

美国纽约州立大学布法罗分校 火山碎屑流和泥石流数学模型研究近况

余 斌

(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: 美国国家科学基金会信息技术研究计划部批准了一项为期 3 a, 金额为\$ 1 900 000 的山地物质流研究项目在 UB 执行, 旨在运用技术手段提供尽可能准确的地质灾害(如火山和泥石流)信息给科学家、工程防治专家和生活在火山威胁阴影下的居民。SH 模型和浅水方程组成了 TITAN2D 模型的基本方程, TITAN2D 模拟了 Colima, Casita, Little Tahoma Peak 和 San Bernardino Mountains 等地区的火山和泥石流。

关键词: 模型; 火山碎屑流; 泥石流

中图分类号: P317. 9, P642. 23

文献标识码: A

2002- 02- 21 美国国家科学基金会(National Science Foundation, 简称 NSF) 信息技术研究(Information Technology Research 简称 ITR) 计划部批准了一项为期 3 a, 总项目金额为\$ 19 万的山地物质流(Geophysical Mass Flow) 研究项目。该项研究旨在运用技术手段提供尽可能准确的地质灾害(如火山和泥石流)信息给科学家、工程防治专家和生活在火山威胁阴影下的居民。这些技术包括数学模型, 地质模拟和地理信息科学。这项多学科、多专业交叉汇集的项目使美国纽约州立大学布法罗分校(The State University of New York at Buffalo, 简称 SUNY at Buffalo) 的科学家们可在一起利用计算研究中心(The Center for Computational Research, 简称 CCR), 国家地理信息和分析中心(The National Center for Geographic Information and Analysis, 简称 NCGIA) 和纽约州工程设计和工业创新中心(The New York State Center for Engineering Design and Industrial Innovation, 简称 NYSCEDI) 的有利条件, 首次联合研究火山及其衍生的灾害(如泥石流), 并期望通过这种联合研究给出科学的计算和近似实际的模拟。该项目重点研究岩石崩塌、火成碎屑流和泥石流的模拟, 目的是定量研究火山爆发的危害范围, 以期能减轻灾害, 为科学家和决策者提供一种模拟结果, 使政府官员通过详细的数据了解在特定的条件下, 火山碎屑流(或泥石流)的活动范围, 决定居民撤离的临界点和居民受影响的区域。为此, 项目的工作将直接用于防治工程中。模型的计算工作由一种新的计算方法进行一系列大规模的计算来完成。输出的大量数据必须转换成视图格式以便从科学家到公共安全计划者都能使用并掌握危险区域, 这种将大量的数据转化为三维可视化图形将使普通的人们都可以参与这项工作的研究。

1 基本方程

Savage and Hutter^[1] (简称 SH 模型) 于 1989 年首次发展了在斜坡上颗粒流连续介质运动模型。该模型的物质在运动中重度保持不变且无粘性, 在内部物质变形和外部底部表面滑移过程中遵守 Mohr

收稿日期(Received date): 2004- 12- 02; 改回日期(Accepted): 2004- 12- 28。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(40271003) 资助项目[Project of National Science Foundation of China (40271003)]

作者简介(Biography): 余斌, 男, 生于 1966 年, 研究员, 博士。2002- 12~ 2003- 09 美国明尼苏达大学访问教授, 2003- 10~ 2004- 09 美国纽约州立大学布法罗分校研究学者。主要研究方向: 泥石流的形成, 预报, 运动和堆积; 浑浊流在海底扇的沉积和海底河道。先后发表论文 30 余篇。[Yu Bin(1966~), PH. D., Research Professor, 2002- 12~ 2003- 09 Visiting professor in University of Minnesota; 2003- 10~ 2004- 09 Research Scholar in the State University of New York at Buffalo. Research interest on the forecast, moving and deposition of debris flows; the deposition and submarine channels in deep sea fans of turbidity currents]

- Coulomb 屈服临界点原理。在几何上的处理按照崩塌、泥石流等实际过程中典型运动特征: 垂直方向几何尺度远小于运动方向的, 因此用浅水方程 (shallow water equation) 简化控制方程。对于不含水的干颗粒流, x 方向浅水动量方程为^[2]:

$$\frac{\partial(hv_x)}{\partial t} + \frac{\partial(hv_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(HV_xv_y)}{\partial y} = - \frac{V_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \\ hg_z \left[1 + \frac{v_x^2}{r_x g_z} \right] \tan \varphi_{bed} - hk_{act/pass} \frac{\partial(hg_z)}{\partial x} - \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial v_x}{\partial y} \right] \\ hk_{ct/pass} \frac{\partial(hg_z)}{\partial y} \sin \varphi_{int} + hg_x \quad (1)$$

式中 x , y 和 t 分别为 x , y 轴和时间; h = 流体流深; v_x = x 方向速度; v_y = y 方向速度; g_z = z 方向重力加速度; g_x = x 方向重力加速度; r_x = 当地地表的曲率半径; φ_{bed} = 底部摩擦角; φ_{int} = 颗粒内摩擦角。

$$k_{act/pass} = 2 \frac{1 / [1 - \cos^2 \varphi_{int} (1 + \tan^2 \varphi_{bed})]^{1/2}}{\cos^2 \varphi_{int}} - 1 \quad (2)$$

当 $\varphi_{int} \geq \varphi_{bed}$ 时 (2) 式才有意义。 y 方向动量方程通过互换方程 (1) 中的 x 和 y 即可获得。

2 计算方法

描述当地地形的数据: 数字化高程模型数据被运用于求解中。这些数据可来源于地理信息系统 (GIS) 资源。通过一种译码将 GIS 数据转化为地理资源分析支持系统 (Geographic Resource Analysis Support System, 简称 GRASS)。GRASS 是修正后的地理数据并且它的数据可以带入计算网格。有限体积 Godunov 求解法是求解这些双曲系统方程, 平行自适应网格的方法。自从 Berger and Colle^[3] 的工作后, 精确计算双曲差分方程的自适应网格的优越性被逐渐认识到了。和平行计算方法一起, 自适应网格使非常细的网格的使用成为可能, 这种方法提供了一种无可比拟的计算精度。模型计算中采用了一种简捷的自适应网格, 这种网格的工作建立在前一步计算的基础上对网格改进。在模型研究中需要改善的依赖时间的双曲方程的主要点在于: 1) 保留未被改进的网格单元的附加模块; 2) 在每一个子区域为一层的“影子”网格单元准备附加数据储存。“影子”网格单元是为所有网格单元到一些处理程序中的分开网格线 (二维) 所设的一层网格单元数据。模型中将网格单元数据中接近和属于一个处理程序的数据复制到另一个处理程序中。这个复制使 Godunov 计算过程覆盖每一个网格单元而不需要额

外的数据传送。但是“影子”网格单元需要在每一个时间步结束时所有的处理程序数据保持一致。

3 计算结果

该项研究模型名为 TITAN2D 模型。近期主要模拟了墨西哥 Colima 火山地区, 尼加拉瓜的西部火山 Casita, 美国华盛顿州雷尼尔山 (Mount Rainier) 的 Little Tahoma Peak 和加利福尼亚州的 San Bernardino Mountains 等地区。这些地区有不同的地形、地面粗糙度和灾害流体特点。如 Colima, Casita 和 Little Tahoma Peak 地区属于坡度大但坡面较平坦的地形, 而 San Bernardino Mountains 地区属于小坡度但有沟道的地形, 另一方面, Little Tahoma Peak 地区有相当一部分地表被冰雪覆盖, 地面粗糙度极小。Colima 火山在 1913 年曾大规模爆发, 由于当时附近居民较少, 未造成较大损失。如果再有 1913 年规模的火山喷发, 将有 1 500 人受到威胁。对 Colima 的模拟是以火山口为起始点, 模拟火山喷发后的火山碎屑流淤积范围和给出危险区域。Casita 在 1998- 10- 30 由火山陡坡上约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的松散土石滑下 30 m 陡坡后, 以泥石流的形式往山脚运动, 冲毁两个村庄, 造成 1 560~ 1 680 人死亡; 最终泥石流停积的前缘距起动点 12 km, 泥石流淤积总面积 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^2$, 总量为 $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[4]。对 Casita 的模拟是以 1998 年泥石流的起点为模拟起点, 模拟泥石流的运动过程和淤积范围。由于 TITAN2D 模型还不能模拟泥石流运动中对底床的侵蚀作用和沿程泥沙的加入, 因此模拟时起动的物质质量与最终的沉积量相同而不是实际的起动力。Little Tahoma Peak 历史上曾在火山陡坡上有滑坡转化成泥石流并淤积在缓坡地区。对 Little Tahoma Peak 的模拟也参照历史事件模拟泥石流的运动和淤积。San Bernardino Mountains 的 Waterman Canyon 在 2003- 12- 27 夜间暴发泥石流, 将处于下游的露营地淤埋, 造成 13 人死亡。这场泥石流的触发是由于事发前 3 个月的南加利福尼亚州山火彻底破坏当地的植被, 在新植被还未生长出来时, 一场短历时暴雨造成的。在泥石流形成区无明显的大滑坡, 因此形成原因是暴雨在短时间内形成沟道径流, 冲蚀沟积物并引发小滑坡从而引起泥石流。对 Waterman Canyon 的模拟则在沟道的源头设定几个小滑坡源, 模拟滑坡进入沟道后形成的泥石流。此外, 在 Waterman Canyon 附近的 City Creek 因下游居民较多, 也参照 Waterman Canyon 的模拟

方式进行了模拟。

公式(1)中有两个重要的物性和地表参数: φ_{int} , φ_{bed} 。对于火山碎屑流和泥石流, φ_{int} 范围在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间, 一般 $25^\circ \sim 35^\circ$; 对于泥石流, φ_{bed} 范围在 $0^\circ \sim 20^\circ$, 一般 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。对于火山碎屑流, φ_{bed} 范围在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 一般 $15^\circ \sim 25^\circ$ 。对于 Little Tahoma Peak 的被冰雪覆盖的地面, φ_{bed} 可取 0° 。根据对公式(1)的各项和变量的量级分析^[5], 在大尺度物质流如火山碎屑流, 泥石流等中, 含有 φ_{int} 的量级很小甚至可以忽略, 因此 φ_{int} 的大小取舍在模拟中并不重要(这在实际的模拟中也是如此)。 φ_{bed} 在模拟中对模拟结果影响很大, 但要确定一个准确的 φ_{bed} 比较困难。在物理实验和模拟计算实验中摸索出 φ_{bed} 的规律最终得到较准确的 φ_{bed} 值。

TITAN2D 模型在模拟火山碎屑流运动和在较平坦的坡面上的泥石流(如 Colima, Casita 和 Little Tahoma Peak)时较准确, 但对于小坡度沟道中的泥石流(如 San Bernardino Mountains 的 Waterman Canyon 和 City Creek)模拟时误差较大。模拟中, 如果 $\varphi_{bed} = 10^\circ$, 模型中泥石流几乎立即就在沟道中停积, 因为中下游沟道的坡度 $< 10^\circ$, 即坡度小于摩擦角, 动力小于阻力; 如果 $\varphi_{bed} = 5^\circ$, 模型中泥石流将在流域的任何地方流动(不管是山峰还是山谷), 而不是沿着沟道内流动。这是因为模型中的流体未考虑水及其粘滞阻力的作用, 在小摩擦角时流体的速度过大而未受到粘滞阻力的节制, 造成流体

翻山越岭这种与事实不合的现象。因此目前的 TITAN2D 模型模拟粘滞阻力占主导地位的泥石流(如粘性泥石流)效果不佳。

发展一个有效且实用的数学模型需要多学科众多科学家们长期不懈的努力。因此 UB 的科学家们希望全球所有的有兴趣的科学家们能参与此项模型的研究。任何人有兴趣, 只要在 <http://hyperion.eng.buffalo.edu/gmfg/software.php> 上登记, 就可免费使用 TITAN2D 模型的最新版本。UB 科学家们唯一希望获得的回报就是使用后告诉他们模型的优缺点, 以便他们在日后的工作中改进模型。

参考文献(References):

- [1] Savage, S. B. and Hutter, K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 199: 177~ 215.
- [2] Patra, A. K., A. C. Bauer, C. C. Nichita, *et al.* Parallel Adaptive Numerical Simulation of Dry Avalanches over Natural Terrain [J]. 2004, To be published on Elsevier Science.
- [3] Berger, M. and Colella, P. Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics[J]. *J. Comp. Phys.* 1989, 82: 64~ 84
- [4] Sheridan, M. F., Bonnard, C., Carreno, R., *et. al.* 30 October 1998 Rock Fall/Avalanche and Breakout Flow of Casita Volcano, Nicaragua, Triggered by Hurricane Mitch[J]. *Landslide News*, 1999, 12: 2~ 4
- [5] Iverson, R. M. and R. P. Denlinger Flow of variably fluidized granular masses across three- dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory[J]. *Journal of Geophysical Research*. 2001, 106(B1): 537~ 552.

Research on the Numerical Model of Pyroclastic Flow and Debris Flow in the State University of New York at Buffalo, USA

YU Bin

(Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

Abstract: The highly ambitious, multidisciplinary work, which involves creation of simulations of active volcanoes, is being conducted under a three- year, \$ 1.9 million grant from the National Science Foundation's Information Technology Research (ITR) Program on Feb. 21, 2002. The researchers will integrate simulation results, remote sensing data and geographic- information system data to organize and present the information to scientists, decision- makers and, ultimately, citizens. Some mountain area, such as Colima, Casita, Little Tahoma Peak and the San Bernardino Mountain were used to simulate geophysical flows by TITAN2D model.

Key words: model; pyroclastic flow; debris flow