第 53 卷第 12 期
2025 年 12 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 53 No. 12
Dec. 2025

文章编号：0253-374X(2025)12-1867-08　　**DOI**：10.11908/j.issn.0253-374x.25072

基于不可压缩光滑粒子流体动力学的海底地形变化对黏土滑坡运动的影响

靳晓言[1]，石　昊[2,3,4]，刘蓓蕾[1]，黄　雨[1,5]

（1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 长江岩土工程有限公司，湖北 武汉 430010；3. 水利水电工程地质灾害技术创新中心，湖北 武汉 430010；4. 国家大坝安全工程技术研究中心，湖北 武汉 430010；5. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室，上海 200092）

摘要：针对滑坡与环境水体间强流-固耦合模拟，构建了基于不可压缩光滑粒子流体动力学的两相流模型，并通过粒子移位技术与梯度修正方法提升数值稳定性。经水下滑坡试验验证，模型可用于分析地形变化对滑坡运动的影响。结果表明，滑坡体在特征坡面拐角处的远程迁移能力最强，滑移距离较其他工况增加约14%。陡坡拐角易引发流体抬升，促进颗粒扩散与浊流形成，增加基础设施破坏风险。相比无水条件，水下滑坡呈现双阶段运动特征，颗粒-流体动量交换使滑体在平坦区域持续运动，为其超长运移提供了一定解释。

关键词：海底地形变化；不可压缩光滑粒子流体动力学；黏土滑坡；运动特征

中图分类号：P642.22　　**文献标志码**：A

Influence of Topographical Slope Variations on Movement Behavior of Viscous Submarine Landslides Based on Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics

JIN Xiaoyan[1], *SHI Hao*[2,3,4], *LIU Beilei*[1], *HUANG Yu*[1,5]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan 430010, China; 3. Water Conservancy and Hydropower Engineering Geological Disaster Technology Innovation Center, Wuhan 430010, China; 4. National Dam Safety Engineering Technology Research Center, Wuhan 430010, China; 5. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To address the challenges posed by intense hydrodynamic interaction between sliding masses and ambient water in submarine landslide dynamics, this paper developed a coupled two-phase flow (incompressible smoothed particle hydrodynamics) ISPH model incorporating particle shifting and gradient correction techniques to enhance numerical stability. The model was validated against underwater landslide experiments and then applied to analyze the impact of terrain variations on landslide evolution. The results indicate that the landslide exhibit the strongest dynamic performance at the characteristic corner, with the sliding distance increasing by approximately 14% compared to other conditions. Steeper slope changes tend to trigger fluid uplift, promoting particle dispersion and turbidity current formation, thereby increasing the risk of damage to underwater infrastructure. Unlike dry conditions, submarine landslides display a two-stage dynamic behavior, where momentum exchange between particles and fluid sustains continued motion over flat regions, partially explaining long-runout phenomena.

Keywords: topographical slope variations; incompressible smoothed particle hydrodynamics; viscous submarine landslides; movement behavior

海底地形具有显著的地貌多样性，常呈现出陡峭的陆坡、深切的海底峡谷以及坡度突变带等特殊地质构造特征[1]。典型海底陆坡的坡度在1°至10°之间，局部区域如陡坎、凹槽、海山附近的地形坡度可达15°甚至更高[2]。地形起伏对滑坡体的流变响应和碎屑化过程具有显著调制作用[3]，从而影响滑体的运动速度、能量释放路径及最终堆积形态[4-6]。研究地形起伏对海底滑坡运动学参数的影响规律，可为海底管道路由优化提供理论依据，有利于提高对海底滑坡地质灾害的认识。

海底环境复杂，滑坡发生及演化难以直接观测。数值模拟技术因其成本低、效率高、无尺寸效应等优

收稿日期：2025-04-02
基金项目：国家自然科学基金(42120104008)
第一作者：靳晓言，博士生，主要研究方向为海洋工程地质灾害。E-mail：1910361@tongji.edu.cn
通信作者：黄　雨，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为工程地质。E-mail：yhuang@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

势,被广泛应用于海底滑坡研究。数值模拟方法主要分为三类:一是基于离散化思想的计算流体力学-离散元耦合方法(CFD-DEM)[7],该方法虽能精确描述颗粒-流体相互作用,但存在计算效率低和尺度受限的不足[8];二是基于连续介质理论的网格法或背景网格法,包括有限差分法(FDM)[9]、大变形有限元法(LDFE)[10]、粒子有限元方法(PFEM)[11]、计算流体动力学方法(CFD)[12]、物质点法(MPM)[13-14]等,然而海底滑坡体与环境水的强烈相互作用问题涉及大变形和多相流界面处理,网格方法在处理流固耦合界面时存在数值畸变[15];三是无网格粒子法。光滑粒子流体动力学(SPH)方法因其在大变形解析与自由界面捕捉方面的优势,近年已成为海底地质灾害数值模拟研究的重要手段。单治钢等[16]基于SPH算法构建了朱家尖海底滑坡堆积动力学模型,但其研究侧重滑体动力学特征描述,关于滑坡动力演进及其流-固耦合效应的多相作用机理尚未系统阐释;Wang等[17]通过SPH摩擦流变模型分析了环境水、土体固结与侵蚀对滑坡行为的影响;戴自立等[15]建立了SPH多相流海底滑坡模型,探讨了流变参数对滑坡运动特性的影响,并预测了朱家尖滑坡的速度与滑移距离。既有研究成果表明,SPH方法凭借无网格架构,在海洋地质灾害动力学模拟中展现出显著优势。然而,现有的海底滑坡模型多集中于简化的理想化地形(如均匀坡度或平坦地形),忽略了复杂地形对滑坡体运动的影响[12]。此外,标准SPH方法在处理大规模海底滑坡及复杂流体问题时容易产生失真。

为此,本文提出了基于不可压缩光滑粒子流体动力学(ISPH)两相流方法的海底滑坡模拟方法,将滑坡体视为Herschel-Bulkley-Papanastasiou(HBP)非牛顿流体,将环境水视为牛顿流体,该方法不仅增强了流体的不可压缩性,还通过缩短时间步长提高了模拟效率。通过粒子移位技术和梯度修正方法显著提高了模型数值稳定性,水下滑坡试验验证了模型准确性,在此基础上研究了有水和无水条件下,地形起伏对海底黏性滑坡体运动演化过程的影响。

1 ISPH两相流方法

1.1 控制方程

本文将滑坡体视为非牛顿流体,环境水视为牛顿流体,采用两相流方法进行模拟。控制方程通过不可压缩光滑粒子流体动力学(ISPH)算法求解[18],该方法能够准确描述泥石流与环境水的相互作用,控制方程如下:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}=-\rho\nabla\cdot\boldsymbol{u} \\ \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{1}{\rho}\nabla p+\dfrac{1}{\rho}\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}+\boldsymbol{g} \\ \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{u} \end{cases} \tag{1}$$

式中:ρ为流体的密度;$\boldsymbol{u}$为速度矢量;p为流体的压力项;$\boldsymbol{\tau}$为应力张量;$\boldsymbol{g}$为重力加速度。

对于不可压缩流体的动量方程,ISPH方法通过隐式算法求解。首先,预测速度场时忽略压力梯度,随后通过求解Poisson方程修正压力场,确保流体不可压缩性。因此,动量方程计算(式(1))分为两步。

(1)预测步:在不考虑压力梯度的情况下计算预测速度$\boldsymbol{u}_i^*$。

$$\boldsymbol{u}_i^*=\boldsymbol{u}_i^n+\Delta t\left(\frac{1}{\rho}\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}+\boldsymbol{g}-m_j\Pi_{ij}\nabla W_{ij}(t)\right) \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{u}_i^*$为第i个粒子的预测速度;Δt为时间步长;Π_{ij}为人工黏性项,用于维持数值稳定性。

$$\Pi_{ij}=\left(-\frac{2\alpha h}{\rho_i(t)+\rho_j(t)}\cdot\frac{\min\left[\left(\boldsymbol{u}_i(t)-\boldsymbol{u}_j(t)\right)\cdot\left(\boldsymbol{r}_i(t)-\boldsymbol{r}_j(t)\right),0\right]}{\left|\boldsymbol{r}_i(t)-\boldsymbol{r}_j(t)\right|^2}\right) \tag{3}$$

式中:α为人工黏性系数;h为光滑核半径;$\boldsymbol{r}_i(t)$和$\boldsymbol{r}_j(t)$分别为粒子i和粒子j在t时刻的位置。

然后,采用隐式欧拉格式计算预测密度ρ_i^*,密度变化由预测速度场决定

$$\rho_i^*=\rho_i^n-\Delta t\left(\rho\nabla\cdot\boldsymbol{u}_i^*\right) \tag{4}$$

(2)修正步:由于预测步未考虑压力梯度,导致预测速度和密度可能不满足不可压缩条件。因此,通过求解压力Poisson方程修正压力场p_i。

$$\nabla\left(\frac{1}{\rho}\nabla p\right)_i=\frac{\nabla\cdot\boldsymbol{u}_i^*}{\Delta t} \tag{5}$$

详细的压力Poisson方程求解方法可参见文献[18]。为避免过多迭代,时间步长限制公式综合考虑Courant-Friedrichs-Lewy(CFL)时间积分条件、重力驱动和黏性扩散约束,适用于多相流复杂行为。

$$\Delta t\leqslant\min\left(0.1\frac{h}{\|u_{\max}\|},\frac{\lambda_{\max}h}{\|\boldsymbol{g}\|},\gamma\frac{h^2}{\nu_{\max}}\right) \tag{6}$$

式中:$\lambda_{\max}$为与时间步长相关的经验系数,用于控制时间步长的大小;$\nu_{\max}$为最大动力黏度;γ为控制非牛

顿流体扩散影响的系数。

1.2　Herschel-Bulkley-Papanastasiou 模型

为准确描述泥石流在大变形下的应力-应变非线性关系，避免传统 Bingham 及其衍生模型的黏性系数数值发散问题[19-21]，本文采用 Papanastasiou 提出的 Herschel-Bulkley-Papanastasiou（HBP）模型表征泥石流动力特性[22]。

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}=\tau_{\mathrm{y}}\left(1-\mathrm{e}^{-m|\boldsymbol{D}|}\right)+\mu|\boldsymbol{D}|^{n} & |\boldsymbol{\tau}|\geqslant\tau_{\mathrm{y}} \\ \boldsymbol{D}=0 & |\boldsymbol{\tau}|<\tau_{\mathrm{y}} \end{cases} \tag{7}$$

式中：τ_{y} 为屈服应力；$\boldsymbol{D}$ 为应变速率张量，定义为 $\boldsymbol{D}=\nabla u+(\nabla u)^{\mathrm{T}}$；$|\boldsymbol{D}|$ 为应变速率张量的范数；μ 为动力黏性系数；m 为正则化参数；n 为幂律指数，决定流体的剪切稀化（$n<1$）或剪切增稠（$n>1$）行为。

1.3　两相流模型

在不可压缩流体假设下，由于相界面处密度的不连续性和传输性质的剧烈变化，可能导致数值不稳定。为缓解这一问题，采用 Xenakis 等[23]提出的光滑颜色函数定义粒子颜色值，以区分不同流体相并实现界面参数平滑过渡，具体公示如下：

$$F_i=\sum_j f_i W_{ij}\Big/\sum_j W_{ij} \tag{8}$$

式中：F_i 为粒子 i 的光滑颜色函数值；f_i 为相颜色值，对于流体 a，$f_i=0$，对于流体 b，$f_i=1$。

基于光滑颜色函数，两相流界面处的密度 ρ_i 可通过以下公式描述：

$$\rho_i=(1-F_i)\rho_{\mathrm{a}}+F_i\rho_{\mathrm{b}} \tag{9}$$

式中：ρ_{a} 和 ρ_{b} 分别是流体 a 和流体 b 的密度。

1.4　改进措施

传统 ISPH 方法虽然在理论上通过求解压力 Poisson 方程实现了质量守恒，但在实际应用中仍面临两相流界面的密度波动和粒子分布不均问题[24-25]。为了解决该问题，引入粒子移位技术（position shift technique，PST）[25]，具体公式如下：

$$\delta r_i=-D_{\mathrm{shift},i}\sum_j\left[1+R\left(\frac{W_{ij}}{W(\Delta x,h)}\right)^{N}\right]\nabla_i W_{ij}V_j \tag{10}$$

式中：δr_i 为粒子 i 的偏移矢量；$D_{\mathrm{shift},i}$ 为偏移系数，根据 Lind 等[25]的研究，取值 $0.5h^2$，同时粒子偏移量上限 $|\delta r_i|\leqslant 0.2h$；$R$ 和 N 为常数，分别为 0.2 和 4；V_j 是粒子 j 的体积。

传统 ISPH 方法在计算流体梯度时，由于界面物理量不连续，会产生较大误差。Khayyer 等[26]比较了多种 SPH 修正算法，发现梯度修正（GC）方法在提高计算精度和减少非物理数值耗散方面具有显著优势。因此，本文采用 GC 方法改进 ISPH，计算公式如下：

$$\begin{cases} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j}(r_j-r_i)\otimes\nabla W_j^{\mathrm{GC}}(r_i)=\boldsymbol{I} \\ \nabla W_j^{\mathrm{GC}}(r_i)=L_i\nabla W_j(r_i) \\ L_i=\left[\sum_j \frac{m_j}{\rho_j}\nabla W_j(r_i)\otimes(r_j-r_i)\right]^{-1} \end{cases} \tag{11}$$

式中：r_i 和 r_j 分别为粒子 i 和 j 的位置；$\nabla W_j^{\mathrm{GC}}(r_i)$ 为修正后的核函数梯度；$\boldsymbol{I}$ 为单位张量。

2　模型验证

本研究采用 Rzadkiewicz 等[27]经典水下滑坡试验作为基准测试案例来验证 ISPH 模型可靠性。试验装置为 4.0 m（长）×2.0 m（宽）×1.6 m（高）的水槽，其中滑坡体几何尺寸为 0.65 m×0.65 m，置于 45°坡面上（图 1，改自文献[27]）。本研究基于试验几何参数建立 SPH 数值模型，材料参数如下：滑坡体密度设定为 1 950 kg·m^{-3}，水密度取 1 000 kg·m^{-3}。粒子间距为 0.01 m。滑坡体采用 HBP 流变模型模拟，屈服应力和黏性系数分别为 250 Pa 和 0.1 Pa·s；水体采用牛顿流体模型，黏性系数为 0.001 Pa·s，重力加速度为 9.81 m·s^{-2}。

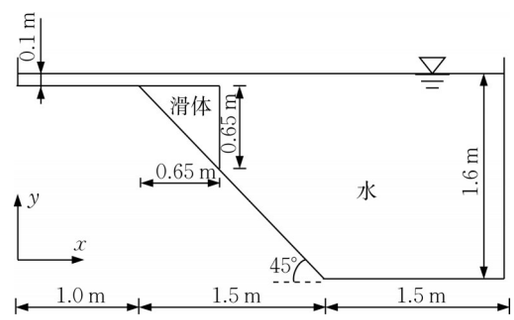

图 1　水下滑坡试验的几何示意图

Fig. 1　Geometric configuration of underwater landslide experiment

图 2 展示了 ISPH 模拟得到的水下滑坡动力学演化过程。在初始阶段（T=0.4 s），滑坡体保持完整几何形态下滑，此时周围水体产生轻微压力扰动，压力场呈现准静态分布特征；随着运动发展（T=0.8 s），滑体表面出现明显的流态化现象；T=1.2 s 时，滑体前缘因水体侵入形成水垫层，产生滑水效应，后缘在重力作用下显著拉长。滑坡体与水体相互作用导致水体压力变化，且滑坡动能传递至水体，前缘上方形成漩涡并产生水面涌浪波。

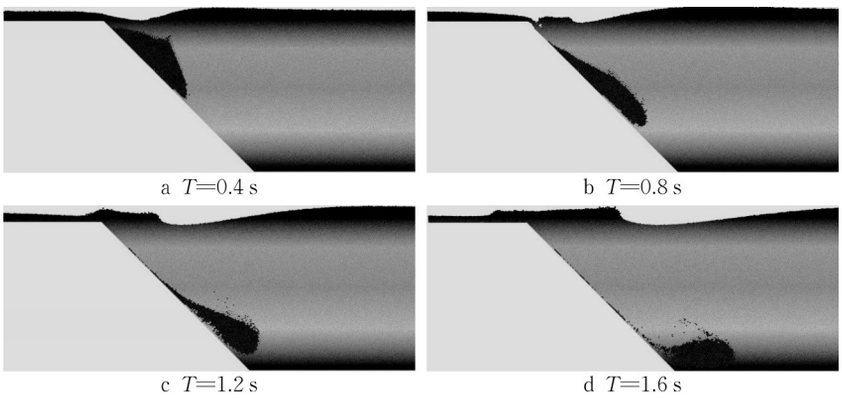

图2 基于ISPH方法的水下土体运动与压力场演化过程模拟结果

Fig. 2 Simulated landslide movement and pressure field evolution at different times based on ISPH method

滑坡体构型(图3)及水面波浪形状(图4)的数值模拟结果与实验吻合良好,证明所建立的ISPH模型能有效模拟水下滑坡运动及其与环境水的相互作用。

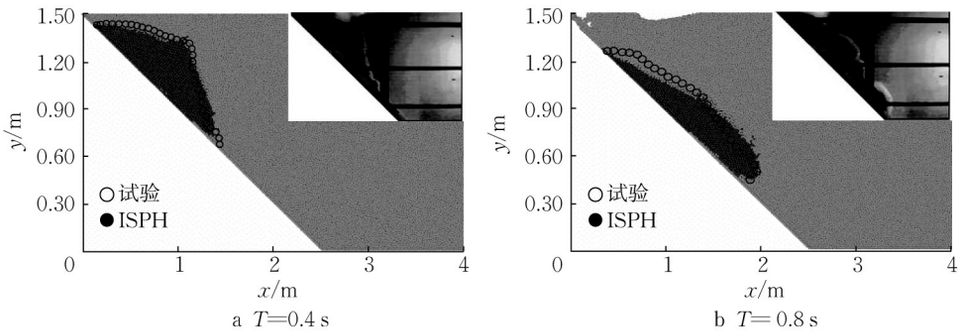

图3 不同时刻水下滑坡体构型

Fig. 3 Underwater landslide dynamics at characteristic instants

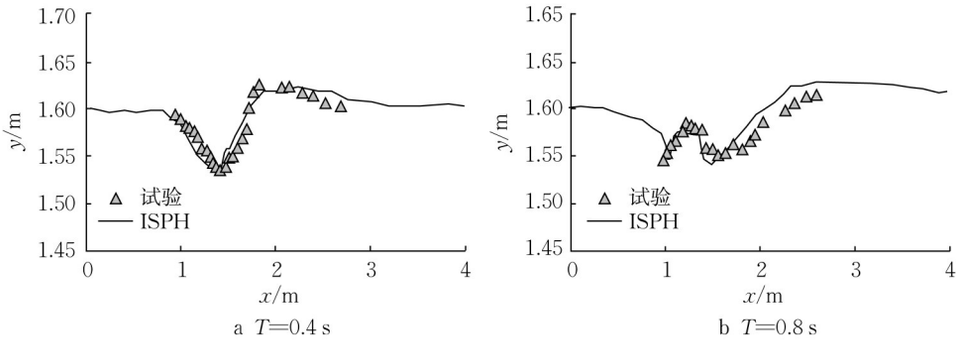

图4 不同时刻水面波浪形状

Fig. 4 Wave propagation at characteristic instants

3 结果分析及讨论

3.1 数值模拟方案

模拟场景如图5所示:左侧为20°倾斜坡面(水平投影长度2.75 m),右侧设置足够长的水平沉积区(10 m)。滑体初始尺寸为0.5 m×0.5 m,采用HBP模型模拟黏土材料的流变特性,参数设置参考Haza等[28]的实测数据:密度ρ为1 134 kg·m^{-3},屈服应力τ_y=3.40 Pa,稠度系数K=4.73 Pa·s^n,流动指数n=0.32。为进一步分析环境水的影响,设置无水条件和有水条件2种工况。通过改变坡面拐角β(定义为坡面折角处相邻坡段之间的夹角),重点研究地形突

变对滑坡体运动演化行为的影响，研究方案见表1。

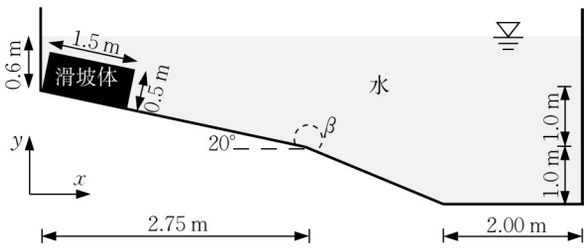

图5　ISPH数值模拟的几何示意图

Fig. 5　Geometric configuration of ISPH model

表1　数值模拟方案设置

Tab. 1　Scheme of numerical simulation

工况编号	β/(°)	是否有水
β_170/S_water	170	水下条件
β_190/S_water	190	
β_220/S_water	220	
β_170/S_dry	170	无水条件
β_190/S_dry	190	
β_220/S_dry	220	

3.2　地形变化对海底黏土滑坡运动的影响

图6展示了不同坡面拐角(170°、190°、220°)对滑坡体动力学行为的差异化影响。数值结果表明：在T=3.0 s时，β为170°和190°工况呈现典型的黏性主导流态，滑体底部紧贴坡面运动，形成稳定的边界层流动，而β为220°工况因陡坡几何效应产生显著的流体分离现象，导致滑体头部抬升高度达到初始厚度的1.5倍，这一流体动力抬升效应源于滑体前缘与水体相互作用产生的动态压力梯度。在越坡临界阶段(T=5.0 s)，β为220°工况表现出独特的滑水效应，两侧的滑体受斜后上方的水的阻力，形成“小尾巴”形；而β为170°和190°工况滑体形态更聚集，表现为前缘隆起，尾部被涡流切割形成多个独立块体。后期演化阶段(T=7.0 s)，β为170°工况因滑体前缘在较缓坡折下方扩展，速度减小，滑体表面环境水形成双涡对结构，滑体呈现典型的伯努利隆起形态，即前缘因水阻力形成弓形隆起，中部因低压区出现凹陷，整体呈波浪状的隆起-凹陷交替形态；β为190°时，滑体表面只存在一个较大的旋涡，尾部涡流推动滑体前进，形成特征性的梭形剖面，后缘高度明显高于前缘；β为220°工况则因陡坡几何效应，滑体运动进入强湍流混合状态，滑体表面颗粒被持续剥离，部分表面颗粒被卷入旋涡，随旋涡逐渐上升并扩散至环境水中并形成浊流。此外，由图7可以看出，一定时间内，滑体的归一化滑动距离(平均滑动距离/初始高度)随时间呈线性增加，但并非随坡面拐角的增加而线性减小。特别值得注意的是，归一化滑动距离分析表明，存在最远滑动距离的特征地形(β=190°)，其滑动距离较其他工况提升约14%。

为更直观地分析滑体局部位置的运动学特征，

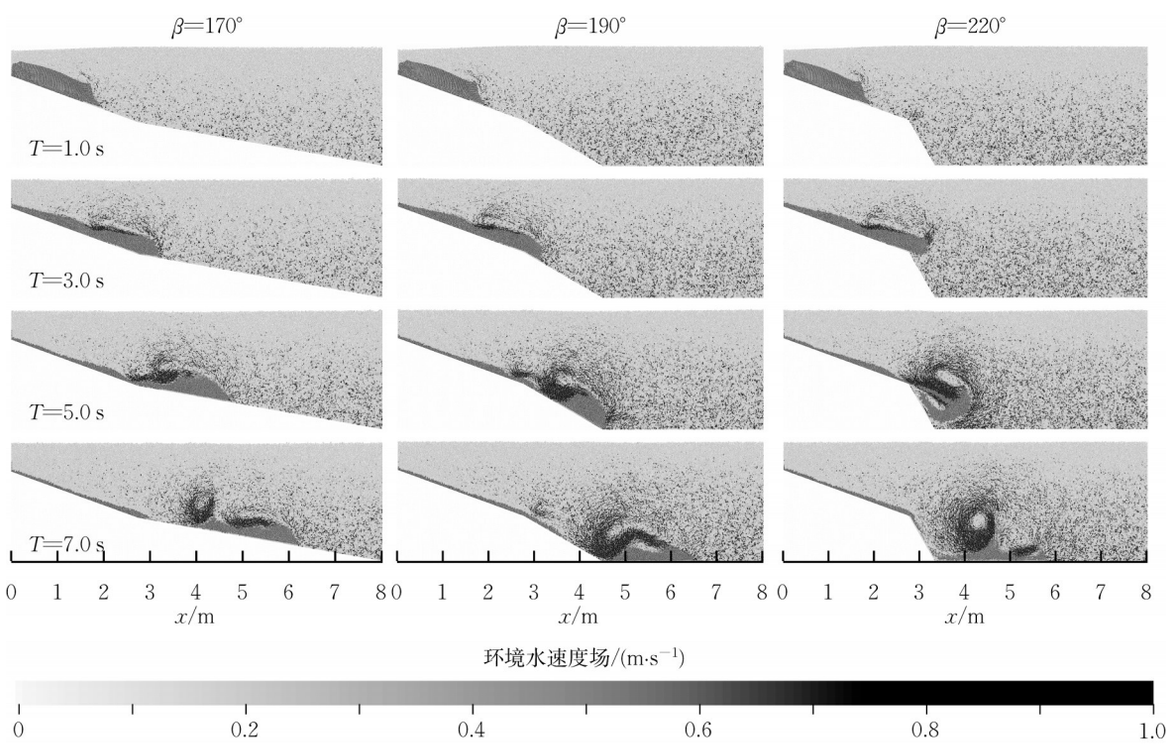

图6　不同坡面拐角的水下滑坡运动演化过程

Fig. 6　Evolution of underwater landslide movement at different topographical slope corners

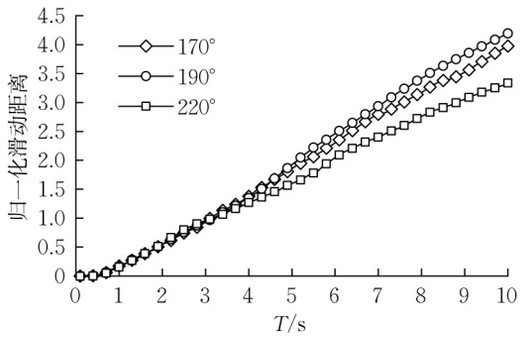

图7 不同坡面拐角下滑体归一化滑动距离与时间的关系

Fig. 7 Relationship between normalized sliding distance and time at different topographical slope corners

本文基于β为190°工况下的SPH模拟数据,将初始滑体沿运动方向均分为5个区段。对前缘(前1/5段)、中段(第3/5段)和尾端(后1/5段)3个特征区域的平均运动速度进行实时监测(图8),发现滑体不同部位呈现出显著差异的运动学演化规律:在0~2 s,前部滑体表现出最快的初始加速度,这主要源于重力势能的高效转化;当地形拐角效应介入后,前部速度骤降45%(从1.21 m·s^{-1}降至0.66 m·s^{-1}),而中部滑体在涡旋推动作用下达到峰值速度2.06 m·s^{-1},超越前部成为运动主导区域。在后续3~10 s,各部位速度演化呈现复杂耦合特征:前部受中部滑体推动抵消了部分底部摩擦和环境水阻力作用,速度衰减率最低;中部因强烈的涡流耗散效应导致速度快速衰减;后部滑体的速度波动则由惯性力和中部土体的黏性牵引效应所致。值得注意的是,运动后期(约7.5 s后),滑体运动至平坦区域,各部位速度呈现明显的归一化趋势。

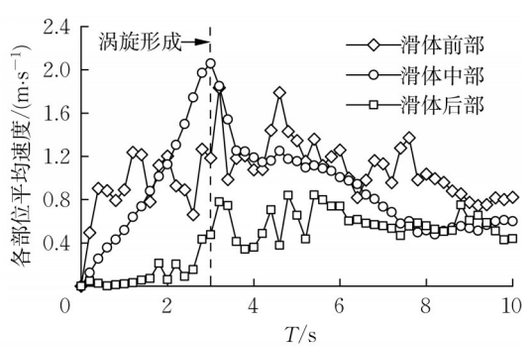

图8 β=190°工况下滑体各部位运动速度与时间的关系

Fig. 8 Relationship between velocity and time of each part of sliding body at β=190°

3.3 水动力环境对滑体运动的影响

由上述分析发现,地形变化通过调控滑坡体-环境水相互作用,进而影响滑体的动力学特征。为了更清晰地揭示环境水的影响,对比分析了坡面拐角β = 190°时无水条件下滑坡体运动过程。图9表明,在无水条件下,滑坡体呈现典型的重力驱动流态,整体流动性更强,速度场分布更加均匀,形态上较为均匀;随着时间推移,泥石流体逐渐扩展并覆盖更大的范围,整体速度逐渐减小,呈现出稳定的沿坡面下滑状态,前缘的扩展性显著,尾部形态较为平缓。相比之下,水下滑坡运动表现出复杂的水-土耦合特征(图6),包括水体阻力集中导致的前缘增厚效应、水体剪切流动引发局部冲刷导致的中段凹陷以及黏土颗粒迁移和旋涡上升流导致的局部隆起等特征。特别值得注意的是,环境水作用使滑坡体流变特性发生本质改变,水下工况出现明显的速度分层。

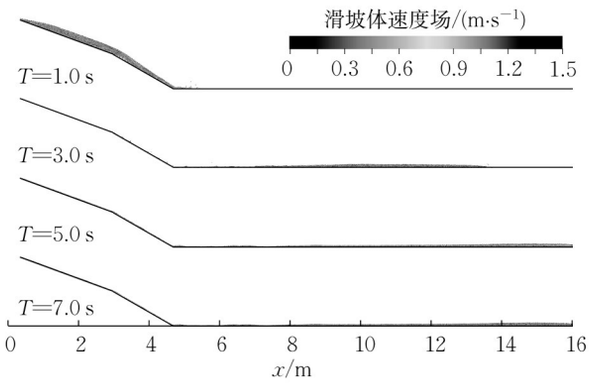

图9 无水条件下滑坡体运动过程

Fig. 9 Movement evolution of dry landslide

有水和无水条件下黏性滑坡体前部速度的时程演化曲线见图10。数值结果表明,在无水条件下,滑坡体呈现典型的重力驱动运动模式,其速度演化可分为3个特征阶段:急剧加速阶段(0~1.0 s),速度在重力主导下快速提升;峰值稳定阶段(1.0~2.2 s),速度维持在5 m·s^{-1}上下;缓慢衰减阶段(>2.2 s),速度呈指数衰减,最终趋于静止。相比之下,水下滑坡体的速度演化展现出显著的双阶段动力特征:受限加速阶段(0~1.5 s),由于水体阻力和浮力效应的共同作用,峰值速度仅为无水条件的20.7%;长程滑移阶段(>1.5 s),水流与滑体间进行持续能量交换,同时由于水体润滑作用减少了基床摩擦能耗,这种独特的"能量输入-耗散"动态平衡机制,维持了水下滑体的持续运动,速度衰减速率显著减缓,为海底滑坡超长运移现象提供了一定解释。

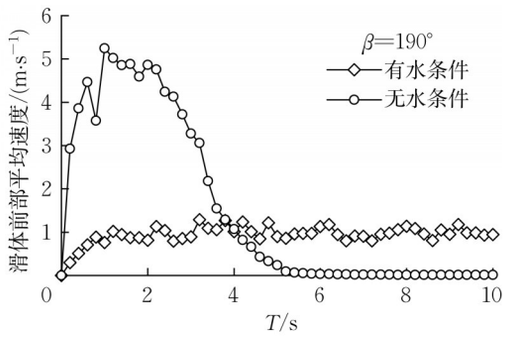

图 10　滑体运动速度与时间的关系

Fig. 10　Relationship between landslide velocity and time

4　结论

针对海底滑坡，构建了基于改进的ISPH多相流数值模型，采用Herschel-Bulkley-Papanastasiou流变模型表征黏土滑坡的非牛顿流体特性，并通过粒子移位技术和梯度修正方法提高模型的压力稳定性，并在水下滑坡试验模拟中验证了其准确性。

揭示了海底地形几何特征对滑坡-水体耦合作用的影响，当坡面拐角为190°时，滑坡体展现出最远运动特性，其归一化滑动距离较坡面拐角为170°和220°工况提升14%，这为海底管线布设和平台选址提供了关键地形参数。工程设计中需重点关注陡坡拐角（>200°）引发的流体动力抬升效应和滑水效应，此类地形易导致浊流生成和颗粒扩散，可能会增加海底基础设施的冲击风险。

有水与无水条件对泥石流形态和运动学特征存在显著差异。环境水通过浮力-剪切力-阻力-润滑的多重耦合效应，使滑体形成独特的“受限加速-长程滑移”双阶段动力特征。颗粒-流体动量交换效应维持了水下滑体的持续运动，为海底滑坡超长运移现象提供了一定解释。

本研究构建的ISPH多相流模型在小尺度海底滑坡运动模拟中表现出良好的适用性，能够预测不同地形条件下滑坡体的迁移与影响范围，可为海底管道布设、海洋平台选址等近海工程灾害预警提供理论依据。此外，本模型还可扩展用于评估滑坡诱发波的影响。

作者贡献声明：

靳晓言：研究选题，数值计算，数据分析，论文撰写。

石　昊：论文撰写与修改。

刘蓓蕾：文献收集。

黄　雨：研究选题，提供基金支持与论文指导。

参考文献：

[1]　刘娅楠，贾超，胡邦琦，等. 基于微地貌特征的西太平洋菲律宾海海底稳定性评价[J]. 海洋地质与第四纪地质，2022，42(1)：214.
LIU Yana，JIA Chao，HU Bangqi，*et al*. Submarine stability evaluation of the Philippine Sea of the Western Pacific based on microgeomorphologic features [J]. Marine Geology and Quaternary Geology，2022，42(1)：214.

[2]　DU P，LI L，KOPF A，*et al*. Earthquake-induced submarine landslides (EQISLs) and a comparison with their terrestrial counterparts：insights from a new database [J]. Earth-Science Reviews，2025，261：105021.

[3]　REICHENBACH P，ROSSI M，MALAMUD B D，*et al*. A review of statistically-based landslide susceptibility models [J]. Earth-Science Reviews，2018，180：60.

[4]　LOWE D R，GUY M. Slurry-flow deposits in the Britannia Formation (Lower Cretaceous)，North Sea：a new perspective on the turbidity current and debris flow problem [J]. Sedimentology，2000，47(1)：31.

[5]　STEVENTON M J，JACKSON C A L，JOHNSON H D，*et al*. Evolution of a sand-rich submarine channel-lobe system，and the impact of mass-transport and transitional-flow deposits on reservoir heterogeneity：Magnus Field，Northern North Sea [J]. Petroleum Geoscience，2021，27(3)：95

[6]　ORTIZ-KARPF A，HODGSON D M，McCAFFREY W D. The role of mass-transport complexes in controlling channel avulsion and the subsequent sediment dispersal patterns on an active margin：the Magdalena Fan，offshore Colombia [J]. Marine and Petroleum Geology，2015，64：58.

[7]　JING L，YANG G C，KWOK C Y，*et al*. Dynamics and scaling laws of underwater granular collapse with varying aspect ratios[J]. Physical Review E，2018，98(4)：042901.

[8]　TAJNESAIE M，SHAKIBAEINIA A，HOSSEINI K. Meshfree particle numerical modelling of sub-aerial and submerged landslides [J]. Computers & Fluids，2018，172：109.

[9]　IMRAN J，HARFF P，PARKER G. A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface [J]. Computers & Geosciences，2001，27(6)：717.

[10]　ZHANG W，RANDOLPH M F，PUZRIN A M，*et al*. Transition from shear band propagation to global slab failure in submarine landslides [J]. Canadian Geotechnical Journal，2019，56(4)：554.

[11]　ZHANG X，MENG J，YUAN S. An implicit nodal integration based PFEM for soil flow problems [J]. Computers and Geotechnics，2022，142：104571.

[12]　GUO X，STOESSER T，ZHENG D，*et al*. A methodology to predict the run-out distance of submarine landslides [J]. Computers and Geotechnics，2023，153：105073.

[13]　DONG Y，WANG D，RANDOLPH M F. Runout of submarine landslide simulated with material point method [J].

Journal of Hydrodynamics(Ser B), 2017, 29(3): 438.

[14] DONG Y, CUI L, ZHANG X. Multiple-GPU parallelization of three-dimensional material point method based on single-root complex [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2022, 123(6): 1481.

[15] 戴自立, 蓝柏森, 李小锋. 基于SPH方法的海底滑坡运动演化过程模拟[J]. 工程地质学报, 2025, 33(1): 213.
DAI Zili, LAN Baisen, LI Xiaofeng. Simulation of the evolution process of submarine landslides based on SPH approach [J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(1): 213.

[16] 单治钢, 高上, 孙淼军, 等. 波浪作用下近海滑坡机制模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊2): 541.
SHAN Zhigang, GAO Shang, SUN Miaojun, *et al*. Phisical model tests and numerical simulations to determine mechanism of offshore submarine landslides under effect of sea waves [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 541.

[17] WANG Z, LI X, LIU P, *et al*. Numerical analysis of submarine landslides using a smoothed particle hydrodynamics depth integral model [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(5): 134.

[18] IHMSEN M, CORNELIS J, SOLENTHALER B, *et al*. Implicit incompressible SPH [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 20(3): 426.

[19] LI W, ALVES T M, REBESCO M, *et al*. The Baiyun Slide Complex, South China Sea: a modern example of slope instability controlling submarine-channel incision on continental slopes [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 114: 104231.

[20] REN Z, ZHAO X, LIU H. Numerical study of the landslide tsunami in the South China Sea using Herschel-Bulkley rheological theory [J]. Physics of Fluids, 2019, 31(5): 056601.

[21] REN Z, LIU H, LI L, *et al*. On the effects of rheological behavior on landslide motion and tsunami hazard for the Baiyun Slide in the South China Sea [J]. Landslides, 2023, 20(8): 1599.

[22] PAPANASTASIOU T C. Flows of materials with yield [J]. Journal of Rheology, 1987, 31(5): 385.

[23] XENAKIS A M, LIND S J, STANSBY P K, *et al*. An incompressible smoothed particle hydrodynamics scheme for Newtonian/non-Newtonian multiphase flows including semi-analytical solutions for two-phase inelastic Poiseuille flows [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2020, 92(7): 703.

[24] XU R, STANSBY P, LAURENCE D. Accuracy and stability in incompressible SPH (ISPH) based on the projection method and a new approach [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(18): 6703.

[25] LIND S J, XU R, STANSBY P K, *et al*. Incompressible smoothed particle hydrodynamics for free-surface flows: a generalised diffusion-based algorithm for stability and validations for impulsive flows and propagating waves [J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(4): 1499.

[26] KHAYYER A, GOTOH H, SHIMIZU Y, *et al*. On enhancement of energy conservation properties of projection-based particle methods [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2017, 66: 20.

[27] RZADKIEWICZ S A, MARIOTTI C, HEINRICH P. Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1997, 123(4): 149.

[28] HAZA Z F, HARAHAP I S H, DAKSSA L M. Experimental studies of the flow-front and drag forces exerted by subaqueous mudflow on inclined base [J]. Natural Hazards, 2013, 68(2): 587.