地震作用下黄土滑坡失稳运动过程模拟研究

——以甘肃平凉崆峒区七府滑坡为例

万朝东[1]，郑思苗[1]，宋 涛[1]，董鹏顶[1]，任广欣[1]，陈 兴[2]，李凯歌[2]，魏江波[2]

（1. 甘肃煤田地质局一四六队，平凉 744000；2. 西安科技大学地质与环境学院，西安 710054）

摘要：黄河流域中上游河道沿岸大型黄土地震滑坡失稳机制及运动过程是地质灾害风险评估领域亟须破解的关键难题。为了真实且准确反演分析地震黄土滑坡失稳运动全过程特征，以甘肃省平凉市崆峒区泾河北岸黄土区七府滑坡为研究对象，在野外地质调查的基础上，采用遥感影像解译、无人机航测和颗粒流离散元数值模拟相结合的方法，重建地震诱发黄土滑坡三维颗粒流数值模型，模拟研究滑坡的失稳-运动-堆积全过程特征。结果表明：七府滑坡呈“舌”状平面发育特征，属典型的大型地震黄土滑坡；滑坡体后缘优先变形破坏，之后挤推中部和前缘发生整体失稳，最终前缘呈扇形状运动形态，而中部和后缘呈舌状运动形态特征；滑坡失稳运动总时长约32 s，主滑时长约24 s，13 s时平均速度达峰值状态，约为3.76 m/s，滑坡平均位移曲线呈“S”形特征，最大平均位移约为52 m。研究结果与实际滑坡堆积特征基本一致，相关研究方法和结果可为同类滑坡定量风险评估提供借鉴。

关键词：黄土滑坡；地震滑坡；滑坡运动过程；颗粒流方法；数值模拟

中图分类号：P642.22 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)02－0039－08

滑坡失稳运动过程分析是滑坡风险定量评估与预测研究关键难点，对滑坡灾害防灾减灾具有重要的理论指导和实践借鉴意义[1]。黄土高原地带，因其独特的地貌特征和土体结构，在地震、降雨、灌溉和不合理的人类工程活动等不利因素作用下极易诱发斜坡体失稳滑动或复滑[2]。例如，1920年12月16日，宁夏海原县发生8.5级特大地震，触发滑坡直接导致约10万人死亡[3-5]，其中平凉市崆峒区泾河北岸大面积的黄土滑坡群发地质灾害也在此次地震滑坡范围之内，造成了严重的经济损失和人员损伤[6]。2013年7月22日甘肃岷县发生6.7级地震，触发永光村大型黄土滑坡造成12人死亡[7-9]。2023年12月18日甘肃积石山县发生6.2级地震，触发大量的滑坡地质灾害，造成了大量人员伤亡[10-13]。由此可知，地震触发滑坡灾害对人类生命和财产安全造成严重的威胁，定量研究地震黄土滑坡失稳运动过程和预测其滑移距离将势在必行，这将为黄土高原区地震灾害防灾减灾提供有效的理论依据和指导方向。

近年来，大量学者针对黄土滑坡失稳运动特征与过程和地震诱发滑坡成灾机理进行了研究，并取得了丰富的成果[14-20]。杨博等[21]采用理论分析和有限差分法数值模拟相结合的方法，研究了海原地震作用下石碑塬黄土滑坡的地震动力响应特征和滑坡失稳流滑发展过程。段俊杰等[22]基于遥感影像研究了海原地震触发黄土滑坡的方向性、远程滑移和流滑等滑坡运动特征。马星宇等[23]通过室内实验揭示了海原地震触发石碑塬黄土滑坡的地层液化滑移成灾机制，并以此为依据估算了滑坡滑移距离。卢育霞等[24]采用二维有限元方法对海原地震密集区的地震动场地效应进行了模拟研究，认为地层与地形等条件联动作用增加了地震触发滑坡的动力。王鼐等[25]在分析地震黄土滑坡稳定性影响因素的基础上，采用模糊信息处理方法构建了滑

收稿日期：2025-06-17

基金项目：平凉市科技计划项目(PL-STK-2023A-062)

作者简介：万朝东(1987—)，男，陕西咸阳人，高级工程师，研究方向为地质灾害勘查与防治；郑思苗(1996—)，女，陕西汉中人，助理工程师，研究方向为地质灾害勘查与防治；宋涛(1988—)，男，陕西咸阳人，高级工程师，研究方向为地质灾害勘查与防治；董鹏顶(1991—)，男，宁夏西吉人，高级工程师，研究方向为地质灾害勘查与防治；任广欣(1986—)，男，内蒙古赤峰人，高级工程师，研究方向为地质灾害勘查与防治；陈兴(1995—)，男，陕西西安人，博士，研究方向为地质灾害勘查与防治；李凯歌(19899—)，男，宁夏固原人，硕士，研究方向为地质灾害勘查与防治；魏江波(1991—)，男，陕西咸阳人，博士，讲师，研究方向为地质灾害勘查与防治。

坡滑距预测模型。关晓迪[26]采用二维颗粒流离散元方法对地震荷载作用下的黄土滑坡运动规律进行了模拟研究，并对不同区段颗粒的位移差异进行了分析。彭政奎和杨东强[27]通过野外地质测量和勘探等手段，综合分析了海原地震触发黄土滑坡群发育和运动特征，并揭示了受微地貌控制、黄土强度和局部地形影响的“连拱成壁”的黄土滑坡群形成机制。王升等[28]采用二维物质点法对土质滑坡失稳、运动和冲击等特征进行了模拟研究。邓龙胜和范文[29]通过遥感影像解译与现场调查的方法，研究了海源地震作用下黄土滑坡的基本特征和破坏类型，并揭示了滑坡密集发育区的成灾机理。郑瑞和魏晓刚[30]采用 PFC2D 软件模拟研究了地震动荷载下的黄土滑坡运动特征，为颗粒流离散元方法模拟滑坡等岩土体大变形特征提供了有力支撑。此外，对于古滑坡的研究，赵海松等[31]通过现场调查，结合斜坡地形地貌、坡体物质组成和区域地质构造进行综合分析判定古滑坡的成因和复活特征。张鑫鑫等[32]通过历史影像解译、现场勘查和室内资料分析，确定了岐山县宋家尧村黄土古滑坡发育特征，揭示了其形成机制。由此可见，学者多采用历史遥感影像进行对比解译分析或者现场调查并采用类比法进行定性分析，研究古滑坡的发育特征和成因机制，然而对于滑坡是失稳运动过程的真实反演及定量分析研究较少。

综上可知，现有研究主要集中于遥感影像解译和理论分析等方法探究（古）滑坡失稳特征和成灾机制，或者采用二维（或假三维）连续或非连续模拟方法对滑坡变形特征与形成过程进行模拟研究[33-36]，而对于真三维地震诱发黄土滑坡的失稳-运动-堆积全生命周期的发育特征研究鲜有报道。因此，本文在甘肃省平凉市崆峒区泾河北岸黄土滑坡群现场野外调查的基础上，以七府滑坡为研究对象，采用三维颗粒流离散元方法（PFC3D），模拟研究黄土滑坡在地震作用下的失稳运动全过程，反演分析滑坡发育特征。该研究方法对于地震诱发黄土滑坡变形失稳与运动堆积的准确模拟表征具有显著的优势，可实现历史滑坡的真实准确模拟和反演，尤其滑坡发生真三维非连续变形和运动过程以及堆积特征，包括滑坡主滑方向和其他侧滑方向上的滑坡运动与堆积特征。该模拟结果在与滑坡真实运动和堆积特征进行对比验证的同时，也可为区域防灾减灾以及市政规划提供精准且有效的实践依据，此外也可为为同类滑坡定量风险评估提供重要理论依据。

1　研究区概况及滑坡发育特征

1.1　研究区概况

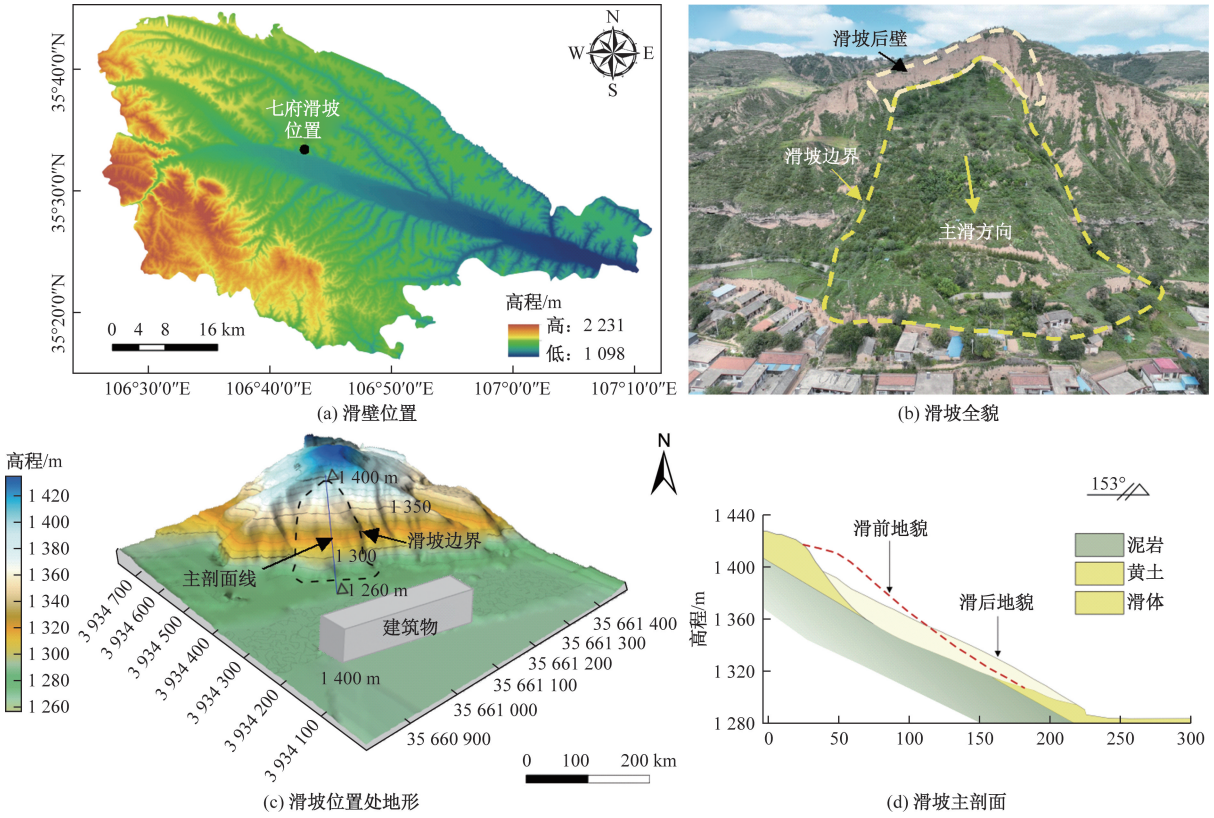
研究区地处甘肃省陇东平凉市崆峒区泾河北岸，属于典型的黄土梁峁台塬地貌（图 1）。区内每年最高气温约为 32.5 ℃，最低气温约为－15.4 ℃，年平均气温约为 10.1 ℃，年均降雨量约为 511.2 mm，降雨主要集中于 7—9 月，约占全年降雨量的 57.4%，属典型的半干旱、半湿润季风型大陆性气候，区内持续性的降雨极易诱发斜坡失稳产生滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害。区内主要河流为泾河，常年流水，年均径流量 4.96 m^3/s，主要集中于 8—10 月，约占全年径流量的 54.7%。区内出露地层岩性分别有岩性由老至新依次为新近系泥岩（N_2）、第四系午城黄土（Q_1^{eol}）、离石黄土（Q_2^{eol}）、马兰黄土（Q_3^{eol}）和第四系全新统冲洪积物（Q_4^{apl}）。泾河北岸斜坡表面主要覆盖厚层马兰黄土，厚度不均一，呈灰黄色，结构疏松，节理裂隙发育，粒度以粉土为主，占 55%左右，易溶盐含量较高，具粒状架空接触结构，孔隙率平均为 39%，遇水易湿陷，湿陷系数普遍介于 0.012～0.045；其下为相对致密的浅黄色离石黄土，局部有姜石，下伏区内广泛赋存的砂砾石层和产状约 94°∠3°的棕红色泥岩。区内历史上发生破坏性地震 14 次，影响最为显著的为 1920 年海原特大地震，造成崆峒区泾河北岸发生大规模的地震滑坡群[37]。区内地下水主要有第四系松散岩类孔隙水和碎屑岩类裂隙水两大类，主要受大气降水补给，局部地段（河谷区）受地表水补给，多以泉水形式排泄。



图 1　研究区地貌特征遥感影像图（局部）

1.2　滑坡发育特征

七府滑坡位于甘肃省平凉市崆峒区七府村，处于泾河北岸山区南缘丘陵区，中心地理坐标为东经 106°46′37″，北纬 35°31′34″[图 2（a）]。根据现场调查，七府滑坡平面呈“舌”状，主滑方向约为 180°[图 2（b）]，滑坡体后缘高程约为 1 400 m，前缘坡脚



(a) 滑壁位置　(b) 滑坡全貌

(c) 滑坡位置处地形　(d) 滑坡主剖面

图 2　滑坡位置及分布特征

高程约为 1 260 m，前后缘高差约为 140 m，后缘较陡，局部坡度约为 50°，前缘坡度平均约为 30°，滑坡体平均坡度为 40°。滑坡体斜长约为 300 m，平均宽约为 130 m，平均厚约为 20 m，属大型黄土滑坡[图 2(c)和图 2(d)]。滑坡左侧以明显陡坎为界，坎高 1.0～3.0 m[图 3(a)]，右侧边界以小冲沟为界，在边界外侧未发现变形迹象，为原始地貌[图 3(b)]，滑坡后部可见明显下挫台阶，高约为 30 m[图 3(c)]，滑坡前缘发育黄土陡坎，垂直节理发育[图 3(d)]，且局部发生土体破碎剥落或滑塌现象[图 3(e)]。同时，受长周期的降雨作用，滑坡体上发育大量的落水洞[图 3(f)]。根据钻孔揭露地层岩性可知，滑坡体主要为粉质黏土，其结构较松散，遇水易膨胀，局部夹杂砂砾层(图 4)。根据野外现场调查推测，该滑坡发生于海原特大地震时期，属于典型的地震滑坡。



(a) 滑坡左侧壁　(b) 滑坡右侧壁

(c) 滑坡后壁

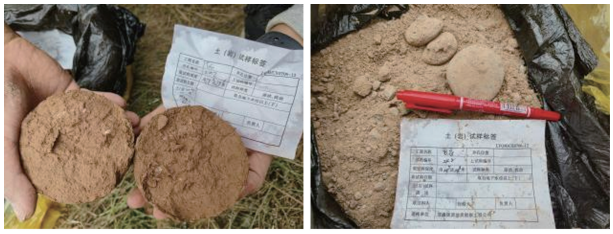
(d) 滑坡前缘陡坎　(e) 滑坡前缘滑塌　(f) 滑坡体上落水洞

图 3　滑坡边界发育特征

2　滑坡三维模型构建

2.1　数值方法选择

本次研究选择颗粒流离散元方法(particle flow code 3D，PFC3D)进行模拟研究，该方法是通过模拟大量独立颗粒的运动和相互作用来模拟研究散体介质或可破碎材料的力学行为。其核心思想认为材料的宏观力学行为是由微观层面自然涌现的结果，而非预先设定宏观本构模型进行间接实现。对于具有一定黏性特征的岩土体，其可通过设定颗粒间黏结进行实现相关特性。该方法相



(a) 粉质黏土　　(b) 砂砾层

图 4　滑坡体岩土特征

较于传统有限元或有限差分法具有处理大变形和破坏问题能力卓越的根本优势，如滑坡失稳全过程，包括滑坡启动、滑动和堆积全生命周期特征。此外，该方法无须复杂的本构模型，不需要预先定义宏观本构关系，且便于模拟不连续结构面，以及可直观模拟岩土体在变形过程中的开裂和破断特征。同时，对于颗粒间的碰撞、冲击和振动等动力学特征模拟，PFC 无须进行内部或局部特定设置。因此，PFC3D 在模拟非连续大变形过程中具有显著优势。

滑坡失稳运动属于典型的非连续变形特征，包括土体变形、开裂、滑动和堆积的整个过程。故该研究采用具有模拟非连续变形显著优势的颗粒流离散元方法（PFC3D）进行模拟七府滑坡在地震作用下的失稳运动过程。

2.2　土体细观参数确定

首先，在根据模拟硬件条件及计算效率的多重影响下，初始构建滑坡颗粒流模型，在保证不失真滑坡体失稳运动宏观特征的前提下，确定滑坡体颗粒粒径大小。之后，遵从“颗粒体系一致性”原则，构建土体直剪数值模型试验，始终保持直剪试验模型中的颗粒粒径与滑坡体颗粒粒径一致。最后，依据室内土体直剪实验所得剪应力-位移曲线，进行调试标定直剪模型中的细观强度参数，直至模拟所得剪应力-位移曲线与室内实验所得曲线基本一致，即可达到宏－细观参数标定完成。

由于滑坡土体既存在一定的抗剪特性，也存在一定的抗拉或抗弯特性，故模型中接触本构选择广泛应用的平行接触黏结模型[38]。基于此，进行滑坡体土体参数标定，剪应力-位移曲线如图 5 所示，相应模型细观参数如表 1 所示。

2.3　滑坡模型构建

首先，采用大疆无人机（unmanned aerial rehicle，UAV）对七府滑坡进行航测，基于无人机影像，

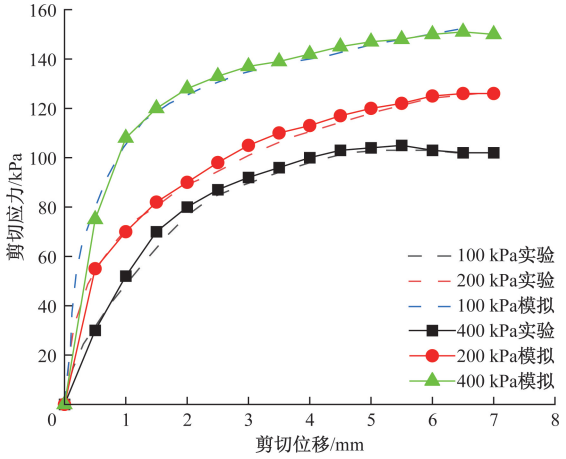


图 5　土体剪应力-位移曲线

表 1　土体颗粒细观参数

参数	取值
颗粒粒径范围/m	1.0～2.0
密度/(kg·m^{-3})	1 530
有效弹性模量/Pa	5.0×10^{7}
刚度比	10.0
法向黏结强度/Pa	5.0×10^{5}
切向黏结强度/Pa	8.0×10^{5}
细观摩擦系数	0.5
内摩擦角/(°)	20.0
力矩贡献系数	0.4

借助地理信息系统（geographic information system，GIS）生产分辨率为 0.1 m 的数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据；之后，基于 DEM 数据运用犀牛软件构建滑坡几何模型，导出. stl 格式文件，并将其导入 PFC3D 数值软件中，通过 WALL IMPORTANT... 相关命令将其转化为 WALL 单元；最后，在滑坡体范围内生产土体颗粒 BALL 单元，并赋值表 1 中的细观参数和对模型施加重力加速度，计算达到初始平衡，完成初始模型构建（图 6）。

在七府滑坡颗粒流初始模型中施加地震波进行模拟计算地震工况下滑坡失稳运动过程。采用 2017 年武隆地震波数据，其垂直向地震动峰值加速度为 0.31g（g 为重力加速度），水平向地震动峰值加速度为 0.75g，原始地震动数据如图 7 所示。然而，滑面及坡面参数对滑坡体运动过程和堆积特征影响较大，通过试验与分析[39]，滑面摩擦系数设置为滑面倾角正切值的 1/3，即 $\mu_{WALL}=\tan40°/3=0.28$。此外，考虑到复杂地形和植被特征对滑坡体运动的影像，结合已有经验，坡面摩擦系数设置为 0.36[40]。

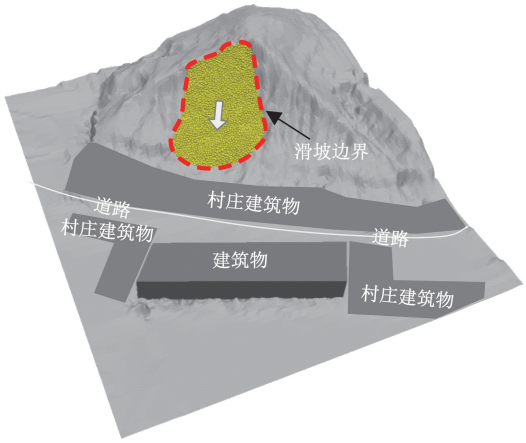


图 6　七府滑坡三维数值

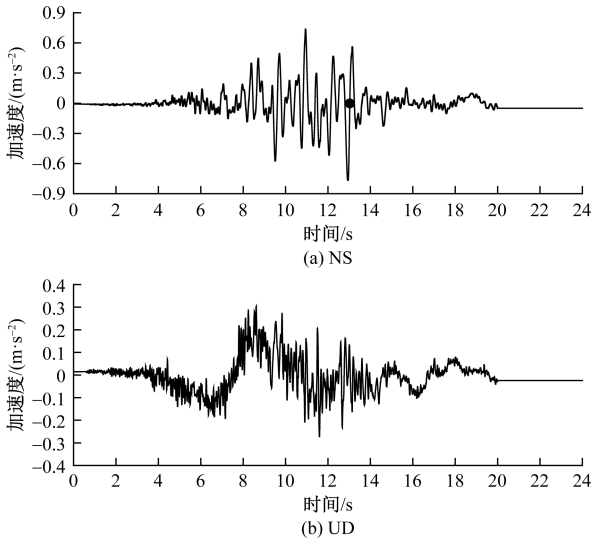


图 7　地震动加速度时程曲线

3　模拟结果分析

3.1　滑坡失稳运动特征

通过反演模拟七府滑坡在地震作用下的失稳-运动-堆积全过程(图 8),滑坡从变形失稳至最终堆积的整个运动过程共持续约 32 s,主滑时长约 24 s。通过阶段性分析可知,在地震初期 2 s 左右,滑坡后缘发生显著变形,产生平均速度约 3.0 m/s 的滑移,后缘局部滑移速度达 3.5 m/s 以上,而前缘相对运动较小,普遍小于 1 m/s[图 8(a)];随着地震的持续进行,滑坡体后缘挤推中部和前缘颗粒,并发生滑移,直至 6 s 时,对应地震动垂向加速度达到首次峰值,同时此时滑坡体产生整体失稳,滑坡体前缘颗粒滑移显著,且平均速度达到 6 m/s,而后缘滑坡体颗粒受前缘的阻挡作用以及颗粒间碰撞耗能,致使滑坡体后缘局部颗粒运动速度有小范围减小,同时,由于滑坡体整体失稳滑移,使得后缘产生显著的滑坡后壁,平均高约 25 m[图 8(c)]。

在地震发生至 8 s 时,滑坡体整体位移显著,前缘颗粒呈现扇形状向坡体前部滑移,滑坡体中部和后缘持续向前滑移,致使后缘陡坎继续发育,高达 30 m 左右[图 8(d)]。直至滑坡运动至 14 s 时,滑坡体后缘颗粒在碰撞耗能和前缘颗粒得阻挡作用下,逐渐减速慢滑,整体形态基本稳定,而前部和中部颗粒仍以扇形向坡脚和两侧滑移运动[图 8(f)]。之后,在滑坡运动过程中,滑坡体运动速度显著减小,仅有滑坡体前缘两侧颗粒运动速度较大[图 8(g)和图 8(h)];直至 32 s 后,滑坡体大部分颗粒基本停止运动,并相对较稳定的堆积于坡脚,此时滑坡体处于相对静止状态,仅有滑坡体前缘两侧局部土体颗粒发生较小速度得运动,顺势滑移至坡脚并堆积于此[图 8(i)]。

在滑坡失稳运动过程中,通过自编 FISH 函数进行滑坡体颗粒平均位移和平均速度实时监测。如图 9 所示,滑坡体平均速度表现出典型的先快速增大后逐渐减小的变化特征,在 13 s 左右,滑坡平均速度达峰值,约为 3.76 m/s。在此之前的 3～5 s和 8～11 s 两个时间段,滑坡体平均速度均由于地震波的反向作用,致使其平均速度有所短暂性的缓慢增大;然而,在 13 s 速度峰值之后,滑坡体平均速度缓慢减小,直至 24 s 之后,滑坡体速度逐渐达到最小,且相对较为稳定,基本小于 1.0 m/s。同时,滑坡体平均位移曲线呈典型的 S 形特征,滑坡体平均位移始终在不断增大,最终逐渐稳定至 52 m 左右。

3.2　滑坡体堆积特征

在滑坡体颗粒模型持续计算至滑坡堆积体相对完全静止状态时,将模拟结果与实际堆积体范围进行对比可知,模拟滑坡体堆积范围基本与实际滑坡堆积体边界一致,其前缘宽度达 240 m,中部宽度约为 162 m,后缘宽度约为 120 m(图 10)。通过沿主滑剖面线对滑坡堆积体进行剖分切面,对比主滑剖面堆积体厚度的模拟与实际结果非常相近,模拟结果中,滑坡堆积体前缘(Ⅰ处)厚度约为 16 m,中部(Ⅱ处)厚约 35 m,后缘(Ⅲ处)厚约 20 m(图 11)。由此可知,综合滑坡模拟堆积体分布范围及堆积厚度均与实际滑坡堆积体特征基本一致,进一步验证了模拟方法的可靠性和模拟结果的准确性。

综上可知,颗粒流离散元方法在模拟地震作用下黄土滑坡失稳运动全过程具有显著的优势,同时,也进一步说明该研究方法对于研究区同类古滑

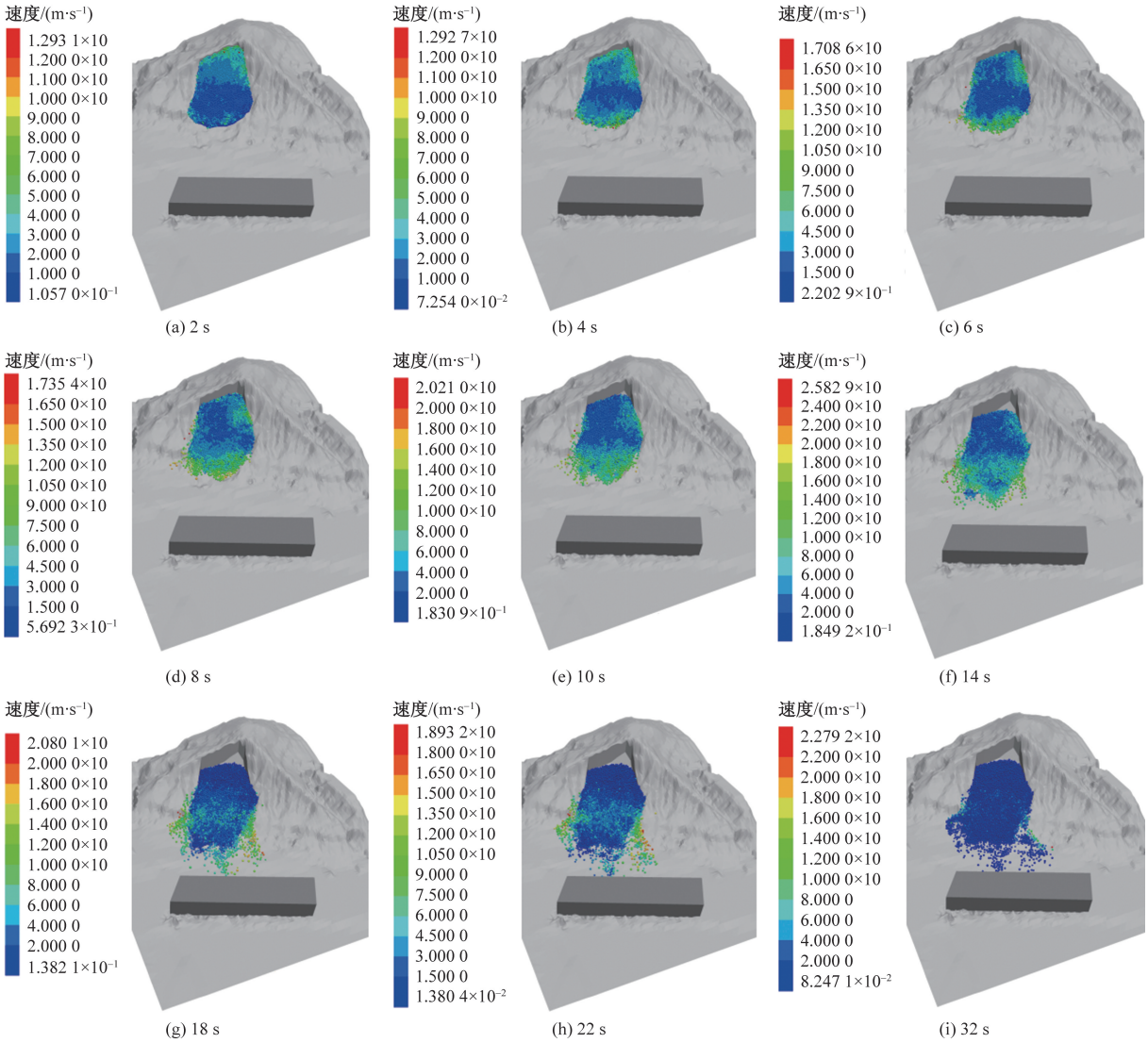


图 8　七府滑坡失稳运动过程速度云图(单位:m/s)

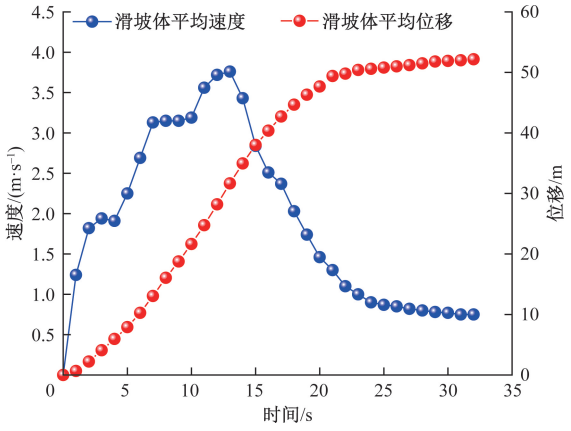


图 9　滑坡体平均速度与平均位移时程曲线

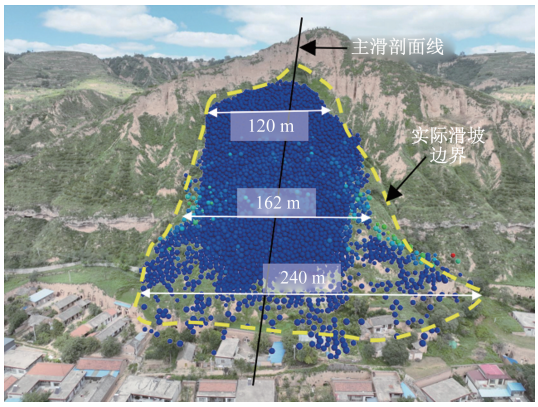


图 10　滑坡体堆积模拟结果与实际堆积体结果对比

坡失稳机制和运动特征的复现研究具有很好的可靠性,以及对于欠稳定斜坡体的稳定性模拟研究和失稳运动堆积范围具有较好的预测性,其对区域未来防灾减灾和市政规划具有重要的指导意义。

4　结论

(1)通过现场调查,七府滑坡边界清晰,平面呈“舌”状,滑坡体前后高差约为 140 m,斜长约为 300 m,平均宽约为 130 m,平均厚约为 20 m,属典

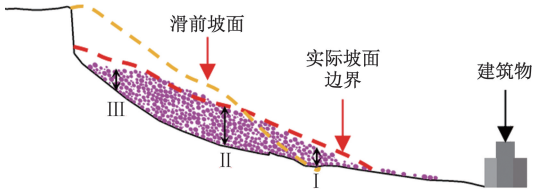


图 11　滑坡体主剖面堆积特征模拟结果与实际结果对比

型的大型地震诱发黄土滑坡。

(2)根据滑坡反演模拟分析,在地震初期七府滑坡后缘优先发生滑移变形,之后挤推滑坡体中部和前缘发生整体失稳破坏,最终前缘呈扇形运动和堆积特征,中部和后缘呈舌状堆积特征。

(3)滑坡失稳运动总时长约为 32 s,主滑时长约为 24 s;地震 13 s 时,滑坡平均速度达到峰值,约为 3.76 m/s;滑坡体平均位移曲线呈典型得“S”形特征,最大平均位移约为 52 m。

(4)七府滑坡地震作用下失稳运动过程及堆积特征与实际真实滑坡特征基本一致,验证了滑坡数值模拟方法的可靠性和模拟结果的准确性,可为同类滑坡失稳机制及运动特征提供方法借鉴。

参考文献

[1] 许领,戴福初,闵弘. 黄土滑坡研究现状与设想[J]. 地球科学进展,2008(3):236-242.

[2] 张文学,王宏民. 高位黄土滑坡特征与成因研究[J]. 地震科学进展,2023,53(8):360-366.

[3] CLOSE U, MCCORMICK E. Where the mountains-wallked[J]. National Geographic Magazine, 1922, 41(5):445-464.

[4] LI T. Landslide management in the mountain areas of China[R]. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development Occasional, 1990.

[5] 许冲,吴熙彦,徐锡伟. 黄土高原及邻区的地震滑坡[J]. 工程地质学报,2018,26(S):260-273.

[6] 王笑然. 平凉市区泾河北岸黄土斜坡演化规律研究[D]. 兰州:兰州大学,2017.

[7] 许冲,徐锡伟,郑文俊,等. 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震触发滑坡及其构造分析[J]. 地震地质,2013,35(3):616-626.

[8] XU C, XU X, SHYU J B H, et al. Landslides triggered by the 22 July 2013Minxian-Zhangxian, China, Mw 5.9 earthquake: inventory compiling and spatial distribution analysis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 92: 125-142.

[9] 许冲,徐锡伟,郑文俊. 2013 年 7 月 22 日岷县漳县 MS6.6 级地震滑坡编录与空间分布规律分析[J]. 工程地质学报,2013,21(5):736-749.

[10] 陆诗铭,吴中海,黄婷. 甘肃积石山 MS 6.2 地震地质灾害发育特征及孕灾环境分析[J]. 地质力学学报,2025,31(1):139-155.

[11] 马星宇,王兰民,蒲小武,等. 基于 Newmark 模型的积石山 6.2 级地震滑坡快速评估[J]. 地震工程学报,2024,46(4):825-835.

[12] 高波,董英,贾俊,等. 甘肃临夏积石山县 6.2 级地震地质灾害发育特征及危险性评价[J]. 西北地质,2024,57(2):209-219.

[13] 刘帅,何斌,王涛,等. 甘肃积石山县 MS6.2 地震同震地质灾害发育特征与易发性评价[J]. 地质力学学报,2024,30(2):314-331.

[14] 侯玮华,董杉,张奇华,等. 地震荷载下唐家山滑坡动力响应特征及破坏机理研究[J]. 甘肃科学学报,2024,36(4):1-8.

[15] 颜灵勇,李孝波,欧阳刚垒. 黄土地震滑坡形成机理研究的若干进展[J]. 防灾科技学院学报,2021,23(2):46-53.

[16] 彭宇林,张奇华,张恒,等. 地震作用下花生地滑坡的稳定性预测分析[J]. 甘肃科学学报,2023,35(5):58-65.

[17] 王兰民,柴少峰,薄景山,等. 黄土地震滑坡的触发类型、特征与成灾机制[J]. 岩土工程学报,2023,45(8):1543-1554.

[18] 王璋,倪万魁,姜骞,等. 泥岩上覆黄土地震滑坡动力变形分析[J]. 灾害学,2018,33(1):225-229.

[19] 葛若鑫,李嘉正,段进睿. 不同降雨工况下滑坡稳定性数值模拟及破坏机理[J]. 科技和产业,2024,24(10):247-251.

[20] 曾营,张迎宾,储峰,等. 甘肃积石山 Ms6.2 级地震诱发滑坡快速评估[J/OL]. 西南交通大学学报,1-10[2025-06-01]. https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20241209.1546.002.

[21] 杨博,田文通,孙军杰,等. 海原大地震诱发石碑塬黄土滑坡机制探讨[J]. 地震工程学报,2020,42(5):1165-1172.

[22] 段俊杰,李孝波,周兴浩,等. 黄土地震滑坡运动特征研究——以海原特大地震诱发滑坡为例[J]. 地震工程学报,2024,46(5):1151-1159.

[23] 马星宇,王兰民,钟秀梅,等. 地震诱发石碑塬黄土地层液化滑移距离研究[J]. 地震工程学报,2020,42(6):1674-1682.

[24] 卢育霞,魏来,刘琨,等. 1920 年海原地震滑坡密集区的地震动场地效应研究[J]. 地震工程学报,2020,42(5):1151-1158.

[25] 王鼐,王兰民,王谦,等. 黄土高原地震作用下黄土滑坡滑距预测方法[J]. 地震工程学报,2016,38(4):533-540.

[26] 关晓迪. 地震作用下黄土滑坡离散元数值模拟研究[J]. 人民珠江,2022,43(12):92-96.

[27] 彭政奎,杨东强. 海原地震典型黄土滑坡群形成机制与运动特征研究[J]. 成都大学学报(自然科学版),2019,38(4):447-450.

[28] 王升，曾鹏，李天斌，等. 土质滑坡失稳、运动及冲击压力物质点法模拟研究[J]. 工程地质学报，2022，30(4)：1362-1370.
[29] 邓龙胜，范文. 宁夏海原 8.5 级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征及发育机理[J]. 灾害学，2013，28(3)：30-37.
[30] 郑瑞，魏晓刚. 地震动荷载下黄土滑坡离散元模拟[J]. 河南科学，2022，40(12)：1911-1918.
[31] 赵海松，向波，邵江，等. 青岗古滑坡体前缘开挖后局部复活特征及防治[J]. 科技和产业，2023，23(16)：263-268.
[32] 张鑫鑫，杜明，董洁. 岐山县宋家尧村滑坡形成机理[J]. 科技和产业，2024，24(7)：238-242.
[33] 郑志文，孙玄. 半边街滑坡形成机制与基于有限元模拟的多场演化特征[J]. 科技和产业，2024，24(14)：281-288.
[34] 段军邦，吕耀成，李建波，等. 基于改进可拓理论-有效降雨耦合模型的库岸滑坡稳定性动态评价[J]. 科技和产业，2023，23(22)：253-261.
[35] 陶海川，张苑，姬凯鹏，等. 降雨条件下槐梁子滑坡多场演化特征与稳定性研究[J]. 科技和产业，2025，25(14)：278-286.
[36] 潘明慧，王其光，江山，等. 强降雨作用下川西地区大型露天矿坑古滑坡复活特性[J]. 科技和产业，2024，24(22)：272-279.
[37] 许冲，田颖颖，马思远，等. 1920 年海原 8.5 级地震高烈度区滑坡编录与分布规律[J]. 工程地质学报，2018，26(5)：1188-1195.
[38] 贾乐琪，严松宏，孙纬宇，等. 基于 PFC2D 的黄土轴向压裂试验细观参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报，2023，34(2)：194-201.
[39] 曹文，李维朝，唐斌，等. PFC 滑坡模拟二、三维建模方法研究[J]. 工程地质学报，2017，25(2)：455-462.
[40] 陈兴，赵洲，魏江波，等. 马边滑坡运动特征及冲击强度的数值研究[J]. 煤田地质与勘探，2021，49(4)：234-241.

Research on Simulation of Instability Movement Process of Loess Landslides under Earthquake Action: A Case Study of the Qifu Landslide in Kongtong District, Pingliang, Gansu Province

WAN Chaodong[1], ZHENG Simiao[1], SONG Tao[1], DONG Pengding[1], REN Guangxin[1], CHEN Xing[2], LI Kaige[2], WEI Jiangbo[2]

(1. 146th Team of Gansu Coalfield Geology Bureau, Pingliang 744000, China;
2. School of Geology and Environment, Xi' an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The instability mechanism and movement process of large loess seismic landslides along the middle and upper reaches of the Yellow River basin are key problems to be solved in the field of geological hazard risk assessment. To authentically and accurately invert and analyze the characteristics of the entire process of instability and movement of seismic loess landslides, the Qifu Landslide in the loess area on the north bank of the Jing River in Kongtong District, Pingliang City, Gansu Province was taken as the research object. Based on field geological surveys, a method combining remote sensing image interpretation, UAV aerial survey and particle flow discrete element numerical simulation was adopted to reconstruct a three-dimensional particle flow numerical model of seismic-induced loess landslides, and simulate and study the characteristics of the entire process of landslide instability-movement-accumulation. The results show that the Qifu Landslide exhibits a "tongue"-shaped planar development feature, belonging to a typical large seismic loess landslide. The rear edge of the landslide body is preferentially deformed and destroyed, then the middle and front edges are pushed to cause overall instability. Finally, the front edge shows a fan-shaped movement pattern, while the middle and rear edges show tongue-shaped movement characteristics. The total duration of landslide instability movement is approximately 32 seconds, the main sliding duration is about 24 seconds, the average speed reaches the peak state at 13 seconds, about 3.76 m/s, the average displacement curve of the landslide shows an "S"-shaped feature, and the maximum average displacement is approximately 52 meters. The research results are basically consistent with the actual landslide accumulation characteristics, and the relevant research methods and results can provide reference for the quantitative risk assessment of similar landslides.

Keywords: loess landslide; seismic landslide; landslide movement process; particle flow method; numerical simulation