channel is the most widely used type of channel with the characteristic of soft foundation energy dissipation in China, which is created by pre-scholars in the long time practice of debris flow mitigation. For the Dongchuan Channel, the threshold and gradient are two key factors to control the movement of debris flow in channel. By using a dynamic experimental system of debris flow, a series of indoor model tests on debris flow passing through channel with different threshold parameters are carried out. The follow test results are drawn: (1) When the spacing of threshold increase from 40 cm to 60 cm, the velocity is increased first and then reduced, it reaches maximum when the spacing of threshold is 50 cm; (2) The relationship between the height of threshold and velocity is very complex. When the threshold spacing and gradient change, the relationship would change too; (3) The relationship between the gradient and the velocity of debris flow is in positive correlation; (4) One formula has derived to express the relationship between the ratio of the threshold spacing and height  $N$  and the velocity of debris flow  $V$  from testing, which is  $V = 0.034 \sqrt{N} + C$ , where  $C$  is a constant number, which is varying in 1.01~1.41 and confined by gradient of the debris flow channel.

**Key words** Dongchuan channel, velocity, debris flow, threshold, gradient.