第 59 卷 第 2 期
2026 年（总 246 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 2
2026(Sum246)



引文格式：高波，刘港. 基于无人机航测与数值模拟的黄土崩塌几何特征及形成机制研究[J]. 西北地质，2026，59(2)：153−160. DOI：10.12401/j.nwg.2025093

Citation：GAO Bo，LIU Gang. Research on the Geometric Characteristics and Formation Mechanism of Loess Collapse Based on UAV Aerial Survey and Numerical Simulation[J]. Northwestern Geology，2026，59(2)：153−160. DOI：10.12401/j.nwg.2025093

基于无人机航测与数值模拟的黄土崩塌几何特征及形成机制研究

高波，刘港*

（自然资源部黄土地质灾害重点实验室，中国地质调查局西安地质调查中心，陕西 西安 710119）

摘 要：针对黄土崩塌灾害形成机制复杂、传统调查手段精度不足的问题，本研究提出"空−地−数"协同分析方法，以2023年9月14日米脂县杨家沟镇产业园区发生的典型黄土崩塌体为研究对象，通过无人机航测技术获取厘米级分辨率的三维地形数据，重构崩塌体几何形态特征；结合现场地质调查揭示控制性结构面与地层组合特征。基于混合有限元−离散元数值模拟(Y-Mat)构建考虑真实几何形态与结构面分布的双尺度模型，通过模拟揭示：受地形与裂隙导水影响，坡脚遇水发生软化，强度降低，牵引上部黄土体产生形变，形变累计至一定程度，沿原有贯通性导水裂隙向下崩落，下落过程中部分黄土发生解体，堆积于坡脚一定范围内，形成大小不同的黄土块体和散土，对坡脚房屋产生冲击，造成房屋倒塌。研究成果可为黄土高原崩塌地质灾害演化机制研究提供多源数据融合分析方法与技术支撑。

关键词：无人机航测；黄土崩塌；几何特征；混合有限元离散元；形成机制

中图分类号：P694；P642.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1009-6248(2026)02-0153-08

Research on the Geometric Characteristics and Formation Mechanism of Loess Collapse Based on UAV Aerial Survey and Numerical Simulation

GAO Bo, LIU Gang*

(Key Laboratory of Loess Geological Hazards of the Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: In response to the complex formation mechanism of loess landslide disasters and the insufficient accuracy of traditional investigation methods, this study proposes a "space ground number" collaborative analysis method. The typical loess landslide body that occurred in Yangjiagou Town Industrial Park, Mizhi County on

收稿日期：2024-12-19；**修回日期**：2025-05-25；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：中国地质调查局项目“国家重大工程规划建设地质安全风险调查评价”(DD20242419)，“西北黄土高原区地质灾害智能监测预警系统应用示范”(DD20230443)，“青藏高原重大工程高位地质灾害与地质安全风险调查评价”(DD202606201306)联合资助。

作者简介：高波(1981−)，男，正高级工程师，从事地质灾害监测预警与风险评价研究工作。E−mail：43617102@qq.com。

*通讯作者：刘港(1990−)，副研究员，博士，主要从事地质灾害调查与研究工作。E−mail：liugang_iggcas@163.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

September 14, 2023, is taken as the research object. Three dimensional terrain data with centimeter level resolution is obtained through unmanned aerial vehicle aerial survey technology to reconstruct the geometric shape characteristics of the landslide body; Reveal the characteristics of controlling structural planes and stratigraphic combinations through on-site geological surveys. Based on the mixed finite element discrete element numerical simulation (Y-Mat), a dual scale model considering the real geometric shape and structural plane distribution is constructed. Through simulation, it is revealed that due to the influence of terrain and crack water conduction, the slope foot softens when encountering water, the strength decreases, and the upper loess body is pulled to deform. When the deformation accumulates to a certain extent, it collapses downwards along the original through water conduction cracks. During the falling process, some loess disintegrates and accumulates within a certain range of the slope foot, forming loess blocks and loose soil of different sizes, which impact the buildings at the slope foot and cause them to collapse. The research results can provide multi-source data fusion analysis methods and technical support for the study of the evolution mechanism of landslide geological hazards in the Loess Plateau.

Keywords: UAV aerial survey; loess collapse geometric features; mixed finite element; discrete element method; formation mechanism

众所周知,黄土是一种典型的第四纪松散沉积物,垂直节理发育,干燥时结构稳定;湿润时结构松散,易发生崩塌、滑坡等地质灾害(曲晨飞等,2025;王新刚等,2025)。人类工程活动中,建房或筑路常以切坡方式开展。切坡打破了其原有应力平衡,应力释放回弹导致卸荷裂隙发育,在降雨入渗及冻融等因素的加持下,卸荷裂隙向外不断拉张,水沿裂隙入渗,裂隙面结构强度衰减,叠加重力的作用,易形成黄土崩塌、滑坡地质灾害(王家政等,2025;于国强等,2025;张文铎等,2025),严重威胁黄土高原区居民生命财产安全。针对黄土崩塌成因机制,前人做了大量且富有成效的工作。王根龙等(2011)提出了黄土崩塌的4种破坏机制,通过数值模拟再现和分析了延安黑龙沟黄土崩塌;叶万军等(2013,2014)阐明了黄土崩塌形成内因、外因并根据黄土崩塌常见的运动形式,提出崩塌体自由飞落及滚动情况下影响范围的理论公式;张宇宇(2016)以延安宝塔区典型黄土崩塌为研究对象,通过试验测试及理论分析研究了降雨作用下黄土崩塌形成的机理;成玉祥等(2021)以陕北黄土丘陵区崩塌灾害为例,统计分析厘定出溯源侵蚀作用引发崩塌的典型类型为拉裂–倾倒型,并分析了其形成机制;刘知等(2023)提出了晋西黄土崩塌的主控因素分类和变形破坏方式分类,并探索了滑落式黄土崩塌与黄土滑坡的界定条件。黄土高原区复杂的地形使得在野外人力调查变得困难,随着无人机航测技术的发展,依靠这些新技术对黄土崩滑灾害的研究越来越多。彭大雷(2018)以甘肃永靖黑方台为例,通过无人机航测结合现场调查,查明了滑坡区工程地质条件,厘清了黄土滑坡主要类型,揭示了滑坡发育分布规律,提出了4类黄土滑坡致灾模式毛正君(2022,2024)以宁夏彭阳县红河镇为例,构建了无人机航摄系统,确定了识别标志,结合现场确定了180处滑坡,并分析研究了滑坡空间分布、孕灾地貌等;刘军(2023)以延安市赵家岸滑坡为例,采用无人机航测技术获取了高分辨率滑坡影像,生成了滑坡空间几何数据,并结合层次分析和危险度计算方法评价赵家岸滑坡的危险性;邵建鸿(2023)基于人工巡查的局限性,提出了一种基于无人机倾斜摄影测量技术实现三维重建和点云数据分析的公路黄土边坡坡面病害巡查防范;刘宽富等(2023)以甘肃环县披覆型黄土高边坡为对象,建立了一种基于无人机倾斜摄影测量技术的数值模型构建方法。笔者以米脂杨家沟黄土崩塌为研究对象,针对黄土崩塌灾害形成机制复杂、传统调查手段精度不足的问题,提出“空–地–数”协同分析方法,分析了崩塌的几何特征并阐明了其形成机制,以期为区内黄土崩塌的研究提供实践参考。

1 崩塌概况

2023年9月14日凌晨,陕西省榆林市米脂县杨家沟产业园区发生黄土崩塌灾害(崩塌点坐标:E 37°44′26.93″,N 110°19′28.52″),摧毁房屋3间,导致

2 人遇难。崩塌点原始微地貌为人工切坡, 东侧为 2 级淤地坝, 淤地坝内种植玉米等农作物, 西侧为产业园区人工切坡(五级), 斜坡坡面侵蚀严重, 坡面发育多条冲沟, 崩塌体北侧为一较大冲沟, 坡面植被覆盖较好, 坡脚处建筑为产业园区工人宿舍。崩塌体主要岩性为第四系上更新统马兰黄土, 节理裂隙发育且具有一定导水性。崩塌点所处杨家沟镇位于米脂县东南部, 区内地貌为典型的黄土高原丘陵沟壑地貌, 地势起伏, 上峁下梁, 峁小梁短, 区内地表大部被第四系黄土层覆盖, 厚度较大。区内年降水量变化较大, 多集中在 7～9 月, 地下水主要受大气降水补给。区内沟谷发育, 切割强烈, 地形破碎, 降雨入渗, 斜坡松散层土体含水量的变化, 直接影响斜坡的稳定性(图 1)。

2　崩塌几何特征

崩塌发生后, 现场使用 DJI MAVIC3 无人机进行了航空摄影测量。基于无人机获得的航拍照片, 使用大疆智图软件生成 DOM 数据和 DEM 数据(图 2), 坡度分布显示, 这次崩塌的后壁近乎直立, 接近 90°; 而堆积物的坡度相对较缓, 大约为 30°。

2023 年 9 月 14 日拍摄的崩塌发生后航拍照片(图 3b), 地面分辨率为 0.04 m。崩塌前图像来自吉林一号卫星影像, 拍摄于 2021 年 11 月 4 日, 分辨率分别为 0.75 m(图 3a)。崩塌后图像清晰地显示了崩塌体边界, 崩塌方向大致为 EW 向。

根据无人机航摄数据三维重建(图 4c)和现场调查, 分别划定了崩塌物源区、崩塌堆积区, 面积分别为 13.74 m^2、220.42 m^2(图 4a)。崩塌源在平面上呈直线形态, 立面成三角面状, 上窄下宽。平均倾角为 80°, 主崩方向为 270°, 垂直高度约为 18.81 m, 崩塌体长(L)为 20.02 m, 宽(W)为 12.60 m, 平均厚度(H)为 2.5 m, 面积(S)为 220.42 m^2, 体积(V)为 496.09 m^3。崩塌体长宽比(L/W)为 1.59, 反映该崩塌总体运移优势方向为崩塌体长轴方向即为 W 向, 宽厚比(W/H)为 5.04, 反映目前崩塌堆积体较为稳定, 面积体积比(S/V)为

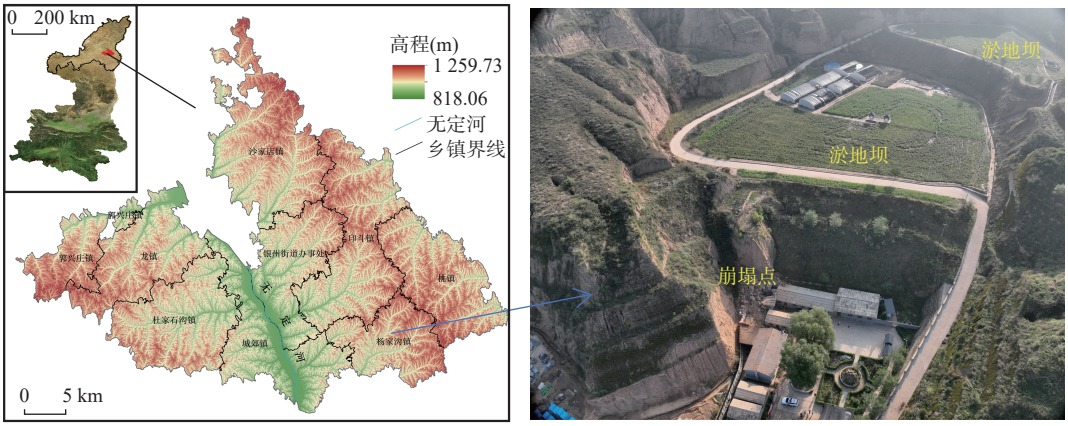


图1　杨家沟产业园区崩塌所处位置

Fig. 1　Location of Yangjiagou industrial park collapse

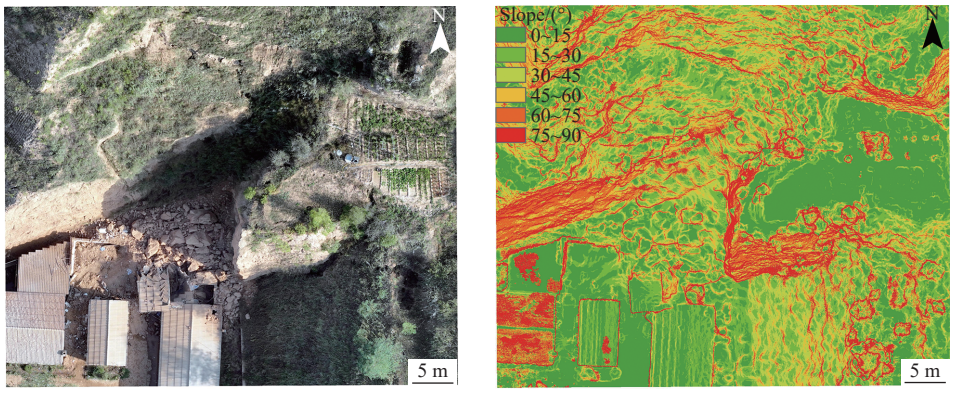


图2　杨家沟产业园区崩塌 DOM 及 DEM(分辨率 0.04 m)

Fig. 2　Collapse DOM and DEM (resolution 0.04 m) of Yangjiagou industrial park



图3 杨家沟产业园区崩塌发生前后影像

Fig. 3 Images before and after the collapse of Yangjiagou industrial park



图4 杨家沟产业园区崩塌无人机航拍照片

Fig. 4 Drone aerial photo of Yangjiagou industrial park collapse

0.44, 反映该崩塌体破碎程度一般。

崩塌源存在明显的垂直节理, 且崩塌后壁土体颜色明显深于其他部位, 表现为土体含水量明显高于其他部位。崩塌堆积物沿坡脚不均匀分布, 其中堆积前缘较为平缓, 坡度为 15°～30°, 堆积区前部以土体为主, 后部以大块土体碎屑为主, 堆积体厚度由前部向后部逐渐增加, 最大厚度约为 7 m(图 4b)。现场调查结果及崩塌体规模显示, 该崩塌为一处典型的小型黄土崩塌。

3 崩塌形成机制

就本次崩塌灾害而言, 现场调查, 崩塌后壁近直立, 垂直节理发育, 坡体下部颜色较上部深, 触摸较潮湿, 说明坡体下部处于长期湿润状态(图 4b)。根据米脂县降雨量国家台站记录, 2023 年降雨量为 453.80 mm, 主要集中在 4～10 月(图 5)。其中, 9 月累计降雨为 71.6 mm, 9 月 8 日降雨量为 30.40 mm, 为最大单日降雨量; 除 9 月 11 日降雨 0.1 mm, 9 月 10 日至 9 月 14 日无降雨(图 6)。结合崩塌点所处冲沟发育的梁峁地形综合分析可知, 本次黄土崩塌发生主要受降雨导致, 9 月 8 日 30.4 mm 大雨, 降雨随坡体北侧冲沟及坡体垂直节理下渗, 聚集于坡脚, 导致坡脚处黄土结构软化, 强度降低, 在自身重力影响下发生累进性变形, 直至发生顺节理面坠落式破坏。

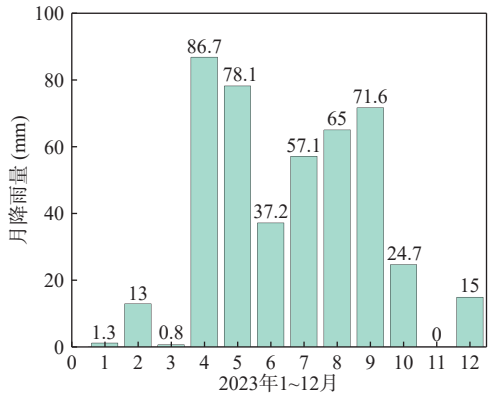


图5 米脂县 2023 年逐月降雨量统计

Fig. 5 Monthly rainfall statistics of Mizhi County in 2023

4 崩塌动力学分析

为了进一步精细刻画该黄土崩塌变形破坏过程, 采用数值模拟开展分析。

4.1　数值分析方法

杨家沟产业园区黄土崩塌模拟采用混合有限元离散元程序 Y-Mat, 其理论基础是混合有限元-离散元算法(FDEM), 将有限元与离散元相耦合而集成二者优点。采用有限元方法计算模型中连续体的变形, 利用离散单元方法计算模型中非连续体的变形, 并且通过无厚度节理单元实现模型由连续向非连续的转变, 从而实现计算模型的大变形和破坏模拟。采用该算法的优势在于其能够捕捉或再现崩塌完整土体开裂到离开母体再到运移堆积全过程, 其基本原理实现如图 7 所示。其运动控制方程为:

$$MV + CU - f_{\mathrm{int}}(x) - f_{\mathrm{ext}}(x) - f_{\mathrm{c}}(x) = 0$$

式中: M 是集中质量矩阵, 为对角线阵; C 是粘滞阻尼矩阵, 为对角线阵; V、U 和 x 分别为节点的加速度、速率和位移; f_{int} 是内部作用力, 包括弹性变形力、节理单元的粘结力等; f_{ext} 是施加的外力; f_{c} 是接触力。

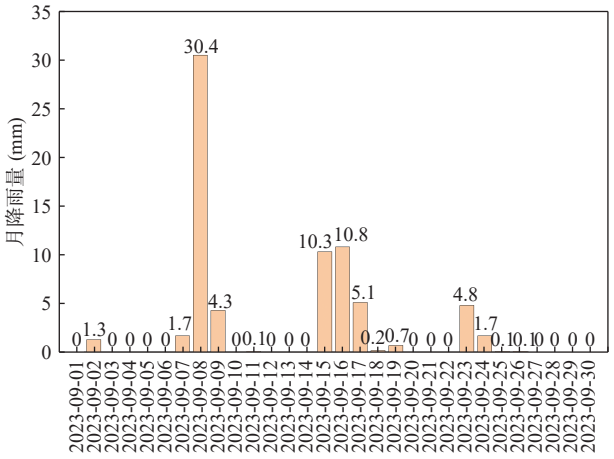


图6　米脂县 2023 年 9 月逐日降雨量统计

Fig. 6　Daily rainfall statistics of Mizhi County in september 2023

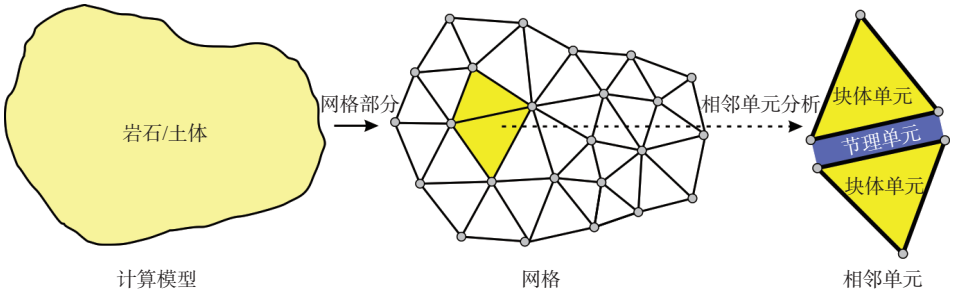


图7　混合有限元–离散元基本原理

Fig. 7　Basic principle of hybrid finite element and discrete element method

4.2　数值模型建立

4.2.1　模型概化

根据灾前的遥感影像数据和灾后现场调查数据, 将杨家沟崩塌的原始地形进行还原概化, 并进行网格剖分, 获取其主剖面形态(图 8)。经过调查, 崩塌体主要岩性为第四系上更新统马兰黄土, 节理裂隙发育且具有一定导水性, 坡脚部分土体发生软化。

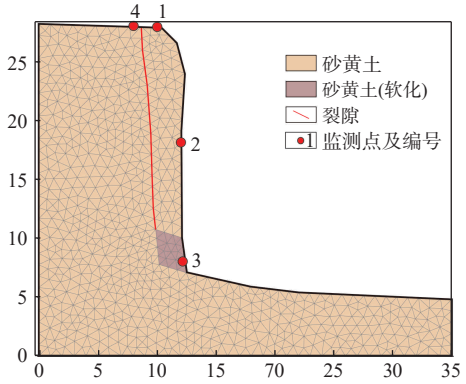


图8　网格剖分

Fig. 8　Model meshing

4.2.2　参数选取

该崩塌体黄土属砂黄土, 根据现场取样开展力学实验测试结果, 确定本次模型的模拟参数, 并通过标定, 确定微观参数数值(表 1)。

表 1　数值模拟计算参数

Tab. 1　Mechanical parameters of loess

单元类别	物理力学参数	黄土	软化黄土	裂隙
网格单元	弹性模量(MPa)	8.8	2.5	—
	泊松比(–)	0.42	0.43	—
	密度(kg/m^3)	1.69	1.88	—
	内聚力(kPa)	12	5	—
	内摩擦角(°)	25	18	—
	抗拉强度(kPa)	13	6	—

续表 1

单元类别	物理力学参数	黄土	软化黄土	裂隙
节理单元	粘聚力(kPa)	12	5	5
	最大静摩擦角(°)	28	21	21
	滑动摩擦角(°)	25	18	18
	残余摩擦角(°)	15	10	10
	抗拉强度(kPa)	13	6	6
	I型断裂能释放率(N/m)	100	20	20
	II型断裂能释放率(N/m)	800	160	160
	裂隙罚函数(Pa)	2.6×10^7	1.2×10^7	1.2×10^7
	法向接触罚函数(Pa)	2.6×10^7	1.2×10^7	1.2×10^7

4.2.3 边界条件

本次模型左边界、右边界和下边界均固定法相位移，上边界和斜坡表面为自由边界，边界上无外部卸载施加，整个模型受重力影响。

4.3 模拟结果与分析

模拟开始前，在崩塌斜坡上设置 4 个监测点，分别位于崩塌体顶部、中部和坡脚，作为对照，在斜坡发育裂隙的另外一侧(相对稳定区域)设置 1 处监测点，位置和编号如图 8 所示。经过模拟计算，得到该崩塌的变形破坏过程(图 9)。结果显示(图 9)，受地形与裂隙导水影响，坡脚遇水发生软化，强度降低，牵引上部黄土体产生形变，形变累计至一定程度，沿原有贯通性导水裂隙向下崩落，下落过程中部分黄土发生解体，堆积于坡脚一定范围内，形成大小不同的黄土块体和散土，对坡脚房屋产生冲击，造成房屋倒塌。

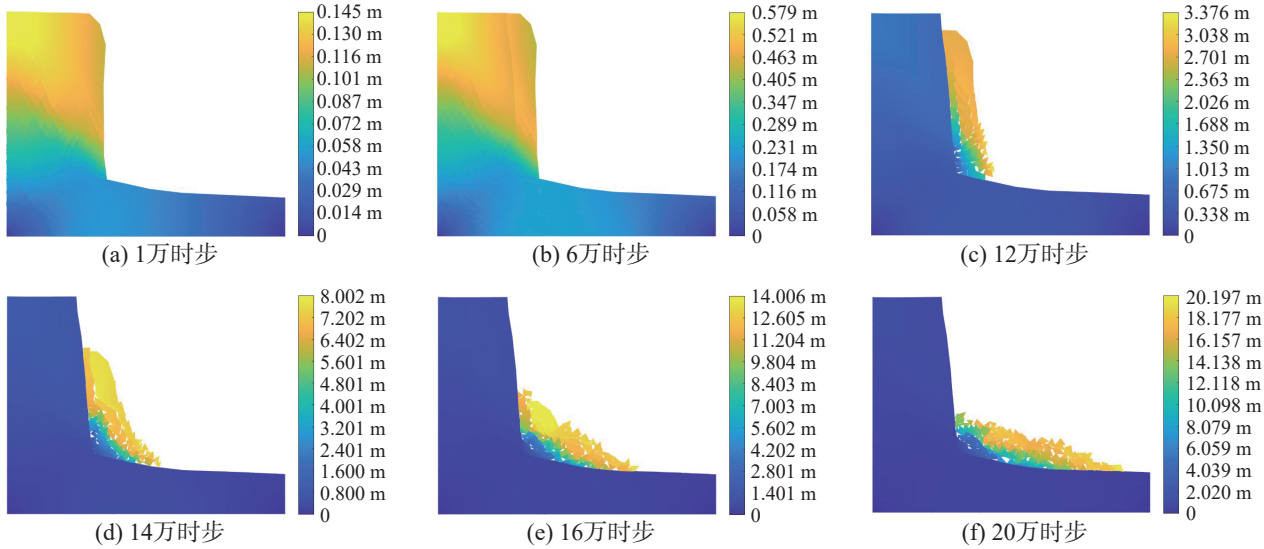


图9 杨家沟产业园区崩塌变形破坏过程(总位移云图)

Fig. 9 The deformation and failure process of loess collapse (total displacement cloud map)

黄土崩塌剪切应力云图(图 10)显示，无论是崩塌发生前、崩塌过程还是崩塌发生后，坡脚始终是剪应力集中带。崩塌发生前，坡脚因坡型而出现应力集中现象，当该部分土体湿润或饱和后，坡脚土体将会被部分挤出，坡体随之发生大变形乃至破坏。崩塌发生时和发生后，应力快速调整，坡脚仍是剪应力集中区，指示黄土斜坡稳定性评估不仅要关注裂隙，还要关注坡脚土体含水率或强度变化。

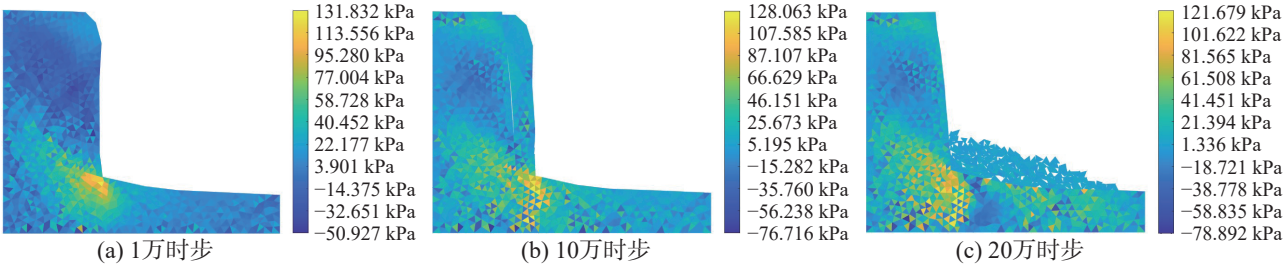
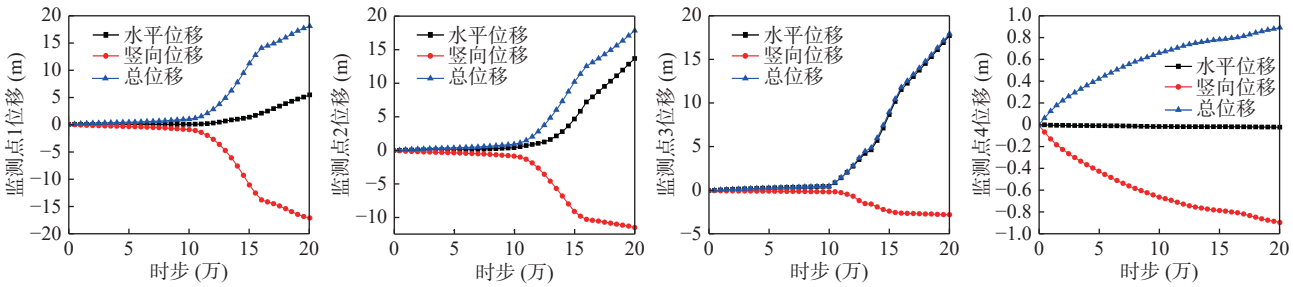


图10 黄土崩塌剪应力场云图

Fig. 10 Cloud map of shear stress field in loess collapse



(a) 监测点1　(b) 监测点2　(c) 监测点3　(d) 监测点4

图11　监测点位移曲线

Fig. 11　Displacement curve of monitoring points

模拟过程中记录 4 个监测点的位移变化(图 11)。监测点 1 和监测点 4 位于坡顶,根据位移历时曲线,监测点 1 所在位置的竖向位移明显大于水平位移,具有显著的坠落式崩塌特点,与现场调查相符,作为对照,监测点 4 因未发生崩落,变形相对较小。监测点 2 和监测点 3 位于坡中和坡脚,坡中黄土首先以竖向位移为主,待滑至坡脚后转为以水平位移为主,坡脚黄土发生水平运动的时间和最终数值均大于其他部位。

5　结论

(1)基于野外调查及无人机航测,杨家沟产业园区崩塌物源区、堆积区,面积分别为 13.74 m^2、185.93 m^2,主崩方向为 270°,垂直高度约为 18.81 m,最大崩落距离为 20.02 m,崩塌堆积体积为 496.09 m^3,崩塌体长宽比(L/W)为 1.59,宽厚比(W/H)为 5.04,面积体积比(S/V)为 0.44,为典型小型黄土崩塌。

(2)特殊的黄土沟壑地貌、疏松的土体结构、发育的垂直节理及持续的降雨等因素是造成杨家沟产业园区黄土崩塌发生的重要原因,特别是崩塌发生前一周即 9 月 8 日持续中雨是其重要诱发因素。

(3)基于混合有限元离散元模拟分析崩塌变形破坏过程:受地形与裂隙导水影响,坡脚遇水发生软化,强度降低,牵引上部黄土体产生形变,形变累计至一定程度,沿原有贯通性导水裂隙向下崩落,下落过程中部分黄土发生解体,堆积于坡脚一定范围内,形成大小不同的黄土块体和散土,对坡脚房屋产生冲击,造成房屋倒塌。

(4)为了避免再次发生类似惨剧,针对区内同类型黄土斜坡,需采取以工程排水为主的综合防控措施,降低其威胁程度。

致谢:崩塌现场应急调查,中国地质调查局西安地质调查中心黄玉华正高级工程师,薛强正高级工程师全程参与并提出宝贵意见,文中部分图件编制,洪勃博士提供帮助,在此一并致谢!

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

成玉祥,张卜平,唐亚明,等. 溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 86−91.

CHENG Yuxiang, ZHANG Puping, TANG Yaming, et al. The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 86−91.

刘军,王磊. 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡调查与危险性评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 139−147.

LIU Jun, WANG Lei. Investigation and risk assessment of a loess-landslide based on UAV tilt photogrammetry[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 139−147.

刘宽富,苟朝勇,杜源,等. 基于无人机倾斜摄影技术的黄土公路边坡数值模型构建[J]. 公路交通科技, 2023, 40(11): 34−39.

LIU Kuanfu, GOU Chaoyong, DU Yuan, et al. Numerical model construction for loess highway slope based on UAV oblique photography technology[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(11): 34−39.

刘知,安明晓,杨文府,等. 晋西黄土崩塌类型及其变形-破坏机制[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(6): 1176−1185.

LIU Zhi, AN Mingxiao, YANG Wenfu, et al. Types of loess collapse and its deformation-failure mechanism in western Shanxi Province[J]. Journal of Xi an University of Science and Tech-

nology, 2023, 43(6): 1176−1185.

毛正君, 于海泳, 梁伟, 等. 基于无人机倾斜摄影测量三维建模的区域黄土滑坡识别及特征分析[J]. 中国地质, 2024, 51(2): 561−576.

MAO Zhengjun, YU Haiyong, LIANG Wei, et al. Identification and feature analysis of regional loess landslides based on UAV tilt photogrammetry 3D modeling[J]. Geology in China, 2024, 51(2): 561−576.

毛正君, 石硕杰, 王贵荣, 等. 基于无人机遥感的区域黄土滑坡识别及发育特征分析[J]. 灾害学, 2022, 38(1): 63−71.

MAO Zhengjun, SHI Shuojie, WANG Guirong, et al. Identification and development characteristics analysis of loess landslide based on UAV remote sensing[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 38(1): 63−71.

彭大雷. 黄土滑坡潜在隐患早期识别研究-以甘肃黑方台为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.

PENG Dalei. Study on early recognition for potentially loess landslide -a case study at Heifangtai terrace, Gansu Province, China[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology, 2018.

曲晨飞, 杨庆义, 刘荣豪, 等. 浸水过程中黄土孔隙气压特性的现场浸水试验研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 146−158.

QU Chenfei, YANG Qingyi, LIU Ronghao, et al. Properties of Pore Air Pressure in Loess During Soaking: Insights from Field Immersion Test[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 146−158.

邵建鸿, 郑万鹏, 张 斌, 等. 基于点云数据的黄土公路边坡病害识别[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(3): 320−326.

SHAO Jianhong, ZHENG Wanpeng, ZHANG Bin, et al. Disease detection of loess highway slope based on point cloud data[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(3): 320−326.

王根龙, 张茂省, 苏天明, 等. 黄土崩塌破坏模式及离散元数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 541−549.

WANG Genlong, ZHANG Maosheng, SU Tianming, et al. Collapse failure modes and dem numerical simulation for loess slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 541−549.

王家政, 辛鹏, 曹生鸿, 等. 降雨诱发黄土滑坡–泥流的规律及阈值曲线研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 102−110.

WANG Jiazheng, XIN Peng, CAO Shenghong, et al. Study on Regularity and Threshold Curve of Rain-Induced Loess Landslide-Mudflow[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 102−110.

王新刚, 王道正, 王家鼎, 等. 黄土高原泥流灾变机理研究进展与发展趋势[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 1−15.

WANG Xingang, WANG Daozheng, WANG Jiading, et al. Research Status and Development Trend on the Mechanism of Mudflow Disasters in the Loess Plateau[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 1−15.

叶万军, 王鹏, 杨更社, 等. 黄土崩塌的形成因素及其影响范围的确定方法[J]. 工程地质学报, 2013, 21(6): 920−925.

YE Wanjun, WANG Peng, YANG Gengshe, et al. Formative factors of loess collapse and method for determining its influence rance[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 541−549.

叶万军, 杨更社, 张慧梅, 等. 拉裂-滑移式黄土崩塌的形成机制及其稳定性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3563−3568.

YE Wanjun, YANG Gengshe, ZHANG Huimei, et al. Research on formation mechanism and stability of tensile cracking-sliding loess collapse[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3563−3568.

于国强, 朱立峰, 张霞, 等. 灌溉诱发湿陷型侧压力对黄土滑坡的影响机制[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 111−120.

YU Guoqiang, ZHU Lifeng, ZHANG Xia, et al. Effect of Collapse-type Lateral Pressure Induced by Irrigation on Loess Landslide[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 111−120.

张宇宇. 降雨作用下延安地区黄土崩塌形成的机理研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2016.

ZHANG Yuyu. Study on the formation mechanism of loess collapse induced by rainfall in Yan’an area[D].Xi'an: Xi'an University of Science And Technology, 2016.

张文铎, 包含, 兰恒星, 等. 不同坡度下生态防护黄土边坡水分迁移演化特征研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 121−135.

ZHANG Wenduo, BAO Han, LAN Hengxing, et al. Study on Water Migration and Evolution Characteristics of Ecologically Protected Loess Slopes with Different Inclinations[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 121−135.