

文章编号: 1000-0887(2006)03-0357-08

# 泥石流固液分相流速计算方法研究<sup>\*</sup>

陈洪凯<sup>1,2</sup>, 唐红梅<sup>1</sup>, 陈野鹰<sup>1</sup>

(1. 重庆交通学院 岩土工程研究所, 重庆 400074;

2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

(刘陆宇推荐)

**摘要:** 泥石流固液分相流速是泥石流对岸坡、防治结构冲击、磨损机理的核心问题。将泥石流流体简化为具有相同粒径的固相和具有相同力学性质的液相, 基于泥石流流体为沿流动方向的一维两相流体, 运用两相流理论建立了泥石流固液分相流速控制方程。构建了泥石流平均压力、彻体力及平均表面力的计算方法, 尤其通过浆体的 Binham 体流变方程、Bagnold 颗粒相互作用试验成果建立了控制体平均表面力计算方法; 建立了固液两相流速比例系数, 以及理论固相流速与实际流速的比例系数。据此求解控制方程得到了固液分相流速计算方法, 该方法既可同时适用于粘性泥石流和稀性泥石流, 也可在泥石流爆发以后通过现场采集沉积物分析反求泥石流爆发期间的分相流速。工程实例分析显示, 该方法计算结果与实测结果吻合较好。

**关键词:** 泥石流; 两相流; 分相流速; 计算方法; 验证

**中图分类号:** P642.23; P694; U418.5<sup>+</sup>5      **文献标识码:** A

## 引 言

泥石流是高浓度水砂砾复合异相混合流, 是毁损公路路基、路面及相应防治结构物的重要外在动力<sup>[1]</sup>。从 20 世纪 70 年代迄今, 国内外在泥石流研究方面取得了大量的研究成果, 从泥石流形成<sup>[2~4]</sup>、泥石流模型<sup>[5~8]</sup>、运动机理<sup>[9~12]</sup>、灾害评价及防治技术<sup>[13,14]</sup>等方面初步形成了泥石流学科体系。随着中国西部大开发战略的全面实施, 尤其是公路建设大发展, 彻底解决长期困扰公路建造的泥石流问题显得尤为迫切。陈洪凯等从 1999 年来对公路泥石流领域研究, 从公路泥石流病害、研究及治理理念、防治技术及相关关键问题如泥石流对防治结构的磨蚀、冲击等方面对公路泥石流进行了较全面的研究<sup>[1], [15~20]</sup>。

由于公路泥石流防治的核心问题是泥石流冲击及磨蚀荷载的确定, 而荷载的确定主要涉及到泥石流流速的计算<sup>[1]</sup>, 泥石流流速的准确计算是泥石流研究中的重点和难点。迄今, 国内外几乎均基于 Manning 公式从观测资料出发建立起一些地区性的经验公式<sup>[3,4], [13,14]</sup>, 其通用表达式为

$$v_c = KH_c^m I_c^n, \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2003\_10\_16; 修订日期: 2005\_11\_01

基金项目: 交通部跨世纪人才专项基金资助项目(95050508); 西部交通建设项目(200332822047); 交通部重点科技基金资助项目(95060233)

作者简介: 陈洪凯(1964—), 男, 重庆人, 教授, 博士, 博士生导师(联系人, Tel/Fax: + 86\_23\_62652719; E\_mail: Bialik@163.net; Rxzj@yahoo.com)。

式中,  $H_c$  为计算断面泥石流流体的平均深度,  $I_c$  为泥石流水力比降,  $K$ 、 $m$  和  $n$  为反应区域性特点的试验常数。目前, 中国几个最著名的泥石流沟为云南蒋家沟泥石流、甘肃武都柳湾沟泥石流、西北地区泥石流和云南东川泥石流改进公式。然而, 这些泥石流流速经验公式的实用性具有很大的局限性, 且计算结果均为平均流速, 未考虑泥石流流体中固相颗粒和液相浆体的分相流速, 给泥石流防治结构的抗冲击、抗磨蚀设计带来了极大困难。因此, 本文基于泥石流流体由固相颗粒和液相浆体组成的客观事实, 运用两相流理论构建泥石流流体分相流速计算方法。

## 1 泥石流流体等效两相流

实际泥石流流体中固相物质(颗粒或块石)的矿物成分及粒度的变化通常较大, 但对影响泥石流的动力特性而言, 粒度占主导地位<sup>[1]</sup>。而泥石流流体中不同粒径的固相物质为研究泥石流流速带来了极大的困难, 甚至于难于实施。由于泥石流综合治理方案中, 通常要在泥石流流通区适当部位建造 1~2 道拦渣坝, 拦截泥石流流体中粒径较大的块石, 因此, 可将泥石流沟中下游的泥石流流体中固相物质按照其体积进行等效, 即将实际泥石流流体中不同粒径的固相物质(图 1) 简化为粒径相同的固相颗粒(图 2)。根据钱宁教授的研究, 粘性泥石流中粒径 10 cm 以下的颗粒均凝聚成一个整体以相同的速度向前运动, 而粒径大于 10 cm 的颗粒则在泥石流沟中跳跃滚动前进; 但在稀性泥石流中呈现悬浮运动的固相颗粒不超过 2 cm<sup>[21]</sup>。因此, 针对广义的泥石流, 本文把粒径小于 2 cm 的固相颗粒视为等效浆体, 其余视为固相物质。如平川沟泥石流流体, 固相颗粒最大粒径可及 30 cm, 而等效后固相颗粒的粒径为 8.16 cm。

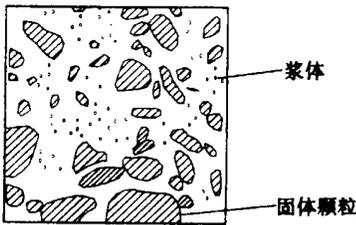


图 1 泥石流流体组成

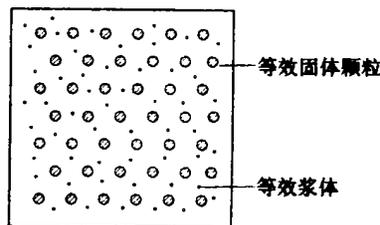


图 2 等效两相泥石流流体

## 2 泥石流流速的两相流计算方法

### 2.1 基本假定

1) 泥石流在运动过程中, 包括沿着泥石流沟的向前流动和泥石流流体内的竖向紊动, 但是, 从分析泥石流流速尤其是针对泥石流对岸坡及防治结构的冲击、磨蚀机理出发, 主要考虑泥石流流体沿沟向前的运动问题, 因此, 本文假定泥石流流体为一维两相流运动体系(流动方向设定为  $x$  方向)。

2) 泥石流在运动过程中, 不考虑外部质量源, 即不考虑岸坡对泥石流流体的物源补给, 泥石流在沟槽内冲淤平衡。

3) 考虑两相流体中固相颗粒之间蹬相互作用、浆体内部的作用以及固相颗粒与液相浆体之间的相互作用, 不考虑固液两相的相变即固相颗粒和液相浆体之间的相互转换。

### 2.2 计算方法

写出固液两相的守恒方程<sup>[22]</sup>, 包括连续方程和动量方程。

#### 1) 连续方程

固液两相的连续方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_s \alpha] + \dots \cdot [\rho_s \alpha v_s] = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_l(1-\alpha)] + \dots \cdot [\rho_l(1-\alpha)v_l] = 0, \tag{3}$$

式中,  $\alpha$  为固相颗粒的平均容积浓度,  $\rho_s$  和  $\rho_l$  分别表示固相和液相的平均密度( $g/cm^3$ ),  $v_s$  和  $v_l$  分别表示固相和液相沿  $x$  方向的平均速度( $m/s$ )。

2) 动量方程

固液两相的动量方程(即运动方程或牛顿方程)的三维矢量表达式分别为

$$\rho_s \left\{ \frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \cdot \dots \cdot v_s \right\} = b_s + f_s - \dots \cdot P_s, \tag{4}$$

$$\rho_l \left\{ \frac{\partial v_l}{\partial t} + v_l \cdot \dots \cdot v_l \right\} = b_l + f_l - \dots \cdot P_l, \tag{5}$$

式中,  $b_s$  和  $b_l$  分别表示作用在固相和液相单位容积的彻体力( $kN/m^3$ );  $P_s$  和  $P_l$  分别表示固相和液相的平均压强梯度( $kN/m^3$ )(且  $P_s = \alpha P, P_l = (1-\alpha)P$ ),  $P$  为泥石流平均压强( $kPa$ );  $f_f$  和  $f_s$  分别表示作用在浆体、固体颗粒上的其余力即单位体积的平均表面力(但不包括压强), 如每相的流体阻力、由相对加速度或速度差引起的表观质量效应以及颗粒之间的作用力。

在一维情况下, (4) 式和(5) 式可分别写为

$$\rho_s \left\{ \frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial x} \right\} = b_s + f_s - \frac{\partial P_s}{\partial x}, \tag{6}$$

$$\rho_l \left\{ \frac{\partial v_l}{\partial t} + v_l \frac{\partial v_l}{\partial x} \right\} = b_l + f_l - \frac{\partial P_l}{\partial x}. \tag{7}$$

2.3 变量计算

1) 泥石流平均压力

假定处于运动状态的泥石流体的平均压力按照静水压力分布(图3), 任意深度处泥石流平均压力由(8) 式计算。

$$P = \frac{\gamma_c h}{2 \cos^2 \theta}, \tag{8}$$

式中,  $\theta$  为泥石流沟床的平均坡角( $^\circ$ );  $\gamma_c$  为泥石流体的平均容重( $kN/m^3$ ), 按照(9) 式计算。

$$\gamma_c = [\alpha \rho_s + (1-\alpha) \rho_l] g. \tag{9}$$

2) 砌体力

由于泥石流运动属于无压重力流, 因此砌体力仅考虑固液两相的重力。但是, 由于固相颗粒均布于泥石流浆体中, 其自重应考虑浆体的浮力。单位体积两相流液体相重力的计算公式表示如下

$$b_l = \rho_l g \cos \theta. \tag{10}$$

对于单位体积两相流固相而言, 由于每个固相颗粒的体积  $V_0$  为

$$V_0 = \frac{\pi}{6} d_e^3. \tag{11}$$

则单位体积两相流体中所含固相颗粒数  $N$  为

$$N = \frac{6\alpha}{\pi d_e^3}. \tag{12}$$

进而得到沿泥石流运动方向单位体积内固相的重力  $b_s$  计算式。

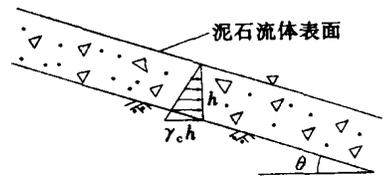


图3 泥石流平均压力计算示意图

$$b_s = \alpha(\rho_s - \rho_l)g \cos \theta \quad (13)$$

### 3) 平均表面力

对于单位体积的两相流体而言, 由于大量的试验资料已经显示出固相颗粒运动速度远小于液相浆体的运动速度<sup>[21]</sup>, 因此, 本质上液相浆体对固相的运动具有加速作用, 其牵引速度为 $(v_f - v_s)$ ; 同时, 固相对液相具有阻滞作用, 阻滞速度仍然为 $(v_f - v_s)$ ; 控制体外浆体对控制体具有阻滞作用。可见, 作用在控制体上的表面力包括 4 个方面, 即 1) 控制体外浆体对控制体浆体的阻力; 2) 控制体外固相对控制体浆体的阻力; 3) 控制体外浆体对控制体固相的牵引力; 4) 控制体外固相对控制体表面固相的相互作用力。下面分别进行讨论。

#### 第 1 控制体外浆体对控制体浆体的阻力

控制体外浆体对控制体浆体的阻力本质上是浆体内部的粘滞阻力问题。由于可将泥石流浆体视为广义的 Binham 体<sup>[6], [21], [23]</sup>, 则 Binham 体的流变方程便可反映浆体内部的粘滞阻力, 即

$$\tau = \tau_B + \mu \frac{dv_f}{dy} - \rho_l L^2 \left( \frac{dv_f}{dy} \right)^2, \quad (14)$$

式中,  $\tau_B$  为浆体的 Binham 极限屈服应力(Pa);  $\mu$  为浆体的刚度系数(Pa·s);  $L$  为泥石流流体中流层之间的混掺长度即液相浆体微团因脉动流速的作用而移动的距离(m), 由  $L = ky$  式计算, 式中  $k$  为 Kamen 系数, 由试验确定;  $dv_f/dy$  为泥石流内竖向流速梯度;  $y$  为泥石流流体内深度(m)。则单位体积的控制体的泥石流浆体阻力为

$$f_{f1} = \int_0^{d_0} \tau dy = \int_0^{d_0} \left[ \tau_B + \mu \frac{dv_f}{dy} - \rho_l k^2 y^2 \left( \frac{dv_f}{dy} \right)^2 \right] dy, \quad (15)$$

式中,  $d_0$  为控制体等效半径(m)。假定泥石流浆体流速从沟床至泥石流流体表面的分布为二次函数, 即

$$v_f = ay^2 + by + c, \quad (16)$$

式中,  $a$ 、 $b$  和  $c$  为待定系数, 通过实验确定。把(16)式代入(15)式, 计算得

$$f_{f1} = -\frac{4}{5} a^2 \rho_l k^2 d_0^5 - ab \rho_l k^2 d_0^4 - \frac{1}{3} \rho_l k^2 d_0^3 + \mu a d_0^2 + (\tau_B + \mu b) d_0 \quad (17)$$

如果不考虑泥石流的紊动效应, 即  $k = 0$ , 则(17)式可简化为

$$f_{f1} = \mu a d_0^2 + (\tau_B + \mu b) d_0 \quad (18)$$

进一步, 如果浆体流速从沟床至泥石流流体表面呈线性分布, 即  $a = 0$ , 则(18)式可退化为

$$f_{f1} = (\tau_B + \mu b) d_0 \quad (19)$$

#### 第 2 控制体外浆体对控制体固相的牵引力

由于液相浆体和固相之间存在压力差 $(P_f - P_s)$ , 该压力差作用于固相的断面积  $A_0$  为

$$A_0 = \frac{3\alpha}{2d_e} \quad (20)$$

则控制体外浆体对控制体固相的牵引力  $f_{s1}$  计算式为

$$f_{s1} = (P_f - P_s) A_0 = \frac{3\alpha(1-2\alpha)}{2d_e} P \quad (21)$$

#### 第 3 控制体外固相对控制体浆体的阻力

控制体外固相对控制体浆体的阻力与控制体外浆体对控制体固相的牵引力为一对大小相等、方向相反的作用力, 即

$$f_{f2} = -f_{s1} \quad (22)$$

#### 第 4 控制体外固相对控制体表面固相的相互作用力

控制体外固相对控制体内固相的作用主要体现在固相颗粒之间的碰撞作用,碰撞的力学效应表现为颗粒之间的离散力  $P_0$  和颗粒之间的剪切力  $T_0$ <sup>[21]</sup>。根据 Bagnold 的研究<sup>[5]、[24]</sup>,  $P_0$  和  $T_0$  分别由 (23) 式和 (24) 式计算

$$P_0 = 0.042 \cos \alpha_i \rho_s (\lambda d_e)^2 \left( \frac{dv_s}{dy} \right)^2, \quad (23)$$

$$T_0 = P_0 \tan \alpha_s, \quad (24)$$

式中,  $\alpha$  为泥石流颗粒之间碰撞产生的离散角( $^\circ$ ),  $\lambda$  为泥石流流体中固相颗粒的线浓度。沿控制体运动方向的离散应力和离散剪应力分别为

$$f_{s21} = 0.013 \rho_s (\lambda d_e)^2 \left( \frac{dv_s}{dy} \right)^2, \quad (25)$$

$$f_{s22} = 0.028 \rho_s (\lambda d_e)^2 \left( \frac{dv_s}{dy} \right)^2, \quad (26)$$

则

$$f_{s2} = 0.041 \rho_s (\lambda d_e)^2 \left( \frac{dv_s}{dy} \right)^2. \quad (27)$$

综上所述,控制体表面固相和液相的平均表面力计算式分别为

$$f_s = f_{s1} + f_{s2} = \frac{3\alpha(1-2\alpha)}{2d_e} P + 0.041 \rho_s (\lambda d_e)^2 \left( \frac{dv_s}{dy} \right)^2, \quad (28)$$

$$f_l = f_{l1} + f_{l2} = -\frac{4}{5} a^2 \rho_l k^2 d_0^5 - ab \rho_l k^2 d_0^4 - \frac{1}{3} \rho_l k^2 d_0^3 + \mu a d_0^2 + (\tau_B + \mu b) d_0 - \frac{3\alpha(1-2\alpha)}{2d_e} P. \quad (29)$$

## 2.4 求解

从连续方程可见,计算的分相流速为常数。仅以泥石流定常流动且泥石流浆体从泥石流沟床至泥石流流体表面呈线性分布的为例进行求解分析,据此,可将 (29) 式简化为

$$f_l = (\tau_B + \mu b) d_0 - \frac{3\alpha(1-2\alpha)}{2d_e} P. \quad (30)$$

把 (13) 式和 (28) 式代入 (6) 式,且不考虑固相颗粒沿泥石流流体深度方向的变化,则

$$\rho_s v_s \frac{dv_s}{dx} = \alpha (\rho_s - \rho_l) g \cos \theta + \frac{3\alpha(1-2\alpha)}{2d_e} P - \alpha \frac{dP}{dx}. \quad (31)$$

把 (10) 式和 (30) 式代入 (7) 式,可得

$$\rho_l v_l \frac{dv_l}{dx} = \rho_l g \cos \theta + (\tau_B + \mu b) d_0 - \frac{3\alpha(1-2\alpha)}{2d_e} P - (1-\alpha) \frac{dP}{dx}. \quad (32)$$

将 (31) 式乘以  $(1-\alpha)$ 、(32) 式乘以  $\alpha$ , 两式相减消除  $dP/dx$  项并整理得

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dx} [(1-\alpha) \rho_s v_s^2 - \alpha \rho_l v_l^2] = \alpha [(1-\alpha) \rho_s - (2-\alpha) \rho_l] g \cos \theta - \alpha (\tau_B + \mu b) d_0 + \frac{3\alpha(1-2\alpha)}{2d_e} P. \quad (33)$$

令

$$A = \left\{ \alpha [(1-\alpha) \rho_s - (2-\alpha) \rho_l] g \cos \theta - 2\alpha (\tau_B + \mu b) d_0 + \frac{3\alpha(1-2\alpha)}{2d_e} P \right\}, \quad (34)$$

则 (33) 式可简化为

$$\frac{d}{dx} [(1-\alpha) \rho_s v_s^2 - \alpha \rho_l v_l^2] = A. \quad (35)$$

积分可得

$$(1 - \alpha)\rho_s v_s^2 - \alpha\rho_l v_f^2 = Ax + C, \quad (36)$$

式中,  $C$  为积分常数, 当泥石流处于临界运动状态时,  $v_s = 0, v_f = 0$ , 因此,  $C = 0$ , 故可将(36)式表示为

$$(1 - \alpha)\rho_s v_s^2 - \alpha\rho_l v_f^2 = Ax \quad (37)$$

令

$$v_f = Mv_s, \quad (38)$$

式中,  $M$  为泥石流固相和液相的流速比例, 为  $\alpha$  的函数, 通过实验确定。通过大量室内试验及现场测试, 该比例系数函数为

$$M = (1 - \alpha)^{-4} \quad (39)$$

把(38)式代入(36)式得

$$v_s = \sqrt{Ax / [(1 - \alpha)\rho_s - M^2\alpha\rho_l]} \quad (40)$$

由(40)式计算的泥石流固相速度可定义为理论速度, 根据陈洪凯等在四川境内的大金河泥石流及美姑河数十条泥石流得现场观测发现, 固相理论速度与实际速度之间存在一定的差异<sup>[25, 26]</sup>, 定义差异系数  $G$  为

$$G = v_s / v_{s'} \quad (41)$$

式中,  $v_{s'}$  为固相实际流速(m/s)。

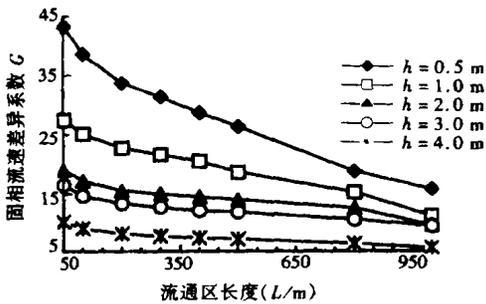


图4 泥石流固相流速比例系数  
曲线图 ( $\alpha = 0.05$ )

大量的实验表明, 固相流速差异系数  $G$  是泥石流固相比  $\alpha$ 、流通区长度  $L$  和泥石流厚度  $h$  的函数, 即

$$G = G(\alpha, L, h) \quad (42)$$

陈洪凯等近年来对中国西部 20 余条泥石流的调查及观测资料分析, 较全面地获取了固相流速差异系数<sup>[25, 26]</sup>, 如固相比为 0.05 时的差异系数见图 4。至此, 泥石流体内固相实际流速可由(43)式确定:

$$v_s = v_{s'} / G \quad (43)$$

将(38)式中的固相理论流速替换为实际流

速, 便可确定泥石流浆体的实际流速, 即

$$v_f = Mv_s \quad (44)$$

表 1 几条泥石流的固相分相流速计算结果

泥石流沟名称	固相比 $\alpha$	固相密度 $\rho_s / (\text{g}/\text{cm}^3)$	液相密度 $\rho_l / (\text{g}/\text{cm}^3)$	等效粒径 $d_e / \text{cm}$	现场观测平均流速 $v / (\text{m}/\text{s})$	本文计算结果	
						固相流速 $v_s / (\text{m}/\text{s})$	液相流速 $v_f / (\text{m}/\text{s})$
平川泥石流	0.049 7	2.4	1.50	8.16	9.70	9.19	11.30
牛牛坝泥石流	0.061 1	2.3	1.43	12.51	11.56	10.95	14.09
天山公路 K631 泥石流	0.090 2	2.5	1.66	10.33	11.60	8.37	12.22

### 3 工程验证

以四川省凉山彝族自治州境内的西昌至木里干线公路的平川沟泥石流、美姑河流域牛牛坝泥石流及新疆天山公路 K631 泥石流为例, 3 条泥石流现场观测平均速度分别为 9.70(m/s)、11.56(m/s) 和 11.60(m/s)<sup>[1]</sup>。通过现场采集泥石流沉积物进行分析, 获取相应参数, 计算结

果与实际情况具有较好的一致性(表1)。

## 4 结 论

第1 泥石流流速尤其是固液分相流速计算的不合理一直困扰着泥石流运动机理研究及防治工程设计,本文把泥石流流体简化为固液两相流,这对于在泥石流沟内中上游已经将粗大颗粒拦截后的泥石流体的运动是一种比较客观的简化<sup>[21]</sup>。

第2 运用两相流理论初步建立了泥石流分相流速计算方法,较详细地推导了计算方法的演绎过程,通过大量的现场测试资料初步确定了相关的比例系数。通过工程实例对该方法进行了验证,显示其良好的一致性。

第3 该方法具有两个显著优点:1) 可同时适用于粘性泥石流和稀性泥石流的固液分相流速计算;2) 可在泥石流爆发以后反算泥石流爆发期间的固液两相实际流速,因为该方法所需的所有参数均易于在泥石流爆发以后获取,如泥石流爆发期间的流体深度可通过沟岸泥位确定,固相比、固液两相密度及浆体相关参数可通过泥石流沉积物取样进行室内分析确定,而流通区的长度及沟床平均倾角则相对固定。

第4 本文方法主要适用于计算沟谷型泥石流流通区出口处的泥石流固液分相流速,而对于泥石流沟内任意地方的固液分相流速计算理论关键是系数  $G$  的确定,目前正处于研究过程中。

### [参 考 文 献]

- [1] 陈洪凯,唐红梅,马永泰,等. 公路泥石流研究及治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004, 108—121.
- [2] 杜榕桓,李鸿璜,唐邦兴,等. 三十年来的中国泥石流研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(1): 64—73.
- [3] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993, 170—180.
- [4] 吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学技术出版社, 1990, 141—164.
- [5] Bagnold R A. Experimental on a gravity free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. Proc Royal Soc London, Ser A, 1954, 225: 49—63.
- [6] 倪晋人,王光谦. 泥石流的结构两相流模型I: 理论[J]. 地理学报, 1998, 53(1): 66—76.
- [7] 倪晋人,王光谦. 泥石流的结构两相流模型II: 应用[J]. 地理学报, 1998, 53(1): 77—85.
- [8] 倪晋人,王光谦. 高浓度恒定固液两相流运动机理探析I: 理论[J]. 水利学报, 2000, (5): 22—26.
- [9] Richard M Iverson. The physics of debris flow[J]. Review of Geophysics, 1997, 35(3): 245—296.
- [10] Ghilardi P, Natale L, Savi F. Modeling debris flow propagation and deposition[J]. Phys Chem Earth, 2001, 26(9): 651—656.
- [11] Tamotsu Takahashi. Debris flow on prismatic open channel[J]. Journal of the Hydraulics Division, Proc ASCE, 1980, 106(HY3): 381—396.
- [12] CHEN Cheng\_lung. General solution for viscoplastic debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, (ASCE), 1988, 114(3): 259—282.
- [13] 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, 65—70.
- [14] 王继康. 泥石流防治工程技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996, 61—64.
- [15] 陈洪凯,唐红梅. 公路泥石流水毁概化模式研究[J]. 公路, 2003, (8): 143—148.
- [16] 陈洪凯,唐红梅,马永泰. 公路特大型泥石流研究及治理新理念[J]. 公路, 2004, (2): 77—83.
- [17] 陈洪凯,唐红梅,吴四飞. 公路特大型泥石流灾害控制技术研究[J]. 公路, 2004, (3): 1—5.
- [18] 陈洪凯,唐红梅. 速流结构防治泥石流的理论及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 11—16.

- [19] 王蓉,翁其能,陈洪凯. 冲淤变动型沟谷泥石流防治结构及计算[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 118—122.
- [20] 陈洪凯,唐红梅,吴四飞. 泥石流对速流结构的磨蚀作用研究[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(11): 1150—1156.
- [21] 钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989, 160—162.
- [22] 张远君,王惠玉,张振鹏,等. 两相流体动力学[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987, 51—111.
- [23] 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, 280—285.
- [24] 林建忠. 流固两相拟序涡流及稳定性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003, 3—20.
- [25] 陈洪凯,唐红梅,马永泰,等. 冲淤变动型沟谷泥石流防治结构抗撞关键技术研究报告[R]. (交通部人才专项基金项目), 重庆交通学院, 2004, 37—45.
- [26] 陈洪凯,马永泰,唐红梅,等. 公路泥石流治理研究及推广应用研究报告[R]. (四川省公路局重点科技项目). 重庆: 重庆交通学院, 2005, 60—72.

## Research on Method to Calculate Velocities of Solid Phase and Liquid Phase in Debris Flow

CHEN Hong\_kai<sup>1,2</sup>, TANG Hong\_mei<sup>1</sup>, CHEN Ye\_ying<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;

2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Velocity of solid phase and liquid phase in debris flow are one key problem to research on impact and abrasion mechanism of banks and control structures under action of debris flow. Debris flow was simplified two-phase liquid composed of solid phase with the same diameter particles and liquid phase with the same mechanical features. Assuming debris flow is one dimension two-phase liquid moving to one direction, then general equations of velocities of solid phase and liquid phase were founded in two-phase theory. Methods to calculate average pressures, volume forces and surface forces of debris flow control volume were established. Especially, surface forces were ascertained using Bingham's rheology equation of liquid phase and Bagnold's testing results about interaction between particles of solid phase. Proportional coefficient of velocities between liquid phase and solid phase was put forward, meanwhile, divergent coefficient between theoretical velocity and real velocity of solid phase was provided too. To state succinctly before, method to calculate velocities of solid phase and liquid phase was obtained through solution to general equations. The method is suitable for both viscous debris flow and thin debris flow. Additionally, velocities every phase can be identified through analyzing deposits *in situ* after occurring of debris flow. It is obvious from engineering case that in the method it is consistent to that in real time field observation.

**Key words:** debris flow; two-phases fluid; velocity of solid phase and liquid phase; calculation method; verification