

物质点法在地质灾害动态模拟中的应用与发展研究动态

王梦晨, 李 滨, 万佳威, 高 杨, 王文沛

Research progress on the application and development of the material point method in dynamic simulation of geological hazards

WANG Mengchen, LI Bin, WAN Jiawei, GAO Yang, and WANG Wenpei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202405006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于实时地质灾害监测数据的预警预报动态阈值分析方法

Dynamic threshold analysis method of early warning and forecast based on real-time geo-hazards monitoring data

薛廉, 唐侨, 郑杰, 陆毅之 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 11-21

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104-110

四川甘洛县比依市村滑坡运动特征分析

Analysis of the landslide movement characteristics in Biyi Village, Ganluo County, Sichuan Province, through SPH numerical simulation

涂正楠, 冯君, 邓应进, 潘激扬 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 92-99

四川省喜德县地质灾害“点面双控”体系探索与实践

Exploration and practice of the “dual control of point and zone” system for geological hazards in Xide County, Sichuan Province

徐伟, 铁永波, 王家柱, 郑玄, 白永健, 徐如阁, 梁东波, 欧文 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 1-9

基于水文过程和应力应变耦合的陕北黄土滑坡复活机理分析

Mechanistic analysis of loess landslide reactivation in northern Shaanxi based on coupled numerical modeling of hydrological processes and stress strain evolution: A case study of the Erzhuangkelandslide in Yan'an

王康, 畅俊斌, 李晓科, 朱文峰, 卢啸, 刘慧 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(6): 47-56

熵权法改进的模糊数学滑坡稳定性评价方法研究

Study on the stability evaluation method of fuzzy mathematical landslide improved by entropy weight method

霍善欣, 王新刚, 薛晨, 王友林, 李琦, 刘凯 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 19-27



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202405006

王梦晨, 李滨, 万佳威, 等. 物质点法在地质灾害动态模拟中的应用与发展研究动态[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(4): 37-47.

WANG Mengchen, LI Bin, WAN Jiawei, et al. Research progress on the application and development of the material point method in dynamic simulation of geological hazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(4): 37-47.

物质点法在地质灾害动态模拟中的应用与发展研究动态

王梦晨^{1,2,3}, 李 滨^{2,3}, 万佳威^{2,3}, 高 杨^{2,3}, 王文沛⁴

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 4. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081)

摘要: 在解决崩塌、滑坡、泥石流等大变形地质灾害问题时, 常采用数值模拟的方法。如何准确高效地模拟这类问题一直以来都是个难题。物质点法(material point method, MPM)作为一种新兴的数值方法, 克服了传统有限元和有限差分等数值方法在模拟大变形时产生的网格畸变问题, 并已成功应用于地质灾害中的大变形分析。为了解物质点法在地质灾害大变形模拟中的应用情况, 文章在现有研究的基础上简要介绍了物质点法的基本原理, 主要总结了物质点法在模拟滑坡、泥石流、地裂缝等地质灾害大变形问题中的应用以及最新的研究进展。同时, 指出了物质点法在现有研究中存在的精度、计算效率、多物理场耦合等问题, 并展望了物质点法在工程地质中进一步发展的趋势。

关键词: 物质点法; 地质灾害; 大变形; 数值方法; 滑坡

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)04-0037-11

Research progress on the application and development of the material point method in dynamic simulation of geological hazards

WANG Mengchen^{1,2,3}, LI Bin^{2,3}, WAN Jiawei^{2,3}, GAO Yang^{2,3}, WANG Wenpei⁴

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

4. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazards, MNR), Beijing 100081, China)

Abstract: Numerical simulation is commonly used to address large deformation geological disasters such as collapses, landslides, and debris flows. Accurately and efficiently simulating these issues has always been a challenge. The material point method (MPM), as emerging numerical method, overcomes the grid distortion problems of traditional numerical methods such

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-09-05

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2244226; 42407280); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230538); 中国电建集团项目(CD2C20230228; CD2C20231102)

第一作者: 王梦晨(1998—), 男, 陕西咸阳人, 博士研究生, 主要从事地质灾害防灾减灾及地震工程方面的研究。

E-mail: 2020226082@chd.edu.cn

通讯作者: 李 滨(1980—), 男, 博士, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail: libin1102@163.com

as the finite element method (FEM) and finite difference method (FDM) when simulating large deformations, and has been successfully applied in the large deformation analysis of geological disasters. In order to understand the research progress of MPM in the large deformation simulation of geological disasters, this paper briefly introduces the basic principles of MPM based on current research. It also summarizes the application of MPM in simulating large deformations of geological disasters such as landslide, debris flow, and ground fracture, highlighting the latest research progress. Furthermore, it identifies issues in existing MPM research, such as accuracy, computational efficiency, and coupling of multi-physics fields, and discusses future trends in MPM development within engineering geology.

Keywords: material point method (MPM); geological disasters; large deformation; numerical methods; landslides

0 引言

由于气候的复杂多变,崩塌、滑坡及泥石流等大变形地质灾害频发^[1],数值模拟是解决这类问题的主要方法之一。目前,模拟岩土体变形方法主要分为:有限差分法、有限元法、离散元法以及光滑粒子法、物质点法为代表的无网格法。有限差分法易于理解和实现,适用于规则的几何形状和边界条件,数值稳定性好;然而对于复杂的几何形状和非线性问题,需要进行网格生成和边界条件处理,计算效率较低。有限元法适用于复杂的几何形状和非线性问题,可以灵活处理各种边界条件,数值稳定性好。但是需要进行网格生成和单元划分,计算过程复杂,耗费计算资源较多。离散元法适用于模拟颗粒物体的运动和相互作用,可以考虑颗粒之间的接触和碰撞,适用于模拟颗粒性材料的行为;离散元法属于非连续介质力学的范畴,而对于连续介质和液态物质的模拟效果较差,计算效率较低。其中 SPH 方法主要常用于流体动力学模拟,对于模拟固体颗粒的动力分析,数值稳定性较低。准确地分析滑坡、崩塌、泥石流等大变形地质灾害的运动过程不仅具有实际工程意义,还具有重要的理论研究价值。因此,为了解决这类大变形问题,国内外学者提出了一种新的数值计算方法——物质点法。

物质点法是一种基于连续介质力学范畴的数值计算方法。它通过将连续体离散成一组质点来携带材料的所有物质信息(如质量、速度、应力、应变等),在背景网格上进行本构计算。该方法采用拉格朗日离散来避免非线性对流项产生的数值求解困难,背景网格采用欧拉描述,从而避免了网格畸变问题。由于物质点法的独有特点,物质点法在模拟岩土工程中的大变形过程时能够较好地捕捉材料的变形行为和相互作用,适用于复杂的多相材料和边界条件情况。因此,物质点法在岩土工程领域得到了广泛的应用。随着物质点法的不断发展,目前已被广泛应用于超高速碰撞、冲击侵蚀、爆炸、裂纹扩展、材料破坏、颗粒材料流动和岩土冲击失效等与

材料特大变形问题相关的领域^[2-3]。

近年来,物质点法被用来分析诸如边坡稳定性、泥石流和同震滑坡等问题,引发了大量工程地质专家的关注。为展示物质点法在地质灾害大变形模拟中的最新研究进展,在查阅大量文献的基础上,本文首先简要阐述了物质点法的基本原理;其次,重点总结了近年来物质点法在模拟地质灾害大变形问题中各研究领域方面的最新研究进展,指出了现有研究的不足与今后研究亟待解决的关键科学问题;最后,给出了物质点法在模拟地质灾害大变形问题的发展趋势,并指出了进一步的研究方向。

1 物质点法的基本原理

1.1 动量方程及其积分弱形式

更新拉格朗日格式连续体动量微分方程为:

$$\rho \ddot{u} = \rho b + \nabla \sigma \quad (1)$$

式中: ρ ——物体的密度;

$\ddot{u}$ ——位移关于时间的二阶导数;

b ——单位质量的体积力;

∇ ——对空间坐标的导数;

σ ——Cauchy 应力。

动量方程(1)在连续体的现时构型 Ω 内处处满足,边界条件为:

$$\begin{cases} (n_j \sigma_{ij})|_{\Gamma_i} = \bar{t}_i \\ v_i|_{\Gamma_u} = \bar{v}_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: n_j ——边界 Γ_i 的外法线单位向量;

σ_{ij} ——Cauchy 应力;

Γ_i 、 Γ_u ——给定的面力边界和位移边界;

$\bar{t}_i$ ——作用在边界 Γ_u 上的面力;

$\bar{v}_i$ ——位移边界 Γ_u 的速度。

动量方程(1)需在求解域 Ω 内处处满足,求解困难。因此引入虚位移 δu_i 作为权函数,其动量方程的等效积分弱形式为:

$$\int_{\Omega} \rho \ddot{u}_i \delta u_i dV + \int_{\Omega} \rho \sigma_{ij}^s \delta u_{i,j} dV - \int_{\Omega} \rho b_i \delta u_i dV - \int_{\Omega} \rho \bar{f}_i \delta u_i dA = 0 \quad (3)$$

上式也称虚功方程,

式中: $\sigma_{ij}^s = \sigma / \rho$ ——比应力;

$\bar{f}_i = \bar{f}_i / \rho$ ——比边界面力。

虚位移满足:

$$\delta u_i \in \{ \delta u_i | \delta u_i \in C^0, \delta u_i|_{\Gamma_u} = 0 \} \quad (4)$$

式中: C^0 ——连续函数集。

1.2 物质点离散

物质点法将连续体离散为一系列质点(图 1), 连续体的密度可近似为:

$$\rho(x_i) = \sum_{p=1}^{n_p} m_p \delta(x_i - x_{ip}) \quad (5)$$

式中: n_p ——质点总数;

m_p ——质点 p 的质量;

δ ——Dirac Delta 函数;

x_{ip} ——质点 p 的坐标。

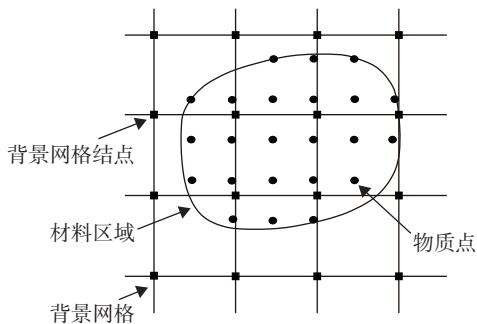


图 1 物质点离散示意图

Fig. 1 Schematic diagram of material point discretization

将式(5)代入虚功方程(3)中, 可将虚功方程转化为求和的形式:

$$\sum_{p=1}^{n_p} m_p \ddot{u}_{ip} \delta u_{ip} + \sum_{p=1}^{n_p} m_p \sigma_{ijp}^s \delta u_{ip,j} - \sum_{p=1}^{n_p} m_p b_{ip} \delta u_{ip} - \sum_{p=1}^{n_p} m_p \bar{f}_{ip} h^{-1} \delta u_{ip} = 0 \quad (6)$$

式中, 带下标 p 的量代表物质点 p 所携带的量。 h 是为了将式(3)左端最后一项转化为体积分而引入的假想边界层厚度。从式(6)可以看出, 物质点法将式(3)中的各项积分转化为被积函数在各质点处的值与该质点所代表的体积之积的和, 即采用了质点积分。

1.3 方程求解

求解动量方程时, 背景网格和质点不产生相对位移

动, 可通过建立在背景网格结点上的有限元形函数 $N_I(x_i)$ 来实现质点和背景网格结点之间信息的映射。因此, 质点 p 的位移 u_{ip} 、位移导数 $u_{ip,j}$ 、虚位移 δu_{ip} 可分别表示为:

$$u_{ip} = N_{Ip} u_{il} \quad (7)$$

$$u_{ip,j} = N_{Ip,j} u_{il} \quad (8)$$

$$\delta u_{ip} = N_{Ip} \delta u_{il} \quad (9)$$

将(7)——(9)式代入虚功方程(6)中, 可得到背景网格结点的运动方程:

$$\dot{p}_{il} = f_{il}^{int} + f_{il}^{ext}, x_i \notin \Gamma_u \quad (10)$$

$$f_{il}^{int} = - \sum_{p=1}^{n_p} N_{Ip,j} \sigma_{ijp} \frac{m_p}{\rho_p} \quad (11)$$

$$f_{il}^{ext} = \sum_{p=1}^{n_p} m_p N_{Ip} b_{ip} + \sum_{p=1}^{n_p} N_{Ip} \bar{f}_{ip} h^{-1} \frac{m_p}{\rho_p} \quad (12)$$

式中: $\dot{p}_{il}$ ——第 I 个网格结点在 i 方向上的动量;

f_{il}^{int} 、 f_{il}^{ext} ——结点的内力和结点外力;

σ_{ijp} ——质点 p 的应力, 可利用本构方程由应变增量和旋量增量得到^[4]。

根据上述理论, 物质点法的求解示意图如图 2 所示, 具体步骤可概括为:

(1) 将物质点携带信息映射到背景网格上;

(2) 在背景网格结点处求解动量方程, 计算背景网格结点的结点力、应变增量、旋量增量、密度等参数;

(3) 将背景网格结点动量方程计算结果映射回物质点, 更新物质点的位置和速度。

2 物质点法在模拟地质灾害大变形问题中的应用

在使用物质点法时, 主要涉及变形和破坏两类问题^[5]。第一类问题是固体力学问题, 使用了 Sulsky 等^[6]提出的物质点法公式来进行描述。而第二类问题则是土水耦合问题, 在 Zienkiewicz 等^[7]和 Verruijt^[8]提出的公式中进行建立。在本节中, 主要介绍物质点法在模拟岩土材料变形和破坏方面的应用, 包括滑坡、泥石流等。

2.1 滑坡问题

滑坡问题一直都是工程地质领域的重要研究课题。近年来, 一些学者利用物质点法对边坡工程做了大量研究。

2.1.1 材料强度诱发滑坡

Beuth 等^[9-10]最早将物质点法应用于滑坡问题中,

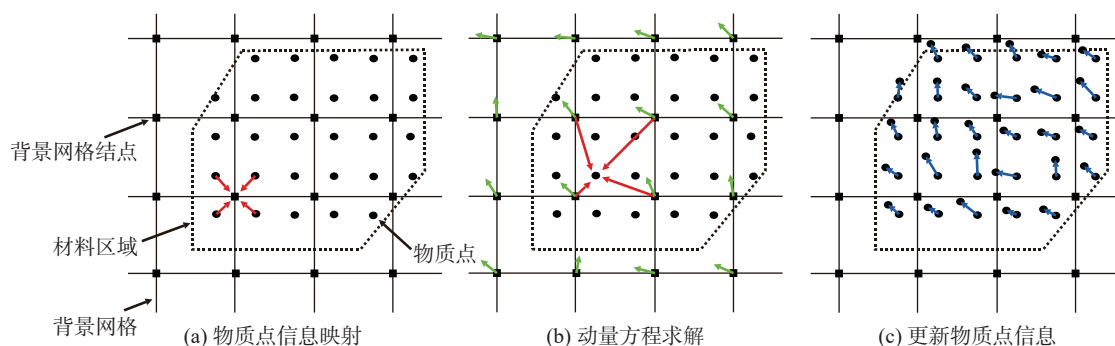


图 2 物质点法求解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of material point method solution

模拟了滑坡触发-运动-静止的全过程。黄鹏等^[11-12]利用 D-P 本构模型,运用物质点法对滑坡问题进行了模拟分析,并讨论了黏性和非黏性土质边坡的变形破坏特征。Llano-Serna 等^[13]运用物质点法对意大利 Vajont 滑坡进行了模拟,模拟结果显示 Vajont 滑坡运动时间为 32 s,与实际观测的实际运动时间 45 s 接近,证实了物质点法具有还原实际滑坡的能力与精度。Li 等^[14]利用物质点法对王家岩滑坡的动态过程进行了模拟,并研究了其对建筑物的影响。宰德志等^[15]利用物质点法研究了岩土体强度与滑坡滑动距离之间的关系。姚云^[16]利用物质点法方法研究了不同剪胀角对土质边坡稳定性的影响,结果显示剪胀角的大小与边坡的稳定程度成正相关关系。杨婷婷等^[17]利用物质点法方法模拟了黏性土和无黏性土坡破坏的大变形问题,并分析了材料摩擦角、黏聚力和高宽比等因素对土体滑动距离的影响规律。Qu 等^[18]利用随机物质点法研究了黏聚力和摩擦角之间的相互关联对边坡失稳概率的问题。Yerro 等^[19]研究了材料脆性对边坡稳定性以及破坏后运动特性的影响。Liu 等^[20]基于物质点法研究了土体参数的空间分布与边坡破坏模式之间的关系。刘磊磊等^[21-22]使用随机多重响应面物质点法和随机物质点法(RMPM),分别研究了土体参数旋转各向异性空间变异性对边坡大变形特征的影响规律,以及不排水条件下土体空间变异性的非平稳性对边坡大变形特性的影响。Li 等^[23]利用物质点法研究了土石混合边坡中黏聚力、摩擦角对其稳定性的影响。

2.1.2 渗流诱发滑坡

(1) 流固耦合

降雨入渗是引发滑坡的重要因素之一^[24-27]。为研究降雨对边坡稳定性的影响,首先须专注于水土耦合问题。一般来说,土-水耦合物质点法公式可以分为两类:(1)单层物质点法,用于描述饱和和非饱和土壤的单

个物质点层,主要用于模拟水与土壤的相互作用和土壤体的滑动阶段,具有较高的计算效率,但忽略了土-水之间的相对速度;(2)多层物质点法,用于描述饱和和非饱和土壤的多个物质点层,主要研究固相和流体相的作用,使用两组拉格朗日物质点来描述土壤骨架和水分子层,可用于模拟土壤和水之间的相互作用^[28]。

针对物质点法的水土耦合问题,已经开展了大量基于水土耦合的物质点法研究。Wang 等^[28]根据 Jassim 等^[29]的完全饱和土的 V-W 公式,提出了适用于描述非饱和土的单层物质点法公式。Girardi 等^[30]提出了一种单物质点两项在非饱和土瞬态水力边界条件下应用的物质点法公式,并通过二维坝堤渗流问题进行了验证。Higo 等^[31]将物质点法与 FDM 耦合,研究了完全饱和以及部分饱和弹塑性土的响应问题。Zheng 等^[32]基于物质点法提出了一种分析饱和弹塑性土工材料大变形的数值方法,通过模拟基础承载力、边坡破坏及基础-边坡相互作用等问题,证实了该方法用于解决流体-力学耦合和涉及大变形等岩土工程问题的适用性。Abe 等^[33]基于 Biot 混合理论,提出了求解大变形饱和土耦合流体力学问题的物质点法,通过对模拟一维固结试验的模拟,得到的数值解与理论解析解一致(图 3)。

Sołowski 等^[34]基于物质点法提出了非饱和流动问题的理论,并通过非饱和颗粒材料筒仓卸料以及非饱和颗粒雪崩两个算例验证了该理论用于非饱和问题的可靠性。

(2) 降雨入渗诱发滑坡

Zhan 等^[35]考虑了孔隙度变化对保水曲线和渗透的影响,并提出了一种能够解决非饱和土中自由水渗入问题的物质点法,并模拟了非饱和土质边坡在降雨作用下的破坏过程。Feng 等^[36]基于非饱和土理论建立了两层流固耦合的物质点法,并研究了非饱和土坡在降雨作用下的破坏机理。Ceccato 等^[37]基于物质点法提出了非

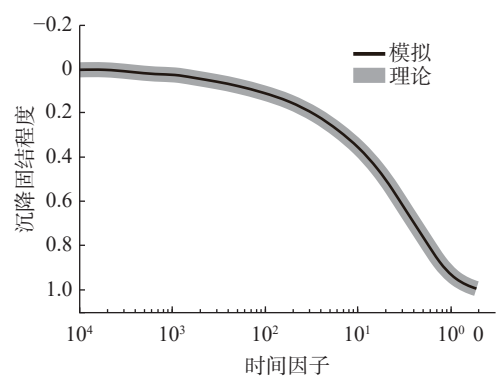


图3 固结程度和时间因子关系图(修改自文献[33])

Fig. 3 Relationship diagram between degree of consolidation and time factor (modified from [33])

饱和土渗流-变形耦合过程的计算框架,并应用于降雨导致的边坡破坏问题。Tran等^[38]利用广义插值物质点法研究了斜坡的渗流及渐进破坏问题。王升等^[39]推导了考虑孔隙水压力效应的等效摩擦角公式,并使用物质点法模拟了深圳“12·20”滑坡的失稳、运动和冲击过程,模拟得到的滑面与实际滑面对比信息如表1所示,结果验证了物质点法在滑坡失稳过程数值模拟中的适用性。

表1 模拟滑面与实际滑面对比信息表^[40]

Table 1 Comparison table of simulated slip surface and observed slip surface^[40]

滑面对比	剪出口水平距 (后缘)/m	剪出口高差 (后缘)/m	滑面最大 深度/m	滑带角度 /(°)
模拟滑面	544.5	111.9	53.9	5.3
实际滑面	457.0	92.1	49.7	2.2

Wang等^[40]提出了一种流固耦合物质点法,并模拟了降雨引起的边坡破坏过程,同时探讨了降雨强度对边坡破坏过程的影响。He等^[41]使用物质点法再现了滑坡活化的全过程,并讨论了前期降雨和地下水对滑坡运动和沉积物形态的影响。Lee等^[42]使用物质点法研究了降雨诱发滑坡从滑坡前阶段到破坏后阶段的运动过程,并分析了降雨强度对孔隙水压力发展、滑坡触发时间、地表位移和速度的影响。

2.1.3 地震诱发滑坡

Moormann等^[43]通过在模型底部增加一层粒子来替代刚性边界,最早将物质点法应用于地震边坡分析。Alsardi等^[44-45]使用物质点法进行了地震反应分析,并与振动台试验和有限元数值模拟结果进行对比,验证了物质点法在地震反应分析方面的适用性。He等^[46]利用物质点法模拟了2008年汶川地震产生的大光包滑坡,通过在模型底部施加160 s的地震加速度时程,最终得

到了与现场实测结果相吻合的几何形状。Xu等^[47]用物质点法技术建立了三维边坡模型,对地震荷载下的红石岩滑坡进行了模拟。Feng等^[48-49]利用域约简法^[50-51]将谱元法(SEM)与物质点法进行耦合,提出了一种模拟多尺度三维同震滑坡的框架,并使用物质点法模拟了地震荷载作用下的同震边坡稳定性问题。Kohler等^[52-54]基于物质点法提出了一种地震反应分析的框架,并利用该方法预测了同震滑坡产生的小位移。Tran等^[55]提出了一种结合土力学、流体力学和固体力学的土-流-结构相互作用模型,并利用物质点法模拟了地震诱发海底滑坡的全过程。Fernández等^[56]建立了一个三维大光包地质模型,并利用物质点法模拟了其中汶川地震诱发滑坡的破坏、运动、平稳的整个过程。

2.1.4 其他因素诱发滑坡

吴方东等^[57]利用物质点法方法研究了边坡坡顶堆载对斜坡稳定性的影响,研究结果显示滑坡前缘运动特征量与堆载荷载大小成正相关。Xie等^[58]利用物质点法研究了边坡坡顶处基础设施对边坡稳定性的影响,并讨论了基础后退距离、坡角以及土体强度参数引起的承载力变化问题。Zhu^[59]利用物质点法研究了超载作用下深埋管道路堑边坡的变形破坏机理。Troncone^[60]利用物质点法分析了边坡坡脚处开挖而产生滑坡的运动变形全过程。Acosta等^[61]利用物质点法研究了不同基础条件下的土体冲击过程中挡土结构的破坏问题,以及由施工引起的边坡破坏问题。

2.2 泥石流问题

2.2.1 颗粒流

关于泥石流的分析,可以使用单层和多层物质点法来模拟土-水耦合问题。而颗粒流可以被视为一种特殊的泥石流,近年来也有许多学者对颗粒流进行了大量研究。Ng等^[62]利用物质点法分析了屏障变化对颗粒流冲击力的影响;Ceccato等^[63]利用物质点法研究了干燥颗粒的冲击问题,并分析了初始孔隙度、前倾角和速度对冲击过程的影响;Wyser等^[64]利用物质点法研究了固体颗粒的三维崩塌问题;Lei等^[65]利用物质点法研究了三维土-结构相互作用的问题,并通过模拟斜面上钢球滚动与解析解的对比证明了该方法的可靠性(图4)。

Lei等^[66]基于基面数字地形模型(DTM),在物质点法框架内开发了一种新型多材料接触模型,以模拟复杂自然地形上的颗粒流问题;Cuomo等^[67]利用物质点法研究了干燥和饱和颗粒流对刚性壁面的冲击问题。

2.2.2 泥石流

Li等^[68]提出了一种基于物质点法的计算框架,用于

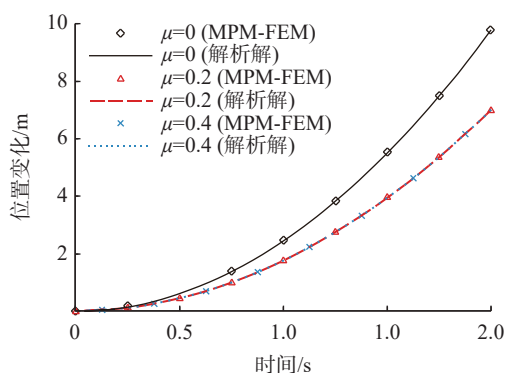


图 4 不同摩擦系数下钢球质点位置随时间变化(修改自文献[65-66])

Fig. 4 Variation of steel ball particle position over time under different friction coefficients (modified from [65-66])

研究滑坡泥石流与挡板的相互作用问题。研究指出,挡板的排列方式和几何形状对泥石流的运动过程有重要影响。Abe 等^[69]提出了一种基于物质点法的计算框架(DA 物质点法),用于模拟泥石流运动过程。通过与干湿砂水槽试验和模拟结果的对比,验证了该计算框架的有效性,并讨论了流变模型的差异对泥石流运动的影响。Zhao 等^[70]提出了一种基于物质点法的方法,可以模拟软质材料与刚性物体之间的复杂几何形状相互作用,并利用该方法模拟了泥石流的流动过程。Li 等^[71]提出了一种将物质点法应用于流固耦合问题的建模方法,并研究了溃坝对弹性障碍物的冲击、干砂对刚性结构的冲击,以及有无斜对称排水槽的泥石流问题。Perna 等^[72]提出了一种固定在地基上的刚性屏障,利用物质点法分析了泥石流与受冲击防护结构之间的相互作用机制问题。Cuomo 等^[73]提出了一种可变性土工合成增强屏障(即通过土工格栅加固的粗粒土层构成的路堤),利用物质点法研究了该屏障在泥石流冲击过程中的能耗影响。Kazmi 等^[74]利用物质点法研究了地震引发的泥石流问题,并讨论了内摩擦角、密度、膨胀角和黏聚力等因素对泥石流运动特征的影响。Wong 等^[75]提出了一种耗散泥石流能量的阶梯池结构,并利用物质点法分析了人工阶梯池的内摩擦角、黏聚力和高度对泥石流消能敏感性的影响。Vicari 等^[76]利用物质点法研究了河床物质的夹带对安装在泥石流通道上游的柔性屏障的影响。

2.3 其他问题

物质点法除了应用于滑坡、泥石流等常见的地质灾害中,近年来还被用于隧道施工引起的地质灾害、地裂缝、边坡支护、液化问题。

2.3.1 洞室围岩稳定性

Xie 等^[77-78]使用物质点法分析了盾构隧道中水涌

的演化过程以及对周围土体的影响,并研究了涌水位置、隧道埋深和土体参数对涌水过程的影响。张春新等^[79]使用物质点法研究了隧道周围砂土地层在支护压力减小过程中的变形破坏机理问题,并分析了隧道埋深比和砂土内摩擦角对土拱效应强弱、极限支护压力和地层变形的影响。王曼灵等^[80]应用自适应正交改进插值移动最小二乘法(AOIIMLS)改进了对流粒子域插值物质点法(CPDI)方法,解决了传统物质点法中质点穿越误差的问题,并模拟了青岛地铁 4 号线静沙区间地面塌陷的整个过程,模拟结果与隧道坍塌现场基本一致。王桂林等^[81]利用物质点法研究了带有裂损的地铁隧道在爆炸作用下的二次损伤响应,结果表明初始裂损不仅导致衬砌结构刚度下降,还加速了隧道结构的损伤速度。Tu 等^[82]使用物质点法研究了饱和地层中隧道开挖工作面临界支护压力及破坏机理的问题。Cheng 等^[83]利用物质点法研究了二维平面应变条件下的巷道掘进引起的塌陷和地面沉降问题。

2.3.2 地裂缝

Li 等^[84]通过将物质点法与断裂力学框架耦合,探讨了泵送诱发地裂缝的成因机制。李克智等^[85]利用物质点法研究了人工裂缝与天然裂缝之间的交互作用,并预测了人工压裂的改造范围。

2.3.3 坝堤及地基液化

Liang 等^[86]则运用物质点法研究了溢流作用对河堤稳定性的影响。Talbot 等^[87]使用物质点法模拟了著名的 Fernando 大坝破坏事件,研究结果与实测数据基本一致。徐云卿等^[88]将人工状态方程引入 B 样条物质点法,研究了溃坝流问题。Remmerswaal 等^[89]则利用物质点法研究了坝堤的残余阻力问题。Zhao 等^[90]研究了不同宽高比的溃坝问题。冯晓青等^[91]推导了固液两项物质点法算法的基本公式,研究了动力荷载下饱和地基的液化问题。

2.3.4 锚杆支护

Liang 等^[92]将物质点法与 DEM 耦合,研究了颗粒砂中锚杆的拉拔问题。高宇新等^[93]利用物质点法模拟了砂土中锚板的上拔过程,并探讨了不同埋深条件下土体位移场的分布以及锚板的上拔破坏机制,研究了砂土密实度、锚板尺寸和埋深等因素对其极限承载力的影响。

3 存在问题与未来的发展趋势

3.1 存在问题

如上所述,尽管物质点法目前已经在模拟地质灾害大变形分析过程中取得了不少研究成果,但以下缺点限

制了它在地质灾害大变形中的应用。

(1)模型准确性:物质点法通常采用质点来代表地质体。这种简化模型可能无法完全反映地质体的复杂结构和力学特性。模拟地质灾害大变形时往往需要考虑复杂的地质结构和地形,网格的分辨率和计算精度会对模拟结果产生影响,特别是在局部细节上容易出现误差。如何提高复杂模型的精度和可靠性,使其更好地反映实际地质灾害的发生和演化过程,是一个亟待解决的问题。

(2)计算成本较高:在处理复杂地质问题时,物质点法的计算成本较高,需要大量的计算资源和时间。这限制了其在大规模实际工程中的应用。因此,如何提高模拟的计算效率,降低计算成本,尤其是在处理大规模地质灾害问题时,是一个需要解决的技术难题。

(3)多物理场耦合问题:地质灾害过程通常涉及多种物理场的相互作用,例如流固耦合和热-力耦合。而物质点法通常较难实现多物理场的耦合。因此,需要进一步发展物质点法的流固耦合公式和三维建模技术,解决地质灾害中的多物理场耦合问题。

3.2 发展趋势

物质点法在地质灾害领域的发展趋势主要有以下几个方面:

(1)多方法耦合:物质点法和有限元法(或其他方法)分别擅长不同类型的物理过程模拟。通过耦合可以同时考虑物质点的大变形和有限元网格的局部细节,从而使模拟更加全面和真实。此外,耦合后能够充分发挥两者的优势,实现高效地计算和准确的结果。

(2)多物理过程耦合模拟:未来的发展将更加注重多物理过程的耦合模拟,包括力学、水文和热学等。地质灾害往往是多种因素共同作用的结果,通过耦合模拟可以更全面地理解地质灾害的发生机制和演化过程。

(3)多尺度模拟与精细化分析:随着计算机技术的进步,基于物质点法的地质灾害模拟将更加注重多尺度模拟和精细化分析。通过多尺度模拟,可以更好地理解地质灾害的全过程,从微观粒子到宏观地形,为灾害防治和应急响应提供更准确的数据支持。

(4)数据驱动的模拟方法:随着遥感技术、地理信息系统和人工智能的发展,将机器学习与物质点法相结合,可实现数据驱动的地质灾害模拟。通过大数据分析和机器学习技术,可以更准确地模拟地质灾害的发生和演化过程,提高预测的准确性和实用性。

综上所述,物质点法在地质灾害领域有广阔的应用前景,但也面临着诸多挑战和问题。不但需要物质点法

自身的发展,还需要将其在地质灾害领域不断进行研究和探索,提高模型的准确性、可靠性和实用性,以更好地应对地质灾害带来的风险和挑战。

4 结论

(1)物质点法是一种将拉格朗日法和欧拉法的优点兼具的模拟方法。物质点法适用于模拟材料的大变形和非线性行为;可以处理多相物质的相互作用,例如流体-结构相互作用、颗粒材料的动态行为;适用于模拟固体、液体和气体等不同性质的物质,涵盖了广泛的应用领域;能够有效模拟材料的破坏和断裂行为,适合于模拟地质岩土等颗粒材料的行为。然而粒子间的相互作用需要额外的处理以保证数值精度和数值稳定性;需要处理大量的计算和存储数据及考虑网格与颗粒的相互作用和穿透等问题,对计算、内存、初始网格的生成和处理要求较高;在处理边界条件和碰撞等问题时,需要额外的算法和技术支持。

(2)物质点法具有模拟滑坡与泥石流的触发、运动和平稳三个阶段的全过程能力。相较于有限元和有限差分等工具,物质点法能够实时分析模型整体的能量、速度和加速度等力学参数,从而全面了解地质灾害的动态过程,为后续的防灾减灾工作提供实质性建议和更具具体、有效的预防策略。

(3)物质点法通过不断尝试和发展流固耦合公式、动力边界条件以及多物理场综合模拟技术,使其能够模拟两项、多项以及多物理场耦合的地质灾害问题。由于物质点法处于发展阶段,随着算法的不断改进与发展,其在模拟地质灾害大变形问题具有非常光明的应用前景。未来,物质点法将应用于地质灾害大变形的各个研究方向。

参考文献(References):

- [1] 陈建平, 辛亚波, 王泽鹏, 等. 样本选取对地质灾害易发性评价的影响——以山西柳林县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 152 - 162. [CHEN Jianping, XIN Yabo, WANG Zepeng, et al. Effect of sample selection on the susceptibility assessment of geological hazards: A case study in Liulin County, Shanxi Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 152 - 162. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 孙玉进. 岩土大变形问题的物质点法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017. [SUN Yujin. Study on large deformation of rock and soil by material point method [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张雄, 廉艳平, 刘岩, 等. 物质点法 [M]. 北京: 清华大

- 学出版社, 2013. [ZHANG Xiong, LIAN Yanping, LIU Yan, et al. Material point method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)]
- [4] 廉艳平, 张帆, 刘岩, 等. 物质点法的理论和应用 [J]. 力学进展, 2013, 43(2): 237 – 264. [LIAN Yanping, ZHANG Fan, LIU Yan, et al. Material point method and its applications [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(2): 237 – 264. (in Chinese with English abstract)]
- [5] YERRO C A, ALONSO P A E, PINYOL P N M. The material point method: A promising computational tool in geotechnics [C] //Challenges and Innovations in Geotechnics. 2013: 853 – 856.
- [6] SULSKY D, ZHOU S J, SCHREYER H L. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics [J]. Computer Physics Communications, 1995, 87(1/2): 236 – 252.
- [7] ZIENKIEWICZ O C, SHIOMI T. Dynamic behaviour of saturated porous media; The generalized Biot formulation and its numerical solution [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 71 – 96.
- [8] VERRUIJT A. An introduction to soil dynamics [M]. DordrechtSpringer Netherlands, 2010
- [9] BEUTH L, BENZ T, VERMEER P A, et al. Large deformation analysis using a quasi-static material point method [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 38(1 – 2): 45 – 60
- [10] BEUTH L, WIĘCKOWSKI Z, VERMEER P A. Solution of quasi-static large-strain problems by the material point method [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(13): 1451 – 1465.
- [11] 黄鹏, 张雄. 岩土边坡失效分析的物质点法研究: 中国计算力学大会 2010(CCCM2010) 暨第八届南方计算力学学术会议 (SCCM8), 中国四川绵阳, 2010 [C] [143]. [HUANG Peng, ZHANG Xiong. Material point method for failure analysis of rock and soil slopes: Chinese congress of computational mechanics 2010 (CCCM2010) and the 8th Southern Conference of Computational Mechanics (SCCM8), Mianyang, Sichuan, China, 2010: 143. (in Chinese with English abstract)]
- [12] HUANG P, LI S L, GUO H, et al. Large deformation failure analysis of the soil slope based on the material point method [J]. Computational Geosciences, 2015, 19(4): 951 – 963.
- [13] LLANO-SERNA M A, FARIAS M M, PEDROSO D M. An assessment of the material point method for modelling large scale Run-out processes in landslides [J]. Landslides, 2016, 13(5): 1057 – 1066.
- [14] LI X P, WU Y, HE S M, et al. Application of the material point method to simulate the post-failure runout processes of the Wangjiayan landslide [J]. Engineering Geology, 2016, 212: 1 – 9.
- [15] 宰德志, 庞锐. 基于物质点法的土体强度对边坡失稳滑移距离影响研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(5): 46 – 51. [ZAI Dezhi, PANG Rui. Influence of soil strength on sliding distance of slope instability based on material point method [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 21, 19(5): 46 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 姚云. 基于物质点法考虑剪胀特性的土质边坡稳定性分析 [J]. 湖南交通科技, 2017, 43(2): 82 – 85. [YAO Yun. Stability analysis of soil slope considering dilatancy characteristics based on material point method [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2017, 43(2): 82 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 杨婷婷, 杨永森, 邱流潮. 基于物质点法的土体流动大变形过程数值模拟 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1463 – 1472. [YANG Tingting, YANG Yongsen, QIU Liuchao. Mpm based numerical simulation of large deformation process of soil flow [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1463 – 1472. (in Chinese with English abstract)]
- [18] QU C X, WANG G, FENG K W, et al. Large deformation analysis of slope failure using material point method with cross-correlated random fields [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2021, 22(11): 856 – 870.
- [19] YERRO A, ALONSO E E, PINYOL N M. Run-out of landslides in brittle soils [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 80: 427 – 439.
- [20] LIU X, WANG Y, LI D Q. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111: 301 – 312.
- [21] 刘磊磊, 梁昌奇, 徐蒙, 等. 考虑参数旋转各向异性空间变异性的边坡大变形概率分析 [J]. 地球科学, 2023, 48(5): 1836 – 1852. [LIU Leilei, LIANG Changqi, XU Meng, et al. Probabilistic analysis of large slope deformation considering soil spatial variability with rotated anisotropy [J]. Earth Science, 2023, 48(5): 1836 – 1852. (in Chinese with English abstract)]
- [22] LIU L L, LIANG C Q, HUANG L, et al. Parametric analysis for the large deformation characteristics of unstable slopes with linearly increasing soil strength by the random material point method [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 162: 105661.
- [23] LI X, TANG S, ZHENG Y, et al. Influence of the matrix of the soil-rock mixture on deformation and failure behaviors of the slope based on material point method [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 997928.
- [24] 蒋涛, 崔圣华, 冉耀. 开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析——以四川万源前进广场滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 20 – 30. [JIANG Tao, CUI Shenghua, RAN Yao. Analysis of landslide mechanism induced by excavation and rainfall: A case study of the Qianjin Square

- landslide in Wanyuan City, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 20–30. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张彦博,孙俊,陈涛,等. 贵州“7·23”水城滑坡触发机制及二次滑坡动力致灾分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 18–26. [ZHANG Yanbo, SUN Jun, CHEN Tao, et al. Triggering mechanism and secondary landslide analyses of the “7·23” Shuicheng landslide in Guizhou [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(3): 18–26. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 顾福计,钱龙,王梦洁,等. 太行山河北段“23·7”强降雨引发的地质灾害规律研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 55–65. [GU Fuji, QIAN Long, WANG Mengjie, et al. Analysis of geological hazards caused by the “23·7” heavy rainfall in the northern section of Taihang Mountain in Hebei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 55–65. (in Chinese with English abstract)]
- [27] QIN J Y, MEI G, XU N X. Meshfree methods in geohazards prevention: A survey [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(5): 3151–3182.
- [28] WANG B, VARDON P J, HICKS M A. Rainfall-induced slope collapse with coupled material point method [J]. Engineering Geology, 2018, 239: 1–12.
- [29] JASSIM I, STOLLE D, VERMEER P. Two-phase dynamic analysis by material point method [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(15): 2502–2522.
- [30] GIRARDI V, YERRO A, CECCATO F, et al. Modelling deformations in water retention structures with unsaturated material point method [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 2021, 174(5): 577–592.
- [31] HIGO Y, OKA F, KIMOTO S, et al. A coupled MPM-FDM analysis method for multi-phase elasto-plastic soils [J]. Soils and Foundations, 2010, 50(4): 515–532.
- [32] ZHENG X C, PISANÒ F, VARDON P J, et al. Fully implicit, stabilised MPM simulation of large-deformation problems in two-phase elastoplastic geomaterials [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 147: 104771.
- [33] ABE K, SOGA K, BANDARA S. Material point method for coupled hydromechanical problems [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(3): 04013033.
- [34] SOŁOWSKI W T, SEYEDAN S. Granular material point method: unsaturated soil modelling [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2023, 34: 100471.
- [35] ZHAN Z Q, ZHOU C, LIU C Q, et al. Modelling hydro-mechanical coupled behaviour of unsaturated soil with two-phase two-point material point method [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 155: 105224.
- [36] FENG K W, HUANG D R, WANG G. Two-layer material point method for modeling soil–water interaction in unsaturated soils and rainfall-induced slope failure [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(8): 2529–2551.
- [37] CECCATO F, YERRO A, GIRARDI V, et al. Two-phase dynamic 物质点法 formulation for unsaturated soil [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 129: 103876.
- [38] TRAN Q A, SOŁOWSKI W. Generalized interpolation material point method modelling of large deformation problems including strain-rate effects - Application to penetration and progressive failure problems [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 106: 249–265.
- [39] 王升,曾鹏,李天斌,等. 土质滑坡失稳、运动及冲击压力物质点法模拟研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1362–1370. [WANG Sheng, ZENG Peng, LI Tianbin, et al. Initiation, movement and impact simulation of soil landslide with material point method [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(4): 1362–1370. (in Chinese with English abstract)]
- [40] WANG D, WANG B, YUAN W H, et al. Investigation of rainfall intensity on the slope failure process using GPU-accelerated coupled 物质点法 [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 163: 105718.
- [41] HE K, XI C J, LIU B, et al. 物质点法-based mechanism and runout analysis of a compound reactivated landslide [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159: 105455.
- [42] LEE W L, MARTINELLI M, SHIEH C L. An investigation of rainfall-induced landslides from the pre-failure stage to the post-failure stage using the material point method [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 764393.
- [43] MOORMANN C, HAMAD F. 物质点法 dynamic simulation of a seismically induced sliding mass [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2015, 26: 012024.
- [44] ALSARDI A, YERRO A. Runout modeling of earthquake-triggered landslides with the material point method [C] // IFCEE 2021. Dallas, Texas. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021: 21–31.
- [45] ALSARDI A, COPANA J, YERRO A. Modelling earthquake-triggered landslide runout with the material point method [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 2021, 174(5): 563–576.
- [46] HE M C, RIBEIRO E SOUSA L, MÜLLER A, et al. Numerical and safety considerations about the Daguanbao landslide induced by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(5): 1019–1035.
- [47] XU X R, JIN F, SUN Q C, et al. Three-dimensional material point method modeling of runout behavior of the Hongshiyuan landslide [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(9): 1318–1337.
- [48] FENG K W, HUANG D R, WANG G, et al. Physics-based

- large-deformation analysis of coseismic landslides: A multiscale 3D SEM-物质点法 framework with application to the hongshiyan landslide [J]. *Engineering Geology*, 2022, 297: 106487.
- [49] FENG K W, WANG G, HUANG D R, et al. Material point method for large-deformation modeling of coseismic landslide and liquefaction-induced dam failure [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 150: 106907.
- [50] BIELAK J. Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, part I: theory [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(2): 817 – 824.
- [51] YOSHIMURA C. Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, part II: Verification and applications [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(2): 825 – 841.
- [52] KOHLER M, STOECKLIN A, PUZZIN A M. A 物质点法 framework for large-deformation seismic response analysis [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, 59(6): 1046 – 1060.
- [53] KOHLER M, HODEL D, KELLER L, et al. Case study of an active landslide at the flank of a water reservoir and its response during earthquakes [J]. *Engineering Geology*, 2023, 323: 107243.
- [54] KOHLER M, PUZZIN A M. Mechanism of co-seismic deformation of the slow-moving La sorbella landslide in Italy revealed by 物质点法 analysis [J]. *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*, 2022, 127(7): e2022JF006618.
- [55] TRAN Q A, GRIMSTAD G, ALI GHOREISHIAN AMIRI S. 物质点法 ICE: A hybrid 物质点法 -CFD model for simulating coupled problems in porous media. Application to earthquake-induced submarine landslides [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2024, 125(5): e7383.
- [56] FERNÁNDEZ F, VARGAS E, MULLER A L, et al. Material point method modeling in 3D of the failure and run-out processes of the Daguangbao landslide [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(7): 4277 – 4296.
- [57] 吴方东, 张巍, 史卜涛, 等. 堆载诱发型土质滑坡运动特征物质点法模拟 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6): 126 – 134. [WU Fangdong, ZHANG Wei, SHI Butao, et al. Run-out characteristic simulation of a surcharge-induced soil landslide using the material point method [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 126 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [58] XIE T C, ZHU H H, ZHANG C X, et al. Modeling strip footings on slopes using the material point method [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(4): 99.
- [59] ZHU H H, XIE T C, ZHANG W, et al. Numerical simulations of a strip footing on the soil slope with a buried pipe using the material point method [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(11): 04023190.
- [60] TRONCONE A, PUGLIESE L, CONTE E. Analysis of an excavation-induced landslide in stiff clay using the material point method [J]. *Engineering Geology*, 2022, 296: 106479.
- [61] GONZÁLEZ ACOSTA J L, VARDON P J, HICKS M A. Study of landslides and soil-structure interaction problems using the implicit material point method [J]. *Engineering Geology*, 2021, 285: 106043.
- [62] NG C W W, WANG C, CHOI C E, et al. Effects of barrier deformability on load reduction and energy dissipation of granular flow impact [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 121: 103445.
- [63] CECCATO F, REDAELLI I, DI PRISCO C, et al. Impact forces of granular flows on rigid structures: comparison between discontinuous (DEM) and continuous (物质点法) numerical approaches [J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 103: 201 – 217.
- [64] WYSER E, ALKHIMENKOV Y, JABOYEDOFF M, et al. Analytical and numerical solutions for three-dimensional granular collapses [J]. *Geosciences*, 2023, 13(4): 119.
- [65] LEI Z D, WU B S, WU S S, et al. A material point-finite element (物质点法 -FEM) model for simulating three-dimensional soil-structure interactions with the hybrid contact method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 152: 105009.
- [66] LEI X Q, CHEN X Q, YANG Z J, et al. A simple and robust 物质点法 framework for modelling granular flows over complex terrains [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 149: 104867.
- [67] CUOMO S, DI PERNA A, MARTINELLI M. Material point method (物质点法) hydro-mechanical modelling of flows impacting rigid walls [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, 58(11): 1730 – 1743.
- [68] LI X P, YAN Q W, ZHAO S X, et al. Investigation of influence of baffles on landslide debris mobility by 3D material point method [J]. *Landslides*, 2020, 17(5): 1129 – 1143.
- [69] ABE K, KONAGAI K. Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method [J]. *Soils and Foundations*, 2016, 56(5): 869 – 888.
- [70] ZHAO Y D, CHOO J, JIANG Y P, et al. Coupled material point and level set methods for simulating soils interacting with rigid objects with complex geometry [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 163: 105708.
- [71] LI X P, YAO J, SUN Y L, et al. Material point method analysis of fluid-structure interaction in geohazards [J]. *Natural Hazards*, 2022, 114(3): 3425 – 3443.
- [72] DI PERNA A, CUOMO S, MARTINELLI M. Empirical formulation for debris flow impact and energy release [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2022, 9(1): 8.
- [73] CUOMO S, DI PERNA A, MARTINELLI M. Analytical and numerical models of debris flow impact [J]. *Engineering Geology*, 2022, 308: 106818.
- [74] KAZMI Z A, KONAGAI K, IKEDA T. Field measurements and numerical simulation of debris flows from dolomite slopes

- destabilized during the 2005 Kashmir earthquake, Pakistan [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2014, 18(3): 364-388.
- [75] WONG T, WEI Y J, JIE Y X. Global sensitivity analysis on debris flow energy dissipation of the artificial step-pool system [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 147: 104758.
- [76] VICARI H, TRAN Q A, NORDAL S, et al. 物质点法 modelling of debris flow entrainment and interaction with an upstream flexible barrier [J]. *Landslides*, 2022, 19(9): 2101-2115.
- [77] XIE X C, CECCATO F, ZHOU M L, et al. Hydro-mechanical behaviour of soils during water-soil gushing in shield tunnels using 物质点法 [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 145: 104688.
- [78] 谢小创, 张冬梅. 基于物质点法的盾构隧道涌水涌砂模拟与应用 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(6): 1045-1056. [XIE Xiaochuang, ZHANG Dongmei. Simulation of water-soil gushing in shield tunnel based on material point method and its application [J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(6): 1045-1056. (in Chinese with English abstract)]
- [79] 张春新, 朱鸿鹄, 李豪杰, 等. 支护压力控制下隧道周围砂土变形破坏物质点法模拟 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(7): 1317-1326. [ZHANG Chunxin, ZHU Honghu, LI Haojie, et al. Material point method simulations of sand deformation and failure around tunnel controlled by support pressure [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(7): 1317-1326. (in Chinese with English abstract)]
- [80] 王曼灵, 李树忱, 周慧颖, 等. 基于改进对流粒子域插值物质点法的隧道大变形分析 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(8): 1632-1643. [WANG Manling, LI Shuchen, ZHOU Huiying, et al. Improved convective particle domain interpolation material point method for large deformation analysis of tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(8): 1632-1643. (in Chinese with English abstract)]
- [81] 王桂林, 余浩, 翟俊, 等. 带裂损隧道在爆炸作用下的二次损伤响应规律 [J]. *高压物理学报*, 2023, 37(5): 197-208. [WANG Guilin, YU Hao, ZHAI Jun, et al. Secondary damage response of cracked tunnels under explosion [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(5): 197-208. (in Chinese with English abstract)]
- [82] TU S Q, LI W, ZHANG C P, et al. Face stability analysis of tunnels in saturated soil considering soil-fluid coupling effect via material point method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 161: 105592.
- [83] CHENG X S, ZHENG G, SOGA K, et al. Post-failure behavior of tunnel heading collapse by 物质点法 simulation [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(12): 2139-2152.
- [84] LI S, ZHANG Y, WU J C, et al. Numerical modeling of pumping-induced earth fissures using coupled quasi-static material point method [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2023, 149(9): 04023065.
- [85] 李克智, 边树涛, 郭晓辉. 应用物质点法实现非常规油气藏水平井压前模拟——以鄂尔多斯盆地杭锦旗区块为例 [J]. *石油地质与工程*, 2023, 37(6): 109-113. [LI Kezhi, BIAN Shutao, GUO Xiaohui. Pre-pressure simulation of horizontal wells in conventional oil and gas reservoirs with material point method: By taking Hangjinqi Block in Ordos Basin as an example [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2023, 37(6): 109-113. (in Chinese with English abstract)]
- [86] LIANG D F, ZHAO X Y, SOGA K. Simulation of overtopping and seepage induced dike failure using two-point 物质点法 [J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(4): 978-988.
- [87] TALBOT L E D, GIVEN J, TJUNG E Y S, et al. Modeling large-deformation features of the Lower San Fernando Dam failure with the material point method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 165: 105881.
- [88] 徐云卿, 周晓敏, 赵世一, 等. 基于B样条物质点法的溃坝流模拟研究 [J]. *应用数学和力学*, 2023, 44(8): 921-930. [XU Yunqing, ZHOU Xiaomin, ZHAO Shiyi, et al. Simulation study on dam break flow based on the B-spline material point method [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, 44(8): 921-930. (in Chinese with English abstract)]
- [89] REMMERSWAAL G, VARDON P J, HICKS M A. Evaluating residual dyke resistance using the random material point method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 133: 104034.
- [90] ZHAO X Y, LIANG D F, MARTINELLI M. Numerical simulations of dam-break floods with 物质点法 [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 175: 133-140.
- [91] 冯晓青, 叶斌, 苗沪生, 等. 基于固液两相耦合物质点法的饱和地基液化数值计算方法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(11): 15-25. [FENG Xiaoqing, YE Bin, MIAO Husheng, et al. Numerical calculation method of saturated ground liquefaction based on solid-liquid two-phase coupling material point method [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(11): 15-25. (in Chinese with English abstract)]
- [92] LIANG W J, ZHAO J D, WU H R, et al. Multiscale modeling of anchor pullout in sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(9): 04021091.
- [93] 高宇新, 朱鸿鹄, 张春新, 等. 砂土中锚板上拔三维物质点法模拟研究 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(2): 295-304. [GAO Yuxin, ZHU Honghu, ZHANG Chunxin, et al. Three-dimensional uplift simulation of anchor plates in sand using material point method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(2): 295-304. (in Chinese with English abstract)]