

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2008.06.001

泥石流泛滥区域数值模拟

李同春¹ 李杨杨¹ 章书成² 余 斌² Pastor M³

(1. 河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098 ; 2. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041 ;
3. 西班牙国家公共试验研究中心(CETA-CEDEX) 西班牙 马德里 28014)

摘要 概述泥石流泛滥区域数值模拟的研究现状 , 介绍数值模拟 Geoflow 程序的基本方程、数值求解方法和定解条件。采用 Geoflow 程序对四川省境内某一较大泥石流沟遭遇 20 年一遇泥石流的泛滥区域进行数值模拟 , 得到的泛滥区域与采用经验公式法得到的结果基本一致 , 表明数值模拟的结果具有工程应用价值。由于该泥石流沟的重大威胁性 , 建议在堆积扇上修建的生产、生活设施应避免让泛滥区域或采取适当的防护治理措施。

关键词 泥石流 ; 泛滥区域 ; 数值模拟 ; Geoflow 程序

中图分类号 : P642.33 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2008) 06-0001-04

Numerical simulation on inundation area of debris flow // LI Tong-chun¹ , LI Yang-yang¹ , ZHANG Shu-cheng² , YU Bin² , Pastor M³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610041 , China ; 3. CETA-CEDEX , Madrid 28014 , Spain)

Abstract : In this paper , the main research achievements in numerical simulation of debris flow inundation areas achieved by CETA-CEDEX are reviewed and summarized. The basic equations , numerical solutions and boundary conditions of the Geoflow program are introduced. Based on Geoflow program , the debris flow inundation occurring over 20 years in a certain gully in Sichuan Province has been simulated. The calculated result is nearly consistent with those of empirical formula method. It shows that the numerical simulation can be applied in practical engineering. We suggest that habitation should be avoided or take some prevention measures in a deposition fan.

Key words : debris flow ; inundation area ; numerical simulation ; Geoflow program

泥石流是环境脆弱山区一种常见的突发性地质灾害 , 严重危及农田、道路、河流等的安全。总的来说 , 泥石流对危害对象没有选择性 , 凡是在泥石流活动影响范围内的对象都将受到危害 , 包括水利工程、电力设施、通讯设备等。

泥石流泛滥区域划分的常用方法包括经验公式法和数值模拟方法。经验公式法具有一定的准确性且计算方便 , 主要计算泥石流流速、密度、洪峰流量和冲击力等。数值模拟方法是为了获得泥石流运动参数的时空分布 , 模拟泥石流的发生、流动、堆积等过程 , 也是确定泥石流泛滥范围、进行危险性分区、辅助减灾工程设计与检验的重要方法。由于大多数泥石流沟泥石流发生年代久远 , 历史情况调查困难 , 故经验公式考虑因素有限 , 不能完全反映泥石流的运动情况 , 而数值模拟需要建立在对泥石流本构关系和初始条件清楚的基础上。因此 , 结合历史情况

调查和经验公式的计算成果 , 采用数值模拟方法模拟泥石流的运动是可行的 , 具有广阔的发展前景。

1 泥石流数值模拟研究现状

泥石流数值模拟研究一直是泥石流研究领域的热点 , 日本在这方面起步较早。Takahashi 等^[1]建立了泥石流库仑阻力的膨胀体模型 , 采用有限差分法计算二维运动方程 ; Mizuyama 等^[2]使用一维方程和二维方程分别计算了沟床比降的变化和泥石流的泛滥范围 ; O'Brien 等^[3]在二维洪水模型的基础上建立了适用于水流、泥流、泥石流的 FLO-2D 模型 , 进行了城区泥石流泛滥的模拟计算。

国内方面 , 章书成^[4]进行了泥石流运动数学模型方面的研究 , 模拟了泥石流泛滥区域 ; 唐川^[5]采用隐式剖开算子法求解泥石流扩散过程的二维非恒定流方程组 , 建立了预测泥石流危险范围的数学模型 ;

王协康等^[6]以溃决式运动模拟泥流运动堆积过程;倪晋仁等^[7]基于结构两相流和 PCI 数值计算方法,研究了稀性泥石流堆积过程中的泥沙分选特性;韦方强等^[8]采用二维方程模拟泥石流在扇形地上的运动,采用一维方程模拟泥石流在固定沟槽的运动;胡凯衡等^[9]应用流团模型模拟泥石流在堆积扇上的扩散堆积运动。

目前进行泥石流流体力学模拟预测的软件主要有^[10-11]:Dent 根据 Bingham 模型开发的程序 BVSMAC ;Hungt 的准二维泥石流流体力学模拟程序 DAN2D 和 DAN3D ;USGS 开发的主要用于火山泥流预测的统计模型 LAHARZ ;Pastor 等开发的拟三维泥石流模拟程序 Geoflow 等。

2 数值模拟 Geoflow 程序

笔者采用的 Geoflow 程序是由西班牙国家公共试验研究中心 Pastor 等为主开发的流体运动计算程序。Geoflow 采用的是有限元方法,计算过程分为前处理、后处理和数值计算 3 部分,可用于计算模拟泥石流、溃坝、滑坡、涌浪等流体运动问题。程序已经得到许多算例、试验和工程实例的验证,计算结果精度较高^[11]。现将基本方程和求解方法简述如下。

2.1 基本方程

Geoflow 程序的主要研究对象是具有自由表面的常态泥石流流体。采用曲线坐标系 $\{\alpha, \beta, \eta\}$ (图 1),更适于研究陡峭边坡和曲面河床的情况。考虑到流体深度小于流动的长度、宽度和河床最小弯曲半径,流体中任一流体质点 Q 的坐标 $x(\alpha, \beta, \eta)$ 为^[11]

$$x(\alpha, \beta, \eta) = x_P(\alpha, \beta) + \eta n \tag{1}$$

式中 $x_P(\alpha, \beta)$ 为 Q 在 $\alpha\beta$ 面上的投影点 P 的坐标; n 为 η 轴方向的单位矢量。

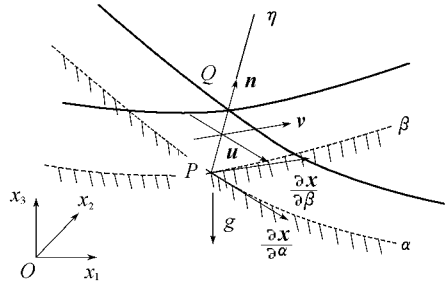


图 1 曲线坐标系示意图

在此基础上,根据 N-S 方程建立质量方程和动量守恒方程,考虑连续不可压缩等温黏性流体,假设垂向速度和加速度可忽略不计,采取深度集成方法,用沿深度方向的平均流速分量 $\{\bar{u}, \bar{v}\}$ 代替 $\{u, v, w\}$ 坐标系下的流速分量 $\{u, v, w\}$,得到控制方程^[11]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} h \\ \bar{u}h \\ \bar{v}h \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial \alpha} \begin{bmatrix} \bar{u}h \\ \bar{u}^2h + \frac{1}{2}\hat{g}h^2 \\ \bar{u}\bar{v}h \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial \beta} \begin{bmatrix} \bar{v}h \\ \bar{v}^2h + \frac{1}{2}\hat{g}h^2 \\ \bar{u}\bar{v}h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\rho}f_{R,\alpha}^B - ghk \cdot \frac{\partial x}{\partial \alpha} \\ \frac{1}{\rho}f_{R,\beta}^B - ghk \cdot \frac{\partial x}{\partial \beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial(\sigma_{v,\alpha})}{\partial \alpha} + \frac{\partial(\sigma_{v,\alpha\beta})}{\partial \beta} \\ \frac{\partial(\sigma_{v,\alpha\beta})}{\partial \alpha} + \frac{\partial(\sigma_{v,\beta\beta})}{\partial \beta} \end{bmatrix}$$

$$\text{其中} \quad \hat{g} = \chi_\alpha \bar{u}^2 + \chi_\beta \bar{v}^2 + gk \cdot n \tag{2}$$

式中 t 为时间; h 为泥深; $\bar{u}, \bar{v}$ 分别为 α, β 方向的平均速度分量; χ_α, χ_β 分别为 α, β 方向的曲率; g 为重力加速度; k 为重力方向的单位矢量; $-gk$ 为体积力; $f_{R,\alpha}^B, f_{R,\beta}^B$ 为沟床摩阻力分量; ρ 为流体密度; σ_v 为应力张量。

流变模型反映了应力张量 σ_v 与变形率张量 D 之间的关系。目前,有很多模型可以反映泥石流的材料性能,根据研究方向,泥石流模型大体可分为 3 类:宾汉模型、颗粒流膨胀体模型和结构两相流模型。Geoflow 程序采用的是宾汉模型,表达式^[11]为

$$\sigma_v = \left(\frac{\tau_B}{\sqrt{I_{2,D}}} + 2\mu \right) D$$

$$\text{其中} \quad I_{2,D} = \frac{1}{2} D \cdot D \tag{3}$$

式中 τ_B 为屈服应力; μ 为黏度系数。

河床摩阻力矢量是由其与平均流速矢量的相关关系给出的,表达式^[11]为

$$\bar{v} = \frac{f_R^B}{6\mu} \left(1 - \frac{\tau_B}{f_R^B} \right) \left(2 + \frac{\tau_B}{f_R^B} \right) \tag{4}$$

式中 $\bar{v}$ 为平均流速矢量; f_R^B 为河床摩阻力矢量;其他参数同上。

2.2 数值求解方法

常用的数值求解方法包括有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)、有限体积法(FVM)和特征线法(MOC)等。

Geoflow 程序采用 FEM 两步 Taylor-Galerkin 算法。有限元法是以变分原理和近似插值离散为基础的一种数值计算方法。Taylor-Galerkin 方法^[12]主要是对时间进行更高阶求导,然后使用常规的 Galerkin 加权余量法对求解方程进行空间离散。两步 Taylor-Galerkin 方法不但在空间和时间上具有二阶精度,而且便于编程,计算速度快。

2.3 定解条件

定解条件包括初始条件与边界条件。采用 Geoflow 程序进行泥石流运动数值模拟,需给出初始

计算区域各网格节点上的原始地形高程,并在网格图上选取初始断面的节点,赋予初始泥深 h_0 和流速 v_0 ,作为初始边界条件,选取初始计算时间步长 Δt 。为了保持计算结果的稳定性,计算过程中不断调整时间步长,使其满足^[11]

$$\Delta t \leq \min \left(\frac{\Delta t_{\text{adv}} \Delta t_{\text{dif}}}{\Delta t_{\text{adv}} + \Delta t_{\text{dif}}}, \left| \frac{\alpha_1 h (2\hat{c} - u)}{\rho f_{R,\alpha}^B - ghk \cdot \frac{\partial x}{\partial \alpha}} \right| \right) \quad (5)$$

其中

$$\Delta t_{\text{adv}} = \frac{\alpha_0 \Delta x}{|u| + \hat{c}}$$

$$\Delta t_{\text{dif}} = \alpha_0 \frac{\Delta x^2}{2v}$$

$$\hat{c} = \sqrt{gh}$$

式中: Δt_{adv} 为平流过程控制的时间步长; Δt_{dif} 为扩散过程控制的时间步长; α_1 为由源项引起的时间步长控制参数, $\alpha_1 = 2$; α_0 为系数,对于分块矩阵 $\alpha_0 = 1$,对于集中质量矩阵 $\alpha_0 = 1/\sqrt{3}$; u, v 分别为 α, β 方向的流速分量; Δx 为离散的线性元长度。

人工边界包括入流边界和出流边界。在入流边界设置初始条件;在泥石流可能出流的边界设置出流条件,即考虑泥石流在流出计算区域边界后继续流动,不会在边界处发生拥堵。

3 泥石流泛滥区域数值模拟

四川省境内某条较大的泥石流沟,近百年来有多次泥石流活动,泥石流活动规模大,暴发频率高,灾害密集,灾情紧迫。该沟地处四川川南高山峡谷地区,新构造运动十分活跃,有多条断层横切流域,岩层破碎,不良地质现象发育。流域内有多处大型滑坡和崩塌体,堆积物的总方量约为 5 000 万 m^3 。气候条件为亚热带季风气候,降雨丰沛,山区年降水量可达 1 200 mm,降雨时空分布不均匀,多集中在 5 ~ 10 月。

3.1 研究目的

随着山区的建设发展,该沟下游堆积扇上修建和规划了一些道路和建筑物,为保证安全,明确泥石流泛滥区域就显得尤为重要。由于 20 年一遇的泥石流暴发几率较大,危险性也相应较大,但缺少相应的地质资料,因此笔者拟采用数值模拟方法加以研究,并与经验公式法的成果进行对比。

3.2 计算参数的选取

从现场调查地形图(1:500)中选取研究区域。根据中国水电顾问集团成都勘测设计研究院和中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所(以下简称成都山地所)的共同研究成果,洪痕调查法共测量了 5 个断面,选择其中最接近的 1 个断面作为 20 年

一遇泥石流暴发时的洪峰过流断面,即为初始断面。根据现场调查和资料分析得到:20 年一遇泥石流屈服应力 $\tau_B = 110 \text{ Pa}$,刚性系数 $\eta = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,泥石流密度 $\rho = 2 050 \text{ kg/m}^3$,初始断面处泥深 $h_0 = 70 \text{ m}$ 。

流速分布由经验公式确定:

$$v_0 = K_c R^{1.5} i^{0.2} \quad (6)$$

式中: v_0 为初始断面处流速; K_c 为泥石流流速系数; R 为水力半径; i 为沟道坡度。在初始断面处, $R = 3.08 \text{ m}$, $K_c = 8.9$, $i = 0.141$,计算得出 $v_0 = 12.6 \text{ m/s}$ 。公式(6)是根据我国西南、西北地区众多泥石流调查、观测资料和工程应用经验得出,在国内应用较多,计算结果比较可靠。

有限元模型网格剖分采用四边形单元,节点数为 20 301,单元数为 20 000,将地形高程存储在网格节点上。为满足计算稳定条件,初始时间步长应选择较小值。

综上所述,数值模拟的主要参数包括:初始断面处 $h_0 = 70 \text{ m}$, $v_0 = 12.6 \text{ m/s}$, $\rho = 2 050 \text{ kg/m}^3$, $\tau_B = 110 \text{ Pa}$, $\eta = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

3.3 泛滥区域数值模拟

根据地质调查资料,截取沟内一段作为重点研究区域,建立有限元模型,见图 2。假定图 2 中标识断面(宽 100 m)为入流断面,输入初始控制参数,预计泥石流流出方向,设置出流边界条件。计算选择 1 000 步,初始步长设为 0.05 s,计算中不断调整时间步长,设置在 90 s 左右泥石流流出计算区域。

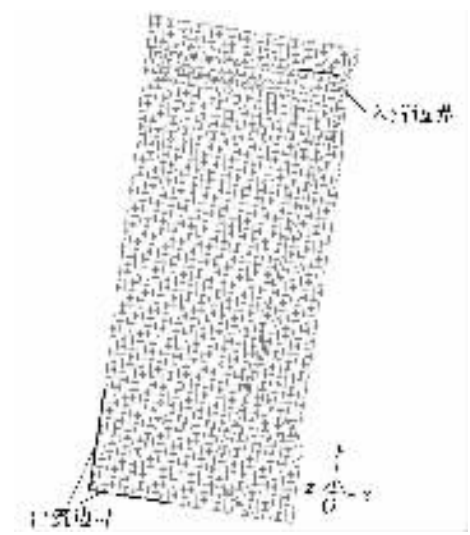


图 2 有限元模型

根据上述的有限元模型及计算参数,用 Geoflow 程序对泥石流沟遭遇 20 年一遇泥石流的情况进行模拟,得到泥石流泛滥区域范围,图 3 为 40 s、60 s 和 90 s 时的泥石流泛滥区域泥深分布示意图。

图 4 为成都山地所根据经验公式法得到的泥石

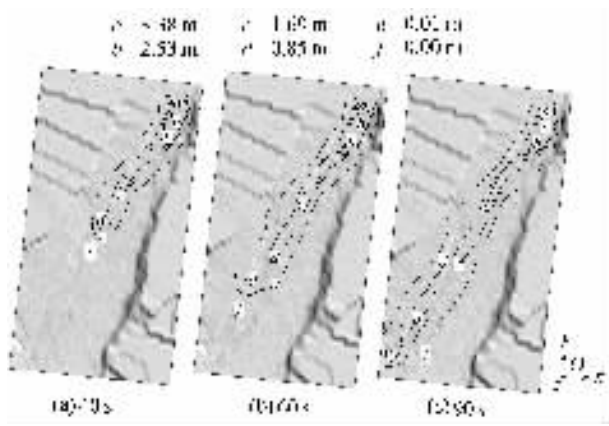


图3 不同时刻泥石流泛滥区域的泥深分布
流泛滥区域示意图。经比较 2 种方法得出的流动形
态基本一致 表明数值模拟结果具有工程应用价值。
同时 相比经验公式法 数值模拟方法可视性效果好 ,
可以得到实时的泥深和流速 因此数值模拟方法已成
为泥石流泛滥区域划分方法的主要发展方向之一。

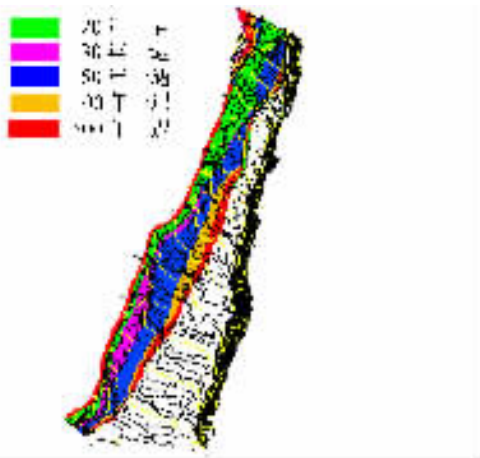


图4 泥石流泛滥区域划分(经验公式法)
调查发现该沟为黏性泥石流沟 ,历史上曾多次
发生泥石流灾害。据 1995 年泥石流沉积形态勘测
和调查结果判断 ,1933 年和 1946 年暴发的泥石流均
为 50 年一遇的黏性泥石流。泥石流突然暴发会对
堆积扇上公路、居民点和农田造成巨大危害 ,因此 ,
在堆积扇上修建的生产、生活设施应避让泛滥区域
或采取适当的防护治理措施。

4 结 语

连续介质的泥石流数值模拟方法建立在泥石流
运动方程的基础上 ,考虑泥石流运动的力学机制 ,可
以得出泥石流流速和泥深等参数的时空分布 ,有着
广泛的适用范围和实用价值。该方法不仅可以用于
泥石流泛滥区域划分和灾害评估 ,还可以用于泥石
流减灾工程效益的模拟和检验。

相比模型试验和现场观测 ,泥石流数值模拟方
法受试验设施和观测地点的影响较小 ,相比数学统

计方法 ,受人为因素的影响较小 ,且可以实现定量分
析。因此泥石流数值模拟方法在泥石流研究领域具
有广阔的发展前景。但是由于泥石流本身的复杂
性 ,运动受很多因素的制约 ,如初始条件、沟道系数、
阻力系数、泥石流流量、泥石流流速、沟床比降、泥
石流流体物质组成、泥石流运动切应力等 ,因此深入
了解泥石流成因和本构关系将是提高数值模拟精度
的研究重点。

参考文献 :

- [1] TAKAHASHI T , TSUJIMOTO H. Delineation of the debris flow hazardous zone by a numerical simulation method[C]// Proceeding of International Symposium on Erosion , Debris Flow and Disaster Prevention. Tsukuba :Japan of Erosion Control Engineering Society ,1985 :457-462.
- [2] MIZUYAMA T , YAZAWA A. Computer simulation of debris flow depositional processes[C]//Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim. Wallingford : IAHS Press ,1987 :179-190.
- [3] O 'BRIEN J S , JULIEN P Y , FULLERTON W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1993 ,119(2) :244-261.
- [4] 章书成. 泥石流运动数值模拟[J]. 中国学术期刊文摘 , 1995 ,(2) :62-63.
- [5] 唐川. 泥石流堆积泛滥过程的数值模拟及其危险范围预测模型的研究[J]. 水土保持学报 ,1994 ,8(1) :45-50.
- [6] 王协康 ,刘同宦 ,崔鹏. 沟道泥流溃决式运动堆积过程二维数值试验[J]. 四川大学学报 :工程科学版 ,2005 ,37(2) :1-4.
- [7] 倪晋仁 ,廖谦 ,曲轶众. 多组分流元模型在稀性泥石流堆积积分选特征研究中的应用[J]. 水利学报 ,2001(2) :16-23.
- [8] 韦方强 ,胡凯衡 ,LOPEZ J L. 泥石流危险性动量分区方法与应用[J]. 科学通报 ,2003 ,48(3) :298-301.
- [9] 胡凯衡 ,韦方强 ,何易平 ,等. 流团模型在泥石流危险度分区中的应用[J]. 山地学报 ,2003 ,21(6) :726-730.
- [10] 兰恒星 ,周成虎 ,王小波. 泥石流本构关系及动力学模拟研究现状综述[J]. 工程地质学报 ,2007 ,15(3) :314-321.
- [11] QUECEDO M , PASTOR M , HERREROS M I , et al. Numerical modeling of the propagation of fast landslides using the finite element method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering ,2004 ,59 :755-794.
- [12] QUECEDO M , PASTOR M. A reappraisal of Taylor-Galerkin algorithm for drying-wetting areas in shallow water computation[J]. International Journal for Numerical Method in Fluids ,2002 ,38(6) :515-531.

(收稿日期 2007-11-22 编辑 骆超)