

西藏古乡沟泥石流的数值模拟

韦方强, 胡凯衡, 程尊兰

(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)

摘要: 泥石流运动数值模拟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。以西藏波密古乡沟为实例, 从泥石流的二维运动方程出发, 使用一种新的数值方法对古乡沟 50 a 一遇泥石流在堆积扇上的运动过程进行了数值模拟, 获得了其最大流速、流深、动量和动能的空间分布, 并据此确定了受泥石流危害较小的川藏公路穿越堆积扇方案。将泥石流数值模拟结果与游勇等 1997 年做的模型试验结果进行了比较, 具有较好的相似性。

关键词: 西藏古乡沟; 泥石流; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

确定泥石流泛滥范围、流速和泥深分布一般可以通过泥石流野外观测、模型实验和运动数值模拟来实现。但野外观测受复杂的自然条件、泥石流自身的特性以及观测设备等的限制, 所得到的资料往往不齐全、不可靠。而泥石流模型试验的试验装置复杂, 大流量供流困难, 堆积扇区流速和泥深等参数监测难度大, 使泥石流模型试验复杂, 成本昂贵, 并且在室内实验中很难再现野外泥石流特有的一些运动现象。随着泥石流运动力学和计算机技术的发展, 泥石流运动数值模拟得到了迅速发展^[1-5]。因数值模拟成本低, 重复性强, 近年来被广泛应用到泥石流研究中, 特别是在泥石流危险性分区中发挥了重要作用^[6-7]。然而, 泥石流运动数值模拟的结果受泥石流运动方程、泥石流物理参数、数值模拟方法、边界条件控制等诸多因素的影响, 其准确性需要得到具体的验证。西藏古乡沟是严重危害川藏公路的一条泥石流沟, 对其研究较多, 且游勇等 (1997) 对其进行了模型试验研究^[8]。本文选择该沟进行泥石流数值模拟研究, 并利用游勇等的模型试验结果来验证数值模拟结果。

古乡沟位于川藏公路西藏波密境内 K4035~

K4038段, 为帕隆藏布右岸一级支流。流域面积 25.2 km^2 , 主沟道长 8.69 km , 最高海拔 6298 m , 相对高度 3574 m , 山体平均坡度 36.9° ^[8]。源头发育有现代冰川, 中上游堆积有大量冰碛物。这些都为泥石流的发育提供了良好条件, 使其成为一条泥石流暴发频繁、危害严重的沟。长期的泥石流频繁活动在古乡沟沟口形成了一个巨型泥石流堆积扇。堆积扇顶角 95° , 半径约 2.25 km , 扇缘长 4.25 km , 面积约 4.23 km^2 ^[8] (图 1)。川藏公路便从该堆积扇上穿过, 长约 3 km , 长期遭受泥石流严重危害。

1 泥石流运动数值模拟

1.1 泥石流运动数值模拟方法

泥石流虽然是一种包含固体颗粒、水和气体的多相体。但是它的固相和液相部分在运动中充分混合, 表现为一种整体性的运动。因此, 可以把泥石流视为单一流体, 遵从流体运动的 Navier-Stokes 方程。泥石流运动过程中, 其垂向尺度远远小于横向和纵向的尺度。这样, 忽略泥石流运动在垂向上的变化, 对 Navier-Stokes 方程进行垂向积分后, 就可以得到

收稿日期 (Received date): 2005-09-11; 改回日期 (Accepted): 2005-12-14.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (编号: 40201009 和 40371016)。[Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Number 40201009 & 40371016)]

作者简介 (Biography): 韦方强 (1968-), 山东临沐人, 博士, 研究员, 主要从事山地灾害减灾理论和技术研究。[Wei Fangqiang (1968-), Professor. Undertaking research on theory and technology of mountain hazards mitigation.]

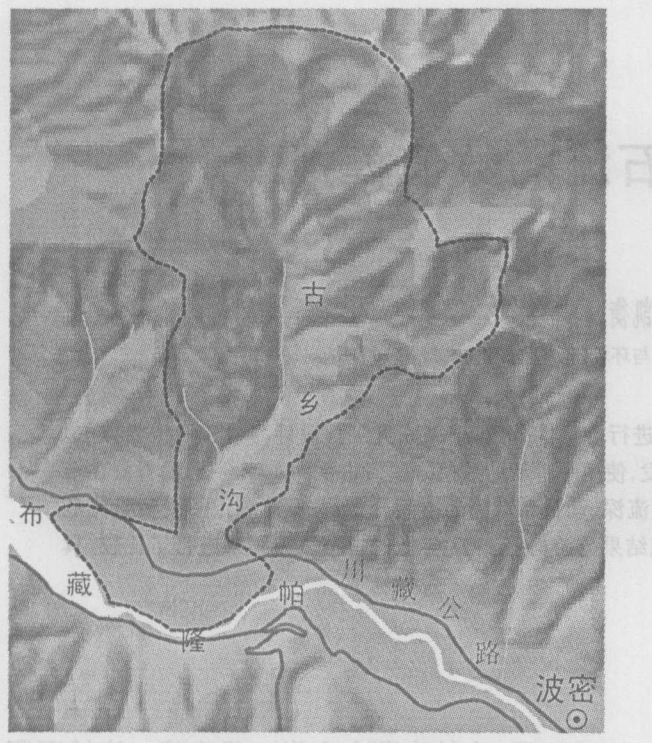


图 1 西藏波密古乡沟流域图
Fig 1 Guxiang Valley in Bomji Tibet

描述泥石流平面二维运动的 Saint-Venant 方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) &= gS_x - gS_{fx} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) &= gS_y - gS_{fy} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 h 、 u 和 v 分别是流深、 x - 和 y - 方向的垂向平均速度分量, g 为重力加速度, S_x 和 S_y 分别是 x - 和 y - 方向堆积区底面坡度, S_{fx} 和 S_{fy} 分别是 x - 和 y - 方向的摩阻坡降。因为 Saint-Venant 方程远比三维方程简单, 而且包括了在泥石流堆积泛滥的研究中极为重要的三个变量—— h 、 u 、 v 。所以方程 (1) 在泥石流运动的数值模拟中应用最为广泛。如 Mizuyama 和 Yazawa^[9] 在泥石流堆积区域有明显沟道及防护工程的情况下对泥石流的泛滥淹没范围的计算, OBrien 等^[2] 对有道路和建筑物的城区泥石流泛滥运动的模拟计算, Han 和 Wang^[10] 对尾矿溃坝问题的计算等。

方程 (1) 是一组非线性的微分方程, 目前还无法得到它的解析解, 一般都是通过有限差分法或特征线法得到该方程组的数值解。为了在数值计算时

便于处理自由边界以及零流深的问题, 胡凯衡等 (2003)^[11] 借鉴王光谦等 (1997) 发展的流团模型^[12], 实现了一种新的计算泥石流运动的数值方法。该方法将泥石流视为大量小颗粒的集合体, 然后根据方程 (1) 的离散形式计算各个颗粒在每一时间步的速度和空间分布。本模拟采用该计算方法, 详细内容参见文献 [12]。

为了能够实际求解方程 (1), 还必须给出泥石流摩阻坡降与流深、运动速度分量之间的关系。这种关系因不同学者对泥石流流体流变性质的认识不同而具有较大差异。其中比较适合粘性泥石流的是 O'Brien 给出的包含了屈服应力、粘性应力、紊流和分散应力在内的泥石流摩阻公式, 具体形式如下^[2]:

$$\begin{aligned} S_{fx} &= \frac{\tau_b}{\gamma_m h} \operatorname{sgn}(u) + \frac{2H_B u}{\gamma_m h^2} + \frac{k_c u \sqrt{u^2 + v^2}}{gh} \\ S_{fy} &= \frac{\tau_b}{\gamma_m h} \operatorname{sgn}(v) + \frac{2H_B v}{\gamma_m h^2} + \frac{k_c v \sqrt{u^2 + v^2}}{gh} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 τ_b 为屈服应力, γ_m 为泥石流的密度, h 为泥深, H_B 为流质的刚性系数, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 是符号函数, k_c 是摩擦系数。

1.2 古乡沟泥石流运动数值模拟
1.2.1 数值模拟的基本参数

根据古乡沟泥石流堆积扇区的实测地形图 (1: 5 000) 建立堆积扇的数字高程 (DEM), 并选取古乡沟沟口以上 100 m 处作为泥石流运动数值模拟的起始断面 (图 2), 模拟古乡沟 50 a 一遇泥石流洪峰在泥石流堆积扇上的运动过程。泥石流运动数值模拟的基本参数见表 1。

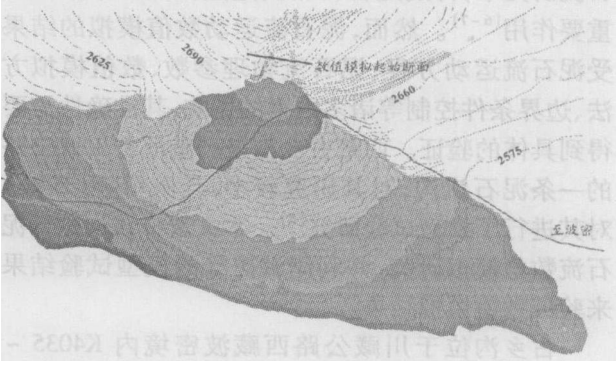


图 2 西藏古乡沟泥石流堆积扇 DEM
Fig 2 DEM of the debris flow inundation fan of Guxiang Valley

表 1 泥石流运动数值模拟基本参数
Table 1 Basic parameters of debris flow numerical simulation

流体参数		计算控制参数		运动参数	
参数名称	参数值	参数名称	参数值	参数名称	参数值
密度	2 000 kg/m ³ [8]	底床糙率系数	0.25	峰值流量	1 260 m ³ /s[8]
粘性系数	0.086 N·s/m ²	沟底平均坡降	90‰	重现期	50 a
屈服应力	55.2 N/m ²	时间步长	0.2 s	持续时间	1 000 s
		流团大小	10 m ³	峰值时刻	300 s

1.2.2 数值模拟结果

通过对古乡沟泥石流在堆积扇区运动的过程模拟, 可以获取堆积扇区每个模拟格点的流速、流深的过程分布, 据此可以获得最大流速和最大流深的分布(图 3~4)。根据泥石流流速和流深的分布以及泥石流流体的相关参数, 可以计算出最大动量和最大动能的分布(图 5~6)。

数值模拟结果显示, 泥石流出口后并不沿一个固定方向流动, 受地形条件的影响, 除堆积扇中央的主流外, 在堆积扇两侧还形成了两股支流。因在

主流线上自然沟道较浅, 主流线两侧出现漫流, 使流体扩散, 并形成堆积, 泥深和流速迅速降低。泥石流运动到堆积扇末端, 泥石流的流深和流速进一步降低, 破坏能力减弱。

根据数值模拟结果, 对通过泥石流堆积扇的各种穿越方案进行了评估, 给出了受泥石流威胁比较小的方案(图 3~6)。图 3~6 中的蓝线是原公路, 红线是根据数值模拟结果确定的受泥石流危害较小的改线方案。

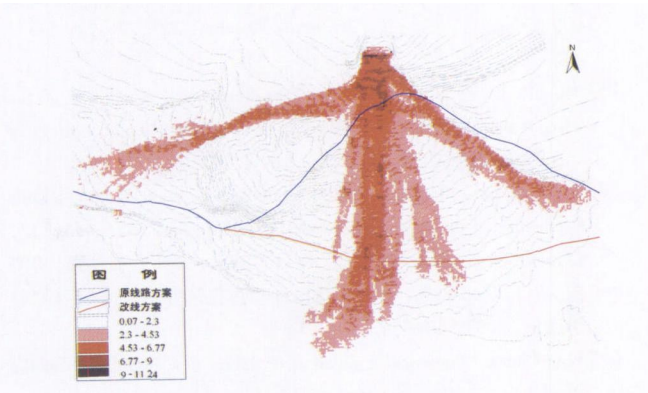


图 3 最大流速分布图

Fig 3 Distribution of maximum velocity

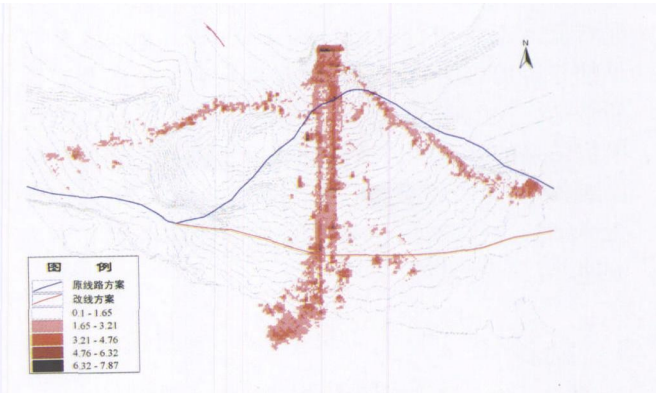


图 4 最大流深分布图

Fig 4 Distribution of maximum depth of flow

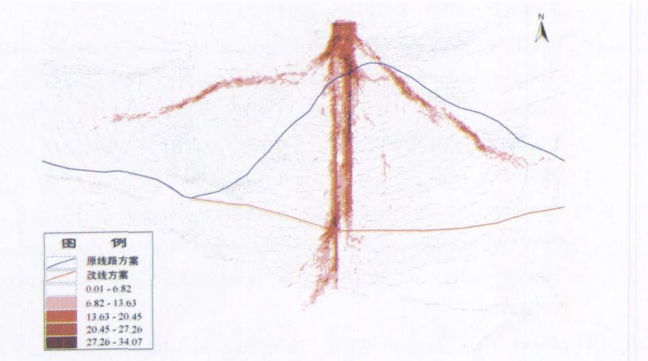


图 5 最大动量分布图

Fig 5 Distribution of maximum momentum

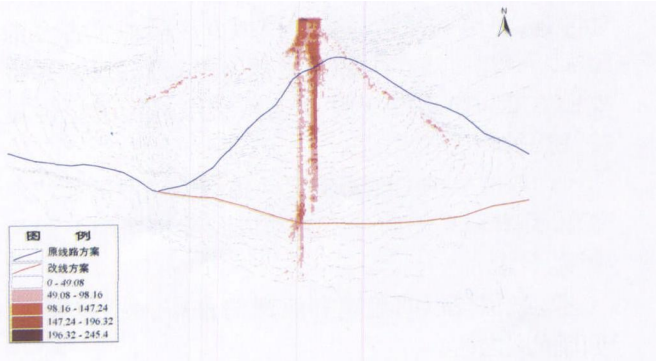


图 6 最大动能分布图

Fig 6 Distribution of maximum kinetic energy

2 数值模拟结果与模型试验的定性比较

游勇等 (1997)对古乡沟泥石流进行了模型试验研究,将古乡沟堆积扇按几何比尺 1:100 缩小建立模型,在模型上对古乡沟泥石流进行了不同重现期泥石流的正态动床试验^[8]。根据该试验的结果,50 a一遇的粘性泥石流进入堆积扇后主流部分沿中间的常流水沟床向下运动,一部分沿左侧山边产生分流。当泥石流运动到中下游时,发生漫流和分流。泥石流在堆积扇下部区段的淤积在 0.5~2.7 m 的范围内。另外试验还得到 50 a一遇的粘性泥石流表面中泓流速为 $8.5 \sim 6.0 \text{ m/s}$ ^[11]。

从泥石流数值模拟结果 (图 3、4)中可以看出,泥石流冲出山口后并分成三支,沿左右岸山坡各一支,主流沿堆积扇中央冲入主河。泥石流流速比较大的区域集中在出山口处 (最大流速达 9.0 m/s) 以及主流线的中央部分 (最大流速达 7.0 m/s)。泥石流流深除了在出山口处较大之外,在堆积扇最前缘泥石流流入汇主河处也可达到 $2.0 \sim 3.0 \text{ m}$ 。这些结果都与游勇等的模型试验结果相吻合。从这些定性的结论以及流深、流速的大小分布等可以验证数值模拟结果的合理性。遗憾的是由于没有模型试验的详细数据,无法将数值模拟与模型实验结果进行更为详细的比较验证,例如泥石流的泛滥范围和断面流速、流深、流量等。

3 结论

古乡沟是川藏公路上一条多发性泥石流沟,严重威胁公路的正常通车。本文基于泥石流的二维运动方程,使用一种新的数值模拟方法模拟了古乡沟 50 a一遇泥石流在堆积扇上的泛滥运动过程,并将模拟结果与游勇等的模型试验结果进行了定性比较,得出如下结论:

1 数值模拟的泥石流流动趋向和模型试验结果吻合,都出现左侧的分支流动以及堆积扇中下游的漫流。

2 数值模拟的流速和流深的分布、大小都在合理的范围之内。

3 数值模拟的结果可以为通过古乡沟堆积扇区公路的选线提供指导和帮助,也能指导公路防护工程方案的制定。

4 泥石流运动数值模拟不仅可以模拟泥石流泛滥范围,获得泥石流流速、流深等重要参数在泥石流堆积扇区的时空分布,确定泥石流的危害范围和危害程度,同时还可以检验泥石流减灾工程的减灾效果。数值模拟方法是补充、检验或代替模型试验的有效方法。

参考文献 (References)

- [1] Schilling S. P., Iverson R. M. Automated reproducible delineation of zones at risk from inundation by large volcanic debris flows [A]. In: Chen C. L. (ed.), Debris Flow Hazard Mitigation Mechanics, Prediction, and Assessment. Proceeding of the First International DFHM Conference [C]. San Francisco, CA, USA, 1997, August 7~9: 176~186. New York: ASCE.
- [2] 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.
- [3] Shieh C.-L., Jan C.-D., Tsai Y.-F. A Numerical Simulation of Debris Flow and Its Application [J]. *Natural Hazards*, 1996, 13 (1): 39~54.
- [4] Brufau P., Ghilardi P. & Savi F. 1D Mathematical modeling of debris flow [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2000, 38 (6): 435~446.
- [5] Hübli J., Steinerndtner H. Two-dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria [J]. 2001, *Physics and Chemistry of the Earth, Part C*, 26 (9): 639~644.
- [6] Wei Fangqiang, Hu Kaiheng, Jose Luis Lopez et al. Method and its application of the momentum model for debris flow risk zoning [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (6): 594~598 [韦方强, 胡凯衡, J. L. Lopez 等. 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].
- [7] Tang Chuan. Numerical simulation of debris flow inundation on the alluvial fans and its prediction model of the risk area [J]. *Journal of soil and water conservation*, 1994, 8 (1): 45~50. [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].
- [8] You Yong, Cheng Zunlan, Hu Pinghua et al. A study on model testing of debris flow in Guxiang Gully, Tibet. *Journal of Natural Disasters*, 1997, 6 (1), 52~58 [游勇, 程尊兰, 胡平华, 等. 西藏古乡沟泥石流模型试验研究 [J]. 自然灾害学报, 1997, 6 (1), 52~58].
- [9] Mizuyama T. & Yazawa A. Computer simulation of debris flow deposition processes. *Erosion and sedimentation in the Pacific Rim, Proc. Corvallis Oregon, Int. Assn. Of Hydrobiol. Sci.* 1987, 165: 179~190.
- [11] Guoqi Han, Deguan Wang. Numerical modeling of anhui debris flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 122 (5): 262.
- [12] Hu Kaiheng, Wei Fangqiang, He Yiping et al. The application of particle model of risk zoning of debris flow [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21 (6): 726~730 [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]
- [13] Wang G., Shao S. & Fei X. Particle model for alluvial fan formation[A]. In Chen C. L. (ed.), Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Proceeding of the First International DFHM Conference, San Francisco, CA, USA, August 7- 9[C]. 1997. 143~ 152 New York: ASCE.
- [14] Cheng Zunlan, Liu Leiji & You Yong. Debris flow velocity of Guxiang Ravine, Xizang[J]. *Mountain Research*, 1997, 15(4): 293-295 [程尊兰, 刘雷激, 游勇. 西藏古乡沟泥石流流速 [J]. 山地研究 (现山地学报), 1997, 15(4): 293-295]

Research on Numerical Simulation of Debris Flow in Guxiang Valley Tibet

WEI Fangqiang HU Kaheng CHENG Zunlan

(Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences Chengdu 610041, China)

Abstract Numerical simulation of debris flow is an important method for predicting debris flow inundation region, making debris flow risk zoning and aiding the design of debris flow control works. Debris flow is assumed as a single-phase flow and it follows Navier-Stokes equation. The vertical velocity can be neglected in the simulation because it is very small comparing the horizontal velocity. So the two-dimension movement of debris flow can be described with Saint-Venant equation. In order to check the velocity of debris flow numerical simulation result, Guxiang Valley, a typical debris flow valley located in Boni Tibet along the highway from Chengdu to Lhasa, is selected as a case study to develop numerical simulation. The numerical simulation of the debris flow with 50 years returning period is developed with the two-dimension model of debris flow movement in Guxiang Valley. The results of debris flow numerical simulation and the model testing carried out by Yong You et al (1997) in Guxiang Valley are compared. The conclusion is made out as following: the result of debris flow numerical simulation is similar to that of model testing, and debris flow numerical simulation is a good method to check or replace debris flow model testing. In addition, a modified route scheme across the fan has been made based on the numerical simulation.

Key words Tibet Guxiang Valley debris flow, numerical simulation, model testing