

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1856

基于计算流体力学-离散元法耦合方法的海底黏性滑坡体运动行为模拟

年廷凯¹, 张 放¹, 郑德凤², 李东阳¹, 沈月强¹, 雷得浴²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 辽宁师范大学 自然地理与空间信息科学重点实验室, 辽宁 大连 116029)

摘 要: 海底滑坡是海洋中常见的一种灾害地质现象, 一旦发生将会对水下基础设施造成破坏, 而目前很少有有关海底黏性滑坡体运动演化行为方面的模拟研究。采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, 简称 CFD) 和离散元法 (discrete element method, 简称 DEM) 建立了描述水与颗粒相互作用的流固耦合模型, 通过引入颗粒间黏聚力模型, 发展海底黏性滑坡体运动演化过程的 CFD-DEM 耦合分析方法, 并开展了多个典型算例的验证分析。在此基础上, 考虑滑体黏性作用和初始速度, 系统地模拟了海底滑坡体的运动学特征 (运动速度和距离) 和形态特征 (滑体长度、宽度、形状等), 并深入探究了滑体运动及演化过程的影响机制。结果表明: 该耦合方法可以较好地模拟再现海底滑坡体的小尺度运动行为, 滑坡体的黏性作用对其运动学特征和形态特征具有显著影响, 初始速度也明显影响了滑体各部位在运动过程中的颗粒流场演化及分布特征。这一成果可为真实海底滑坡的运动演化过程模拟和有效预测提供重要的科学依据。

关 键 词: 海底滑坡; CFD-DEM 耦合; JKR 黏聚力模型; 滑体运动特征; 黏性滑坡体

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 11-3174-11

Numerical simulation on the movement behavior of viscous submarine landslide based on coupled computational fluid dynamics-discrete element method

NIAN Ting-kai¹, ZHANG Fang¹, ZHENG De-feng², LI Dong-yang¹, SHEN Yue-qiang¹, LEI De-yu²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: Submarine landslide is one of the main marine geological disasters. Once submarine slide happens, it will cause serious damage to underwater infrastructures. However, there are few researches on the movement and evolution of submarine landslides, especially considering the viscous effect of submarine landslides. A fluid-structure coupling model describing the interaction between water and particles was established by using computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM), and a cohesive force model was introduced to develop a coupled CFD-DEM analysis method considering the viscous characteristics of sliding body. On this basis, the kinematic characteristics (velocity and distance) and morphological characteristics (length, width, shape, etc.) of the submarine landslide were systematically simulated by considering the viscosity and initial velocity of the landslide, and the influencing mechanism of the evolution process of the landslide movement was investigated in depth. The results show that the coupled method can simulate and reproduce the small-scale movement behavior of the submarine landslide well, the viscous action of the landslide has a remarkable influence on its kinematic and morphological characteristics, and the initial velocity also significantly affects the evolution and distribution characteristics of the particle flow field in each part of the landslide. The results can provide a scientific basis for the evolution process simulation and the effective prediction of submarine landslides.

Keywords: submarine landslide; CFD-DEM coupling; JKR cohesive model; movement characteristics of sliding mass; viscous landslide

收稿日期: 2021-11-03

修回日期: 2022-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42077272, No. 51879036, No. 52079020); 辽宁省兴辽英才计划项目 (No. XLYC2002036)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42077272, 51879036, 52079020) and Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC2002036).

第一作者简介: 年廷凯, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程、工程地质环境与地质灾害领域的科研和教学工作。E-mail: tknian@dlut.edu.cn

1 引言

随着海洋油气资源开发进入深水区, 海洋油气开采井、各类海洋基础、海底管缆系统(含油气管道、海底光缆和电缆)等将面临更多更复杂的海洋地质灾害问题^[1-3]。其中海底滑坡就是一类较为常见的海洋地质灾害, 往往发生在近海三角洲和大陆坡地带, 其规模通常比陆上滑坡大 3~4 个数量级, 破坏性很强, 一旦发生会对水下基础设施造成严重破坏, 甚至引发海啸灾害^[1, 4]。

目前, 海底滑坡已引起各国专家学者的关注, 特别是海底滑坡运动过程的模拟预测已成为当前的研究热点^[5-6]。在分析研究中, 主流的数值模拟方法包括: 有限差分法(finite difference method, 简称 FDM)^[7]、大变形有限元法(large deformation finite element, 简称 LDFE)^[8]、计算流体动力学方法(computational fluid dynamics, 简称 CFD)等网格法^[9-11]、物质点法(material point method, 简称 MPM)^[12-14]等无网格法。利用上述数值模拟方法, 学者们针对海底滑坡的运动过程开展了许多有价值的探索, 如: Imran 等^[7]开发了具有显式有限差分格式的一维数值分析软件 BING, 成功实现了海底滑坡的滑动距离、滑动速度和滑层厚度的实时预测; Gauer 等^[10]采用 CFD 数值方法, 基于 Bingham 模型, 将滑坡体视为一种塑性非牛顿流体, 反演了世界上已知规模最大的 Storegga 海底滑坡的运动过程, 并通过实测滑坡沉积剖面进行了比较验证; 国内学者解秋红等^[11]同样基于 CFD 数值方法, 对苏门答腊岛西北海域的大型海底滑坡的动态运动过程开展模拟分析, 获得了与实际海底滑坡相近的沉积形态和滑动距离; Dong 等^[14]采用 MPM 方法, 模拟了地中海南部的一个真实海底滑坡案例, 研究了海底滑坡的运动形态。上述数值方法, 大多假定滑坡体为单相连续介质, 忽略了海底滑坡运动过程中海水与滑坡体间的水-土耦合交换作用, 难以还原海底滑坡在水环境影响下的真实演进过程, 使得当前基于连续介质理论的数值方法在海底滑坡运动状态的模拟预测方面不够可靠, 难以在实际工程中推广应用^[15]。离散元法不依赖于宏观连续介质假设和本构关系, 它不仅在模拟土体的非连续变形和大变形流动方面具有优势, 更重要的是离散元法可以从颗粒尺度认识土体发生非连续变形与流动的细观机制^[16]。因此, 有必要将连续介质与非连续介质的理论方法相结合^[17], 发展 CFD-DEM 流固耦合分析方法, 模拟海底黏性滑体的运动演化行为。

本文使用开源软件 OpenFOAM、LIGGGHTS 以及耦合模块 CFDEM, 采用离散单元法(DEM)描述滑坡体的颗粒组成^[15], 用 CFD 方法计算环境水的运动及其与颗粒的相互作用^[18-25]。在此基础上, 在颗粒运动方程中引入黏聚力模型, 并耦合开源程序 OpenFOAM, 实现黏性滑体的运动过程模拟, 并拓展至海底黏性滑体的运动学和形态学特征模拟, 这一工作是对现有 CFD-DEM 耦合分析方法的继承和发展, 也为未来深入探究真实海底滑坡的运动和演化过程及灾害预测提供可能。

2 CFD-DEM 方程及模型

2.1 CFD-DEM 方程

流体运动的控制方程为考虑颗粒作用修正后的 Navier-Stokes 方程。其向量形式的质量守恒、动量守恒方程为^[21]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_w) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_w \mathbf{u}_w) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_w \mathbf{u}_w) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_w \mathbf{u}_w \mathbf{u}_w) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \boldsymbol{\tau}) - \mathbf{F}_p + \varepsilon \rho_w \mathbf{g} \quad (2)$$

式中: ε 为孔隙率; ρ_w 为流体密度; $\mathbf{u}_w$ 为流体速度; p 为压力; $\boldsymbol{\tau}$ 为流体黏性应力张量; $\mathbf{F}_p$ 为颗粒和流体间的相互作用力; $\mathbf{g}$ 为重力加速度。

根据牛顿第二运动定律, 颗粒 i 的平动和转动控制方程分别为^[26]

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_{p,i}}{dt} = m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_i \quad (3)$$

$$\mathbf{I}_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_{p,i}}{dt} = \sum_{j=1}^n (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{T}_{rj}) \quad (4)$$

式中: m_i 为颗粒质量; $\mathbf{v}_{p,i}$ 为颗粒 i 的速度; $\mathbf{F}_i$ 为作用在粒子上的总外力^[26]; $\mathbf{I}_i$ 为转动惯量; $\boldsymbol{\omega}_{p,i}$ 为颗粒 i 的角速度; $\mathbf{T}_{ij}$ 和 $\mathbf{T}_{rj}$ 分别为切向力和滚动摩擦产生的力矩。

颗粒和流体间的相互作用力用 $\mathbf{F}_p$ 表示, 其表达式为^[27]

$$\mathbf{F}_p = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} (\mathbf{F}_{D,i} + \mathbf{F}_{LM,i})}{\Delta V} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{F}_{D,i}$ 为拖曳力; $\mathbf{F}_{LM,i}$ 、 $\mathbf{F}_{LM,j}$ 为升力; n_p 为一个计算单元中颗粒数量; ΔV 为一个流体计算单元体积。

CFD-DEM 求解流程如下:

(1) 建立不同工况下滑坡体的 CFD-DEM 水-土耦合计算模型;

(2) 给定初始流场、初始颗粒位置、初始颗粒

速度以及固定的步长;

(3) 在颗粒运动方程中引入黏聚力模型, DEM 求解器计算颗粒的运动位置、速度;

(4) 颗粒的位置和速度信息传递给 CFD 求解器;

(5) 根据速度场与压力场对动量方程离散求解, 然后求解压力修正方程, 对压力和速度进行修正, 迭代直到流场收敛;

(6) 计算流体网格中的流体体积分数和平均颗粒速度;

(7) 求得流体对每个颗粒的作用力, 求解颗粒-流体的动量交换源项;

(8) 考虑空隙率和动量交换源项, CFD 求解器求解流场速度;

(9) 流场收敛后, 进行颗粒相的求解, 即重复步骤 (3) ~ (9) 至模拟结束;

(10) 按上述流程耦合计算土颗粒与海水相互作用过程中的受力特征, 得到黏性滑体在海水中运动的动态变化过程。

2.2 考虑黏聚力模型的颗粒控制方程

当考虑黏聚力时, 作用在颗粒上的总外力 F_i 可表达为^[26]

$$F_i = F_{C,i} + F_{D,i} + F_{LM,i} + F_{CO,i} \quad (6)$$

式中: $F_{C,i}$ 为颗粒间接触力; $F_{CO,i}$ 为黏聚力。

现结合 JKR 模型对式 (6) 中黏聚力值 $F_{CO,i}$ 进行分析。JKR 模型是目前研究中应用最广泛的一类数学模型之一^[28], 其中黏聚力随着接触面积的增加而增大; Johnson 等^[28]假设两个颗粒之间的黏聚力值 $F_{CO,i}$ 由其内在的黏聚能密度 k 和有效接触表面积 S 决定, 即

$$F_{CO,i} = kS \quad (7)$$

式中: k 定义为单位有效表面积上的黏聚力, 即黏聚能密度 (J/m^2); S 为有效接触面积。 k 的表达相对复杂, 其取值可根据经验或参考有关文献^[29-30], 亦或采用简化的 Johnson-Kendall-Roberts (SJKR) 模型中 k 的表达式^[31]:

$$k = \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{3}{16}\pi^2 R(1-\nu^2)^2 / E^2}} P^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中: R 为半径; ν 为泊松比; E 为杨氏模量; P 为单位接触面积上的能量, 可通过数值模拟与试验相结合而得出^[32]。

LIGGGHTS 中 SJKR 模型中有关 S 的表达式为^[33]

$$S = \frac{\pi(\Delta d - R_i - R_j)(\Delta d + R_i - R_j)}{4(\Delta d)^2} \times \frac{(\Delta d - R_i + R_j)(\Delta d + R_i + R_j)}{(\Delta d - R_i + R_j)(\Delta d + R_i + R_j)} \quad (9)$$

式中: Δd 为颗粒 i 和 j 的圆心距; R_i 和 R_j 为颗粒 i 和 j 的半径。

联立式 (7)、(8)、(9), 可获得新的黏聚力表达式 $F_{CO,i}$, 再联立式 (6)、(3), 可得出含有黏聚力模型的颗粒运动控制方程, 从而实现黏性滑体运动的 CFD-DEM 流固耦合模拟。值得注意的是, 这里的黏聚力不同于土力学中黏性土 (黏土、粉质黏土) 的黏聚力, 有关其相关性或换算关系仍需研究。

2.3 模型设置与研究工况

为了有效模拟海底黏性滑体的运动演化过程, 假定位于水下斜坡上的滑块体在自身重力作用下发生坍塌破坏, 继而发生滑动运移, 通过监测滑体的局部运动学参数与堆积范围以获得海底滑坡的运动演化过程与形态特征变化规律。为此, 本文构建模拟计算的原始模型, 如图 1 所示, 设置一长度为 4 m、宽度为 2 m、深度为 1 m 的海底模拟区域, 海床倾角为 5° , 一个体积为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 滑块体位于模拟区一端的流体中, 先发生坍塌破坏, 进而发生水下斜坡的运动。

计算条件考虑 A~F 6 种情况, 详见表 1。其他参数设置为: 颗粒直径为 1 mm、颗粒密度 $\rho_d = 2\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、杨氏模量 $E = 5 \text{ GPa}$ 、摩擦系数 $\mu_p = 0.5$ 、恢复系数 $e = 0.3$ 、水的黏度 $\mu_f = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和密度 $\rho_f = 1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

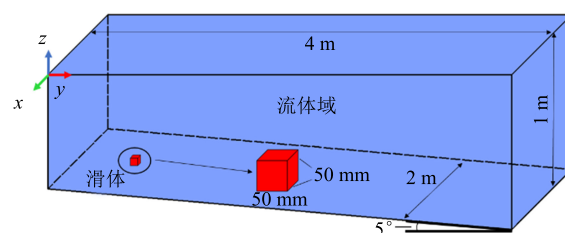


图 1 模型的三维示意图

Fig.1 3D geometry of the model

表 1 计算工况 A~F 的参数设定

Table 1 Control parameter setting of calculation working conditions A-F

计算工况	黏聚能密度 / $(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	初速度 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
A	0.0	0.0
B	2.5	0.0
C	5.0	0.0
D	7.5	0.0
E	7.5	0.5
F	7.5	1.0

3 数值模型验证

针对上述 CFD-DEM 耦合方程及其数值模型，利用 3 个案例进行递进式验证工作。首先对单个颗粒在水中的沉降过程进行模拟，验证耦合作用力计算的准确性，以检验 CFD-DEM 耦合程序的可靠性；随后对颗粒堆积体的坍塌过程进行模拟，堆积体塌陷形成流动并最终达到稳定^[22]，这个过程反映了与滑坡过程相似的堆积、非稳定流动和再堆积等关键环节，因此常被作为滑坡过程的简化验证，用以证明颗粒流-流场双向耦合计算的准确性；最后通过黏性颗粒流运移演化过程的数值模拟，与 Trygve 等^[34]开展的室内模型试验进行对比，以定性验证发展的流固耦合方法在黏性滑体运动过程模拟中的可靠性。

3.1 单颗粒沉降验证

设置 0.1 m×0.1 m×0.5 m 的流体域，直径为 1 mm 的颗粒静止放置在流体域的顶部，如图 2 所示。对单个颗粒在水中的沉降过程进行模拟，验证耦合作用力计算的准确性，以证明 CFD-DEM 耦合程序的可靠性。

数值模拟使用的主要参数列于表 2^[35]，所得计算结果及单颗粒沉降速度-时间关系曲线如图 2 所示。对比分析可见，数值模拟结果与解析解高度吻合。

3.2 无黏性颗粒堆积体坍塌验证

颗粒堆积体的坍塌过程，表现为堆积体塌陷形成流动并最终达到稳定^[22]。这个过程反映了与滑坡过程相似的堆积、非稳定流动和再堆积等关键环节，因此常被作为滑坡过程的简化验证，以验证颗粒流-流场双向耦合计算的准确性。

无黏性颗粒堆积体坍塌，实际上可视为控制方程中黏聚力模型的一种特例，即黏聚能密度参数 k 设置为 0。数值模拟的原始模型如图 3(a)所示^[22]，选取的无黏性颗粒参数详见表 3^[22]。通过计算获得了不同时刻颗粒速度与流场速度的分布，如图 4 所示。

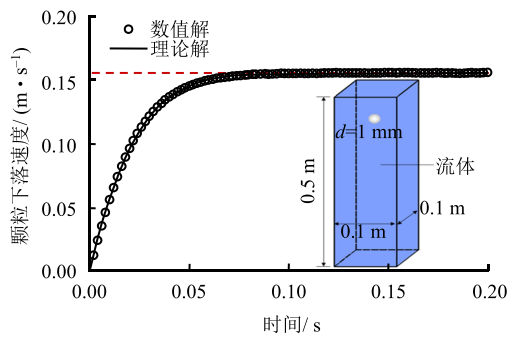


图 2 单颗粒沉降速度-时间关系
Fig.2 Time series of particle sedimentation velocity

表 2 单颗粒沉降模拟参数^[35]
Table 2 Parameters for single particle sedimentation simulation^[35]

颗粒直径 / mm	颗粒密度 / (kg · m ⁻³)	重力加速度 / (m · s ⁻²)	时间步(DEM) / s	流体密度 / (kg · m ⁻³)	流体黏度 / (Pa · s)	时间步(CFD) / s
1	2 500	-9.8	1×10 ⁻⁵	1 000	1×10 ⁻³	1×10 ⁻⁴

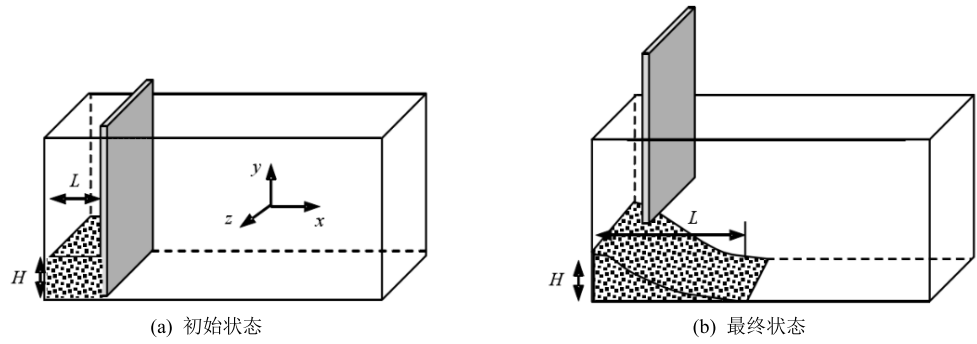


图 3 颗粒堆积体坍塌模型图^[22]
Fig.3 Model of particle accumulation collapse^[22]

表 3 无黏性颗粒堆积体坍塌过程模拟参数^[22]
Table 3 Parameters for non-viscous granular collapse^[22]

颗粒直径 / mm	颗粒密度 / (kg · m ⁻³)	重力加速度 / (m · s ⁻²)	杨氏模量 / GPa	时间步(DEM) / s	摩擦系数	回弹系数	流体密度 / (kg · m ⁻³)	流体黏度 / (Pa · s)	时间步(CFD) / s
1	2 500	-9.8	5	1×10 ⁻⁵	0.5	0.65	1 000	1×10 ⁻³	1×10 ⁻⁴

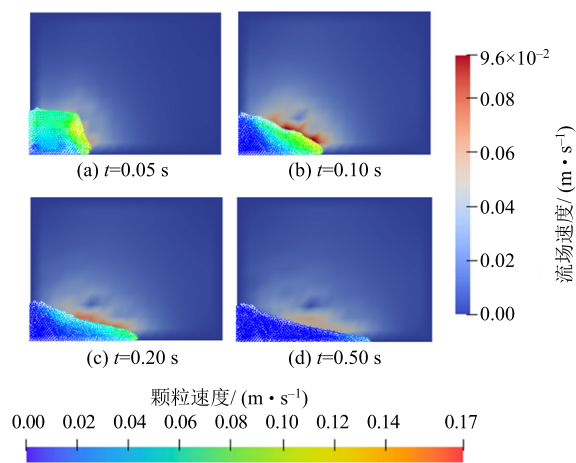


图4 不同时刻颗粒速度与流场速度图

Fig.4 Simulated particle and flow field velocity under different time scale

假定 H 为堆积体纵向高度, L 为堆积体横向长度, 初始堆积体在 x 和 y 方向上尺寸相等(见图 3(a))。在 0.05 s 时, 堆积体的右上角已形成坍塌流动(见图 4(a))。水下坍塌时, 堆积体的右上角水体因颗粒沿斜面滑动而迅速形成涡旋, 而颗粒流前端附近的水体流速最大。在 0.10~0.20 s 时, 颗粒流动主要集中在表面位置, 且没有离散颗粒脱离流动主体的现象。在 0.2 s 时, 由于之前形成的涡旋随颗粒流动而迁移, 使得颗粒体表面微微隆起(见图 4(c)); 在 0.50 s 后, 所有 DEM 颗粒基本稳定(见图 4(d))^[22], 与图 3(b)基本一致。进一步, 绘制了 H/L 随时间的演变关系曲线(见图 5); 对比分析可见, 基于数值模拟得到的颗粒堆积体坍塌形态演变特征与文献解^[22]

吻合较好。

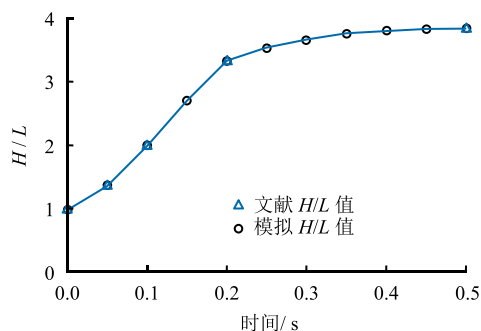


图5 颗粒堆积体坍塌形态演变对比图

Fig.5 Comparison analysis of granular collapse evolution

3.3 黏性颗粒流运移演化过程验证

Trygve 等^[34]开展了有关水下碎屑流的室内大型模拟试验, 研究了碎屑流的前缘动力学和形态特征(见图 6 左侧), 为富含黏土的水下碎屑流的科学研究提供了新的思路。本节将针对黏性颗粒流动的演进过程, 开展数值模拟和模型试验的比较分析, 以验证发展的流固耦合方法在黏性滑体运动过程模拟中的可靠性。

数值模拟采用的原始三维模型如图 1 所示, 相关模拟参数列于表 4。在进行模拟时, 假定初始状态为能够在自重作用下产生坍塌的水下斜坡上的滑块体, 即触发因素作用后, 在重力作用下产生下滑, 考察滑动后其在海底的运动演化过程及形态特征变化, 不考虑在此过程中波浪和底流等带来的影响。

表4 黏性颗粒流动模拟参数

Table 4 Parameters for viscous particles flow

颗粒直径 / mm	颗粒密度 / (kg · m ⁻³)	重力加速度 / (m · s ⁻²)	时间步(DEM) / s	流体密度 / (kg · m ⁻³)	流体黏度 / (Pa · s)	杨氏模量 / GPa	时间步(CFD) / s
1	2 000	-9.8	1×10 ⁻⁵	1 000	1×10 ⁻³	5	1×10 ⁻⁴

考虑黏聚能密度 $k = 2.5 \text{ kJ/m}^3$ ^[29-30], 开展黏性颗粒流动的演进过程模拟, 其结果如图 6 右侧所示, 滑坡体前缘的迁移运动模式可分为 i、ii、iii、iv、v 5 个阶段。进一步将获得的数值模拟结果(见图 6 右侧)与 Trygve 在 i→v 阶段得到的运动演化模式(图 6 左侧, 俯视图)进行对比。分析可见, 滑坡体从 i 阶段开始, 两侧滑体的运动状态逐渐滞后于中间滑体, 产生“小尾形”(见图 6(c)); 随后两侧滑体也逐渐产生颈缩, 直至断裂并与中间的滑体分离(iii→v)。而随着滑坡运动的进行, 由于后部滑体的推挤和水的作用力, 滑体前缘逐渐产生裂缝(见图 6(e)); 滑体前缘形状由初始状态(见图 6(a))

变为“月牙形”(见图 6(b)), 再变为两侧的“小尾形”(见图 6(c)), 再到两侧滑体与主体断裂分离(见图 6(d)、6(e))滑体前缘形状的对比结果较吻合, 说明本文发展的海底黏性滑坡体运动过程分析方法在实际应用中是可行的。

4 海底黏性滑坡体的运动特征模拟

4.1 黏性滑坡体运动特征模拟

在 A-D 工况下(见表 1), 设置不同滑体的黏聚能密度。通过模拟水下滑体在水中的运动过程, 获得了不同黏度滑体的形态特征和运动学特征(运动速度和运移距离)。初始滑块的不同部位用不同

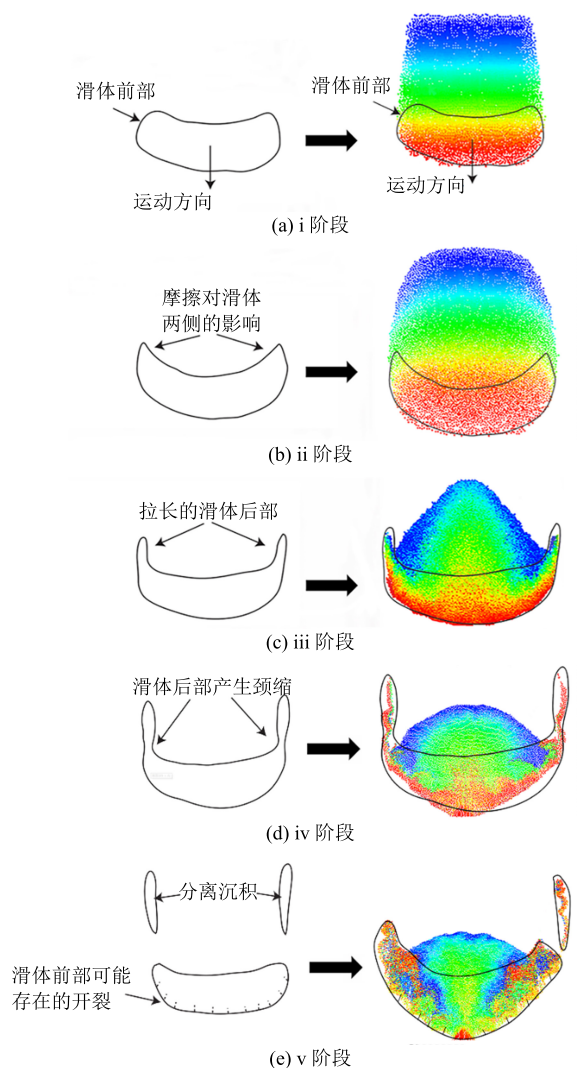


图 6 滑坡体前缘形态对比图(左侧源自 Trygve 等^[34])
Fig.6 Comparison diagram of migration morphology of the front part of the landslide (left part from Trygve et al.^[34])

的颜色表示,如图 7 所示,其中红色代表滑体的前缘部分,绿色代表滑体的中间部分,而蓝色代表滑体的后缘部分。从图 7 可以看出,随着滑体向前移动,滑坡体的侧向宽度不断扩大、速度不断增加。从图 7 还可以看出,滑体两侧开始出现“小尾巴”的形状;两侧的滑体运动滞后于中间滑体;前部的滑体受到后部滑体的推挤,两侧的滑体受斜向后方水的阻力,形成“小尾巴”形。非黏性滑体形态(如形状)更聚集,而黏性滑体形状更长、宽度更窄。还可得出,无黏性滑体的运动速度最大、运移距离最远(见图 8(a)),侧向扩展也最大(图 7(a)和图 8(a))。随着黏性的增加,滑坡体的速度和运移距离逐渐减小。此外,由图 9 可以看出,在一定时间内,滑体的平均滑动距离随时间呈线性增加,而随着黏聚能密度的增加而减小。通过对比分析较短时间内的数值结果(见图 9),发现非黏性滑体比黏性滑体的滑动距离要远不少,可达 8%左右。

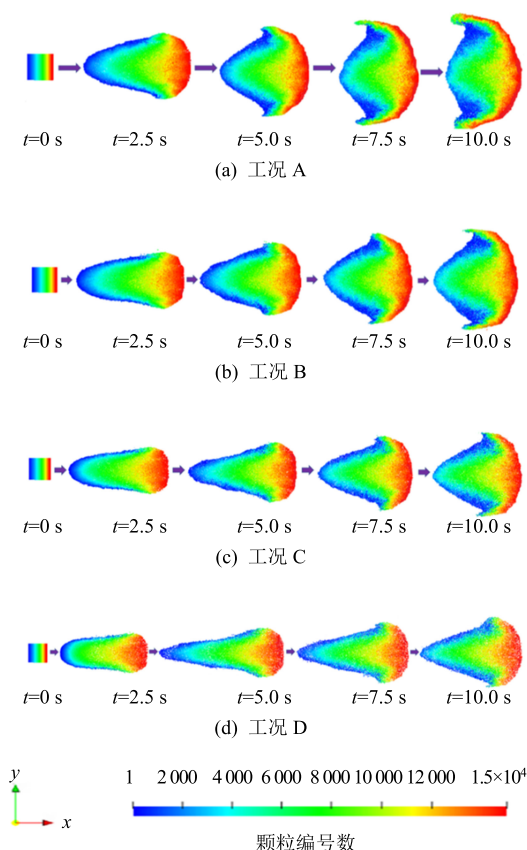


图 7 表 3 中不同工况 A、B、C、D 滑体运动的形态特征
Fig.7 The movement characteristics of sliding mass under different working conditions A, B, C and D

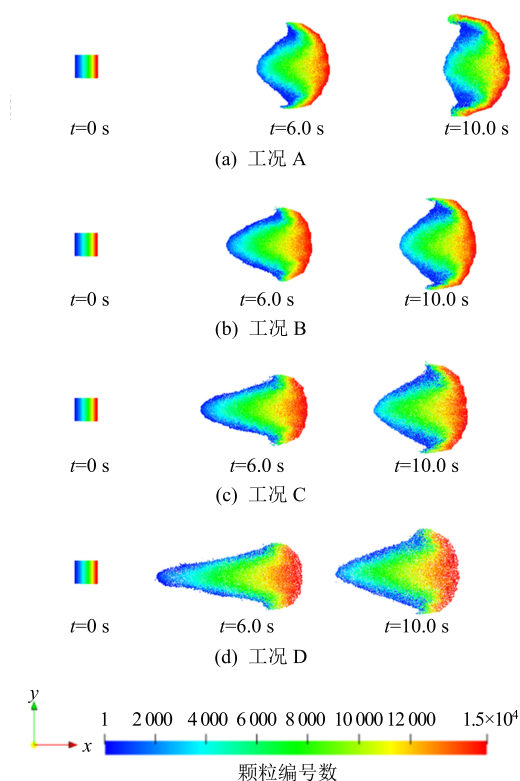


图 8 同一坐标系下不同工况滑体运动学特征对比
Fig.8 Comparison of sliding mass movement distance and velocity under different working conditions A, B, C and D in the same coordinate system

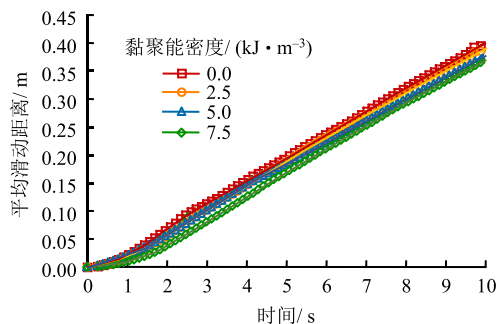


图9 不同黏聚力能密度下平均滑动距离-时间图
Fig.9 Relation between average sliding distance and time under different cohesion energy densities

为了量化描述海底滑坡的形态特征变化, 设滑坡的初始长度和宽度分别为 A_0 和 B_0 , A_t 和 B_t 为分别经过 t 时间后滑体长度和宽度, 如图 10 所示。

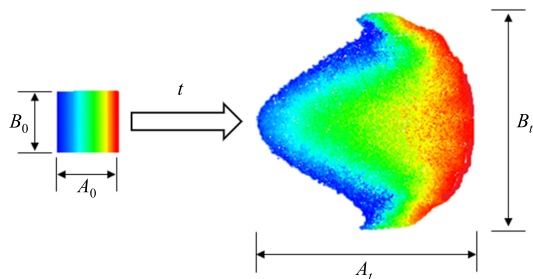


图 10 A_0, A_t, B_0 和 B_t 的设置
Fig.10 Definition of the parameters A_0, A_t, B_0 and B_t

滑体的无量纲长度可定义为: $\lambda_A = A_t / A_0$, 即 t 时刻滑体长度与初始时刻滑体长度的比值, 该比值可以反映出滑体形态特征(如长度)的相对变化。同理, $\lambda_B = B_t / B_0$, 该比值可以反映出滑体形态特征(如宽度)的相对变化; 进而分别建立各工况下 λ_A 和 λ_B 与时间的关系曲线, 得到图 11 和图 12。

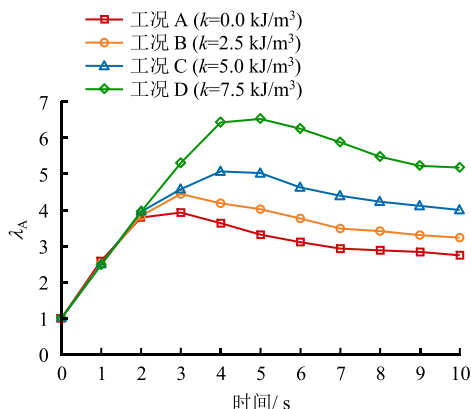


图 11 不同黏聚能密度下 λ_A 值与时间 t 的关系
Fig.11 Relation between the ratio of λ_A and the time under different cohesion energy densities

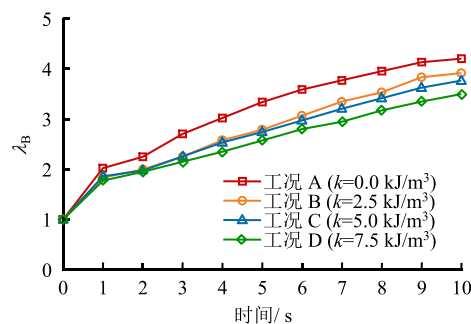


图 12 不同黏聚能密度下 λ_B 值与时间 t 的关系
Fig.12 Relation between the ratio of λ_B and the time under different cohesion energy densities

从图 11 可以看出, 随着时间的增加, λ_A 先增大, 当达到一定值后, 又逐渐减小, 最后趋于稳定。从图 12 可以看出, λ_B 随着时间的增加而不断增大, 初始阶段增幅显著, 后续增幅保持稳定。从图 11 和图 12 还可以看出, 在一定时间内, 随着黏聚能密度的增加, λ_A 相应增大, 而 λ_B 则相应减小。总的来说, 随着时间的增加, 滑体的长度先增大后减小, 趋于稳定; 而滑坡体的宽度则不断增大, 起初显著, 后续保持稳定。随着黏聚能密度的增大, 滑体长度增大, 宽度减小, 运动中的形态特征发生明显改变, 这是因为: 当滑体向前运动时, 内部的黏聚力(颗粒与颗粒间黏结力)便会起到一定的阻滞作用, 起到减缓滑体移速的效果, 故在运动初期表现为滑体前部运动较快, 而后部由于黏性拖动而滞后的现象; 当对比黏聚力大小带来的影响时, 便出现随着黏聚能密度 k 的增大, 滑体长度增大、侧向扩展减小这一现象(见图 11、12)。从图 11 还可以看出, 随着黏聚能密度的增加, 滑体长度达到峰值的时间也在增加。

特别注意到, 在滑坡体运动过程中, 不同位置的滑体运动学特征(如速度、距离等)存在较大差异。为更加直观清晰地分析滑体局部位置的运动学特征, 对滑体后缘、中部和前缘各位置处的运动速度(是指平均速度而非某个特征颗粒的速度)进行实时监测, 监测结果如图 13 所示。滑体各部位的运动速度均表现为随时间先快速增大、到达峰值速度后缓慢减小的基本特征。而中部、后缘部分的滑体最晚达到峰值速度, 这是由于前部滑体的黏性牵引效应以及后部滑体的惯性力(加速路径较长, 其重力势能释放更加充分)所致, 从而可达到更大的平均速度。随着海床的摩擦及滑体与环境水的相互作用, 各部位滑体的速度达到峰值后都逐渐缓慢减小, 其衰减速度呈现出由前至后逐渐增大, 且前缘、中

部、后缘各部位的平均速度存在显著的归一趋势，如图 13 中的整体趋势图和细部放大图所示。

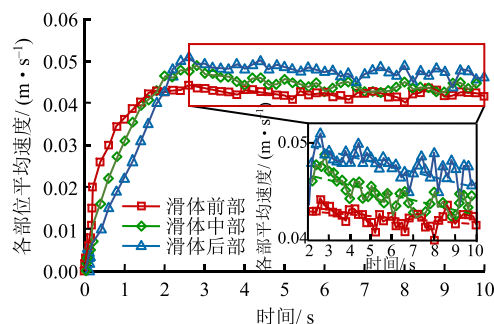


图 13 滑体各部位运动速度-时间关系

Fig.13 Velocity and time relationship of each part of sliding body

进一步地，提取水对滑体各颗粒的拖曳力，并统计、求得各部位颗粒所受拖曳力的合力，即为前、中和后部滑体各部位所受到的水阻力，进而绘制出各部位所受水阻力随时间的变化曲线，如图 14 所示。由图可见，滑体中部、后部所受到的水阻力均小于前部水阻力，这是由于前方滑体迎水面积大而受到了更大的水阻力所致。此外，分析图 14 中曲线初始阶段，在 0.1 s 范围内水阻力就达到了最大值并快速下降，这是由于此时滑体处于塌落阶段，竖向速度较大，故滑体受到的水阻力也大，至塌落结束时水阻力降到最低值；进一步随着时间增加，滑体沿着斜面的速度逐渐增加，受到的水阻力又逐渐增大。

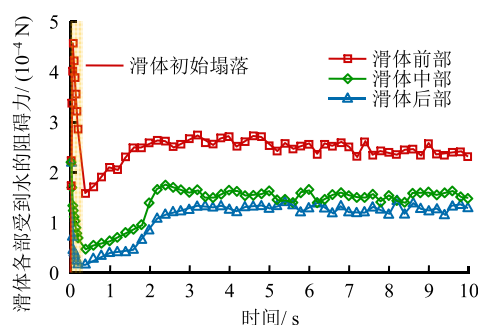


图 14 滑体各部位水阻力-时间关系

Fig.14 Relationships between water resistances and time of each part of sliding body

4.2 具有初速度的黏性滑体形态特征模拟

针对表 1 的 D—F 工况，设置初速度不同的黏性滑体开展运动过程模拟，重点考察形态特征演变，结果如图 15 所示，图中滑体的不同部位用不同的颜色表示。分析图 15 可见，初始速度对黏性滑体运动中的形态特征有很大影响，随着初始速度增加，滑体长度变小、侧向扩展增大，滑体形态发生显著改

变，滑动质量的形状重心变得更加聚集。对比无初速度的滑体（见图 15(a)），可以看出有初速度的滑体运动一段时间后，颗粒混合更加充分，初始状态中处于中部和后部的颗粒也出现在滑动体的前缘部位（见图 15(c)）。初始速度越大，滑体的形状越聚集。通过对比数值分析结果，发现有初速度的滑移距离比无初速度的滑移距离要远 8% 以上（见图 16）。

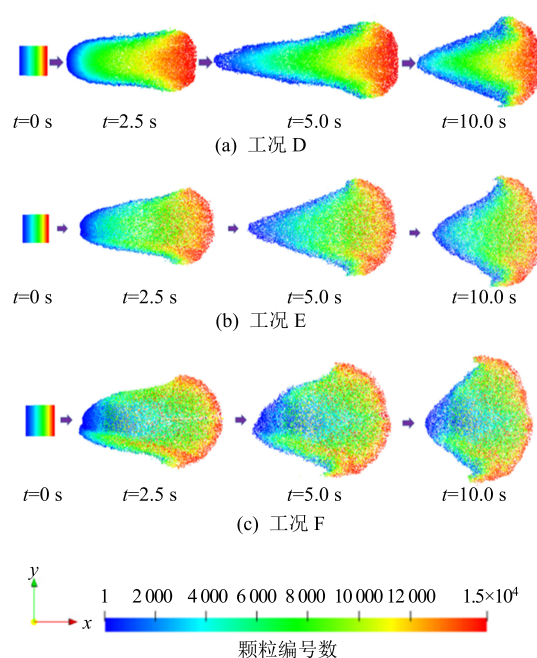


图 15 表 1 中不同工况下滑体运动的形态特征

Fig.15 The morphological characteristics of sliding mass movement at different initial velocities

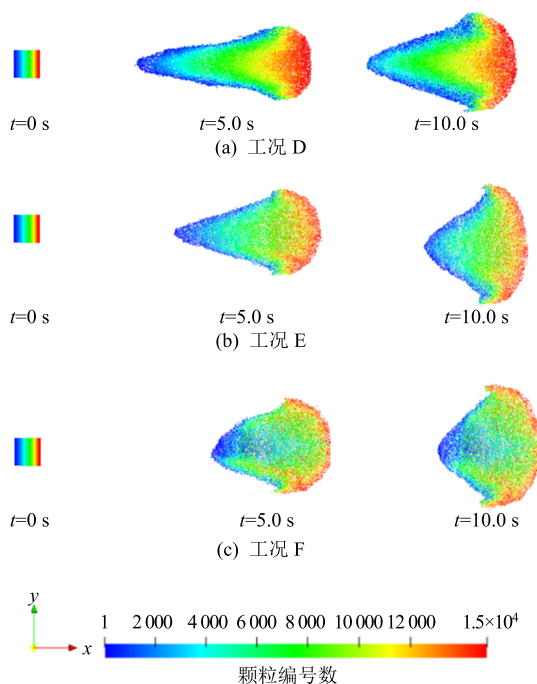


图 16 同一坐标系下不同工况 D、E、F 滑体运动对比

Fig.16 The morphological characteristics of sliding mass movement at different initial velocities

分析图 17, 在运动初始阶段, 具有较大初速度的滑体由于前缘受到更大的水阻力、加之底部摩擦力, 使得滑体处于阻力大于下滑力的状态, 其速度将逐渐减小; 而没有初速度的滑体处于下滑力大于阻力的状态, 则逐渐加速。在运动一段时间后, 由于滑体内部颗粒的碰撞和黏聚力, 速度发生变化。后期总体来说, 滑体的平均滑动距离满足初速度越大、滑动距离越远的一般规律。

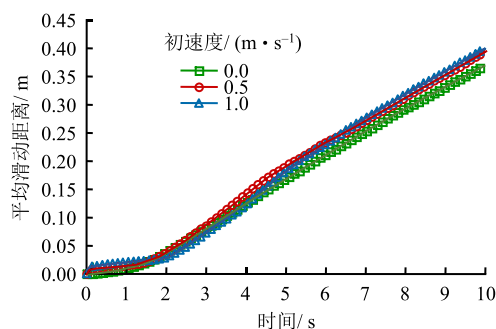


图 17 不同初速度下平均滑动距离-时间图

Fig.17 The relation between average sliding distance and time under different initial velocities

图 18 给出了不同初速度下滑体无量纲长度 λ_A 与时间 t 的关系。分析可见, 某一初速度下, 随着时间 t 的增长, 长度 λ_A 先线性增加, 达到一定值后又逐渐减小后趋于稳定。滑体初速度, 对于某一时刻, 随着滑体初速度的增加, 无量纲长度 λ_A 显著减小。此外, 滑体初速度越大, λ_A 峰值点越低、峰值点出现的越早; 结合图 15 可以进一步识别出滑体的长度减小, 且滑体各部分颗粒混合较均匀。

图 19 给出了无量纲宽度 λ_B 随时间的变化关系。分析可见, 无量纲宽度 λ_B 随时间的增长而不断增加; 特别是随着初速度的增加, λ_B 值也相应增大。总体上描述, 随着滑体初速度的增加, 滑体的长度减少, 而宽度增加。

当滑体初速度变化的情况下, 这个初速度越大, 滑体前部受到的水阻力越大, 其演进就越慢, 进而出现后部推挤前部的现象; 故对比初速度大小带来的影响时, 便出现随着初速度的增大, 滑体长度减小、侧向扩展增大这一特殊现象(如图 18、19 所示)。

4.3 讨论

出现上述这些现象的内在机制, 可理解是滑体内部的黏性作用(含阻滞或牵引)、滑体运动过程中前方的水阻力与后部滑体的惯性力间的平衡关系; 当滑体的黏聚力不变, 初速度从 0 逐渐增加时, 所受到的前方水阻力和后部惯性力逐渐增大, 表现

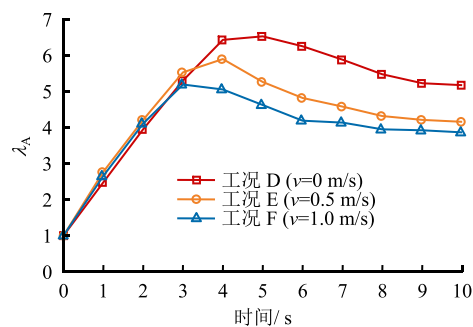


图 18 不同初速度下无量纲长度 λ_A 与时间 t 关系

Fig.18 The relationship between dimensionless length λ_A and the time at different initial velocities

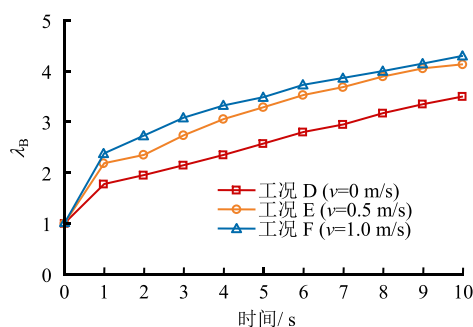


图 19 不同初速度下无量纲宽度 λ_B 与时间 t 的关系

Fig.19 Relationship between dimensionless width λ_B and time at different initial velocities

为后部推挤前部, 故滑体形态表现出长度变小、侧向扩展增大的特征; 当滑体的初速度设置为 0 时, 改变滑体的性质(即不同的滑体), 若滑体黏性越大, 其受到的黏性阻滞作用越大, 表现为前部拉扯后部, 故滑体形态表现出长度增大、侧向扩展减小的特征。

由于真实的海底斜坡往往规模大, 其失稳过程与滑坡的运动路径长, 目前尚缺少监测数据, 而且整个运动演化过程十分复杂, 至今没有统一的框架可以描述。加之大规模的海底黏性斜坡体失稳或滑坡运动, 对于当前的 CFD-DEM 耦合模拟尚存在算力上的困境, 故本文选取较小尺度的室内模型试验尺度为模拟对象, 采用定性与定量化结合方式研究海底滑坡的运动演进过程, 也便于与前人的室内试验进行对比分析。因此, 所建模型是一个海底斜坡块体(并不是大规模海底斜坡体)发生水下坍塌破坏后产生的滑体运动演进过程, 与小尺度海底滑坡具有一致性; 通过提取海底滑坡体运动过程中的任一阶段, 获得相应的运动学参数(如运动速度、距离、前锋范围等)和形态学特征(如滑坡体宽度、形状、厚度等), 进而深入分析即可初步揭示海底滑坡的运动学特征和相关规律, 对实际大规模海底滑坡的模拟分析具有指导意义。未来将加大算力,

研究海底滑坡的不同尺度对其运动学特征的影响。

此外，本文的模型设置与海底快速沉积所触发的滑坡运动模式相似，在后续的改进模型中将考虑地震、波浪流、水合物分解等触发因素对海底滑坡运动行为的影响，或结合上述某种触发机制开展针对性研究。

5 结 论

针对海底黏性滑坡体，建立了描述环境水与土颗粒相互作用的 CFD-DEM 耦合模型及分析方法，并深入探讨了海底滑坡运动行为特征和演化过程。得出以下结论：

(1) 将黏聚力模型引入 CFD-DEM 耦合算法，较好地再现了海底黏性滑体的运动行为和演化过程。

(2) 通过模拟不同黏性滑体的运动行为，揭示了滑体黏度对海底滑坡运动学特征（距离和速度）和形态特征（长度、宽度、形状等）的显著影响。

(3) 本文主要聚焦小尺度海底滑坡体的运动学特征和侧向扩展，未来可关注滑体内部的孔隙压力和颗粒有效压力等压力场演变，特别是考虑更大时空尺度的真实海底滑坡的运动过程模拟。

致谢：感谢程旷博士在流固耦合程序学习中提供的帮助，感谢郭兴森博士在论文撰写过程中提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] NIAN T K, GUO X S, ZHENG D F, et al. Susceptibility assessment of regional submarine landslides triggered by seismic actions[J]. **Applied Ocean Research**, 2019, 93: 101964.
- [2] 修宗祥, 刘乐军, 李西双, 等. 荔湾 3-1 气田管线路由海底峡谷段斜坡稳定性分析[J]. **工程地质学报**, 2016, 24(4): 535-541.
XIU Zong-xiang, LIU Le-jun, LI Xi-shuang, et al. Slope stability analysis of submarine canyon area along pipeline route of Liwan3-1 gasfield[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(4): 535-541.
- [3] 郑德凤, 雷得浴, 闫成林, 等. 基于 Web of Science 数据库的海底滑坡研究趋势文献计量分析[J]. **工程地质学报**, 2021, 29(6): 1805-1814.
ZHENG De-feng, LEI De-yu, YAN Cheng-lin, et al. Global research trends in submarine landslides: a bibliometric analysis based on Web of Science publications[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2021, 29(6): 1805-1814.
- [4] 孙永福, 黄波林, 宋玉鹏, 等. 海底滑坡海啸的颗粒流耦合模型[J]. **岩土力学**, 2018, 39(9): 3469-3476.
- SUN Yong-fu, HUANG Bo-lin, SONG Yu-peng, et al. Granular flow coupling model for tsunami generated by submarine landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 3469-3476.
- [5] FAN N, NIAN T K, JIAO H B, et al. Evaluation of the mass transfer flux at interfaces between submarine sliding soils and ambient water[J]. **Ocean Engineering**, 2020, 216: 108069.
- [6] GUO X S, NIAN T K, GU Z D, et al. Evaluation methodology of laminar-turbulent flow state for fluidized material with special reference to submarine landslide[J]. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, 2021, 147(1): 04020048.
- [7] IMRAN J, HARFF P, Parker G. A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface[J]. **Computers & Geosciences**, 2001, 27(6): 717-729.
- [8] ZHANG W C, RANDOLPH M F, PUZIRIN A M, et al. Transition from shear band propagation to global slab failure in submarine landslides[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2019, 56(4): 554-569.
- [9] NIAN T K, GUO X S, FAN N, et al. Impact forces of submarine landslides on suspended pipelines considering the low-temperature environment[J]. **Applied Ocean Research**, 2018, 81: 116-125.
- [10] GAUER P, KVALSTAD T J, FORSBER C F, et al. The last phase of the Storegga slide: simulation of retrogressive slide dynamics and comparison with slide-scar morphology[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2005, 22(1-2): 171-178.
- [11] 解秋红, 修宗祥, 刘乐军, 等. 苏门答腊岛西北海域大型海底滑坡过程反分析[J]. **工程力学**. 2016, 33(12): 241-247.
XIE Qiu-hong, XIU Zong-xiang, LIU Le-jun, et al. Back calculation of submarine landslide identified in the northwest coast of Sumatra[J]. **Engineering Mechanics**, 2016, 33(12): 241-247.
- [12] DONG Y K, WANG D, RANDOLPH M F. Investigation of impact forces on pipeline by submarine landslide using material point method[J]. **Ocean Engineering**, 2017, 146: 21-28.
- [13] MEI X F, MA G T, HU X W, et al. Simulation of the failure process of submarine landslides on a seabed by coupled MPM[J]. **Journal of Coastal Research**, 2020, 111(Suppl.): 231-237.
- [14] DONG Y K, WANG D, RANDOLPH M F. Runout of submarine landslide simulated with material point method[J]. **Journal of Hydrodynamics**, 2017, 29(3): 438-444.
- [15] 年廷凯, 沈月强, 郑德凤, 等. 海底滑坡链式灾害研究进展[J]. **工程地质学报**, 2021, 29(6): 1657-1675.
NIAN Ting-kai, SHEN Yue-qiang, ZHENG De-feng, et al.

- Research advances on the chain disasters of submarine landslides[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2021, 29(6): 1657-1675.
- [16] 周健, 周凯敏, 姚志雄, 等. 砂土管涌-滤层防治的离散元数值模拟[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 17-24.
ZHOU Jian, ZHOU Kai-min, YAO Zhi-xiong, et al. Numerical simulation of piping-filter prevention in sandy soil by discrete element method[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 41(1): 17-24.
- [17] ZHAO J D, SHAN T. Coupled CFD-DEM simulation of fluid-particle interaction in geomechanics[J]. **Powder Technology**, 2013, 239: 248-258.
- [18] 蒋明镜, 付昌, 贺洁, 等. 胶结型深海能源土升温降压联合分解离散元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2015, 43(10): 1480-1486.
JIANG Ming-jing, FU Chang, HE Jie, et al. Distinct element method simulation of bonded-type methane hydrate bearing sediments exploitation by thermal recovery-depressurization combined method[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2015, 43(10): 1480-1486.
- [19] 彭恺然, 刘红帅, 平新雨, 等. CFD-DEM 耦合模拟中拖曳力模型精度[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1400-1407.
PENG Kai-ran, LIU Hong-shuai, PING Xin-yu, et al. Accuracy of drag force models in the CFD-DEM method[J]. **Journal of Jilin University (Earth Science Edition)**, 2021, 51(5): 1400-1407.
- [20] SHAN T, ZHAO J D. A coupled CFD-DEM analysis of granular flow impacting on a water reservoir[J]. **Acta Mechanica**, 2014, 225(8): 2449-2470.
- [21] MA Z, WANG Y, REN N X, et al. A coupled CFD-DEM simulation of upward seepage flow in coarse sands[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2019, 37(5): 589-598.
- [22] 景路, 郭颂怡, 赵涛. 基于流体动力学-离散单元耦合算法的海底滑坡动力学分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 388-394.
JING Lu, KWOK Chung-ye, ZHAO Tao. Understanding dynamics of submarine landslide with coupled CFD-DEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 388-394.
- [23] CHENG K, WANG Y, YANG Q. A semi-resolved CFD-DEM model for seepage-induced fine particle migration in gap-graded soil[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 100: 30-51.
- [24] 韩祺祺. 循环流化床液固两相及气液固三相的 CFD-DEM 模拟[D]. 天津: 天津大学, 2014.
HAN Qi-qi. CFD-DEM simulation of liquid-solid and gas-liquid-solid circulating fluidized beds[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [25] 李伟一, 钱建固, 尹振宇, 等. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的计算流体力学-离散元模拟[J]. 岩土力学, 2021 (11): 1-11.
LI Wei-yi, QIAN Jian-gu, YIN Zhen-yu, et al. Simulation of seepage erosion in gap graded sand soil using CFD-DEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(11): 3191-3201.
- [26] XU H B, ZHONG W Q, YUAN Z L, et al. CFD-DEM study on cohesive particles in a spouted bed[J]. **Powder Technology**, 2016, 314: 377-386.
- [27] JIANG M J, SUN C, CROSTA G B, et al. A study of submarine steep slope failures triggered by thermal dissociation of methane hydrates using a coupled CFD-DEM approach[J]. **Engineering Geology**, 2015, 190: 1-16.
- [28] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids[C]//Proceedings of the Royal Society of London A—Mathematical, Physical and Engineering Sciences. [S. l.]: [s. n.], 1971.
- [29] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 130-140.
LI Jun-wei, TONG Jin, HU Bin, et al. Discrete element simulation parameter calibration of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil touching component[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2019, 35(6): 130-140.
- [30] THOMAS R, ANDRE K. DEM parameter calibration of cohesive bulk materials using a simple angle of repose test[J]. **Particuology**, 2019, 45: 105-15.
- [31] LU R R, ZHANG L, RICOUX P, et al. Experiments and CFD-DEM simulations of cohesive particles sedimentation in still fluid[J]. **Powder Technology**, 2019, 356: 222-230.
- [32] RABINOVICH Y I, ADLER J J, ATA A, et al. Adhesion between nanoscale rough surfaces[J]. **Colloid Interface**, 2000, 232: 10-24.
- [33] RAMÍREZ-ARAGÓN C, ORDIERES-MERÉ J, ALBA-ELÍAS F, et al. Comparison of cohesive models in EDEM and LIGGGHTS for simulating powder compaction[J]. **Materials**, 2018, 11(11): 2341.
- [34] TRYGVE I, FABIO V, ANDERS E, et al. On the frontal dynamics and morphology of submarine debris flows[J]. **Marine Geology**, 2004, 213(1-4): 481-497.
- [35] LÜ K, MIN F F, ZHU J B, et al. Experiments and CFD-DEM simulations of fine kaolinite particle sedimentation dynamic characteristics in a water environment[J]. **Powder Technology**, 2021, 382: 60-69.