

文章编号: 1009-3087(2013)01-0008-06

## 基于小波分析的泥石流冲击力信号处理

唐金波<sup>1,2</sup>, 胡凯衡<sup>1,2\*</sup>, 周公旦<sup>1,2</sup>, 陈华勇<sup>1,2</sup>, 朱兴华<sup>1,2,3</sup>, 马超<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 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 对于防治工程的设计, 泥石流冲击力是一个很重要的参数, 其冲击力的大小要准确地进行估计是很困难的, 并且由于泥石流的破坏性很强, 很难在野外进行冲击力的测量。为了减小模型尺度带来的影响, 利用大型水槽进行泥石流冲击力实验, 并对得到的冲击力信号进行小波降噪处理。通过比较降噪后重构的信号及降噪后的信号发现, 降噪后的泥石流冲击力信号可作为液相浆体的冲击力过程线。对采集到的泥石流冲击力数据分析后发现, 泥石流液相浆体的冲击力计算公式  $p = K\rho_1 v^2$  中的系数  $K$  接近于 0.5。

**关键词:** 泥石流; 冲击力; 小波分析; 信号降噪

中图分类号: TV147

文献标志码: A

## Debris Flow Impact Pressure Signal Processing by the Wavelet Analysis

TANG Jin-bo<sup>1,2</sup>, HU Kai-heng<sup>1,2\*</sup>, ZHOU Gong-dan<sup>1,2</sup>, CHEN Hua-yong<sup>1,2</sup>, ZHU Xing-hua<sup>1,2,3</sup>, MA Chao<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Lab. of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Inst. of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. Graduate Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the prevention and control of engineering design, the magnitude of debris flow impact force is a very important parameter and is difficult to be estimated and measured in the field. To reduce the influence of model scale, debris flow impact force experiment was carried out by large flume and the wavelet analysis was used to de-noise the debris flow impact signal. The results showed that the de-noised debris flow impact signal could be impact pressure of liquid phase slurry by comparing the reconstructed signal with de-noised signal. The analysis of debris flow impact pressure experiment data showed that the coefficient approaches 0.5 in the debris flow impact pressure formula  $p = K\rho_1 v^2$ .

**Key words:** debris flow; impact pressure; wavelet analysis; signal de-noising

“5·12”地震后, 由于地震作用导致了许多的山体滑坡、崩塌, 沟道内堆积了大量的松散堆积物, 为泥石流的形成提供了丰富的物源, 加上近年来全球气候变暖, 产生了很多极端暴雨天气, 使得泥石流发生的概率比地震之前大很多, 并且随着西部大开发的深入进行, 西部地区的灾害性泥石流也越来越

多。因此加强泥石流灾害的预警预防及其工程防治成了亟待解决的研究课题。由于泥石流爆发突然, 其运动过程极其复杂, 使得对泥石流冲击力的认识及其机理研究存在很大的困难<sup>[1]</sup>。

泥石流作为一种特殊的固液两相流体, 其运动机理是及其复杂的。根据泥石流物质组成的特点, 可将泥石流冲击力分成 2 部分, 一是流体动压产生的冲击力, 二是单个大石块对建筑物产生的撞击力<sup>[2]</sup>。Zhang<sup>[3]</sup>利用采集到的冲击力信号, 将泥石流流体冲击力和单个大石块的冲击力概化为 3 种形式: 矩形脉冲、尖峰型脉冲、锯齿型脉冲。它们分别对应流体动压冲击力、单个大石块冲击力、流体均匀动压力与不均匀动压力及大大小小石块撞击力相互叠加的结果。

然而, 由于泥石流爆发突然, 来势凶猛, 破坏力

收稿日期: 2012-11-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2011CB409902); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-05-01); 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所青年百人团队资助项目 (110900K235)

作者简介: 唐金波 (1986—), 男, 研究实习员, 硕士。研究方向: 泥石流运动机理。E-mail: jinbotang@imde.ac.cn

\* 通信联系人 E-mail: khhu@imde.ac.cn

极大,从野外直接采集得到泥石流的冲击力数据是非常困难的。胡凯衡等<sup>[4]</sup>通过在云南蒋家沟建立的泥石流冲击力野外测试装置和新研制的力传感器以及数据采集系统,采集到了不同泥深位置、长历时、波形完整的泥石流冲击力信号。对原始信号经过低通滤波处理后,对数据进行初步分析发现,在同等流速条件下,连续流的冲击力要比阵性流的冲击力大得多。但是在泥石流过后,由于测试装置和传感器被泥石流淤埋,后期没有再采集到野外泥石流冲击力数据。鉴于野外采集泥石流冲击力数据的困难,目前对泥石流冲击力的研究通常是利用水槽试验进行的<sup>[5-9]</sup>,比如陈洪凯等<sup>[8]</sup>针对沟谷泥石流,建立的泥石流冲击试验模型的试验。结果表明,当泥石流流体中的固相比比较小时,泥石流脉动特征显著,泥石流阵性流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。但是目前基于小型实验水槽进行的冲击力的实验研究,其结果可能会受到模型尺度的影响。为了减小模型尺度带来的影响,利用中国科学院东川泥石流观测与研究站的大型水槽进行了泥石流冲击力实验,在实验过程中通过泥石流对直杆构件的冲击,实时采集到了冲击力信号过程线。进一步对采集到的冲击力信号进行处理发现,由于采集到的信号存在噪音,很有可能会影响到信号数据的真实性及其下一步分析研究,因此对其进行降噪处理是得到真实信号并进一步进行分析的技术保障。而对于冲击力信号的处理,张玉萍<sup>[10]</sup>曾针对泥石流的冲击荷载,将小波降噪得到的平滑曲线作为水石流浆体的冲击过程线。但是其实验材料为清水加粗颗粒物,更像是含沙水流,与真实的泥石流差别很大,并且其水槽是基于小型实验水槽,受模型尺度的影响较大。另外, Hu 等<sup>[11]</sup>曾利用移动平均法对野外测量到的泥石流冲击力信号进行处理,得到了一条相对平滑的曲线,并以此作为泥石流液相浆体的冲击过程曲线。但是对于移动平均法的步长的选取存在很大的问题,通过比较后发现,当步长选取相对较短时,移动平均法得到的曲线的光滑性不是很好,而当步长选取较长时,得到的曲线虽然光滑性得到了保障,但是相对小波降噪得到的曲线的趋势明显向后移动。因此针对小型实验水槽带来的模型尺度的影响及利用移动平均法对泥石流冲击信号处理存在的不足,作者利用大型实验水槽进行了泥石流冲击力实验,并基于小波分析技术对采集到的冲击力信号进行了处理。

## 1 泥石流冲击力信号采集

由于考虑到尺度相似比问题,泥石流冲击力实验在位于中国科学院东川泥石流观测与研究站的大型实验水槽内进行,如图 1 所示,水槽长 47.3 m,宽 0.7 m,高 1.2 m,坡降为 20%。冲击力实验装置如图 2 所示,包括数据采集仪、放大器、称重力传感器、传输数据线及其计算机。



图 1 东川泥石流观测与研究站的大型实验水槽

Fig. 1 Large experiment flume at Dongchuan debris flow observation and research station



图 2 冲击力信号采集系统

Fig. 2 Impact pressure data collecting instrument, signal amplifier and weighing sensor

采集仪的数据采集频率为  $f = 2\ 000\ \text{Hz}$ ,传感器的最大量程为 20 kg,灵敏度为  $1.5 \pm 0.1\ \text{g/kPa}$ ,放大器的放大倍数选择为 1 000 倍。实验中,用于实验的材料取自著名的蒋家沟泥石流堆积扇上的泥石流堆积物,并在实验开始前,剔除大于 20 mm 的石块,其颗粒级配曲线如图 3 所示。在配制好实验材料后,将其堆放在大型实验水槽内,形成堵塞坝。然后对供水系统蓄水,待水深到达 50 cm 时,通过提拉闸门使其流向水槽,冲溃水槽中堆放的人工土石

坝形成泥石流。并在水槽下端距离出口 2 m 处安装冲击力传感器(见图 2),采集泥石流冲击力信号。在整个实验过程中,高速摄像机被用来捕捉泥石流撞击传感器时的流速和流深。

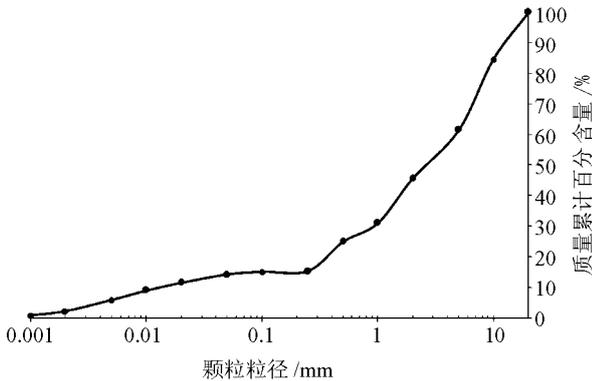


图3 实验用土的颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle size curve of experiment soil

实验共进行了 5 次,其中有 1 组清水冲击实验。实验数据表明实验的可重复性较强。图 4 为其中 1 组实验采集到的泥石流冲击力数据。

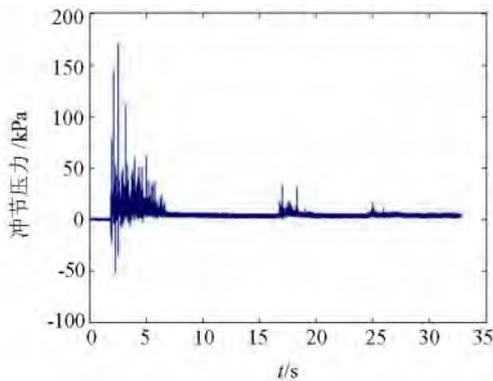


图4 采集到的泥石流冲击力数据

Fig. 4 Collected debris flow impact pressure data

## 2 泥石流冲击力信号处理

由于采集到的泥石流冲击力信号存在噪音,影响了信号的真实性,因此对信号进行降噪处理是很有必要的。将采用小波分析方法对采集到的冲击力信号进行小波降噪。小波分析方法是由短时 Fourier 变换发展起来的,是一种窗口大小即窗口面积固定,但其形状可改变时间窗和频率窗的时频局域化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,被誉为“数学显微镜”<sup>[12-13]</sup>。

小波变换的基本含义是,将 1 个基本小波函数  $\psi(t)$  做平移  $\tau$  后,在不同的尺度  $\alpha$  下与一个能量有限的信号即  $f(t) \in L^2(R)$  (即可平方可积) 作内积:

$$WT(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{\alpha} \right) dt \quad (1)$$

其中,  $WT(\alpha, \tau)$  为小波变换系数,  $\alpha$  为尺度因子,  $\tau$  为平移因子,  $\psi^*(t)$  为基本小波函数  $\psi(t)$  的共轭函数。在频域上改变  $\alpha$  值相当于对信号进行带通滤波,表现出频率局部化特性。因此,小波分析可以克服傅里叶变换分析的不足。

假设尺度函数  $\varphi(t)$  与小波函数  $\psi(t)$  组成的多分辨率尺度空间和小波空间分别为  $\{V_j\}_{j \in Z}$  与  $\{W_j\}_{j \in Z}$ , 它们的标准正交基分别为  $\{\varphi_{j, \dots, k}\}_{k \in Z}$  和  $\{\psi_{j, \dots, k}\}_{k \in Z}$ , 则有:

$$f_j(t) = \sum_{k \in Z} C_{j, k} \varphi_{j, k}(t) \quad (2)$$

其中,  $f_j(t) \in V_j$ ,  $C_{j, k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_j(t) \varphi_{j, k}(t) dt$ 。

由于采集到的冲击力信号  $\{f(k)\}_{k=1, 2, \dots, M}$  ( $M$  为每次采集的冲击力数据的数量) 是离散数据, 并且假设  $f(k) = C_{0, k}$ , 即  $f(k) \in V_0$ , 那么信号  $\{f(k)\}$  的小波变换为:

$$\begin{cases} C_{j, k} = \frac{1}{2} \sum_{n \in Z} C_{j+1, n} h_{n-2k} \\ D_{j, k} = \frac{1}{2} \sum_{n \in Z} D_{j+1, n} g_{n-2k} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $h_k$  为低通滤波器系数,  $g_k$  为高通滤波器系数, 且  $g_k = (-1)^k h_{1-k}$ 。

对于信号的重构过程则运用式(4)计算:

$$C_{j, n} = \sum_{k \in Z} C_{j-1, k} h_{n-2k} + \sum_{k \in Z} D_{j-1, k} g_{n-2k} \quad (4)$$

运用小波分析对实验中采集到的泥石流冲击力信号进行处理, 其基本步骤如下:

1) 根据需要选取合适的小波基, 确定小波分解的层数  $N$ , 对采集到的信号进行  $N$  层分解。表达式为:

$$f(t) = A_N f + D_N f + D_{N-1} f + \dots + D_1 f \quad (5)$$

其中,  $A_N f$  为逼近信号,  $D_i f$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 为细节信号。

2) 对分解后的每一层高频系数选择合适的阈值进行阈值量化处理, 消除高频噪声。

3) 根据小波分解的第  $N$  层的低频系数和经过量化处理的高频系数进行小波重构。此过程为小波逆变换。表达式为:

$$A_N f + D_N f + D_{N-1} f + \dots + D_1 f = f(t) \quad (6)$$

对于小波函数的选取, 目前并没有统一的理论方法, 一般是根据经验或者不同的实际情况进行选取<sup>[13]</sup>。经过选取不同的小波基对采集到的冲击力

信号进行处理后发现,由于 Daubechies( Db) 小波基具有正交性,对信号的重构可获得较好的平滑效果。采用 Db4 对信号进行处理,并将信号分解为 8 层,即  $N = 8$ ,每 1 层的细节信号见图 5。逼近信号  $a_8$  和去噪后重构的信号见图 6 和 7。通过对采集到的冲击力信号进行降噪后发现,其降噪后的冲击力过程线相对平滑,见图 6(a)。而对清水冲击力信号的处理发现,由于清水中不存在固相颗粒,因此通过小波降噪后的清水冲击力信号去除了噪声和水流脉动的影响,其数据与原始信号的数据相差很小,且相对平滑,见图 8。

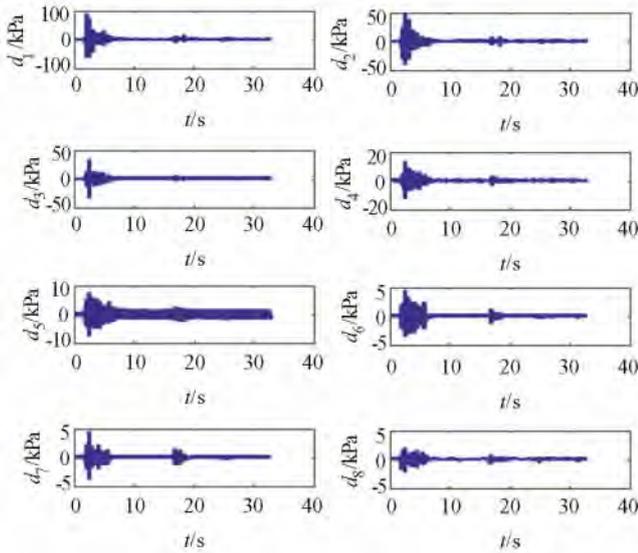
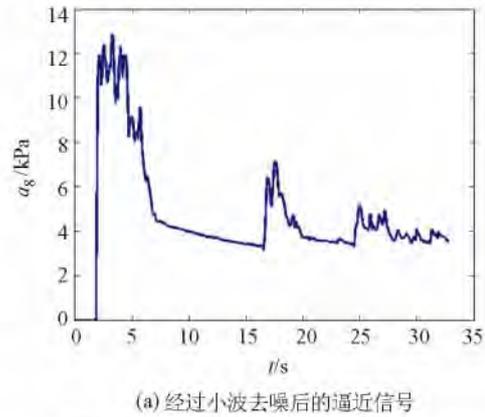


图 5 原始冲击力信号进行小波分解后的每 1 层细节信号  
Fig. 5 Detailed signals after decomposing original impact pressure by the wavelet

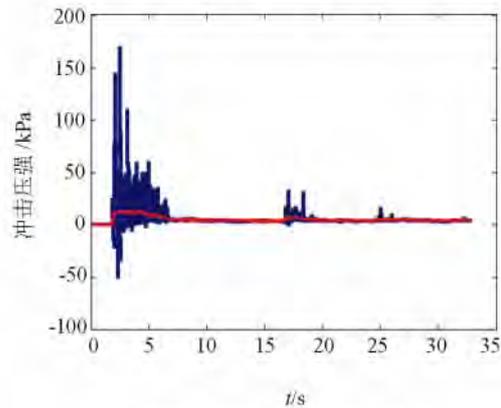
另一方面,由于泥石流是一种特殊的固液两相流体,液相为泥石流中细颗粒与水混合形成的浆体,其得到的冲击力曲线应相对平滑且连续<sup>[3]</sup>,而泥石流中的大颗粒组成了泥石流的固相,具有离散性和随机跳跃性,使得不论是在野外测量到的泥石流冲击力信号,还是通过大型水槽实验得到的泥石流冲击力信号都含有很多离散的瞬时脉冲信号(图 4)。

为了去除冲击力信号中的噪声, Hu 等<sup>[11]</sup>曾利用移动平均法对野外测量到的泥石流冲击力信号进行处理,得到了一条相对平滑的曲线,并以此作为泥石流液相浆体的冲击过程曲线。通过比较清水冲击力信号利用小波降噪和移动平均法得到的平滑曲线(图 9)发现,利用 2 种方法处理泥石流冲击力的原始信号得到的曲线基本上是一致的。但是对于移动平均法的步长的选取存在很大的问题:当步长选取相对较短时,移动平均法得到的曲线的光滑性不是

很好,而当步长选取较长时,得到的曲线虽然光滑性得到了保障,但是相对小波降噪得到的曲线的趋势明显向后移动,并且移动平均法并没有明确解释其得到的曲线作为液相浆体冲击过程的物理意义。



(a) 经过小波去噪后的逼近信号



(b) 重构后的泥石流冲击力信号的比较图, 红线为逼近信号

图 6 经过小波去噪后的逼近信号和重构后的泥石流冲击力信号与逼近信号的比较图

Fig. 6 Approximation signal by de-noised original and comparing the reconstructed debris flow signal with de-noised signal

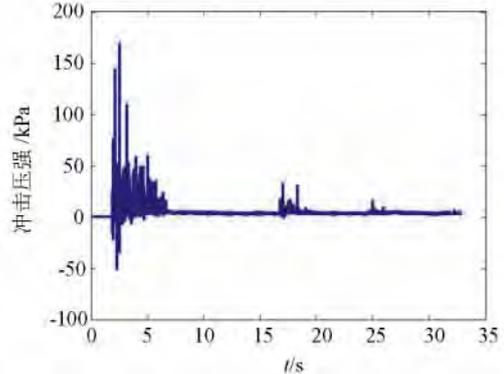


图 7 经过小波去噪重构后的冲击力信号  
Fig. 7 Reconstructed signal after de-noising original by wavelet

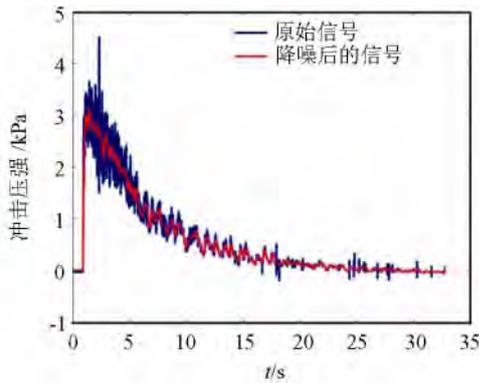


图 8 重构后的清水冲击力信号与逼近信号的比较图, 红线为逼近信号

Fig. 8 Comparing the reconstructed water signal with de-noised signal red curve is approximation signal

对于泥石流冲击信号的小波降噪,一方面去除了噪声和浆体脉动的影响,另一方面通过分析小波降噪的细节信号发现(图 5),小波降噪还消除了由于固相大颗粒撞击产生的脉冲信号,降噪之后同样得到了相对平滑且连续的曲线。因此可以考虑将降噪后的泥石流冲击信号作为泥石流液相浆体的冲击力曲线。由此利用降噪后重构的冲击力信号和降噪后的冲击力曲线(泥石流液相冲击曲线)就可以分离出泥石流固相的冲击力信号。

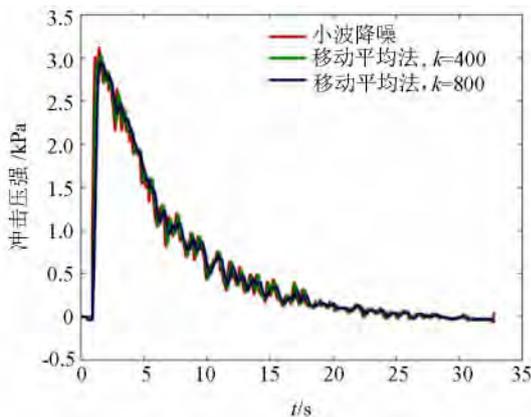


图 9 小波降噪和移动平均法对清水冲击信号处理的比较  
Fig. 9 Comparing wavelet de-noising with moving average for water impact pressure signal

### 3 实验结果分析

对于泥石流的冲击力,一般认为由液相浆体的流体动压力和石块的冲击力组成,而液相浆体冲击力一般可由式(7)进行计算:

$$p = K\rho_f v^2 \quad (7)$$

分析采集的冲击力信号发现,泥石流的龙头冲击力达到最大,因此为了计算泥石流冲击力,在实验

过程中采集了泥石流龙头的流速和容重,见表 1。

表 1 实验得到的流速、容重、 $p_{\max}$  及  $K$  的值

Tab. 1 Velocity, density,  $p_{\max}$  and the value of  $K$

实验序号	龙头流速 $v$ / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	龙头容重 $\rho_m$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	降噪后的 $p_{\max}$ /Pa	$K =$ $p_{\max} : \rho_f v^2$
第 1 次	5.50	1 512.30	12 718.25	0.343 315
第 2 次	5.43	1 690.63	13 306.25	0.338 79
第 3 次	5.12	1 580.80	16 472.5	0.497 295
第 4 次	5.56	1 534.43	18 638.5	0.487 433
第 5 次(清水)	5.00	1 000	12 467.0	0.498 68

另外,如第 2 节所述,利用小波分析技术对泥石流冲击冲击力信号进行降噪后得到的光滑曲线可作为泥石流液相浆体的冲击过程曲线,提取其最大值  $p_{\max}$ ,见表 1。

而泥石流作为一种很复杂的固液两相流体,其容重由式(8)计算:

$$\rho_m = C_w \rho + (1 - C_w) \rho_s \quad (8)$$

其中,  $\rho_m$  为泥石流容重,  $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$  为清水的容重,  $\rho_s = 2\,650 \text{ kg/m}^3$  为固体颗粒的容重,  $C_w$  为泥石流中水的体积含量。由式(8)可以根据采集到的泥石流容重计算出泥石流中水的体积为:

$$C_w = \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_s - \rho} \quad (9)$$

由于泥石流液相浆体是由细颗粒( $d < 2 \text{ mm}$ )与水混合组成的混合物<sup>[14]</sup>,假设细颗粒含量在总的固体颗粒含量中所占的比例为  $X$ ,那么泥石流液相浆体的容重为:

$$\rho_f = \frac{C_w \rho + X(1 - C_w) \rho_s}{C_w + X(1 - C_w)} \quad (10)$$

通过分析 Hu 等<sup>[11]</sup>在野外得到的泥石流样品发现,2 mm 以下的颗粒含量在 28% ~ 34% 之间,平均为 31%。而通过大型水槽实验得到的泥石流样品,固体颗粒级配曲线见图 10,其表明 2 mm 以下的细颗粒含量在 30% ~ 40% 之间。因此由式(9)和(10)得到了泥石流浆体的容重  $\rho_f$ 。结合试验中测到的龙头流速和冲击力,就可以算出泥石流浆体冲击力计算公式中的系数  $K$ 。结合大型水槽实验得到的冲击力数据和野外测得的冲击力数据(图 11),通过拟合式(7)得到  $K = 0.475 1$ ,接近于 0.5,与流体力学中的流体动压  $p = \frac{1}{2} \rho_f v^2$  很接近<sup>[1]</sup>,进一步验证了将经过小波降噪后得到的冲击力过程线作为泥石

流液相浆体的冲击力过程线的可行性。

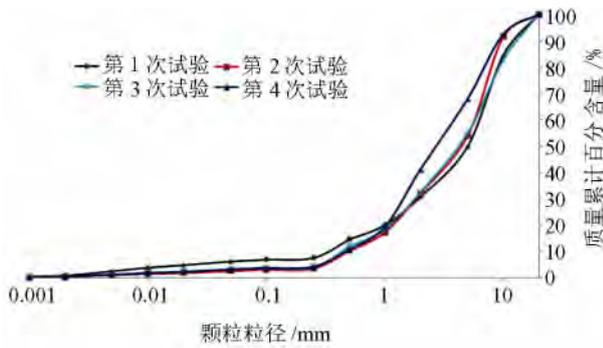


图 10 大型水槽实验得到的泥石流样品的颗粒级配曲线  
Fig. 10 Debris flow particle size curves in the large experiment flume

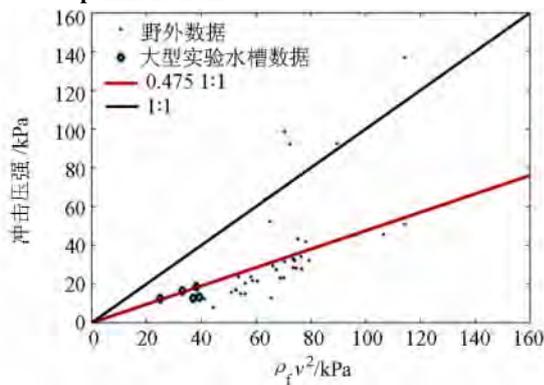


图 11 野外泥石流和大型水槽实验的液相浆体的最大冲击力与  $\rho_r v^2$  的比较  
Fig. 11 Maximum liquid phase slurry pressure versus  $\rho_r v^2$  for field debris flow and large flume debris flow

#### 4 结 论

利用小波分析技术对采集到的冲击力信号进行处理, 将小波降噪后的平滑曲线作为泥石流液相浆体的冲击力过程线是可行的。结合大型水槽实验得到实验数据与 Hu 等<sup>[11]</sup>在野外采集到的泥石流数据进行分析发现, 泥石流液相浆体的冲击力计算公式  $p = K\rho_r v^2$  中的系数  $K = 0.475$  接近于 0.5, 与流体力学中的流体动压  $p = 0.5\rho_r v^2$  很接近, 因此泥石流液相冲击力的计算公式可近似表述为  $p = 0.5\rho_r v^2$ 。

参考文献:

[1] Liu Leiji, Wei Hua. Study on debris flow impact force [J]. Journal of Sichuan Union University: Engineering Science Edition, 1997, 1(2): 99 - 102. [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.]

[2] Mitsuyama T. Evaluation of impact of debris flow on check dams [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control

Engineering, 1979, 32(1): 40 - 49.

[3] Zhang S. A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China [J]. Natural Hazards, 1993(7): 1 - 23.

[4] Hu Kaiheng, Wei Fangqiang, Hong Yong, et al. Field measurement of impact force of debris flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2813 - 2819. [胡凯衡, 韦方强, 洪勇, 等. 泥石流冲击力的野外测量 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2813 - 2819.]

[5] Armanini A, Scotton P. On the dynamic impact of a debris flow on structure [C]//Armanini A, Masanori M. Recent developments on debris flows, lecture notes in earth sciences. Berlin: Springer, 1997: 208 - 226.

[6] Liu K F, Lee F C, Tsai H P. The flow field and impact force on a debris dam [C]//Proceeding of the 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, ASCE. New York, 1997: 737 - 746.

[7] Wei Hong. Experimental study on impact force of debris flow heads [J]. Chinese Railway Science, 1996, 17(3): 50 - 62. [魏宏. 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.]

[8] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Xian Xuefu, et al. Experimental model of debris flow impact features [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 114 - 119. [陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福, 等. 泥石流冲击特性模型试验 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 114 - 119.]

[9] Yang H, Wei F, Hu K, et al. Measuring the internal velocity of debris flows using impact pressure detecting in the flume experiment [J]. Journal of Mountain Science, 2011(8): 109 - 116.

[10] Zhang Yuping. Signal identification method to debris flow impaction [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. [张玉萍. 泥石流冲击信号识别方法研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.]

[11] Hu Kaiheng, Wei Fangqiang, Li Yong. Real-time measure and preliminary analysis of debris flow impact force at Jiangjia Ravine, China [J]. Earth Surface Process and Landforms, 2011, 36(9): 1268 - 1278.

[12] 刘明才. 小波分析及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[13] 张德丰. MATLAB 小波分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[14] 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.

(编辑 陈晓红)