

# 泥石流缝隙坝对龙头泥砂体积浓度变化影响试验研究

吕娟<sup>1,2</sup>, 韩文兵<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 广西华蓝设计(集团)有限公司, 南宁 530011)

**摘要:** (1) 通过前人研究成果及野外调查和预备试验, 对泥石流龙头泥砂体积浓度变化影响因子进行分析, 写出了其无因次关系式, 并根据试验结果, 建立了泥石流缝隙坝泥砂体积浓度比的多元回归关系式; (2) 试验发现: 在相同的水槽坡度和泥砂粒径组成的条件下, 泥石流过坝前后的泥砂体积浓度比会受到切口密度、相对切口宽度和相对切口深度的影响, 均呈现正相关的关系。

**关键词:** 缝隙坝; 泥石流; 泥砂体积浓度

**中图分类号:** P642. 23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2009)02-0068-04

## Experiment on Variety of Surge Sediment Volume Concentration with Debris Flow Passing Through Silt Dam

L ÜJ uan<sup>1,2</sup>, HAN Wen-bing<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Chengdu Mountain Hazards and Environment of CAS, Chengdu 610041, China; 3. Guangxi Hualan Design & Consulting Group, Nanning 530011, China)

**Abstract:** According to the results of previous studies and field investigations and preliminary tests, the affected factors of surge volume concentration of debris flow are analyzed and the non-dimensional relationship is deduced. In addition, the multi-analysis regression equation is established according to experiment results. The results also indicated that sediment volume concentration ratio is subject to incision density ( $b'/B$ ), the relative width of incision ( $b'/d_{95}$ ) and relative depth of incision ( $h_e/H_e$ ), the impact showed a positive correlation relationship at the same flume slope and sediment size distribution.

**Key words:** silt dam; debris flow; sediment volume concentration

泥石流是山区特有的一种突发性灾害现象。它常发生在山区小流域, 是一种含有大量泥砂石块和巨砾的固液两相流体, 是地质、地貌、水文、气象、土壤、植被等自然因素和人为因素综合作用的结果<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 全球性的气候变化异常, 灾害性天气频繁, 随着西部大开发战略的实施和山区社会经济的不断发展以及不合理的人类活动, 致使泥石流灾害日益频繁, 灾害造成的损失更加严重, 对人民生命财产、国民经济基础设施等构成严重威胁。因此, 当前我国对于泥石流灾害研究, 应更加关注防灾减灾工作。

泥石流灾害防治措施一般分为工程措施和非工程措施, 工程措施主要包括排导工程、拦挡工程、停淤工程、渡槽工程等; 非工程措施主要是对泥石流成灾进行预防, 包括生物措施、灾害预警、社会保险、土地政策等。缝隙坝是泥石流拦挡工程的一种形式, 在国内外泥石流防治工程中应用比较广泛<sup>[2]</sup>。然而目前缝隙坝的设计多以设计者的经验来确定参数, 缺乏足够的依据。因此, 泥石流缝隙坝的拦砂性能, 是当前迫切需要解决的关键问题之一。本文主要通过试验方法探讨缝隙坝对泥石流龙头泥砂体积浓度变化影响。

\* 收稿日期: 2008-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(40830742)

作者简介: 吕娟(1963-), 女, 山东稷山人, 高级实验师, 主要从事泥石流实验研究。E-mail: ljjuan@imde.ac.cn

## 1 泥石流龙头泥砂体积浓度变化影响因素分析

根据前人研究成果及野外调查和预备试验,对泥石流龙头泥砂体积浓度变化影响因子进行分析。

泥石流坝前泥砂体积浓度  $C_{da}$  与沟床比降、泥砂粒径组成等因素相关,可用高桥保饱和泥砂体积浓度的理论公式(1)来表征;泥砂流通过坝体后的泥砂体积浓度  $C_{db}$  的关系式可写为式(2)。

$$C_{da} = \frac{\tan \alpha}{(s - \rho) (\tan \alpha - \tan \beta)} \quad (1)$$

$$C_{db} = f(b, \rho, B, d_r, h_s, H_e, C_{da}) \quad (2)$$

式中:  $\tan \alpha$  ——动摩擦系数;  $\tan \beta$  ——水槽坡度;  $s$  ——固体泥砂颗粒和水体的密度;  $b$  ——切口宽度;  $B$  ——总切口宽度;  $B$  ——水槽宽度;  $d_r$  ——泥砂代表粒径,本研究以泥砂特征粒径  $d_{95}$  ——代表粒径;  $h_s$  ——切口深度;  $H_e$  ——有效坝高(缝隙坝  $H_e = h_s + h_c$ )。式(2)又可写为无因次关系式。

$$R = \frac{C_{db}}{C_{da}} = f(b/d_{95}, b/B, h_s/H_e) \quad (3)$$

式中:  $R$  ——泥砂体积浓度比;  $b/d_{95}$  ——相对切口开度,反映泥石流泥砂颗粒通过坝体切口的难易程度;  $b/B$  ——坝体切口密度,表征泥石流颗粒通过坝体的几率,其比值越大,可供泥砂通过的面积愈广,故泥砂通过的几率就越高;  $h_s/H_e$  ——相对切口深度<sup>[3]</sup>。

## 2 试验设备及条件

### 2.1 试验设备

试验在中国科学院成都山地灾害与环境研究所泥石流动力学试验室内进行,设备主要由水箱(前端有闸门)、玻璃水槽、提升装置 3 部分组成。水槽长 6 m,宽 20 cm,高 40 cm,实测纵比降变化范围在 0°~21°(图 1)。

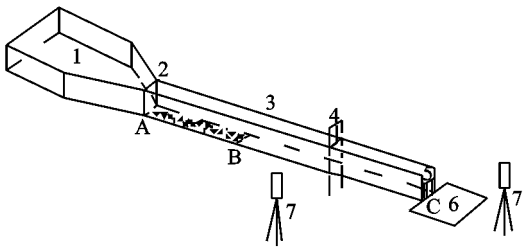
### 2.2 试验条件及方法

2.2.1 试验用砂 试验用砂是由蒋家沟泥石流物料筛分而成,小于 0.5 mm 部分配制成 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的泥浆,泥浆颗粒组成曲线见图 2。大于 0.5 mm 小于 20 mm 的泥砂颗粒铺设水槽(见图 1)中断面 A 至 B 段,铺砂高度 10 cm,试验前加水使其饱和。图 3 为水槽铺砂粒径组成曲线。

2.2.2 坝体模型 坝体模型见图 4。

2.2.3 水槽试验段布置 图 1 为本试验水槽示意图,图中断面 A 至断面 B 为泥石流形成段,形成段流

量是由上游水箱配合阀门控制,模拟溃决型洪水,自 A 断面进入水槽内冲刷水槽上游段铺设的泥砂,使其充分混合形成泥石流流下,断面 B 至断面 C 为试验流通观察段,各种缝隙坝模型设置于断面 C 处。



1 - 水箱;2 - 闸门;3 - 玻璃水槽;4 - 提升装置;5 - 坝体模型;6 - 尾料池;7 - 数码摄像机

图 1 水槽示意图(侧视)

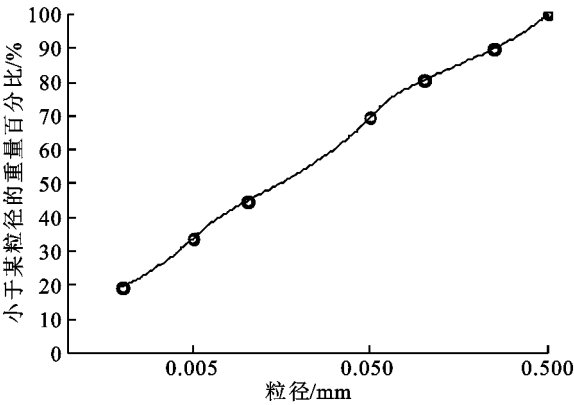


图 2 泥浆颗粒组成曲线

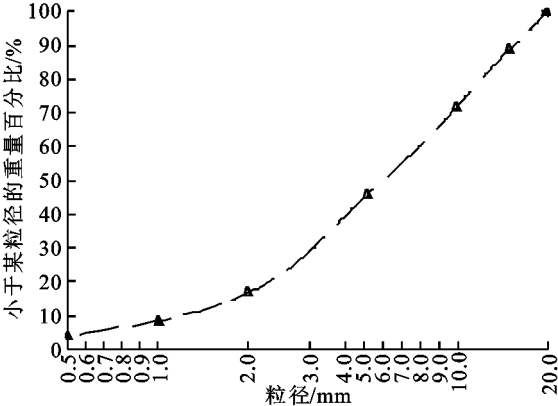


图 3 水槽铺砂粒径组成曲线

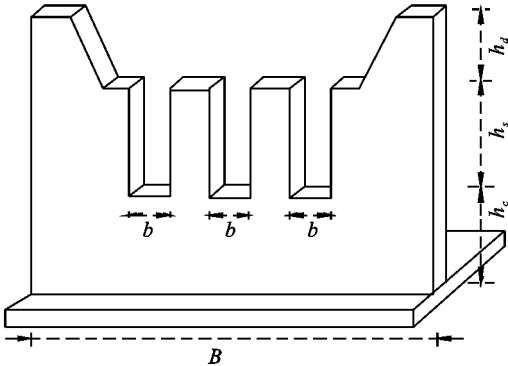


图 4 缝隙坝模型示意图

表 1 坝体模型与试验条件一览表

试验类别	试验参数	泥石流参数值
未设坝	水槽坡度 ( $S_0$ )	9°,12°,15°
	粒径组成	一种 (0.5~20) mm
缝隙坝	水槽坡度 ( $S_0$ )	9°,12°,15°
	粒径组成	一种 (0.5~20) mm
	切口宽度 $b'$ /cm	1.0,1.5,2.0,2.5, 3.0,3.5,4.0
	切口密度	0.25,0.30,0.40,0.50, 0.60,0.70,0.80
	坝翼高度 $h_d$ /cm	4.0
	底部高度 $h_c$ /cm	2.0,6.0,10.0
	切口深度 $h_s$ /cm	6.0
	坝体宽度 $B$ /cm	20

表 2 量测项目及方法

项 目	方 法
泥深	水槽侧面贴透明格子纸 (1 cm 方格), 同时利用摄像机录制试验过程, 读出泥深
龙头泥砂体积浓度	采用取样称重法计算, 龙头浓度以试验前 4 s 的泥石流流体浓度计算
泥石流表面流速	浮标法

表 3 部分试验结果一览表

$S_0$	$b'/d_{95}$	$b'/B$	$C_{da}$	$C_{db}$	$R$
0.1584	0.56	0.25	0.474	0.366	0.772
0.1584	0.84	0.30	0.474	0.388	0.820
0.1584	1.13	0.40	0.474	0.412	0.868
0.1584	1.41	0.50	0.474	0.425	0.898
0.1584	1.69	0.60	0.474	0.433	0.914
0.1584	1.97	0.70	0.474	0.442	0.932
0.1584	2.25	0.80	0.474	0.452	0.954
0.2126	0.56	0.25	0.568	0.427	0.751
0.2126	0.84	0.30	0.568	0.433	0.763
0.2126	1.13	0.40	0.568	0.453	0.797
0.2126	1.41	0.50	0.568	0.472	0.831
0.2126	1.69	0.60	0.568	0.477	0.841
0.2126	1.97	0.70	0.568	0.509	0.896
0.2126	2.25	0.80	0.568	0.529	0.931
0.2679	0.56	0.25	0.675	0.516	0.765
0.2679	0.84	0.30	0.675	0.533	0.789
0.2679	1.13	0.40	0.675	0.548	0.812
0.2679	1.41	0.50	0.675	0.570	0.845
0.2679	1.69	0.60	0.675	0.593	0.878
0.2679	1.97	0.70	0.675	0.622	0.921
0.2679	2.25	0.80	0.675	0.639	0.946

$$R = 1.054 (b'/d_{95})^{0.053} (b'/B)^{0.118} (h_s/H_e)^{0.238} \quad (4)$$

$r^2 = 0.80$ , 具有较高的相关性, 其各无因次变量

本试验主要探讨泥石流通过坝体前后的龙头泥砂体积浓度的变化, 而过坝前的龙头泥砂体积浓度由未设置坝体时对照试验获得。

2.2.4 量测项目及方法 量测项目及方法见表 2。

3 泥石流龙头泥砂体积浓度变化分析

3.1 试验结果

在本试验条件下, 其过坝龙头泥砂体积浓度变化在 2%~38% 之间, 可见可以通过缝隙坝体条件的调配, 来削减泥石流龙头泥砂体积浓度, 改变泥石流性质, 从而达到减轻对下游造成灾害的目的。

3.2 试验结果分析

根据试验结果和公式 (3) 进行多元回归分析, 得出了泥石流过缝隙坝泥砂体积浓度比的多元回归关系式如式 (4)。

的变化范围为:  $b'/d_{95} = 0.56 \sim 2.23$ ;  $b'/B = 0.25 \sim 0.8$ ;  $h_s/H_e = 0.375 \sim 0.75$ , (其中  $H_e = h_s + h_c$ )。

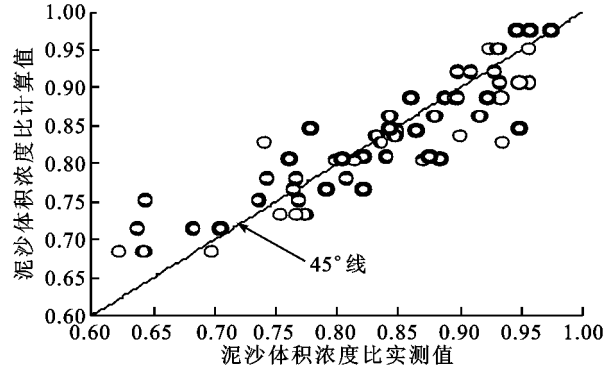


图 5 泥石流过缝隙坝龙头泥砂体积浓度比实测值与计算值对比

图 5 为泥砂体积浓度比的实测值和利用公式 (4) 的计算值对比图, 可以发现数据点基本均匀的分布在 45 线的两侧, 说明计算值具有较高的准确性。泥石流通过坝体前后的泥砂体积浓度比与切口密度、相对切口宽度及相对切口深度等具有高度的相关性, 根据式 (4) 可以归纳分析出以下几条重要规律:

(1) 泥石流过坝前后的泥砂体积浓度比在相同的水槽坡度和泥砂粒径组成的条件下, 会受到切口密度 ( $b'/B$ ) 改变而影响, 其切口密度越大, 表示泥石流流过坝的机率越大, 泥石流过坝后的泥砂体积浓度也就越大, 相对的泥砂体积浓度比也就越大, 呈现正相关的关系。

(2) 泥石流过坝前后的泥砂体积浓度比在相同的水槽坡度和泥砂粒径组成的条件下,会受到相对切口宽度 ( $b/d_{95}$ ) 改变而影响,其相对切口宽度越大,表示泥石流过坝的受阻程度越低,泥石流越容易通过坝体,相对的泥砂体积浓度比也就越大,呈现正相关的关系。

(3) 泥石流过坝前后的泥砂体积浓度比在相同的水槽坡度和泥砂粒径组成的条件下,会受到相对切口深度 ( $h_s/H_c$ ) 改变而影响,其相对切口深度越大,表示增加了泥石流过坝的面积从而增大了其过坝的机率,故相对切口深度越大,泥砂体积浓度比也就越大,呈现正相关的关系。

4 结 论

(1) 通过前人研究成果及野外调查和预备试验,

对泥石流龙头泥砂体积浓度变化影响因子进行分析,写出了其无因次关系式。通过试验结果的多元回归分析,建立了泥石流缝隙坝泥砂体积浓度比的多元回归关系式。

(2) 通过试验发现,在相同的水槽坡度和泥砂粒径组成的条件下,泥石流过坝前后的泥砂体积浓度比会受到切口密度、相对切口宽度和相对切口深度的影响,均呈现正相关的关系。

参考文献:

[1] 唐邦兴. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2000:1-10.  
[2] 连惠邦,柴钊武,柯志宗. 梳子坝对泥石流的防治效率[J]. 水土保持研究,2001,8(1):52-58.  
[3] 韩文兵. 泥石流缝隙坝拦砂性能基础研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2007:1-72.

(上接第 67 页)

[8] Freer J K, Beven K J. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE Approach [J]. Water Resources Research, 1996, 32(7): 2161-2173.  
[9] Beven K J, Freer J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology [J]. Journal of Hydrology, 2001, 249: 11-29.  
[10] 莫兴国,刘苏峡. GLUE 方法激起在水文不确定性分析中的应用[C]//夏军. 水问题的复杂性与不确定性研究与进展,北京:中国水利水电出版社,2004:143-150.  
[11] 熊立华,郭生练. 三水源新安江模型异参同效现象的研究[C]//夏军. 水问题的复杂性与不确定性研究与进展,北京:中国水利水电出版社,2004:151-155.  
[12] 黄国如,解河海. 基于 GLUE 方法的流域水文模型的不确定性分析[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2007,35(3):137-143.  
[13] 李胜,梁忠民. GLUE 方法分析新安江模型参数不确定性的应用研究[J]. 东北水利水电,2006,24(2):31-34.  
[14] 舒畅,刘苏峡,莫兴国,等. 新安江模型参数的不确定性分析[J]. 地理研究,2008,27(2):343-352.  
[15] Tukey J W. A survey of sampling from contaminated distribution in contributions to probability and statistics[M]. Stanford, Calif:Stanford University Press, 1960.  
[16] Andrews D F. A robust method for multiple linear regression[J]. Technometrics,1974,16(4):39-45.  
[17] Hampel F R. Influence curve and its role in robust estimation[J]. JASA, 1974,69:1179-1186.  
[18] 周江文,黄幼才,杨元喜,等. 抗差最小二乘法[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1997.  
[19] 包为民,瞿思敏,黄贤庆,等. 水文系统抗差权函数分析与检验[J]. 清华大学学报,2003,43(8):1127-1129.  
[20] 包为民,嵇海祥,胡其美,等. 抗差理论及在水文学中的应用[J]. 水科学进展,2003,14(4):528-532.  
[21] 包为民,瞿思敏,李清生,等. 遥测系统降雨观测误差估计方法研究[J]. 水利学报,2003(4):30-34.  
[22] 瞿思敏,包为民,石朋,等. AR 模式误差修正方程参数抗差估计[J]. 河海大学学报,2003,31(5):497-500.  
[23] 瞿思敏,包为民,石朋,等. 降雨观测误差修正方法研究[J]. 武汉大学学报:工学版,2005,38(6):32-34.  
[24] 瞿思敏,包为民,石朋,等. 降雨观测误差抗差估计方法比较研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):51-55.  
[25] 张正康,胡凤彬,廖劲红,等. 小河配套雨量站网密度分析[J]. 水文,1997(增刊):20-23.