

泥石流堵塞坝溃决模式实验^{*}

党超^{1,2,3}, 程尊兰^{1,2}, 刘晶晶^{1,2,3}

(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 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 100039)

摘要: 为了研究泥石流堵塞坝溃决的模式, 采用模型实验对堵塞坝溃决的过程进行模拟, 实验历时2个月, 共13组。实验中, 通过改变主沟的水力参数和坝体参数研究泥石流堵塞坝溃决的全过程, 并作了相关记录。通过对理论和实验数据的分析, 泥石流堵塞坝的溃决形式有3种: 冲刷溃决、有表面流的泥石流堆积体水力再启动、没有表面流的泥石流堆积体重力再启动。讨论了冲刷溃决中颗粒启动和有面流泥石流水力再启动的临界条件, 并分析了启动流速 u_0 和颗粒粒径 D 之间的关系; 分析了泥石流重力再启动时堵塞坝坡面破坏的一般形式和特征; 通过实验数据对不同溃决形式的溃决条件进行了验证, 结果比较吻合。

关键词: 模型实验; 泥石流; 泥石流堵塞坝; 溃决模式; 临界条件

中图分类号: P642.23. **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)04-0015-05

0 前言

在我国西部山区, 泥石流这种特殊的灾害时有发生, 而泥石流出沟口后又经常堵塞主河形成泥石流堵塞坝, 坝体溃决后产生强大的溃决洪水给下游带来很大的灾害。尤其是在西藏地区, 由于现代冰川的发育, 古冰碛物的厚度很大, 冰川和积雪消融速度快, 雪崩和冰湖溃决频繁, 经常发生大规模的泥石流堵塞主河的现象。林芝地区的培龙沟在1984和1985年连续爆发大规模泥石流, 堵断帕隆藏布, 形成了泥石流堵塞坝, 并在上游形成了一个长达6.5 km的湖区, 其最宽处超过200 m, 在2000年扎木弄巴堵塞坝溃决以前, G318公路在堵塞口附近被淹没在水面10 m以下, 培龙沟泥石流带来的大量固体物质淤塞河床, 使该段河床被整体抬高, 平均抬高约10 m, 目前残留的堵塞坝体物质仍高达 $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[1-2]。

对于泥石流堵河和土石坝的溃决, 许多学者已做了大量的研究。泥石流入汇主河的研究主要集中于堵河危险性判别指标^[3]和临界条件的研究^[4-8]; 土石坝的溃决, 特别是由滑坡形

成的土石坝的形成和溃决条件以及溃决洪水演进都做了大量的研究^[9-12]。但是, 对于泥石流这种特殊的流体入汇主河后形成的泥石流堵塞坝溃决的相关研究却很少, 本文通过理论分析和对实验现象的观测, 揭示了泥石流堵塞坝溃决的主要模式和溃决条件, 并通过实验数据进行了验证。

1 模型实验设计

1.1 模型平面布置

实验主河为单面钢化玻璃的混凝土水槽, 宽度40 cm, 长5 m, 坡度为5%, 整个模型实验区由三部分组成: 供流系统, 实验槽和集流装置。模型实验平面布置图见图1。

1.2 坝体模型参数

通过对西藏地区多次泥石流堵江及溃决事件的现场调查, 确定典型泥石流堵塞坝的主要特征值, 并参考多名专家的经验, 同时考虑实验场地的限制, 确定概化模型参数(表1)。而坝体模型砂的配制则是以培龙沟1985年堵塞坝物质级配为参考, 并取小于2 cm的粒径部分作为实验的模型砂, 其级配曲线如图2。

* 收稿日期: 2008-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771024); 交通部西部交通建设科技项目(2006 31879284)

作者简介: 党超(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事泥石流形成机理及其减灾防灾措施研究. dangchao@imde.ac.cn

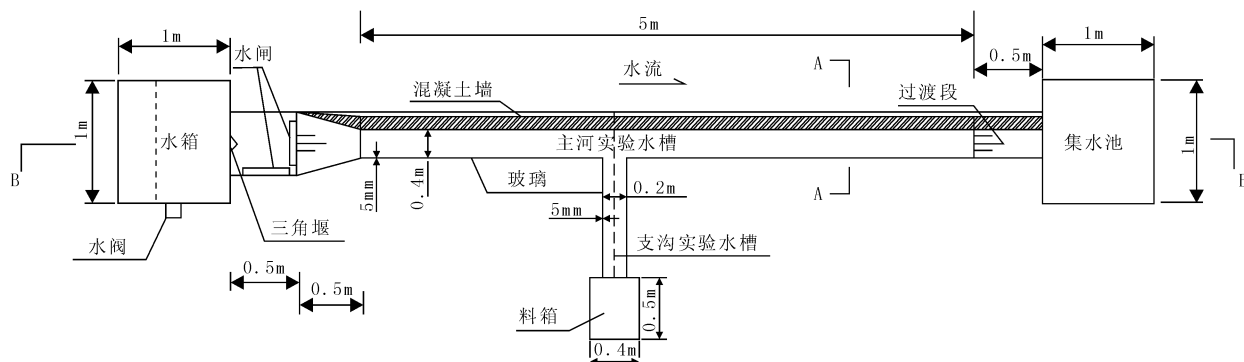


图1 实验平面布置图

表1 堵塞坝体概化参数

流量/ (L/s)	与堵塞 坝夹角	断面 形状	坝顶宽 /cm	下坡角	上坡角	坝顶纵 坡降	高/cm
0.5 ~ 1.5	90°	梯形	10 ~ 30	20°	25°	0°	20 ~ 30

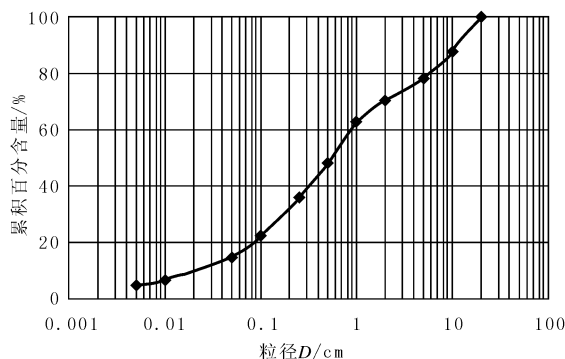


图2 模型砂级配曲线

2 溃决的模式研究

泥石流堵塞坝的溃决形式直接决定着溃决过程和溃决洪水的特征,通过堵塞坝溃决模型实验,对堵塞坝溃决的模式进行了初步的研究。根据坝体堆积物的泥沙运动特征,堵塞坝溃决模式包括三种基本模式:冲刷溃决、有表面流的泥石流堆积体水力再启动、没有表面流的泥石流堆积体重力再启动。

2.1 坝体冲刷溃决

通过实验发现,堵塞坝溢流之后,在堵塞坝的下游坡面产生坡面水流,在坡面水流的作用下,部分坡面物质(颗粒)开始启动。这些坡面上泥沙颗粒的运动方式主要是在坡面上滚动下滑,属于推移质。通过实验发现,在大部分组次中,泥石流堵塞坝溢流后在下游坡面上都出现了这种坡面物质以推移质形式启动的现象。

2.1.1 下游坡面颗粒启动条件分析

当水流经由松散泥沙颗粒组成的下游坡面时,

坡面泥沙将承受拖拽力和上举力。对于细颗粒来说,抗拒水流作用力的除了泥沙的重力外,还有相邻颗粒之间的内聚力^[13]。因为泥石流堵塞坝大部分为粘性泥石流堵塞河道形成的,因此堵塞坝堆积物中的粘粒含量一般是比较高的,应该说研究过程中必须考虑物质中的内聚力。但是由于溢流后水流对坝体下游坡面的冲刷都发生在溃决初期,而且这种推移质形式的冲刷作用只发生在泥石流堆积物质表层,泥石流堆积物质的表层结构更加松散,所以可以忽略其内聚力。经过简化认为,泥石流堵塞坝下游坡面即将在坡面水流作用下启动的颗粒物质受力如下:水下的重力 W' 、颗粒物质受到的坡面的摩擦力 f ,水流的拖拽力 F_D 和水流的上举力 F_L ,如图3。

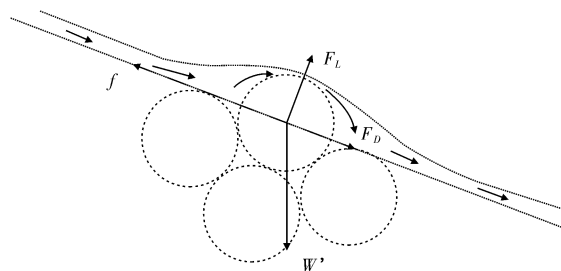


图3 坡面松散物质颗粒的受力示意图

水下重力: $W' = \frac{\pi}{6} D^3 (\gamma_s - \gamma)$, D 为颗粒的直径, γ_s 颗粒的容重, γ 为水的容重。

坡面摩擦力: $f = (W' \cos \theta - F_L) \tan \phi$, θ 为堵塞坝下游坡面角度, ϕ 为泥沙在水下的内摩擦角。

拖拽力: $F_D = C_D A \frac{\rho u_0^2}{2}$, C_D 为阻力系数, u_0 为作用在床面上的流速, A 为颗粒最大截面面积, ρ 为水的密度。

上举力: $F_L = C_L A \frac{\rho u_0^2}{2}$, 作用方向垂直坡面向上通过重心。 C_L 为上举力系数, u_0 为作用在床面

上的流速, A 为颗粒最大截面面积。

建立如图 3 坐标系, 分析堵塞坝过流时下游坡面泥沙颗粒的极限平衡条件。当水流方向与坝体轴线正交时, 颗粒启动的极限条件为在水流方向上达到力的平衡, 建立平衡方程:

$$F_D + W' \sin \theta = (W' \cos \theta - F_L) \tan \phi. \quad (1)$$

下游坡面粒径 $< D$ 的泥沙颗粒启动的条件为:

$$C_D A \frac{\rho u_0^2}{2} + \frac{\pi}{6} D^3 (\gamma_s - \gamma) \sin \theta \geq \left(\frac{\pi}{6} D^3 (\gamma_s - \gamma) \cos \theta - C_L A \frac{\rho u_0^2}{2} \right) \tan \phi. \quad (2)$$

2.1.2 颗粒启动临界流速计算

颗粒的粒径直接影响其在一定的溢坝流速下的启动, 实验中堵塞坝下游坡角 $\theta = 20^\circ$, 水下内摩擦角 $\phi = 29^\circ$, 最大粒径为 2 cm, 颗粒最大截面面积 3.14 cm^2 , $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 固体颗粒容重: $\gamma_s = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 水的容重: $\gamma = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, C_L 和 C_D 的取值与河床颗粒周围的绕流流态有关, 其具体数值又随 u_0 的取定方法不同而异, 这里 C_L 按照爱因斯坦及埃尔萨姆尼的实验成果取 0.178, C_D 的取值我们参考杰缅季夫的实验, 取 $C_D = 4 \times C_L = 0.712$, u_0 为作用在颗粒上的有效流速。经过计算得到颗粒粒径 D 与启动最小流速 u_0 的关曲线, 如图 4。

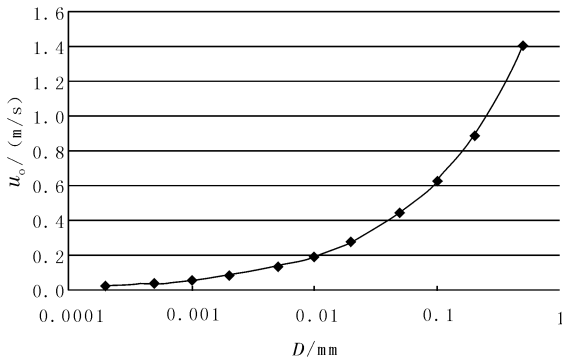


图 4 $D \sim u_0$ 关系曲线

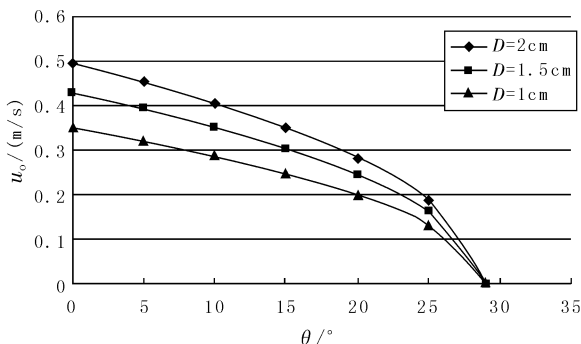


图 5 模型试验中颗粒启动临界坝体背水面坡角

由计算可以发现 2 cm 粒径的堵塞坝下游坡面物质, 在 0.28 m/s 的有效流速下即可启动。在实验中, 在 2 cm 颗粒启动时观测到的堵塞坝溢流后下游坡面上的流速为 0.35 m/s。计算结果与实验观测值接近。

2.1.3 堵塞坝体背水面坡度对颗粒启动的影响

坝体背水面的坡度变化范围 $0 \sim 29^\circ$, 其大小决定了某一粒径颗粒的启动流速。当其他参数不变, $D = 1 \text{ cm}$ 、 1.5 cm 、 2 cm 情况下, 坝体下游坡度对颗粒启动流速的影响, 如图 5。

颗粒启动临界流速随着坝体背水面坡度的增加而降低, 当 $\theta = 29^\circ$ 时, 即被水面的坡度等于堆积体内摩擦角时, 坝体处于极限平衡状态; 当 $\theta = 0^\circ$ 时, 其启动流速即为水平河床下的泥沙启动流速。在实验中, 溢流初期坝体下游坡面都出现了大颗粒启动, 但随着坝体在过坝水流的冲刷下逐渐降低高度, 使堵塞坝背水面坡角降低, 大于某一粒径的颗粒则不能启动, 逐渐出现粗化层。

2.2 水力作用下的再启动

泥石流堵塞坝是由泥石流堆积物堵塞河道后形成的天然坝体, 其最大的特点就是有泥石流堆积物质的特性, 泥石流堵塞坝溃决过程中, 最特殊的问题就是泥石流物质的再启动问题。通过我们对模型实验观测发现, 在溢坝表面流作用的水力泥石流再启动, 就是泥石流物质在坡面水流的渗透作用和拖拽力作用下, 一定厚度的堆积物重新开始运动向下游。

2.2.1 临界条件分析

堵塞坝下游坡面在水流的作用下出现泥石流的再启动, 是水体和重力作用下的堆积物中的剪应力 τ 和坡面堆积物中固体颗粒之间的阻力 τ_L 相互作用的结果。首先我们假定: 第一, 溢坝后形成的坡面流已经使坡面以下松散物质含水量达到饱和; 第二, 坡面物质内聚力可以忽略, 即不考虑其粘结力; 第三, 不考虑渗流力的作用。因此堵塞坝坡面以下 z 处的剪切力可以写为:

$$\tau = [S_{v*} (\gamma_s - \gamma) z + \gamma (z + h_0)] \sin \theta, \quad (3)$$

$$\tau_L = \cos \theta [S_{v*} (\gamma_s - \gamma) z] \tan \phi, \quad (4)$$

式中: S_{v*} 为堵塞坝物质中固体颗粒的体积比含量 h_0 为堵塞坝下游坡面上的流深, 其他参数同上。那么, 堵塞坝坡面以下 z_0 厚的物质层再启动的条件为:

$$\frac{d\tau}{dz} < \frac{d\tau_L}{dz}, \text{ 当 } z = z_0 \text{ 时 } \tau = \tau_L. \quad (5)$$

对于一般概念的泥石流, 运动中的固体颗粒

均匀分布在流层中,为此必须有一定厚度的表层以下的堵塞坝坡面堆积物都参加运动,亦即 $z_0 > kh_0$, 其中 k 取值为 $(0 \sim 1)$ [14,15]。

因此综合上述分析堵塞坝下游坡面出现表层厚度为 z_0 物质集体运动的条件为:

$$\frac{S_{v*}(\gamma_s - \gamma)}{S_{v*}(\gamma_s - \gamma) + \gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \tan \phi < \tan \phi < \frac{S_{v*}(\gamma_s - \gamma)}{S_{v*}(\gamma_s - \gamma) + \gamma} \tan \phi_0 \quad (6)$$

而当 $\tan \theta \geq \frac{S_{v*}(\gamma_s - \gamma)}{S_{v*}(\gamma_s - \gamma) + \gamma} \tan \phi$ 时,则会出现坝体整体启动的现象。

2.2.2 泥石流水力启动的临界坡度

坡面泥石流再次启动受到坝体背水面坡角的影响,通过实验,我们研究了坡面泥石流再次启动时堵塞坝背水面的临界坡角。第5组实验中,固体颗粒的体积比含量的最大: $S_{v*} = 0.75$ (其他实验值如表2),其他参数同上,则可以计算出当堵塞坝堆积物质的内聚力忽略的情况下,堵塞坝坡面在水流作用下启动的角度范围为: $\theta > 11.11^\circ$,其他的计算结果如表2。这也就是说在假定堆积物质忽略内聚力和完全饱和的情况下,坡角 θ 大于计算值时就可能会出现泥石流再启动。但是需要指出的是,并不是坝体背水面坡脚大于临界值就一定会出现这种溃决模式,其溃决模式还受到其他控制条件的影响,临界坡脚只是必要条件而非充分条件,实验中坝体的背水面坡度均为 20° ,但不是所有组次的实验中都出现了这种溃决模式(表2)。当然实际中 γ_s 、 S_{s*} 、 ϕ 的大小也有所差异,实际中由于泥沙的进入肯定有 $\gamma > 1$,则最小启动坡角还会有所降低。

表2 启动坡度及溃决类型统计表

组次	容重 $\gamma_c/\text{kg}/\text{m}^3$	固体体积比 S_{s*}	启动坡角/ $^\circ$	溃决形式
1#	1.95×10^3	0.58	9.34	水力再启动
2#	2.02×10^3	0.62	9.84	水力再启动
3#	1.87×10^3	0.53	8.80	水力再启动
4#	1.91×10^3	0.55	9.06	重力再启动
5#	2.23×10^3	0.75	11.11	冲刷溃决
6#	2.07×10^3	0.65	10.10	重力再启动
7#	2.13×10^3	0.68	10.49	冲刷溃决
8#	2.11×10^3	0.67	10.38	冲刷溃决
9#	1.97×10^3	0.59	9.48	冲刷溃决
10#	1.98×10^3	0.59	9.55	重力再启动
11#	2.06×10^3	0.64	10.04	水力再启动
12#	2.04×10^3	0.63	9.94	水力再启动
13#	1.89×10^3	0.54	8.93	水力再启动

2.2.3 泥石流启动深度

泥石流的启动深度受到过流水深的影响,当 $z_0 = z$ 时,利用公式(3)和公式(4)建立方程,从而得到坡面泥石流的启动深度 z_0 。

$$[S_{v*}(\gamma_s - \gamma)z + \gamma(z + h_0)] \sin \theta = \cos \theta [S_{v*}(\gamma_s - \gamma)z] \tan \phi, \quad (7)$$

$$z_0 = \frac{\gamma h_0}{\cot \theta \tan \phi S_{v*}(\gamma_s - \gamma) - S_{v*}(\gamma_s - \gamma) - \gamma} \quad (8)$$

h_0 的取值可以通过观测堵塞坝体上的流深来确定。在堵塞坝刚过流时坡面流水深很小,约为 0.5 cm,当产生冲沟时水深变化从 0.5 ~ 1 cm 不等,在部分实验中确实发现了当过流时坡面在很薄水流作用下出现启动的情况。

在模型实验中,并不是所有的实验都出现了泥石流的再启动,这是因为不是所有实验中的堵塞坝物质的内聚力都可以忽略,同时泥石流堵塞坝物质再启动也并不是全部都有坡面水流的水力作用,这就是因为有一部分坝体物质启动是由于堵塞坝物质的强度参数随着渗透和饱和度增大而减少,直至坡面在重力的作用下再次滑动进而形成泥石流物质再启动。

2.3 重力类再启动

堵塞坝下游坡面再启动,问题类似于边坡稳定性问题。其启动过程一般是由于坝体物质强度指标不断降低而造成坡面稳定性破坏,坝体强度指标的降低常常是因为上游库区水的渗透和坡面上雨水或者是坡面水流的浸润。因此我们可以借鉴边坡问题的研究方法来分析堵塞坝下游坡面再启动的条件。

本文对堵塞坝下游坡面进行网格剖分,利用有限差分程序 Fick3d 计算坡面内部应力应变分布和变化趋势,并通过逐渐减少堵塞坝物质的强度参数分析坡面启动的临界条件。这里主要研究堵塞坝在不同的内聚力(c)条件下的临界启动内摩擦角(ϕ)以及堵塞坝坡面破坏的一般形式和特征。

图6为内聚力为 500 Pa 时的堵塞坝破坏时的位移等值云图,从中我们可以看大堵塞坝破坏的一些规律。第一,坡面破坏发生位置最早发生在坡面的上部,这一点确实可以从实验录像中发现,如图7;第二,坡面破坏其动的深度不是很大,破坏深度最大位置位于坝顶附近;第三,破坏面等值线外部轮廓近似圆弧形。

以上基本上说明了堵塞坝下游坡面破坏的临界强度参数和堵塞坝的坡面破坏特征,如果进一

步了解了堵塞坝在渗透等作用下的强度参数变化规律, 就可以为堵塞坝稳定性进行预测。但是由于实验条件和数据的原因, 这方面的研究暂时还没有条件, 这里不作分析。

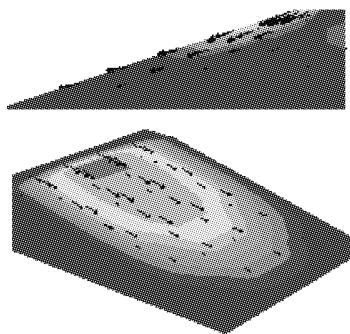


图6 $c = 500 \text{ pa}$, $\phi = 15^\circ$ 时的下游坡面位移等值云图



图7 实验中的重力再启动破坏位置

3 结语

通过对实验现象的分析, 泥石流堵塞坝溃决的3种形式: 冲刷溃决、泥石流堆积体水力再启动、泥石流堆积体重力再启动。但是需要指出的是, 这三种形式并不是孤立存在的, 在一次实验中可能是某一种溃决形式起主要作用, 其他的溃决形式也在坝体溃决的过程中出现, 各组实验中起主要作用的溃决模式如表2。一般而言, 在溢坝

初期都会出现坝体表面颗粒的冲刷, 重力再启动出现在水流溢坝, 溃口无发育或很小时, 坝体整体垮塌形成的泥石流重新启动; 而水力再启动在溃坝的整个过程中都可能出现。

参考文献:

- [1] 吴积善, 程尊兰, 耿学勇. 西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J]. 山地学报, 2005, 23(4): 399-405.
- [2] 朱平一, 程尊兰, 游勇. 川藏公路培龙沟泥石流输沙堵江成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2002, 9(1): 80-83.
- [3] 徐永年, 匡尚富, 黄永键, 等. 泥石流入汇的判别指标[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 33-38.
- [4] 陈德明, 王兆印, 何耘. 泥石流入汇对河流影响的实验研究[J]. 泥沙研究, 2002, 6(3): 22-28.
- [5] 陈德明. 泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.
- [6] 郭志学, 曹叔尤, 刘兴年, 等. 泥石流堵江影响因素实验研究[J]. 水利学报, 2004, 26(11): 39-45.
- [7] 匡尚富. 汇流部泥石流的特性和淤积过程的研究[J]. 泥沙研究, 1995, (1): 1-15.
- [8] Christopher F. W. Formation and failure of volcanic debris dam in the Chakachatna River valley associated with eruptions of the spur volcanic complex, Alaska [J]. Geomorphology, 2001, (39): 111-129.
- [9] Fread, D. L. The development and testing of a dam-break flood forecasting model [J]. Proc. of Dam-Break Flood Modeling Workshop, US Water Resources Council, Washington D. C, 1977, (12): 164-197.
- [10] Costa, J. E. and Schuster R. L. The formation and failure of natural dams [J], Geol. Soc. America bull, 100: 1054-1068.
- [11] 徐永年. 崩塌土流动化机理及泥石流冲淤特性的实验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2001.
- [12] 魏文礼, 沈永明, 孙广才, 等. 二维溃坝洪水波演进的数值模拟[J]. 水利学报, 2003, 25(9): 43-48.
- [13] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [14] Tamotsu Takahashi. Mechanical characteristics of debris flow [J]. J Hy Div, Proc ASCE, 1978, 104(8): 1153-1169.
- [15] Tamotsu Takahashi. Debris flow on prismatic open channel [J]. J Hy Div, Proc ASCE, 1980, 106(3): 381-396.

(下转第26页)