

Bingham 型黏性泥石流流体的三维数值模拟

马宗源¹, 廖红建^{1,2}, 张骏³

(1. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安; 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, 400044, 重庆; 3. 长安大学地质工程与测绘学院, 710054, 西安)

摘要: 使用 CFD 软件对泥石流中固体物质以土为主的 Bingham 型黏性泥石流流体进行了三维数值模拟。首先通过 CAD 软件 AutoCAD 和 Unigraphics, 建立了泥石流沟谷三维地形模型, 然后分析了泥石流流体的流变特性, 并建立了 Bingham 计算模型, 最后运用 CFD 软件 CFX, 对泥石流流体的速度场及压力场的大小与分布进行了三维数值模拟分析, 得出了流场的相关力学指标和泥石流速度场及压力场的大小与分布, 并实现了泥石流模拟结果的显示。计算结果表明, 泥石流流体数值模拟可以在 CFD 软件环境下完成, 计算得出的泥石流流场各种数据有助于更合理地避让和防治泥石流。

关键词: 泥石流; 流场; 数值模拟; Bingham 模型

中图分类号: O35; P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1146-05

Three Dimensional Numerical Simulation of Bingham Viscous Debris Flow Fluid

MA Zongyuan¹, LIAO Hongjian^{1,2}, ZHANG Jun³

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering of Chinese Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The CFD software was used to simulate the flow field of Bingham viscous debris flow which mainly consists of soil in solid matter. A 3-D land model of debris flow was established with CAD software AutoCAD/Unigraphics (UG). By analyzing the rheological character of debris flow fluid, a Bingham computational model was built up. The CFD software CFX was used to simulate 3-D distributions of velocity and pressure fields of debris flow, and the results were expressed via the section of CFX-Post. It is concluded that numerical simulation of debris flow fluid can be performed with CFD software to practically evade and control debris flow.

Keywords: debris flow; flow field; numerical simulation; Bingham model

泥石流是山区及沟谷地形发育地区常见的自然灾害,危害极大。目前对泥石流的研究工作主要集中在工程防治方面,而对泥石流的预测预报,特别是泥石流流体的动力学运动机制及破坏范围,还研究得不够。泥石流流体属非牛顿流体,其本构关系和动力学特性非常复杂。目前,由于试验难度大、成本高,国

内外的研究多为基于试验和根据经验来分析。有学者采用地理信息系统(GIS)的栅格式 GIS-ERDAS 系统,基于泥石流流团二维模型进行了泥石流的可视化研究^[1-2],但不能计算泥石流的速度场与压力场。日本京都大学灾害防治研究所曾对日本的典型泥石流进行了计算机模拟,但由于算法的局限性,仍

然无法精确计算泥石流流动时的速度场与压力场^[3].近年来,由于流体力学、计算流体动力学及流变学的进展,描述黏性流体的运动方程在理论上已较为成熟,加之计算机技术的高速发展,对黏性流体的数值模拟计算也成为可能.因此,基于计算流体动力学的理论和软件,进行三维泥石流流场的数值模拟开发与分析,从而获得泥石流流体运动时的速度场、压力场以及流场的各项力学指标,对深入研究泥石流流体的动力学运动机制具有重要的意义.

1 理论基础

本文采用计算流体动力学(CFD)软件 CFX 来进行计算分析.CFD是通过计算机数值计算和图像显示对流体流动及热传导等物理现象进行分析的技术,其基本思路是在流动基本控制方程(质量守恒、动量守恒、能量守恒方程)的基础上,采用一系列离散的数值方法来近似表示连续的物理场^[4].CFD主要的离散化方法有有限差分法、有限元法和有限体积法.

本文研究使用的软件 CFX 采用有限体积法.与有限元法不同,有限体积法是将分析对象划分为若干个互不重复的控制体积,然后将问题的控制方程对每一个控制体积积分,通过插值的形式将体积界面的物理量用节点上的物理量来近似表示.

流体力学中的三大基本控制方程(质量守恒、动量守恒及能量守恒方程)可以写成如下通式^[4]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中: ϕ 代表速度、温度等求变量; Γ 为扩散系数; S 为广义源项.

进一步可将式(1)展开如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S \end{aligned} \quad (2)$$

图1为计算域体积单元划分示意图,其中W、N、P、E和M为节点的编号, w 、 n 、 e 和 m 分别代表上述节点对应单元的编号,对应P节点的体积单元(图中阴影部分)在 x 和 y 方向上的宽度分别为 Δx 和 Δy .

在P对应的控制体积上,由式(2)积分有

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{d(\rho u\phi)}{dt} dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \text{div}(\rho u\phi) dV dt = \\ \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} S dV dt \end{aligned} \quad (3)$$

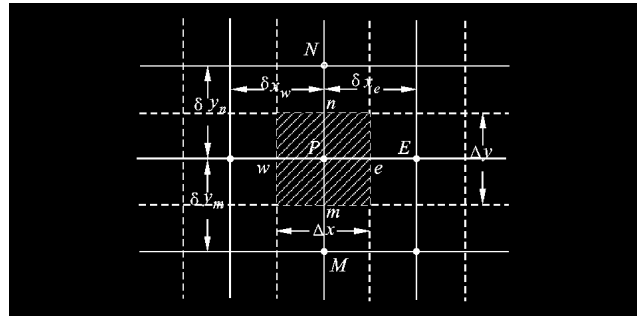


图1 计算域体积单元划分示意图

有限体积法对待求参量的离散方式多采用中心差分法,即在每个控制体积界面上作线性近似插值:

$$\text{对 } \Gamma \text{ 项} \quad \Gamma_w = \frac{\Gamma_P + \Gamma_W}{2}; \quad \Gamma_e = \frac{\Gamma_P + \Gamma_E}{2}$$

$$\text{对 } \phi \text{ 项} \quad \phi_w = \frac{\phi_P + \phi_W}{2}; \quad \phi_e = \frac{\phi_P + \phi_E}{2}$$

$$\text{对 } \frac{\partial\phi}{\partial x} \text{ 项} \quad \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_w = \frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w}$$

$$\text{对 } \frac{\partial\phi}{\partial y} \text{ 项} \quad \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_n = \frac{\phi_P - \phi_N}{(\delta y)_n}$$

将上述插值形式代入式(3),得瞬态项为

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{d(\rho u\phi)}{dt} dV dt = \\ \int_{\Delta V} \left(\int_t^{t+\Delta t} \rho \frac{\partial\phi}{\partial t} dt \right) dV = \rho_P (\phi_P^{t+\Delta t} - \phi_P^t) \Delta V \end{aligned} \quad (4)$$

对流项为

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \text{div}(\rho u\phi) dV dt = \\ \int_t^{t+\Delta t} [(\rho u)_e A_e \phi_e - (\rho u)_w A_w \phi_w + (\rho v)_n A_n \phi_n - \\ (\rho v)_m A_m \phi_m] dt \end{aligned} \quad (5)$$

与梯度相关的扩散项为

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV dt = \\ \int_t^{t+\Delta t} \left[\Gamma_e A_e \frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} - \Gamma_w A_w \frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w} + \right. \\ \left. \Gamma_n A_n \frac{\phi_N - \phi_P}{(\delta y)_n} - \Gamma_m A_m \frac{\phi_P - \phi_M}{(\delta y)_m} \right] dt \end{aligned} \quad (6)$$

式中: A 是控制体积界面的面积.

将广义源项采用如下形式变换

$$S = S_C + S_P \phi_P$$

其中 S_C 为常数, S_P 是 S 随 ϕ 变化的曲线在P点的斜率,则广义源项为

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} S dV dt = \int_t^{t+\Delta t} (S_C + S_P \phi_P) \Delta V dt \quad (7)$$

将上述各项的离散表达式代回式(3)相加并合并常数项,便得到一组代数方程

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_M \phi_M + a_N \phi_N + b \quad (8)$$

式中: a_P 、 a_W 、 a_E 、 a_M 、 a_N 均为系数。

以上为流体力学二维问题的控制方程使用有限体积法离散化的过程。对于三维问题的离散化方程,可以在二维问题的基础上增设第3个坐标 z ,控制体积就由图1所示的矩形变为立方体,增加了2个节点及 z 轴正、负方向2个面,增加的节点记为 T 和 B 。三维问题控制方程离散化后的代数方程组如下

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + a_B \phi_B + a_T \phi_T + b \quad (9)$$

2 浆体流变特性与计算建模

本文选用固体物质以土为主的 Bingham 型黏性泥石流进行数值模拟分析。

2.1 浆体流变特性及 Bingham 模型

由于非牛顿流体流动时不同高度的流体速度不同,因此层间会有摩擦所产生的剪应力。浆体的流变特性是指其受剪切变形时的剪应力与剪切率的关系。与对牛顿流体黏度的定义方式相同,非牛顿流体的黏度 μ 也可表示为剪应力 τ 与剪切率 $\frac{du}{dy}$ 的函数^[4],即

$$\mu = f\left(\tau, \frac{du}{dy}\right) \quad (10)$$

由式(10)可知,非牛顿流体的流变特性主要由黏度来体现。大量的试验表明,对于较高浓度的泥沙悬浮液,其流变关系服从 Bingham 流体特性^[5-6]。因此,固体物质以土为主的黏性泥石流流体(即本文的研究对象)符合 Bingham 流体模型,其剪应力与剪切率的关系可表示为^[7-8]

$$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (11)$$

式中: τ_y 为屈服应力或极限剪应力; μ 为 Bingham 流体的黏度。当流体受到的剪应力大于 Bingham 极限剪应力时,即会发生流动^[9]。

由式(11)可以看出, Bingham 流体带有一定的黏塑性,计算模型可以看作是由一个阻尼器和一个牛顿黏壶并联组成,如图2所示。

2.2 计算模型建立及网格划分

泥石流沟谷模型属于复杂三维实体模型,无法直接生成高级图元模型,所以只能遵循由线到面、由面到体、自下而上的建模方式。本文采用软件 AutoCAD 及 Unigraphics(UG)建立了泥石流沟谷三维地形模型,具体过程是:首先在 AutoCAD 中将二维

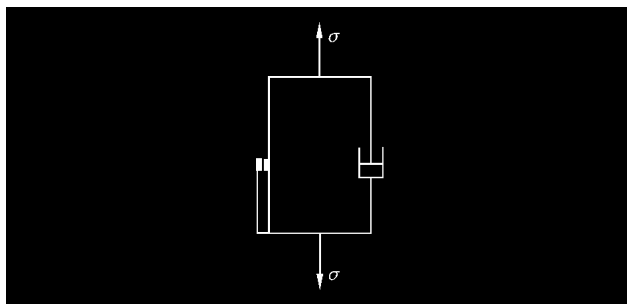


图2 Bingham 流体力学模型

等高线赋以高程值生成三维等高线,再将三维等高线导入 UG 中,在线的基础上生成面,进而通过拉伸命令将生成的面拉伸成三维实体。使用 ANSYS Workbench 作为 CAD 导入的平台,在 Workbench 中的 CFX-mesh 模块下对模型进行网络单元划分,将计算模型划分为 15.6 万个四面体网格单元。模型尺寸及网格划分见图3。

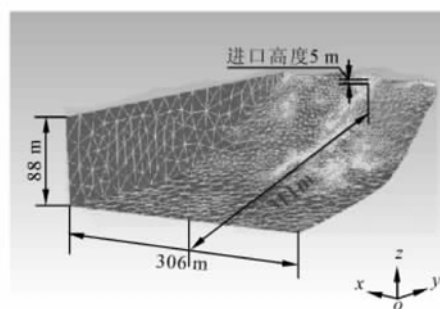


图3 模型尺寸及网格划分图

3 三维数值模拟及分析

3.1 边界条件及流变特性的设定

CFX 中的边界条件有进口(inlet)、出口(outlet)、壁面(wall)、开放(opening)及镜像(symmetry)5种类型。在模型中,沟谷坡面设定为壁面,模型其他部分设定为常温常压的开放环境,泥石流流体从坡体上部进口流入,进口高度设为 5 m,进口流体速度采用泥石流流速经验公式^[8]计算

$$U_c = 28.5h^{0.327}J^{0.5} \quad (12)$$

式中: h 为平均泥深; J 为平均坡降。

在 CFX 中并没有定义 Bingham 流体属性的选项,只能使用 CFX 中的 CFX Expression Language (CEL 语言)来定义黏度。

根据式(11)将 Bingham 模型表达式变换为

$$\mu = (\tau - \tau_y) \left(\frac{du}{dy} \right)^{-1} \quad (13)$$

式中:流体的 Bingham 极限剪应力 τ_y 与流体中固体颗粒的体积分数 S_v 有关,可写成^[6]

$$\tau_y = 9.8 \times 10^{-2} \exp(B\varepsilon + 1.5) \quad (14)$$

其中 $\varepsilon = \frac{S_V - 1.26S_{Vm}^2}{S_{Vm}}$, $\lambda = \left[\left(\frac{S_{Vm}}{S_V} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1}$, S_{Vm}

为极限体积分数,即泥石流中固体颗粒可与水形成悬浮液的最大体积分数, λ 为线性浓度, B 为常数。

流体在二维流动中离床面任一高程 z 处的剪应力可表示为^[6]

$$\tau = \gamma_m H J \left(1 - \frac{z}{H} \right) \quad (15)$$

式中: γ_m 为泥石流流体密度; H 为全水深.在三维情况下,坐标 y 对流体层间的剪应力会产生一定的影响.在现阶段,由于试验设备和理论研究上的困难,还没有得出完善的非牛顿流体三维流动中剪应力的解析表达式,这也是今后工作中有待深入研究的课题,本文将泥石流流动中剪应力的变化近似视为平面问题来处理。

试验证明,对于黏度较大并且颗粒均匀的 Bingham 型泥石流,其 $S_V > 0.6$, S_{Vm} 的范围为 0.55 ~ 0.60,并且多数固体物质以土为主的泥石流流体密度 $\gamma_m < 1\,900 \text{ kg/m}^3$ ^[8],具体参数取值详见表 1。

表 1 参数取值

S_V	S_{Vm}	B	$\gamma/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
0.65	0.56	8.45	1 800

3.2 计算模拟结果的显示及分析

CFX 主要以流线(Streamline)的形式反映流场,流线可以分别以流体速度(Velocity)和压力(Pressure)变量显示.对于泥石流沟谷的截面,可用截面(Plane)上的速度及压力等值云图显示.图 4 和图 5 分别为泥石流流体的速度变量流线图及其侧视图,图 6 为泥石流沟谷纵断面的速度云图,图 7 为泥石流流体对沟谷壁面法向压力的等值线图。

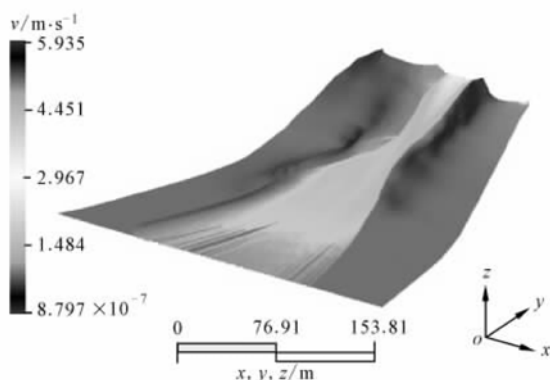


图 4 泥石流速度变量流线图

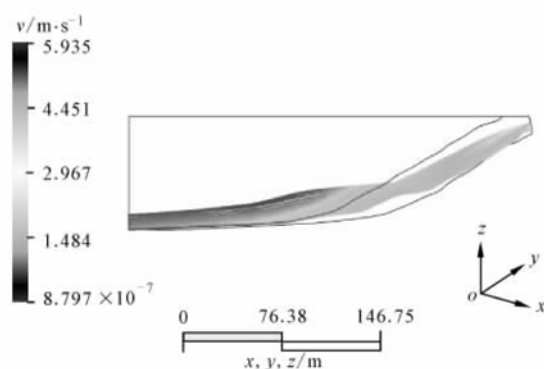


图 5 泥石流速度变量流线侧视图

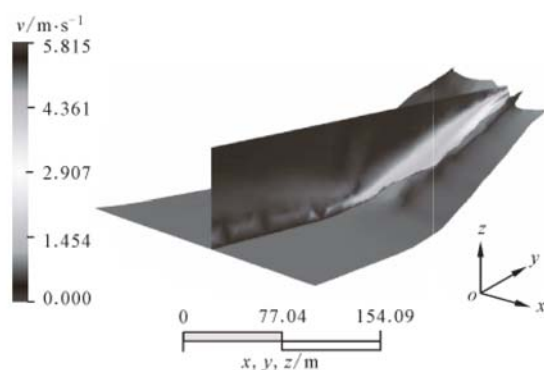


图 6 泥石流沟谷纵断面的速度云图

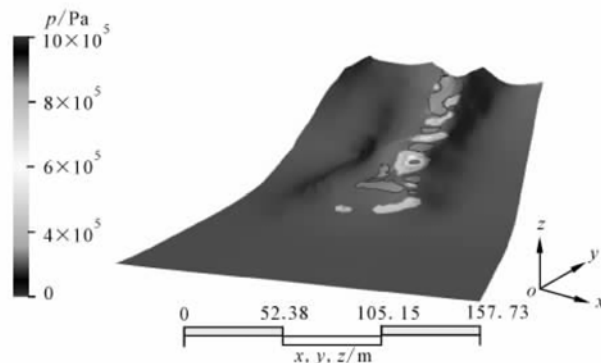


图 7 泥石流流体对沟谷壁面的法向压力等值线图

由图 4~图 6 的计算结果可见,泥石流流体在进口处附近速度达到最大值,并在流通区出口处产生跃高现象.在流通区的后半段,流体速度随着坡度的减缓逐渐降低,当地形趋于平缓时泥石流流体也逐步趋于停滞.图 7 显示了泥石流流体对沟谷壁面的冲击力.也可以在模型中加入泥石流拦挡坝,从而可计算出泥石流流体对拦挡坝的冲击力,以便更好地确定拦挡坝的布设位置,为泥石流的防治工程提供依据。

经过计算,得出了泥石流流体的最大流速、对沟床的最大压力、剪切率最大值以及动力黏度值,如表 2 所示。

表2 计算结果

	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p/Pa	$du \cdot (\text{dy})^{-1}/\text{s}^{-1}$	$\mu/\text{Pa} \cdot \text{s}$
最大值	59.7	2.17×10^6	41.05	5.68×10^5
最小值	0	5.50×10^5	2.58×10^{-5}	5.44

Bingham 模型适用于固体物质以土为主的黏性泥石流,属于均匀细颗粒物质占主体的泥石流流体^[9].这种泥石流在流通区的前段往往具有很高的速度,随着坡度的减缓和沟道的摩擦其速度会明显降低,遇到开阔平缓地形时则迅速淤积,所以 Bingham 型黏性泥石流流动时所携带的能量较小,沟口冲积扇面的面积也相对较小.

4 结 论

本文的研究意在对方法的探究,试图为今后泥石流数值模拟方面的研究工作开辟一条新的道路.

本文运用 CFX 软件模拟了泥石流中的 Bingham 型黏性泥石流,最终证明计算流体动力学软件可以对泥石流流场进行数值模拟,并借助软件的后处理器实现模拟结果的显示.具体结论如下:

(1)由于使用计算流体动力学软件对泥石流进行数值模拟时不能考虑泥石流沟谷的地质条件(如地层岩性情况及沟床的粗糙程度等),即只能把沟谷视为光滑的壁面,所以无法计算泥石流流体流动过程中的能量损失对泥石流流速的影响,因而具有一定的局限性.

(2)通过建模过程发现,CFX 软件对模型的形态具有较高的要求,模型必须具有较为规则的几何形态,这就需要借助功能更为强大的建模软件(如 AutoCAD 及 UG 等)来建立三维模型.

(3)经过计算,获得了泥石流流体的最大速度(59.7 m/s)及沟床最大压力(2.17×10^6 Pa),证明计算流体动力学软件可以进行三维泥石流流场的数值计算.

(4)对模拟计算结果的分析表明:黏性泥石流在流通区的前段往往具有很高的速度,随着坡度的减

缓和沟道的摩擦其速度会明显降低,遇到开阔平缓地形时则迅速淤积.

参考文献:

- [1] 刘学,王光谦,王兴奎.泥石流模拟:IV:显示[J].泥沙研究,1998(3):23-28.
LIU Xue, WANG Guangqian, WANG Xingkui. Simulation of debris flow: IV: display [J]. Journal of Sediment Research, 1998(3): 23-28.
- [2] 王光谦,绍颂东,费翔俊.泥石流模拟,I:模型[J].泥沙研究,1998(3):7-13.
WANG Guangqian, SHAO Songdong, FEI Xiangjun. Simulation of debris flow, I: model [J]. Journal of Sediment Research, 1998(3): 7-13.
- [3] TAKAHASHI T. Debris flow on prismatic open channel [J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1980, 106(3): 381-396.
- [4] 王福军.计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:5-65.
- [5] JAN Chyan-dang, SHEN Hsich-wen. Lecture notes in earth sciences, 64: review dynamic modelling of debris flows [M]. Berlin: Springer, 1996: 93-116.
- [6] 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,2004:56-103.
- [7] CHEN Cheng-lung. Bingham plastic or Bagnold's dilatant fluid as a rheological model of debris flow [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1982, 49(2): 102-107.
- [8] 舒安平,费翔俊.粘性泥石流运动流速与流量计算[J].泥沙研究,2003(3): 8-13.
SHU Anping, FEI Xiangjun. Calculation for velocity and discharge of the viscous debris flow [J]. Journal of Sediment Research, 2003(3): 8-13.
- [9] 沈寿长,谢慎良.粘性泥石流的模式结构和流变特性[J].铁道工程学报,1986(4): 26-33.
SHEN Shouchang, XIE Shenliang. The structure model and rheological character of viscous debris flow [J]. Journal of Railway Engineering, 1986(4): 26-33.

(编辑 葛赵青)