

文章编号: 1008-2786-(2018)4-571-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000353

泥石流冲击桥墩绕流过程模拟与试验分析

刘发明¹, 王东坡^{2,3}, 何思明^{2*}, 李明清¹, 付刚¹, 张伦⁴

(1. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;
3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 4. 成兰铁路有限责任公司, 成都 610031)

摘 要: 泥石流与桥墩动力相互作用包括泥石流对桥墩的冲击淤埋作用及桥墩对泥石流运动过程的反向影响, 其中涉及复杂的流固耦合, 是学术界关注的热点问题。为研究泥石流绕流桥墩过程, 在纳维斯托克斯方程的基础上结合深度平均理论, 考虑泥石流固液两相的特点, 构建了泥石流-桥墩流固耦合物理模型, 并基于有限体积法建立时间和空间尺度上具有 2 阶精度的高效数值算法, 实现了泥石流绕流桥墩运动全程模拟, 与室内试验成果进行了对比验证。结果表明: 不同粘度的泥石流冲击桥墩绕流过程有显著不同, 相同初始条件下粘性泥石流堆积厚度较大, 运动速度较小, 堆积范围较小; 反之, 稀性泥石流堆积厚度较小, 运动速度较大, 堆积范围也较大。数值模拟结果与室内模型试验非常接近, 验证了物理模型的适用性。

关键词: 泥石流; 桥墩绕流; 流固耦合; 固液两相流; 有限体积法

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

泥石流是一种在全世界范围内普遍发生的自然灾害, 其运动过程模拟和机理性研究也是国内外关注的重点^[1-4]。随着桥梁工程建设范围的扩大, 尤其在西南山区, 泥石流对桥墩的冲击淤埋现象越发显著^[5]。除了泥石流对桥墩的冲击淤埋作用, 桥墩对泥石流的运动也有一定的影响, 即存在灾害与承灾体的双向耦合作用, 然而目前还没有详细的研究来描述分析这种物理过程。近年来, 数值模拟越来越多地被应用于灾害与承灾体动力相互作用的研究中。李新坡等(2010)^[6]用离散元法 (DEM) 模拟了崩塌产生的碎屑流对刚性填土壁和刚性挡墙的影响, 考察了崩塌体的形状、坡面角度、颗粒性质等对碎屑流溢出比率以及作用在结构物上冲击力的影

响。Teufelsbauer 等(2011)^[7]采用颗粒离散元软件 PFC3D, 对崩塌碎屑流的堆积形态、流动形式和对刚性墙的冲击力进行详细阐述。类似的工作还包括: Buchholtz 等(1998)^[8]、Faug 等(2002)^[9]、Zakeri 等(2008)^[10]。虽然离散元法可以描述灾害运动过程, 但对于泥石流而言, 较难反映出其流态特性, 计算参数难以确定, 且大多为泥石流对承灾体的单向作用。近年来也有学者进行了桥墩和泥石流的流固耦合作用研究, 姚昌荣等^[11]以成昆铁路某重力式桥墩结构作为研究对象, 采用 ANSYS + CFX 建立了泥石流冲击桥墩的流固耦合分析模型, 分析桥墩在不同参数的泥石流冲击作用下的响应情况。陈子俊^[12]基于 ANSYS, 在 FLUENT 模块中计算流场模型, 在

收稿日期 (Received date): 2017-11-21; **改回日期** (Accepted date): 2018-07-23

基金项目 (Foundation item): 铁道部科技研究开发计划课题 (Z2012-061); 国家自然科学基金项目 (41502297); 中国博士后科学基金 (2017M612997); 铁总试验专项 (CLRQT-2015-012); 中国中铁股份有限公司科技开发计划课题 (2012-重大-3)。[Technology Research and Development Plan of China Railway (Z2012-061); National Natural Science Foundation of China (41502297); China Postdoctoral Science Foundation (2017M612997); Experimental Project of China Railway (CLRQT-2015-012); Technology Development Plan of China Railway Group Limited (2012-Major-3).]

作者简介 (Biography): 刘发明 (1965-), 男, 四川人, 高级工程师, 主要从事铁路桥梁、地质灾害等方面研究。[LIU Faming (1965-), male, born in Sichuan province, senior engineer, mainly research on bridges and geological disasters] E-mail: huapo2017@163.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 何思明 (1968-), 男, 四川人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事山地灾害形成机制及防治技术等方面的研究工作。[HE Siming (1968-), male, Ph. D., professor, mainly research on mountain disaster formation mechanism and prevention technology] E-mail: hsm@imde.ac.cn

Transient Structural 模块中计算固体整体模型,在 System Coupling 中通过耦合界面传递,进行泥石流流冲击桥墩的双向流固耦合模拟计算,得到了泥石流流场的流速分布云图、压强分布云图、流速矢量云图和流速迹线云图。但以上基于商业软件的泥石流—桥墩流固耦合计算因为流体模型的限制,不能准确描述泥石流的流态特征。很多研究证明基于流体动力学方法,采用不同的流变模型对泥石流运动特征的描述,可以较好地反映出泥石流的流态特征。Savage 等^[13]提出了基于深度平均理论的浅水波方程,考虑土体特征的影响,较好地描述了滑坡体的运动过程。Iverson 等^[14]讨论了泥石流的流态特征,通过流体动力学法模拟了泥石流的运动过程,可为泥石流与桥墩相互作用研究提供基础。本文在纳维—斯托克斯方程的基础上结合深度平均理论,构建了二维泥石流运动数学模型,采用有限体积法对泥石流冲击桥墩绕流过程进行数值模拟,探讨了不同粘度的泥石流冲击、绕流桥墩的运动过程及形态分布。

1 泥石流运动物理方程

泥石流是典型的固液两相流,即由泥石流浆体及混入浆体中的颗粒块石组成,而颗粒及浆体的自身材料特征以及固液比的不同(固相体积分数)会使泥石流的运动特征发生改变,据此,为了更好地反映出泥石流在冲击桥墩时的运动特征,本文采用固液两相数值模型对泥石流运动绕流过程进行模拟。固液两相数值模型考虑了固液两相动量交换而建立的两组分的流体动力学方程组,每一组分都有各自的质量、动量和能量守恒方程。相比单流体模型,固液两相模型更符合物理实际,也可以解释更多的泥石流运动现象。在此模型中,假设泥石流是均匀的固液混合物,且在运动过程中固液成分均处于不可压缩状态,同时加入固液两相之间以及固液两相分别与基底之间的相互作用力等因素。基于以上考虑,泥石流固液两相的质量守恒方程和动量守恒方程可表达为:

$$\partial_t(\rho_s \alpha_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \mathbf{u}_s) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_s \alpha_s (\partial_t \mathbf{u}_s + (\mathbf{u}_s \cdot \nabla) \mathbf{u}_s) = \rho_s \alpha_s \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\zeta}_s + \mathbf{f} \quad (2)$$

$$\partial_t(\rho_f \alpha_f) + \nabla \cdot (\rho_f \alpha_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_f \alpha_f (\partial_t \mathbf{u}_f + (\mathbf{u}_f \cdot \nabla) \mathbf{u}_f) = \rho_f \alpha_f \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\zeta}_f - \mathbf{f} \quad (4)$$

其中: t 代表时间, ρ_s 和 ρ_f 分别代表泥石流固相和液相的密度, $\mathbf{u}_s = (u_s, v_s, w_s)$ 代表固相速度场, $\mathbf{u}_f = (u_f, v_f, w_f)$ 代表液相速度场, α_s 和 $\alpha_f = 1 - \alpha_s$ 分别代表泥石流单位体积内固相和液相的体积分数, $\boldsymbol{\zeta}_s$ 和 $\boldsymbol{\zeta}_f$ 代表泥石流运动过程中固相和液相所受到的应力场, $\mathbf{g} = (g_x, g_y, g_z)$ 代表重力加速度,应力 \mathbf{f} 是浮力 \mathbf{f}_b 与所有由液相与固相相互作用产生的非浮力之和 \mathbf{f}_m 的合力, $\mathbf{f} = \mathbf{f}_b + \mathbf{f}_m$ 。 \mathbf{f}_m 包括拖拽力、升力和虚拟质量力。这里,仅考虑拖拽力在泥石流运动过程中的作用,则 \mathbf{f}_m 可表示为:

$$\mathbf{f}_m = \frac{(\rho_s - \rho_f) \alpha_s \mathbf{g}}{v_T \alpha_f^{m-1}} (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s) \quad (5)$$

其中: v_T 代表固体颗粒在重力作用下于静水中的自由沉降速度; m 是与雷诺数有关的经验参数,根据雷诺数从无限大到0的变化,其取值范围在0.4至2.65之间波动。方程(1)至(4)是基于纳维—斯托克斯方程演化而来,方程组成较为复杂且不易求解,根据泥石流本身所具有的特殊长度尺度($H \ll L$, H 为泥石流特征厚度, L 为泥石流特征长度),忽略泥石流在垂直方程上变化的影响^[3,4],采用深度平均的方法对其进行简化。模型假设泥石流是均匀混合物,且在运动过程中处于不可压缩状态,考虑泥石流本身特征对其自身运动的影响。基于以上假设,数值模型方程可表达为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(uh) + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + k_{ap} \frac{1}{2} g_z h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y}(uvh) \\ &= g_x h - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2v_i \frac{\partial}{\partial x}(uh) - \frac{2}{3} kh \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[v_i \left(\frac{\partial}{\partial y}(uh) + \frac{\partial}{\partial x}(vh) \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(vh) + \frac{\partial}{\partial x}(uvh) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + k_{ap} \frac{1}{2} g_z h^2 \right) \\ &= g_y h - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_i \left(\frac{\partial}{\partial y}(uh) + \frac{\partial}{\partial x}(vh) \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[2v_i \frac{\partial}{\partial y}(vh) - \frac{2}{3} kh \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中: t 代表时间, h 代表泥石流厚度, u 和 v 分别代表泥石流沿地表顺流以及横向速度, ρ 代表与泥石流固相体积分数 α_s 有关的泥石流密度, $\rho = (1 - \alpha_s) \rho_f + \alpha_s \rho_s$,其中 ρ_s 和 ρ_f 分别代表泥石流固相和液相的密度, τ_{bx} 和 τ_{by} 代表泥石流基底所受到的阻力, v_i 为粘滞系数; k 为固定系数,通常设为0.1; g_x, g_y, g_z

则是泥石流所受到的重力加速度分量, z_b 代表基底高度, k_{ap} 代表与泥石流流动摩擦角有关的侧向土压力系数, 可表示为:

$$\left. \begin{matrix} k_{act} \\ k_{pass} \end{matrix} \right\} = 2 \frac{1 \mp (1 - \cos^2 \varphi_{int} (1 + \tan^2 \varphi_{bed}))^{1/2}}{\cos^2 \varphi_{int}} - 1 \quad (9)$$

其中: “-”代表泥石流处于发散状态时的主动土压力 k_{act} (此时 $\partial u / \partial x + \partial v / \partial y > 0$), 而“+”代表泥石流处于压缩状态时的被动土压力 k_{pass} (此时 $\partial u / \partial x + \partial v / \partial y < 0$); φ_{bed} 和 φ_{int} 分别代表基底摩擦角和泥石流内摩擦角。这里, 采用修正的基底剪切力公式来描述泥石流受阻, 可表达为

$$\tau_{bx} = \max(\rho g_s h \tan \varphi_{int} + \rho g_z (u^2 + v^2) / C_z, \rho g_s h (1 - r) \tan \varphi_{bed}) \quad (10)$$

其中: $r = \rho_w / \rho$ 代表固液密度比, C_z 代表谢才系数。

2 数值算法

有限体积法 (Finite Volume Method, FVM), 又

称为控制体积法 (Control Volume Method, CVM), 是基于物理量守恒这一基本要求, 以守恒型方程为出发点, 通过对流体运动的有限子区域的积分离散来构造离散方程的一种数值算法。有限体积法的两种导出方式, 控制容积积分法和控制容积平衡法都描述了有限各控制容积物理量的守恒性。有限体积法适用于任意类型的单元网格, 便于应用来模拟具有复杂边界形状区域的流体运动; 只要单元边上相邻单元估计的通量是一致的, 就能保证方法的守恒性; 有限体积法各项近似都含有明确的物理意义; 同时, 它可以吸收有限元分片近似的思想以及有限差分方法的思想来发展高精度算法。由于物理概念清晰, 容易编程; 有限体积法成了工程界最流行的数值计算手段。

本文采用有限体积法来求解控制方程^[15-17], 为了方便求解, 将控制方程化为向量形式:

$$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial y} = \mathbf{s} + \mathbf{t} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{w}, \mathbf{f}, \mathbf{m}, \mathbf{s}$ 和 \mathbf{t} 分别代表变量、在 x 和 y 方向上的通量和在 x 和 y 方向上源项的向量形式。它们可表达为:

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &= \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2} k_{ap} g_z h^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2} k_{ap} g_z h^2 \end{pmatrix} \\ \mathbf{s} &= \begin{pmatrix} 0 \\ g_x h - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2v_t \frac{\partial}{\partial x} (uh) - \frac{2}{3} kh \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t \left(\frac{\partial}{\partial y} (uh) + \frac{\partial}{\partial x} (vh) \right) \right] \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{t} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ g_y h - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t \left(\frac{\partial}{\partial y} (uh) + \frac{\partial}{\partial x} (vh) \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2v_t \frac{\partial}{\partial y} (vh) - \frac{2}{3} kh \right] \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

对于方程(11)进行时间和空间上的离散, 可得

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_i^{n+1} &= \mathbf{w}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{f}_e^n - \mathbf{f}_w^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (\mathbf{m}_n^n - \mathbf{m}_s^n) \\ &\quad + \Delta t (\mathbf{s}_i^n + \mathbf{t}_i^n) \end{aligned} \quad (13)$$

其中: 下标 n 代表时间步长, 下标 i 代表网格节点, Δt 代表时间步长, \mathbf{f}_e 和 \mathbf{f}_w 代表网格节点上通过东西方向的通量, \mathbf{m}_n 和 \mathbf{m}_s 代表网格节点上通过南北方向的通量, Δx 和 Δy 代表网格在 x 和 y 方向上的边界长度。此时, 在有限体积法 Godunov-type 格式的基础上, 结合 HLLC 格式来求解黎曼问题。而黎曼

问题的求解, 关键在于网格边界上的通量求解, 如 \mathbf{f}_w 可以通过以下方式求解:

$$\mathbf{f}_e = \begin{cases} \mathbf{f}_l & \text{if } 0 \leq S_l \\ \mathbf{f}_{*l} & \text{if } S_l \leq 0 \leq S_m \\ \mathbf{f}_{*r} & \text{if } S_m \leq 0 \leq S_r \\ \mathbf{f}_r & \text{if } S_r \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中: \mathbf{f}_l 和 \mathbf{f}_r 分别代表在同一网格边界上左侧和右侧的通量, 由相应的黎曼状态的变量 \mathbf{w}_l 和 \mathbf{w}_r 求解, S_l, S_m 和 S_r 则代表黎曼问题中的左、中和右区域内

的速度, \mathbf{f}_{*l} 和 \mathbf{f}_{*r} 代表黎曼接触波左右两侧的通量, 可表示为:

$$\mathbf{f}_{*l} = \begin{pmatrix} f_{*1} \\ f_{*2} \\ v_l f_{*1} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}_{*r} = \begin{pmatrix} f_{*1} \\ f_{*2} \\ v_r f_{*1} \end{pmatrix} \quad (15)$$

其中: v_l 和 v_r 代表黎曼解中左右两侧的切向速度。这里, 处于中间区域的通量 \mathbf{f}_* 需要由 \mathbf{f}_{*l} 和 \mathbf{f}_{*r} 计算得出, 可表示为:

$$\mathbf{f}_* = \frac{S_r \mathbf{f}_l - S_l \mathbf{f}_r + S_r S_l (\mathbf{w}_r - \mathbf{w}_l)}{S_r - S_l} \quad (16)$$

同时考虑到黎曼问题中干湿边界的处理, 对波速进一步的修正, 可表示为:

$$S_l = \begin{cases} u_r - 2\sqrt{g_z h_r} & \text{if } h_l = 0 \\ \min(u_l - \sqrt{g_z h_l}, u_* - \sqrt{g_z h_*}) & \text{if } h_l > 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$S_r = \begin{cases} u_l + 2\sqrt{g_z h_l} & \text{if } h_r = 0 \\ \max(u_r - \sqrt{g_z h_r}, u_* + \sqrt{g_z h_*}) & \text{if } h_r > 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$S_m = \frac{S_l h_r (u_r - S_r) - S_r h_l (u_l - S_l)}{h_r (u_r - S_r) - h_l (u_l - S_l)} \quad (19)$$

其中: u_* 和 h_* 代表黎曼平均状态, 可表示为:

$$u_* = \frac{1}{2}(u_l + u_r) + \sqrt{g_z h_l} - \sqrt{g_z h_r};$$

$$h_* = \frac{1}{g_z} \left(\frac{1}{2}(\sqrt{g_z h_l} + \sqrt{g_z h_r}) + \frac{1}{4}(u_l - u_r) \right)^2 \quad (20)$$

为了提高计算精度和防止数值震荡现象的出现, 本文还采用 MUSCL (Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws) 格式与 HLLC 进行耦合, 对于 \mathbf{w}_l 和 \mathbf{w}_r 进行重构可得:

$$\mathbf{w}_l = \mathbf{w}_i + \frac{1}{2}(\mathbf{w}_i - \mathbf{w}_{i-1}) \cdot M(\mathbf{q}_i^-);$$

$$\mathbf{w}_r = \mathbf{w}_{i+1} - \frac{1}{2}(\mathbf{w}_{i+1} - \mathbf{w}_i) \cdot M(\mathbf{q}_i^+) \quad (21)$$

其中

$$\mathbf{q}_i^- = \frac{\mathbf{w}_{i+1} - \mathbf{w}_i}{\mathbf{w}_i - \mathbf{w}_{i-1}}; \quad \mathbf{q}_i^+ = \frac{\mathbf{w}_{i+2} - \mathbf{w}_{i+1}}{\mathbf{w}_{i+1} - \mathbf{w}_i} \quad (22)$$

功能函数 M 采用 min-mod flux 限制器, 可表示为:

$$M(x) = \max(0, \min(1, \mathbf{q})) \quad (23)$$

3 结果及分析

3.1 物理模型试验

泥石流冲击桥墩物理模型试验平台由桥墩、泥石流水槽、料斗、尾料池、测试实验设备等部件构成 (图 1)。整个泥石流模拟系统可分为: 物源区、流通区及堆积区, 分别由两个料斗、有机玻璃水槽及堆积平台组成; 可模拟泥石流启动、运移、堆积的全过程。桥墩形状设计为圆形墩, 墩高 1 m、桩径为 30 cm, 于桥墩迎冲面安装 9 个压力传感器, 传感器呈方阵排列, 列间距 (中心距) 为 5 cm, 排间距 (中心距) 为 8 cm, 底排传感器中心距堆积平台垂向间距为 6.5 cm, 如图 2 所示。



图 1 物理模型试验装置

Fig. 1 Physical model test apparatus



图 2 圆形桥墩

Fig. 2 Circular pier model

试验所用泥石流材料取自野外泥石流沟 (图 3), 并进行现场初步筛分。试验设计泥石流容重设

计为 $11 \sim 19 \text{ kN/m}^3$,裹挟大块石($40 \sim 60 \text{ mm}$)含量1%,小于 10 mm 的细块石含量71%。试验中保持各组颗粒级配一致,颗粒级配曲线如图4所示。



图3 试验材料
Fig.3 Laboratory materials

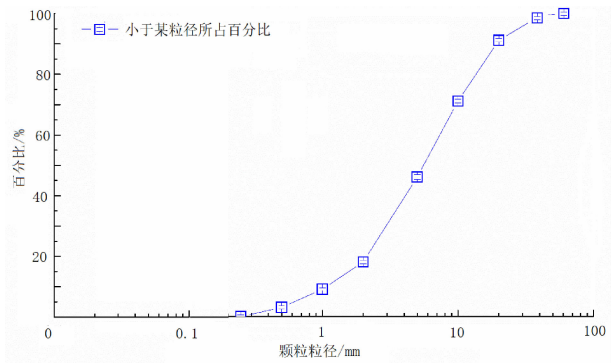


图4 固相颗粒级配曲线
Fig.4 Grain size distribution of the mixture

3.2 数值模型验证

为了验证模型的可行性与适用性,本文分别对三种不同类型(粘性、亚粘性、稀性)的泥石流绕流桥墩运动形态进行了模拟,并将计算结果与模型试验结果进行对比。为了确保计算结果的可靠性,模型所用参数均以试验数据为参考,针对不同类型泥石流分别取值,不同类型的泥石流其流态差别主要体现在粘度特征上。众所周知,泥石流是由固液两相组成,即泥石流浆体及混入浆体中的颗粒石组成,而颗粒的不断增加会使泥石流浆体的粘度发生改变。据此,本文将影响泥石流粘滞系数的因素考虑为泥石流浆体浓度和泥石流颗粒组成的综合作用。由室内试验统计可知,在不同情况下,泥石流粘度取值一般在 $0.001 \sim 10$ 变化,因此,针对不同类型的泥石流,其相应粘度系数取值将根据以上两个因素综合确定。

3.2.1 粘性泥石流

在粘性泥石流试验模拟中,具体模型选取泥石流运动参数如表1所示,其中基于粘性泥石流其浆体浓度或颗粒组成中粘土成分含量较高,粘度系数取值也较大(普遍大于1),体积分数与物理模型试验中相同。图5为典型时刻泥石流运动流态的计算模拟结果与试验测量结果对比。从试验图片中可以看出,泥石流体和桥墩结构的相互作用可分为冲击、绕流和堆积三个过程。在冲击区,泥石流和桥墩产生强烈相互作用并产生快速的能量转换,即动能和势能、内能之间的转换,使得泥石流在桥墩表面有一定的爬高。不同于拦挡结构(譬如大坝等),桥墩这种柱形结构不能完全阻碍泥石流体的运动,因此,泥石流在冲击桥墩之后会产生绕流现象,使得这种强相互作用得到一定释放。所以冲击和绕流这两种现象之间是有相互影响的,由于粘性效应,这种影响在稀性泥石流和亚粘性泥石流之间体现得更加明显。根据对比结果可得,粘性泥石流由于粘度比较大,冲击速度较为缓慢,从而导致其浆体平均厚度较大,冲击高度较低(模拟结果最大冲击高度为 0.25 m),导致桥墩所受到的冲击力也较小,对应的运动范围也较小,图中模拟的泥石流运动流态与试验测量形态一致。此外,泥石流运动过程中的浆体平均厚度与冲击速度试验测量值分别为 20.64 cm 和 1.76 m/s ,相应的模拟结果分别值为 19.9 cm 和 1.5 m/s ,与试验数据也较为吻合。

表1 粘性泥石流计算参数				
Tab.1 Calculation parameters of viscous debris flow				
参数	粘度系数 ν_t	内摩擦角 φ_{int}	基底摩擦角 φ_{bed}	固相体积分数 α_s
数值	1.5	35°	25°	0.68

3.2.2 亚粘性泥石流

亚粘性泥石流相对于粘性泥石流来说,其区别界限不是很明显,但从主要特征来说,浆体浓度或颗粒组成中粘土成分含量相对较低,导致粘度系数也相对较低。在亚粘性泥石流试验模拟中,具体模型选取泥石流运动参数如表2所示,其中体积分数与试验中相同,基于亚粘性泥石流其浆体浓度或颗粒组成中粘土成分含量,其粘度系数取值在 $0.1 \sim 1$ 之间变化。图6为亚粘性泥石流运动流态的计算模拟结果与试验测量结果对比,根据对比结果可得,亚粘性泥石流相对于粘性泥石流来说,冲击速度较快,从

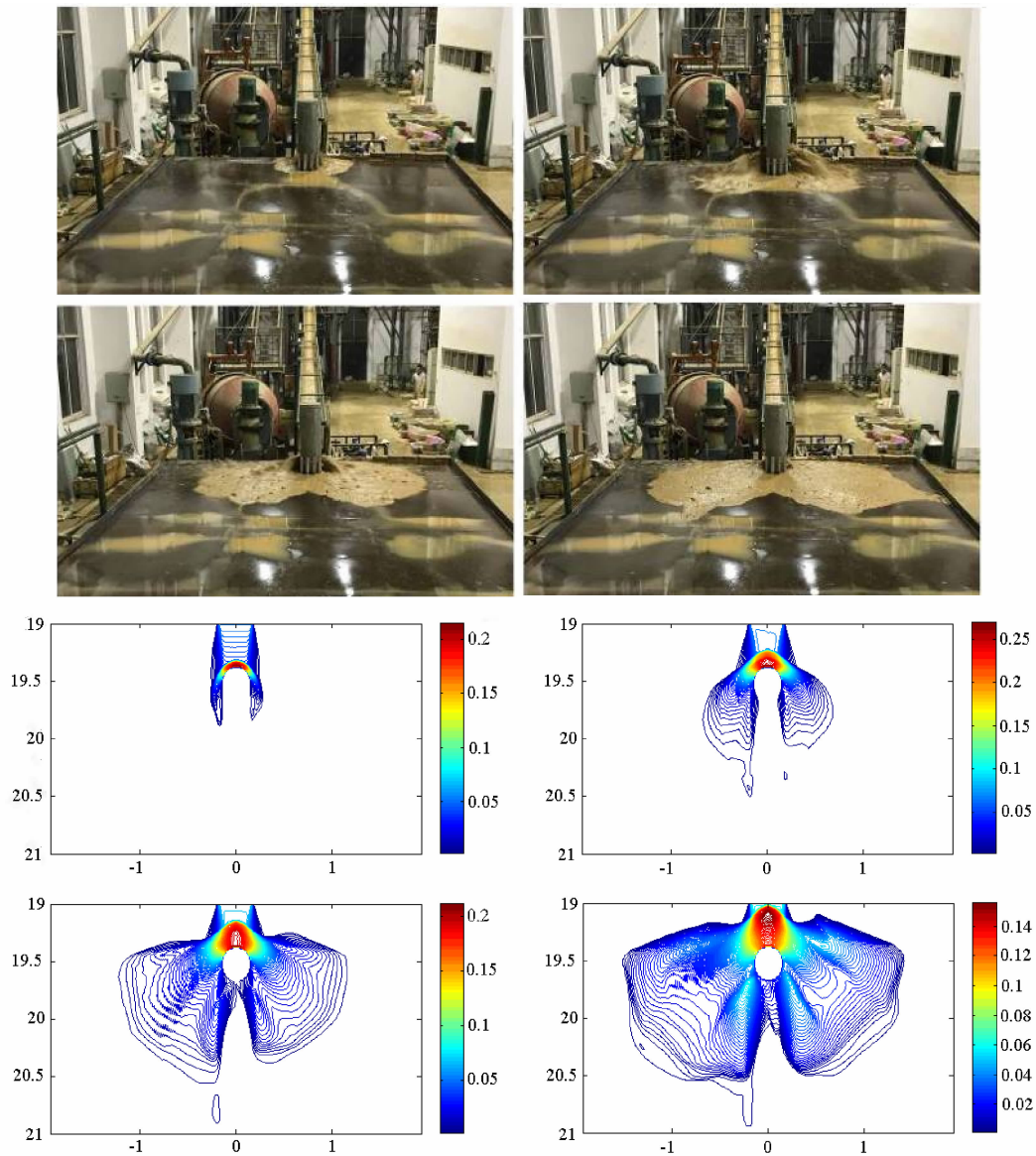


图 5 典型时刻粘性泥石流运动形态实测与模型计算结果对比

Fig. 5 Comparison between viscous debris flow motion of experimental and numerical results at typical times

而导致其浆体平均厚度较低,冲击高度较高(模拟结果最大冲击高度为 0.7 m),导致桥墩所受到的冲击力也较大,对应的运动范围有明显增大,图中模拟的泥石流运动流态与试验测量形态一致。此外,泥石流运动过程中的浆体平均厚度与冲击速度试验测量值分别为 15.33 cm 和 4.14 m/s,相应的模拟结果分别值为 15 cm 和 3.75 m/s,与试验数据也较为吻合。

表 2 典型时刻亚粘性泥石流计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of subviscous debris flow

参数	粘度系数 v_t	内摩擦角 φ_{int}	基底摩擦角 φ_{bed}	固相体积分数 α_s
数值	0.5	30°	25°	0.49

3.3 稀性泥石流

稀性泥石流浆体浓度或颗粒组成中粘土成分含量是三种泥石流类型中最低的,故而相应的粘度系数也是最低。在稀性泥石流试验模拟中,具体模型选取稀性泥石流运动参数如表 3 所示,体积分数与试验中相同,基于稀性泥石流其浆体浓度或颗粒组成中粘土成分含量,其粘度系数取值在 0.001 ~ 0.1 之间变化。图 7 为泥石流运动流态的计算模拟结果与试验测量结果对比,根据对比结果可得,稀性泥石流相对于其他类型的泥石流来说,冲击速度最快,从而导致其浆体平均厚度最低,冲击高度较高(模拟结果最大冲击高度为 0.8 m),导致桥墩所受到的冲

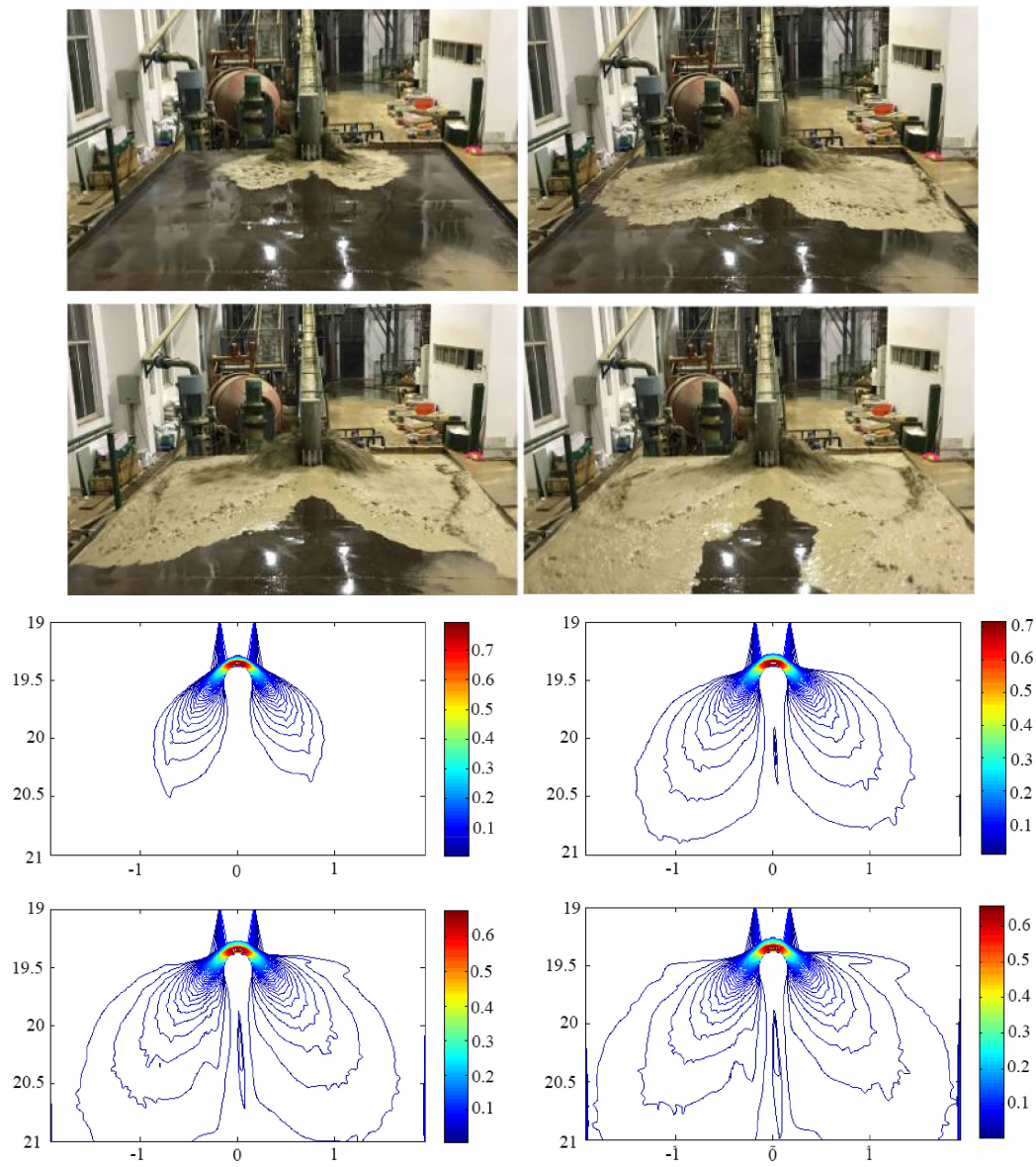


图 6 典型时刻亚粘性泥石流运动形态实测与模型计算结果对比

Fig. 6 Comparison between subviscous debris flow motion of experimental and numerical results at typical times

击力也最大,对应的运动范围也最大,图中模拟的泥石流运动流态与试验测量形态一致。此外,泥石流运动过程中的浆体平均厚度与冲击速度试验测量值分别为 12.66 cm 和 5.3 m/s,相应的模拟结果分别为 13 cm 和 5.1 m/s,与试验数据也较为吻合。

表 3 稀性泥石流计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of micro - viscous debris flow

参数	粘度系数 v_t	内摩擦角 φ_{int}	基底摩擦角 φ_{bed}	固相体积分数 α_s
数值	0.01	25°	25°	0.38

4 结论

泥石流 - 桥墩动力相互作用涉及复杂的流固耦合是国际学术界亟待破解的难点问题。我们以室内大型模型试验为基础,考虑泥石流固液两相的特点,在纳维斯托克斯方程基础上结合深度平均理论,构建了泥石流 - 桥墩流固耦合物理模型,并基于有限体积法建立时间和空间尺度上具有 2 阶精度的高效数值算法,实现了不同粘度的泥石流绕桥墩运动全程模拟,并与室内试验成果进行了对比验证。结果表明:

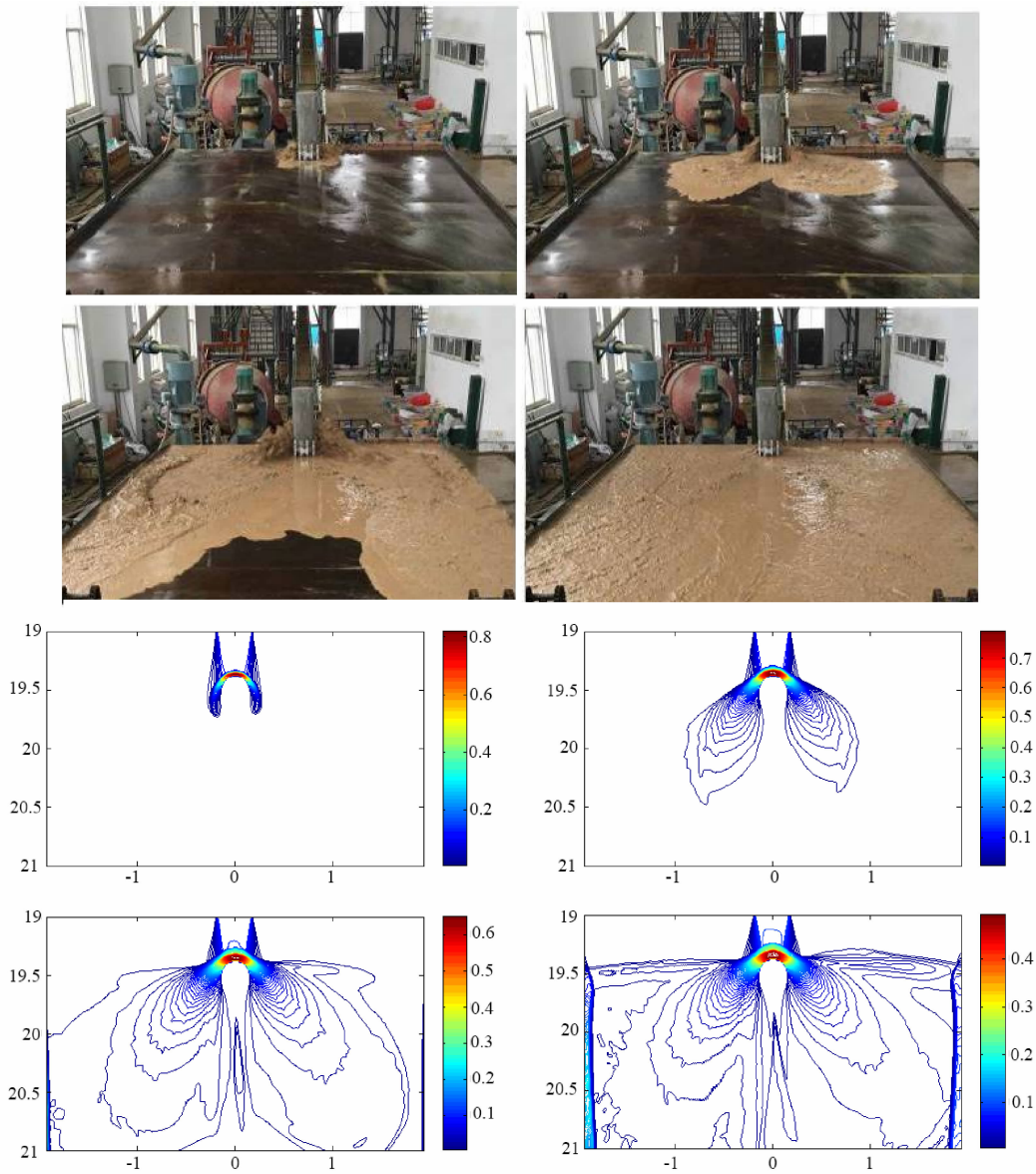


图7 典型时刻稀性泥石流运动形态实测与模型计算结果对比

Fig.7 Comparison between micro-viscous debris flow motion of experimental and numerical results at typical times

(1) 该数值模型可以较准确地模拟泥石流冲击桥墩绕流过程,数值模拟成果与室内模型试验非常接近;

(2) 泥石流和桥墩的相互作用可分为冲击、绕流和堆积三个过程。在冲击区,泥石流和桥墩产生强烈相互作用并产生快速的能量转换,即动能和势能、内能之间的转换。泥石流在冲击桥墩之后产生的绕流现象,使得该强相互作用得到一定释放。冲击和绕流两种现象相互影响,由于粘性效应,这种影响在稀性泥石流和亚粘性泥石流之间体现得更加明显;

(3) 将泥石流粘滞系数的影响因素考虑为泥石

流浆体浓度和泥石流颗粒组成的综合作用,不同粘度泥石流冲击桥墩绕流过程具有显著不同,主要体现在:相同初始条件下粘性泥石流堆积厚度较大,运动速度较小,堆积范围较小;反之,稀性泥石流堆积厚度较小,运动速度较大,堆积范围也较大。

参考文献 (References)

- [1] HUNGR O, MORGAN G C, KELLERHALS R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(4): 663-677
- [2] PITMAN A J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models[J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(5): 479-510

- [3] MCDUGALL S, HUNGR O. Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42** (5): 1437–1448
- [4] IVERSON R M. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, **117**, F03006
- [5] SAAR M O, MANGA M. Depth dependence of permeability in the Oregon Cascades inferred from hydrogeologic, thermal, seismic, and magmatic modeling constraints [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, **109**, B04204
- [6] 李新坡, 何思明. 节理岩质边坡破坏过程的 PFC2D 数值模拟分析 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, (S1): 70–75 [LI xinpo, HE siming. Numerical analysis of the failure of heavily jointed rock slopes using PFC2D [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, (S1), 70–75]
- [7] TEUFELSBAUER H, WANG Y, PUDASAINI S P, et al. DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures [J]. Acta Geotechnica, 2011, **6**(3): 119
- [8] BUCHHOLTZ V, PÖSCHEL T. Interaction of a granular stream with an obstacle [J]. Granular Matter, 1998, **1**(1): 33–41
- [9] FAUG T, LACHAMP P, NAAIM M. Experimental investigation on steady granular flows interacting with an obstacle down an inclined channel: study of the dead zone upstream from the obstacle. Application to interaction between dense snow avalanches and defence structures [J]. Natural hazards and Earth System Sciences, 2002, **2**(3/4): 187–191
- [10] ZAKERI A, HØEG K, NADIM F. Submarine debris flow impact on pipelines—Part I: Experimental investigation [J]. Coastal Engineering, 2008, **55**(12): 1209–1218
- [11] 姚昌荣, 王友彪, 刘赛智. 重力式桥墩在泥石流冲击作用下的响应分析 [J]. 桥梁建设, 2017, **47**(4): 18–23 [YAO Changrong, WANG Youbiao, LIU Saizhi. Analysis of Response of Gravity Bridge Pier Under Impact of Debris Flow [J]. Bridge Construction, 2017, **47**(4): 18–23]
- [12] 陈子俊. 泥石流冲击作用下桥墩的动力响应分析 [D]. 华南理工大学, 2017 [CHEN Zijun. Dynamic response analysis of pier Under Impact of Debris Flow [D]. South China University of Technology, 2017, 39–75]
- [13] SAVAGE S B, HUTTER K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989(199): 177–215
- [14] IVERSON R M. The physics of debris flows [J]. Reviews of Geophysics, **35**(3): 245–296
- [15] 张丽剑, 罗跃生, 张文平. 变限积分的有限体积法解决对流扩散方程 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, **36**(3): 427–431 [ZHANG Lijian, LUO Yuesheng, ZHANG Wenping. Solving convection-diffusion equation by using the finite volume method with variable limit integral [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, **36**(3): 427–431]
- [16] 关朋燕, 李春光, 景何仿. TDMA 算法在迭代求解二维对流扩散问题中的收敛性证明 [J]. 高等学校计算数学学报, 2014, **36**(1): 77–85 [GUAN Pengyan, LI Chunguang, JING Hefang. Proof on the convergence of TDMA algorithm in the iterative solution of two-dimensional convection-diffusion problems [J]. Numerical Mathematics: Theory, Methods and Applications, 2014, **36**(1): 77–85]
- [17] LIU Wei, HE Siming, OUYANG Chaojun. Two-dimensional dynamics simulation of two-phase debris flow. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2017, **91**(5): 1873–1883

Numerical Simulation and Experiment Analyses of Debris Flow Movement around Bridge Pier

LIU Faming¹, WANG Dongpo^{2,3}, HE Siming^{2*}, LI Mingqing¹, FU Gang¹, ZHANG Lun⁴

(1. China Railway Eryuan Engineering Group CO. LTD, Chengdu 610031, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China;

3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

4. Chengdu Lanzhou Railway CO., LTD., Chengdu 610031, China)

Abstract: The dynamic interactions between debris flow and piers comprise the impact of debris flow on piers and the resulting reverse effects of piers on the mobility of debris flow, involving complex fluid-solid coupling, and it is one of the most concerns in academic society. To investigate the behavior of debris flow moving around bridge piers, a two-dimensional physical model of debris flow-bridge pier was constructed based on Navier-Stokes equations combined with depth-averaged theory, where the characteristics of solid-fluid two-phase debris flow were

included in the study. An efficient numerical algorithm with two-order precision on the time and space scales was established based on finite volume method to simulate the process of debris flow with varied viscosities striking bridge piers. Results showed that the high solid volume fraction could reduce the debris flow mobility and affect deposition shape of debris flow significantly; Viscous debris flow led to greater thickness in debris accumulation at flume outlet but smaller size of debris fan, and a higher kinematic velocity than micro-viscous debris flow under the same initial conditions. The result of numerical simulation was consistent with that of laboratory tests, suggesting the applicability of the proposed physical model.

Key words: debris flow; flow around bridge pier; fluid-solid coupling; finite volume method

哈尼梯田老虎嘴

(高璇 云南师范大学)

哈尼梯田景观及其传统稻作系统是我国西南山地生态农业的典型代表,至今已存在了 1300 多年。影响整个景观存续的关键因素在于水资源的良性循环和利用。在哈尼梯田一年的耕作周期内,梯田除收割季节外常年蓄水,因此不论是雨季前期的冲水肥田和水稻种植,中期的水稻生长,还是旱季的关水养田都需要大量的灌溉用水补给。降水作为哈尼梯田区最主要的补给水源,明晰不同季节的降水水汽来源、循环过程及其区域影响因素,对合理分配该区的水资源、实现哈尼梯田的可持续发展具有十分重要的意义。

详见本期《哈尼梯田区降水稳定氢氧同位素的旱雨季变化特征及其影响因素》一文