

DOI: 10.11779/CJGE20230463

考虑强度速率衰减效应的地震滑坡 SPH-FEM 模拟

魏 星¹, 程世涛², 谢相焱^{*3}, 陈 睿¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川交通职业技术学院, 四川 成都 611130; 3. 中铁二院昆明勘察设计研究院
有限责任公司, 云南 昆明 650200)

摘要: 基于 SPH 和 FEM 耦合的数值计算方法, 引入滑动面摩擦强度的速率衰减模型, 提出了一种能够模拟地震诱发滑坡破坏过程的数值模拟方法。基于所提数值方法模拟了唐家山地震滑坡, 模拟结果与现场勘查结果及室内试验现象较为一致。基于模拟的滑动面上摩擦系数的演化过程, 将唐家山滑坡的发生分为 4 个阶段: 启动阶段、摩擦衰减阶段、低摩擦滑移阶段和逐步稳定阶段。模拟结果表明速度增加和摩擦强度衰减的相互促进, 是触发滑体的高速运动的根本原因。提出采用滑体上作用的动摩擦力 f_d 和动下滑力 T_d 的比值 R 作为判别指标用于判断大型滑坡的启动, 当首次出现 R 小于 1 时认为滑动面发生整体贯通并出现失稳启动。基于滑动面不同位置摩擦系数的演化, 揭示了滑坡启动中滑动面摩擦强度衰减和滑动面的渐进贯通过程, 解释了地震作用与滑动面摩擦参数速率衰减效应共同作用触发大型滑坡发生破坏的内在机理。

关键词: 大型滑坡; 滑动面; 摩擦强度; 速度衰减效应; SPH-FEM 耦合方法

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)08-1753-09

作者简介: 魏 星(1977—), 女, 工学博士, 副教授, 主要从事岩土工程数值模拟、岩土本构理论方面的研究工作。
E-mail: weixinghl@163.com。

SPH-FEM simulation of landslide induced by earthquake considering velocity weakening effect of frictional strength

WEI Xing¹, CHENG Shitao², XIE Xiangyan³, CHEN Rui¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu 611130, China; 3. Kunming Survey, Design and Research Institute Co. Ltd. of CREEC, Kunming 650200, China)

Abstract: Based on the SPH-FEM coupling method, a frictional velocity weakening model for sliding surface is introduced and a numerical simulation method which can simulate the whole failure process of the landslides triggered by earthquake is proposed. The Tangjiashan landslide is simulated by the proposed method, and the simulated results are consistent with the on-site investigations and the laboratory test results. Based on the calculated frictional strength on the sliding surface, the whole failure process of the Tangjiashan landslide is divided into four stages: the triggering stage, the frictional weakening stage, the low frictional stage and the gradually stabilizing stage. The simulated results indicate that the high-speed movement of the sliding body is triggered by the interaction of the increase of the velocity and the decrease of the frictional strength. The parameter R defined by the ratio of the dynamic frictional force f_d to the dynamic sliding force T_d is suggested to evaluate the failure of large landslides. When R less than 1 occurs for the first time, the stress on the sliding surface reaches the shear strength and slope failure occurs. Based on the evolution of friction coefficient at different positions of the sliding surface, the frictional weakening of the sliding surface and the gradual failure of the landslide are revealed. The large-scale landslide is supposed to be triggered by the joint effects of the earthquake and the frictional velocity weakening.

Key words: large-scale landslide; sliding surface; frictional strength; velocity weakening effect; SPH-FEM coupling method

0 引言

尽管对于大型滑坡的启动和运动机理的认识仍然存在争议^[1], 但是滑动面的摩擦强度衰减是大型滑坡发生高速运动的主要诱因已成为广泛共识^[2-3]。滑动面

的摩擦强度在滑坡发展过程中是一个动态演化的参

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977235)

收稿日期: 2023-05-24

*通信作者 (E-mail: xiexiangyan163@163.com)

量, 呈现出显著的速率相关性, 这种相关性决定了滑坡的滑移模式、滑动速度和移动距离^[4-5]。大型滑坡的勘探资料和反演分析表明, 滑体高速滑移时滑动面呈现出远低于其正常摩擦强度的超低摩擦性^[6-7], 典型的如日本的 Nikawa 滑坡^[8]和中国的西藏易贡滑坡^[9]。滑带土的残余强度决定了滑动面的摩擦强度, 因此, 室内环剪试验和旋剪试验能定量地给出滑动面摩擦强度随速率的衰减程度, 揭示高速滑坡的触发机制^[10-15]。试验研究表明粗粒滑带土的残余强度随剪切速率的增加呈现减小的规律^[10-13]; 且随着剪切变形量和剪切速率的增加, 粗粒滑带土内部颗粒破碎、细化, 孔隙水压力逐渐累积, 并可能触发剪切面液化现象, 导致残余强度显著下降^[14-15]。这种剪切速度增加和滑动面上强度衰减的相互促进机制, 促使滑体不断加速, 并最终发展成为高速远程滑坡。

但是需要指出的是, 剪切面摩擦强度衰减对大型滑坡的失稳启动的影响研究仍然较少。目前, 临界位移是判别滑坡失稳一个常用指标^[16-17]。Jibson^[18]的研究表明大多数土体强度在 5~10 cm 的剪切变形下可降低至残余值, 据此建议了临界位移的参考值。但是在一些地震滑坡现象中发现, 滑体位移超过 1 m 仍未发生破坏 (Dong 等^[19]、Yang 等^[20])。传统的临界位移没有反映滑动面上的强度速率衰减效应, 无法反映大型滑坡的启动机理, 更无法考虑地震荷载与强度速率衰减效应对滑坡启动的同步作用。因此, 在地震作用下, 滑动面摩擦强度是如何衰减并对大型滑坡失稳和启动产生影响是需要进一步研究的^[20]。

数值模拟方法是研究滑坡灾害机理, 找出滑坡启动和运动规律的有效手段。离散单元法 (DEM)^[21]、非连续变形分析 (DDA)^[22]、光滑粒子流体动力学方法 (SPH)^[23-25]和物质点法 (MPM)^[26-27]等方法已经广泛用于模拟大变形的滑坡问题当中。但是目前的数值模拟研究主要关注大型滑坡在滑体高速滑动时的超低摩擦现象, 较少考虑地震荷载与摩擦面强度衰减效应在滑坡失稳启动中的影响规律。为此, 本文基于 SPH 和 FEM 耦合的方法, 发展能够在滑坡启动和滑移过程中考虑滑动面摩擦强度速率衰减效应影响的动力数值方法, 通过实际地震诱发滑坡的模拟, 再现地震作用下大型滑坡启动和运动过程, 探讨滑动面摩擦强度的速率衰减效应对大型地震滑坡启动的影响机制。

1 SPH 和 FEM 耦合的数值计算方法

1.1 数值计算方法流程

有限元法 (FEM) 采用连续介质力学原理描述, 能够适应复杂的几何形状和边界条件, 通过适当的边

界处理, 能够合理考虑地震动的输入, 降低地震波在边界上反射产生的误差。但是, FEM 方法在处理大变形问题中有一定的局限性, 存在网格畸变问题。光滑粒子流体动力学法 (SPH) 采用拉格朗日方法描述, 物体的变形及运动信息携带在粒子上, 广泛地应用于模拟流体和固体变形问题, 能够较好地模拟大变形现象。但是 SPH 方法在边界处理上相对复杂, 需要在边界上人为设定初始速率、荷载或约束, 这种设置难以考虑复杂的边界条件, 也很难完全再现真实的边界条件, 更适用于滑坡发生后的滑体运动过程的模拟^[23-25]。

本文拟采用 SPH 和 FEM 耦合的数值计算方法, 建立一种能够描述滑坡由初始稳定状态、启动状态到滑移破坏状态全过程的模拟方法。该方法能够合理考虑复杂边界条件的影响, 也能够合理再现滑坡中的滑体的大变形发展过程。所建立的耦合计算方法的流程图如图 1 所示。

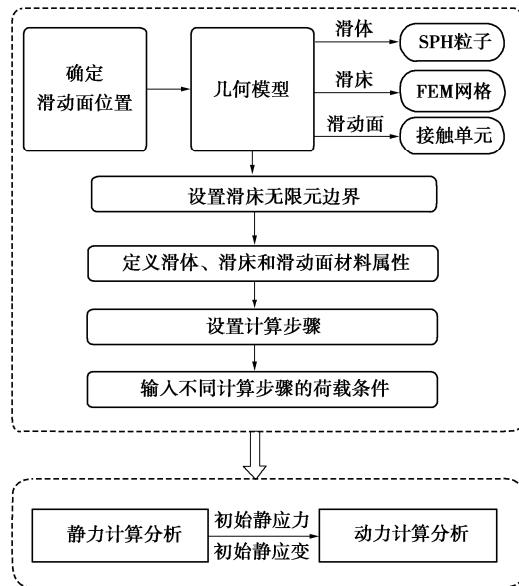


图 1 SPH 和 FEM 耦合的数值模拟方法流程图

Fig. 1 Flow chart of coupled SPH and FEM numerical simulation method

(1) 确定滑体和滑床间的滑动面位置。一些滑坡可以根据现场地勘直接确定。对于现场难于确定的情况可以由有限元的强度折减法计算确定滑动面的具体位置。

(2) 建立 SPH 和 FEM 耦合的几何模型。首先, 将滑坡的几何模型导入有限元网格进行网格剖分, 其中滑动面设置为接触单元。然后, 将滑体的有限元网格转化为 SPH 粒子, 并在滑床的有限元网格的外侧增加设置无限元网格, 以模拟远场地基对地震波能量的吸收作用以及无穷远处位移为零的边界条件。

(3) 设置不同部分的本构模型并输入材料参数。

需根据不同部分岩土材料的性质, 分别定义滑体和滑床的本构模型以及滑动面的接触模型。

(4) 设置计算步骤并分别定义边界条件和荷载条件。根据地震滑坡前后的荷载变化设置两个计算步骤: 重力作用下的静力计算步骤和地震作用下的动力计算步骤。在动力计算中需要设置地震荷载的作用。

(5) 开展静力计算分析, 确定重力作用下, 滑坡内部的应力和应变, 并将计算结果存储。

(6) 开展动力计算分析, 将静力计算得到的应力应变作为初应力和初应变, 进一步开展动力计算分析, 模拟地震荷载作用下, 滑坡启动和滑移的过程。

1.2 滑床和滑体的本构模型

考虑外部降雨、荷载作用、地震及滑体运动的冲击作用, 均会导致岩土体发生结构损伤, 在本文的静力和动力计算步骤中, 滑床和滑体均采用强度软化的 Mohr-Coulomb 模型。假定强度参数会随着塑性变形的增加而降低, 采用如下强度参数软化模型:

$$c = c_r + (c_p - c_r) \exp(-\eta \varepsilon_{eq}) \quad , \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi_r + (\varphi_p - \varphi_r) \exp(-\eta \varepsilon_{eq}) \quad . \quad (2)$$

式中: c 和 φ 为土体的黏聚力和内摩擦角; c_r 为残余黏聚力; φ_r 为残余内摩擦角; c_p 为峰值黏聚力; φ_p 为峰值内摩擦角; η 为影响因子; ε_{eq} 为塑性剪应变。当塑性变形很小时, 黏聚力和内摩擦角分别为峰值黏聚力和峰值内摩擦角。该模型中, 随着塑性变形的增加, 黏聚力和内摩擦角逐渐减小至残余值, 其中 η 的具体确定方法及取值参见文献[28]。

1.3 滑动面的摩擦强度速率衰减模型

滑动面采用 Coulomb 摩擦模型描述, 如下:

$$\tau = \begin{cases} \mu \sigma \operatorname{sign} v & (|v| > 0) \\ \min(|\tau_{app}|, \mu \sigma \operatorname{sign}(\tau_{app})) & (v = 0) \end{cases} \quad . \quad (3)$$

式中: τ , μ 分别为滑动面上的剪应力和摩擦系数; v 为剪切速度; σ 为动面上作用的正应力; τ_{app} 为 $v = 0$ 时, 作用于滑动面上的剪应力; sign 为符号函数, $x > 0$ 时 $\operatorname{sign}(x) = 1$; $x = 0$ 时 $\operatorname{sign}(x) = 0$; $x < 0$ 时 $\operatorname{sign}(x) = -1$ 。

本文计算中摩擦系数 μ 采用 Lucas 等^[2]建议的考虑剪切速率影响的滑动面摩擦强度衰减模型:

$$\mu(v) = \frac{\mu_0 - \mu_w}{1 + \|v\|/v_w} + \mu_w \quad . \quad (4)$$

式中: μ_0 和 μ_w 分别为静摩擦系数和稳态摩擦系数; v_w 为特征速度。Lucas 等^[2]广泛地分析了已有研究成果, 指出式(4)中相关参数的取值范围为 $\mu_0 \in [0.5, 0.9]$, $\mu_w \in [0.08, 0.16]$, $v_w \in [0.8 \text{ m/s}, 5.2 \text{ m/s}]$ 。Lucas 等^[2]还进一步研究了太阳系内不同行星上发生的大型滑坡现象, 发现当 $\mu_0=0.84$, $\mu_w=0.11$, $v_w=4 \text{ m/s}$, 在数值

计算中可以较好地再现大型滑坡发生的过程, 该组参数具有较广泛的适用性。

基于 ABAQUS 中的 SPH 模块进行了二次开发, 通过用户子程序定义了相应的滑体和滑床的本构模型以及接触面的摩擦强度衰减模型。SPH 算法中采用三次样条函数作为光滑核函数, 时间积分方法采用中心差分法对运动方程进行显式的时间积分。SPH-FEM 链合能充分利用两者的优势, 在滑坡大变形区域(滑体)使用 SPH 方法, 在小变形区域(滑床)采用 FEM 方法, 边界采用无限元模拟, 提高了计算效率的同时也提高了模拟的准确性。

2 工程实例分析

2.1 唐家山滑坡工程概况

唐家山滑坡处于龙门山断裂带北川—映秀段西北约 2.5 km, 属于“V”型高山峡谷地貌。地震前唐家山斜坡上部坡度为 39.01° , 中部为 34.65° , 下部为 33.94° , 属于中陡顺向岸坡结构, 地震前天然状态下边坡整体稳定。滑坡顶部高程约 1300 m, 滑坡前后缘高差约 540 m, 水平距离约 800 m, 整个滑坡下滑时间约 0.5 min, 滑体方量约 $2.037 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[29-30], 根据现场调研资料推断最大下滑速度约为 28 m/s ^[31]。现场地勘资料显示唐家山滑坡的地质剖面及滑体最终堆积形态见图 2, 滑体结构从上至下分别为: 强一中风化岩, 厚 $4 \sim 10 \text{ m}$; 弱风化灰岩, 厚 $3 \sim 10 \text{ m}$; 新鲜灰岩夹灰绿色含绿泥石的细粒状砾块岩、灰色含砾泥灰岩, 厚约 50 m, 间夹层间剪切带和泥化夹层^[30]。

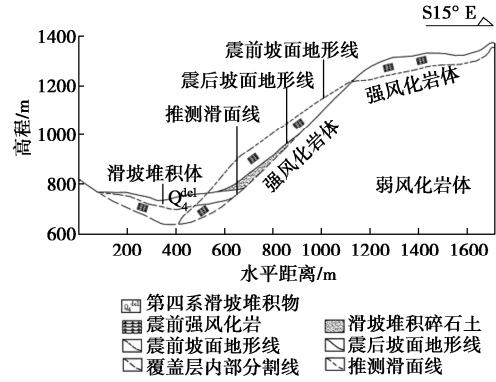


图 2 唐家山滑坡地质剖面图^[29]

Fig. 2 Geological profile of Tangjiashan landslide^[29]

2.2 数值计算模型

本文建立的唐家山数值计算模型如图 3 所示。结合场地的实际条件, 滑床基岩采用有限元网格以构建近场模型, 基岩左右侧和下侧均设置无限元网格以构建远场条件, 此外还设置了 6 个监测点, 分别位于滑坡顶面和滑动面上的前段、中段和后段, 用于记录监测点状态的变化过程。

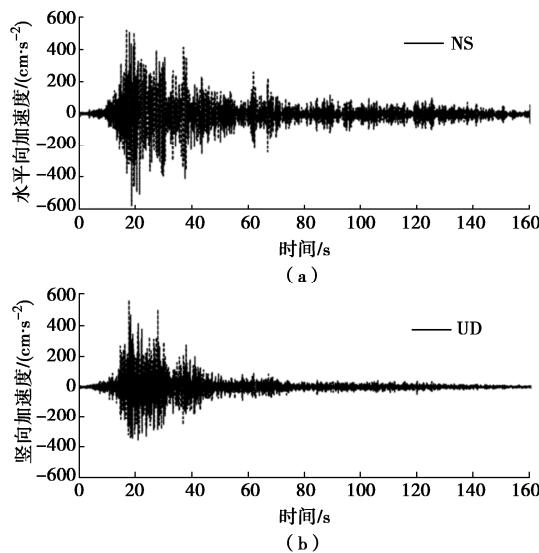


图 3 汶川地震什邡八角镇地面加速度记录

Fig. 3 Ground acceleration records of Bajiao Town, Shifang City during Wenchuan earthquake

滑体和滑床材料强度衰减由式(1), (2)描述, 材料参数见表1, 其中滑体和滑床的重度 γ 、弹性模量 E 、峰值强度 c_p 和 φ_p 根据曹琰波等^[21]的研究成果确定; 残余强度 c_r 和 φ_r 根据唐家山滑坡(堰塞体)室内物性试验, 进行地质工程经验类比分析确定^[31]; η 根据 Soga 等^[28]的建议确定。滑动面采用 Lucas 等建议的速率衰减模型模拟, 参数 μ_0 , μ_w 和 ν_w 也采用了 Lucas 等^[2]的建议取值: $\mu_0=0.84$, $\mu_w=0.11$, $\nu_w=4.0$ m/s。此外, 在地震作用下唐家山滑坡的破坏过程模拟中还需要输入地震波。本文采用什邡八角镇地面加速度实测数据(如图4所示)作为输入地震波, 地震水平和竖向加速度均施加在有限元网格的下边界处, 如图4所示。

表 1 唐家山滑坡的材料参数

Table 1 Material parameters of Tangjiashan landslide

滑坡	γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	E GPa	ν	c_p/MPa	c_r/MPa	$\varphi_p/^\circ$	$\varphi_r/^\circ$	η
滑体	24.0	2.63	0.2	1.28	0.60	40	28	400
滑床	26.5	12	0.1	2.65	2.65	40	40	0.0

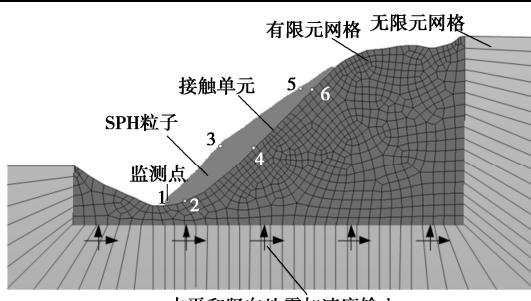


图 4 唐家山数值计算模型

Fig. 4 Numerical model for Tangjiashan landslide

3 模拟结果分析

3.1 静力计算的模拟结果

在重力作用下, 斜坡竖向应力值的范围为 0.09~16 MPa, 水平应力值范围为 0.47~4.3 MPa, 说明重力作用下斜坡处于均匀受压状态, 同时剪应力仅在坡脚出现应力集中, 最大剪应力约为 2 MPa。斜坡竖向应力和水平应力等值线平滑, 从底部到顶部均匀过渡, 并无应力集中或突变的现象, 计算结果符合经典力学的理论解。此外, 进一步采用强度折减法分析了重力作用下边坡的稳定性, 经计算重力作用下坡体的安全系数为 1.61, 边坡处于整体稳定状态。

3.2 地震诱发滑坡的模拟结果

图 5~7 给出了唐家山滑坡的数值模拟结果。图 5 给出了不同时刻的唐家山滑坡的形态及水平位移云图, 图 6 给出了各测点的速度模拟结果, 图 7 给出了滑动面上 3 个观测点的摩擦系数的变化过程。模拟结果显示, 唐家山滑坡运动总的持续时间约为 28~30 s; 滑体的最大水平位移约 332 m, 最大竖向位移约为 266 m, 最大总位移约 370 m; 各测点中最大水平速度约为 24.8 m/s, 最大竖向速度约为 18.7 m/s, 最大合速度约为 27.2 m/s; 滑动面上各观测点出现的最小摩擦系数均大致约为 0.25。

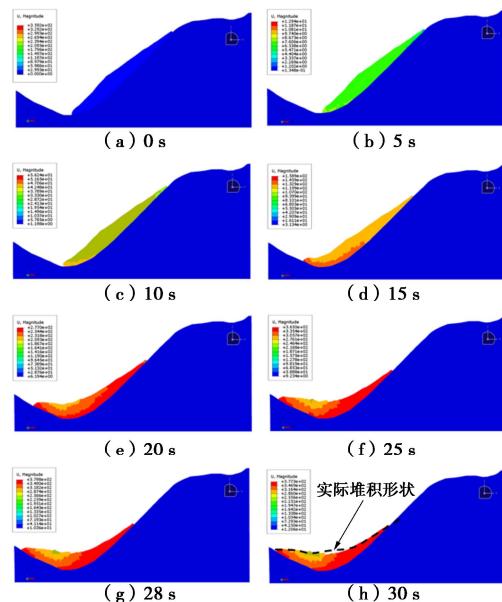
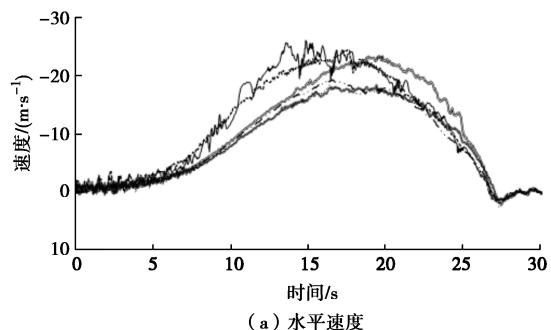


图 5 模拟的不同时刻的滑坡形态和水平位移云图

Fig. 5 Simulated landslide morphology and horizontal displacement at different time



(a) 水平速度

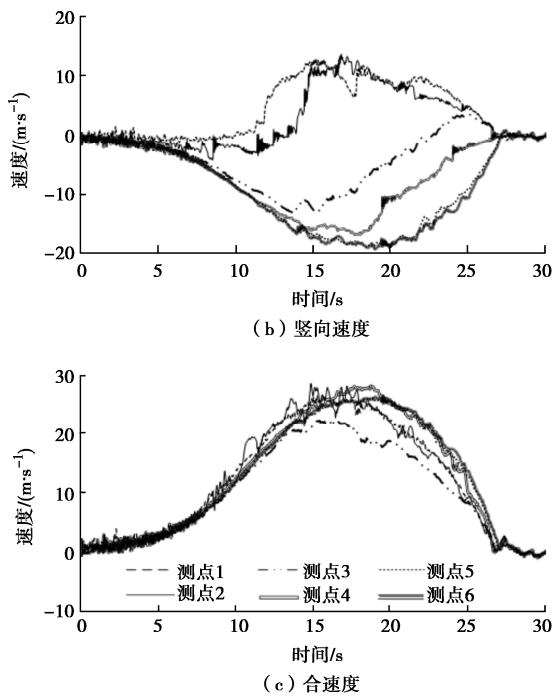


图 6 测点的速度的模拟结果

Fig. 6 Simulated results of velocity at measuring points

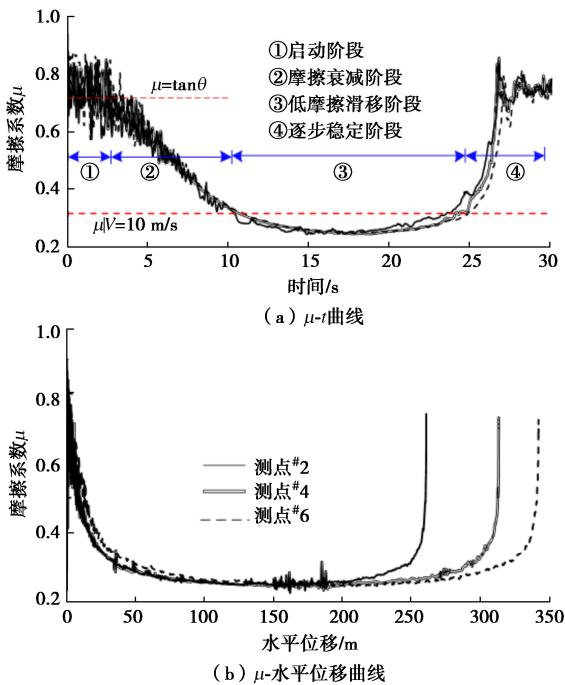


图 7 滑动面摩擦系数的变化曲线

Fig. 7 Curves of frictional coefficient of sliding surface

进一步地, 根据图 7 中模拟的唐家山滑坡的滑动面摩擦强度随着速度的变化过程, 将滑动过程分为 4 个阶段(图 7 (a)): ①启动阶段; ②摩擦衰减阶段; ③低摩擦滑移阶段; ④逐步稳定阶段。分述如下: ①启动阶段: 由于地震的发生, 滑动面上的摩擦系数出现较大波动和逐渐降低的趋势, 滑体开始出现滑动, 该阶段时间较短, 滑体滑动速度较低。该阶段, 滑动

面上的摩擦系数由初始值降低至 $\tan\theta$ (θ 为滑坡面的平均倾角), 此时滑坡的瞬时安全系数为 1, 标志着滑坡的启动。后面将进一步结合数值模拟的结果分析地震作用和摩擦强度衰减对启动的影响机理。②摩擦衰减阶段。滑坡启动后随着滑体滑动速度的增加, 滑动面的摩擦系数发生大幅降低。根据已有基于速度进行滑坡分类的研究成果^[32-33], 将滑坡由启动至滑移速度达到 10 m/s 的过程定义为摩擦衰减阶段, 该阶段中滑移速度逐步增加到极高的水平, 滑动面摩擦强度大幅衰减。如图 6 所示, 在地震发生 9 s 左右, 滑动面上各测点合速度陆续达到 10 m/s。③低摩擦滑移阶段中, 滑动面上的摩擦系数始终保持在较低的值, 滑体保持在超过 10 m/s 的高速滑移的状态, 因此 $\mu < \mu_{V=10 \text{ m/s}}$ 。地震后 10 s 左右, 滑坡前端的水平速度达到 14.6 m/s, 水平位移达到了 40 m 左右; 地震后 15 s 时滑体前缘已运动至对岸, 水平位移达 140 m 左右; 25 s 时, 滑体的三分之一已爬升到对岸山坡上, 前缘水平位移达 317 m。地震发生 14~20 s 之间, 各测点的速度先后达到最大值, 水平最大速度出现在前缘测点#1 和#2, 在 15 s 左右达到 24.5~26.8 m/s; 坚向最大速度出现在尾部测点#5 和#6, 在 19 s 时均达到 18.7 m/s 左右; 最大合速度出现在测点#2 和#4, 达到 27.2 m/s 左右。④逐步稳定阶段中, 地震发生 25 s 时滑坡由于对岸山坡的阻碍, 滑动速度迅速降低至 10 m/s 以下, 滑动面上摩擦系数迅速增大, 并促使速度进一步降低, 摩擦系数逐步增加至初始值。此后, 滑体滑移 15 m 后, 在 28~30 s 左右迅速停止并稳定, 前端最大总位移约 370 m, 部分滑体堆积至对岸山坡坡面。

对比模拟的停止后的滑体边界与滑坡的实际轮廓线(如图 5), 可见计算结果与滑坡实际轮廓线十分吻合^[29], 且模拟得到的滑坡滑移过程的速度及最终堆积形态与已有的离散元模拟结果^[21, 34]以及 DDA 数值模拟结果^[35]均较为吻合。本文的静动力数值模拟结果与现场调研结果^[29-31]也较为一致。此外, 在加速阶段滑动面上 3 个监测点处的摩擦系数从峰值降到较低水平需约 30~40 m 左右的水平滑动距离, 时间约在地震发生 9 s 后, 而从低摩擦恢复到较高水平只需约 15 m 的水平滑动距离, 需要的时间约为 2 s 左右, 中间较长距离均保持低摩擦的运动状态。这种摩擦强度先衰减再恢复, 且衰减需要的距离明显大于恢复需要的距离的现象, 与 Sone 等^[36]的变速试验结果相吻合。唐家山滑坡的模拟结果初步证实了本文所采用的 SPH-FEM 数值模拟方法的有效性以及所采用的滑动面摩擦强度速率衰减模型的合理性。

边界条件的处理一直以来都是 SPH 应用的难点, 目前的方法主要有虚粒子边界条件^[37]、排斥粒子边界条件^[38]、速度无滑移边界条件^[39]、以及动力粒子边界条件^[40]等。李云屹等^[25]通过在计算域外设置边界粒子, 并对边界粒子施加地震位移时程, 实现了瑞利波作用下缓倾场地流滑大变形的 SPH 数值模拟。该方法物理概念清晰, 对于给定位移边界条件的情况计算效果较好, 但是存在时间步长和支撑域半径的取值对计算精度影响显著的问题^[25]。本文通过将 FEM 与 SPH 两种方法耦合, 利用 SPH 实现滑体的大变形发展过程模拟, 利用 FEM 可以方便地模拟水平和竖向地震加速度作用的边界条件, 两者耦合的方法具有较好的适用性。

3.3 滑动面摩擦强度衰减对滑坡启动的影响

图 8 给出了地震发生后滑体上受力的示意图。考虑地震的影响后, 滑动面对滑体产生的动摩擦力 f_d 和作用在滑体上的动下滑力 T_d 分别为

$$f_d = \mu(v)(mg \cos \theta + ma_z \cos \theta - ma_x \sin \theta) \quad (5)$$

$$T_d = mg \sin \theta + ma_z \sin \theta + ma_x \cos \theta \quad (6)$$

式中: m 为滑体的质量; g 为重力加速度为 9.80 N/kg ; a_z 和 a_x 分别为地震产生的竖向和水平加速度; θ 为滑动面的平均倾角。定义动摩擦力 f_d 和动下滑力 T_d 的比值由动态参数 R 定义, 即

$$R = \frac{f_d}{T_d} \quad (7)$$

当 R 值初次小于 1 时, 出现了整个滑体上作用的下滑力大于摩擦力的情况, 笔者认为此时整个滑动面将处于贯通状态, 可以作为判断滑坡开始启动的标志。

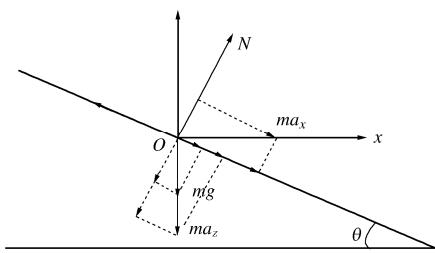


图 8 滑体受力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of force on sliding body

图 9 (a) 给出了地震发生前 5 s 内滑体 6 个测点平均速度和平均摩擦系数间的关系。地震发生初期, 尽管滑体的剪切速率较低, 但是滑动带的平均摩擦强度在波动的同时仍出现逐渐降低的趋势。这与 Yang 等^[3]的高速旋转剪切摩擦试验规律一致, Yang 等发现在恒定的剪切速率下, 速率由 0.0023 m/s 增加至 $0.0124, 0.0436 \text{ m/s}$ 时, 摩擦强度出现了明显的衰减。较低剪切速率下摩擦强度的衰减效应将对滑坡的启动产生显著影响。图 9 (b) 给出了基于该摩擦系数计算

的参数 R 值的变化曲线, 由图 9 (b) 可见在地震第 2 秒末时首次出现了 $R < 1$ 的情况, 可以判别滑坡启动。如果不考虑摩擦强度的速率衰减效应, 即滑动面摩擦系数 μ 始终为 $\mu_0=0.84$, 计算表明在地震发生 10 s 末才可能出现 $R < 1$ 的情况, 这说明了强度的速率衰减效应对大型滑坡启动的影响。

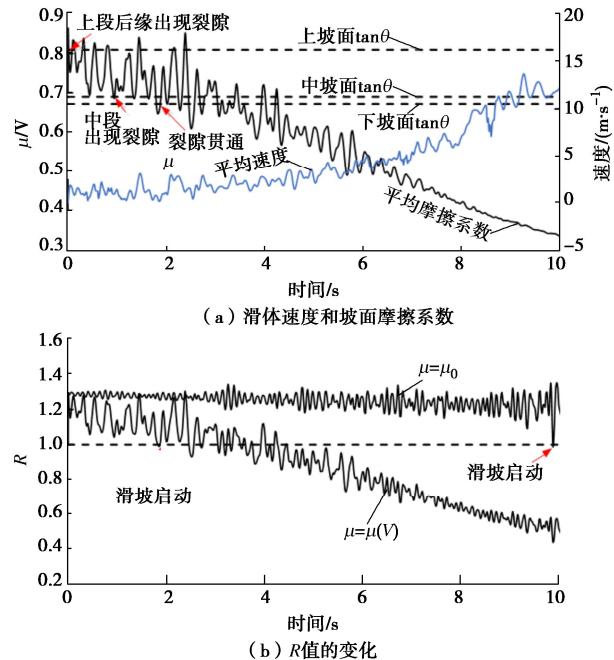


图 9 滑动带摩擦系数变化和滑坡失稳启动

Fig. 9 Variation of friction coefficient of sliding surface and failure of landslide

由于临界位移判别方法在大型滑坡的失稳启动中存在局限性, Yang 等^[20]认为采用 $\tan \theta$ 与摩擦系数间关系判别大型滑坡的启动更为合理, 即当滑动面摩擦系数小于 $\tan \theta$ 时滑坡启动。本文的滑坡的滑动面倾角由上自下逐渐降低, 滑动面的角度略大于滑坡的坡面角。为了简化这里将本滑坡分为上中下 3 段, 假定滑动面倾斜角约等于滑坡坡面倾角, 上中下坡面倾角分别约为 $39.01^\circ, 34.65^\circ, 33.94^\circ$ 。据此分析滑动面上摩擦系数与滑动面倾角间关系。图 9 (a) 对比了滑动面平均摩擦系数与上中下段的 $\tan \theta$ 与摩擦系数间的关系。由图可见滑动面上段在刚发生地震时, 摩擦系数就出现首次小于 $\tan \theta$ 的情况, 说明滑坡上段滑动面后缘裂隙开始产生。上段滑动面最先发生破坏的模拟结果与已有的数值模拟结果是一致的^[21]。在地震发生的 1 s 末, 滑动面中段出现摩擦系数首次小于 $\tan \theta$, 而在地震发生的 2 s 末滑动面下段产生裂隙。地震后滑动面上的裂隙逐渐贯通, 在 2 s 末处于整体贯通状态, 可以判别滑坡失稳启动。由此得到的判别结果与本文所提出的基于 R 的判别结果是一致的。

进一步地分析模拟的临界位移的大小。地震 2 s 末时, 各测点的临界位移在 $1\sim2 \text{ m}$, 远大于 Jibson^[18]

建议的5~10 cm的临界位移值, 模拟结果与Dong等^[19]和Yang等^[20]发现的现象一致。如假设唐家山滑坡模拟中地震荷载在1 s末结束, 由图9(a)可知此刻滑动面下段的摩擦系数仍大于 $\tan\theta$ 。所以尽管此时各测点的位移为0.45~1.0 m, 可能仍无法发生整体滑移破坏。这是Dong等^[19]和Yang等^[20]发现地震后滑坡位移达到1 m仍未发生破坏的一种可能的解释。

4 结 论

本文基于SPH和FEM耦合的数值计算方法, 引入了滑动面摩擦强度的速率衰减模型, 发展了一种能够描述滑坡由初始稳定状态、启动状态到滑移破坏状态全过程的模拟方法。

(1) 开展了唐家山滑坡的数值模拟, 模拟结果与现场勘查结果及室内试验规律较为一致, 初步说明了该数值方法能合理考虑地震等复杂边界条件的影响, 能合理反映滑动面摩擦强度的速率衰减效应对滑体启动和滑移过程的影响, 再现大型滑坡的启动和滑移过程。

(2) 基于模拟的剪切面上摩擦系数的演化过程, 将滑坡过程分为4个阶段: 启动阶段、摩擦衰减阶段、低摩擦滑移阶段和逐步稳定阶段。滑坡在启动和运动过程中, 随着滑移速度的增加, 滑动带上的摩擦系数逐渐降低, 速度增加和摩擦强度衰减的相互促进, 触发了滑体的高速滑移。

(3) 提出采用滑体上作用的动摩擦力 f_d 和动下滑力 T_d 的比值 R 作为判别指标用于判断大型滑坡的启动, 认为首次出现 $R<1$ 时滑动面整体贯通并出现失稳启动。采用 R 的判断结果与采用滑动面摩擦系数(考虑了速率衰减效应)的判别结果一致, 揭示了滑坡启动中滑动面摩擦强度衰减和渐进贯通过程, 揭示了地震作用与滑动面摩擦参数速率衰减效应共同作用触发了大型滑坡的失稳启动的内在机理。

参考文献:

- [1] FRANÇOIS L. The mobility of long-runout landslides[J]. Engineering Geology, 2002, 63(3): 301-331.
- [2] LUCAS A, MANGENEY A, AMPUERO J P. Frictional velocity-weakening in landslides on Earth and on other planetary bodies[J]. Nature Communications, 2014, 5(9): 3417.
- [3] YANG C M, YUA W L, DONG J J, et al. Initiation, movement, and run-out of the giant Tsaoling landslide-What can we learn from a simple rigid block model and a velocity-displacement dependent friction law[J]. Engineering Geology, 2014, 182(1): 158-181.
- [4] 陈果, 钮志林, 樊晓一, 等. 高速远程滑坡沿程速度演化与冲击力分布研究—以三溪村滑坡为例[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 232-241. (CHEN Guo, NIU Zhilin, FAN Xiaoyi, et al. Velocity evolution and impact force distribution of high-velocity and long-runout landslide debris flow along the way: a case study of Sanxi Village landslide[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(3): 232-141. (in Chinese))
- [5] 王鲁男, 晏鄂川, 宋琨, 等. 滑带土残余强度的速率效应对滑坡变形行为的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(12): 3350-3358. (WANG Lunan, YAN Echuan, SONG Kun, et al. Rate effect of residual strength of slip soils and its impact on deformation process of landslides[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3350-3358. (in Chinese))
- [6] WANG F, ZHANG Y, HUO Z, et al. Mechanism for the rapid motion of the Qianjiangping landslide during reactivation by the first impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China[J]. Landslides, 2008, 5(4): 379-386.
- [7] 张卫杰, 余瑞华, 陈宇, 等. 强度指标影响下滑坡运动特征及参数反分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2304-2311. (ZHANG Weijie, YU Ruihua, CHEN Yu, et al. Post-failure movement characteristics and parameter back-analysis for landslides considering effect of strength parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2304-2311.
- [8] SASSA K, FUKUOKA H, WANG G H, et al. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics[J]. Landslides, 2004(1): 7-19.
- [9] 胡明鉴, 汪发武, 程谦恭. 基于高速环剪试验易贡巨型滑坡形成原因试验探索[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1602-1606. (HU Mingjian, WANG Fawu, CHENG Qiangong. Formation of tremendous Yigong landslide based on high-speed shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1602-1606. (in Chinese))
- [10] 崔圣华, 裴向军, 王功辉, 等. 基于环剪试验的汶川地震大型滑坡启动机理探索[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2268-2277. (CUI Shenghua, PEI Xiangjun, WANG Gonghui, et al. Initiation of a large landslide triggered by Wenchuan earthquake based on ring shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2268-2277. (in Chinese))
- [11] IKARI M J, MARONE C, SAFFERA D M. On the relation between fault strength and frictional stability[J]. Geology,

- 2011, **39**(1): 83-86.
- [12] BEELER N M, TULLIS T E, GOLDSBY D L. Constitutive relationships and physical basis of fault strength due to flash heating[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: B01401.
- [13] TOGO T, SHIMAMOTO T, MA S, et al. High-velocity frictional behavior of Longmenshan fault gouge from Hongkou outcrop and its implications for dynamic weakening of fault during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Earthquake Science*, 2011, **24**(3): 267-281.
- [14] 汪发武. 地震诱发的高速远程滑坡过程中土结构破坏和土粒子破碎引起的两种不同的液化机理[J]. *工程地质学报*, 2019, **27**(1): 98-107. (WANG Fawu. Liquefactions caused by structure collapse and grain crushing of soils in rapid and long runout landslides triggered by earthquakes[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, **27**(1): 98-107. (in Chinese))
- [15] SASSA K, DANG K, HE B, et al. A new high-stress undrained ring-shear apparatus and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama megaslide in Japan[J]. *Landslides*, 2014, **11**: 827-842.
- [16] KEEFER D K, WILSON R C. Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments[C]// *Landslides Arid Semi-arid Environ.* Yinchuan, 1989.
- [17] ROMEO R. Seismically induced landslide displacements: a predictive model[J]. *Engineering Geology*, 2000, **58**(3): 337-351.
- [18] JIBSON R W. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes-a retrospective[J]. *Engineering Geology*, 2011, **122**(1): 43-50.
- [19] DONG J J, LEE W R, LIN M L, et al. Effects of seismic anisotropy and geological characteristics on the kinematics of the neighboring Jiufengershan and Hungtsaiping landslides during Chi-Chi earthquake[J]. *Tectonophysics*, 2009, **466**(3/4): 438-457.
- [20] YANG C M, HSU C H, DONG J J. Critical displacement of earthquake-triggered catastrophic landslides[C]// *Advancing Culture of Living with Landslides*. Cham, 2017.
- [21] 曹琰波, 戴福初, 许冲, 等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(增刊 1): 2878-2887. (CAO Yanbo, DAI Fuchu, XU Chong, et al. Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for tangjiashan landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(S1): 2878-2887. (in Chinese))
- [22] 张迎宾, 董琰, 陈岩岩, 等. 基于强度衰减的 Vajont 滑坡运动特征非连续变形分析[J]. *西南交通大学学报*, 2021, **56**(6): 1205-1213. (ZHANG Yingbin, DONG Yan, CHEN Yanyan, et al. Effects of strength degradation of sliding mass on movement of vajont landslide numerical simulation based on discontinuous deformation analysis[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, **56**(6): 1205-1213. (in Chinese))
- [23] ZHANG W J, JI J, GAO Y F. SPH-based analysis of the post-failure flow behavior for soft and hard interbedded earth slope[J]. *Engineering Geology*, 2019, **267**: 105446.
- [24] 黄帅, 刘传正, GODA K. 光滑粒子流体动力学方法在饱和边坡地震滑移大变形中的适用性研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(2): 336-344. (HUANG Shuai, LIU Chuanzheng, GODA K. Applicability of smooth particle hydrodynamics method to large sliding deformation of saturated slopes under earthquake action[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(2): 336-344. (in Chinese))
- [25] 李云屹, 王睿, 张建民. 瑞利波作用下缓倾场地流滑大变形的 SPH 数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(7): 1333-1340. (LI Yunyi, WANG Rui, ZHANG Jianmin. Numerical simulation of Rayleigh wave-induced large lateral spreading deformation in gentle sloping ground using SPH[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(7): 1333-1340. (in Chinese))
- [26] 钟祖良, 贺凯源, 宋宜祥, 等. 基于仿射速度矩阵改进物质点法的大位移滑坡研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, **44**(9): 1626-1634. (ZHONG Zuliang, HE Kaiyuan, SONG Yixiang, et al. Large-displacement landslides based on affine velocity matrix-improved material point method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(9): 1626-1634. (in Chinese))
- [27] ZHAO L H, QIAO N, HUANG D L, et al. Numerical investigation of the failure mechanisms of soil–rock mixture slopes by material point method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, **150**: 104898.
- [28] SOGA K, ALONSO E, YERRO A, et al. Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method[J]. *Géotechnique*, 2016, **66**(3): 1-26.
- [29] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(1):

- 181-189. (HU Xiewen, HUANG Runqiu, SHI Yubing, et al. Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 181-189. (in Chinese))
- [30] 李守定, 李 晓, 张 军, 等. 唐家山滑坡成因机制与堰塞坝整体稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2908-2915. (LI Shouding, LI Xiao, ZHANG Jun, et al. Study of geological origin mechanism of Tangjiashan landslide and entire stability of landslide dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2908-2915. (in Chinese))
- [31] 罗 刚. 唐家山高速短程滑坡堵江及溃坝机制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (LUO Gang. Analysis of Blocking Mechanism of Tangjiashan High-Speed Short-Run Landslide and Dam-Breaking Mode of Tangjiashan Barrier Dam[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [32] International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1995, 52(1): 75-78.
- [33] 李 坤, 程谦恭, 林棋文, 等. 高速远程滑坡颗粒流研究进展[J]. 地球科学, 2022, 47(3): 893-912. (LI Kun, CHENG Qiangong, LIN Qiwen, et al. State of the art on rock avalanche dynamics from granular flow mechanics[J]. Earth Science, 2022, 47(3): 893-912. (in Chinese))
- [34] 董金玉, 赵志强, 郑珠光, 等. 大型地震滑坡高速滑动堵江机制的离散元数值模拟[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 47-50. (DONG Jinyu, ZHAO Zhiqiang, ZHENG Zhuguang, et al. Discrete element numerical simulation of the mechanism of the large-scale earthquake high-speed landslide's blocking the river[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2015, 36(6): 47-50. (in Chinese))
- [35] 邬爱清, 林绍忠, 马贵生, 等. 唐家山堰塞坝形成机制 DDA 模拟研究[J]. 人民长江, 2008, 39(22): 91-95. (WU Aiqing, LIN Shaozhong, MA Guisheng, et al. DDA simulation research for formation mechanism of Tangjiashan barrier lake[J]. Yangtze River, 2008, 39(22): 91-95. (in Chinese))
- [36] SONE H, SHIMAMOTO T. Frictional resistance of faults during accelerating and decelerating earthquake slip[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(10): 705-708.
- [37] LIBERSKY L D, PETSCHEK A G, CARNEY T C, et al. High strain Lagrangian hydrodynamics[J]. Journal of Computational Physics, 1993, 109(1): 67-75.
- [38] MORRIS J P, FOX P J, ZHU Y. Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH[J]. Journal of Computational Physics, 1997, 136(1): 214-226.
- [39] DOMNIK B, PUDASAINI S P, KATZENBACH R, et al. Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2013, 201: 56-68.
- [40] CRESPO A J C, GOMEZ G M, DALRYMPLE R A. Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods[J]. Computers Materials and Continua, 2007, 5(3): 173-184.