中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 7 期: 1783 ~ 1795
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题专刊

基于物理机制的地震-滑坡-涌浪-漫坝灾害链情景数值模拟

江汇[1], 张文杰[1], 王进廷[2*], 朱晶晶[1], 杜修力[1]

1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124
2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084
* E-mail: wangjt@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-12-18; 接受日期: 2026-04-16; 网络版发表日期: 2026-07-13
国家自然科学基金项目(批准号: 52339007, 52479114)资助

摘要 强震可能诱发库岸滑坡-涌浪-漫坝灾害链, 是威胁高坝安全的极端灾变过程. 当前研究多聚焦于灾害链的单一环节, 缺乏从震源破裂、地震动传播、滑坡涌浪至坝体响应的全过程直接物理与数值模拟研究, 难以揭示链生灾害的演化机制与动力耦合效应. 本研究构建了基于物理机制的地震-滑坡-涌浪灾害链及大坝动力响应的SEM-FEM-SPH-FEM多尺度数值模拟框架, 耦合谱元法(SEM)、有限元法(FEM)、光滑粒子流体动力学(SPH)等方法. 该框架具体包括以下部分: (1) 震源破裂-滑坡模拟: 基于谱元法获取从震源到局部场址的空间非均匀地震动场, 建立库区局部边坡FEM-SPH动力耦合模型, 实现从震源破裂到空间地震动触发滑坡启动、滑移和堆积的全过程模拟, 克服传统地震滑坡模拟均匀输入假设与预设滑裂面的局限; (2) 滑坡模型重构与映射: 由于采用分阶段模拟策略, 建立基于Alpha-Shape算法与动量守恒原则的滑坡体重构与映射方法, 保证了滑体几何形态与动力学参数的精准传递, 实现震源破裂-滑坡与滑坡-涌浪数值模型的跨模型衔接; (3) 库区滑坡-涌浪-大坝相互作用模拟: 构建滑坡体-库水-大坝SPH-FEM耦合模型, 精细模拟滑坡体入水激发涌浪及其与坝体结构的流固耦合效应. 本文提出的模拟框架首次实现了从震源破裂、空间地震动触发滑坡、滑坡体入水激发涌浪、涌浪传播并冲击大坝结构的灾害链全过程情景数值模拟. 本文进一步应用该框架, 对某典型库区潜在滑坡体在地震作用下的失稳滑动及其触发涌浪-漫坝的全过程进行了情景模拟分析. 本研究可为水电工程枢纽的地震型链生灾害风险评估提供关键技术支撑.

关键词 灾害链, 高坝安全, 地震动模拟, 地震滑坡, 涌浪, 流固耦合

1 引言

强烈地震可能诱发库岸边坡失稳滑动, 滑坡体高速入水生成涌浪, 涌浪沿河道传播并冲击大坝, 可能导致漫坝、溃坝或下游洪水的级联灾害过程[1,2]. 1958年7月9日阿拉斯加M_w8.3级地震诱发利图亚湾超过3000万m^{3}的岩石从近千米的高处整体滑落, 高速坠入峡湾, 在对岸产生高达524 m的涌浪爬高, 并以约

引用格式: 江汇, 张文杰, 王进廷, 等. 基于物理机制的地震-滑坡-涌浪-漫坝灾害链情景数值模拟. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1783–1795
Jiang H, Zhang W J, Wang J T, et al. Physics-based modeling of the earthquake-landslide-surge-dam overtopping disaster chain scenarios (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1783–1795, doi: 10.1360/SST-2025-0419

© 2026 《中国科学》杂志社

160 km/h的速度传播[3], 是有历史记录以来的最高涌浪.

极端地震作用触发的地震-滑坡-涌浪-漫坝灾害链的形成和演化过程具有显著的链式特征和级联效应[4~7]. 开展灾害链全过程直接数值模拟, 是揭示其致灾机理并实现大坝工程灾害链安全风险评估的重要前提. 现有研究工作大多针对该灾害链的单一或部分环节开展, 例如在地震-滑坡或滑坡-涌浪等灾害环节的数值模拟上取得了显著进展. 在地震滑坡数值模拟方面, 研究学者多采用离散元法(DEM)、光滑粒子流体动力学(SPH)、物质点法(MPM)等无网格方法开展地震滑坡模拟, 主要关注局部场地特定工程地质条件下滑坡体孕灾模式与灾变演化力学机制[8~10]. 然而, 目前关于地震滑坡的地震动输入大多采用简化方式, 如施加初始速度或在模型底部施加均匀分布的地震加速度或速度时程[11,12], 难以反映真实地震传播机制和高山峡谷地形局部场地效应, 且往往需预设滑移面, 割裂了地震与滑坡的物理因果关系[13]. 在库区滑坡涌浪模拟方面, 常采用有限体积法(FVM)及SPH等方法[14~16], 其中, 网格法存在网格畸变与自由表面追踪精度不足的固有局限性. 相比之下, SPH等无网格方法在追踪复杂自由表面流动方面具有独特优势. 已有关于库区滑坡涌浪的研究常将坝体结构简化为刚性边界, 仅关注滑坡诱发的水动力过程而忽略坝体动力响应; 或考虑流体与结构的耦合相互作用, 但因计算资源限制, 多为二维或简化三维模型, 难以准确刻画滑坡涌浪与坝体结构的复杂相互作用及涌浪高度分散的自由表面流特征.

尽管针对单一或部分灾害环节的模拟研究已取得重要进展, 但目前仍缺乏能够贯通地震-滑坡-涌浪-大坝响应链生灾害全过程的整体性数值模拟框架. 构建该框架需完整表征从震源破裂、空间地震动场触发边坡渐进溃滑、涌浪-坝体相互作用、大坝结构非线性动力响应等全链条灾害物理过程, 面临以下关键难题: (1) 地震动输入的物理真实性: 诱发地震型链生灾害的通常是超设计基准的极端强震. 基于概率法的经验地震动模型依赖于历史记录统计, 难以考虑断层破裂、传播路径和局部场地条件. 采取基于物理机制的确定性数值模拟方法能更合理的表征地震真实空间分布与作用机制, 是揭示灾害链演化机制并评价工程安全的重要前提. (2) 跨尺度与多物理场耦合的复杂性: 链生灾害全过程具有显著的跨尺度传递效应, 从几百公里的区域地震波传播、数公里范围的边坡动力响应到百米级的坝体结构, 时空尺度跨度大; 同时, 不同介质间存在复杂的动力相互作用, 包括弹性波在岩土介质中的传播(固-固耦合)、滑坡体-库水-坝体动力相互作用(固-流-固耦合), 难以在单一模型中实现统一高效的建模与求解. (3) 数值求解的异构性问题: 由于链式灾害不同环节主导物理机制差异大, 针对不同灾害物理过程采用多模型分阶段耦合策略是一个可行的技术路径, 但由于各灾害环节的最优数值离散与求解方法异构, 因此需要在相对独立的模型间建立高效、准确的耦合方法, 保证边界条件与状态量的一致性传递, 从而保证灾害链动力过程的物理连续性. (4) 大规模仿真的计算效率问题: 实现从区域尺度震源破裂、地震波传播到局部尺度边坡岩土体破碎运移、库水自由表面剧烈变形以及大坝结构破损溃决等强非线性响应的灾害链全过程高精度模拟, 模型自由度可高达百亿, 计算资源需求巨大, 对数值仿真效率提出了极高的要求.

围绕上述问题, 相关研究已取得一定进展. 针对前两个难题, 近年来谱元法(SEM)广泛应用于区域地震动模拟, 能够充分考虑震源机制、传播路径及局部场地效应. He等人[17]和Wang等人[18]提出了基于谱元法的宽频带地震动数值模拟方法, 有效频率能达到10 Hz. Jiang等人[19]进一步提出了SEM-FEM-SPH耦合框架, 无需预设滑移面, 可实现从震源破裂到边坡滑动的全过程模拟, 为地震滑坡模拟研究提供了创新性途径. 针对大规模仿真的计算效率问题, 近年来, 以GPU为代表的高性能计算技术发展迅速, 极大推动了计算力学数值方法的进步, 例如基于GPU加速的开源光滑粒子流体动力学模拟代码DualSPHysics已被广泛应用于复杂自由表面流体动力学求解[20,21]. 在此基础上, Jiang等人[22]提出了一种SPH-FEM耦合框架, 可实现兼顾计算效率和精度的滑坡-涌浪-坝体相互作用分析.

上述进展为灾害链分阶段模拟提供了有效的技术方法, 本文在此基础上构建了基于物理机制的地震-滑坡-涌浪-漫坝灾害链及大坝动力响应的SEM-FEM-SPH-FEM多尺度数值模拟框架. 该框架采取基于物理机制的确定性数值模拟方法, 耦合了地震动传播模拟的SEM模型、边坡失稳与滑动模拟的FEM-SPH模型, 以及涌浪-坝体相互作用模拟的SPH-FEM模型, 实现了从震源破裂到地震诱发滑坡、涌浪、坝体响应的链

生灾害全链条直接数值模拟. 为解决地震-滑坡与滑坡-涌浪-大坝模型的物理一致性衔接问题, 本文发展了一种基于Alpha-Shape算法和动量守恒原则的高精度滑坡体重构与滑体动力参数传递方法, 确保了跨模型参数传递的准确性与动力学条件的连续性. 基于该框架, 本文以某库区河岸典型潜在滑坡体为例, 开展了地震-滑坡-涌浪-漫坝全过程模拟, 评估了地震触发滑坡涌浪对库区的影响.

2　地震-滑坡-涌浪-漫坝模拟框架

本研究提出了SEM-FEM-SPH-FEM耦合框架, 通过基于物理机制的确定性数值模拟方法, 实现了地震-滑坡-涌浪灾害链及大坝动力响应全过程数值模拟. 该框架包括三部分(图1), 具体如下.

(1) 震源破裂-滑坡模拟: 基于SEM模拟区域尺度地震波场, 通过内部子结构法, 将局部场址空间地震动时程转化为等效节点荷载, 局部边坡选取FEM-SPH耦合模型进行表征, 实现从震源破裂到空间地震动触发滑坡启动、滑移和堆积全过程模拟, 并为后续滑坡涌浪模拟提供关键输入参数.

(2) 滑坡模型重构与映射: 由于采用分阶段模拟策略, 震源破裂-滑坡与滑坡-涌浪两个数值模型存在跨模型衔接问题, 需要建立高精度滑坡体重构与滑体动力参数传递方法. 基于Alpha-Shape算法通过SPH粒子云提取几何包络面, 并通过体积归一化处理确保几何一致性, 同时基于动量守恒原则将变形体运动映射为等效刚体运动参数, 实现跨模型滑体动力参数的准确传递, 保证灾害链动力过程的物理连续性.

(3) 滑坡-涌浪-大坝相互作用模拟: 建立滑坡-库

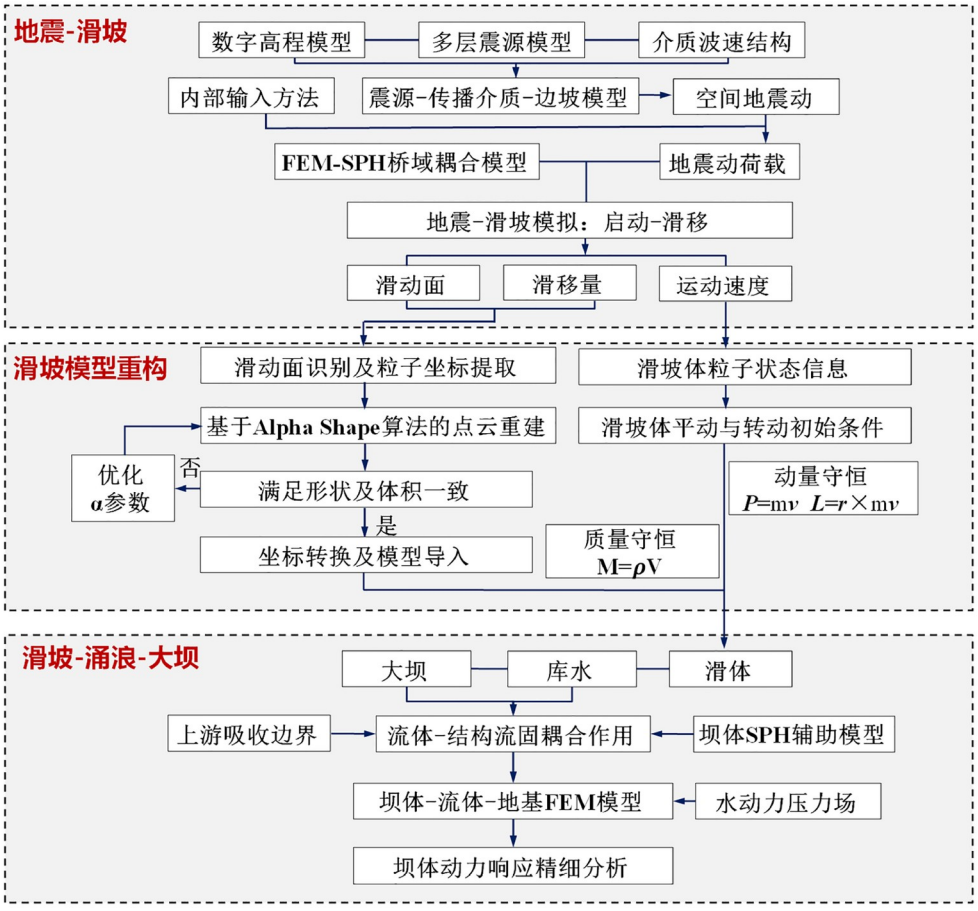


图 1　(网络版彩图)地震-滑坡-涌浪-漫坝灾害链数值模拟方法

Figure 1　(Color online) Numerical simulation framework for earthquake-landslide-tsunami-dam overtopping hazard chain.

水-大坝SPH-FEM耦合模型，模拟滑坡体入水、涌浪的产生与传播的过程, 以及涌浪与大坝相互作用.

2.1 地震-滑坡数值模拟

震源破裂-滑坡的数值模拟思路如下：采用基于SEM的确定性地震动数值模拟方法模拟从震源破裂到局部场地的地震波传播过程，生成作用于局部峡谷的真实空间分布的地震动场. 为了模拟地震荷载作用下局部边坡的启滑过程，采用内部子结构法将自由场地震动时程转化为等效地震荷载施加到局部边坡有限元模型的三层内部子结构节点上[23,24]. 模型的截断边界处施加等效粘弹性边界单元进行散射波吸收[25,26].

为了模拟强震作用下边坡大变形滑动过程，建立边坡FEM-SPH桥域耦合模型，实现强震作用下边坡从小变形到大变形破坏全过程仿真. 边坡潜在大变形区域采用SPH模型表征，外部小变形区域采用FEM模型表征，并作为区域尺度模型与局部尺度边坡模型之间的过渡区域，同时便于施加等效地震荷载. 通过引入FEM和SPH模型的重叠区域，实现了两种不同数值方法的平滑耦合. 该框架耦合区域尺度的地震波传播与局部尺度的边坡大变形过程，能够考虑地震动的空间非均匀性, 并自动生成滑移面.

该方法耦联区域尺度地震波传播与局部尺度的边坡大变形破坏过程，可用于揭示地震波传播-场地响应-滑坡的动力耦合机制. 关于该框架的具体验证可参考Jiang等人[19]的相关研究. 值得注意的是，本节所介绍的地震-滑坡模拟SEM-FEM-SPH框架是本文总体SEM-FEM-SPH-FEM耦合框架的一个关键组成部分，本文将在该地震-滑坡模型基础上，耦合涌浪-大坝SPH-FEM模型，并结合高精度滑体参数传递方法，从而将模拟对象从单一灾害环节拓展至“地震-滑坡-涌浪-大坝”的全灾害链过程, 如图2所示.

2.2 滑坡模型重构与映射

本研究中, 表征从震源破裂到边坡滑动的地震-滑坡模型和滑坡-涌浪-大坝流固耦合模型为两个相对独立的模型, 为实现两阶段跨模型参数的无缝衔接, 本文提出一种高精度滑坡体重构映射方法，实现两阶段滑坡体模型的统一表征，保证几何、质量与动量的一致性. 该方法主要包括两个方面: (1) 基于Alpha-Shape算法的滑体几何重构; (2) 基于动量守恒的滑体动力学参数映射.

2.2.1 基于Alpha-Shape算法的滑体几何重构

为精确表征滑坡体与流体的相互作用界面，本研究采用基于Delaunay三角剖分的Alpha-Shape算法从SPH粒子点云中重构非凸的包络几何外形. Alpha-Shape算法的核心思想是对点云的Delaunay三角剖分结果进行尺度相关的筛选. 滑坡体重构具体流程如下.

(1) Delaunay三角剖分：首先，对滑坡体离散的SPH粒子集进行三维Delaunay四面体剖分. 该过程将生成一个由四面体构成的、覆盖粒子点云凸包的空间填充网格.

(2) α尺度筛选：遍历Delaunay剖分产生的每一个四面体, 计算其外接球半径R. 根据预设的尺度参数α, 执行筛选规则: 若$R>\alpha$, 则判定该四面体对应的局部尺度超出重建分辨率阈值，予以剔除; 若$R\leqslant\alpha$, 则保留该四面体参与构成滑坡体包络面. 通过将α值与SPH粒子平均间距Δd关联, 可以有效地捕捉滑坡体表面形态.

(3) 表面提取: 所有被保留的四面体共同构成了一个能反映真实凹凸细节的非凸几何体. 该几何体的外边界, 即为能够精确描述滑坡体形态的重构表面.

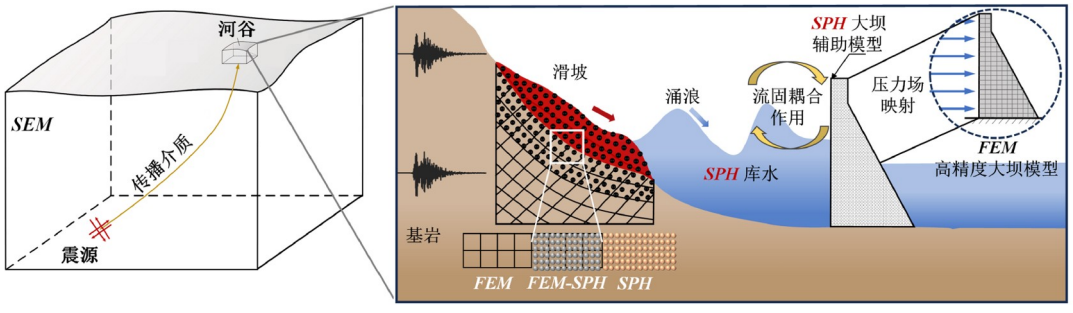


图 2 (网络版彩图)地震-滑坡-涌浪-大坝响应全过程数值模拟示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of earthquake-landslide-tsunami-dam simulation.

为了获得形状及体积一致的等效滑坡体，需要对生成的三角网格顶点进行以质心为基准的缩放变换，坐标缩放系数如下式所示:

$$S=\left(\frac{V_{\mathrm{sph}}}{V_{\mathrm{mesh}}}\right)^{1/3}, \tag{1}$$

式中，V_{sph}为原始滑坡体SPH粒子的总体积，V_{mesh}为重构滑坡体体积.

2.2.2　基于动量守恒的滑体动力学参数映射

为实现地震-滑坡和滑坡-涌浪模型的有效衔接，需建立跨模型的滑体动力学映射机制：选取滑体接触水面瞬时的临界时刻为状态传递基准，基于动量守恒原则确保两模型间滑体运动状态的物理一致性. 具体可采取两种思路：其一，两个模型选取一致的滑体本构，并一一映射滑体粒子的运动参数；其二，针对未发生大规模破碎或流态化的整体性岩质滑坡，当其宏观动能远大于内部变形耗散能时，则可将滑体入水后运动合理简化为绕轴转动的刚体运动，这也是一种适用于工程评估的偏于安全的简化策略. 具体映射过程如下.

1) 状态提取: 提取地震滑坡模型中滑坡体全部粒子的状态信息. 对任意一个粒子i，提取其关键状态信息包括质量m_i、位置$\mathbf{r}_i$及速度$\mathbf{v}_i$.

2) 状态映射: 重构等效刚性滑坡体平动和转动速度可通过动量守恒原则计算.

(1) 线动量守恒

重构滑坡体刚体平动速度$\mathbf{v}_{\mathrm{c}}$由下式确定:

$$\mathbf{v}_{\mathrm{c}}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N}m_i\mathbf{v}_i, \tag{2}$$

其中，M为滑坡体质量，N为地震滑坡模型中滑坡体总粒子数，m_i和$\mathbf{v}_i$分别为第i个粒子的质量与速度.

(2) 角动量守恒

地震滑坡模型中滑坡体对质心位置$\mathbf{R}_{\mathrm{c}}$的总角动量如式(3)所示:

$$\mathbf{L}=\sum_{i=1}^{N}\left[(\mathbf{r}_i-\mathbf{R}_{\mathrm{c}})\times m_i(\mathbf{v}_i-\mathbf{v}_{\mathrm{c}})\right], \tag{3}$$

式中，$\mathbf{R}_{\mathrm{c}}$为滑坡体质心的位置矢量，$\mathbf{L}$为总角动量.

根据重构滑坡体刚体的等效几何特征计算其转动惯量张量$\mathbf{I}$，则该等效刚体的角速度$\boldsymbol{\omega}$由下式确定:

$$\boldsymbol{\omega}=\mathbf{I}^{-1}\mathbf{L}, \tag{4}$$

该转动轴的空间方位由角速度方向决定，其具体位置由下式确定:

$$\mathbf{R}_{\mathrm{axis}}=\mathbf{R}_{\mathrm{c}}+\frac{\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{v}_{\mathrm{c}}}{\|\boldsymbol{\omega}\|^2}. \tag{5}$$

2.3　滑坡-涌浪-大坝数值模拟

本文采用SPH-FEM耦合方法对滑坡-涌浪冲击大坝灾害链全过程进行数值模拟研究. 首先，采用统一SPH框架建立滑坡-库水-大坝模型，其中滑体模型基于前述滑坡体重构方法获得其几何形态与运动参数. 流体运动和辅助结构响应均通过SPH粒子进行描述. 流体和结构的耦合通过动态边界条件进行实现[27]. 当流体与结构相互作用时，结构粒子作为一种特殊的动态边界粒子受流体粒子作用力的驱动并更新速度与位置. 结构粒子采用双密度方法，固有固体材料密度用于动量方程计算加速度，虚拟流体动力密度遵循连续性方程以准确地表示流体施加的水动力. 以上SPH框架在开源SPH代码DualSPHysics v5.2中实现，该代码针对GPU加速进行了优化，从而显著提高了计算效率.

为进一步分析涌浪作用下坝体的非线性动力响应，建立坝体高精度有限元子结构模型. 将基于统一SPH框架提取的涌浪冲击坝面时空压力场荷载映射到坝体-库区系统的高精度有限元模型中，进而开展流固耦合作用下坝体动力响应的精细化分析. 在统一SPH-FEM耦合方法中，统一SPH框架可有效捕捉双向流固耦合作用及复杂自由表面流动特性，同时耦合FEM模型开展结构精细动力响应分析. SPH-FEM耦合框架的详细描述与验证可参考Jiang等人[22]的相关研究.

3　灾害链模拟典型案例与数值模型

为实现地震-滑坡-涌浪-大坝灾害链全过程模拟，本节基于前述耦合框架，依次建立了区域尺度的地震动模拟数值模型、局部库区地震-滑坡模型以及滑坡-涌浪-大坝模型.

3.1　研究区域库岸滑坡概况

本研究区库区内分布有两个潜在滑坡体，本文针对特定地震情景，应用所提框架模拟分析两个滑坡体

在地震作用下同时入水所引发的涌浪传播过程及其对大坝的漫坝影响. 研究区域近坝库岸存在着两个潜在滑坡, 分别为1#和2#. 1#滑坡位于库区左岸, 堆积体大部分分布于现有河床两岸, 部分残留于左岸岸坡. 水库蓄水后, 滑坡体前缘部分区域也将被淹没. 2#滑坡同样位于库区左岸, 前缘地形较陡, 中部及后缘相对平缓, 潜在滑坡体积约为2000万m^3. 水库蓄水后, 滑坡体前缘部分区域将被淹没.

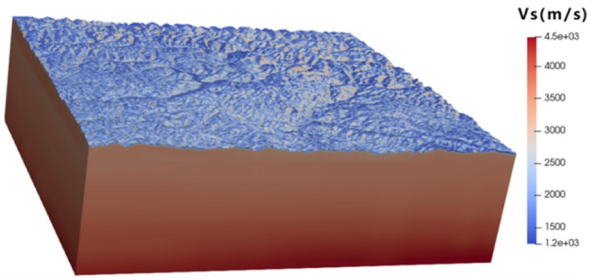


图 3 (网络版彩图)库区区域波速结构

Figure 3 (Color online) Regional velocity structure around the dam site.

3.2 区域地震动模拟数值模型

本文地震动模拟的SEM模型采用Wang等人[18]的成果. 模型计算范围为东西方向220 km, 南北方向197 km, 竖直方向60 km, 模型截断边界处采用Stacey边界吸收外形波. 采用三维波速结构来描述包括P波波速、S波波速和密度等介质参数, 如图3所示. 地形数据采用精度为30 m的数字高程, 地表节点间距约50 m, 总自由度约176.9亿, 可模拟最高频率为6 Hz, 计算步长0.001 s, 总时长55 s. 本研究采用SEM模拟获得的滑坡区地震动时程作为边坡滑动分析的地震荷载, 选取地表自由场峰值地面加速度(PGA)与50年超越概率10%基岩水平加速度峰值相近的地震动数据, 进行情景分析. 如图4所示, 地震动PGA为0.29 g, 持续时间55 s.

3.3 库区局部数值模型

3.3.1 库区地震滑坡模型

采用12.5 m分辨率高精度高程数据, 建立库区滑坡三维FEM-SPH动力耦合模型, 整体模型尺寸约11.9 km×9.24 km×2 km. 如图5所示, 库区左岸的1#和2#两个潜在滑坡体均采用SPH粒子进行离散, SPH粒子间距为14 m. 潜在滑坡体周围区域采用FEM单元离散, 网格尺寸为100 m. 模型共包含3580114个六面体单元, 1#、2#滑坡体SPH粒子数分别为426348和309604. 滑坡体采用Mohr-Coulomb本构模型, 滑坡体及基岩的材料参数列于表1. 计算总时间为100 s, 时间步长为9.82×10^{-3} s. 初始荷载考虑自重作用. 地震动输入直接采用SEM模拟结果, 通过内源输入将地震动自由场施加于FEM区域内部子结构, 边界采用等效粘弹性单元吸收反射波.

3.3.2 滑坡体模型重构

基于3.3.1节建立的地震滑坡模型, 可获得特定地震情景下失稳滑体的空间分布与运动状态, 如图6所示. 为了确保地震滑坡模拟中的几何信息能够准确传递至后续的滑坡-涌浪-大坝耦合模型, 采用本文提出的方法对滑动面内所有粒子点集进行滑坡体重构. 图6

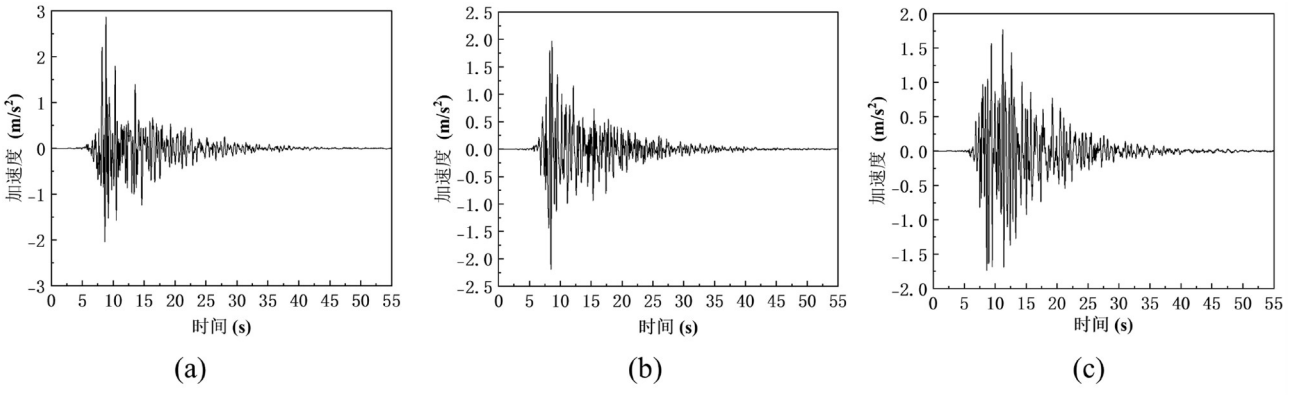


图 4 库岸地震滑坡分析的自由场加速度时程. (a) 南北向地震动; (b) 东西向地震动; (c) 竖向地震动

Figure 4 Free-field acceleration time history for coseismic landslide analysis. (a) North-south seismic motion; (b) east-west seismic motion; (c) vertical seismic motion.

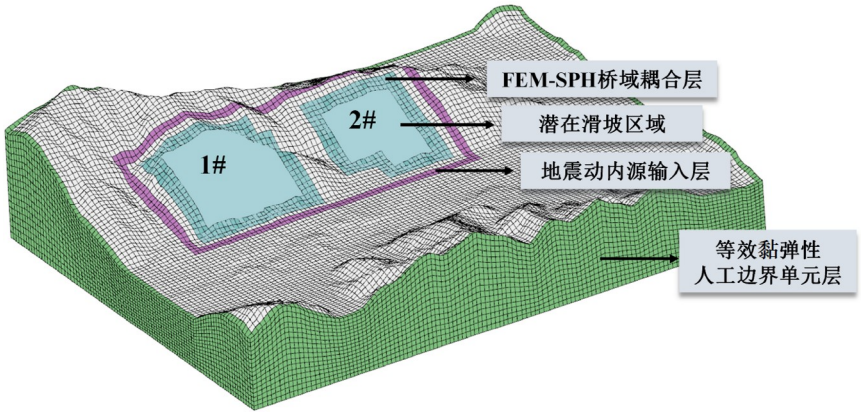


图 5　(网络版彩图)库区滑坡FEM-SPH动力耦合模型

Figure 5　(Color online) FEM-SPH dynamic coupling model of reservoir landslides.

表 1　数值模拟材料参数

Table 1　Parameters used in the simulation of the landslide and bedrock

材料	E (GPa)	ρ (kg/m^3)	v	ϕ (°)	c (kPa)
1#滑坡	4.98	1820	0.2	24	30.3
2#滑坡	7.38	2500	0.2	28	40
基岩	7.29	2600	0.2	–	–

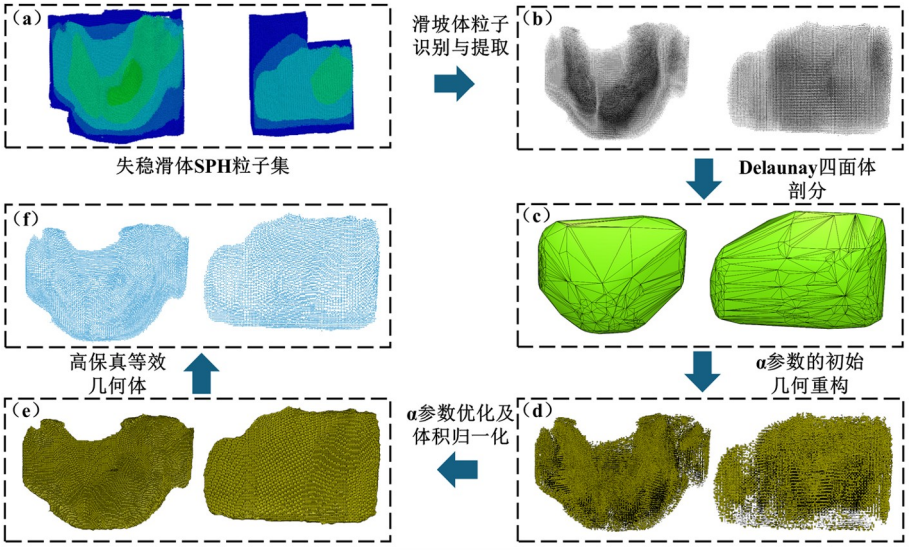


图 6　(网络版彩图)基于Alpha-Shape算法的滑体重构流程图

Figure 6　(Color online) Workflow for reconstructing sliding masses using the Alpha-Shape algorithm.

展示了Alpha-Shape算法滑体几何重构的全过程及重构结果. 首先, 对识别出的滑坡体SPH粒子点云数据进行三维Delaunay四面体剖分, 生成覆盖点云数据的空间填充网格. 为准确捕捉真实滑坡体表面的非凸特征与几何细节, 需要对Alpha-Shape算法中的参数α进行调整优化. 通过将参数α值与SPH粒子间距建立倍数关

联, 可以快速确定α参数最优值. 然后, 对基于最优α值所重构的几何表面进行体积一致性处理, 通过缩放变换使滑坡体体积严格保证体积守恒, 最终生成了与原始滑坡体几何形态一致的等效滑坡体, 如图6(f)所示. 结果表明, 该方法不仅实现了从离散粒子到连续几何体的精确转换, 而且保证了重构模型与原始粒子集在形状和体积上的高度一致性, 满足后续耦合计算的数值要求.

3.3.3 库区滑坡涌浪模型

滑坡-库水-大坝三维模型建立如图7所示, 计算模型整体尺寸为21.95 km×9.97 km×0.2 km. 该滑坡体和库水SPH粒子间距设置为8 m. 库水最大水深130 m, 坝体高度高出水面10 m. 采用动态边界粒子方法来处理固体边界条件. 在滑坡-库水-大坝模型中, 滑坡体简化为刚体, 基于前述地震滑坡模型中滑体接触水面瞬时临界状态进行重构, 以获得其当前时刻的几何形态与运动参数. 另外, 由于涌浪作用下的大坝变形力学响应一般较小, 因此初步分析中将坝体简化刚性边界, 重点关注地震触发滑坡涌浪的传播与漫坝效应. 尽管如此, 本文所构建的耦合框架可适用于坝体高精度非线性有限元动力仿真分析, 未来可用于评估更极端工况下的工程安全.

4 地震-滑坡-涌浪-漫坝情景模拟

4.1 地震触发滑坡情景模拟

图8展示了库岸潜在滑坡体在地震作用下的模拟结果. 图9为滑坡体滑动面内部监测点1~8的速度变化情况. 由图8和9(a)可知, 1#滑坡体的运动过程共约64 s, 5 s左右时, 边坡岩土体逐渐发生失稳破坏, 滑坡体开始启动. 滑动面各点处的速度变化趋势相同, 在滑体运动刚开始时, 滑动速度线性增加, 运动到25 s左右时, 滑体速度最大为16.39 m/s, 在31 s后, 速度逐渐减小, 直至64 s左右后滑体滑动停止, 进入稳定状态. 由图8和9(b)可知, 2#滑坡体的运动过程共约100 s. 滑坡体运动到26 s左右时, 滑体速度最大为19.96 m/s, 之后, 速度逐渐减小, 直至100 s左右后滑体滑动停止. 1#滑坡体最终滑动方量为1689.6万m^3, 2#滑坡体滑动方量为439.8万m^3. 考虑到滑坡体在启动阶段均位于水面以上, 库水对其初始动力学特性的影响可忽略, 因此本阶段模拟未计入库水作用, 通过提取滑坡运动参数与滑动方量, 为后续涌浪分析提供初始条件.

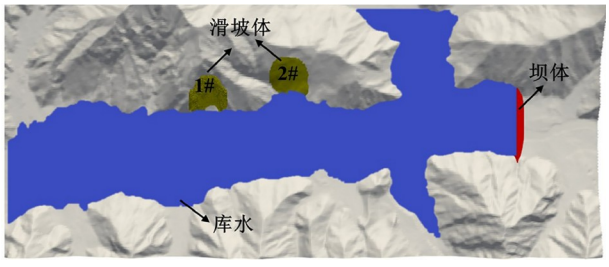


图 7 (网络版彩图)库区滑坡、库水以及大坝三维模型
Figure 7 (Color online) Numerical model of reservoir landslide, reservoir water, and dam structure.

4.2 滑坡-涌浪-漫坝情景模拟

基于前述方法将地震-滑坡模型和滑坡-涌浪-大坝模型进行耦合, 进一步模拟了近坝库区两处潜在滑坡体在情景地震作用下触发滑坡所引发的涌浪及其漫坝影响.

图10展示了库区潜在滑坡在地震作用下失稳入水, 进而引发涌浪及其传播的全过程. 在t=25 s左右时, 两个滑坡体开始失稳滑动碰撞水体, 水体被滑坡体挤压抬升, 产生圆弧形状涌浪并向四周扩散. 在t=100 s左右, 两个滑坡体已停止运动, 涌浪传播到对岸, 随后沿着河谷地形向上下游继续扩散. 随着滑坡涌浪在两岸之间的传播、反射以及沿上下游传播过程中受到库岸边界和坝体结构的碰撞影响, 水体的动能逐渐衰减.

为了分析滑坡体失稳入水后激起涌浪的传播与衰减规律, 模型中沿水面布置了11个浪高仪, 如图11(a)所示, 其中监测点17~19位于坝前20 m的左坝肩、坝中、右坝肩. 图11(b)~(d)分别为不同区域监测点的涌浪高度变化曲线, 即各监测点水体自由表面高程相对于初始水库蓄水位的变化情况. 从图11(b)可以看出, 滑坡体区域监测点9和监测点10的次浪波峰均大于首浪波峰, 这是由于两处潜在滑坡体滑动入水后导致涌浪存在叠加效应, 其中监测点9出现最大浪高为13.4 m. 图11(c)监测点12~16结果表明, 随着涌浪传播距离的增加, 首波浪高逐渐减小. 当涌浪传播到坝体区域时, 由于受到坝体反射影响, 波高则随着涌浪波的叠加在一段时间会出现逐渐增大的趋势. 由图11(d)监测点17~19可知, 滑坡产生的涌浪传播至坝体前20 m时, 监测点17、监测点18和监测点19的最大峰值分别为

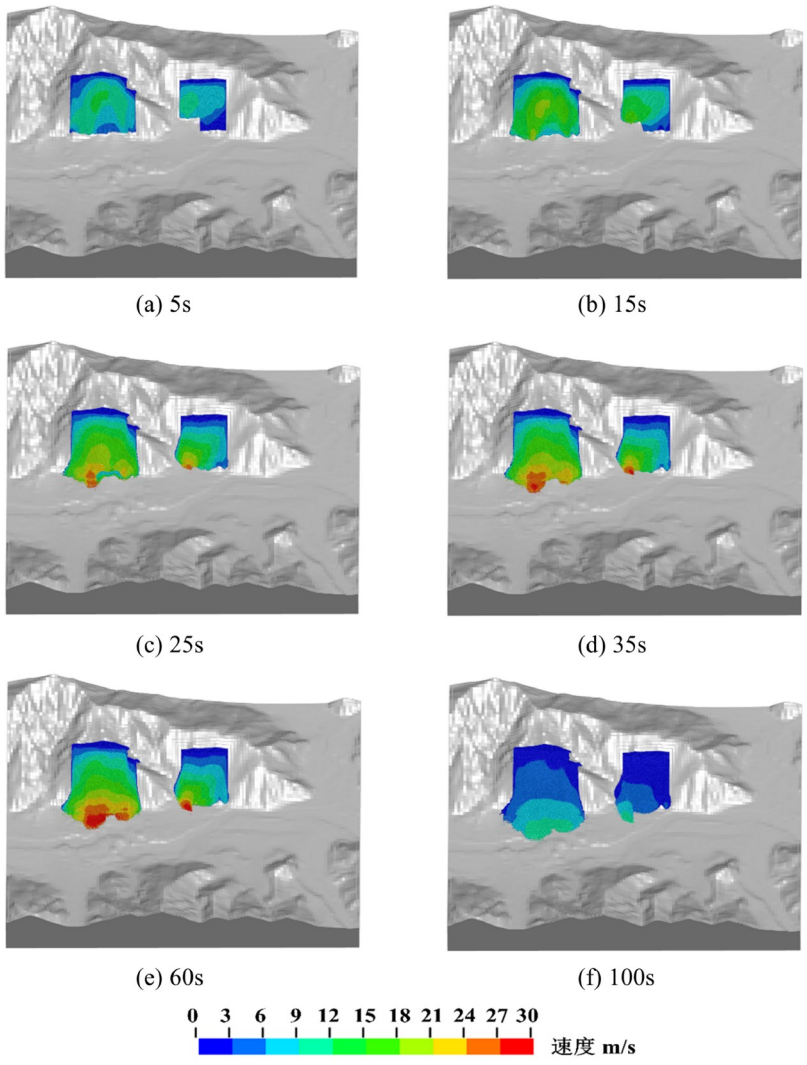


图 8　(网络版彩图)地震滑坡模拟结果

Figure 8　(Color online) Earthquake-induced landslide simulation results.

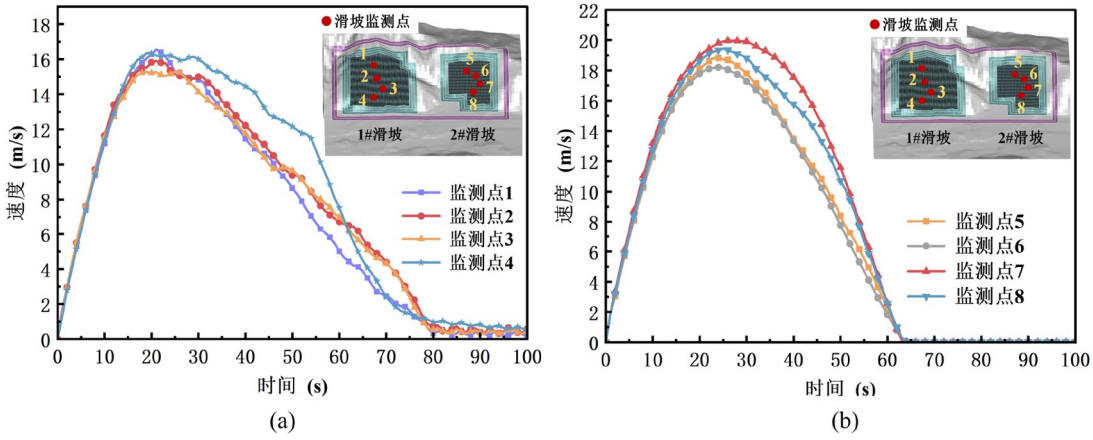


图 9　(网络版彩图)滑坡滑动面监测点速度. (a) 监测点1~4; (b) 监测点5~8

Figure 9　(Color online) Velocity of monitoring point on sliding surface of landslide. (a) monitoring points 1–4; (b) monitoring points 5–8.

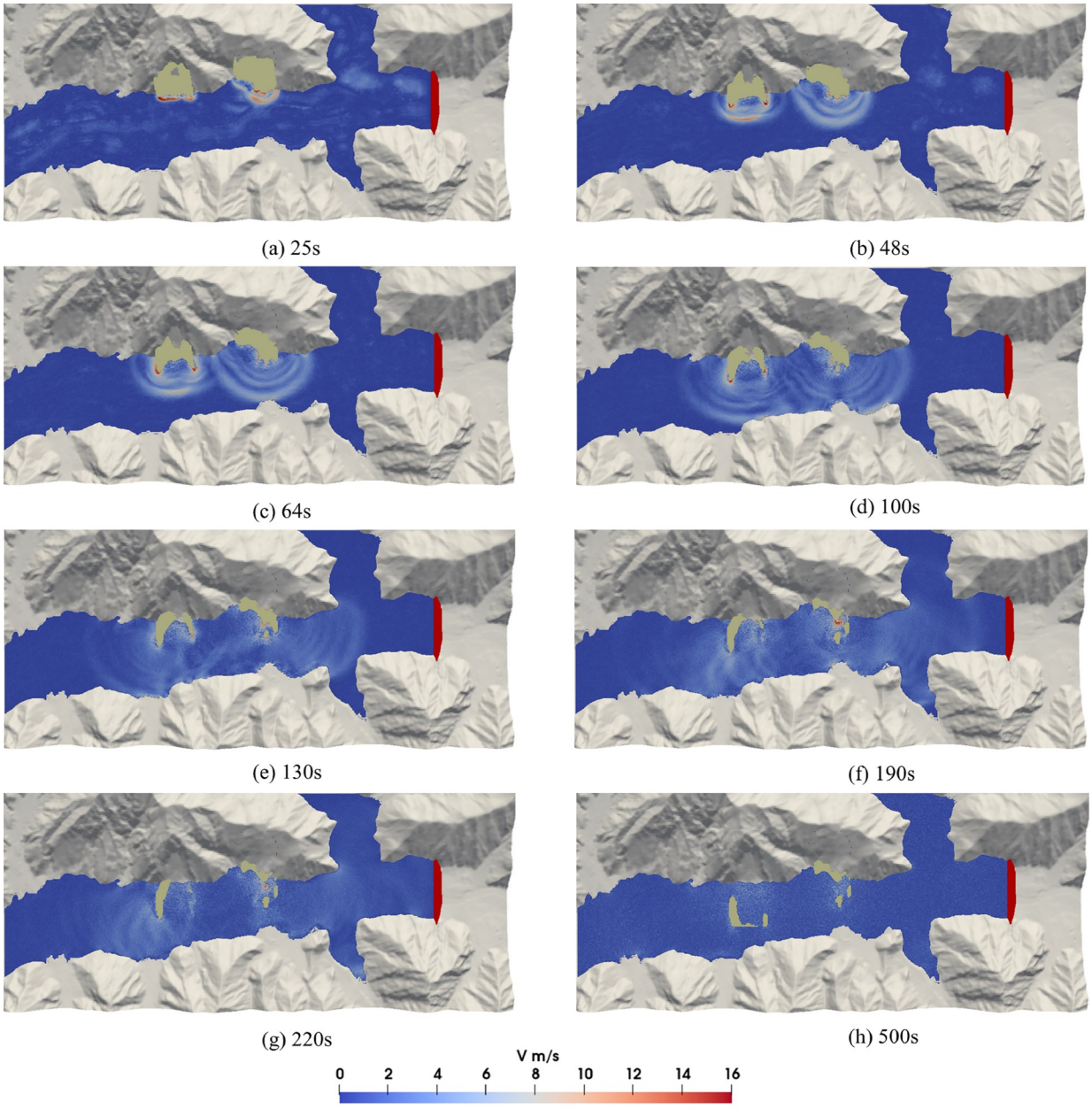


图 10 (网络版彩图)滑坡涌浪产生及传播过程图

Figure 10 (Color online) Generation and propagation process of landslide surge waves.

6.4、5.7和5.4 m, 坝前波峰由坝体中间往两岸逐渐增大, 且左坝肩大于右坝肩. 为分析下游涌浪的传播特性, 如图11(e)所示, 记录了9个监测点的最大涌浪高度. 随着涌浪激发并向下游传播, 浪高峰值逐渐减小, 在监测点13位置处因地形原因已显著降低. 当涌浪传播至大坝附近时, 受坝体及库岸边界的影响, 浪高峰值略有回升, 随后逐渐趋于稳定.

初步计算结果表明, 在水库为正常蓄水位且地震动PGA为0.29 *g*的情况下, 库区两处潜在滑坡体同时滑动在坝前产生的最大涌浪高度为6.4 m, 不会导致漫坝现象. 另外, 由于本文数值模型中滑坡体, 运动过程中不会发生破碎, 而实际滑坡体滑动过程中因块石间

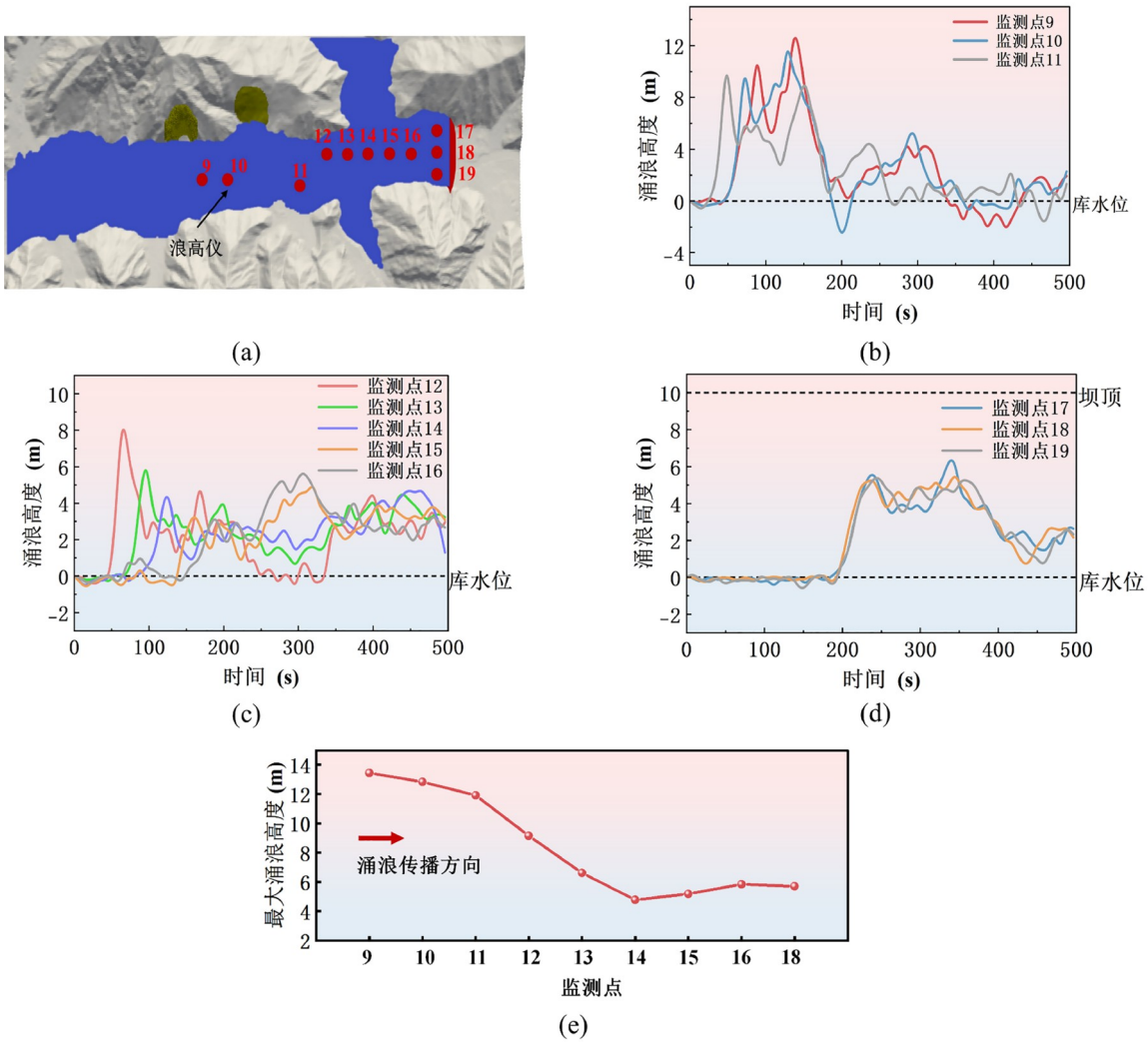


图 11　(网络版彩图)监测点位置分布及监测点涌浪高度变化曲线. (a) 浪高仪布置位置; (b) 监测点9~11; (c) 监测点12~16; (d) 监测点17~19; (e) 监测点最大涌浪高度

Figure 11　(Color online) Distribution of monitoring points and surge wave height curves at monitoring points. (a) Layout of wave gauges; (b) monitoring points 9–11; (c) monitoring points 12–16; (d) monitoring points 17–19; (e) maximum surge wave heights at monitoring points.

的碰撞破碎与摩擦效应会造成部分能量损失, 因此滑坡体入水时传递的动能相比刚性体小, 产生的涌浪高度也会相应减小.

5　结论

本文首次提出了基于物理机制的地震-滑坡-涌浪-漫坝灾害链全过程情景模拟框架. 该框架采取基于物理机制的确定性数值模拟方法, 耦合了地震动传播模拟的SEM模型、边坡失稳与滑动模拟的FEM-SPH模型, 以及涌浪-坝体相互作用模拟的SPH-FEM模型, 实现了从震源破裂、地震触发滑坡、涌浪链生灾害到坝体响应的全过程直接数值模拟. 由于采用分阶段模拟策略, 提出了基于Alpha-Shape算法与动量守恒原则的滑坡体高精度重构与映射方法, 有效确保了滑坡几何形态与动力参数的跨模型精准传递, 实现了地震-滑坡与滑坡-涌浪-大坝模型的跨模型衔接.

本文进一步采用地震-滑坡-涌浪-漫坝模拟框架研究了某库区边坡潜在滑坡体在地震作用下失稳滑动并诱发涌浪-漫坝效应. 结果表明, 在正常蓄水位条件下, 两处滑坡体在情景地震作用下同时滑动引发的涌浪不会导致漫坝现象, 验证了该框架在地震型链生灾害风

险评估中的有效性. 由于在单一涌浪荷载作用下的大坝变形力学响应一般较小, 因此本文初步将坝体简化为刚性边界, 主要关注地震触发滑坡涌浪的传播与漫坝效应. 值得说明的是, 本文所构建的耦合框架可拓展于开展坝体非线性有限元动力仿真分析. 未来研究将聚焦于超设计标准的极端地震情景, 深入分析地震-滑坡-涌浪链生灾害作用下库坝系统非线性动力响应与极限承载力.

参考文献

1 Chen S Z, Xu W Y, Shi A C, et al. Review of hazard chain of landslide surge for high dams and large reservoirs (in Chinese). Adv Sci Technol Water Resour, 2023, 43: 83–93 [陈世壮, 徐卫亚, 石安池, 等. 高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述. 水利水电科技进展, 2023, 43: 83–93]

2 Huang B L, Yin Y P, Li R J, et al. Research progress and challenges of landslide-induced impulse wave prevention and control engineering measures (in Chinese). J Eng Geol, 2025, 33: 159–170 [黄波林, 殷跃平, 李仁江, 等. 滑坡涌浪综合防控工程措施研究进展与挑战. 工程地质学报, 2025, 33: 159–170]

3 Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Near field characteristics of landslide generated impulse waves. J Waterw Port Coast Ocean Eng, 2004, 130: 287–302

4 Zhang C H. Revelations on engineering disaster from Wenchuan Earthquake (in Chinese). Water Resour Hydropower Eng, 2009, 40: 1–3 [张楚汉. 汶川地震工程震害的启示. 水利水电技术, 2009, 40: 1–3]

5 Liu J H, Zhou J J, Wang H. Review on catastrophe risk analysis and mitigation of cascade hydropower complexes (in Chinese). J Hydraul Eng, 2023, 54: 34–44 [刘家宏, 周晋军, 王浩. 梯级水电枢纽群巨灾风险分析与防控研究综述. 水利学报, 2023, 54: 34–44]

6 Zhou X B, Chen Z Y, Huang Y F, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part Ⅲ: Risk analysis of embankment break in cascade (in Chinese). J Hydraul Eng, 2015, 46: 765–772 [周兴波, 陈祖煜, 黄跃飞, 等. 特高坝及梯级水库群设计安全标准研究Ⅲ: 梯级土石坝连溃风险分析. 水利学报, 2015, 46: 765–772]

7 Li Y L, Wang S L, Wang L, et al. Research progress on risk analysis of cascade reservoirs in river basin (in Chinese). Sci Sin-Tech, 2021, 51: 1362–1381 [李炎隆, 王胜乐, 王琳, 等. 流域梯级水库群风险分析研究进展. 中国科学:技术科学, 2021, 51: 1362–1381]

8 Gao Y, Yin Y P, Li B, et al. Numerical simulation method of high-position and long runout landslides under granular state transformation (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2023, 42: 1623–1637 [高杨, 殷跃平, 李滨, 等. 考虑颗粒状态转化的高位远程滑坡数值模拟方法. 岩石力学与工程学报, 2023, 42: 1623–1637]

9 Hoang T N, Bui H H, Nguyen T T, et al. Development of free-field and compliant base SPH boundary conditions for large deformation seismic response analysis of geomechanics problems. Comput Method Appl M, 2024, 432: 117370

10 Feng K, Huang D, Wang G, et al. Physics-based large-deformation analysis of coseismic landslides: A multiscale 3D SEM-MPM framework with application to the Hongshiyan landslide. Eng Geol, 2022, 297: 106487

11 Du W, Wu K, Fu X, et al. Failure history, mechanism, and recent run-out reproduction of the Xinhua Village landslide triggered by the 2022 Ms 6.1 Lushan earthquake. Landslides, 2023, 20: 2675–2693

12 Bhandari T, Hamad F, Moormann C, et al. Numerical modelling of seismic slope failure using MPM. Comput Geotech, 2016, 75: 126–134

13 Fernández F, Vargas Jr. E, Muller A L, et al. Material point method modeling in 3D of the failure and run-out processes of the Daguangbao landslide. Acta Geotech, 2024, 19: 4277–4296

14 Shi C, Wang X, Liu Q. Wave generation, energy conversion, and sediment accumulation in a real-scale channel-like reservoir by landslide using a soil-water coupling SPH model. Landslides, 2025, 22: 2769–2783

15 Viroulet S, Cébron D, Kimmoun O, et al. Shallow water waves generated by subaerial solid landslides. Geophys J Int, 2013, 193: 747–762

16 Wang R, Wang Y, Xu W, et al. Numerical simulation of the formation and propagation of landslide-induced waves: A case study of the RM dam reservoir (Southwest China). Landslides, 2025, 22: 2347–2362

17 He C H, Wang J T, Zhang C H, et al. Simulation of broadband seismic ground motions at dam canyons by using a deterministic numerical approach. Soil Dyn Earthq Eng, 2015, 76: 136–144

18 Wang X C, Wang J T, Zhang L, et al. A multidimension source model for generating broadband ground motions with deterministic 3D numerical simulations. Bull Seismol Soc Am, 2021, 111: 989–1013

19 Jiang H, Qiu Y X, Zhu J J, et al. A SEM-FEM-SPH framework for physics-based source-to-slope simulation of earthquake-induced landslides.

Eng Geol, 2025, 353: 108127
20 Crespo A J C, Domínguez J M, Rogers B D, et al. DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Comput Phys Commun, 2015, 187: 204–216
21 Zhan Y, Luo M, Khayyer A. DualSPHysics+: An enhanced DualSPHysics with improvements in accuracy, energy conservation and resolution of the continuity equation. Comput Phys Commun, 2025, 306: 109389
22 Jiang H, Yuan Y Y, Wang J T, et al. Coupled SPH-FEM modelling from landslide surges to dynamic response of concrete dams. Bull Eng Geol Environ, 2026, 85: 179
23 Qiu Y X, Wang J T, Zhang C H. An internal input framework of earthquake motions for dam-water-foundation rock systems. Soil Dyn Earthq Eng, 2022, 156: 107241
24 Liu J, Bao X, Wang D, et al. The internal substructure method for seismic wave input in 3D dynamic soil-structure interaction analysis. Soil Dyn Earthq Eng, 2019, 127: 105847
25 Gu Y, Liu J B, Du Y X. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element (in Chinese). Eng Mech, 2007, 24: 31–37 [谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元. 工程力学, 2007, 24: 31–37]
26 Liu J B, Gu Y, Du Y X. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2006, 28: 1070–1075 [刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元. 岩土工程学报, 2006, 28: 1070–1075]
27 Cabrera Crespo A J, Gómez Gesteira R, Dalrymple R A. Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods. Comput Mater Contin, 2007, 5: 173–184

Physics-based modeling of the earthquake-landslide-surge-dam overtopping disaster chain scenarios

JIANG Hui[1], ZHANG WenJie[1], WANG JinTing[2], ZHU JingJing[1] & DU XiuLi[1]

[1] *College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*
[2] *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Strong earthquakes can induce a disaster chain involving reservoir bank landslides, surges, and dam impacts, representing an extreme catastrophic process that threatens the safety of high dams. Current research predominantly focuses on individual stages of this disaster chain, lacking direct physical and numerical simulations of the entire process—from the seismic source and landslide-generated surge to the dam response—which hinders the understanding of evolution mechanisms and dynamic coupling effects. To address this gap, this study develops a physics-based, multi-scale numerical simulation framework coupling the spectral element method (SEM), finite element method (FEM), and smoothed particle hydrodynamics (SPH). The framework first utilizes SEM to obtain the spatially non-uniform ground motion field from the seismic source to the local site, and establishes a local slope FEM-SPH dynamic coupling model to simulate the full process of landslide initiation, sliding, and accumulation, thereby overcoming the limitations of uniform input assumptions and preset slip surfaces. To facilitate the staged simulation strategy, a landslide body reconstruction and mapping method based on the Alpha Shape algorithm and momentum conservation is established to ensure the precise transfer of geometric and dynamic parameters between models. Subsequently, a coupled landslide-reservoir water-dam SPH-FEM model is constructed to simulate the surge generated by landslide and the fluid-dam structure interactions. This framework achieves, for the first time, a comprehensive scenario-based numerical simulation of the entire disaster chain, spanning from source rupture, landslide, surge induced dam impact. The framework is further applied to analyze the instability, sliding, and subsequent surge-overtopping process of a potential landslide in a typical reservoir under seismic loading, providing critical scientific support for the risk assessment of earthquake-induced cascading disasters in cascade hydropower projects.

disaster chain, dam safety, seismic motion simulation, coseismic landslide, reservoir surge, fluid-structure interaction

doi: 10.1360/SST-2025-0419