

基于 PFC^{3D} 的于都县黄麟乡远坑村滑坡机理与运动特征研究

李海潘^{1,2,3} 许威^{1,2,3,4} 刘国成^{1,2,3}

1 江西省地质局第七地质大队

2 赣州市地质灾害防治重点实验室

3 江西赣南地质矿产集团有限公司

4 江西理工大学矿业工程学院

DOI:10.32629/etd.v6i7.18249

[摘要] 江西赣南地区地质灾害具有“点多、面广、规模小”的特征,地质灾害隐患点数量多且分布范围广,防治任务艰巨。江西赣南地区灾害点类型主要以滑坡为主,近年来发生了多起因切坡建房诱发造成人员伤亡的事故,该类型滑坡隐蔽性较强,识别难度较大。本研究以切坡建房诱发、造成了2人死亡的于都县黄麟乡远坑村滑坡为例,采用已发生和未发生滑坡的人工切坡段进行精细化调查的方式,对比地质环境条件、人工切坡特征等量化参数,研究其滑坡机理;基于PFC^{3D}数值模拟软件,对黄麟乡远坑村滑坡运动过程进行反演,获得滑坡过程的颗粒运动位移与速度的变化,探究该类型滑坡的运动学特征。研究表明:①松散层厚度相对差值比例最高,为滑坡主控因子;其他参数均小于20%,为滑坡次要影响因子;②滑坡演化过程存在初始加速阶段、中期加速滑动阶段及末期减速沉积阶段3个阶段,揭示了其以牵引式滑动为主,伴随显著碎裂和局部流态化的运动特征。该研究可为江西赣南地区切坡建房诱发滑坡的识别与防治提供借鉴。

[关键词] 切坡建房; 滑坡机理; PFC^{3D}; 运动特征

中图分类号: U216.41+9.1 **文献标识码:** A

Study on the Mechanism and Kinematic Characteristics of the Yuankeng Village Landslide in Huanglin Township, Yudu County Based on PFC^{3D}

Haipan Li^{1,2,3} Wei Xu^{1,2,3,4} Guocheng Liu^{1,2,3}

1 The Seventh Geological Brigade of Jiangxi Bureau of Geology. LTD

2 Key Laboratory for Geohazard Prevention and Control of Ganzhou City

3 Jiangxi Gannan Geology and Mineral Resources Group Co., Ltd

4 School of Mining Engineering, Jiangxi University of Science and Technology

[Abstract] Geological hazards in southern Jiangxi, China are characterized by their large number, wide distribution, and generally small scale. The numerous potential hazard sites scattered across a broad area make prevention and control particularly challenging. Landslides represent the predominant type of geological hazard in this region. In recent years, several casualties have been caused by landslides triggered by slope-cutting for housing construction. Such landslides are often concealed and difficult to identify. This study focuses on a fatal landslide induced by slope-cutting in Yuankeng Village, Huanglin Township, Yudu County, which resulted in two deaths. Through detailed field investigations of both failed and intact cut slopes, quantitative parameters including geological environmental conditions and artificial slope characteristics were compared to analyze the failure mechanism. Using the discrete element modeling software PFC^{3D}, the kinematic process of the Yuankeng Village landslide was back-analyzed. Variations in particle displacement and velocity during the landslide were obtained to investigate the kinematic characteristics of this landslide type. The results indicate that: (1) The relative difference in thickness of the loose deposit layer is the highest among all parameters, representing the primary controlling factor, while other parameters, each with a relative difference of less than 20%, are secondary influencing factors; (2) The landslide evolution process consists of three stages:

initial acceleration, mid-term accelerated sliding, and final deceleration and deposition. This reveals a retrogressive failure mechanism accompanied by significant fragmentation and local fluidization. This study can provide a reference for the identification and prevention of landslides induced by slope-cutting for construction in southern Jiangxi.

[Key words] Slope cutting for construction; Landslide mechanism; PFC^{3D}; Kinematic characteristics

引言

赣州市地貌类型以山地(低山)、丘陵为主, 占总面积的83%, 地质灾害具有“点多、面广、规模小”的特征, 且危害直接^[1]。据不完全统计^[2], 自有记录以来的1964年-2022年12月, 赣州市已发生地质灾害事件共计8469处, 包括滑坡5971处, 崩塌2309处, 地面塌陷164处, 泥石流25处, 灾害点规模以小型为主, 灾害点类型主要以滑坡为主。通过“江西省地质灾害业务支撑平台”查询赣州市2014年-2024年(近10年)间值班速报统计的554条地质灾害事故, 其中造成人员死亡的地质灾害共15起, 共造成21人死亡。其中因切坡建房造成人员死亡事故12起, 占比86.6%。在这12起事故中, 因滑坡造成人员死亡事故9起, 占比75%, 且滑坡点均不在江西省地质灾害隐患点管理台账内, 由此可见, 切坡建房可能造成人员死亡的地质灾害隐患点隐蔽性较强^[3], 对该类型滑坡隐患的识别难度较大^[4]。鉴于赣南地区滑坡的突发性、隐蔽性和不可重复性的特点, 其运动过程几乎无法人为观察和记录, 因此, 滑体停积后的滑坡堆积体成为研究高速滑坡运动学、动力学机理的主要地质证据。数值模拟法是研究滑坡运动过程的主要研究方法之一, 相对于相似模拟法、大型现场试验法等成本低, 避免了试验尺寸效应的影响与监测手段的限制, 可以根据滑坡堆积体对滑坡进行反演。Tang Chaolung等^[5]、陈达等^[6]基于PFC^{2D}软件对滑坡体在不同工况下的破坏特征进行了模拟, 对滑坡关键部位颗粒的位移、速度进行监测, 对其运动特征进行了分析; Zou Zongxing等^[7]和胡晓波等^[8]分别基于PFC^{2D}、PFC^{3D}在研究滑坡运动基本参数的基础上, 讨论了滑坡运动过程中能量的转化关系。PFC软件在小型高速滑坡模拟方面也具备可行性。谢强等^[9]对采用PFC^{3D}数值软件模拟了滑坡(规模 $1.89 \times 10^4 \text{m}^3$)与建筑物的相互作用过程, 观察并记录了建筑物的破坏形式, 研究结论可为滑坡灾害作用下建筑物破坏形式与破坏程度的评价研究提供理论基础。张家勇等^[10]以贵州省开阳县鱼鳅坡滑坡(规模 $4 \times 10^4 \text{m}^3$)为研究对象, 采用PFC^{3D}软件对其破坏运动过程进行数值模拟, 研究成果可对该类滑坡影响范围预测以及工程措施的制定提供一定的参考意义。这些研究通过数值模拟与实际滑后状态进行对比分析, 能够显示出较好的一致性, 展示了PFC开展小型滑坡运动过程模拟的可靠性。发生于2022年6月13日的江西省赣州市于都县远坑村滑坡(以下简称远坑滑坡)造成了2人死亡, 是江西赣南地区典型切坡建房诱发的滑坡。本文以该滑坡为案例, 基于滑坡变形破坏特征, 建立PFC^{3D}数值计算模型, 研究滑坡的形成机理与运动特征, 为江西赣南地区切坡建房诱发滑坡的识别与防治提供借鉴。

1 研究区概况

1.1 地质环境背景



图1 滑坡点地理位置



图2 滑坡点地形地貌



图3 滑坡点区域地质构造图

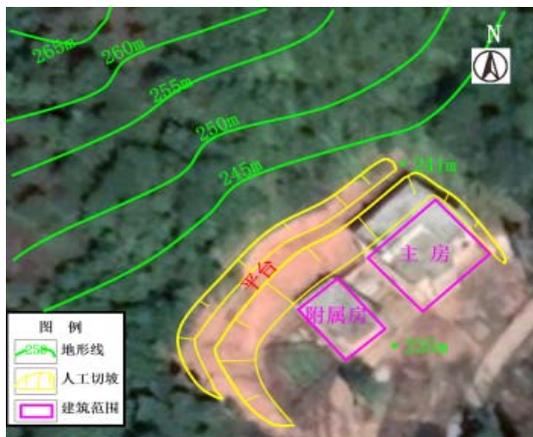
滑坡灾害点位于江西省赣州市于都县(图1), 所处位置为丘陵地貌(图2), 山坡相对高差30m, 自然斜坡坡度 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$, 植被发育, 以成年松树、杉树为主。滑坡区自然斜坡地貌呈微凹状, 两翼为山脊, 中间为谷, 易于汇水。滑坡区地层岩性主要为第四系残坡积层(Q^{e1-d1})砂质粘土和白垩系下统周田组(K₂z)泥质粉砂岩(图3), 岩层产状 $308^{\circ} \angle 20^{\circ}$, 为逆向坡, 松散层厚度约1~4m, 呈现“山顶薄, 山腰厚”和“山脊薄, 山谷厚”的特点。根据区域地质资料, 滑坡点未发现明显地质构造现象, 但以东约525m处一条断裂通过。地下水主要为赋存于粉质粘土中的孔隙水和红色碎屑岩中的孔隙裂隙水, 主要接受大气降水的垂直补给, 其水位、水量随季节变化。其中孔隙水渗透性中等; 孔隙裂隙水渗透性差, 富水性差, 沿着节理裂隙径流, 周边地表水系不发育。坡脚人工切坡因修建主房和附属房形成, 切坡宽约40m、坡度 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 、高约5~7m, 采取了两个台阶放坡, 一级坡高约5m, 二级坡高约2m, 台阶宽约1~1.5m, 坡房距1.5~2m。

1.2 滑坡特征

远坑滑坡发生于2022年6月13日20时20分许, 滑坡附近24小时降雨量达162.5mm, 达到大暴雨等级。滑坡体启动突然, 运动速度快, 将前缘的一栋附属房(1层, 3间, 砖混平房)推倒, 导致人员被掩埋造成2人死亡, 大量滑体堆积在主房(3层, 框架结构)房脚。滑坡平面形态呈舌形(图4), 剖面形态呈台阶状, 宽约40m, 主轴长约55m, 平均厚约3m, 面积2200m², 体积6600m³, 主滑方向 136° 。滑坡后缘弧形下错约3~4m, 右翼普遍下错1~2m, 左翼裂缝宽20~50cm, 形成一个完整的滑坡边界。滑坡前缘水平向前推移约4m, 摧毁三间附属房(约40m²)。滑体上裂缝纵横交错, 出现多个下错台坎, 树木或倾倒或歪斜, 形成“醉汉林”。滑体由残坡积土及强风化泥质粉砂岩组成, 滑面位于强风化泥质粉砂岩内的节理裂隙面, 滑床为强风化泥质粉砂岩。根据滑体变形迹象及摧毁房屋的时间(约6~8s)判断, 该滑坡为小型浅层牵引式岩质快速滑坡, 滑坡前缘整体峰值速度约3~5m/s。

2 基于精细化调查的滑坡机理分析

2.1 精细化调查



(a) 滑坡前 (2019年6月25日)



(b) 滑坡后 (2022年6月25日)

图4 滑坡前后影像对比图

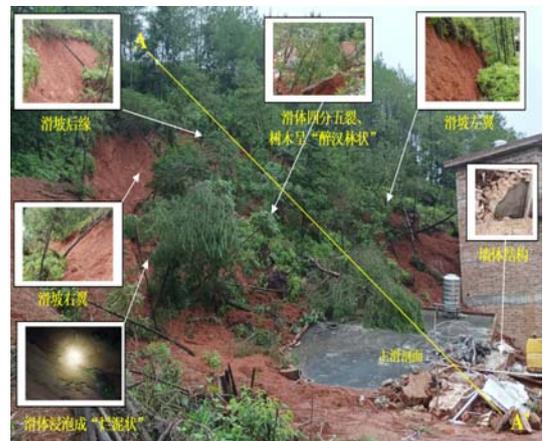


图5 滑坡特征

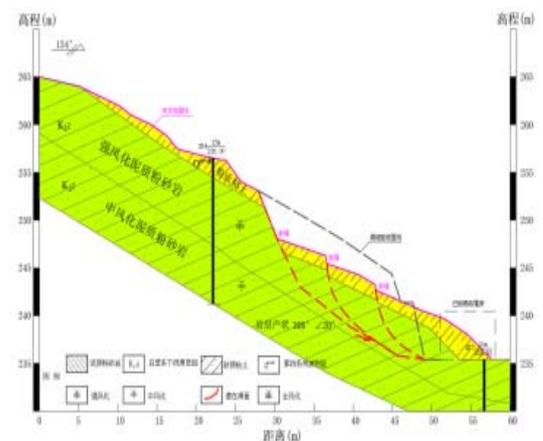


图6 主滑剖面示意图(A-A')

表1 精细化调查结果

地质环境条件								人工切坡特征			
自然斜坡相对高差/m		斜坡坡度/°		坡面形状		松散层厚度/m		人工切坡高度/m		人工切坡坡度/°	
已滑段	未滑段	已滑段	未滑段	已滑段	未滑段	已滑段	未滑段	已滑段	未滑段	已滑段	未滑段
32	28	15~25	17~22	凹型坡	凸型坡	2~4	1~2	6~7	5~6	60~70	60~70

为探究其滑坡机理,通过对已发生和未发生滑坡的人工切坡段进行精细化调查,主要内容包括地质环境条件、人工切坡特征,精细化调查切坡段位置见图2,精细化调查结果见表1、图7。

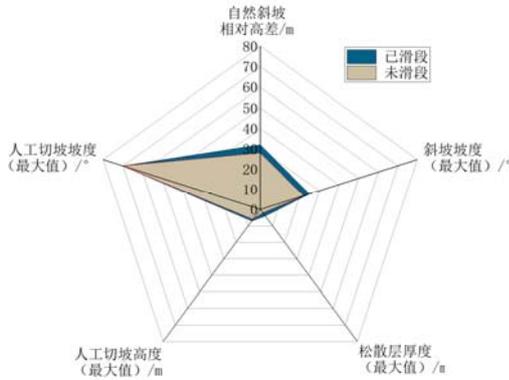


图7 精细化调查参数

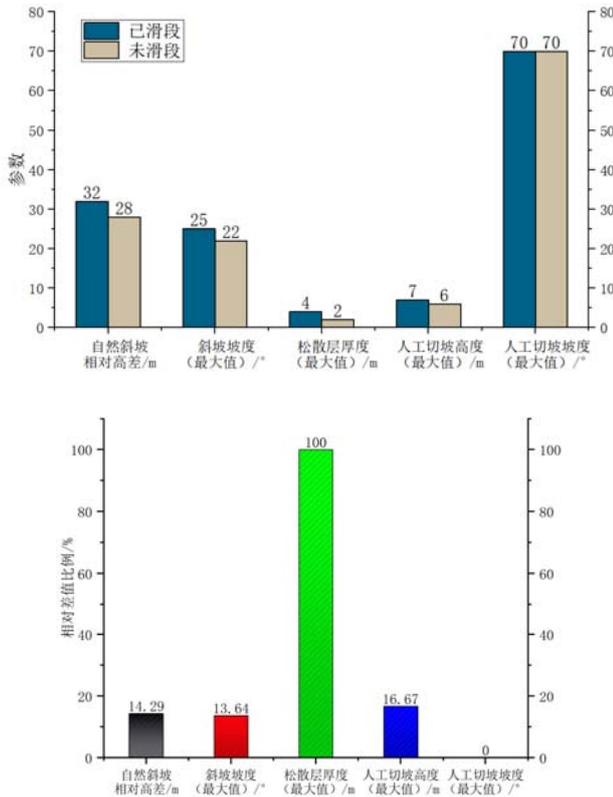


图8 相对差值比例

通过引入相对差值比例(式1)用于反映差异的相对幅度:

$$\eta = \frac{\Delta X}{X_2} \times 100\% \quad (式1)$$

式中, $\Delta X = X_1 - X_2$, 为已滑段(X_1)参数与未滑段(X_2)参数的绝对差值; η 为相对差值比例。已滑段与未滑段参数相对差值比例计算结果见图7, 其中松散层厚度相对差值比例最高, 为滑坡主控因子; 其他参数均小于20%, 为滑坡次要影响因子。

2.2 差异化对比分析

地质环境条件方面,已滑段人工切坡的自然斜坡相对高差、斜坡坡度松散层厚度均大于未滑切坡段。斜坡高差方面,相对高差越大,边坡岩土体重力势能越高,为滑坡启动提供了能量条件。斜坡坡度、坡面形状方面,主滑段人工切坡所在的斜坡为凹形坡,未滑段的人工切坡所在的斜坡为凸形坡,造成主滑段人工切坡所在的斜坡形成了一处汇水带,易于汇水,造成该区域岩土体差异风化较强烈。两段松散层厚度差异较大也验证该点,松散层具有低强度、高渗透性特征,其厚度增加会降低坡体抗滑力,是已滑段失稳的辅助因子。主要地层岩性泥质粉砂岩中含大量黏土矿物(如蒙脱石、伊利石),这类矿物具有强亲水性,遇水后黏土矿物发生膨胀,导致岩土体颗粒间胶结力大幅降低,内摩擦角(ϕ)和黏聚力(C)急剧衰减。在风化、卸荷作用下,边坡内部发育的次生顺坡向节理裂隙,节理裂隙不仅成为雨水入渗通道,还会切割岩土体形成破碎块体,形成滑面,降低坡体整体性。

人工切坡方面,已滑段人工切坡高度高于未滑段,但坡度接近一致,剪应力集中程度随切坡高度增大而增强,坡体内部的拉应力区范围随切坡高度扩展,尤其在松散层或软弱夹层中,拉应力集中易诱发裂缝扩展,降低坡体整体性。并且高切坡的坡面汇水面积更大,雨水入渗量增加,将降低岩土体的有效应力。

3 基于PFC^{3D}的滑坡数值模拟与运动特征研究

3.1 数值模拟方法(PFC介绍)

为深入探究快速滑坡的失稳机理、运动过程及堆积特征,本研究采用基于离散元法(DEM)的颗粒程序(Particle Flow Code, PFC)进行数值模拟分析。PFC通过将研究对象离散为大量可相互作用的刚性球形(3D)颗粒,并定义颗粒间接触的本构关系,能够有效地模拟岩土体在受力作用下的大变形、破裂、碎裂、流动以及块体间的碰撞分离等复杂非线性力学行为。该方法在处理诸如滑坡这类涉及材料破坏、离散化运动和复杂接触问题方面具有独特优势。

3.2 模型建立

基于详细的现场地质调查、地形测绘以及无人机倾斜摄影测量生成的高精度DEM,建立了反映于都远杭滑坡实际地形地貌的三维数值模型。模型尺寸东西长140m,南北长130m,底部标高200m。模型的建立分为五个部分:(1)通过实地勘察绘制滑坡周边等高线,获取地形数据;(2)通过Rhino软件复原滑前地貌;(3)使用无人机倾斜摄影测量生成高精度模型,与Rhino中的模型进行比对,绘制滑床面;(4)将滑床模型和滑体模型导入到PFC软件中;(5)依据滑体模型范围生成颗粒模型。模型范围充分包含了滑坡源区、运动路径及堆积区。采用Ball-Wall法建立模型,根据高精度DEM实现滑床精细化建模,并将滑床基岩被简化为刚性边界,能够在一定程度上减少未考虑因素对模拟结果造成的误差。滑体区域则通过生成符合实际岩土体级配特征的大量颗粒来模拟,颗粒粒径范围设定为0.2至0.4m,颗粒总数约为10400个。颗粒间的相互作用采用线性平行粘结模型(Linear Parallel Bond

Model) 进行描述, 该模型能同时考虑颗粒间的法向/切向弹性作用、摩擦滑动以及可断裂的粘结强度。

3.3 参数确定

本研究中的岩土体宏观力学参数主要来源于该滑坡勘查报告, 参考相似条件下的研究资料, 根据堆积体形态进行多次计算反演确定模型参数。最终确定的本模型关键细观参数值见表2。

表2 滑坡点岩土体物理力学参数

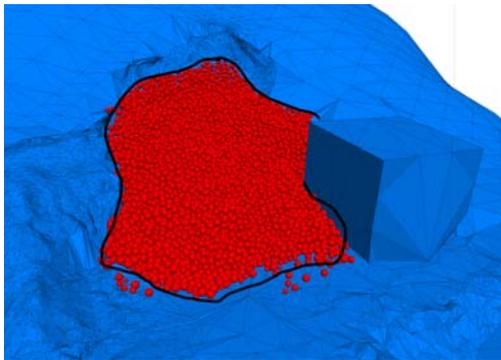
地层名称	重度 γ (kN/m ³)	饱和重度 γ_s (kN/m ³)	天然状态凝聚力 C (kPa)	饱和状态凝聚力 C (kPa)	天然状态内摩擦角 Φ (°)	饱和状态内摩擦角 Φ (°)
砂质粘土	18.6	19.6	22.65	27.9	23.9	15.5
全风化泥质粉砂岩	19	21	26.25	20	22	16
强风化泥质粉砂岩	22	25	30	20	31	27
滑带	-	-	-	9.6	-	10.1

3.4 滑体形态对比与模型验证

为验证所建立PFC模型的可靠性及参数选取的合理性, 将模拟计算得到的滑坡最终堆积体形态与现场调查测绘的实际堆积体形态进行了详细对比(图9), 在滑坡在滑体上共布置9个监测点, 见图10。



(a) 现场滑体堆积特征



(b) 数值模拟滑体堆积特征

图9 现场/数值模拟滑体形态对比

3.4.1 滑移距离分析

图11展示了滑坡运动过程的纵向剖面结果, 其中明确标识出滑体失稳前的原始范围(以黑色虚线表示)与模拟堆积体的最

终空间分布(以红色区域表示), 坡脚最大水平位移为10.1m。通过颗粒移动云图, 可以得出颗粒系统中的最大个体运移距离为27.9m。该模拟值与通过无人机倾斜摄影测量生成的高精度数字表面模型得的实际滑移距离(10.3m)相对误差小于3%, 结果高度吻合。表明模型所采用的接触力学参数能够有效反映滑体材料与下伏地层之间的相互作用机制, 模拟结果准确地再现了滑体的运动范围及止停特性。

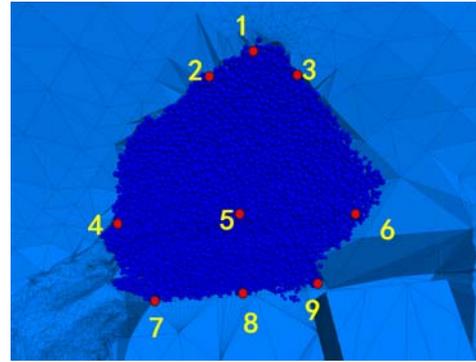


图10 监测点布置(滑坡前)

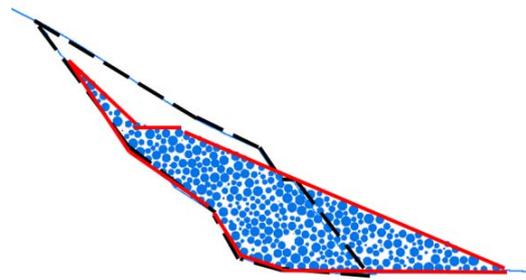


图11 主滑剖面图

3.4.2 滑体投影面积对比

利用图像处理算法提取堆积体轮廓并计算其投影面积, 模拟结果为617m²。对比由无人机倾斜摄影测量生成的高精度数字表面模型获得的实际堆积体面积(601m²), 相对误差为2.59%。此外, 模拟堆积体在平面形态上表现出与实际堆积体一致的主轴方向性和边缘形态分布特征, 进一步表明模型能够合理反映滑体在运动过程中的流变特性、侧向扩展性及堆积机制, 验证了模型在模拟颗粒材料运移和停积过程方面的可靠性。

综合以上形态学和定量指标的对比结果, 表明本研究建立的PFC滑坡模型能够较为准确地再现实际滑坡的堆积特征, 验证了模型参数设置和模拟方法的可靠性, 为后续分析滑坡破坏与运动过程提供了可信的基础。

3.5 滑坡运动特征分析

图12为颗粒运动速度分布的时空演化云图。云图显示滑体主体速度集中于1-5m/s区间, 其中前缘局部区域因地形挤压效应速度可超过10m/s。表现出典型的三阶段动力学行为: 初始加速度阶段(0-2s)、中期加速滑动阶段(2-4s)及末期减速沉积阶

段(4s后)。模拟速度与基于现场碎屑撞击痕、结构物变形特征及林带破坏模式相互对应,说明模拟结果与实际情况具有高度一致性。

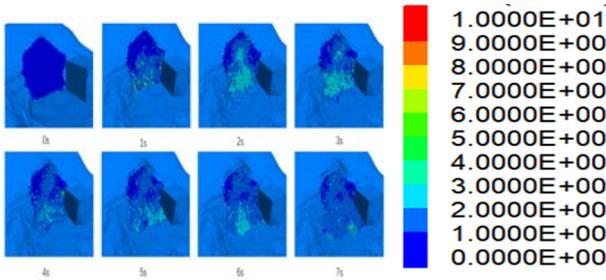


图12 颗粒运动速度分布的时空演化云图

通过后缘拉裂区、潜在剪出口、滑体中上部、滑体前缘、两侧边界设置一系列监测点(图10),实时记录了颗粒的位移、速度等运动学信息(图13、图14)。通过观察颗粒位移、速度和时间的变化曲线可知,滑坡前缘颗粒在滑坡过程前期出现快速移动,这是由于边坡初始平衡状态打破,在短时间内颗粒速度达到峰值,而后逐渐变缓。随着前缘土体的剪出,滑体中部和后缘的颗粒逐渐加速,但始终保持在相对稳定的范围内。通过观察监测颗粒的位移-时间曲线,可以看到前缘颗粒位移较大,后缘颗粒位移较小,与滑坡实际情况相符。

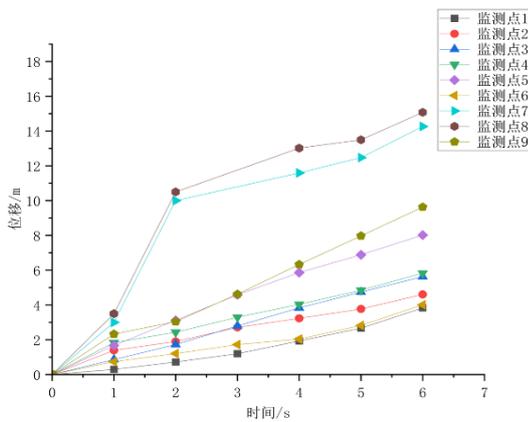


图13 监测点时间-位移图

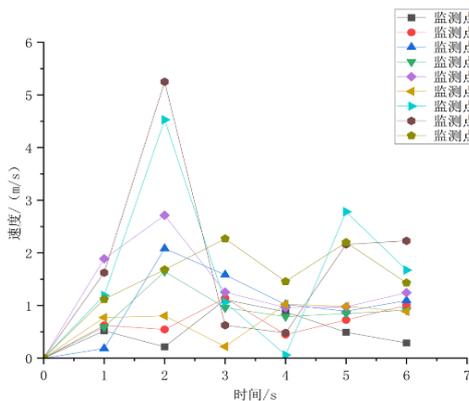


图14 监测点速度-位移图

3.6 滑坡演化特征分析

根据模拟结果,滑坡演化存在初始加速度阶段、中期加速滑动阶段及末期减速沉积阶段3个阶段,见图15。

① 初始加速度阶段(0-2s)

始于坡脚剪出段,首先在坡脚临空面出现局部剪切位移(表现为监测点水平位移突增、剪切应变增量局部集中),并快速向上游(后部)扩展,导致上部土体失去侧向支撑。随后在坡体中下部形成贯通剪切带(剪应变增量呈带状贯通),最终上部土体被牵引下滑。破坏模式主要表现为牵引式滑动。

② 中期加速滑动阶段(2-4s)

发生在坡脚剪出口贯通后,下部滑体首先加速,最大速度超过10 m/s;上部土体因被动牵引,开始整体下滑,呈现前缘推动后缘的牵引式特征。

③ 末期减速沉积阶段(4s后)

进入坡度<8°的堆积扇后,摩擦阻力显著增大,前缘速度迅速衰减至0,后续物质持续推挤,形成前缘鼓丘、叠瓦状构造。

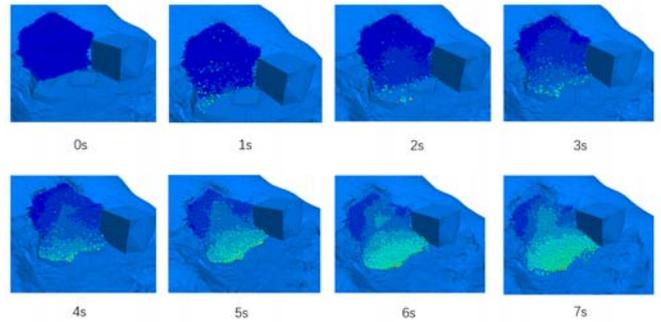


图15 颗粒运动位移分布的时空演化云图

综上,PFC数值模拟成功地再现了滑坡从坡脚启动、牵引式向上扩展、整体加速-碎裂流态化、到最终减速堆积的全过程动力学行为,整个剧烈运动过程持续时间约为7s。揭示了其以牵引式滑动为主,伴随显著碎裂和局部流态化的运动特征。

4 结论

(1)通过现场调查、地质勘查,于都县黄麟乡远坑村滑坡为江西赣南地区典型的强降雨与人工切坡活动共同诱发软弱地层(泥质粉砂岩)滑坡。强降雨造成地表水迅速渗入坡体、不合理的人类工程活动是滑坡发生的外因,泥质粉砂岩中量黏土矿物的软化、发育的次生顺坡向节理面是滑坡发生的内因。

(2)通过对已发生和未发生滑坡的人工切坡段进行精细化调查,主要包括地质环境条件、人工切坡特征,引入相对差值比例用于反映差异的相对幅度,结果表明松散层厚度相对差值比例最高,为滑坡主控因子;其他参数均小于20%,为滑坡次要影响因子。其原因是主滑段人工切坡所在的斜坡为凹形坡,未滑段的人工切坡所在的斜坡为凸形坡,造成主滑段人工切坡所在的斜坡形成了一处汇水带,造成该区域岩土体差异风化较强烈。

(3)通过PFC3D数值模拟软件对黄麟乡远坑村滑坡运动过程进行反演,获得了滑坡过程的颗粒运动位移与速度的变化云图,

结果表明该滑坡演化存在初始加速度阶段、中期加速滑动阶段及末期减速沉积阶段3个阶段,揭示了其以牵引式滑动为主,伴随显著碎裂和局部流态化的运动特征。

江西省地质局青年科学技术带头人培养计划项目—赣南地区变质岩地层切坡建房诱发高速滑坡孕灾机理与防治关键技术研究(编号:2025JXDZKJRC04)。

[参考文献]

[1]曾庆荣.江西赣州市地质灾害现状及防御对策[J].中国防汛抗旱,2025,35(S1):88-90+104.

[2]何寒舟,刘学亮.赣州地区地质灾害发育特征分析[J].地下水,2024,46(02):152-156.

[3]Chongjian S, Yun L, Hengxing L, et al. Spatiotemporal distribution characteristics, causes, and prevention advice of fatal geohazards in Jiangxi Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 834: 155337-155337.

[4]向兴达,郭立,王诗发,等.江西省农村切坡建房引发地质灾害现状与管控对策——以赣南地区为例[J].华北自然资源,2025,(05):129-132.

[5]TANGChao lung, HU Jyrching, LIN Minglang, et al. The Tsoling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan:

Insights from a discrete element simulation[J]. Engineering Geology, 2009, 106(1/2): 1-19.

[6]陈达,薛喜成,魏江波.基于PFC2D的刘洞滑坡破坏运动过程模拟[J].煤田地质与勘探,2018,46(4):115-121.

[7]ZOU Zongxing, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Kinetic characteristics of debris flows as exemplified by field investigations and discrete element simulation of the catastrophic Jiweishan rockslide, China [J]. Geomorphology, 2017, 295: 1-15.

[8]胡晓波,樊晓一,唐俊杰.基于离散元的高速远程滑坡运动堆积特征及能量转化研究:以三溪村滑坡为例[J].地质力学学报,2019,25(4):527-535.

[9]谢强,李雨桐,徐先宇.滑坡诱发农村山区砖混结构变形及演化规律研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2024,56(02):166-175.

[10]张家勇,邹银先,杨大山.基于PFC3D的鱼鳅坡滑坡运动过程分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(04):33-39.

作者简介:

李海潘(1982--),男,汉族,江西于都人,本科,高级工程师,主要从事地质灾害防治、矿山生态环境修复等方面的应用研究。