

DOI: 10.11779/CJGE20220489

瑞利波作用下缓倾场地流滑大变形的 SPH 数值模拟

李云屹, 王 睿*, 张建民

(清华大学水利水电工程系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 地震可能导致土体弱化甚至液化, 从而在倾斜场地引起流滑变形, 一般认为在缓倾场地中这种变形相对有限。然而, 在 2018 年苏拉威西地震中, 3° 以内的缓倾场地却出现了数百米的大变形。已有的模型试验与数值计算大多只考虑了剪切波的作用, 无法再现和解释这一现象。通过光滑粒子流体动力学法 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 开展数值模拟, 发现瑞利波对流滑大变形有显著影响。模拟使用 HBP (Herschel Bulkley Papanastasiou) 流变学模型模拟地基土, 使用动力粒子边界 (Dynamic Boundary Particles, DBP) 实现瑞利波的非一致输入, 结合地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 进行三维建模, 计算并对比分析了瑞利波和剪切波输入下 Balaroa 缓倾场地的变形特征, 解释了 2018 年苏拉威西地震 Balaroa 滑坡的成因。

关键词: 瑞利波; 光滑粒子流体动力学法; 流滑; 大变形; 数值模拟

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)07-1333-08

作者简介: 李云屹(1994—), 男, 助理研究员, 主要从事土动力学与地下结构抗震等方面的科研工作。E-mail: liyunyi@mail.tsinghua.edu.cn。

Numerical simulation of Rayleigh wave-induced large lateral spreading deformation in gentle sloping ground using SPH

LI Yunyi, WANG Rui, ZHANG Jianmin

(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The sloping ground may suffer from lateral spreading due to earthquake-induced soil softening or liquefaction, and this deformation is usually relatively limited in the gentle sloping ground. However, several hundred meters of lateral deformation were observed in gentle sloping ground within 3° during the 2018 Sulawesi Earthquake. This phenomenon can not be explained through the observations from the existing model tests and numerical computations, where only the shear wave ground motion is considered. The numerical simulations using the smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method are conducted to show that Rayleigh wave input plays an important role in lateral spreading in the gentle sloping ground. The ground soil is simulated through the Herschel Bulkley Papanastasiou (HBP) rheology constitutive model, the Rayleigh wave is input using the dynamic boundary particles (DBP) boundary condition, and the geographic information system (GIS) is utilized for 3D spatial modeling. The deformation characteristics of the gentle sloping ground under the Rayleigh wave and shear wave are computed and compared, revealing the cause of the observed large deformation of Balaroa landslide in 2018 Sulawesi Earthquake.

Key words: Rayleigh wave; SPH method; lateral spreading; large deformation; numerical simulation

0 引言

地震是地壳在受力破裂后快速释放能量的过程中产生振动并传播地震波的一种自然现象, 是常见的自然灾害之一。由于迄今为止在技术层面仍然难以准确地预测地震, 为了降低地震造成的损失, 评价地震可能诱发的灾害形式并进行合理的抗震设计是当前最为有效的应对方法。地震发生时, 震源处释放的能量往往以地震波的形式传至地壳表面, 大量震害调查结果表明, 剪切波和以瑞利波 (Rayleigh wave) 为代表的

面波更具破坏性, 其传播形式如图 1 所示。在一些特定的地质条件下, 地震波引起的岩土体剧烈运动会产生流滑大变形, 一般认为, 在坡度小于 3° 的缓倾地基中这类变形相对有限。然而, 在 2018 年苏拉威西地震中, 坡度仅有 $1^\circ \sim 3^\circ$ 的缓倾场地却出现了数百米

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目和面上项目 (52022046, 52038005); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目 (2021-KY-04)

收稿日期: 2022-04-22

*通信作者 (E-mail: wangrui_05@mail.tsinghua.edu.cn)

的流滑变形^[1-2]。大量振动台离心模型试验证明^[3]，此时仅输入剪切波不足以产生如此规模的变形，Li 等^[4]发现瑞利波可能在缓倾场地的侧向变形中起重要作用，在抗震设计中有必要考虑瑞利波等面波的影响。

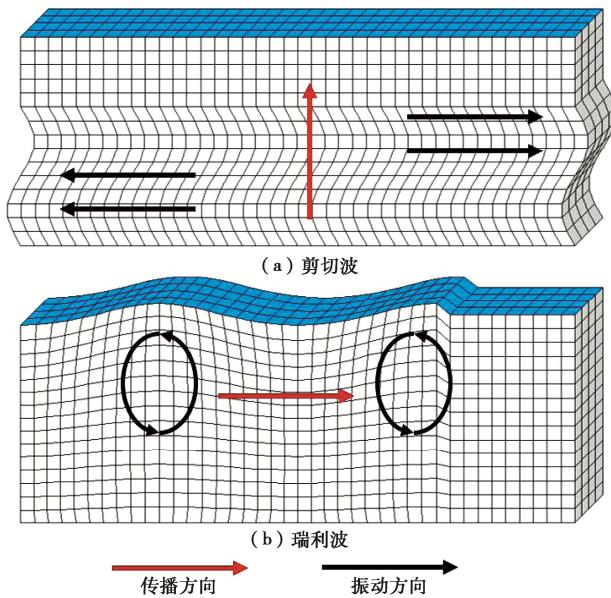


图 1 剪切波和瑞利波的传播形式

Fig. 1 Propagation styles of shear wave and Rayleigh wave

当涉及大变形问题时，传统的有限元方法中网格往往会产生扭曲和畸变，并导致刚度矩阵和质量矩阵变得接近奇异。此时动力计算的时间步长必须降低到相当小的程度，线性方程组的解也较不稳定，不论是计算精度还是效率都难以接受。为了解决上述网格畸变问题，许多学者尝试了不同的改进方法来处理岩土工程中的大变形问题，比如光滑粒子流体动力学法 (SPH)、粒子有限元法 (PFEM)^[5]、物质点法 (MPM)^[6]、无网格伽辽金法 (EFG)^[7]等。其中，SPH 避免了繁琐的数值积分，且可以较好地反映自由表面的运动情况，因而非常适合处理流滑大变形问题。

SPH 最早于 1977 年由 Gingold 等^[8]和 Lucy^[9]分别独立提出，是应用最早的无网格数值方法之一，广泛应用于天体物理学、流体动力学、冲击动力学、岩土工程等领域。Maeda 等^[10]最早使用 SPH 研究了岩土体的大变形问题，但没有考虑塑性变形，仍存在诸多局限性。Bui 等^[11]采用了 Drucker-Prager 理想弹塑性模型，充分讨论了使用 SPH 模拟岩土体的塑性变形时所遇到的各类问题。在此基础上，国内外许多学者都使用 SPH 研究了岩土工程中的各类大变形问题^[12-18]。受计算能力的制约，早期的 SPH 程序一般只能处理数千个粒子，难以准确模拟实际震害现象。但随着 GPU 加速和并行计算技术的发展，现如今 SPH 已经可以求

解千万级自由度的数值模型^[16-18]，足以解决常见的岩土体大变形问题。

综上所述，为了研究瑞利波对缓倾场地流滑大变形的影响，本文使用 SPH 进行了数值模拟。首先介绍了 SPH 大规模计算平台的构建方法，随后通过二维平面应变模型与基于 2018 年苏拉威西地震 Balaroa 滑坡构建的三维模型，计算了瑞利波与剪切波输入下缓倾场地的变形特征，对比分析了瑞利波与剪切波对此类变形的影响，揭示了瑞利波在缓倾场地流滑大变形中所起的重要作用。

1 SPH 数值分析方法

1.1 控制方程

在连续介质动力计算中，控制方程为如下连续性方程和平衡方程：

$$A[\mathbf{u}(\mathbf{x})] = \dot{\rho} + \nabla \cdot (\rho \dot{\mathbf{u}}) = 0, \quad (1)$$

$$B[\mathbf{u}(\mathbf{x})] = \rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}. \quad (2)$$

式中： \mathbf{u} 为位移矢量； \mathbf{x} 为位置矢量； $\boldsymbol{\sigma}$ 为总应力张量； \mathbf{g} 为重力加速度矢量； \mathbf{f} 为体力矢量。对于大部分较复杂的动力计算问题，直接求解上述偏微分方程组的解析解是非常困难的。此时可以使用紧支试函数加权残量法将该方程组转换为弱形式，从而使用数值计算方法求解计算域 Ω 内 $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ 的近似解 $\mathbf{u}^h(\mathbf{x})$ ，即

$$\int_{\Omega} \mathbf{W}_k(\mathbf{x}) \mathbf{A}[\mathbf{u}^h(\mathbf{x})] d\Omega = 0 \quad (k=1,2,\dots,r), \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} \mathbf{W}_k(\mathbf{x}) \mathbf{B}[\mathbf{u}^h(\mathbf{x})] d\Omega = 0 \quad (k=1,2,\dots,r). \quad (4)$$

式中的近似解 $\mathbf{u}^h(\mathbf{x})$ 通常可以表示为一组基函数的线性组合：

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \mathbf{N}_i(\mathbf{x}) \mathbf{u}_i. \quad (5)$$

式 (3) 中 $\mathbf{W}_k(\mathbf{x})$ 称为权函数，式 (5) 中 $\mathbf{N}_i(\mathbf{x})$ 称为试函数， \mathbf{u}_i 为离散点处的位移矢量。通过选取不同的权函数、试函数以及数值积分方法，可以得到不同的无网格数值计算方法。当权函数采用配点法、试函数采用核近似、积分方法采用梯形公式时，得到的数值方法即为广义的 SPH，此时特定节点 \mathbf{x}_I 处的物理量 \mathbf{u}_I 可以表示为

$$\mathbf{u}_I \approx \mathbf{u}_I^h = \sum_{j=1}^N w_{IJ} \frac{m_j}{\rho_j} \mathbf{u}_j. \quad (6)$$

式中： $w_{IJ} = w(\mathbf{x}_I, \mathbf{x}_j, h)$ 为核函数； $r = \|\mathbf{x}_I - \mathbf{x}_j\|$ 为点 \mathbf{x}_I 与 \mathbf{x}_j 之间的距离； h 为选定的支撑域半径。本文选用如下形式的四次样条函数作为核函数：

$$w(r, h) = \frac{21\pi h^3}{16} \left(1 - \frac{r}{2h}\right)^4 \left(\frac{2r}{h} + 1\right) \quad (0 \leq r \leq 2h). \quad (7)$$

将式(6)代入式(1)~(4), 即可得到控制方程的 SPH 近似形式:

$$\dot{\rho}_I = \sum_{J=1}^N m_J (\dot{\mathbf{u}}_I - \dot{\mathbf{u}}_J) \cdot \frac{\partial w_{IJ}}{\partial \mathbf{x}_I} , \quad (8)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_I = \sum_{J=1}^N m_J \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_I}{\rho_I^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_J}{\rho_J^2} \right) \cdot \frac{\partial w_{IJ}}{\partial \mathbf{x}_I} + \mathbf{R}_{IJ} + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho_I} \mathbf{f} . \quad (9)$$

式中, \mathbf{R}_{IJ} 为提高数值稳定性所施加的人工黏滞阻力, 本文使用如下形式的层流黏性力:

$$\mathbf{R}_{IJ} = \sum_{J=1}^N \frac{4m_J v_0}{(\rho_I + \rho_J)(\|\mathbf{u}_I - \mathbf{u}_J\|^2 + 0.01h^2)} \cdot \left((\mathbf{u}_I - \mathbf{u}_J) \cdot \frac{\partial w_{IJ}}{\partial \mathbf{x}_I} \right) (\dot{\mathbf{u}}_I - \dot{\mathbf{u}}_J) . \quad (10)$$

式中, v_0 为运动黏度, 取固定值 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

1.2 本构模型

从物理状态而言, 发生流滑变形的土体可视为介于固态和液态之间, 因此简化地使用流变学模型进行数值模拟通常能够较为全面地反映其物理性质。由于土体发生流滑变形时密度可能会发生较大的变化, 本文采用弱压缩性流体的状态方程来描述平均应力 p (以压缩为正) 与质量密度 ρ 之间的关系, 表达式为

$$p = \frac{c_0^2 \rho_0}{\beta} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\beta - 1 \right] . \quad (11)$$

式中: ρ_0 为参考状态的密度, c_0 为 $\rho = \rho_0$ 时的胀缩波波速; β 为常数。对于弱压缩性流体, 建议取 $\beta = 0.7$ 。偏应力张量 \mathbf{s} 与偏应变张量 \mathbf{e} 间的关系选用 Herschel-Bulkley-Papanastasiou 流变学模型(简记为 HBP 模型)进行描述^[19], 即

$$\mathbf{s} = 2\mu_{\text{eff}} \mathbf{e}, \mu_{\text{eff}} = (2\dot{\gamma})^{n-1} \mu + \frac{\tau_0}{2\dot{\gamma}} [1 - \exp(-2m\dot{\gamma})] . \quad (12)$$

式中: $\dot{\gamma} = \partial'(\sqrt{3/2\mathbf{e}:\mathbf{e}})$ 为广义剪应变率; τ_0 为初始屈服应力; μ 为运动黏度; m 和 n 为材料参数, 对本构关系的影响如图 2 所示。可以发现, 当 m 较大时(比如取 $m=100$)可以认为 τ_0 为土体静止状态下的屈服应力, 当 $n=1$ 时, 材料为典型的 Bingham 流体。Han 等^[17]证明了这套本构模型可以较为准确地反映饱和土弱化后的运动特征, 并且数值稳定性很好。

1.3 边界条件

边界条件的处理方法以及边界附近粒子的计算精度问题一直以来都是 SPH 的应用难点, 常用的方法有虚粒子边界条件^[20]、排斥粒子边界条件^[21]、速度无滑移边界条件^[22]、动力粒子边界条件^[23]等。

动力粒子边界条件(Dynamic Boundary Particle Conditions, DBP)即在计算域外再添加若干粒子来反映外边界, 这类粒子可称为“边界粒子”。在求解内部

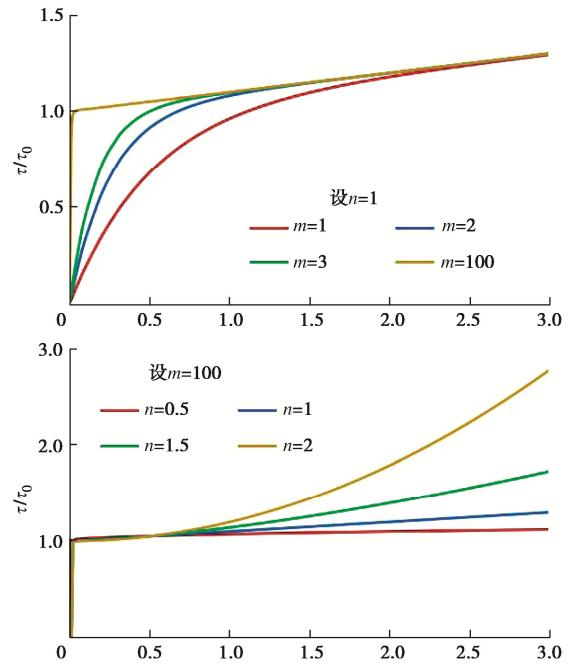


图 2 参数 m 与 n 对本构关系的影响

Fig. 2 Influences of parameters m and n on constitutive relation
粒子的运动方程时, 边界粒子就像其他常规粒子一样参与计算, 但其本身的运动状态是由边界条件给定的。与此同时, 边界粒子提供的应力 p 对密度 ρ 的变化非常敏感, 从而提供较大的斥力, 来避免内部粒子穿过边界粒子层。本文只需要在边界上输入地震波的位移时程, 因此选用动力粒子边界条件。

DBP 边界条件物理概念清晰, 程序设计简单, 对于给定位移的边界条件可以得到较好的处理效果, 但在使用时需要注意以下两个问题: ①时间步长 Δt 不能取得太大, 否则内部粒子在一个时步内运动距离较远, 可能会穿过边界粒子层; ②支撑域半径 h 不能取得太大, 边界附近的内部粒子的核函数支撑域不能越过边界粒子层, 否则支撑域两侧不同粒子的权重差异较大, 会严重影响计算精度。

1.4 大规模计算平台

使用 SPH 求解偏微分方程时, 支撑域内粒子的数量对计算结果的影响很大, 而且为了确保边界附近的计算精度, 支撑域半径 h 也不能取的太大。因此, 构建 SPH 模型时粒子的间距不能取得太大, Peng 等^[18]证明了在模拟地基变形时粒子间距应小于 2 m, 否则可能会出现较大的误差。因此, 在使用 SPH 模拟实际工程中的大规模地基变形时, 往往需要构建上千万级自由度的数值模型, 需要搭建大规模计算平台。

本文使用 GPU 加速以及并行计算的技术来处理此类大规模计算问题。与 CPU 相比, 虽然 GPU 不适合处理复杂的计算任务, 但数据的吞吐量要大很多, 特别适合处理大规模且反复运行的简单数学运算, 与

SPH 的特征不谋而合。Crespo 等^[13]证明了在 SPH 模型计算中, GPU 加速技术可以有效地提高计算效率, 最多可以提升 70 余倍, 并且非常适合并行计算。

本文使用 DualSPHysics 开源平台^[13]进行动力计算, 该平台集成了 HBP 本构模型和 DBP 边界条件, 且支持 GPU 并行计算。并行计算则通过北京超级云计算中心提供的 GPU 并行服务实现, 最多可同时调用 8 块计算显卡, 共计 32 GB 显存, 可以在 24 h 内完成本文涉及的千万级自由度 SPH 动力计算。

2 瑞利波对流滑大变形的影响

2.1 模型构建

为了研究瑞利波对地基流滑大变形的影响, 本节构建了如图 3 所示的水平与缓倾地基的平面应变模型, 并使用 DualSPHysics 软件进行动力计算, 对比剪切波与瑞利波输入下地基的变形特征。在二维模型中, 上层覆盖着 10 m 厚的软弱土层, 下层为较坚硬的土层, 水平方向宽 100 m, 倾斜场地的倾斜角为 2°。

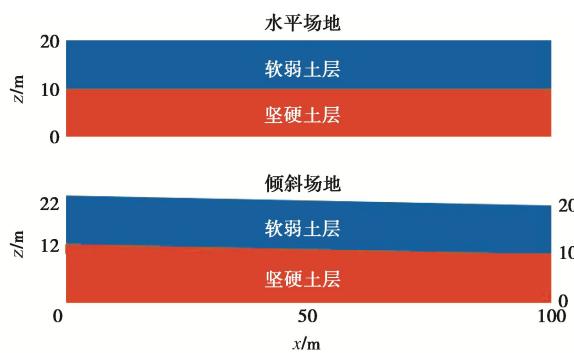


图 3 理想双层地基的平面应变 SPH 模型

Fig. 3 Idealized two-layer plane strain SPH ground model

平面应变模型中粒子初始间隔 $d = 0.1$ m, 支撑域半径 $h = 0.173$ m; 状态方程中的参考状态密度 $\rho_0 = 1.0$ g/cm³, 胀缩波波速 $c_0 = 1500$ m/s, 参数 $\beta = 0.7$; 依照 Han 等^[17]根据泥浆的水槽试验给出的建议值, 两种土本构参数取值如表 1 所示。

表 1 软弱土层与坚硬土层的本构参数

Table 1 Constitutive parameters of weak and stiff soil

本构参数	质量密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	初始屈服应力/ τ_0/kPa	运动黏度 $v_0/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	参数 $m/(m \cdot s^{-1})$	参数 n
软弱土层	2.0	1.1	0.001	100	1.0
坚硬土层	2.0	10.0	0.001	100	1.0

模型的左侧边界(即 $x = 0$ m)上输入瑞利波, 底部边界(即 $z = 0$ m)上输入剪切波, 位移时程如图 4 所示。其中, 剪切波沿 x 方向是均匀分布的, 瑞利波沿 z 方向是非均匀分布的, 在 $z = 0$ m 处位移保持为 0, 其余深度处则如图 4 所示, 且两种波的平均能量密度

相等。根据瑞利波的解析解, 地面附近瑞利波竖直方向的运动产生的影响相对较小^[4], 简化起见, 只输入了水平方向的运动分量。此外, 在实际地震中, 瑞利波和剪切波往往是同时存在的, 因此本节还考虑了同时输入瑞利波和剪切波的工况(记为“复合波”)。

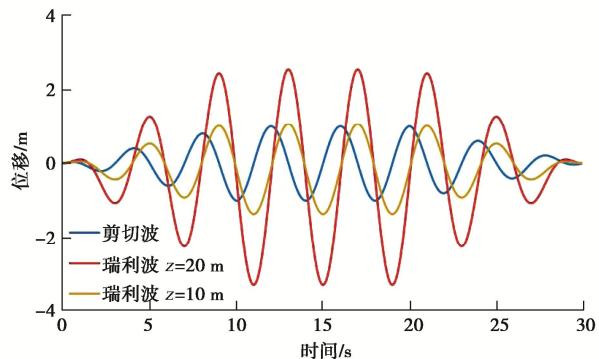
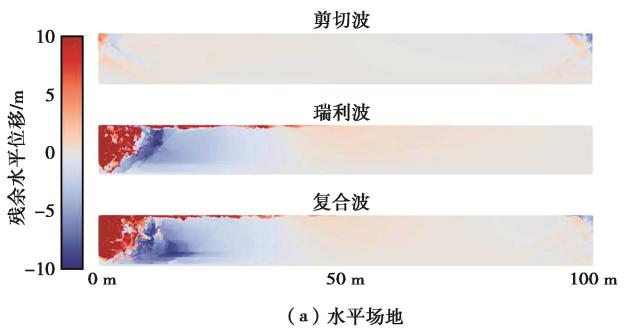


图 4 平面应变模型中输入的位移时程

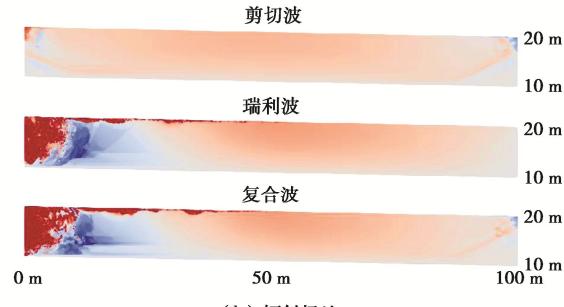
Fig. 4 Time histories of input displacement of plane strain model

2.2 计算结果

不同地震波输入下水平与倾斜场地中软弱土层的水平残余位移分布情况如图 5 所示, 可以发现, 虽然各种输入工况下倾斜场地整体会比水平场地多出约 2 m 的水平残余位移, 但总体的分布规律是类似的。剪切波输入下两种模型的整体变形幅度都较小, 且对于水平场地残余位移基本对称, 最大正向位移为 8.2 m, 最大负向位移为 -9.4 m, 分别发生在场地左侧地表与右侧地表; 而对于倾斜场地, 最大正向与负向位移分别为 8.6, -8.0 m, 相差不大。



(a) 水平场地



(b) 倾斜场地

图 5 不同地震波输入下平面应变场地的水平残余位移云图

Fig. 5 Nephogram of residual horizontal displacement of plane strain ground under different seismic wave inputs

瑞利波和复合波输入下水平场地变形状态都是非对称的, 变形集中在左侧, 最大正向位移分别为 49.1, 53.2 m; 倾斜场地中最大正向位移则分别为 60.0, 59.0 m, 变形规律与水平场地基本一致, 且变形都集中在地震动输入侧 20 m 范围内, 说明地震波在 HBP 黏塑性流体中衰减得较快, 直接影响范围有限。

综上所述, 在使用 HBP 流变学模型和 DBP 边界条件的 SPH 数值模型中, 不论是水平场地还是缓倾角的倾斜场地, 仅输入剪切波时都不足以产生足够大的永久变形, 而输入瑞利波后场地中则会出现较大的侧向变形, 说明抗震分析中有必要考虑瑞利波的影响。

3 Balaroa 滑坡数值分析

3.1 工程背景

2018 年苏拉威西地震诱发的流滑大变形是近年来岩土地震工程领域的研究与讨论热点, 尤其是 Jono Oge、Sibalaya、Petobo 和 Balaroa 四处滑坡, 发生滑动处地面坡度仅有 $1^\circ \sim 3^\circ$, 但滑动的最大位移却达到了数百米甚至上千米。其中, Balaroa 滑坡由于发生在帕鲁市的居民区, 造成人员伤亡和经济损失远比其余 3 处更大。许多学者对该滑坡的成因给出了不同的解释: 部分学者认为, 当地的饱和砂土地基在剪切波作用下发生了液化, 并在重力作用下发生了流滑大变形^[1-2], 但大量振动台离心模型试验证明^[3], 仅输入剪切波时, 产生的剪应变不足 0.15; 也有许多学者认为, 当地运河、灌溉渠以及地下水的影响加剧了流滑的发展^[25-27], 但 Balaroa 滑坡并不受上述因素影响^[28]。

Balaroa 地区地震前后的卫星图像如图 6 所示, 其中黄色多边形表示流滑变形较大的区域, 根据当地的地质勘探结果^[2], 主要为 1~7 m 厚的可液化饱和粉细砂, 本构参数按表 1 的软弱土层取值, 其余地表土则为不易弱化或液化的粉质黏土, 本构参数按表 1 的坚硬土层取值。Li 等^[4]曾使用有限元法定性揭示了面波在该滑坡中所起的重要作用, 但受制于变形规模, 并不能完全再现流滑大变形现象。因此, 本节以 Balaroa 滑坡为研究对象, 使用 SPH, 通过对当地在不同地震波输入下的变形现象, 来解释流滑大变形的成因。

3.2 基于 GIS 的建模方法

基于以上卫星图像和物探结果, 可以结合地理信息系统 (GIS) 构建三维 SPH 数值计算模型, 具体操作流程如下:

(1) 根据地理空间数据云 Aster GDEM 高程数据库绘制地表面, 参照卫星图像确定软弱土与坚硬土的水平分布范围, 并根据当地物探结果确定两种土的竖直分布范围, 通过三次样条曲线插值的方法确定分界

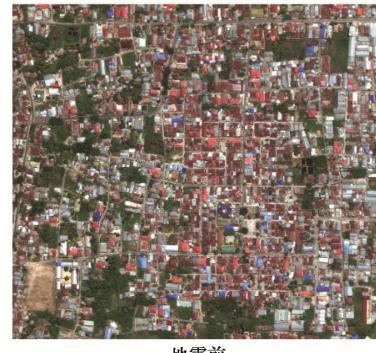


图 6 Balaroa 滑坡的卫星图像

Fig. 6 Satellite images of Balaroa landslide

面的形状, 并使用 ArcGIS 软件构建三维几何模型, 地基土的本构参数取值参照第 2 节表 1。

(2) 使用 DualSPHysics 软件读取上述几何模型, 将该模型离散化为约 1400 万个流体粒子, 并添加约 200 万个边界粒子, 从而构建如图 7 所示的 SPH 模型。该模型在北京超级云计算中心平台上使用 GPU 加速以及并行计算技术进行动力学分析。

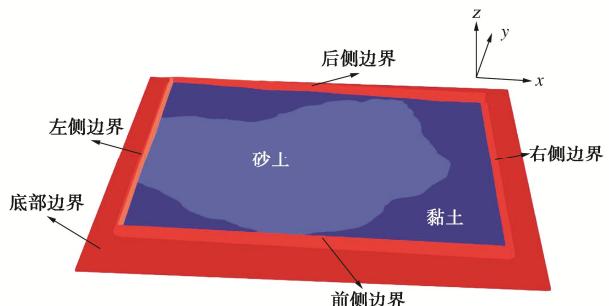


图 7 Balaroa 滑坡的 SPH 模型

Fig. 7 SPH model for Balaroa landslide

(3) 根据印度尼西亚气象气候和地球物理局 (BMKG) 及日本国际协力机构 (JICA) 实测得到的帕卢市当地实测地震波加速度时程^[28], 使用消除多项式趋势法进行基线修正^[24], 并根据弹性柱面波的能量密度解析解分解体波和面波^[4], 从而得到如图 8 所示的边界粒子的位移时程。根据第 2 节的计算结果, 地震波在 HBP 黏塑性流体中衰减得较快, 可以忽略地震波散射的影响, 因此, 可在模型的左侧边界和底部边界上分别输入对应于图 8 中瑞利波和剪切波的给定位移时程, 无需施加用以处理散射波的人工边界。根据

当地目击者的观察,流滑在地震中持续了约 1 min^[2],因此,在 20 s 的动力计算结束后继续计算 40 s,使变形能够充分发展。

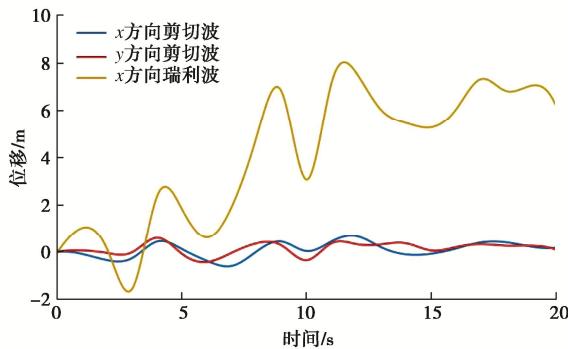


图 8 三维模型中输入的位移时程

Fig. 8 Time histories of input displacement of 3D model

3.3 计算结果分析

不同地震波输入下三维 SPH 模型计算得到的残余水平位移云图如图 9 所示。可以发现,剪切波几乎不会引起明显的变形,绝大部分区域的残余位移均在 10 m 以下,说明单纯输入剪切波不会对场地变形产生明显的影响,与平面应变模型得到的结论基本一致。

与剪切波相比,瑞利波作用下土体产生了较为明显的侧向变形,最大位移达到近 100 m,但永久位移大于 50 m 的区域(即图 9 中的红色与黄色区域)比较窄,沿 y 方向的宽度仅在 50~100 m 左右,与图 6 的卫星图像中观察到的滑动范围不完全吻合。

同时输入两种波时,虽然最大位移仍然在 100 m 左右,与瑞利波输入的工况接近,但发生较大规模永久变形的范围扩大了不少。复合波输入下,永久位移大于 50 m 的区域沿 y 方向的宽度最大可以达到 300 m 以上,且该区域的轮廓与卫星图像中滑裂面的形状和位置都比较接近,主要分布在滑坡的西北侧。当然,虽然复合波输入下该 SPH 模型出现了近百米的水平

位移,但 Balaroa 滑坡实际观测到的最大位移约有 300 m^[2],说明瑞利波只是诱发该缓倾场地发生流滑大变形的成因之一,当地的水文地质条件以及工农业活动也对流滑破坏有重要影响。

为了更清晰地反映不同地震波输入下 Balaroa 滑动的破坏形式,在 $y = 325$ m 处(见图 6)沿铅直方向截取了一个截面,并绘制了静力变形以及不同输入工况下的动力残余变形形态与位移云图,如图 10 所示。

可以发现,剪切波输入下几乎不会产生残余变形,而在瑞利波和复合波输入下,都会产生最大近百米的残余水平位移。但纯瑞利波输入下当 $x > 180$ m 后,残余位移就衰减至不足 50 m;而复合波输入下直到 $x > 500$ m 时,残余位移才下降至 50 m 以下,说明此时面波的影响范围远大于纯瑞利波输入的工况。瑞利波和复合波输入下残余变形在 $x < 100$ m 时是逐渐增大的,这是因为 $x < 50$ m 时地面几乎水平,随后坡度逐渐变陡,变形才会逐渐增加;之后随着面波影响的衰减,变形又会逐渐减小。

除了位移云图外,根据震后截面的形态也可以得到一些有用的结论。剪切波作用下倾斜角沿 x 方向的分布比较均匀,保持在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 左右。在瑞利波输入下,截面的坡度会变得不再均匀,而在复合波输入下,变形后的截面呈现出明显的三段:当 $x < 150$ m 时发生非均匀滑动,坡度较陡;当 $150 \text{ m} \leq x < 630$ m 时发生整体流动,坡度平缓且比较均匀;当 $630 \text{ m} \leq x < 830$ m 时,滑下的土堆积在滑动体底部,使地面抬高了 6~8 m,坡度较陡,也是建筑物碰撞与破坏的主要区域。上述模拟结果与现场调查比较一致^[2]。

综上所述,三维 SPH 模型的计算结果表明,对于缓倾场地,仅输入剪切波并不会产生明显的变形;瑞利波输入下则会在局部产生较大的变形,但影响范围有限;如果同时输入剪切波和瑞利波,不但产生的变

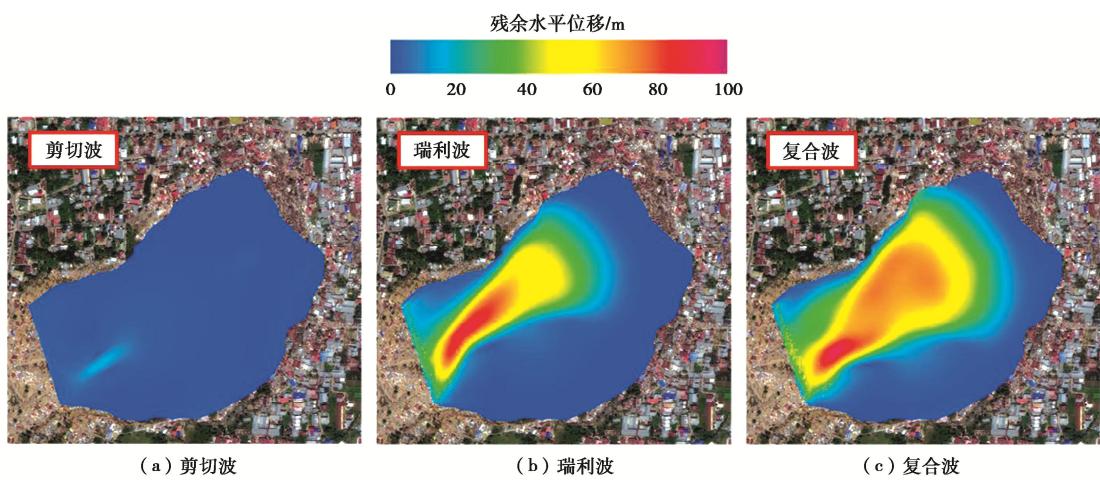


图 9 不同地震波输入下 Balaroa 滑坡的残余水平位移云图

Fig. 9 Nephogram of residual horizontal displacement of Balaroa landslide under different seismic wave inputs

形会更大, 影响范围也要宽得多, 远远不是剪切波和瑞利波输入下计算结果的直接叠加。

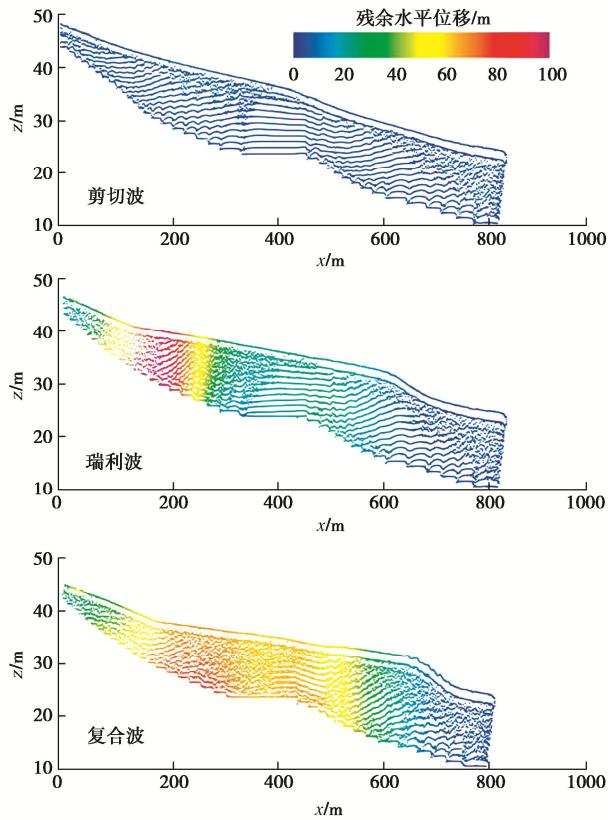


图 10 不同地震波输入下代表性截面的残余水平位移云图

Fig. 10 Nephogram of residual horizontal displacement of chosen profile under different seismic wave inputs

4 结 论

为了研究瑞利波对缓倾场地流滑大变形的影响, 并解释 2018 年苏拉威西地震 Balaroa 滑坡的成因, 本文使用 SPH 构建了二维与三维数值计算模型, 通过 DualSPHysics 开源平台对比分析了剪切波与瑞利波作用下残余变形的特征, 得到以下 3 点结论。

(1) SPH 可以有效地模拟实际工程中的软弱地基大变形问题: 在建模时通过 GIS 技术可以便捷地构建真实场地的三维模型, 在计算中通过 GPU 加速技术和并行计算技术可以高效地处理大规模场地动力计算问题, 在边界上使用 DBP 可以实现瑞利波的非一致输入, 在内部使用 HBP 流变学模型可以模拟地基土弱化后的应力应变关系。

(2) 对于简化的二维平面应变模型, 不论是水平场地还是缓倾场地, 剪切波输入下变形都比较小, 而瑞利波输入下则会出现数十米的残余变形。

(3) 对于模拟 Balaroa 滑坡的三维缓倾场地模型, 剪切波输入下不会发生明显的变形, 瑞利波输入下场地顶部附近会发生近百米的大变形, 但范围较小。而

当同时输入剪切波与瑞利波时, 发生流滑大变形的范围较大, 与实际震害现象比较吻合, 证明了瑞利波等面波在边坡变形中可能发挥重要作用, 在抗震分析中有必要考虑这类面波的影响。

当然, HBP 流变学模型并不足以完整地描述饱和砂土地基液化前后的动力学行为, 还需采用精度更高的本构模型与数值计算方法展开进一步的研究。本文主要针对 Balaroa 滑坡进行计算分析, 由于瑞利波兼具行波效应和沿竖向分布不均匀的特征, 为了进一步推广本文的研究结论, 还需讨论可液化地基的场地规模对于变形特征的影响。

参考文献:

- [1] SASSA S, TAKAGAWA T. Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters[J]. Landslides, 2019, **16**(1): 195-200.
- [2] HAZARIKA H, ROHIT D, KIYOTA T, et al. Forensic evaluation of long-distance flow in gently sloped ground during the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia[M]/Latest Developments in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Singapore: Springer Singapore, 2021: 247-280.
- [3] KUTTER B L, MANZARI M T, ZEGHAL M. Model tests and numerical simulations of liquefaction and lateral spreading: LEAP-UCD-2017[M]. New York: Springer Nature, 2019.
- [4] LI Y Y, LUO C, ZHANG J M, et al. Rayleigh wave-shear wave coupling mechanism for large lateral deformation in level liquefiable ground[J]. Computers and Geotechnics, 2022, **143**: 104631.
- [5] ZHANG X, KRABBENHOFT K, SHENG D C, et al. Numerical simulation of a flow-like landslide using the particle finite element method[J]. Computational Mechanics, 2015, **55**(1): 167-177.
- [6] CECCATO F, YERRO A, GIRARDI V, et al. Two-phase dynamic MPM formulation for unsaturated soil[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **129**: 103876.
- [7] 荚 颖, 唐小微, 栾茂田, 等. 土坝的地震响应及液化无网格法分析[J]. 水利学报, 2009, **40**(4): 506-512. (JIE Ying, TANG Xiaowei, LUAN Maotian, et al. Meshless analysis on seismic response and liquefaction of embankments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, **40**(4): 506-512. (in Chinese))
- [8] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,

- 1977, **181**(3): 375-389.
- [9] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. *The Astronomical Journal*, 1977, **82**: 1013.
- [10] MAEDA K, SAKAI M. Development of seepage failure analysis procedure of granular ground with Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, **7**: 775-786.
- [11] BUI H H, FUKAGAWA R, SAKO K, et al. Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2008, **32**(12): 1537-1570.
- [12] 黄雨, 郝亮, 谢攀, 等. 土体流动大变形的 SPH 数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(10): 1520-1524. (HUANG Yu, HAO Liang, XIE Pan, et al. Numerical simulation of large deformation of soil flow based on SPH method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(10): 1520-1524. (in Chinese))
- [13] CRESPO A J C, DOMINGUEZ J M, ROGERS B D, et al. DualSPHysics: open-source parallel CFD solver based on smoothed particle hydrodynamics (SPH)[J]. *Computer Physics Communications*, 2015, **187**: 204-216.
- [14] 胡曼, 谢莫文, 王立伟. 基于弹塑性土体本构模型的滑坡运动过程 SPH 模拟[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(1): 58-67. (HU Man, XIE Mo-wen, WANG Li-wei. SPH simulations of post-failure flow of landslides using elastic-plastic soil constitutive model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(1): 58-67. (in Chinese))
- [15] 唐宇峰, 施富强, 廖学燕. 基于 SPH 的边坡稳定性计算中失稳判据研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(5): 904-908. (TANG Yufeng, SHI Fuqiang, LIAO Xueyan. Failure criteria based on SPH slope stability analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(5): 904-908. (in Chinese))
- [16] 骆钊, 汪淳. 改进的 SPH 边界处理方法与土体大变形模拟[J]. *计算力学学报*, 2018, **35**(3): 364-371. (LUO Zhao, WANG Chun. Improved SPH boundary conditions and simulation for large deformation of soil[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, **35**(3): 364-371. (in Chinese))
- [17] HAN Z, SU B, LI Y G, et al. Numerical simulation of debris-flow behavior based on the SPH method incorporating the Herschel-Bulkley-Papanastasiou rheology model[J]. *Engineering Geology*, 2019, **255**: 26-36.
- [18] PENG C, LI S, WU W, et al. On three-dimensional SPH modelling of large-scale landslides[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, **59**(1): 24-39.
- [19] FRIGAARD I A, NOUAR C. On the usage of viscosity regularisation methods for visco-plastic fluid flow computation[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2005, **127**(1): 1-26.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] CRESPO A J C, GOMEZ G M, DALRYMPLE R A. Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods[J]. *Computers Material and Continua*, 2007, **5**: 173-184.
- [24] PAN C, ZHANG R F, LUO H, et al. Target-based algorithm for baseline correction of inconsistent vibration signals[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2018, **24**(12): 2562-2575.
- [25] BRADLEY K, MALLICK R, ANDIKAGUMI H, et al. Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(11): 935-939.
- [26] WATKINSON I M, HALL R. Impact of communal irrigation on the 2018 Palu earthquake-triggered landslides[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(11): 940-945.
- [27] GALLANT A P, MONTGOMERY J, MASON H B, et al. The Sibalaya flowslide initiated by the 28 September 2018 Mw 7.5 Palu-Donggala, Indonesia earthquake[J]. *Landslides*, 2020, **17**(8): 1925-1934.
- [28] KIYOTA T, FURUICHI H, HIDAYAT R F, et al. Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia[J]. *Soils and Foundations*, 2020, **60**(3): 722-735.