

文章编号: 1008-2786-(2016)3-331-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000136

基于 SPH 法的岩崩碎屑流与防护结构相互作用分析

孙新坡¹, 何思明², 刘恩龙³, 王汝恒¹

(1. 西南科技大学土建学院, 四川 绵阳 621010; 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. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 基于 SPH(光滑粒子动力学法)开展岩崩碎屑流与防护结构相互作用研究,并与干颗粒材料的水槽流砂试验进行验证分析,在此基础上优化防护结构设计。结果表明:岩崩碎屑流的运动和堆积受水槽的倾角和挡板的影响,挡板高度较小时,挡板对颗粒物质的堆积影响很小,颗粒物质较易翻越挡板,继续向前运动堆积,挡板后部几乎形不成保护带,而伴随挡板高度增加,更多的颗粒不能轻易越过挡板,大部分从挡板两侧越过,在挡板后形成一个保护带。水槽的挡板周围碎屑流沿深度剖面的速度图伴随深度变化而变化。研究结果可为山区岩崩滚石灾害多发带防护结构设计提供技术依据。

关键词: 岩崩碎屑流; 牛顿流体; 防护结构; 黏度; SPH

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

岩崩碎屑流具有超强的动力特性,对沿程构筑物造成巨大的冲击破坏。研究岩崩碎屑流灾害与承灾体之间的动力相互作用的研究工作还比较少。Chehata^[1]等实验研究了密集的颗粒状材料绕浸在其中的圆柱体流动特性,主要关注圆柱体上的阻力。Chiou^[2]通过一系列的实验,研究了颗粒物质在障碍物周围的沉积行为和流动区域。Chiou^[2]、Teufels-bauer^[3]等采用室内水槽模型试验和离散元方法,研究了雪崩与防护结构的动力相互作用; Thibert^[4]在法国阿尔卑斯山区开展了雪崩对防护结构的原型冲击试验研究。

国内学者在这方面做了大量工作,何思明等^[5]基于天然危岩体的宏观结构特征,从岩石断裂力学的角度入手,对比分析了不同震波模式下裂缝的失

稳扩展条件,确立了拉剪破坏的危岩失稳机制;继而以能量法为手段,研究了震波能量在危岩体中的输入和耗散机制。叶健^[6]等,采用离散元法建立岩石碎屑流模型,在场景中构建拦砂坝和排导槽等防灾设施模型,并对其进行边界处理,充分利用 GPU 的高度并行性和可编程性,使得利用离散元法模拟大规模岩石碎屑流的计算结果能够满足实时的要求,实现岩石碎屑流与拦砂坝交互场景的三维可视化。黄润秋和许强^[7]等选取自 20 世纪以来发生在我国的 19 个灾难性滑坡为典型实例,对各滑坡进行了深入系统的分析研究。乔建平^[8]等在野外考察无详细勘测资料的情况下,采用危险指数法对四川达县青宁乡滑坡的变形特点和形成条件,以及触发因素进行了快速评价,建立了滑坡危害性分区标准。崔

收稿日期(Received date): 2015-04-07; 改回日期(Accepted): 2015-05-14。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目:岩崩灾害颗粒分选机理与易损性定量评价(41472325); 西南科技大学博士基金:大型地震滑坡动力过程与危害研究(12zx7124); 国家自然科学基金资助项目:岩土体与下垫面对降雨滑坡运动参数的作用机制及主控关系(41272297)。[NSFC: The particle separation mechanism of rockfall hazards and the quantitative evaluation of vulnerability(41472325); Doctorate fund of Southwest university of science and technology: Large Earthquake Landslide Dynamic Process and Hazards Research(12zx7124); NSFC: The action mechanism and main control relationship of rainfall landslides movement parameters based on rock-soil mass and underlying(41272297).]

作者简介(Biography): 孙新坡(1978-),男,河北人,讲师,博士,主要从事山地灾害形成机理及防治技术研究。[Sun Xinpo(1978-),man, He-bei, Lecturer, Ph.D., Mainly engaged in mountain disaster formation mechanism and control technology.] E-mail: xinpo2008@sina.com.cn

鹏^[9]等针对四川 2013 年“4·20”芦山 7.0 级地震次生地质灾害活动特征与趋势做了深入研究。

光滑粒子动力学方法 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 是近 20 多年来逐步发展起来的一种无网格方法,该方法的基本思想是将连续的流体(或固体)用相互作用的质点组来描述,各个物质点上承载各种物理量,包括质量、速度等,通过求解质点组的动力学方程和跟踪每个质点的运动轨道,求得整个系统的力学行为。SPH 方法最早由 L. B. Lucy^[10]和 R. A. Gingold 等^[11]于 1977 年提出并应用于天体物理学,后来被广泛地应用于力学研究的各个领域。SPH 方法类似于物理学中的粒子云 (particle-in-cell) 模拟,从原理上说,只要质点的数目足够多,就能精确地描述力学过程。虽然在 SPH 方法中,解的精度也依赖于质点的排列,但对点阵排列的要求远远低于网格的要求。由于质点之间不存在网格关系,因此可避免极度大变形时网格扭曲而造成的精度破坏等问题,并且也能较为方便地处理不同介质的交界面。

本文以水槽流砂试验为研究对象,运用 SPH 法进行数值分析对岩崩碎屑流运动以及受挡板作用滑动和堆积,并与实验结果进行对比,得出合理的力学参数,用作岩崩碎屑流方面的防治。

1 建模及分析

1.1 问题描述

彻底关大桥位于国道 213 线都(江堰) - 汶(川)公路 K44 + 235 处,“5·12”汶川地震时被崩塌滚石冲毁,后经重建,新的彻底关大桥于 2009 - 05 - 12 建成。由于连日大雨,2009 - 07 - 25T4:40 左右,岷江右岸山体高位(落差达 500 m)危岩发生大面积(崩塌体总方量超过 $10 \times 10^3 \text{ m}^3$)崩塌,导致桥墩再次被冲毁(图 1)。

为了研究岩崩碎屑流的运动机制与结构物相互作用,构建了一个理想模型:半球形的岩崩碎屑流在重力作用下沿一个倾斜的水槽流动以及和一个障碍物挡板相互作用。通过比较计算结果与一些基准实验来确定所需参数。Chiou^[2]的模型测试报告非常适合我们所进行的研究。实验室模型试验相比实地测量的岩崩碎屑流有许多优势。在实验室测试中,通过设定明确的初始和边界条件可以很好的再现测试结果。实验室水槽实验的另一个优点是可以



图 1 彻底关大桥附近的岩崩碎屑流

Fig. 1 Rockfall debris flow near Chediguan bridge

改变地貌倾角、挡板的位置和尺寸。地形对颗粒流动和沉积的影响可以通过改变研究挡板位置和水槽倾角来实现。同样,颗粒材料的类型、数量和初始流动形状可以很容易地由实验室岩崩碎屑流实验来控制。

水槽的截面几何模型试验^[2]见图 2。槽分为三个部分:上部倾斜区域,相对于圆形过渡区和水平流动区域。水槽上面倾斜部分的倾角 ζ 可以调整到 30° 、 40° 、 45° 和 50° 。水槽平面的总长度 1 915 mm,槽宽度约 1 100 mm。表 1 为水槽几何参数。

挡板(长方体)安装在槽倾斜区(图 2)。显然,与挡板的碰撞的颗粒速度取决于障碍的位置。出于这个原因,考虑了两个挡板位置,挡板至水槽顶端距离分别为 P_1 和 P_2 ,即 $P_1 = 650 \text{ mm}$ 和 $P_2 = 810 \text{ mm}$ (图 2)。为了获得对称流模式,大坝是放置在槽的中心。研究了三种挡板的高度,采用表 2 中给出的尺寸。

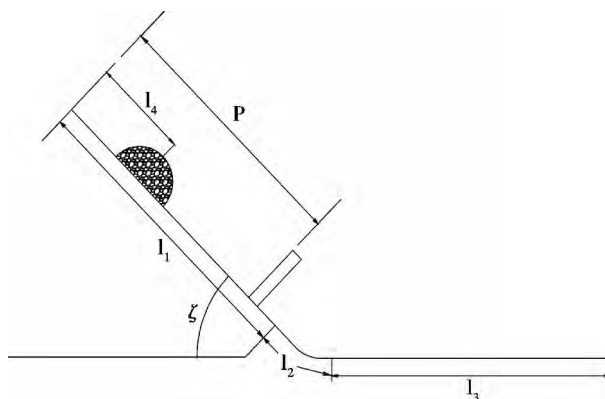


图 2 岩崩碎屑流剖面示意图^[4]

Fig. 2 Profile of the rockfall debris flow^[4]

表1 水槽几何参数

Tab.1 Geometry of chute and hemispherical cap /mm

几何参数 Geometric parameters	水槽倾角 Chute angle	
	40°	45°
上倾斜部分 Tilt the upper part μ_1	933.5	936
过渡部分 The transition section μ_2	146.5	144
水平部分 Levels of part μ_3	835	835
水槽宽度 The width of the chute	1 100	1 100
崩塌位置 The location of the rockfall μ_4	309.5	312
岩崩体半径 The radius of rockfall body	100	100

表2 挡板几何参数

Tab.2 Geometry of cuboid dams /mm

挡板 Dam	宽 Width	高 Height	厚 Thick
低高度 Low height	160	20	10
中高度 Medium height	160	40	10
高高度 High height	160	80	10

颗粒材料的特点是:密度、恢复系数和内摩擦角、基底摩擦角度。Chiou^[2]采用的是粗石英砂,平均直径5 mm,材料密度2 650 kg/m³和恢复系数约为0.75。

1.2 基本理论与方法

1.2.1 SPH方法

SPH方法是通过构造一个核函数对离散质点位置进行核估计来计算梯度的相关项,因此不需要网格来求解偏微分的差分,只需将微分形式的守恒方程转化为积分方程形式,计算出在任意一点上的各个场变量的核估计。函数 $f(x)$ 在空间某一点 x 上的核估计可以通过函数 $f(x)$ 在域 Ω 中的积分获得

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad (1)$$

式中 $W(x - x', h)$ 为核函数或权函数, x 为估计点的空间坐标, x' 为对估计点有贡献作用的空间点坐标, h 为紧支域的度量尺寸即光滑长度。

函数导数的核估计可通过将式(1)里的函数 $f(x)$ 视为导数 $\partial f(x)/\partial x$ 而求得,并利用分步积分和核函数 W 在积分域 Ω 边界上为零的条件求得

$$\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x} \right) = \int_{\Omega} \frac{\partial f(x')}{\partial x} \frac{W(x - x', h)}{\partial x} dx' \quad (2)$$

由此可见光滑粒子法的基本思想之一是将函数导数的核估计转换成核函数的导数,核函数是预先设定的已知函数。将解域 Ω 划分为 M 个子域粒子,每个子域粒子 j 的质量和密度分别为 $m_j = m(x_j)$, ρ_j

$= \rho(x_j)$,设 $f(x)$ 在粒子 i, j 上的值分别为 $f_i = f(x_i)$, $f_j = f(x_j)$,则 $f(x)$ 及其导数在粒子 i 上的核估计式(1)~(2)的离散式为

$$f_i = \sum_{j=1}^M f_j W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \quad (3)$$

$$\frac{df_i}{dx^\alpha} = \sum_{j=1}^M f_j \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_j^\alpha} \frac{m_j}{\rho_j} \quad (4)$$

式中 $W_{ij} = W(x_j - x_i, h)$ 为离散核函数,积分微体元 $dx' = m_j/\rho_j$, α 表示空间维序数,下标 j 为编号为 i 粒子的临近粒子编号。

核函数是SPH方法中核心组成部分,常用的有B-spline核函数、Gauss核函数、二次核函数及指数核函数等,其中B-spline核函数是目前应用最广泛的核函数,其形式为^[12]

$$W(z, h) = \frac{1}{N} \begin{cases} (1 - 1.5z^2 + 0.75z^3) & 0 \leq |z| < 1 \\ 0.25(2 - |z|)^3 & 1 \leq |z| < 2 \\ 0 & |z| \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $z = (x_i - x_j)/h_{ij}$, $h_{ij} = 0.5(h_i + h_j)$ 为对称光滑长度, $N = 1.5/h_{ij}^d$, $d = 1, 2, 3$ 分别对应一维、二维和三维问题。

1.2.2 Mie-Grüneisen状态方程

Mie-Grüneisen状态方程的耗能是线性的,通用方程为

$$P - P_H = \Gamma_\rho (E_m - E_H) \quad (6)$$

P_H 和 E_H 分别是Hugoniot压力和比能, Γ 是Grüneisen比定义为

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho} \quad (7)$$

Γ_0 是材料常数, ρ_0 是参考密度。

Hugoniot能 E_H 与Hugoniot压力有关

$$E_H = \frac{P_H \eta}{2\rho_0} \quad (8)$$

$\eta = 1 - \rho_0/\rho$ 是体积压缩应变。由上式消除 Γ 和 E_H 得到

$$P = P_H \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (9)$$

线性 $U_s - U_p$ Hugoniot形式中Hugoniot通用形式为

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (10)$$

式中 $\rho_0 c_0^2$ 等价于体积弹性模量, $\eta = 1 - \rho_0/\rho$ 是体积压缩应变, ρ_0 是参考密度。

C_0 和 s 定义冲击波速度 U_s 和粒子速度 U_p 的线性关系,表示如下

$$U_s = c_0 + sU_p \quad (11)$$

上面假设的 $U_s - U_p$ Hugoniot 形式如下

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (12)$$

牛顿内摩擦定律表达式

$$\tau = \mu \gamma \quad (13)$$

式中 τ —所加的切应力; Γ —剪切速率(流速梯度); M —度量液体黏滞性大小的物理量, 简称为黏度 物理意义是产生单位剪切速率所需要的剪切应力。

1.3 SPH 数值建模

SPH 的优点还在于它是一种纯 Lagrange 方法, 能避免 Euler 描述中欧拉网格与材料的界面问题, 因此特别适合于求解高速碰撞等动态大变形问题。

岩崩体通过颗粒体模拟, 在整个变形区域内随机生成由粒子质量构成岩崩体, 滑动面和挡板用刚性“壳单元”模拟(图3)。岩崩体体积为 0.002 1 m³, 为了减小计算时间, 采用质点虚拟半径范围 5 mm。总颗粒数为 4 203 个。

实际岩崩碎屑流的成分、颗粒粒径和级配复杂, 而本文模型试验采用单一流砂来模拟实际碎屑流, 其真实性如何, 有待与实际崩塌碎屑流结果对比。

1.4 参数确定

本文采用 B-spline 核函数, 通过进行大量参数试验, 选择了一组与试验符合的比较合理的参数作为本文计算参数。表 2 为模拟采用的砂的参数。

2 计算结果与实验对比

现在对水槽的不同倾角的岩崩体的堆积形态和

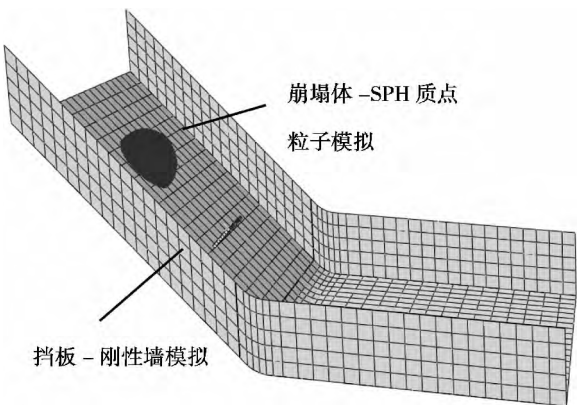


图 3 岩崩碎屑流与挡板数值模型

Fig. 3 Numerical model of rockfall debris flow and dam

速度场进行分析。

表 2 砂的参数

Tab. 2 Properies of sands

参数 Parameters	数值 value
密度 Density	2.65
$C_0 / (m/s)$	1.5
S	0
Γ_0	0
$\mu / (t \cdot s/mm^2)$	4.0E-6

2.1 水槽倾角 40°时计算结果分析

图 4 显示了 SPH 仿真和实验的颗粒堆被释放后在不同的时间的一些快照。快照是在同一次 SPH 计算和实验同时刻拍的照片。目测仿真和实验的流场结果对比比较吻合。大约 17.5% 的颗粒质量被挡墙阻挡。数值模拟是非常接近实验结果, 误差 $\pm 1.5\%$ 。SPH 方法可以获得颗粒流在斜带和沉积的

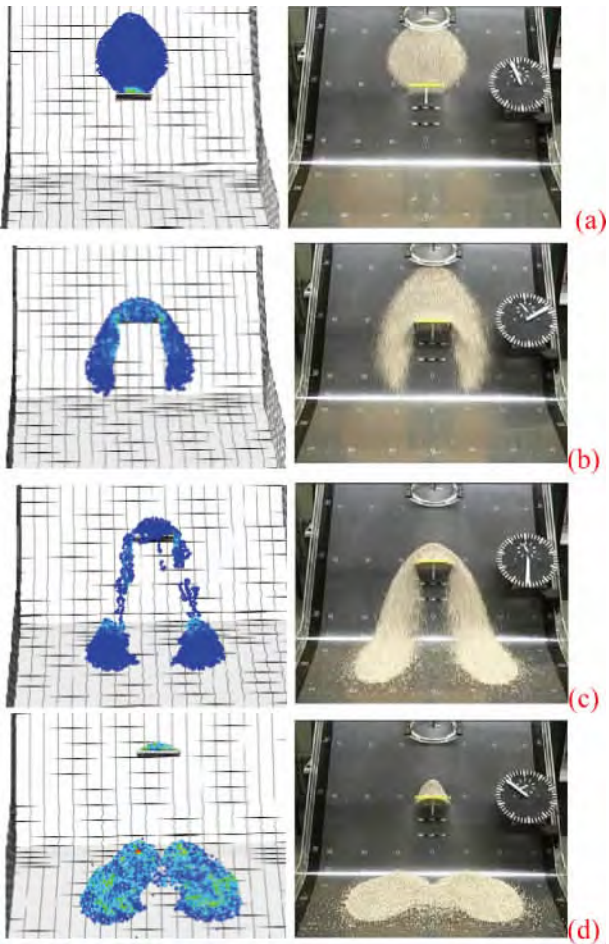


图 4 岩崩体滑动演化过程 SPH 数值模拟(左)与试验^[4](右)对比

Fig. 4 Flow-obstacle interaction: comparison between the SPH simulation (left panels) and the laboratory experiment (right panels)

主要特点。

图4c显示更多的颗粒流实验中心以外的障碍。我们认为这是由于挡板边缘粒子的干扰。有角的粒子比球形粒子的干扰更明显。图4(d)也证实了这一点。计算结果显示挡板后面中线上颗粒少于实验结果。

2.2 不同挡板高度对岩崩体的堆积形态的影响

对45°的倾角水槽进一步计算。这些计算旨在研究挡板高度对颗粒流的影响。图5显示三种不同挡板高度颗粒流堆积。挡板高度比较小时,挡板对颗粒物质的堆积影响很小,颗粒物质很容易翻越挡板,继续向前运动堆积,挡板后面几乎形不成保护带,而随着挡板高度增加,更多的颗粒不能轻易越过挡板,大部分从挡板两侧越过,在挡板后面形成一个保护带。通过对比实验和仿真的挡板阻挡颗粒流,SPH模拟可以再现颗粒材料的溢出和堆积。

2.3 岩崩体运动过程中的速度场分析

速度场的模拟和实验的对比如图6所示。实验采用PIV(粒子图像测速技术)测量表面速度。一些颗粒被挡板阻挡在挡板前形成静态区。静态区的颗粒数量随着时间的推移而增加,直到达到静止状态。如图6所示,颗粒流被挡板分成两个分支。通过计算与试验对比发现,0.39s时计算结果最高

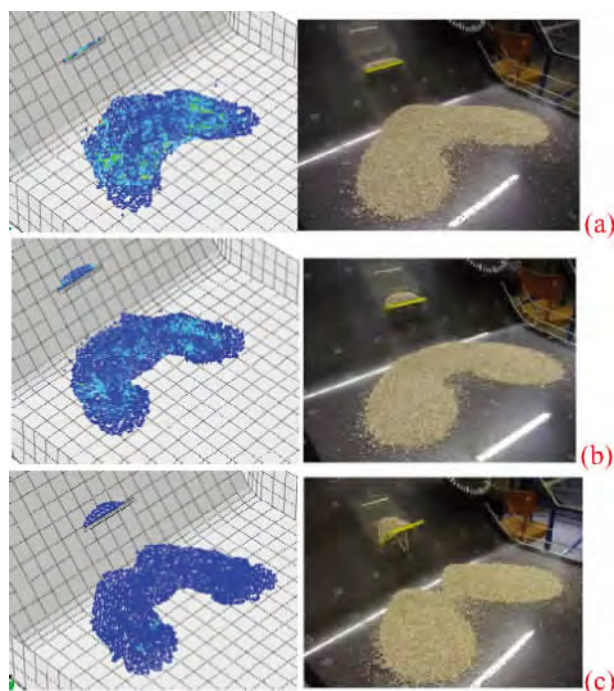


图5 岩崩体滑动堆积SPH数值模拟(左)与试验^[2](右)对比

Fig. 5 Flow deposition: comparison between SPH calculations and experiments (top panels^[2]) and (bottom panels)

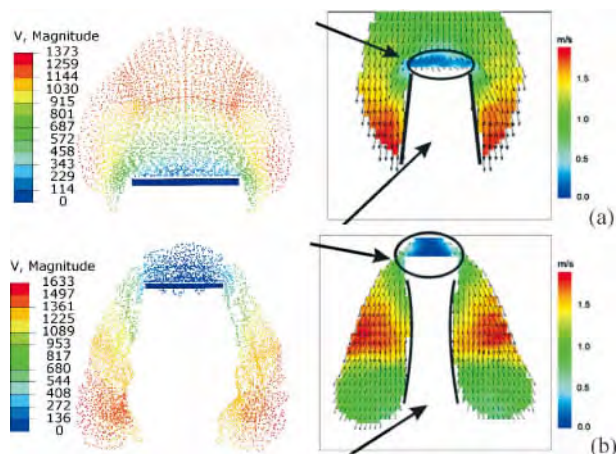


图6 岩崩体滑动速度云图SPH数值模拟(mm/s)与试验^[2]对比

Fig. 6 Velocity profile: particle velocities in the SPH calculation (left panels) (mm/s) and in the experiment (right panels^[2]) (m/s) at different time after cap lifting

速度略微低于试验值,1.37 m/s对应试验值为1.5 m/s;0.67s时计算结果最高速度略微高于试验值,1.63 m/s对应试验值为1.5 m/s,挡板前的静态区的模拟细节非常重要。比较PIV测量和SPH模拟显示了速度场比较吻合。因为防护结构的设计依赖于颗粒与挡板的动态碰撞和挡板前的颗粒的质量。岩崩防护的一个关键问题在于保护是低于围护结构的保护区域。SPH模型能够模拟挡板下面的保护区域。

3 结语

通过SPH方法模拟岩崩与试验对比分析。得到如下结论:

1. SPH法可以模拟颗粒物质流动以及颗粒和结构之间的相互作用。用模拟结果与实验进行了比较,结果显示仿真和实验结果比较吻合。颗粒的分散特性是由数值模拟与实验拟合得到。

2. 岩崩碎屑流的运动和堆积受到水槽的倾角和挡板的影响,SPH可以方便地考虑一些影响因素,如地形、挡板的几何属性和挡板的位置。此外,SPH模型可以应用于一些连续介质方法不能实现的情况,如溢流。

3. 黏度模拟颗粒流-挡板相互作用中以及颗粒的分散堆积发挥着重要作用。

4. 流动机制受挡板的位置以及高度的影响,不同位置和不同高度的挡板前颗粒堆积以及挡板后保护区范围和形态不同。可以计算挡板阻挡的颗粒大

小以及受挡板影响的保护区域的动态变化范围。

本文未讨论挡板与岩崩碎屑流之间的碰撞力，在以后的研究中探讨。

参考文献(References)

- [1] Chehata D , Zenit R , Wassgren C R. Dense granular flow around an immersed cylinder[J]. *Phys of Fluids* 2003 ,15(6) : 1622 – 1631
- [2] Chiou ,M C. Modelling dry granular avalanches past different ob-structs: numerical simulations and laboratory analyses ,Dissertation [D]. Technical University Darmstadt ,Germany 2005.
- [3] Harald Teufelsbauer ,Y Wang ,M C Chiou. Flow-obstacle interaction in rapid granular avalanches: DEM simulation and comparison with experiment [J]. *Granular Matter* 2009 ,11(4) : 209 – 220
- [4] Emmanuel Thibert ,Djebar Baroudi ,Ali Limam ,Philippe Berthet – Rambaud. Avalanche impact pressure on an instrumented structure [J]. *Cold Regions Science and Technology* 2008 ,54(3) : 206 – 215
- [5] 何思明 ,吴永 ,李新坡. 强震荷载下裂缝岩体拉剪破坏机理[J]. *工程力学* 2012 ,29(4) : 178 – 184 [He Siming ,Wu Yong ,Li Xin-po. Failure mechanism of dangerous rock under seismic tension-shear action [J]. *Engineering Mechanics* ,2012 ,29(4) : 178 – 184]
- [6] 叶健 ,陶和平 ,陈锦雄 ,等. 基于 GPU 的岩石碎屑流与拦砂坝交互场景的[J]. *中南大学学报* 2013 ,44(2) : 718 – 725 [Ye Jian ,Tao Heping ,Chen Jinxiong ,et al. Three-dimensional modeling and visualization of interaction of rock avalanche and debris dam based on GPU [J]. *Engineering mechanics* 2013 ,44(2) : 718 – 725]
- [7] 黄润秋 ,许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京 :科学出版社 ,2008. [Huang Runqiu ,Xu Qiang. Catastrophic landslides in China [M]. Beijing :Science Press 2008.]
- [8] 乔建平 ,田宏岭 ,石莉莉 ,等. 采用危险指数法研究达县特大型暴雨滑坡发育特征[J]. *山地学报* 2008 ,26(6) : 739 – 744 [Qiao Jianping ,Tian Hongling ,Shi Lili ,et al. Using the risk index method research daxian oversize rainstorm landslide development characteristics [J]. *Mountain Research* 2008 ,26(6) : 739 – 744]
- [9] 崔鹏 ,陈晓清 ,张建强 ,等. “4 · 20”芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动特征与趋势[J]. *山地学报* 2013 ,31(3) : 257 – 265 [Cui Peng ,Chen Xiaoqing ,Zhang Jianqiang ,et al. “4 · 20” forth an earthquake of magnitude 7.0 secondary mountain hazards activity characteristics and trends [J]. *Mountain Research* ,2013 ,31(3) : 257 – 265]
- [10] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. *The Astronomical Journal* ,1977 ,82(12) : 1013 – 1024
- [11] Gingold R A ,Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics-theory and application to non-spherical stars[J]. *Royal Astronomical Society* ,1977 ,181: 375 – 389
- [12] Petschek A G ,Libersky L D. Cylindrical smoothed particle hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics* ,1993 ,109(1) : 76 – 83

Analysis of Rockfall Debris-obstacle Interaction with SPH Method

SUN Xinpo¹ , HE Siming² , LIU Enlong³ , WANG Ruheng¹

(1. Southwest University of Science and Technology , Mianyang 621010 , Sichuan , China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610041 , China;

3. College of Water Resources and Hydropower , Sichuan University , Chengdu 610065 , China)

Abstract: This paper investigates the interaction action between rapid rockfall debris flow and an obstacle. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) is used to simulate the flow regimes observed in laboratory experiments. The relationship between the particle properties and the overall flow behavior is obtained by using SPH with Newtonian Fluid contact model. The debris body movement and its accumulation are affected by the inclination of chutes and dams of state. As a dam height is small , it has little impact on the accumulation of particles , and particles easily across the board , and then continue to move forward. Protection zone are almost not formed behind the dam , and with the increase of dam height , more particles cannot be easily cross dam , most instead , cross from the dam side behind the dam form a protective belt. The velocity depth-profiles around the obstacles are not uniform which varies with depths. The numerical results are compared with laboratory experiments of chute flow with dry granular material. Some important model parameters are obtained , which can be used to optimize defense structures in mountain regions.

Key words: Rockfall debris flow; Newtonian fluid; Obstacle; viscosity; SPH