

# 泥石流的结构两相流模型: II. 应用\*

倪晋仁

(北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

王光谦 熊育武

(清华大学水利工程系, 北京 100084)

张 军 康志成

(中国科学院东川泥石流观测研究站, 东川 654100)

**提 要** 本文应用泥石流的结构两相流模型对各类泥石流的运动机理进行探讨, 并成功地解释了泥石流运动中的一系列特殊现象, 如可能出现的颗粒浓度“上大下小”型分布、泥石流垂线速度的“反 S”型分布、泥石流中颗粒脉动速度分布变化的特殊性、泥石流的输移特性以及在一定条件下出现的“流核”现象, 等等。模型计算结果得到了实验资料的验证。

**关键词** 泥石流 特殊性 结构两相流模型 应用

## 1 泥石流运动的特殊性

泥石流在许多方面不同于一般固液两相流或洪水高含沙两相流。除了产生泥石流所需的丰富的物质储量、陡峭的地形及特殊的水动力条件外, 泥石流在运动特性上也表现出一系列既复杂又特殊的现象。根据室内试验和野外观察, 泥石流运动的特殊性可归纳如下:

(1) 泥石流是一种特殊的固液两相流。泥石流内部结构复杂, 形态多样, 但从整体上仍可把泥石流看作结构两相流<sup>[1]</sup>, 即把水和细颗粒泥沙结合而成的非沉降性浆体看作“液相”, 而把大于某临界粒径的粗泥沙或石块看作“固相”。对泥石流野外观测资料的分析表明<sup>[3]</sup>, 在密度  $\gamma_m$  大于  $1\,400\text{ kg/m}^3$  的低粘性泥石流中具有上限粒径  $D < 0.05\text{ mm}$  的非沉降性浆体; 在密度  $\gamma_m$  大于  $1\,900\text{ kg/m}^3$  的高粘性泥石流中具有上限粒径  $D < 2.0\text{ mm}$  的非沉降性浆体。据此可结合泥石流的密度(或根据文献[1]给出的划分关系式)来给出“固相”和“液相”的分界粒径。泥石流多为非牛顿体, 在一定条件下可简化为宾汉体、膨胀体或粘塑性体。

(2) 泥石流多为阵性流。泥石流的运动与其所在的沟坡形态及流域物质供应密切相关。上游物质供应的不连续会造成不稳定泥石流流动的随机性和间歇性, 从而可能形成以一阵一阵的方式运动的不连续的阵发性流动, 即阵性流。每一阵泥石流由其“龙头”、“龙尾”和“龙身”构成一个完整的剖面<sup>[2]</sup>, 由于“龙头”运动速度很大且头部能量集中, “龙头”所到之处具有强大的冲击力, 所以泥石流造成的危害极大。

(3) 泥石流运动中粗颗粒有向表层集中的趋势。泥石流中粗颗粒的这种运动取向在水石流中表现尤为突出, 它导致的直接结果是使泥石流中固相颗粒浓度在垂线上出现了“反

\* 国家自然科学基金、霍英东青年教师基金和中国科学院东川泥石流观测研究站基金资助项目。

来稿日期: 1997-01; 收到修改稿日期: 1997-08。

常”的分布——“上大下小”型分布。这种在接近流动表层处颗粒浓度最大的分布在一般固液两相流中很难见到。但是,这种以固体颗粒间作用为主时独有的垂向分选现象,在一般泥石流中因固体颗粒受到液相浆体的束缚而无法表现出来,其结果是固相颗粒在泥石流中常常呈现出无分选的状态。

(4) 泥石流的垂线速度分布可能为“反S”型曲线。当以颗粒作用为主的泥石流在不很陡峻的沟坡形成后,泥石流的速度剖面往往在垂直方向上出现一个拐点,从而将泥石流的垂线速度分布曲线由床面向上分为上凸和上凹两部分,沿流深整体呈“反S”型分布曲线。这种现象在一般固液两相流中亦极少见到。

(5) 泥石流具有特殊的脉动强度分布规律。泥石流中液相的脉动强度在粘性颗粒含量较高时小得可以忽略不计。另一方面,建立在类比气体分子热运动的“温度”概念上的颗粒相脉动强度却具有较大的变化范围,且在不同条件下沿垂线出现多种分布类型<sup>[4]</sup>。与一般固液两相流中具有相对稳定曲线类型的脉动强度分布规律相比,泥石流具有其独特的表现。

(6) 泥石流运动中可能在表层出现“流核”。这种特殊现象主要出现在泥石流“液相”为非牛顿体且存在宾汉极限剪切力 $\tau_b$ 时。由于在接近表层区域的泥石流剪切力小于宾汉极限剪切力,所以不可能存在相对运动,因而位于流动顶部的塞流层将以“流核”的形式作为一个整体向前流动。这种特殊现象将会使泥石流能够比一般挟沙水流浮托更重体积更大的固体颗粒。

(7) 泥石流具有独特的输移特性。一般挟沙水流中的固体颗粒输移距离较长,且在进入冲积平原后可通过与床面丰富的松散沉积物进行物质交换而形成与河槽输移能力相一致的输沙量。然而,对于我国常见的暴雨泥石流,泥石流的输移距离则相对较短,且固体物质供应主要靠因外动力触发产生的崩塌滑坡土体或对沟谷河槽中堆积物的侵蚀来满足,一旦物质不能及时供给,则会形成非连续流动。泥石流搬运固体的能量有相当一部分来自固体颗粒本身的势能。此外,即使对实验条件下控制形成的二维稳定均匀泥石流,亦因泥石流液相的复杂变化和固相颗粒浓度的变化,不能象河道水沙流一样由水力条件和泥沙代表粒径简单决定其输移能力。

正是泥石流运动的上述诸多特殊性使得它成为一种特殊的山地灾害,因而需要采用特殊的工程对策,并需要不同于一般固液两相流的模型来对之描述。应用前文中提出的泥石流的结构两相流模型,本文将对各类泥石流的运动机理进行探讨并尝试对泥石流运动中所表现出的各种特殊现象从机理上给予解释。

## 2 泥石流的运动机理

泥石流依其密度大小又可划分为稀性泥石流和粘性泥石流。稀性泥石流运动机理与紊流型高含沙两相流相似,对此已有许多研究<sup>[5]</sup>。粘性泥石流则因其“两相”组成结构特殊、密度较高,其运动机理比较复杂。

对于紊动弱、粘度和密度高的粘性泥石流来说,应用结构两相流模型进行描述,确实可使“两相”流变参数的确定变得相对容易和合理。基于结构两相流的概念,泥石流的运动特性在很大程度上是由两相间作用的对比决定,这种对比结果实质上往往是由相间作用力控制。由于目前关于粘性泥石流条件下的实测资料很少,且仅限于某些定位观测站中测

得的泥石流表面速度 (或似平均速度), 因而定量的验证多数也仅限于此<sup>[3]</sup>。

粘性泥石流运动中单位体积上相间作用力可用 Stokes 阻力形式表达, 即

$$M_{px} = -M_{fx} = \frac{18\mu\lambda}{D^2}(u_f - u_p) \quad (2-1)$$

式中  $M_{px}$  和  $M_{fx}$  分别为作用于颗粒相或液相的单位体积上的相间作用力,  $\mu$  为液相粘滞系数;  $D$  为颗粒粒径;  $u_f$  和  $u_p$  分别为液相与固相速度;  $\lambda$  为与颗粒浓度相关的修正系数。

当式 (2-1) 中  $u_f = u_p$  时, 泥石流可以看成“伪一相流”或其内固、液两相作用相当, 这时如果泥石流粘度很高, 则很容易表现出非牛顿体的运动特征。当  $u_f \neq u_p$  时, 按两者大小不同的对比, 泥石流中“两相”对泥石流的运动机理起着不同的作用。在多数情况下, 泥石流的运动是由两相共同作用, 即最常见的情形是  $|u_f - u_p|$  为有限值的情形。在一般条件下, 泥石流中的固相颗粒, 因其液相的强烈束缚, 不易表现出颗粒相的垂向分选特征。

由于泥石流中固液两相及其两相之间的作用都很强, 在泥石流头部集中的大石块应该由液相静剪切力和颗粒碰撞力共同支撑。理论上, 式 (2-1) 中的  $u_f$  和  $u_p$  都可由结构两相流模型求解, 但关于  $u_f$  和  $u_p$  的测定则因技术限制十分困难。

### 3 泥流的运动机理

泥流是内部物质组成相对简单的一种泥石流, 按其流态又可分为稀性泥流和粘性泥流。稀性泥流与高含沙水流较为相似, 在这种情况下结构两相流模型可以简化为紊流模型; 粘性泥流则因其流动往往已不属于普通的牛顿流体, 对应条件下的结构两相流模型可简化为宾汉体模型。由于粘性泥流中细颗粒的含量较大时, 其内水和沙已不再发生分选且全部泥沙都有可能以中性悬浮形式运动, 实际上它已具有伪一相流的性质。

对于粘性泥流, 在二维稳定均匀流条件下, 其应力关系可简化为<sup>[1]</sup>

$$T_{mxy} \doteq T_{fxy} = \tau_b + \mu \frac{du_f}{dy} \quad (3-1)$$

式中  $T_{mxy}$  和  $T_{fxy}$  分别表示泥流沿流动方向的总应力和“液相”应力;  $\tau_b$  为宾汉极限应力;  $\mu$  为泥流的液相粘滞系数;  $u_f$  为泥流沿  $y$  向任一点的液相速度。

应用 (3-1) 式进行的研究已有很多<sup>[5]</sup>。研究表明, 对泥流运动特性影响最大的是宾汉极限剪切应力  $\tau_b$ 。 $\tau_b$  的存在使得在泥流运动中形成特殊的景观, 即在接近泥流表层的区域存在着厚度为  $\tau_b/\gamma_m \sin \theta$  的以“流核”形式作整体运动的流层, 流核的运动速度  $u_c$  可由简化模型得出

$$u_c = \frac{(\gamma_m H \sin \theta - \tau_b)^2}{2\mu \gamma_m \sin \theta} \quad (3-2)$$

式中  $\theta$  为流动方向与水平方向的夹角;  $H$  为流深。显然,  $\tau_b$  越大, 流核所占据的厚度愈大。当  $\tau_b$  达到  $\gamma_m H \sin \theta$  时, 泥流将在整个流深范围内处于停顿状态。事实上, 当流核的厚度增加到某种程度后, 其流动表面就可能支撑具有一定尺度的粗颗粒泥沙, 从而显示出与一般固液两相流完全不同的运动特性。

### 4 水石流的运动机理

根据前文中关于泥石流的分类, 水石流按其颗粒浓度大小可再分为稀性泥石流 (不饱

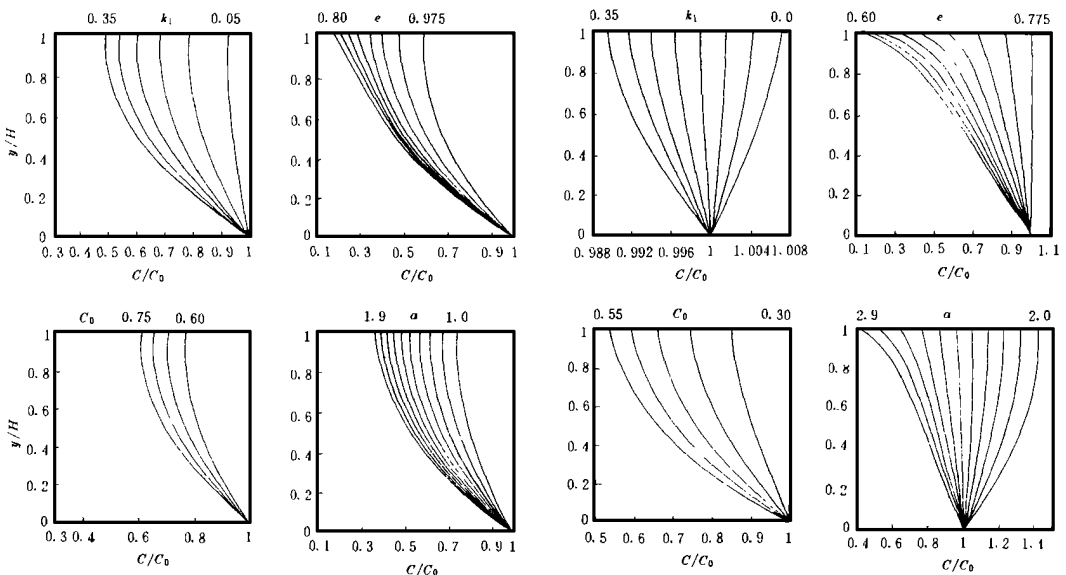
和水石流)和饱和水石流。对于前者,除考虑颗粒间的相互作用外,还应按前文中式(5-30)进行修正以计入液相的影响;对于后者,泥石流的结构两相流模型可简化为颗粒流模型<sup>[1]</sup>。

有关水石流或与此类似的层移质在二维稳定均匀流动条件下的室内试验资料相对来说较为丰富,因此,结合水石流试验资料对泥石流运动的诸多特殊性进行讨论是本文的重点。

本文所用的验证资料是王立新<sup>[6]</sup>的缓槽高浓度(无粘性颗粒)资料和 Egashira<sup>[7]</sup>的陡槽不饱和水石流(无粘性颗粒)实测资料。前者采用直径为 $D = 0.95 \text{ mm}$ 的塑料沙分别在 $\theta = 0.22$ 和 $\theta = 0.3$ 两种槽坡条件下进行实验,有关实验参数为颗粒密度 $\rho_p = 1.046 \text{ g/cm}^3$ ,颗粒弹性恢复系数 $e = 0.95$ ,内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$ ,底部浓度 $C_0 = 0.62$ ,两组实验的流深分别为 $76 \text{ mm}$ 和 $79 \text{ mm}$ 。后者采用直径为 $D = 3.89 \text{ mm}$ 的玻璃球,在 $\theta = 18$ 的坡槽条件下,设计了 $H = 16 \text{ mm}$ 和 $H = 17 \text{ mm}$ 的两组试验,对应实验参数为 $\varphi = 26.5^\circ$ , $e = 0.8$ , $C_0 = 0.295$ 和 $C_0 = 0.280$ , $\rho_p = 2.48 \text{ g/cm}^3$ ,这两个系列的实验对于研究水石流的运动机理具有很好的代表性。

不失一般性,将代表缓坡且液相作用不明显的第一组(对应 $\theta = 0.22$ )实验特征参数和代表陡坡且液相作用不可忽略(因浓度 $C < 0.35$ )的第三组(对应 $C_0 = 0.295$ )实验参数作为结构两相流模型的输入参数,则根据前文中的式(5-19)至式(5-30)可以得到关于水石流颗粒速度分布、浓度分布、脉动强度及颗粒输移率等一系列要素变化规律的初步认识。

对比“缓槽—近饱和水石流”和“陡槽—不饱和水石流”两组典型实验条件下的模型计算结果(见图1~图4)可以发现,当影响泥石流运动要素的诸参数(包括摩擦应力系数 $k_1$ , $e$ , $C_0$ , $D$ 和修正系数 $\alpha^{[1]}$ )中固定其中4个而任意变化另一个时,除了粒径 $D$ 的影响



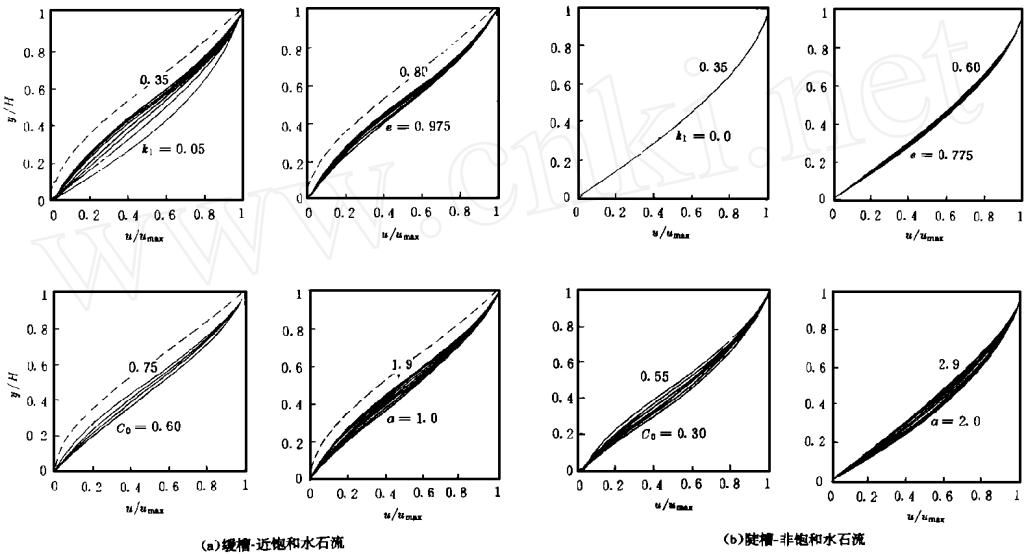
(a) 缓槽近饱和水石流 (b) 陡槽不饱和水石流

(a) saturated water-rock flow in mild slope channels (b) non-saturated water-rock flow in steep slope channels

图1 泥石流的颗粒浓度分布变化特性

Fig. 1 Particle concentration profiles for debris flow s

因在模型简化时被忽略而未反映出来外, 其余参数都对泥石流的运动有不同程度的影响。图中  $y/H$  为从床面计起的垂直床面向上的相对坐标;  $C$ 、 $u$ 、 $V$  和  $Q_s$  分别为颗粒浓度、颗粒速度、颗粒脉动速度均方值 (脉动强度) 和颗粒输移率。带下标 “max” 的符号代表对应变量沿整个流深的最大值。



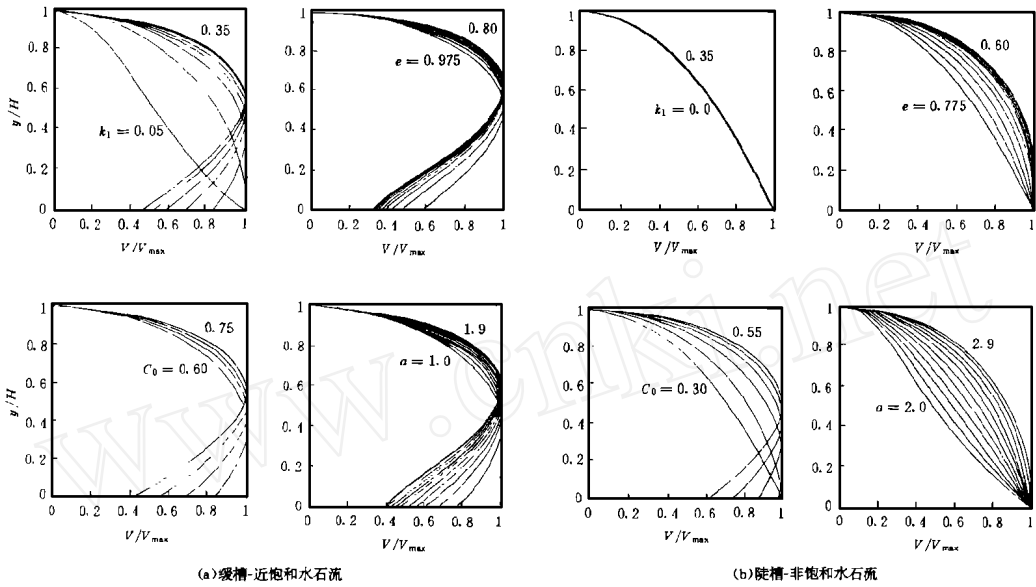
(a) 缓槽近饱和水石流 (b) 陡槽非饱和水石流

(a) saturated water-rock flow in mild slope channels (b) non-saturated water-rock flow in steep slope channels

图 2 泥石流的速度分布变化特性

Fig. 2 Particle velocity profiles for debris flow s

水石流的浓度垂线分布在上述两种典型试验条件下随各实验特征参数的变化趋势是一致的。但是, 对于缓槽中的近饱和水石流,  $k_1$  的变化对浓度分布曲线影响很大, 从而说明摩擦应力在缓槽流动中不可忽略。另一方面, 当  $k_1$  向零趋近时, 随着摩擦应力的减少颗粒间碰撞作用开始占优势, 这时, 水石流的颗粒浓度分布渐趋均匀, 甚至出现“上大下小”型反常分布 (见图 1(a))。这说明颗粒有向表面 (或头部) 集中的表现。在二维、三维稳定或非稳定的条件下, 这种表现将以更加奇特的面目出现。相比之下, 对于陡槽中的非饱和水石流,  $k_1$  的影响就小得多了, 当  $k_1$  从 0 变至 0.35 时, 浓度分布曲线几乎没有什么变化, 这说明颗粒在陡槽中作快速流动时, 摩擦应力可以忽略不计; 在这种情形下, 颗粒浓度的垂线分布比较均匀, 且很容易出现“上大下小”型的分布曲线 (见图 1(b))。由图 1 还可以看出, 对缓槽中的近饱和水石流, 修正系数  $\alpha$  几乎不能影响颗粒浓度的“上小下大”型分布且  $\alpha$  取值相对较小, 变化范围约在 1~2 之间; 但是对陡槽中的非饱和水石流, 当  $\alpha$  值的取值大于 2 时流动才有意义, 且对颗粒浓度分布的线型影响很大, 这时  $\alpha$  的影响必须考虑。此外, 底部浓度的减小和颗粒弹性恢复系数的增加都在不同程度上反映了固体颗粒向表层集中的倾向, 因而其结果都是使颗粒浓度的垂线分布趋向均匀。

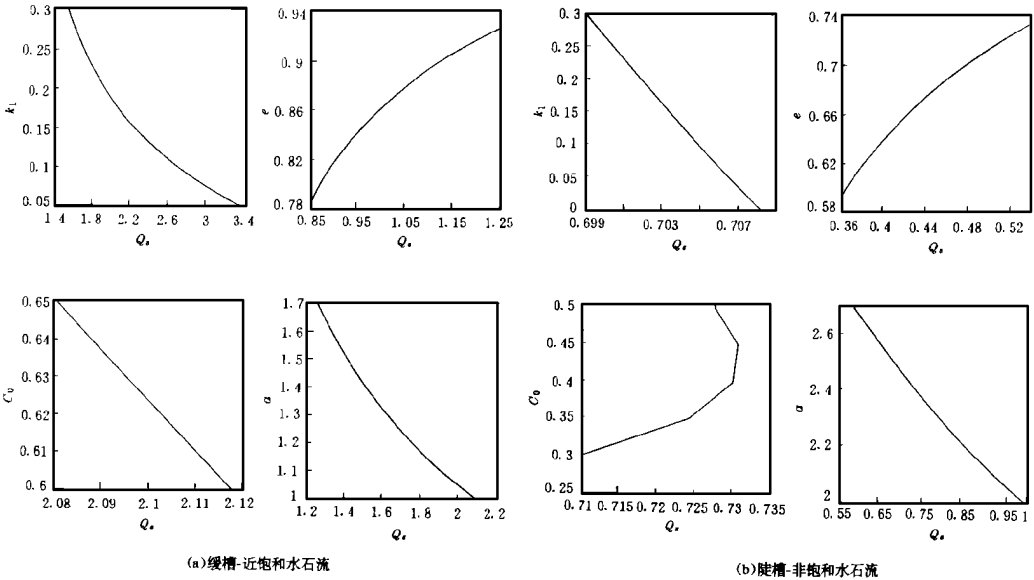


(a) 缓槽近饱和和水石流 (b) 陡槽不饱和和水石流

(a) saturated water-rock flow in mild slope channels (b) non-saturated water-rock flow in steep slope channels

图 3 泥石流的脉动强度分布变化特性

Fig. 3 Particle fluctuating-intensity profiles for debris flow s



(a) 缓槽近饱和和水石流 (b) 陡槽不饱和和水石流

(a) saturated water-rock flow in mild slope channels (b) non-saturated water-rock flow in steep slope channels

图 4 泥石流的输移特性

Fig. 4 Particle transport rate for debris flow s

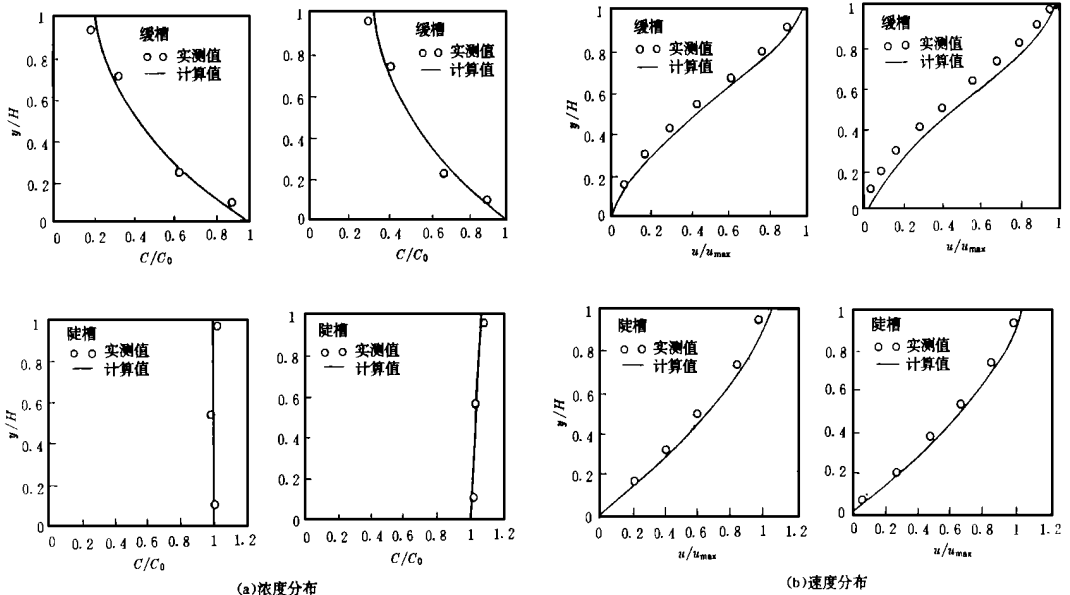
水石流的速度垂线分布在两种典型试验条件下随实验特征参数的变化趋势也是一样的。对缓槽中的近饱和水石流,  $e$  和  $\alpha$  的变化对速度分布的影响不明显, 而  $k_1$  的影响则比较明显。当  $k_1$  从 0.05 逐渐增大时, 速度逐渐减小且其垂线分布由无拐点的上凹型曲线变为具有明显拐点的“反 S”型曲线(见图 2(a))。当  $k_1$  增大到某一极限值后,  $k_1$  继续增加并不能使流速减少多少, 从而使速度分布趋向某最小极限分布(见图 2 中的虚线), 对应于这种情况下的极限速度分布可以用一个极限表达式很好地概括, 即

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(2 - \frac{y}{H}\right) \left(\frac{y}{H}\right)^2 \quad (4-1)$$

该式经与 Takahashi<sup>[8]</sup>, Tsubaki 等<sup>[9]</sup> 及 Savage<sup>[10]</sup> 等人的实测资料对比得到了很好的验证<sup>[4]</sup>。作为对比, 对陡槽中的非饱和水石流, 满足流动条件的  $\alpha$  取值集中在 2.0~2.9 之间且对水石流速度分布有一定影响;  $k_1$  和  $e$  的变化对速度分布几乎没有影响。两种试验条件下,  $C_0$  的增大都使速度沿垂线的分布更不均匀。

水石流脉动强度沿垂线的分布在两种试验条件下有很大不同。对于缓槽中的近饱和水石流,  $k_1$  的变化明显地改变着脉动强度分布曲线(见图 3(a)); 但是对于陡槽中的非饱和水石流,  $k_1$  的变化对垂线脉动强度分布毫无影响(见图 3(b))。 $\alpha$  的变化对前者影响不大, 但对后者影响相对较大。在两种实验条件下,  $C_0$  和  $e$  的变化都对水石流脉动强度分布有一定的影响。

对比两种典型实验条件下的泥石流颗粒输移率  $Q_s$  随各项参数的变化可知,  $Q_s$  随  $e$  的增大而增大, 随  $k_1$  的增大而减小。然而, 对陡槽中的非饱和水石流,  $Q_s$  随  $k_1$  增大而增加的幅度小得可以忽略不计, 即在这种情况下  $Q_s$  与  $k_1$  几乎无关。 $\alpha$  的增加虽然在两种条件下(见



(a) 浓度分布

(b) 速度分布

(a) 浓度分布 (b) 速度分布

(a) particle concentration profiles (b) particle velocity profiles

图 5 模型计算结果与实测资料的比较

Fig. 4 Comparison of theoretical and measured results

图 4) 都使  $Q_s$  减小, 但在缓槽饱和和水石流条件下  $\alpha$  值相对较小。

在影响  $Q_s$  的诸试验参数中,  $C_0$  的影响颇为复杂。由图 4 可以看出, 当  $C_0$  较小时, 随着  $C_0$  的增加  $Q_s$  亦在增加; 当  $C_0$  大于 0.45 后继续增加时,  $Q_s$  开始减小。

由上面对模型计算结果的讨论不难发现, 对于缓槽中的近饱和水石流, 修正系数  $\alpha$  的变化范围大约在 1~2 之间; 对于陡槽中的非饱和水石流,  $k_1$  的变化对水石流的运动特性几乎没有影响。因此, 为使问题简化, 对上述第一种典型的实验条件, 可以取  $\alpha=1.5$ ; 对上述第二种实验条件, 可取  $k_1=0$ 。由此可以发现, 当对缓槽中的近饱和水石流取  $k_1=0.3$ , 而对陡槽非饱和水石流取  $\alpha=2.45$  时, 实测水石流颗粒浓度及速度垂线分布与模型计算结果十分吻合。图 5 中给出了模型验证结果, 其中相对脉动强度  $V/V_{\max}$  分布因没有对应的实验测量结果而未作同步验证。

图 5 说明, 实测水石流速度沿垂线的“反 S”型分布 (其拐点位置可通过  $d^2u/dy^2=0$  的条件确定) 及“上大下小”型的颗粒浓度分布都可通过结构两相流模型进行描述, 但是这两种不同于一般固液两相流运动的特殊现象通常不易同时出现。

## 5 结论

与一般固液两相流相比泥石流具有许多独特的运动特性, 应用泥石流的结构两相流模型<sup>[1]</sup>可以从理论上探讨各类泥石流的运动机理并可初步合理地解释泥石流运动的特殊性。随着测试技术的提高, 在应用泥石流结构两相流模型对各类泥石流进行深入研究时, 应进一步考虑泥石流“固相”和“液相”运动速度的差异以及固液两相相互作用的机制。

## 参 考 文 献

- 1 倪晋仁, 王光谦 泥石流的结构两相流模型: I. 理论 地理学报, 1998, 53(1) 66~76
- 2 王光谦, 倪晋仁 波状泥石流运动特性分析 泥沙研究, 1994, 4 1~9
- 3 费祥俊, 康志诚, 王裕宜 细颗粒浆体泥石流浆体及其对泥石流运动的作用 见 泥石流和洪水灾害防御国际讨论会暨第三次全国泥石流学术讨论会组织委员会编 泥石流及洪水灾害防御国际学术讨论会论文集(A 卷), 四川峨眉, 1991 47~52
- 4 王光谦, 倪晋仁 泥石流的颗粒流模型 山地研究, 1992, 10(1) 1~10
- 5 钱宁 高含沙水流运动 北京: 清华大学出版社, 1989
- 6 Wang L X. Flume experiments on debris flow. In French R H (ed). Hydraulics/Hydrology of Arid Lands New York: ASCE Publishers, 1990 238~243
- 7 Egashira S, Ashida K, Yajima H et al Constitutive equation of debris flow. Annuals of the Disaster Prevention Research Institutes, Kyoto University, 1989, 32(B-2) 487~591
- 8 Takahashi T. Debris flow on prismatic open channel J. Hydr. Divi, Proc. ASCE, 1980, 106(3) 381~396
- 9 Tsubaki E. Grain stresses and flow properties of debris flow. Proc. JSCE, 1982, 317(1) 79~91
- 10 Savage S B. Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels J. Fluid Mech., 1979, 92(1) 53~96



## CONCEPTUAL TWO-PHASE FLOW MODEL OF DEBRIS FLOW: II. APPLICATION

N i Jinren

*(Department of Geography, Peking University, Beijing 100871)*

W ang Guangqian Xiong Yuwu

*(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)*

Zhang Jun Kang Zhicheng

*(Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Dongchuan 654100)*

**Key words** debris flow, conceptual model, application, specific characteristics

### Abstract

Based on the conceptual two-phase flow model developed in the companion paper, applications of the model to the mechanism of various debris flows including muddy flow, water-rock flow as well as the general debris flows are discussed in greater details in the present paper. Specific characteristics of debris flows are summarized and theoretical explanations are given subsequently. Special attention is paid to the flow characteristics of debris flow with cohesionless particles in either mild or steep flumes since there are enough reliable measured data in this study field. Predictions for the specific particle concentration profile, velocity profile, fluctuation profile as well as the particle transport properties are made for both saturated and non-saturated water-rock flows. It is indicated that the saturated water-rock flow occurring in the mild slope channel behaves more like the laminated flow does, with common particle concentration, fluctuation profiles as well as transport characteristics, but with typical particle velocity profiles different from those in sediment-laden flows. However, the non-saturated water-rock flow occurring in the steep slope channel behaves more like the rapid granular flow, dominated by the collision among particles, and thus demonstrate all kinds of special characteristics reported on the water-rock debris flows. The maximum concentrations at the flow surface and other special behaviours are successfully modeled. The predicted results are reasonably verified by the experimental results. It is also indicated that more characteristics of debris flows will be possible to be explained theoretically by using the conceptual model in case that the technology of measurements is improved in the near future.