基于底摩擦与数值试验的滑移式危岩体渐进失稳特征研究

戴雨馨[1]，孙少锐[1]，李松洋[1]，毛博帅[1]，刘刚[2]，施威[2]，陈永祥[2]，眭敏磊[2]

（1. 河海大学 地球科学与工程学院，江苏 南京 211100；2. 江苏省地质局第一地质大队，江苏 南京 210041）

摘　要:【目的】揭示南京幕府山典型滑移式危岩体在真实几何约束下由启动、滑移、解体至堆积趋稳的演化特征，为高陡危岩体失稳识别与风险管控提供参考。**【方法】**基于无人机贴近摄影获取的三维实景模型完成危岩体二维轮廓提取，结合底摩擦物理模型试验、粒子图像测速法（PIV）、数字图像相关法（DIC）和数值试验，分析失稳过程中的速度场、位移场及关键监测点响应，并开展数值验证。**【结果】**①失稳过程可划分为启动响应、加速发展、峰值运动和残余调整4个阶段，呈现出由局部启动向整体滑移、由结构完整向块体解体逐步发展的渐进失稳特征。②PIV结果表明，试样失稳初期速度响应较弱，随后局部高速区逐渐扩大并向前缘及上部临空部位集中，速度峰值对应块体滑移和碰撞碎裂的强烈阶段。③DIC结果显示，累计位移主要集中于滑移方向及前缘解体区，关键监测点位移时程可反映试样由缓慢启动、快速滑移至残余稳定的阶段转换过程。④数值试验与物理模型试验在运动阶段、速度变化趋势和位移累积规律方面总体一致。**【结论】**南京幕府山MF-WS01滑移式危岩体失稳具有明显阶段性，主要受结构面剪切滑移、临空边界效应和后期动力耗能共同控制。未来现场监测可重点关注前缘、上部临空部位及结构薄弱区，为监测方案优化和预警阈值确定提供依据。

关键词: 危岩体；底摩擦试验；数字图像分析；离散元模拟；崩塌演化

中图分类号: P642.2　　**文献标识码**:A

危岩体广泛发育于高陡岩质边坡，其失稳具有突发性强、破坏性大和运动过程复杂等特点。在长期风化、卸荷作用及结构面切割等因素影响下，危岩体易发生渐进变形并最终失稳崩塌，其运动路径、碎裂程度及堆积范围直接影响灾害影响范围与危害程度。因此，针对危岩体失稳后的运动特征分析可为灾害预测预警及治理措施制定提供依据[1]。黄晋文等[2]、Gong Tao等[3]和Xing Lei等[4]分别从动力响应、三维离散元崩塌模拟及裂隙网络控制下失稳运动等方面表明，结构面贯通、裂纹扩展、块体分离及碰撞耗能等过程对危岩体由渐进变形向崩塌运动转化具有重要影响。

物理模型试验具有边界条件可控、失稳过程可视化及试验结果可重复等优势，能够为危岩体渐进变形、失稳启动及运动破坏过程研究提供重要手段。其中，底摩擦试验可通过模型底面与摩擦带之间的摩擦作用模拟地质体所受等效重力，在实验室尺度下再现裂隙扩展、滑移启动、块体解体及阶段性失稳过程。李卓等[5]、Zhang Lingfei等[6]、孙书伟等[7]和陈国庆等[8]分别针对软弱基座型危岩体、露天矿边坡、顺倾层状岩质边坡及含岩桥结构边坡开展物理模型试验，揭示了基座劣化、结构面贯通、局部

收稿日期/Received:2026-05-27　　**修回日期**/Revised:2026-07-22

基金项目:国家自然科学基金项目（41672258）；江苏省地质局科技项目（2024KJ01）；江苏省地质工程环境智能监控工程研究中心开放基金项目（2023-ZNJKJJ-04）；江苏省自然资源厅地质数据智能应用技术创新中心开放基金项目（GDIATIC-XM-202507）。

第一作者:戴雨馨(2002—)，女，硕士研究生，从事地质灾害防治与地质环境保护方面的研究。E-mail:daiyuxin@hhu.edu.cn。

通信作者:孙少锐(1975—)，男，教授，博导，博士，从事岩土体结构与工程地质特性方面的研究。E-mail:ssrfish@hhu.edu.cn。

破坏及整体失稳等演化特征。已有研究表明[5–8]，底摩擦试验能够表征岩质边坡及危岩体的阶段性失稳过程，但针对真实危岩几何约束下启动、滑移、解体与堆积全过程的连续观测仍有待加强。

随着图像分析技术的发展，粒子图像测速法（Particle Image Velocimetry, PIV）和数字图像相关法（Digital Image Correlation, DIC）等非接触式测量方法逐渐用于岩土模型试验中的运动场与变形场分析。PIV 可提取模型表面瞬时运动矢量和速度场，DIC 可获取位移场及关键点位移时程，二者能够从瞬时运动响应和累计位移演化两个角度刻画试样失稳过程。李任杰等[9]、隋振德等[10]、龚柏城等[11]将 PIV 应用于岩质边坡及岩崩模型试验，提取了速度矢量、位移云图及变形演化特征；Chouhan K 等[12]和陆烨等[13]的研究表明，DIC 可用于岩土试验中的全场变形测量和局部变形识别。但 PIV 和 DIC 结果主要反映试样表观运动与变形响应，对结构面剪切滑移、局部接触破坏及块体碰撞等机制的解释仍需结合数值方法进一步分析。

颗粒流法能够显式表征颗粒或块体间的接触作用、裂纹扩展及非连续运动过程，适用于危岩体失稳崩塌这类涉及块体分离、碰撞和堆积的复杂动力问题。Chen Liang 等[14]、靳立周等[15]和黄健等[16]采用离散元方法分析了复杂坡面条件下块体运动轨迹、裂隙贯通、剪切破坏及碰撞碎裂等过程，为危岩体崩塌演化机制解释提供了数值依据。上述研究表明，离散元方法能够为危岩体块体解体、碰撞碎裂和堆积过程提供有效的数值解释，但其结果仍需与可观测的物理模型试验现象和影像分析指标相互印证。

基于上述认识，以南京幕府山一处典型滑移式危岩体为例，采用底摩擦物理模型试验、影像定量分析与数值试验相结合的方法，研究危岩体的全过程演化特征。通过统一几何概化、影像运动学分析与数值模拟互证，揭示危岩体渐进失稳与崩塌演化机制，为类似城市景区内危岩体失稳过程识别和风险管控提供参考。

1　研究对象与模型概化

1.1　研究对象选取

幕府山风景区位于南京主城区北缘，研究区处于东山头南侧早期白云石矿开采形成的岩质边坡带内，如图 1 所示。该区域受人工采石切坡、长期卸荷风化及降雨入渗等因素共同作用，坡体局部形成高陡临空岩壁，危岩体及崩塌堆积现象较为发育。研究区基岩主要为震旦系灯影组（Z_2d）白云岩，中等至强风化，节理裂隙发育，局部坡面可见碎石、矿渣及滚石堆积。结合区域地形地貌、地质构造及现场调查结果可知，该类危岩体具有明显的结构面控制特征，在强降雨、持续风化或外部扰动条件下存在失稳崩落风险。

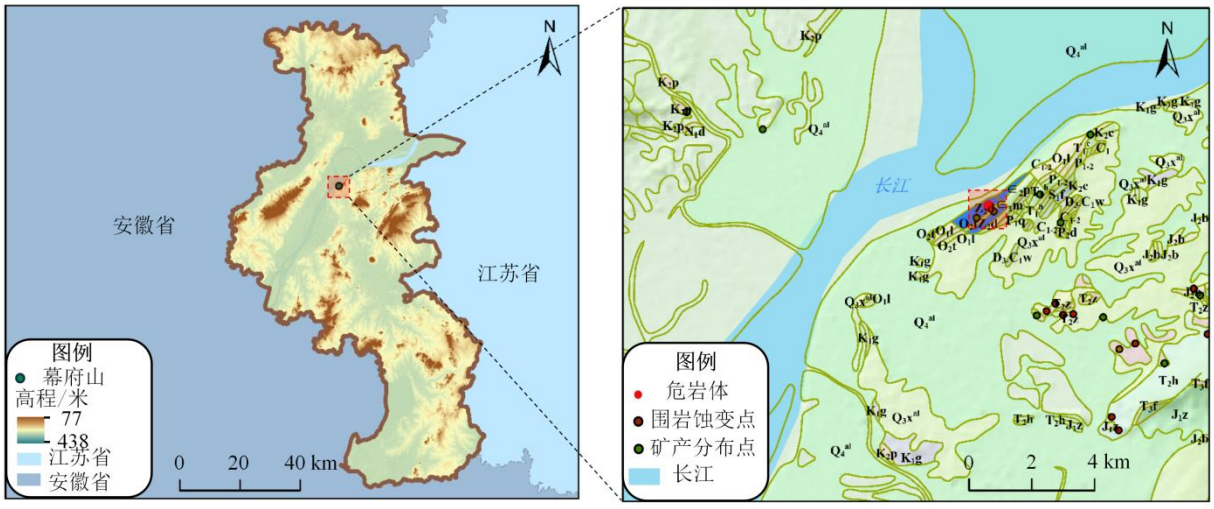
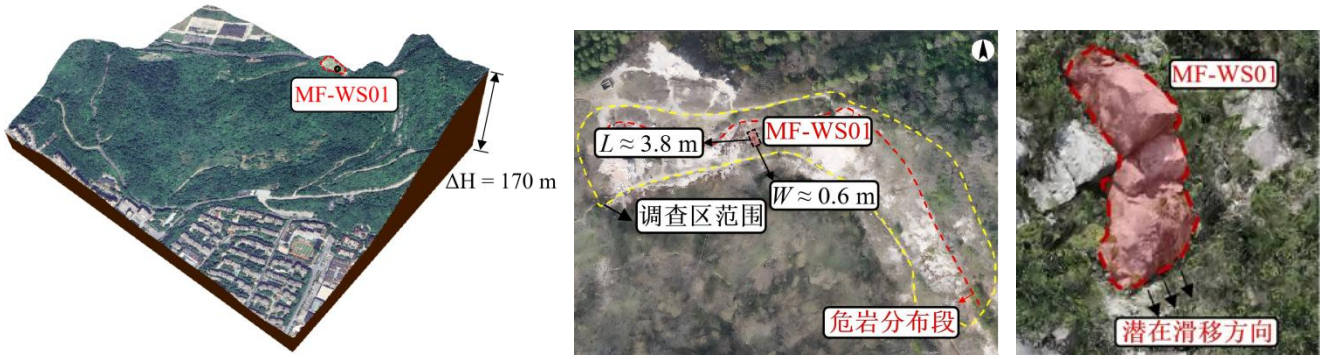


图 1　研究区位置及地质背景图

Fig.1　Location and geological background of the study area

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2767 号的标准地图制作，底图无修改。

在上述危岩发育区内选取编号为 MF-WS01 的典型滑移式危岩体作为研究对象，其空间位置及影像特征如图 2 所示。由三维空间位置图可见，MF-WS01 位于高陡岩壁中上部，前缘临空条件明显，坡下分布有登山步道及游客活动空间，失稳后具有一定的运动发展条件。正射影像和近景影像显示，该危岩体边界相对清晰，块体形态较完整，周缘受裂隙切割控制明显，能够在近景摄影测量模型中进行较稳定的识别与轮廓提取。



(a)危岩体三维地形位置图　(b)危岩体卫片图　(c)危岩体近景影像特征

图 2　MF-WS01 危岩体空间位置及影像特征

Fig.2　Spatial location and image characteristics of the MF-WS01 unstable rock mass

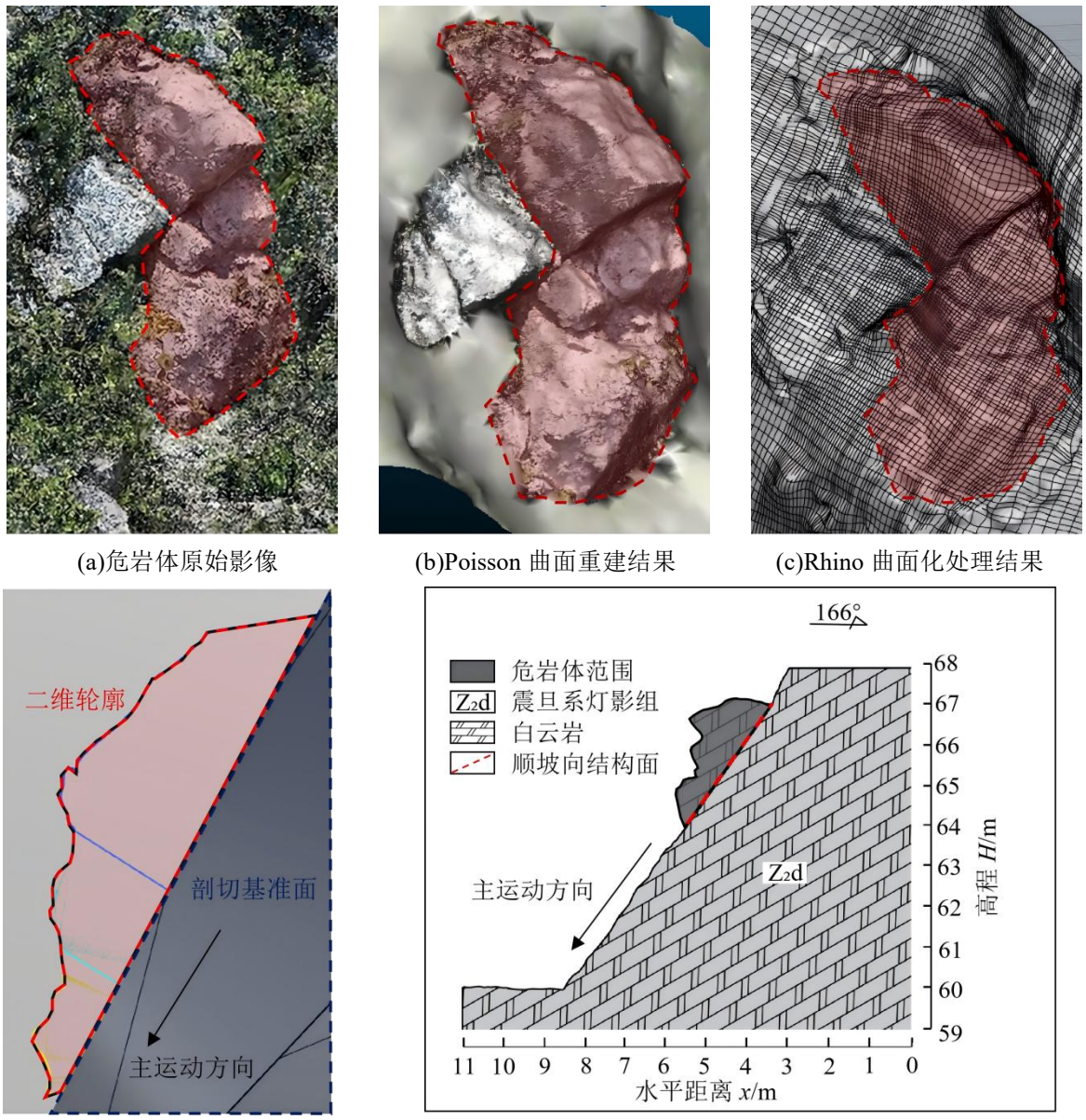
MF-WS01 危岩体高度约 64～67 m，纵向长度约 3.8 m，横向宽约 0.6 m，平均厚度约 1.0 m，估算体积约 1.8 m³，属小型危石。现场调查表明，该危岩体主要受三组结构面控制：一组裂隙控制侧向切割，一组为反倾结构面，另一组为顺坡向结构面，且其倾角小于坡面坡角。受结构面组合关系及前缘临空条件影响，该危岩体在自重、降雨入渗或地震扰动作用下更可能发生以剪滑为主的失稳破坏，潜在运动方向与坡面倾向一致。

MF-WS01 危岩体几何边界清楚、结构面控制特征明显，且近景影像资料较完整，能够形成可追溯的三维几何数据，因此，将其作为底摩擦物理模型试验与数值试验的原型对象。后续研究以其近景摄影测量三维重建模型为基础，进一步开展曲面重建、轮廓提取及二维化表达，为模型试样制备和数值模型构建提供统一几何基准。通过将物理模型试验与数值模型试验建立在同一危岩对象和同一几何来源之上，可增强两类方法在失稳模式判读、运动过程分析及动力响应对比中的一致性。

1.2　模型概化处理

为保证物理模型试验与数值模型试验在几何边界上的一致性，以无人机贴近摄影获取的三维实景模型为基础，对典型危岩体开展统一几何概化。首先，从整体实景模型中裁剪出包含危岩体的局部 OBJ 数据，经点云采样、去噪处理、法向统一及 Poisson 表面重建，获得能够反映危岩体外形特征与坡面起伏关系的三维表面。Poisson 重建在复杂岩面条件下具有较好的连续性和孔洞补全能力，但其直接生成的高密度三角网格在工程应用中往往存在可编辑性不足、局部拓扑缺陷较多等问题，难以直接满足后续几何切割与数值建模需求。基于此，进一步将重建结果导入 Rhino 平台，完成网格修复、边界整理及 NURBS 曲面化处理，为危岩体的几何模型工程化表达提供稳定载体。

在三维模型构建完成后，进一步沿危岩体主运动方向提取二维观测轮廓。MF-WS01 滑移式危岩体几何模型构建、二维轮廓提取及地质剖面如图 3 所示。二维化处理以三维模型为基础，并结合现场结构面控制特征，重点保留前缘临空边界、后缘裂隙端点、底部潜在滑移面出露位置及关键折线特征等主要几何要素。其中，后缘裂隙和底部潜在滑移面作为控制危岩体剪切滑移的主要结构面，在底摩擦试验中通过试样边界轮廓和底部接触边界进行等效表达；前缘临空边界则用于表征危岩体外侧约束条件。通过该处理，可将复杂三维结构面控制关系转化为适用于底摩擦试验观测与二维分析的几何边界条件，并作为后续试样设计与模型制作的统一几何基准，从而为试样制备、过程观测及结果对比分析提供一致的边界基础。



(a)危岩体原始影像　(b)Poisson 曲面重建结果　(c)Rhino 曲面化处理结果

(d)二维轮廓提取及主运动方向示意　(e)地质剖面图

图 3　危岩体几何重建及地质剖面图

Fig.3　Geometric reconstruction and geological profile of the unstable rock mass

2　底摩擦物理模型试验

2.1　试验原理及试验方案设计

底摩擦试验是一种用于模拟岩土体二维失稳运动过程的物理模型试验方法，其基本思想是利用运动摩擦带与模型试样底面之间的摩擦拖曳作用，为薄层试样提供持续的平面驱动力，从而近似模拟危岩体在重力分力作用下的启动、滑移及运动演化过程。模型试样直接置于摩擦带表面，限位挡板用于约束试样整体边界并控制试验区域，滚筒转动带动摩擦带连续运动，使试样底部受到沿摩擦带运动方向的摩擦作用。该方法能够在二维平面内较直观地再现危岩体由启动、滑移至后期调整的运动过程，并便于通过视频影像连续记录试样的位移、速度及破坏形态变化。

采用自制底摩擦试验装置开展物理模型试验，该装置主要由摩擦带、限位挡板、滚筒、电机、传动皮圈及支撑框架组成，其中摩擦带有效工作尺寸为 1.0 m ×1.2 m。试验过程中，电机带动驱动滚筒转动，并通过传动皮圈将动力传递至传动滚筒，从而驱动摩擦带连续运行；试验时滚筒转速设定为 30 r/min，并在加载过程中保持恒定。限位挡板布置于摩擦带四周，用于限定模型试样的运动范围并保证试验过程的可控性。与传统重力加载模型相比，底摩擦试验装置结构相对简单，加载过程连续稳定，试验过程可重复性较好，适用于危岩体失稳运动过程及破坏形态的对比分析。

试样采用已建立的 MF-WS01 危岩体二维概化

轮廓作为统一几何边界，并按照几何相似比 C_L=20 进行缩尺设计，重点保留临空边界、底部接触边界及后缘裂隙等对失稳启动和运动演化具有控制作用的关键几何特征。缩尺后危岩体模型为不规则薄层块体，沿主运动方向的纵向长度约为 19 cm，垂直主运动方向的横向宽度约为 3 cm。为满足二维物理模拟要求，采用薄层模型试样。根据圣维南原理，当试样厚度相对于平面尺度较小时，厚度方向上的应力与变形影响可在一定程度上弱化，模型响应可近似按二维问题处理[17]。综合试样平面尺度、装置条件及二维模拟要求，最终确定试样厚度统一取 1 cm，以保证模型具有较好的平面运动特征，并便于后续基于影像的位移场和速度场分析。

2.2 相似材料标定与试验实施

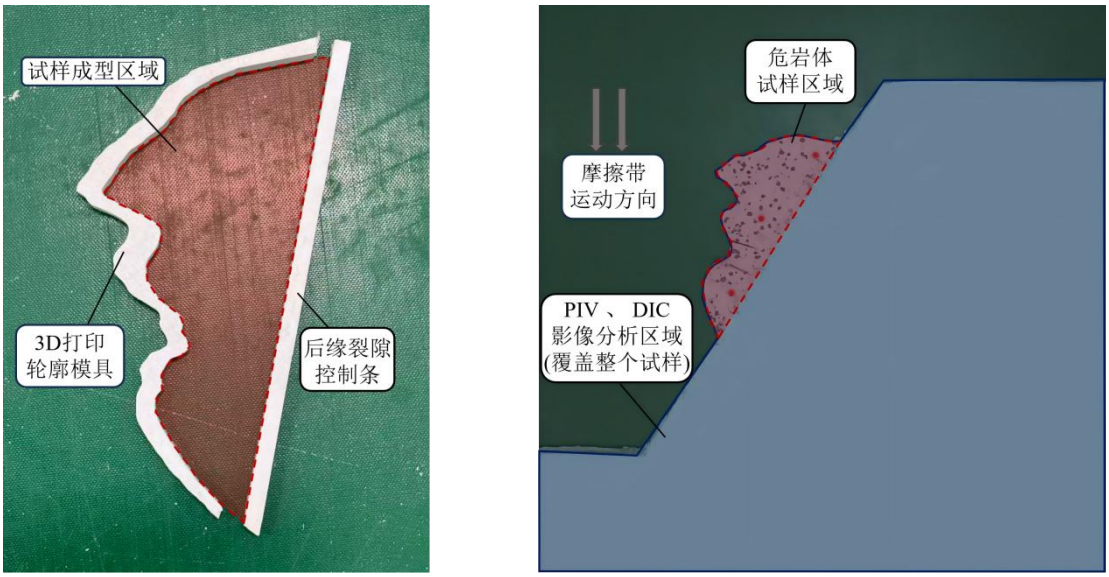
采用重晶石粉、石英砂和石蜡油配制相似材料，其中重晶石粉主要用于调节模型材料重度，石英砂作为骨料用于改善材料颗粒骨架及摩擦特性，石蜡油主要用于调节颗粒间黏结状态及材料强度。结合预配比试验结果，最终确定试样材料的质量配比为：重晶石粉:石英砂:石蜡油=58:35:7。通过室内试验对材料基本力学参数进行标定，其重度γ为 26.7 kN/m³，黏聚力 c 为 10.1 kPa，内摩擦角φ为 29.6°。底摩擦试验中采用表面粗糙度较稳定、运行过程中变形较小的橡胶类传送带作为摩擦带，以保证模型底部摩擦拖曳作用的连续性和稳定性。模型材料与摩擦带之间的界面摩擦系数采用水平拉动法测定，经多次测试取平均值后，界面摩擦系数μ约为 0.57。综合表 1 所示原型危岩体与相似材料力学参数对比结果可知，所取配比组合能够满足底摩擦模型试验的相似性要求，可作为危岩体失稳运动过程物理模拟的参数依据。

表 1　原型危岩体与相似材料力学参数对比表

Tab.1　Comparison of mechanical parameters between the prototype unstable rock mass and similar material

材料类型	重度 γ/(kN·m^{-3})	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/（°）
原型材料	27.2	203.0	32.0
相似材料	26.7	10.1	29.6

试样按 3D 打印后的概化轮廓放样制作，材料经充分拌和后填入轮廓范围内，并通过分层压实保证试样整体密实度和厚度一致性。成型后对试样表面进行散斑化处理，以提高后续影像识别和运动场提取的稳定性。试验过程中采用固定机位进行连续拍摄，拍摄设备为 DJI Osmo Action 5 Pro，视频采集参数为 4K 分辨率、120 帧/s，用于记录试样从启动、运动到最终趋稳的全过程。试验结束后，将视频逐帧导出，并以试样整体所在图像范围作为 PIV 速度场和 DIC 位移场的主要分析区域。3D 打印模具、成型试样如图 4 所示。



(a)3D 打印成型模具　　(b)PIV、DIC 影像分析范围布置

图 4　3D 打印模具与 PIV、DIC 影像分析布置

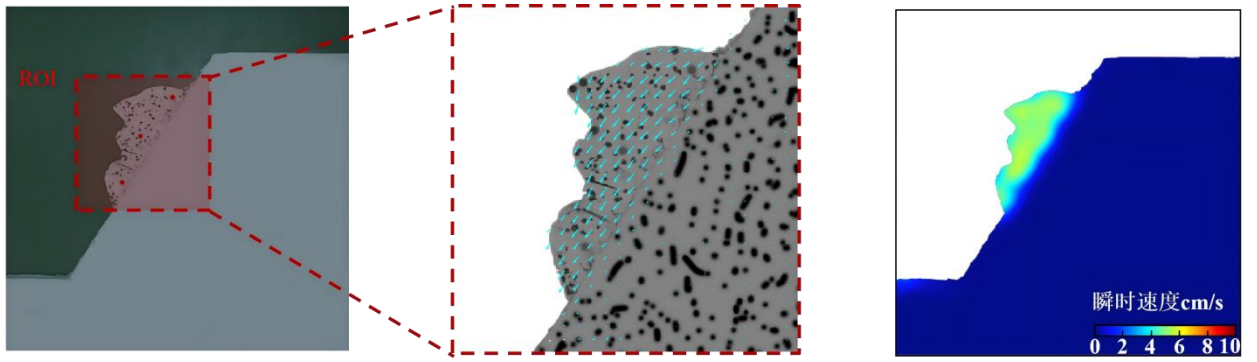
Fig.4　3D-printed mold and PIV/DIC image analysis setup

3　结果分析

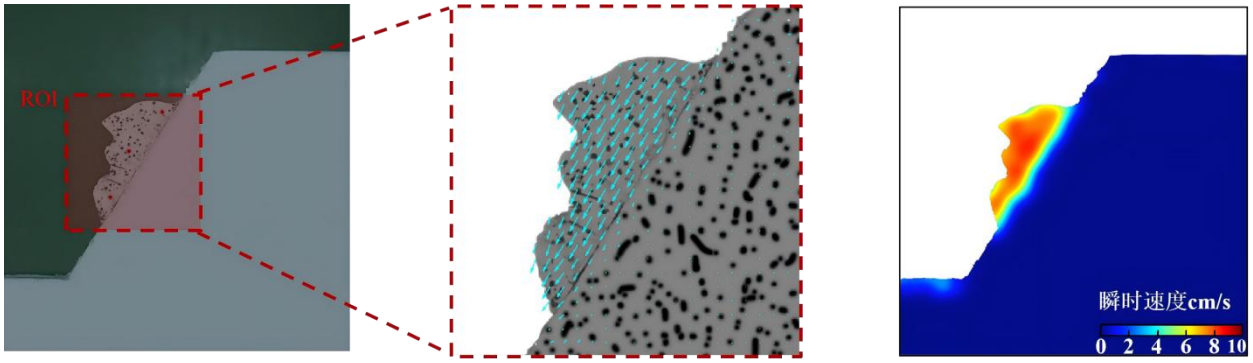
3.1　基于影像分析的危岩试样运动学响应识别

为揭示危岩试样失稳过程中的运动学响应特征，基于 MATLAB 平台对试验影像进行了定量分析。其中，局部运动矢量场与速度场采用 PIVlab 提取，瞬时位移场及关键监测点累计位移基于 DIC 获取。

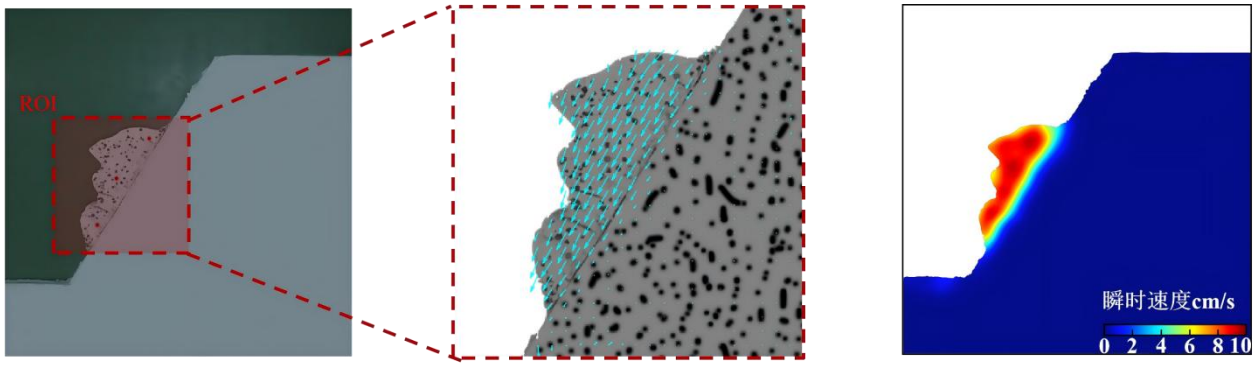
图 5 为危岩试样在 4 个关键时刻的原始影像、局部运动矢量场及速度场分布特征。总体来看，试样失稳后沿坡面持续运动，运动响应首先出现在前缘及上部临空部位，随后向块体内部扩展，并在中前期达到最强，后期则逐渐减弱。



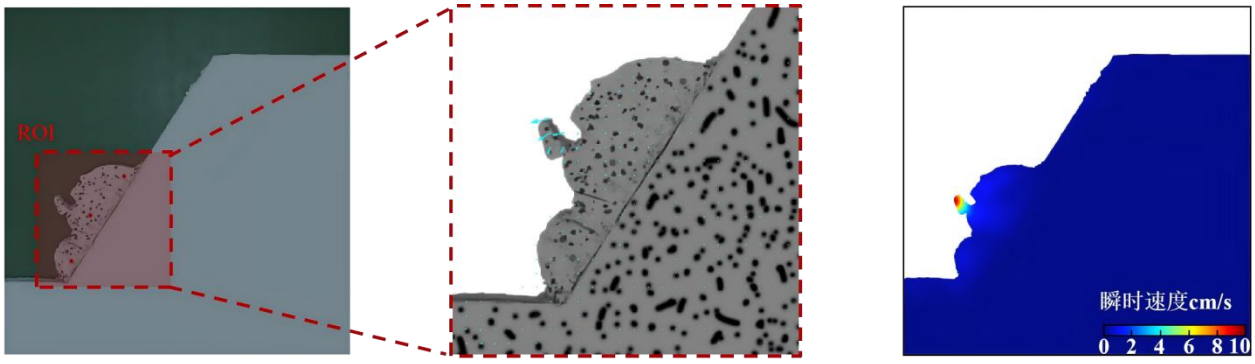
(a) t =12.51 s



(b) t =12.79 s



(c) t =13.16 s



(d) t =15.03 s

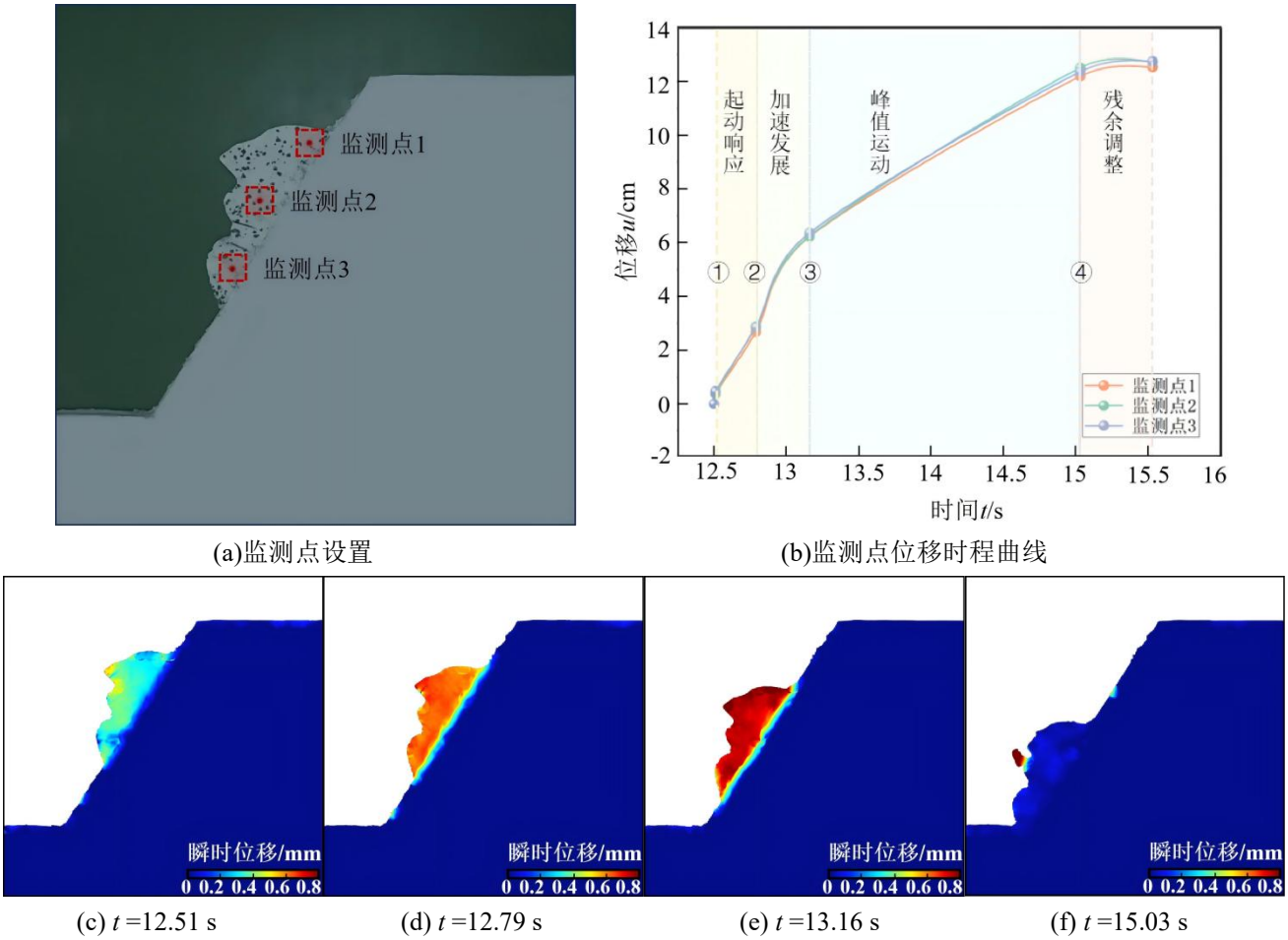
图 5　危岩试样关键时刻运动矢量及速度场特征

Fig.5　Motion vectors and velocity field characteristics of the unstable rock specimen at key moments

结合速度场演化特征，可将其主运动过程划分为启动响应、加速发展、峰值运动和残余调整 4

个阶段：①启动响应阶段（t=12.51 s），试样已开始沿坡面发生可识别运动，但整体形态仍保持较好连续性，局部运动矢量总体沿坡面向下分布，高值区主要集中于前缘上部及临空部位，表明试样处于由静止向失稳运动转化的初始建立阶段。②加速发展阶段（t=12.79 s），局部运动矢量长度明显增大，顺坡定向特征更加清晰，速度场高值区范围显著扩大，说明前缘及上部区域的下滑运动持续增强，试样整体运动强度快速上升。③峰值运动阶段（t=13.16 s），速度场高值区范围及强度均达到所选关键时刻中的最大水平，表明试样整体运动最为剧烈。此时局部运动矢量仍以顺坡面向下为主，但不同部位间矢量长度差异进一步增大，显示出块体内部响应已由前期相对一致逐渐向局部不均匀演化。④残余调整阶段（t=15.03 s），前期集中于前缘的高速度区域明显减弱，运动矢量场整体显著衰减，说明试样主要快速运动过程逐渐趋于结束，整体运动由强烈顺坡滑移转入后期局部残余调整，并最终于 15.53 s 达到静止状态。

为进一步揭示试样位移演化的空间分异及时间累积特征，图 6 给出了监测点布置、关键监测点累计位移时程曲线及对应关键时刻的瞬时位移场分布。3 个监测点均位于试样主体块体范围内，受整体滑移控制较强，累计位移曲线表现出较高一致性，均表现为前期缓慢增长、中期快速增加、后期逐渐趋缓的变化规律，与速度场划分得到的阶段特征具有较好对应关系。其中，启动响应阶段位移高值主要局限于前缘及临空部位；加速发展阶段和峰值运动阶段，位移高值区明显向块体内部扩展，监测点累计位移快速增加；残余调整阶段位移场整体响应减弱，监测点位移曲线斜率逐渐减小，表明试样整体运动已接近终止，后续仅表现为局部残余调整。



(a)监测点设置　(b)监测点位移时程曲线

(c) t =12.51 s　(d) t =12.79 s　(e) t =13.16 s　(f) t =15.03 s

图 6　危岩试样监测点布置及位移响应特征

Fig.6　Monitoring point layout and displacement response characteristics of the unstable rock specimen

综合速度场、位移场及关键监测点位移时程特征可知，危岩试样失稳运动具有较明显的阶段性演化规律。前缘及上部临空部位始终是最先响应且最为活跃的区域，也是速度和位移高值集中分布的主要部位；随着运动过程推进，局部响应由前缘向块体内部逐步扩展，整体运动由启动、加速发展至峰值增强，并在后期随能量耗散而逐渐减弱。图 6 所示位移结果主要反映二维底摩擦条件下试样表

面位移的累积特征，可用于判断运动阶段、位移增长趋势及前缘自由面附近的敏感响应区域。

3.2　数值试验与模型试验结果对比分析

为分析数值模型对危岩试样失稳运动过程的表征能力，并进一步检验底摩擦物理模型试验中阶段划分结果的合理性，基于 MF-WS01 滑移式危岩体二维概化轮廓建立离散元数值试验模型。模型分为基座区与危岩体区，统一采用颗粒集合体进行离散化表达。数值模型沿用物理模型试验中的二维概化轮廓，并将危岩体与基座接触部位作为底部潜在滑移结构面，通过弱化接触参数等效表征结构面抗剪强度较低、易发生剪切错动的特征，进而在重力加载下触发危岩体沿该弱化接触面发生失稳运动。底摩擦试验通过底部摩擦作用近似表征危岩体受到的重力作用，数值试验则直接施加重力场诱发滑移失稳，二者在加载实现方式上不同，但均用于表征危岩体沿潜在滑移面的启动与运动演化过程。模型中选取与物理模型试验监测点位置相对应的 3 个颗粒作为监测点（图 7），分别记录其速度和累计位移时程响应，用于与底摩擦试验结果进行对比分析。图 8 为数值试验中 3 个监测点的运动响应特征。

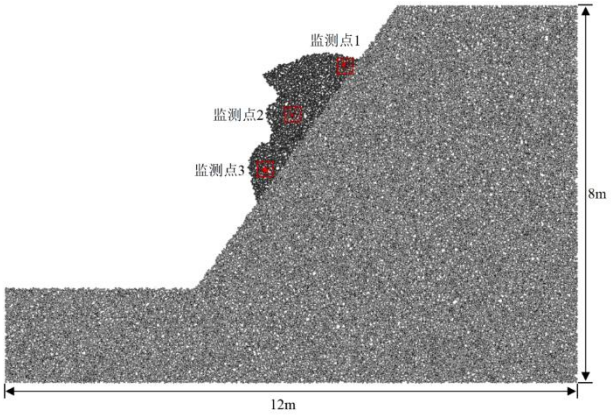
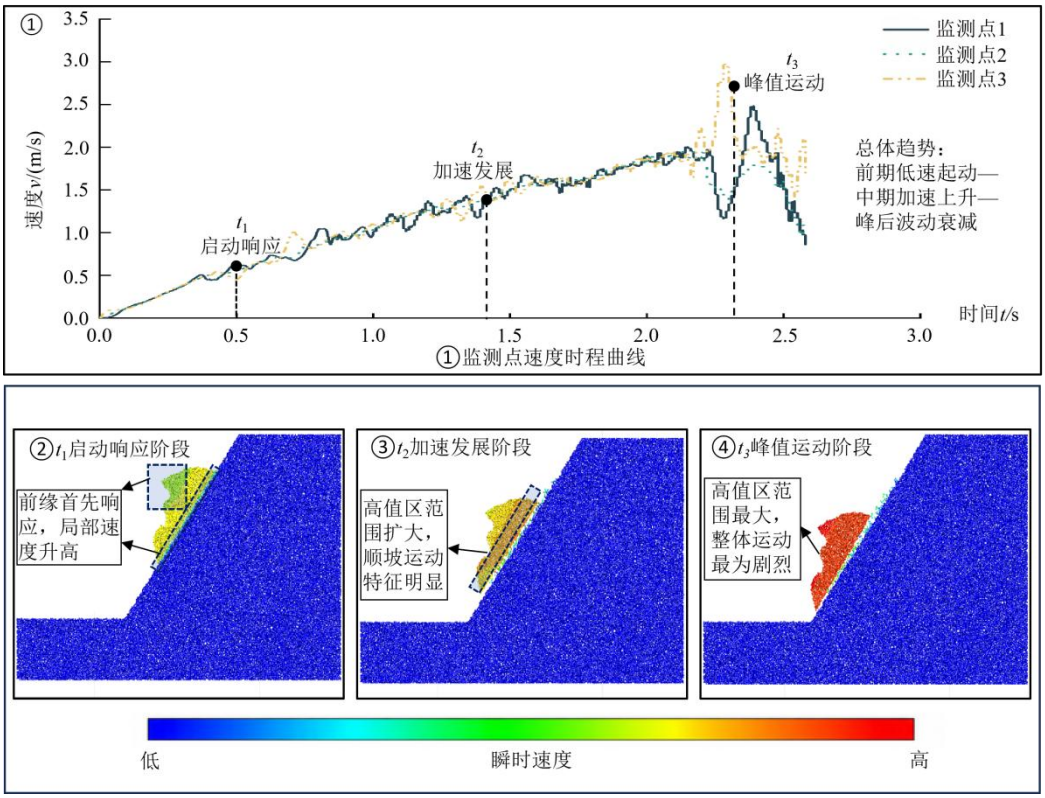
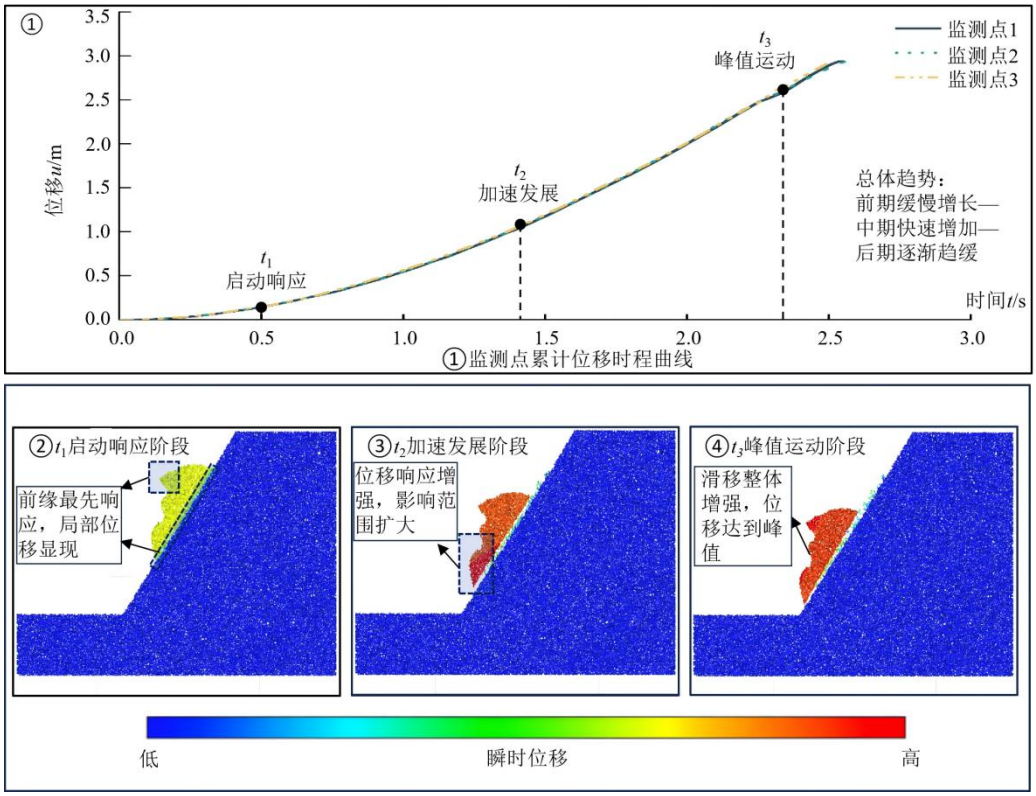


图 7　数值试验模型及关键点布设

Fig.7　Numerical test model and layout of key monitoring points



(a)速度时程曲线及速度场分布特征



(b)位移时程曲线及位移场分布特征

图 8　危岩体数值试验运动响应特征

Fig.8　Motion response characteristics of the unstable rock mass in numerical tests

由图 8(a)可知，3 个监测点速度变化趋势总体一致，均呈现出由低速启动、快速增长、达到峰值后波动衰减的变化特征，与物理模型试验中基于 PIV 识别得到的速度场演化规律一致性较好。监测点 1、监测点 2 和监测点 3 的最大速度分别为 2.5、1.9、2.9 m/s。

结合速度曲线变化及速度场分布特征，可将数值试验中的主运动过程划分为启动响应、加速发展和峰值运动 3 个阶段：①启动响应阶段，监测点速度由低值逐渐上升，表明危岩体开始由初始稳定状态向失稳运动状态转化。此时速度高值区首先出现在前缘及临空部位，且分布范围较小，说明前缘自由面附近对失稳扰动响应最为敏感，是危岩体失稳启动的主要响应区域。②加速发展阶段，监测点速度持续增大，速度曲线斜率较前期明显提高，表明危岩体沿坡面运动强度不断增强。速度场中高值区沿坡面方向进一步扩展，顺坡运动特征更加明显，说明前缘局部运动逐步向块体内部传递，危岩体整体参与运动程度显著提高。③峰值运动阶段，监测点速度达到较高水平，并在峰值附近出现一定波动。该现象反映了危岩体在快速滑移过程中受到局部接触、碰撞及块体间相互作用的影响。此时速度高值区范围达到最大，整体运动最为剧烈，表明危岩体进入强烈失稳运动阶段。峰值之后，监测点速度逐渐衰减，说明快速滑移过程开始减弱，系统逐步向后期残余调整阶段过渡。

由图 8(b)可知，3 个监测点累计位移曲线变化趋势较为一致，整体表现为前期缓慢增长、中期快速增加、后期增长速率逐渐降低的特征。监测点 1、监测点 2 和监测点 3 的最大累计位移分别为 2.98、2.96、3.00 m，三者差异较小，表明危岩体在失稳滑移过程中具有较明显的整体运动特征。该位移演化规律与物理模型试验中基于 DIC 获取的监测点位移响应一致性较好，说明数值试验能够较好反映危岩体失稳过程中位移累积及阶段转换特征。在启动响应阶段，监测点累计位移较小，位移高值区主要集中于前缘及临空部位，说明危岩体尚未发生大范围整体滑移，运动响应以局部启动为主。进入加速发展阶段后，监测点累计位移增长速率明显提高，位移高值区范围逐渐向块体内部扩展，表明危岩体沿坡面滑移不断增强，整体运动参与程度进一步提高。至峰值运动阶段，累计位移达到较高水平，位移高值区进一步发展，危岩体滑移变形最为显著。随后，位移曲线斜率逐渐降低，表明危岩体主要滑移过程趋于结束，后续运动主要表现为局部残余调整。

综合速度与位移模拟结果可知，危岩体失稳运动首先发生于前缘及上部临空部位，随后运动响应逐渐向块体内部扩展，并在中后期达到峰值，最终随速度衰减和位移增长趋缓而进入残余调整阶段。数值模型试验的结果进一步表明，危岩体失稳并非瞬时整体破坏过程，而是经历了局部启动、加速滑移、峰值运动和残余调整的连续演化过程。

进一步从失稳机理上看，MF-WS01 滑移式危岩体的渐进破坏主要受结构面控制作用、临空边界效应和后期动力耗能过程共同影响。该危岩体周缘受多组结构面切割，其中顺坡向结构面为危岩体提供了优势滑移边界。潜在滑移面上的剪切位移逐渐累积，结构面抗剪作用不断减弱，使危岩体由初始局部变形逐步转入整体滑移。因此，结构面剪切滑移是控制该类危岩体失稳启动和加速发展的主要因素。

同时，前缘及上部临空部位受外部约束较弱，具有更大的运动释放空间，因而成为速度和位移响应最先集中的敏感区域。随着滑移过程持续发展，局部运动由临空边界附近向块体内部传递，危岩体内部不同部位的运动响应差异逐渐增大，为后续局部破碎和块体分离提供了动力条件。峰值运动之后，危岩体整体运动强度开始衰减，局部破碎、块体碰撞和接触摩擦逐渐成为主要耗能方式，使速度响应降低、位移增长趋缓，并最终进入残余调整状态。由此可见，MF-WS01 滑移式危岩体的失稳不是单一因素控制下的瞬时破坏，而是结构面剪切滑移、临空边界响应和块体动力耗能共同作用下的渐进演化过程。

4 结论

以南京幕府山 MF-WS01 典型滑移式危岩体为研究对象，基于近景摄影测量三维模型开展几何概化与二维轮廓提取，并结合底摩擦物理模型试验、PIV 和 DIC 分析及数值试验，对危岩体渐进失稳与崩塌演化过程进行了研究，主要结论如下：

1）基于近景摄影测量三维模型完成了 MF-WS01 滑移式危岩体的几何概化与二维轮廓提取，实现了底摩擦物理模型试验与离散元数值试验在几何边界上的统一，为试样制备、过程观测及数值建模提供了一致的几何基础。

2）底摩擦试验结果表明，危岩试样失稳运动具有明显阶段性，可划分为启动响应、加速发展、峰值运动和残余调整 4 个阶段。运动响应首先出现在前缘及上部临空部位，随后向块体内部扩展，最终随运动能量耗散而逐渐减弱。

3）PIV 与 DIC 分析结果表明，速度高值区和位移高值区主要集中于前缘、临空部位及结构薄弱区，关键监测点位移时程能够较好反映危岩体由缓慢启动、快速滑移至残余趋稳的阶段转换过程。

4）数值试验与物理模型试验在运动阶段、速度变化趋势和位移累积规律方面总体一致。综合分析表明，MF-WS01 滑移式危岩体失稳主要受结构面剪切滑移、临空边界效应和后期动力耗能过程共同控制，其中结构面剪切滑移控制失稳启动与加速发展，临空边界条件控制局部优先响应及运动扩展，局部破碎、块体碰撞和接触摩擦控制后期解体、耗能及堆积稳定。

参 考 文 献

[1] 王忠福,罗干,杨晓洁.基于RocPro3D的大华桥水电站危岩体数值模拟研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):152-160.[Wang Zhongfu,Luo Gan,Yang Xiaojie.Rockfall numerical simulation at Dahuaqiao Hydropower Station using RocPro3D[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(1):152-160.]

[2] 黄晋文,苏国韶.地震作用下高陡危岩体动态响应特征与机制研究[J/OL].水文地质工程地质,1-16[2026-06-27].https://link.cnki.net/urlid/11.2202.P.20251106.0928.002.[Huang Jinwen,Su Guoshao.Research on dynamic response characteristics and mechanisms of high-steep precarious rock mass under seismic loading[J/OL].Hydrogeology & Engineering Geology,1-16[2026-06-27].https://link.cnki.net/urlid/11.2202.P.20251106.0928.002.]

[3] Gong Tao,Zhang Ji,He Chuan, et al.Refined simulation for predicting the seismic collapse of high and steep dangerous rock masses via the 3D discrete element method[J].Natural Hazards,2025,121(5):6107-6132.

[4] Xing Lei,Gong Wenping,Li Bing, et al.Probabilistic analysis of earthquake-induced failure and runout behaviors of rock slopes with discrete fracture network[J].Computers and Geotechnics,2023,159:105487.

[5] 李卓,罗皓,吉锋,等.软弱基座型立柱式危岩变形破坏过程物理模拟试验研究[J/OL].地质灾害与环境保护,1-9[2026-07-20].https://link.cnki.net/urlid/51.1467.P.20250919.1254.002.[Li Zhuo,Luo Hao,Ji Feng,et al.Study on deformation and failure process of weak base columnar dangerous rock mass based on physical model test[J/OL].Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,1-9[2026-07-20].https://link.cnki.net/urlid/51.1467.P.20250919.1254.002.]

[6] Zhang Lingfei,Chen Zhonghui,Nian Gengqian, et al.Base friction testing methodology for the deformation of rock masses caused by mining in an open-pit slope[J].Measurement,2023,206:112235.

[7] 孙书伟,李圆,杨晓锐,等.不同岩层倾角顺倾层状岩质边坡破坏机制研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(7):1607-1620.[Sun Shuwei,Li Yuan,Yang Xiaorui,et al.Study on the failure mechanism of rock slopes with dipped layered structures under various rock dip conditions[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(7):1607-1620.]

[8] 陈国庆,秦昌安,魏涛,等.岩质边坡阶梯状破坏及岩桥破裂机制研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(4):809-821.[Chen Guoqing,Qin Changan,Wei Tao,et al.Study on the stepped failure of rock slopes and fracture mechanism of rock bridges[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(4):809-821.]

[9] 李任杰,胡富杭,石豫川,等.基于底摩擦试验的硬岩岩质边坡变形过程及破坏机制研究[J].水文地质工程地质,2022,49(3):145-152.[Li Renjie,Hu Fuhang,Shi Yuchuan,et al.A study of deformation process and failure mechanism of hard rock slope based on the bottom-friction test[J].Hydrogeology & Engineering Geology,2022,49(3):145-152.]

[10] 隋振德,张科,张凯,等.基于PIV-地震信号监测的岩崩运动破碎机制研究[J/OL].工程科学与技术,1-16[2026-07-20].https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250617.0909.006.[Sui Zhende,Zhang Ke,Zhang Kai,et al.Investigation on the motion and fragmentation mechanism of rockfall based on PIV-seismic signal monitoring[J/OL].Advanced Engineering Sciences,1-16[2026-07-20].https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250617.0909.006.]

[11] 龚柏城,苑久超,王磊,等.软硬岩互层反倾高边坡变形破坏过程物理模型试验研究[J].地质灾害与环境保护,2024,35(1):87-95.[Gong Baicheng,Yuan Jiuchao,Wang Lei,et al.Experimental study on physical model of deformation evolution mode of high slope with reverse dip of soft and hard rock[J].Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2024,35(1):87-95.]

[12] Chouhan K,Chavda J T.A review on digital image correlation in experimental geotechnics[J].Indian Geotechnical Journal,2024,54(2):639-656.

[13] 陆烨,黄越川.基于DIC分析的含石量对碎石土边坡稳定性影响[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(4):49-57.[Lu Ye,Huang Yuechuan.Influences of stone content on stability of gravel soil slope based on DIC analysis[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2023,34(4):49-57.]

[14] Chen Liang, Zeng Weiqian, Wang Xianbiao, et al. A three-dimensional DEM method for trajectory simulations of rockfall under irregular-shaped slope surface and rock blocks[J].Journal of Earth Science,2024,35(1):306-312.

[15] 靳立周,王盈,常文斌,等.基于D-InSAR和PFC2D技术的白格滑坡稳定性分析[J].地震地质,2023,45(1):153-171.[Jin Lizhou,Wang Ying,Chang Wenbin,et al.Stability analysis of the Baige landslide using D-InSAR and PFC2D modeling[J].Seismology and Geology,2023,45(1):153-171.]

[16] 黄健,袁圆,曾探,等.高位崩塌碰撞破碎能量转化机制的模型试验研究[J].工程科学与技术,2026,58(1):167-180.[Huang Jian,Yuan Yuan,Zeng Tan,et al.Dynamic fragmentation mechanism of high-altitude rockfalls:an experimental study on energy conversion[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(1):167-180.]

[17] He Liu,Wu Guang,Wang Hua.Study of base friction simulation tests based on a complicated engineered bridge slope[J].Frontiers of Structural and Civil Engineering,2012,6(4):393-397.

Study on Progressive Instability Characteristics of a Sliding Unstable Rock Mass Based on Bottom-Friction and Numerical Tests

Dai Yuxin[1], Sun Shaorui[1], Li Songyang[1], Mao Boshuai[1], Liu Gang[2], Shi Wei[2], Chen Yongxiang[2], Sui Minlei[2]

(1. School of Earth Science and Engineering，Hohai University，Nanjing 211100，China；2. The First Geological Brigade of Jiangsu Geological Bureau，Nanjing 210041，China)

Abstract:【Objective】 To elucidate the evolution of a representative sliding unstable rock mass in Mufu Mountain, Nanjing, from initiation and sliding to disintegration and stabilization of the deposit under field-derived geometric constraints, thereby providing a reference for instability identification and risk management of high and steep unstable rock masses.**【Methods】**A three-dimensional reality model acquired by close-range UAV photogrammetry was used to extract the two-dimensional contour of the unstable rock mass. Bottom-friction physical model tests, particle image velocimetry (PIV), digital image correlation (DIC), and numerical tests were combined to analyze the velocity field, displacement field, and responses of key monitoring points during instability, followed by numerical validation.**【Results】** (1) The instability process comprised four stages: initiation response, accelerated development, peak motion, and residual adjustment, exhibiting progressive failure from local initiation to overall sliding and from structural integrity to block disintegration. (2) The PIV results showed a weak velocity response during the initial stage, followed by the gradual expansion of local high-velocity zones toward the front edge and upper free-face areas. The peak velocity corresponded to intense block sliding, collision, and fragmentation. (3) The DIC results indicated that cumulative displacement was mainly concentrated along the sliding direction and in the frontal disintegration zone. The displacement–time curves of the key monitoring points reflected the transition from slow initiation and rapid sliding to residual stabilization. (4) The numerical and physical model tests showed overall agreement in motion stages, velocity variation trends, and displacement accumulation patterns. **【Conclusions】** The instability of the MF-WS01 sliding unstable rock mass in Mufu Mountain, Nanjing, exhibits distinct stage-dependent characteristics and is jointly controlled by shear sliding along structural planes, free-face boundary effects, and late-stage dynamic energy dissipation. Future field monitoring may focus on the front edge, upper free-face areas, and structurally weak zones, providing a basis for optimizing monitoring schemes and determining early-warning thresholds.

Keywords: unstable rock mass; bottom friction test; digital image analysis; discrete element simulation; collapse evolution