

# 阵性泥石流的平均流速与加速效应

徐永年, 匡尚富, 舒安平

(中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

**摘要:** 本文讨论了泥石流的定义和分类, 分析了不同形式泥石流运动方程的结构特点, 认为泥石流平均流速公式与曼宁公式结构相似。考虑了粗颗粒平均粒径、泥石流龙头泥位、体积比浓度、不稳定层厚度、泥面相对比降等因素对平均流速的影响, 并用蒋家沟实测资料和实验室资料进行了验证。最后通过初步实验说明两阵泥石流迭加过程中出现超载孔隙水压力, 孔隙水压力突然增加, 且不能及时消散, 减小了泥石流龙头的阻力, 出现泥浆飞溅的加速运动。从而可以解释在缓坡( $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ )上泥石流流速能够达到每秒十几米的成因。

**关键词:** 阵性泥石流; 平均流速; 迭加减阻; 加速效应

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0468-155X(2001)06-0008-06

## 1 绪言

由于各国、各地泥石流的种类不同, 研究者的认识不同, 泥石流的定义尚无统一标准。前苏联弗莱施曼认为泥石流是固体物质含量高, 泥位剧增的暂时性山地河床洪流。英国地质学会则认为泥石流介于水流与滑坡之间的一系列过程, 包括有重力作用下的松散物质, 水体和空气构成的块体运动。日本砂防学会认为泥石流含量多于水量, 水流不是泥石流物质的搬运介质, 而是含水的粥状泥沙在其自重作用下产生运动的现象。成都山地所认为泥石流是一种由泥、砂、石块等松散碎屑物质和水体构成的流体。其性质是能构成一相流体的粘性泥石流, 二相流体的稀性泥石流, 介于二者间的过渡性泥石流。

综合上述不同学者的见解<sup>[2]</sup>, 可以将泥石流解释为: 泥石流是饱和或超饱和状态的土、石、水(有时还有气体)混合物受重力和水力共同作用下, 沿某一纵坡流动, 并超过一定输沙强度的暂时性流体。这一解释把崩塌土、高含沙水流和挟沙水流中的推移质都排除在泥石流之外。如崩塌土是非饱和的土、石、水混合物在重力作用下运动; 高含沙水流主要是土、水混合物在水力作用下的运动; 而推移质的输沙强度比较小, 而泥石流输沙强度较大。

从产生源地和暴发时刻两方面来判断, 泥石流是介于块体运动与挟沙水流之间的地段和时段。上限条件是崩塌土(或滑坡体)在运动过程中与水流掺混达到饱和状态时形成泥石流, 其下限条件是挟沙水流冲刷河床泥沙, 当输沙率超过某一强度而全层输沙时形成泥石流。超过上限条件的是崩塌土, 达不到下限条件的是挟沙水流。泥石流与块体运动相似之处是侵蚀搬运松散物质, 加速地貌演化; 泥石流和挟沙水流相似之处是它们都具有流动性的特征。泥石流又以沙、石等颗粒物质含量高, 流体稠密而不同于挟沙水流, 从而使泥石流具有结构性、惯性、输沙能力强等特征。

泥石流的分类方法较多, 按流态特征、流体性质、流体浓度和物质组成可以分成不同类型的泥石流。目前, 不论哪种方法都难于绝对区分, 在讨论同一问题时应按同一标准以于区别。本文参考熊刚的研究<sup>[5]</sup>, 按物质组成将泥石流分成土石流、水石流与泥流, 这充分体现了细颗粒、粗颗粒和水三者之比例。水石流中 2mm 以上的粗颗粒大于 80%、泥流中 2mm 以上的粗颗粒小于 2%, 土石流中 2mm 以上的粗

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(49831010)。

作者简介: 徐永年(1961—), 男, 浙江长兴人, 博士, 高级工程师, 主要从事泥沙灾害与防治的研究。

收稿日期: 2001-06-15

粒介于2%至80%。其中,又可根据流体浓度将土石流细分为稠性与稀性泥石流,稠性泥石流密度大于 $1.9\text{t/m}^3$ ,稀性泥石流密度小于 $1.9\text{t/m}^3$ 。

## 2 稠性泥石流的形态特征

### 2.1 龙头的流态

稠性泥石流具有从粘粒到漂石之间很宽的级配,多以双峰型频率分布,运动中常具有明显的阵流现象。在纵向龙头前锋呈现逆坡、垂直、正坡三种流态特征<sup>[3]</sup>。当流速较小(一般流速小于 $4\text{m/s}$ ),且密度较大,泥石流龙头迎面呈正坡。当泥石流流速中等(一般流速小于 $6\text{m/s}$ )、泥位较小,龙头前端几乎垂直,龙头与床面之间没有太大的冲淤变化。当泥石流流速快(一般流速大于 $6\text{m/s}$ )、泥深大时龙头前锋呈逆坡。这种流态的泥石流,表层流速大于底层流速,石块由上向下翻落,波浪涛涛。这种翻落的泥石流,因龙头前进速度快,又重新被卷入龙头。阵性泥石流龙头冲刷龙尾淤积,当龙头冲刷大于龙尾淤积时,流路冲刷下切;当龙头冲刷等于龙尾淤积时,流路不冲不淤;当龙头冲刷小于龙尾淤积时,流路出现淤积抬高。所以,阵性泥石流在运动过程中随时随地与床面层发生交换。床面上存在不稳定层,沿程不断冲刷或与前阵泥石流迭加,流量和泥位具有不断增加的趋势。如图1。

### 2.2 泥石流泥面比降 $J_c$

由于泥石流龙头泥深较大比降较小,有时出现负坡,龙身泥深次之,比降也居中,龙尾泥深很小,比降最大,接近沟床纵比降。由于泥石流龙头长度相比龙身很短,且前锋可能为正坡也可能为逆坡。龙身距离较长,在运动过程中流速与龙头接近,所以,泥石流的泥面比降采用龙身的比降。龙身的相对比降应为泥深与龙身长度  $L$  的比值。如相对于泥石流沟床纵坡  $J_e$  的相对比降为  $J_r$ ,则泥石流泥面比降为

$$J_c = J_e - J_r = \tan\beta - Hc/L \quad (1)$$

### 2.3 不稳定层厚度 $D_x$

当流动深为  $H_c$  的阵性泥石流龙头通过厚度  $D$  的均质松散河床时,由于前面泥石流的铺床作用,淤积层处于饱和状态。假若作用在淤积层中的剪切应力及阻应力成直线分布,且渗透水压力对淤积层的稳定产生影响,沿某深度  $D_x$  处土层出现移动。就是在龙头通过时床面产生冲刷,此冲刷层称不稳定层<sup>[8]</sup>。龙头通过时不稳定层内的应力分布如2图。当作用在自床面的垂直深度  $D_x$  处的剪应力  $\tau$  和阻应力  $\tau_L$  相等时

$$D_x = \frac{\rho_c H_c J_c}{C_{v*} (\rho_s - \rho) \tan\varphi} \quad (2)$$

式中  $\varphi$  为不稳定层的摩擦角,可取泥石流的流动摩擦角;  $C_{v*}$  为淤积沟床的体积比浓度;  $\rho_c$  为泥石流的密度。

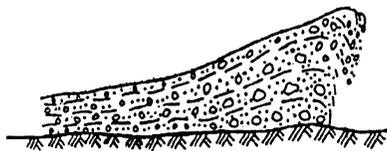


图1 泥石流龙头呈逆坡形态

Fig. 1 Adverse slope at the head of debris flows

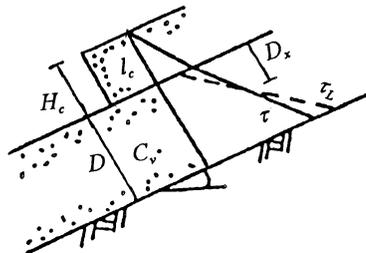


图2 泥石流龙头的应力分布

Fig. 2 The stress distribution at the head of debris flows

## 3 阵性泥石流的平均流速

### 3.1 代表性公式

由于泥石流的产流、汇流过程非常复杂,区域差异性很大,类型与性质也不同。把泥石流简化为连

续介质,并根据力的平衡求解流速分布。如宾汉流体模型、膨胀流体模型、粘塑性流体。现有泥石流运动方程可大致归纳为三大类。

### (1) 拜格洛(Bagnold)

将泥石流视为固液两相流,在理论分析基础上建立阻力和运动参数方程,通过实验确定其参数。高桥保、Chen、王光谦等都曾把颗粒流研究成果应用到泥石流研究中,促进了泥石流研究的发展。这类方程可以高桥保的方程为代表<sup>[4]</sup>,其平均流速公式为

$$u_c = \frac{2}{5D_a} \left[ \frac{g \sin \beta}{a_i \sin \varphi} \left[ C_y + (1 - C_y) \frac{\rho_w}{\rho_s} \right] \right]^{1/2} \left[ \left( \frac{C_y}{C_v} \right)^{1.5} - 1 \right] H_c^{3/2} \quad (3)$$

化简后,平均流速公式(3)的结构与曼宁公式一致。

### (2) 宾汉流体(Bingham)

认为稠性泥石流近似宾汉流体,按宾汉流体阻力方程导出匀速运动参数方程,通过实验确定流变参数。这类方程以熊刚提出的泥石流两相双流体模型为代表<sup>[5]</sup>。一般,泥石流浆体的应力本构关系可用宾汉体描述,熊刚以分界粒径为界将固体颗粒分为粗细两部分,细颗粒部分与水结合形成不易分离的浆体,粗颗粒部分作为粗颗粒拟流体。对浆体和粗颗粒拟流体同时引入连续介质假定,视两者为连续介质。泥石流两相双流体模型把慢速、中速和快速颗粒流的应力本构关系系统一起来。应力表达式中同时存在速度梯度的零次项、线性项和二次项。零次项是由于粗颗粒之间静态支撑作用;二次项是由于粗颗粒之间的碰撞和扩散作用;线性项是由于粗颗粒之间的相对滑动和挤压作用。其平均流速为

$$u_c = \frac{1}{2} A_6 H_c + \frac{4A_5^2}{15H_c} \left( A_4 + \frac{H_c}{A_5} \right)^{5/2} - \frac{4A_5^2}{15H_c} A_4^{5/2} - \frac{2}{3} A_5 A_4^{3/2} \quad (4)$$

将公式中的待定系数代入后,最终形式具有曼宁公式的结构形式。

### (3) 库伦公式(Coulomb)

泥石流体具有基本符合库伦公式的剪切强度,按固体颗粒散体重力流的观点建立阻力运动的参数方程,通过实验确定其运动碰撞摩擦阻力参数。这类方程可以周必凡的方程为代表<sup>[6]</sup>。表面流速为

$$u_c = u_{c0} + \frac{2}{3|l|} \left( \frac{a_1}{a} \right)^{1/2} \left[ H_c - \frac{\tau_0}{a_1 \rho_c} \right]^{3/2} \quad (5)$$

## 3.2 阵性泥石流的平均流速

通过对上述几家公式的分析,将待定系数代入后结构形式与曼宁公式相同。但这些理论公式在实际应用时,需要确定较多的待定系数或参数。而曼宁公式结构简单,至今仍被工程界广泛使用。

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (6)$$

曼宁公式是利用综合糙率系数来表示泥石流在运动过程中的阻力。对于窄深沟床上式中的水力半径不能用泥深代替,对于宽浅沟床,当边壁没有影响或影响较小时,水力半径可用泥深代替,  $R=H$ 。从蒋家沟泥石流观测资料分析,泥石流龙头宽度与泥深相比,平均宽深比为20,用泥深代替水力半径误差不超过10%。影响泥石流平均流速的因素有:泥深  $H_c$ 、比降  $J_c$ 、固体颗粒的平均粒径  $d_{\varphi}$ 、重力加速度  $g$ 。另外,还与泥石流通过时床面的不稳定层厚度  $D_x$ ,以及泥石流密度  $\rho_c$  等因素有关。

泥石流平均流速与曼宁公式具有相同的结构<sup>[8]</sup>,改写成曼宁公式的形式

$$u_c = k \left( \frac{h_c}{d_{\varphi}} \right)^{1/6} \sqrt{g_c h J_c} \quad (7)$$

式中  $u_c$  为泥石流平均流速;

$h_c$  为泥石流流动深,  $h_c = H_c + D_x$ , 其中,  $H_c$  为观测泥位,  $D_x$  为不稳定层厚度;

$J_c$  为泥石流泥面比降,  $J_c = J_e - J_r$ ;  $d_{\varphi}$  为粗颗粒平均粒径, 没详细资料时可取  $d_{\varphi} = d_{65}$ ;

$g_c$  为泥石流的重力加速度,  $g_c = (\rho_c - \rho) g / (\rho_s - \rho)$ ;

$k$  为待定系数,对于稠性泥石流取  $k=3 \sim 4$ 。

### (1) 粗颗粒平均粒径

泥石流龙头一般集中较多的粗颗粒,龙头流速与代表粗颗粒的平均粒径  $d_{\varphi}$  有关。用粗颗粒的平均粒径与现场观测泥位比值的六分之一次方反映泥石流阻力的大小。取泥石流重力加速度  $g_c = g$ , 泥面比降  $J_c =$  沟床比降  $J_e$ 。通过对蒋家沟 1991 年实测资料进行了分析统计。相关系数为 0.46。精度较低,不能满足工程应用的需要。下面进一步讨论其他因素的影响。

$$u_{c1} = k_1 \left( \frac{H_c}{d_{\varphi}} \right)^{1/6} \sqrt{gH_e J_e} \quad (8)$$

### (2) 泥石流体积比浓度

考虑颗粒有效重力,取泥石流的体积比浓度对重力加速度进行修正,  $g_c = (\rho_c - \rho) g / (\rho_s - \rho)$ 。通过对蒋家沟 1991 年实测资料进行了分析统计。相关系数提高到 0.50。

$$u_{c2} = k_2 \left( \frac{H_c}{d_{\varphi}} \right)^{1/6} \sqrt{\frac{\rho_c - \rho}{\rho_s - \rho} gH_e J_e} \quad (9)$$

### (3) 不稳定层厚度

阵性泥石流在运动或迭加过程中,沟床以下某一深处存在不稳定层  $D_x$ , 假若蒋家沟的泥石流流动摩擦角为  $15^\circ$ , 可根据公式(2)进行计算  $D_x$ 。通过对蒋家沟 1991 年实测资料进行了统计分析。相关系数上升到 0.62。

$$u_{c3} = k_3 \left( \frac{H_c + D_x}{d_{\varphi}} \right)^{1/6} \sqrt{\frac{\rho_c - \rho}{\rho_s - \rho} g(H_c + D_x) J_e} \quad (10)$$

### (4) 泥石流泥面比降

泥石流泥面比降应为沟床比降与泥石流相对比降的差。将上式修改后得公式(11)。通过对蒋家沟 1991 年实测资料进行了统计分析。相关系数 0.68。

$$u_{c4} = k_1 \left( \frac{H_c + D_x}{d_{\varphi}} \right)^{1/6} \sqrt{\frac{\rho_c - \rho}{\rho_s - \rho} g(H_c + D_x)(J_e - J_r)} \quad (11)$$

## 3.3 平均流速公式验证

为了增加公式精度及可靠性的说服力,利用蒋家沟 1974 年实测资料和水槽实验资料进行了验证。如图 3。相关系数分别为 0.71 和 0.73。修正后的平均流速公式精度较高,可应用于工程设计。

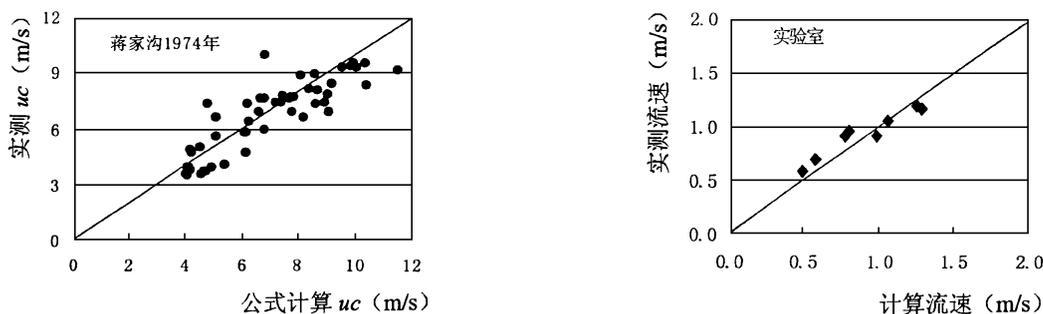


图 3 计算值与实测值的比较

Fig. 3 Comparison of computational and experimental values

## 4 泥石流龙头的加速效应

### 4.1 龙头迭加加速

由于各阵流速的差异,往往出现大阵流赶上或超过小阵的现象。造成阵流的叠加。这种阵的叠加现象,不仅仅已观测到,而且,获得了它的动态资料。蒋家沟泥石流的流通区长度 7km。如果某阵泥石流从主沟开始以  $10 \text{ m/s}$  的流速行进,距前面的阵流约 480m,那么,这阵流速  $10 \text{ m/s}$  的泥石流应会在 7km 的河段上赶上流速  $8 \text{ m/s}$  的泥石流 2 阵,流速  $6 \text{ m/s}$  的泥石流 6 阵。蒋家沟观测站自 1985 年 7 月 25 日开

始使用测速雷达仪进行泥石流测流以来,已取得了几千阵次的泥石流运动过程的流速资料。分析发现泥石流龙头的紊动流速远大于泥流体整体的流速。实际上雷达观测到的速度是龙头泥浆飞溅的速度,这个速度往往高达  $15 \sim 24 \text{ m/s}$ , 大约是泥石流整体流速  $6 \sim 12 \text{ m/s}$  的一倍。

假设稠性泥石流龙头在快速迭加过程中保持整体,具有一定封闭作用,与块状崩塌土的具有相同的压差减阻机理(另文讨论)。根据块状崩塌土在运动过程中能量守恒原理,给出的运动方程同样适用于稠性泥石流龙头。

$$\frac{du}{dt} = k \cdot g \sin \beta \left\{ 1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \right\} \quad (12)$$

$$u = u_0 + k \cdot g \sin \beta \left\{ 1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \right\} \Delta t \quad (13)$$

式中  $u$  为泥石流龙头在某一时刻的运动流速;  $u_0$  为  $\Delta t$  时间间隔前泥石流龙头的运动流速。

根据上式可以进行泥石流流速估算,如蒋家沟泥石流密度为  $2.2 \text{ t/m}^3$ , 当流动摩擦角  $\tan \varphi$  下降至沟床纵  $\tan \beta$  的一半时,对于初始流速为  $8 \text{ m/s}$ , 且在  $6.5^\circ$  的缓坡( $5^\circ \sim 10^\circ$ ) 上运动的泥石流,只需经历 20 秒钟(距离不超过 200 m), 流速增加一倍至  $15 \text{ m/s}$ 。可见,在缓坡上出现每秒十几米的流速就不足为奇。

#### 4.2 阵流迭加实验

实验条件: 根据要求的水沙比,在实验沙中加一定数量的水充分搅拌后,铺在斜坡槽上、中、下三格内,用升降机调节坡度至  $40^\circ$ , 打开下侧一格闸门,斜坡槽中的泥石流开始流动,当泥石流运动到坡前( $15^\circ$ ) 时,泥石流在坡前开始减速,此时,打开斜坡槽中间闸门,而后再打开上侧闸门,观测泥石流在变坡槽中与前一阵迭加时的运动情况。每阵泥流体积  $V=0.09 \text{ m}^3$ , 斜坡坡度为  $40^\circ$ , 坡前倾角为  $15^\circ$ , 上下坡夹角  $\theta=25^\circ$ 。实验装置见图 4。实验沙粒径为  $d_{90}=30 \text{ mm}$ 、 $d_{50}=2 \text{ mm}$ 、 $d_{10}=0.03 \text{ mm}$ 。

实验现象: 当阵性泥石流在追赶前一阵泥石流时,水流形成涌浪快速向前推进,在翻过前阵龙头的同时,前阵泥石流加速前进;当第 2 阵超过前一阵泥石流时,集中于龙头的粗颗粒快速打击泥石流表面,产生突发性超载孔隙水压力,使泥石流内部流动摩擦角下降;第 1 阵泥石流通过时流速较小,床面没有出现超载孔隙水压力,第 2 阵、第 3 阵泥石流通过时,出现了孔隙水压力。并且,第 3 阵比第 2 阵更大。见图 5。

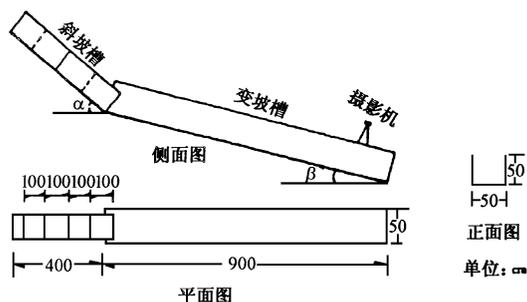


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Sketch of the experimental equipment

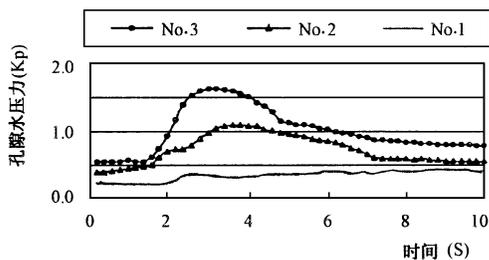


图 5 孔隙水压力变化过程

Fig. 5 Variation of void water pressure with time

## 5 结语

在自然条件下,稠性泥石流的运动属于非均匀、非恒定流。这是一种比较复杂的运动方式,目前直接用动力学的方法解其运动方程相当困难。但泥石流平均流速(或泥石流流量)是泥石流防治工程中的基本设计参数,必不可少,其准确性对于工程规模的大小(过大不经济,过小不安全)极为重要。

本文从工程上广泛使用的曼宁公式入手,考虑了粗颗粒平均粒径、泥石流龙头泥位、体积比浓度、不稳定层厚度、泥面相对比降等因素对平均流速的影响。公式结构简单,各项物理意义明确。利用蒋家沟 1974 年实测资料和实验室资料对泥石流平均流速公式(11)进行了验证。计算值与实测流速相比,误差

小于 35%, 可以用于同类泥石流平均流速的计算。由于不同类型泥石流的阻力相差很大, 其他类型泥石流的平均流速有待于进一步探讨。

阵性泥石流在迭加过程中, 当龙头与床面尚未封闭时出现泥浆飞溅, 封闭后形成超载孔隙水压力。这种超载孔隙水压力的出现可以减小泥石流龙头的阻力, 从而出现加速运动。所以, 阵性泥石流迭加具有加速效应。实验中由于总体流速还是偏小, 无法真实反映现场实际的 2 阵泥石流的迭加过程。但超载孔隙水压力的出现可以说明泥石流龙头在迭加过程中阻力减小。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] C.M. 弗莱施曼著, 姚德基译. 泥石流. 科学出版社, 1986.
- [ 2 ] 田连权等. 试论泥石流的形成过程. 泥石流论文集(1). 科技文献出版社重庆分社, 1981.
- [ 3 ] 康志成. 粘性泥石流加速运动的力学分析. 山地研究, 1991(3).
- [ 4 ] 高桥保. 土石流の発生と流动に関する研究. 京大防灾研年报, 第 20 号 B-2, 1977.
- [ 5 ] 熊刚. 粘性泥石流的运动机理. 清华大学博士学位论文, 1996.
- [ 6 ] 周必凡. 粘性泥石流阻力和运动方程验证分析. 山地学报, 1999(2).
- [ 7 ] 张军, 熊刚主编. 云南蒋家沟泥石流运动观测资料集. 中国科学院东川泥石流观测研究站, 1987-1994.
- [ 8 ] 徐永年. 崩塌土流动化机理及泥石流冲淤特性的实验研究. 中国水利水电科学研究院博士学位论文, 2001.

## Average Velocity and Acceleration Effects of Intermittent Debris Flows

XU Yong-nian, KUANG Shang-fu, SHU An-ping

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In this paper, the authors discussed the definition and classification of debris flows, and studied the characteristics of different equation forms of debris flow motion. The authors considered that the average velocity formulas of debris flows accord with the Manning's formula. By using the annual observed data in Jiangjia channel, the authors analysed and verified the effect factors of the average velocity formulas of debris flows, such as the average coarse grain size, the concentration by volume, the thickness of unsteady layer, and relative gradient of slope, etc. Finally, the superimpose effect on the moving process of intermittent debris flows was discussed. The authors pointed out that the supernormal pore water pressure between debris flows and underlay reduces resistance between debris flows and underlay, and accelerates debris flows, thereby the velocity of debris flows on mild slope can reach 15m/s.

**Key words:** intermittent debris flows; the average velocity; resistance decrease due to superimpose effect; acceleration effect