

基于“天—空—地”协同观测的西宁市南川东路滑坡 变形特征与稳定性分析

王志超¹, 赵健赞¹, 温兰冲¹, 高崇越¹, 姜传礼¹, 赵利江², 韩国财³

(1.青海大学地质工程学院, 青海西宁810016; 2.青海省基础测绘院,
青海西宁810001; 3.青海省水利水电勘测设计研究院有限公司, 青海西宁810000)

摘要: [目的] 明确降雨对西宁市浅层滑坡失稳的影响, 为该市降雨型浅层滑坡灾害的监测预警防治提供依据。[方法] 以青海省西宁市南川东路 H7 滑坡为例, 采用“天—空—地”协同观测技术对滑坡体进行观测调查, 基于流固耦合原理和非饱和土强度理论进行水力耦合数值模拟, 得出降雨作用下斜坡的孔隙水压力、应力、位移演化及塑性区分布, 通过强度折减法计算不同降雨时长下斜坡安全系数。[结果] ①南川东路 H7 滑坡整体形态呈长条状, 为“牵引—推移”式滑坡, 运动模式表现为坡脚失稳牵引、中部变形滑移及顶部失稳推移。②雨水入渗引发斜坡土体饱和度上升、基质吸力消散、有效应力降低、抗剪强度衰弱, 导致斜坡的下滑力增大、抗滑力减小, 诱使南川东路滑坡稳定性持续下降。③模拟降雨 72 h 后, 在浅层土体内形成接近贯穿的圆弧形塑性滑动面, 斜坡的安全系数从 1.17 降至 1.01, 处于“暂时稳定—变形”的欠稳定状态。水平位移在坡脚处最大, 为 6.89 cm; 竖向位移在坡体上部最大, 为 5.98 cm。[结论] ①“天—空—地”协同观测技术可有效支撑滑坡灾害的调查与评估, 有限元水力耦合数值模拟对降雨型滑坡稳定性研究适用性强、效果较好。②南川东路 H7 滑坡在高强度持续降雨下稳定性将进一步降低, 威胁道路、建筑及居民安全, 需重视潜在滑坡风险。

关键词: “天—空—地”协同观测; 降雨型浅层滑坡; 失稳机制; 数值模拟; 变形特征; 稳定性分析

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)02-0223-13

中图分类号: P642.22

文献参数: 王志超, 赵健赞, 温兰冲, 等. 基于“天—空—地”协同观测的西宁市南川东路滑坡变形特征与稳定性分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 223-235. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.024; Wang Zhichao, Zhao Jianyun, Wen Lanchong, et al. Deformation characteristics and stability analysis of Nanchuan East Road landslide in Xining City based on space-air-ground observation technology [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 223-235.

Deformation Characteristics and Stability Analysis of Nanchuan East Road Landslide in Xining City Based on Space-Air-Ground Observation Technology

Wang Zhichao¹, Zhao Jianyun¹, Wen Lanchong¹, Gao Chongyue¹, Jiang Chuanli¹, Zhao Lijiang², Han Guocai³

(1.School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai

810016, China; 2.Qinghai Institute of Basic Surveying and Mapping, Xining, Qinghai 810001, China;

3.Qinghai Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: [Objective] The influence of rainfall on the instability of shallow landslides was determined in Xining City in order to provide a basis for the monitoring, early warning and prevention of rainfall-type shallow landslide disasters in Xining City. [Methods] The H7 landslide of Nanchuan East Road in Xining City, Qinghai Province was observed and investigated by using space-air-ground observation technology. Based on the fluid-solid coupling principle and unsaturated soil strength theory, hydraulic coupling numerical simulation was carried out to obtain the evolution of porewater pressure, stress, displacement, and plastic zone distribution of the slope under the action of rainfall. The intensity reduction method was used to calculate the slope safety factor under different rainfall durations. [Results] ① The overall landslide form of

收稿日期: 2023-11-06

修回日期: 2024-02-06

资助项目: 青海省重点研发与转化计划项目“青海省湟水流域潜在地质灾害风险识别与监测预警关键技术研究与应用”(2023-SF-122)

第一作者: 王志超(2000—), 男(汉族), 辽宁省朝阳市人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害监测。Email: wzc18242174010@163.com。

通信作者: 赵健赞(1981—), 男(汉族), 甘肃省张掖市人, 博士, 副教授, 主要从事对地观测技术与资源环境评价研究。Email: zhaojianyun1981@163.com。

the H7 landslide on Nanchuan East Road was a long strip, which was a tractor-push landslide. The movement mode was manifested as unstable traction at the slope foot, deformation and sliding in the middle of the slope, and unstable pushing at the top of the slope. ② Rainwater infiltration caused soil saturation to rise, matric suction to dissipate, effective stress to decrease, and shear strength to weaken, resulting in the slope sliding force to increase and the anti-sliding force to decrease, thereby inducing the landslide stability of Nanchuan East Road to continue to decline. ③ After 72 h of simulated rainfall, a nearly penetrating arch-shaped plastic sliding surface was formed in the shallow soil, and the safety factor of the slope decreased from 1.17 to 1.01, indicating an unstable state of temporary stability-deformation. The maximum horizontal displacement was 6.89 cm at the foot of slope. The maximum vertical displacement was 5.98 cm in the upper part of the slope. [Conclusion] ① Space-air-ground observation technology can effectively support the investigation and evaluation of landslide disasters, and finite element hydraulic coupling numerical simulation has strong applicability and good effect for the study of the stability of rainfall-type landslides. ② The stability of the H7 landslide on Nanchuan East Road will be further reduced under high-intensity continuous rainfall, which will threaten the safety of roads, buildings and residents, therefore attention should be given to the potential landslide risk.

Keywords: space-air-ground observation; rainfall-type shallow landslide; instability mechanism; numerical simulation; deformation characteristics; stability analysis

西宁市地处青藏高原、黄土高原过渡地带,地质环境复杂,内外动力作用强烈^[1],地形起伏大,降雨量增加趋势显著^[2],降雨型浅层滑坡灾害大量发生,如南川东路滑坡^[3]、石板滩滑坡^[4]、付家寨绿化区滑坡^[5]、彭家寨张家湾滑坡等^[6],严重威胁社会经济的发展 and 人民的生产生活^[7],分析滑坡的成因机理及其监测预警具有重要意义。通过对滑坡变形破坏过程性指标(如位移、应力及地下水位等)进行监测,并根据其动态变化特征和规律,在滑坡发生前进行预警是主动防灾减灾的重要途径之一^[8]。传统的滑坡监测方法通过布设观测网对滑坡体的水平位移和竖向位移进行监测,尽管测量精度较高,但工作量大、成本高、效率低^[9]。随着遥感技术的发展,“天一空一地”协同观(监)测技术逐步在地质灾害监测领域应用和发展,为致灾机理研究提供多层次、多角度、多维立体观测数据和支撑。

目前,针对降雨型浅层滑坡失稳问题,学者们主要通过试验和数值模拟方法开展研究。在试验研究方面,又分为探究不同初始条件与斜坡稳定性之间的关系和探究降雨入渗作用斜坡失稳机制 2 类,如郭长宝等^[10]通过离心机模型试验,模拟了典型滑坡滑体土在不同含水率下的孔隙水压力、土压力及斜坡稳定性演化过程,表明滑坡复活因素主要受降雨入渗和孔隙水压力的影响。王力等^[11]通过一维土柱入渗试验和二维滑坡模型试验,研究不同降雨强度下滑坡土体的入渗特征和浅层变形机制。孟生勇等^[12]通过室内试验研究降雨触发斜坡变形破坏过程、运动模式及土水响应规律。数值模拟是一种通过计算机模拟真实

系统的行为和特性的技术方法。崔亮等^[13]、王述红等^[14]、徐晗等^[15]采用 ABAQUS 对降雨入渗条件下斜坡土体渗流场与应力场的耦合情况进行模拟。张群等^[16]采用 Geo-studio 进行浅层斜坡基覆界面处孔隙水压力变化规律与稳定性研究。谢强等^[17]基于 FLAC^{3D} 平台进行饱和-非饱和渗流分析模块的二次开发,研究降雨入渗对浅层土质边坡的渗流场、位移场及稳定性演变过程的影响,揭示降雨型滑坡的失稳机制。非饱和强度理论是土力学和岩土工程领域的重要理论框架,用于描述非饱和土体的力学行为^[18]。流固耦合原理是描述流体和固体之间相互作用关系的理论框架,其涉及到流体力学和固体力学之间的相互影响。强度折减法最早由英国学者 Zienkiewicz 等^[19]提出,是一种用于实际工程中计算安全系数和评估结构强度、稳定性的方法^[20],其可在有限元分析中模拟斜坡渐进破坏过程,自动计算潜在滑动面、塑性应变及位移突变区域。针对降雨型浅层滑坡失稳问题的研究,非饱和土斜坡受到雨水入渗后,坡体内部变化很难通过试验进行深入分析和探究,而基于非饱和土强度理论和流固耦合原理的斜坡渗流场与应力场耦合数值模拟方法,通常比室内外试验的微观研究更能直观表现降雨过程中斜坡的动态弱化机理。综上所述,现有研究大多是针对降雨型滑坡开展失稳方面的研究,限于区域地质环境条件与水文气候条件的差异,仍有必要结合单体滑坡开展具体、深入的研究。近年来,西宁市南川东路滑坡体变形特征发育明显,并发生多次滑塌,破坏较为严重。马还援^[21]开展了南川东路滑坡灾害发育特征研究,魏正发等^[3]通过现场调查及数理统计分析了南川东路滑坡形成机理

及防治成效,但对于该滑坡目前的变形特征与稳定性情况仍不明确。为此,本研究于2023年期间利用“天—空—地”协同观测技术,在查明滑坡区地质环境及水文环境的基础上,分析滑坡体的形态规模、变形特征,并结合滑体土物理力学参数进行滑坡水力耦合数值模拟,明确滑坡的失稳机理并分析其稳定性,为同类降雨型浅层滑坡灾害的监测预警防治提供科学依据。

1 研究区地质环境概况

研究区位于青海省西宁市城中区南川东路滑坡灾害群(101°44′56″—101°46′54″E, 36°33′29″—36°36′22″N),空间上呈长条形分布,长约4 km(如图1所示)。研究区北临南川东路街道,南至南苑小区,西临南川东路加气站,东至南山顶部。研究区总体地貌为东高西低的单面长斜坡地貌,分为侵蚀剥蚀低山丘陵及河谷平原两种类型,断裂发育显著^[3]。研究区地层岩性分为4类:①含碎石、石膏粉质黏土($Q_4^{\text{del+col}}$),分布于斜坡及其后缘,土质不均匀,粉质黏土为主、局部为黏土;②泥岩、砂岩和石膏岩(E_m),分布于南山后缘陡崖处;③冲积黄土状土(Q_3^{al}),分布于南川河河谷平原阶地,由粉土、卵石组成,粉土厚度约1~5 m;④风积黄土(Q_3^{col}),覆于研究区东侧低山丘陵区山体,呈土黄色,孔隙大,垂直节理发育,具有自重湿陷性^[22]。研究区在地质构造上受控于祁连—加里东褶皱系祁连中间隆起带,受新构造运动的间歇性上升影响,南川河下切严重,研究区内形成多级宽阔阶地和高陡斜坡^[3,5]。

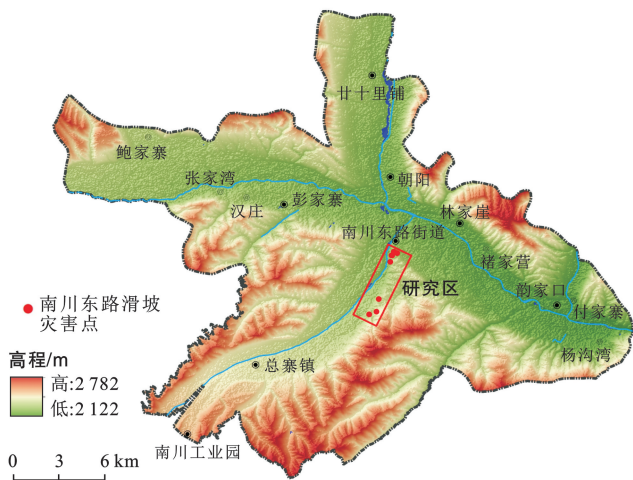


图1 研究区地理位置和地形

Fig.1 Geographical location and topography of study area

研究区紫外线辐射强、昼夜温差大、降水量少而集中,属高原半干旱大陆性气候,气候条件复杂。依据西

宁气象站2000—2023年观测数据发现,研究区多年平均气温6.0℃,年最高月平均气温28.9℃,年最低月平均气温-17.5℃;年平均降水量386.8 mm,年最高月降雨量195.6 mm,年最高日降雨量107.1 mm,区域内降水分配不均匀,主要集中在5—9月,年降水量周期性变化明显,强降雨偏多。

2 研究方法

2.1 “天—空—地”协同观测技术

“天—空—地”协同观测技术是运用航天遥感平台、航空遥感平台、地基观测平台对滑坡灾害点进行多维、多角度立体观测,以获取滑坡体地表覆盖、变形特征、地形地貌等信息。利用航天遥感平台获得的研究区2018年1月至2023年9月的Sentinel-1A卫星遥感数据,通过小基线子集干涉合成孔径雷达(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)技术处理得到滑坡区的年平均形变速率并评价其整体稳定性;利用无人机航空遥感平台倾斜摄影测量与机载激光雷达(LiDAR)技术,获取研究区高清数字影像、高分辨率点云数据,利用高分辨率点云数据构建实景三维模型,获取滑坡体地表覆盖、地形地貌等信息;利用地面全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测平台和实地调查数据,查明滑坡区地质环境、水文环境,分析滑坡体的形态规模、变形特征。

2.2 有限元数值模型的构建

2.2.1 计算原理 非饱和土强度理论由Fredlund等^[18]提出,在降雨入渗斜坡稳定性分析应用较为广泛,计算公式为:

$$\tau_f = c' + (\delta - p_a) \tan \varphi' + (p_a - p_w) \varphi^b \quad (1)$$

式中: φ' 为有效内摩擦角; c' 为有效黏聚力; p_w 为孔隙水压力; p_a 为孔隙气压力; φ^b 为随基质吸力($p_a - p_w$)变化的内摩擦角; τ_f 为非饱和土抗剪强度。

由公式(1)可知,土体强度随基质吸力减小而大幅降低,本研究将基质吸力作为评价土体强度和斜坡失稳重要指标,负孔隙水压力表示基质吸力。

土体渗透系数随基质吸力、饱和度随基质吸力的关系参考^[15],计算公式为:

$$K_w = \frac{a_w K_{ws}}{a_w + [b_w \times (p_a - p_w)] c_w} \quad (2)$$

式中: K_{ws} 为土体饱和时渗透系数,取 5.50×10^{-6} m/s; a_w, b_w, c_w 为土体系数,本研究分别取1 000, 0.01, 1.7^[23]。

$$S_r = \frac{S_i + (S_n - S_i) a_s}{a_s + [b_s \times (p_a - p_w)] c_s} \quad (3)$$

式中: S_r 为土体饱和度; S_i 为土体残余饱和度, 取 0.08; S_n 为土体最大饱和度, 取 1; a_s, b_s, c_s 为土体系数, 本研究分别取 $1, 5.00 \times 10^{-5}, 3.5^{[23]}$ 。

随着降雨持续, 雨水渗入到土质斜坡导致渗流场与应力场相互作用影响。根据水力学原理, 结合降雨入渗边界和孔压边界条件, 单元的渗流体积力 (F_V)、流固耦合方程^[14]分别为:

$$F_V = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_w J_x \\ r_w J_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: F_x, F_y 为 F_V 在 x 和 y 方向上的分量; J_x, J_y 为在 x 和 y 方向上的渗透坡降; r_w 为水的重度。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{C} \\ \mathbf{E} & \mathbf{G} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ p_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & F_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ p_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dF_V}{dt} \\ \hat{\mathbf{F}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{K}, \mathbf{C}, \mathbf{E}, \mathbf{G}, \hat{\mathbf{F}}$ 均为矩阵; t 为时间; u 为单元节点位移。

强度折减法的基本原理为折减系数 F_r 对土体的强度指标 c' 与 φ' 进行持续折减运算, 当强度折减

到斜坡处于失稳临界状态, 此时的 F_r 可作为斜坡安全系数, 经过折减的抗剪强度参数^[19]如公式(6)–(7)所示。在土体强度折减过程中, 最准确的斜坡失稳判据为斜坡塑性贯通区形成且特征点位移发生突变^[20], 本研究数值模拟均采用上述判据。

$$c_m = c' / F_r \quad (6)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi' / F_r) \quad (7)$$

式中: c_m, φ_m 分别为折减后土体的黏聚力与内摩擦角。

2.2.2 网格模型及计算参数 利用机载 LiDAR 技术获取的点云数据处理得到斜坡的地表截面, 将斜坡几何模型简化为二维平面, 建立有限元网格模型, 进行降雨条件下斜坡稳定性分析(图 2)。斜坡模型长 81 m, 高 50 m, 坡度为 38° , 模型坡高 40 m, 地下水位 10 m, 粉质黏土的饱和渗透系数为 5.50×10^{-6} m/s, 初始孔隙比为 1。模型网格单元采用 CPE4P 单元, 网格单元量为 900 个。土水特征曲线(POR—SAT)与渗透性函数曲线(K_s —SAT)取值参考^[23], 根据公式(2)–(3)计算得到。

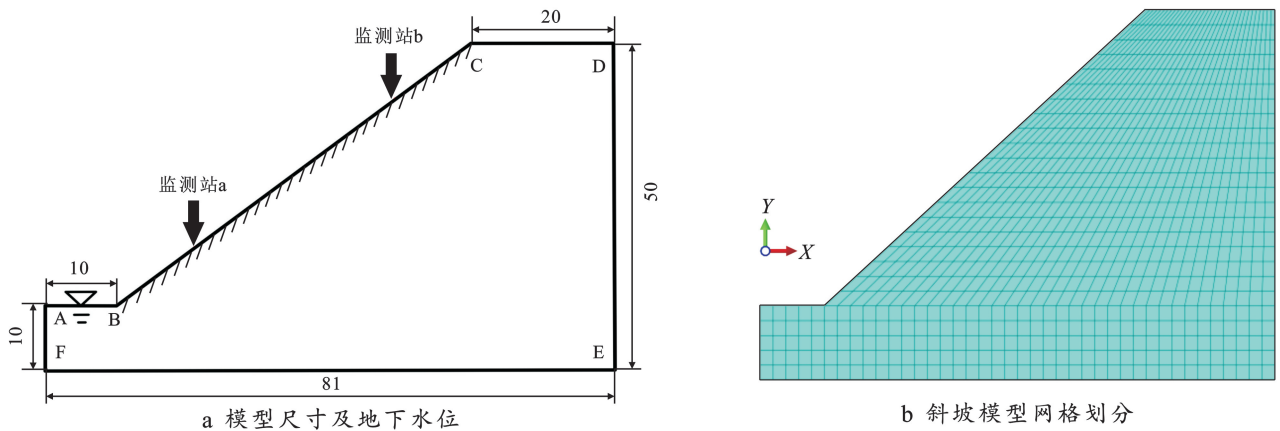


图 2 斜坡数值模拟计算模型

Fig.2 Numerical simulation model of slope data

数值模拟所需土体物理力学参数主要包括重度、弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角。其中土体重

度、黏聚力、内摩擦角为室内试验得到, 弹性模量、泊松比的取值参考前人试验研究^[24](如表 1 所示)。

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Soil physical and mechanical parameters

力学参数	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
粉质黏土	14.54	40.00	0.33	20.10	30.59

2.2.3 计算方案及约束条件 降雨入渗边界条件采用 Mein 和 Larson 学者研究中^[25]降雨强度大于土体饱和和渗透系数而小于土体入渗能力的情况, 即所有雨水全部入渗, 土体入渗能力随入渗深度的增加而变小, 但此时降雨强度还未达到土壤允许入渗容量, 故入渗率保持很高并不会降低。此情况下坡面为流量

边界, 以降雨强度表示降雨边界函数, 坡体未出现径流现象。结合降雨入渗边界条件, 为模拟研究区最大降雨, 设置降雨强度为 0.020 m/h, 同时实现降雨条件下斜坡的真实变化趋势, 设置降雨历时为 72 h, 因此斜坡坡顶入渗强度为 0.020 m/h, 坡面入渗强度为 0.016 m/h。斜坡的模拟初始条件为理想弹塑性本构

模型,稳定性分析采用 Morhr-Coulomb 破坏准则,模拟过程中排除降雨所造成的地表积水现象。本研究模型约束条件为:两端边界 DE, AF 设置水平约束,底部 EF 设置竖向和水平约束,采用斜坡土体重力模拟初始地应力。模型孔压边界条件为:模型左、右两侧水位以下边界设置为随水深线性增加的静水孔压边界,即 $10 \times (10 - Y)$, AB 边界孔压为 0,其余边界设为不排水边界。根据滑坡稳定状态划分标准将滑坡的稳定状态划分为 4 级(如表 2 所示)。

表 2 滑坡稳定状态划分标准^[26-27]

Table 2 Classification criteria of landslide stable state

稳定系数取值	<1.00	[1.00, 1.05]	[1.05, 1.15]	>1.15
稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

3 结果与分析

3.1 滑坡体基本特征分析

利用大疆经纬 M300RTK 无人机,分别搭载禅思 P1, L1 镜头对研究区进行多维立体观测,设置相对航高为 100 m,航向重叠率 80%,旁向重叠率 70%,获得研究区高清数字影像和高分辨率点云数据,并构建滑坡体的数字正射影像、数字高程模型和实景三维模型(如图 3 所示)。制作滑坡体地表截面并测量数值模

拟计算所需的地表截面几何参数,地表截面形态整体呈直线形。



图 3 基于点云数据的滑坡体实景三维模型

Fig.3 Real 3D model of landslide based on point cloud data

由上述成果资料量测得到滑坡体长约 81 m,宽约 153 m,面积约 12393 m²,体积约 76 200 m³。滑坡体主要滑行方向为 279°,滑坡体前缘距南川东路 42 m,平面呈矩形,高程范围为 2 240~2 345 m,整体坡度为 38°。滑坡边界较为清晰,后缘有明显的滑坡壁,高约 18~34 m,前缘为高 4~9 m 的墙体,南北两侧边界均为天然冲沟。滑坡区的物质结构为松散堆积体,表层土体主要为粉质黏土,粉质黏土呈黄色、棕红色,稍湿、稍密,固结程度低(如图 4a 所示)。滑坡区的承灾体主要为公路、加气站、加油站、南山公园、附近建筑居民点及绿化灌溉工程。



a 滑坡区航拍全貌图(近东西向拍摄, 2023年)



b 崩塌区堆积体



c 滑坡后壁张拉裂缝



d 坡体裂缝发育



e 坡脚垂向裂隙发育

图 4 研究区滑坡全貌及变形特征

Fig.4 Overall perspective and deformation characteristics of landslide at study area

由实地调查(图 4c,图 4e)和无人机倾斜摄影测量(图 4b,图 4d)成果可知,滑坡整体变形破坏特征明显,主要表现为顶部崩塌区岩土体滑落堆积、滑坡后缘的张拉裂缝发育,滑坡体坡面出现蠕滑迹象,张拉裂缝、剪切裂缝及孔洞发育,坡脚土体出现大量垂向裂隙。滑坡区后缘形成近似垂直、高约 35 m 的主断壁,部分陡壁有崩塌变形迹象。受上部崩塌区破坏影响,滑坡区北侧后缘发育大量张拉裂缝,宽度为 12~65 cm,延伸长度约 35 m,且上下错动;坡体中部受到上部土体推移作用出现多条张拉、剪切裂缝及大量孔洞,张拉裂缝宽度为 7~35 cm,上下错动 5~30 cm,剪切裂缝宽度为 20~50 cm,孔洞面积约为 30×30 cm,且在中部坡面土体拉裂破碎,部分树木歪斜;坡脚处土体在牵引作用下变形强烈,垂向裂隙发育明显。滑坡边界为两侧翼部分经地表径流侵蚀形成的自然冲沟。该滑坡尚未发现大规模贯通性的蠕滑破坏面,说明其目前变形以浅表层蠕滑变形为主。

3.2 滑坡体变形特征分析

由 SBAS-InSAR 处理结果得到南川东路 H7 滑坡区垂直向的年平均形变速率(如图 5 所示)。负值表示地面沉降,正值表示地面抬升。研究区域从 2018 年 1 月至 2023 年 9 月年平均形变速率介于 -46.69~3.98 mm/a,最大沉降形变速率场为滑坡主滑体区域,最大抬升形变速率场为灾害点西面的南川东路及灾害点东面的南山公园区域,表明该滑坡区整体稳定性较差。GNSS 地表监测数据表明研究区 5 月降雨 3 d 内监测点 a 累计位移为 35.8 mm,监测点 b 累计位移为 37.5 mm(如图 6 所示)。

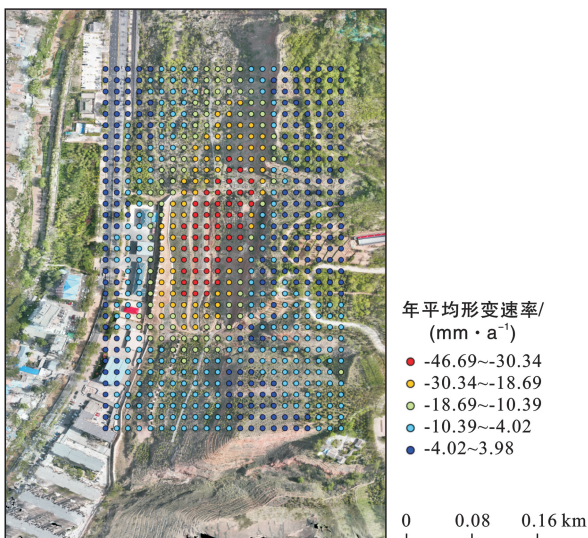


图 5 滑坡区形变速率分布

Fig.5 Deformation rate distribution of landslide area

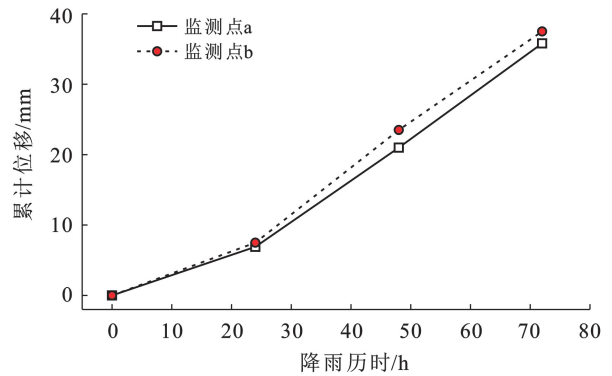


图 6 研究区滑坡监测点累计位移

Fig.6 Cumulative displacement of landslide monitoring points at study area

3.3 降雨条件下斜坡体稳定性数值模拟分析

3.3.1 渗流场分析 利用有限元数值模拟得到不同降雨时长下斜坡土体的渗流场相关参数,包括地下水位、孔压分布、饱和度分布云图,分别如图 7—9 所示。结果表明,随着降雨入渗,斜坡非饱和土含水率逐渐增加,地下水位线、孔隙水压、饱和度都发生相应变化,对斜坡稳定性产生不利影响。

经过 72 h 降雨入渗,斜坡模型的非饱和区处于初始水位线以上,土体孔压为负值由水位线逐渐降低到坡顶。未降雨时地下水位处在水平与坡底的位置(图 7a),随着降雨时长的增加,地下水位呈缓慢上升趋势。黄色区域代表地下水位线以上,黄色与蓝色的交界为地下水位线(图 7)。

降雨前,斜坡的孔隙水压力呈线性分布;降雨 24 h 时,距坡脚 3.21 m 处斜坡土体的正孔隙水压达到 42.04 kPa,粉质黏土在坡面上平均孔压达到 -3.32 kPa,如图 8b 浅绿色区域所示;降雨 48 和 72 h 时,沿坡面方向距坡脚 3.75 和 4.90 m 处,孔隙水压高达 58.91 kPa(图 8c)和 72.31 kPa(图 8d),24~72 h 孔隙水压上升幅度达 41.86%。结果表明,在降雨过程中雨水逐渐入渗到斜坡浅表层,孔隙水压、孔隙水压力迅速增大,基质吸力降低;同时,饱和区由初始水位线以下逐渐向坡脚处聚集,沿坡面发展为图 9d 中的深红色区域,威胁斜坡安全。综合上述渗流场研究结果发现,随着斜坡土体的孔隙水压力增大,基质吸力降低,饱和区逐渐上升,导致斜坡稳定性持续降低,极易发生浅层滑坡。

3.3.2 应力场分析 利用有限元数值模拟得到不同降雨时长下斜坡的最大主应力、最小主应力云图,分别如图 10—11 所示。结果表明,水平方向应力、垂直方向应力总体上与土体埋深均呈正相关。在降雨 24、48 和 72 h 时,水平方向最大主应力分别为 -4.97, 1.47 和 21.01 kPa(图 10);垂直方向最小主应力分别为

-616.40, -623.30 和 -630.70 kPa(图 11)。坡面和坡体顶部水平方向应力为正,即为拉应力,最大拉应

力为 21.01 kPa(图 10d);底部竖直方向应力为负,即为压应力,最大压应力为 630.70 kPa(图 11d)。

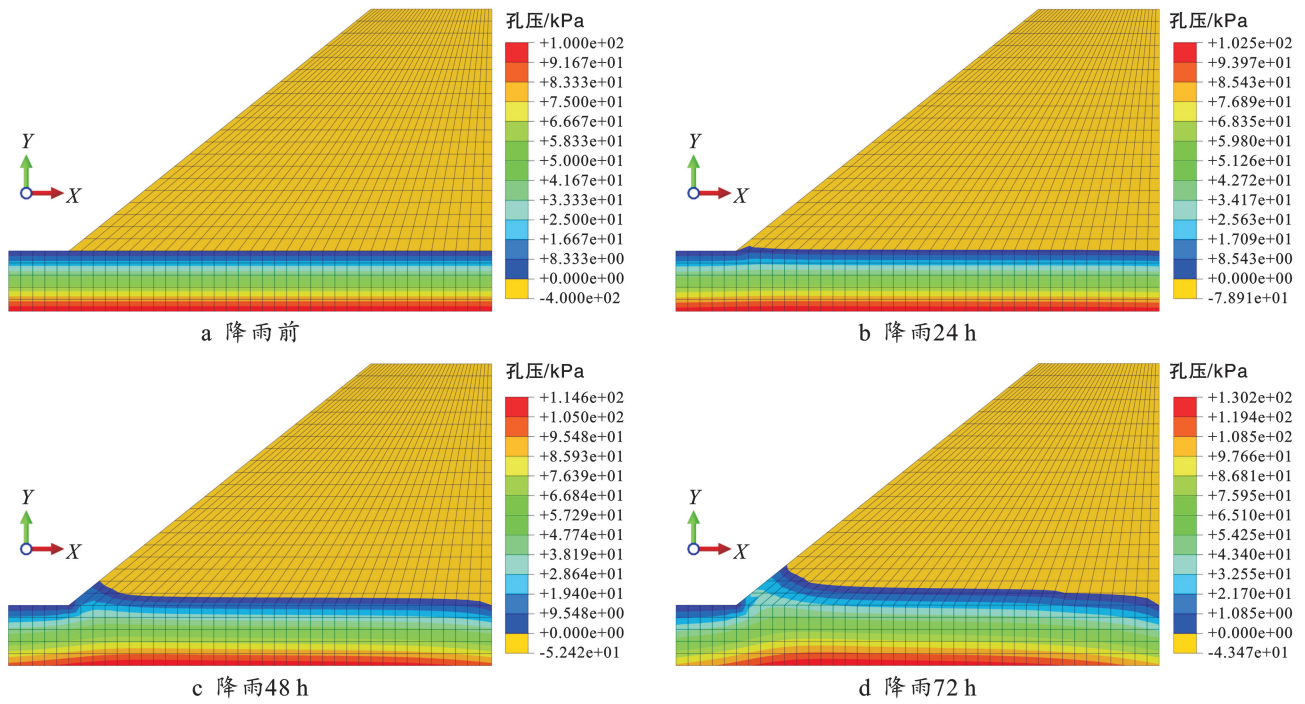


图 7 研究区不同降雨时长地下水分布

Fig.7 Distribution of groundwater levels under different rainfall durations in study area

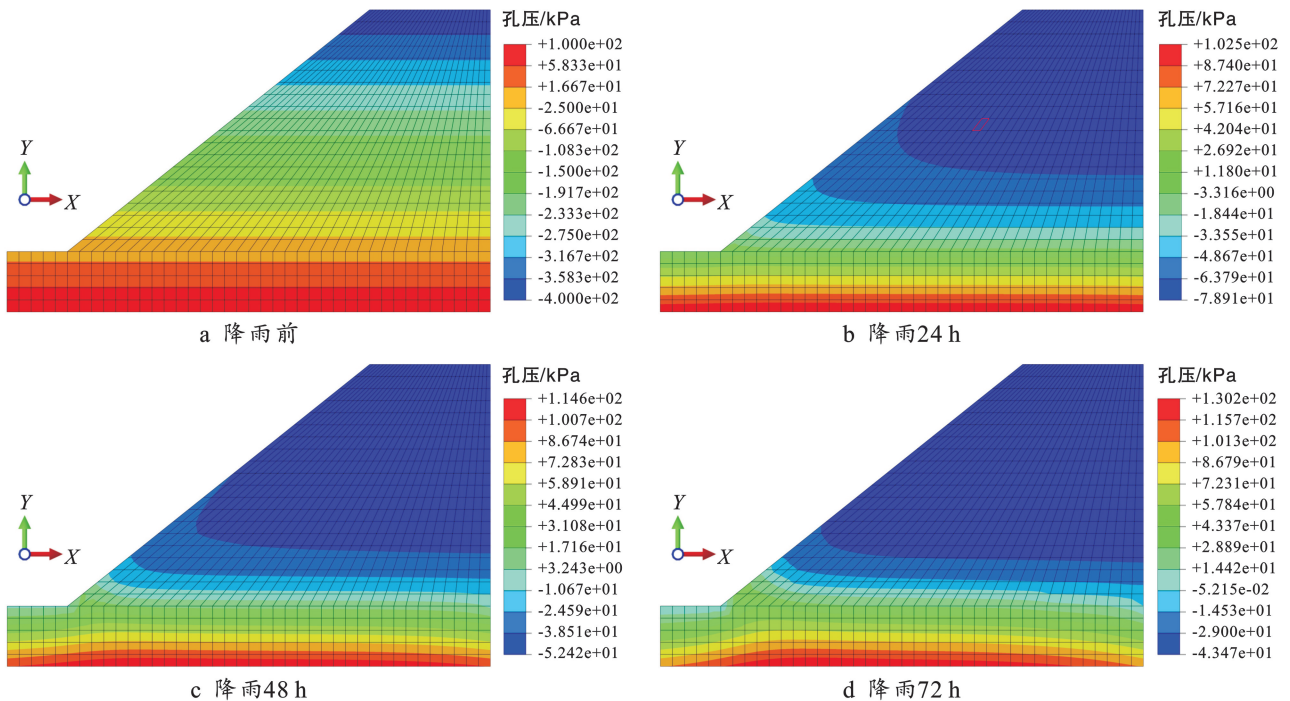


图 8 不同降雨时长斜坡孔压分布

Fig.8 Pore pressure distribution of slope with different rainfall duration

3.3.3 位移分析 位移分析能明确斜坡土体的主要变形、破坏位置及滑动方向,通过有限元数值模拟得到不同降雨时长下斜坡的水平位移、竖直位移云图,

分别如图 12—13 所示。结果表明,斜坡土体的位移变形主要出现在降雨入渗影响的浅表层区域。土体水平位移、竖直位移与降雨时长呈正相关,在降

雨 24, 48 和 72 h 时, 水平位移分别为 1.08, 1.68 和 6.89 cm(图 12), 竖直位移分别为 4.32, 4.43 和 5.98 cm(图 13)。

随着降雨时间持续增加, 斜坡浅层土体的水平位移变化明显大于竖向位移变化。水平最大位移出现在斜坡底部坡脚处, 为 6.89 cm(图 12c), 竖直最大位

移出现在斜坡上部, 为 5.98 cm(图 13c)。推测此过程中斜坡的运动形式为顶部崩塌堆积层及上覆土体首先发生较大变形, 斜坡体下滑力增大, 顶部土体推移挤压中部土体向下滑动。按照引起滑坡的力学性质作为划分依据, 南川东路 H7 滑坡具有推移式滑坡的特点。

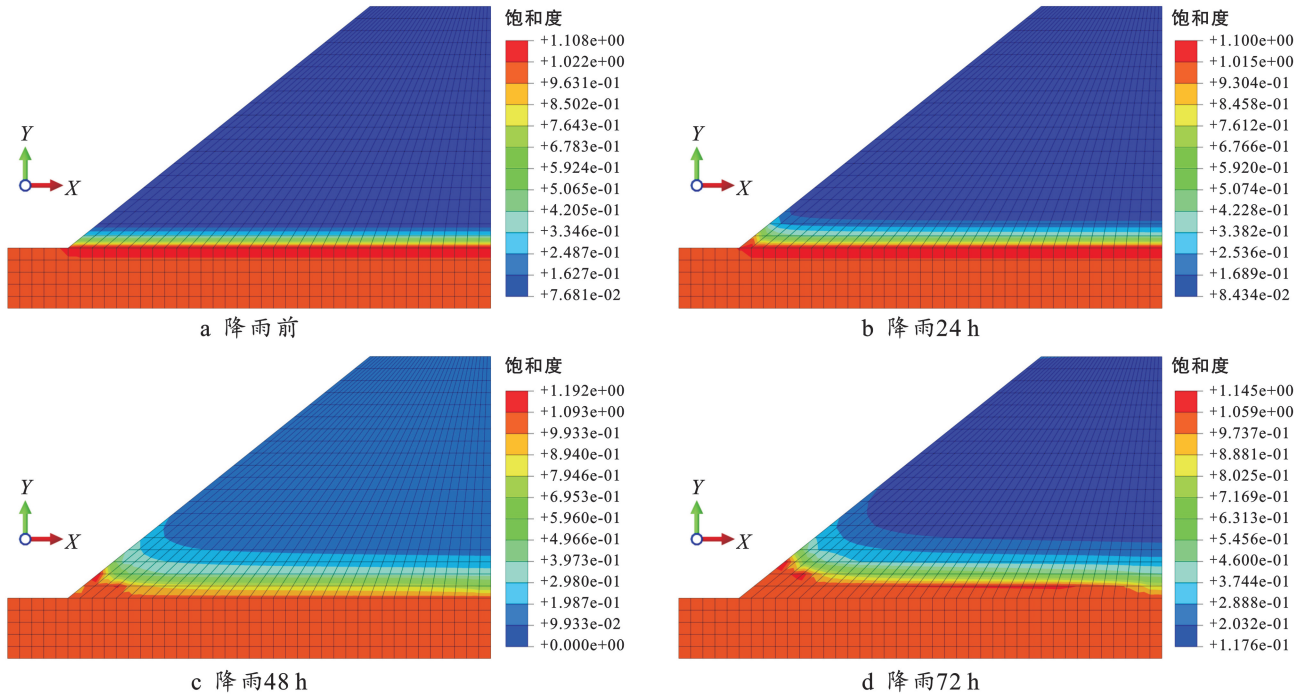


图 9 不同降雨时长斜坡饱和度分布

Fig.9 Slope saturation distribution with different rainfall duration

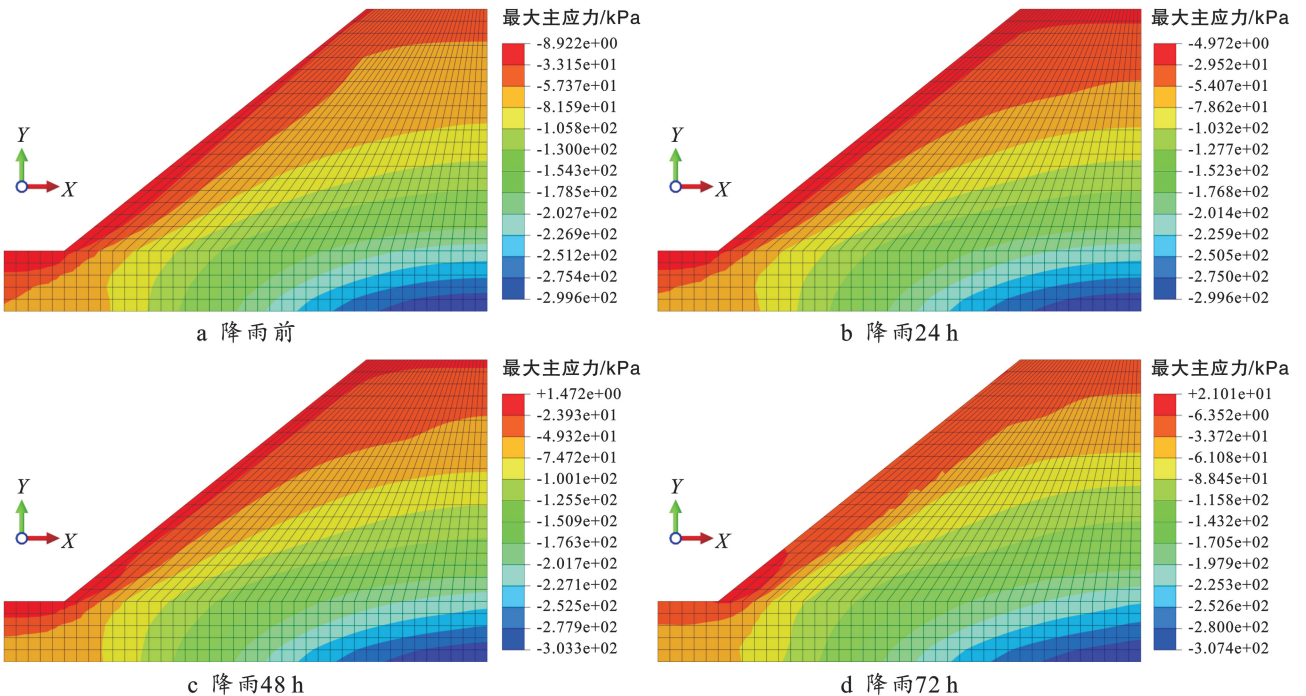


图 10 不同降雨时长斜坡最大主应力分布

Fig.10 Maximum principal stress distribootion of slopes with different rainfall duration

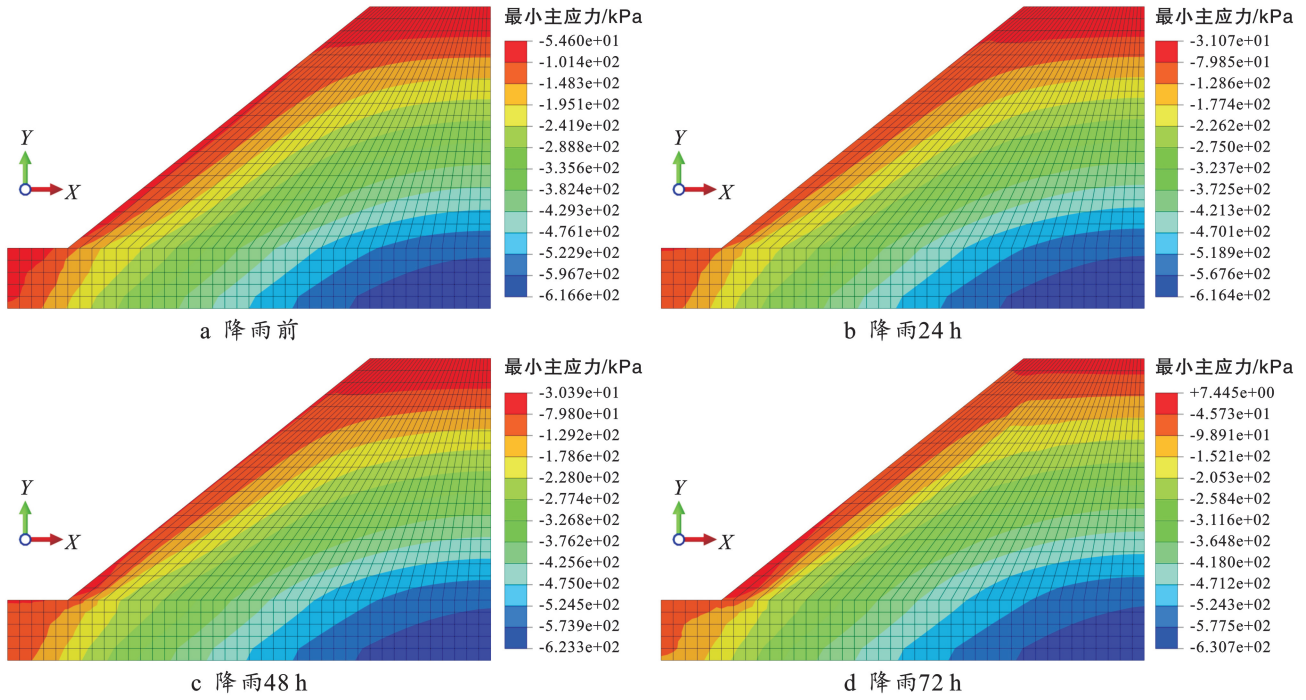


图 11 不同降雨时长斜坡最小主应力分布

Fig.11 Minimum principal stress distribution of slopes with different rainfall duration

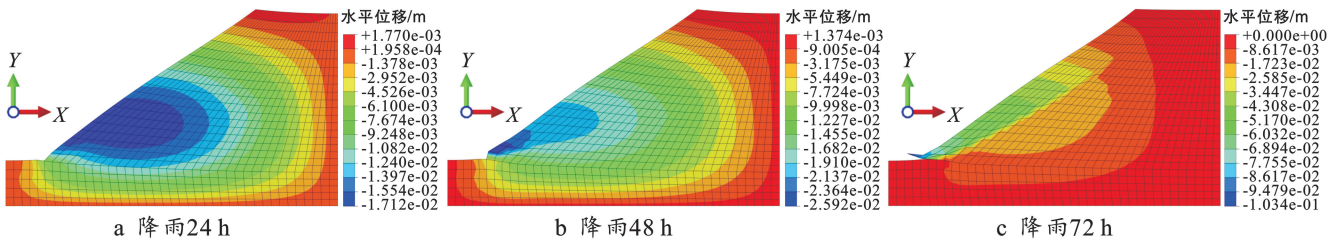


图 12 不同降雨时长斜坡水平方向位移

Fig.12 Slope horizontal displacement with different rainfall duration

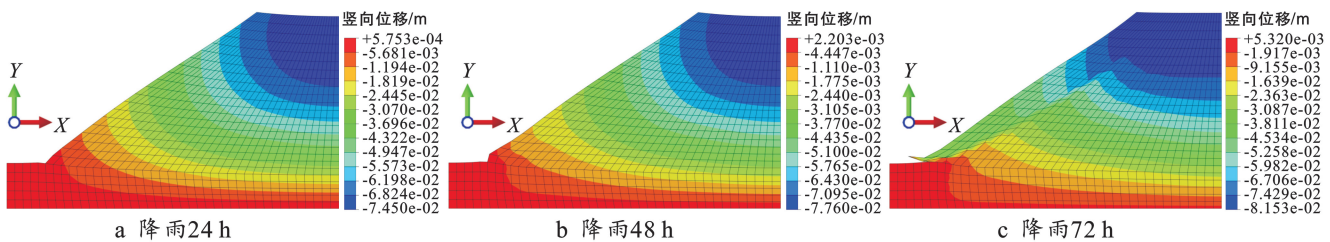


图 13 不同降雨时长斜坡竖直方向位移

Fig.13 Slope displacement in vertical direction with different rainfall duration

3.3.4 安全系数分析 由渗流场分析结果可知,降雨过程中土体强度随着孔隙水压力、基质吸力的改变呈下降趋势。通过有限元数值模拟得到不同降雨时长下斜坡的等效塑性应变云图(如图 14 所示)。结果表明,随着降雨时长增加,塑性区域首先出现在坡脚浅表层土体,并沿坡面斜向上、向内延伸,在浅层土体内逐渐形成接近贯通的圆弧形滑动面。降雨 72 h 后斜坡土层达到破坏临界状态,结合渗流场分析结果,推测在高强度降雨浸润影响下斜坡的运动形式还表现

为坡脚附近浅层土体发生变形,导致中上部土体失去支撑,坡脚浅层土体牵引中上部土体造成斜坡浅层失稳破坏。

按照引起滑坡的力学性质划分依据,南川东路 H7 滑坡还具有牵引式滑坡的特点。综合位移分析及等效塑性应变分析结果,发现南川东路 H7 滑坡为“牵引—推移”式复合型滑坡,运动模式为坡脚失稳牵引,中部变形滑移及顶部失稳推移。

斜坡坡脚内部的等效塑性应变随着时间的增大

而迅速增大,临界状态下等效塑性应变为等值线,通过强度折减法计算和监控点的位移拐点判断得出斜坡安全系数。由公式(6)–(7)计算并结合失稳判据得到降雨 0, 24, 48 和 72 h 的斜坡安全系数分别为 1.17, 1.06, 1.03 和 1.01。分析可知,降雨过程中安全系数从 1.17 下降至 1.01,降雨入渗 24 h 内安全系数迅速下降,斜坡处于基本稳定状态;24–48 h 安全系

数下降速率变慢,斜坡处于欠稳定状态;48–72 h 安全系数下降速率进一步变慢,于降雨 72 h 后达到最小值 1.01。结合表 2 的滑坡稳定状态划分标准,可判断模拟降雨 72 h 后南川东路 H7 滑坡处于“暂时稳定—变形”的欠稳定状态,威胁道路、建筑及居民安全,需重视潜在滑坡风险,雨季时定期进行调查监测,必要时适当加固其防治工程。

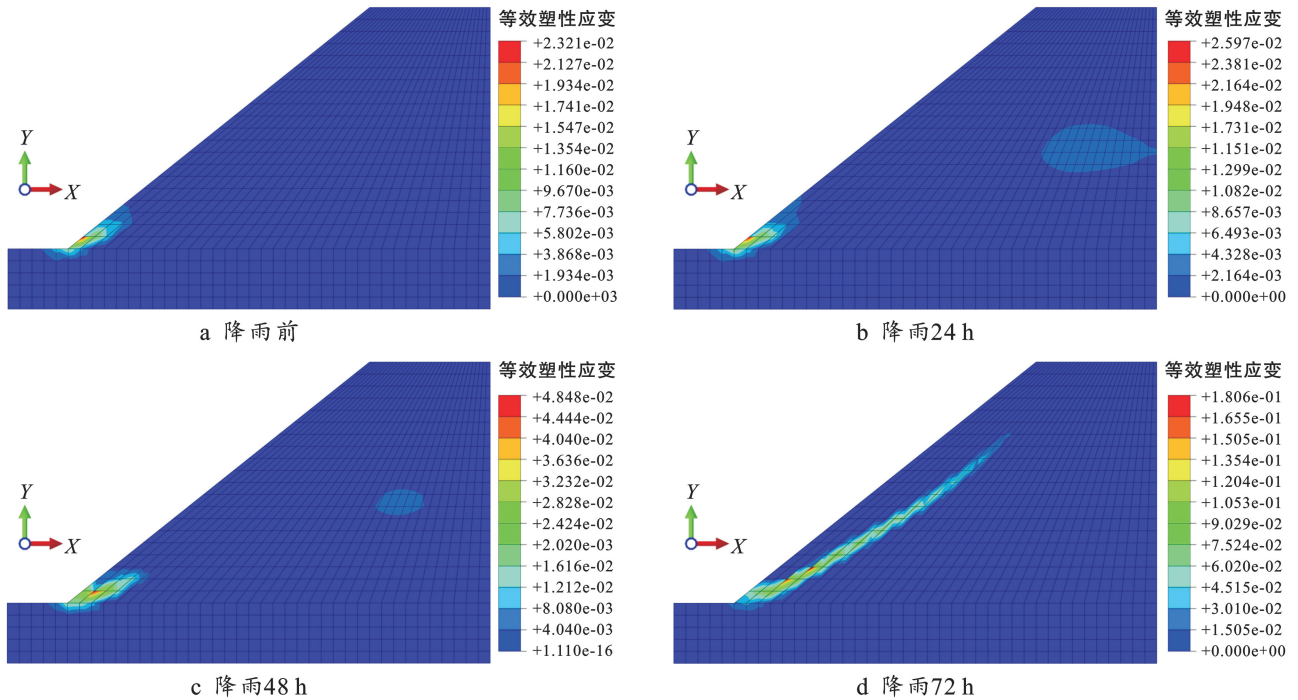


图 14 不同降雨时长斜坡等效塑性应变图

Fig.14 Equivalent plastic strain diagram of slope with different rainfall duration

4 讨论

将 GNSS、野外实地调查及倾斜摄影测量技术得到的土体位移与水力耦合数值模拟结果进行对比,发现整体变化趋势基本吻合,监测数据比数值模拟结果偏小,可能与挡土墙、抗滑桩等防治工程防护措施有关。对比相关研究成果^[13-15,28-29],发现在降雨型滑坡失稳问题研究中,通常将安全系数作为斜坡整体稳定性的评价指标,但安全系数无法详细描述降雨对斜坡稳定性的影响过程。因此,部分学者引入基质吸力、孔隙水压力、地下水位、饱和度等参数,从而分析斜坡失稳演化过程及局部稳定性。有限元数值模拟方法具有多物理场耦合作用效果准确和适应滑坡区地质环境强等优势,模拟降雨型滑坡失稳过程效果通常更好,其结合流固耦合原理及强度折减法,通常可以获取更全面的水力场耦合参数。因此本研究利用有限元数值模拟获取位移、安全系数与基质吸力、孔隙水压力等参数,将两类指标结合,更全面地分析降雨

对研究区滑坡的失稳影响和分析斜坡稳定性,如表 3 所示。

南川东路 H7 滑坡变形发育特征与降雨影响失稳机理方面,本研究结果与马还援^[21]、魏正发^[3]发育特征及形成机理结果进行对比,发现在滑坡发育特征方面,2023 年调查期间滑坡区变形特征比 2015, 2020 和 2021 年前人研究时稍有发育。滑坡区后缘堆积体明显变厚,后壁排水渠处新发育长约 10 m、宽约 30 cm 的张拉裂缝;坡面中部出现进一步局部蠕滑错动,新增部分张拉、剪切裂缝、孔洞;坡脚处垂向裂隙进一步发育。防治工程目前变形不明显、较为稳定,但上部崩塌危岩区分布较高,危害性较大,治理较少,且在 2021 年发生破坏,也说明该区域处于不稳定状态,应重视研究区地质灾害防治;在失稳机理方面,相较于前人现场调查定性分析研究,本研究利用“天一空一地”协同观测技术获取滑坡区资料,结合数值模拟定量分析,进一步说明降雨是南川东路滑坡失稳的最重要诱因。即降雨入渗后,斜坡渗流场与应力场相

互作用,地下水水位线上升、土体孔隙水压力、饱和度上升、基质吸力降低、抗剪强度减小,斜坡稳定性持续降低;同时,粉质黏土遇水发生软化,坡体强度进一步降低。因此,相关部门在雨季应定期调查监测滑坡体的变形特征和稳定性,重视潜在的滑坡风险,保障南川

东路居民的生命财产安全。尽管本研究考虑了基质吸力改变对土体渗透系数与有效应力、抗剪强度水力两类评价参数的影响,但是忽略了地表积水、土体沉降对土体孔隙率的影响,在未来研究中应关注以上未考虑因素对斜坡土体特性的影响。

表 3 研究区滑坡和斜坡稳定性参数和变化趋势

Table 3 Parameters and variation trends of landslide and slope stability in study area

评价参数	降雨历时				变化趋势	对稳定性影响
	0 h	24 h	48 h	72 h		
安全系数	1.17	1.06	1.03	1.01	逐渐降低,前 24 h 下降最快	显著下降
水平位移/cm	0	1.08	1.68	6.89	正相关,48~72 h 增大最快	下降
竖直位移/cm	0	4.32	4.43	5.98	正相关	下降
最大主应力/kPa	-8.92	-4.97	1.47	21.01	与土体埋深呈正相关	持续下降
最小主应力/kPa	-616.60	-616.40	-623.30	-630.70	与土体埋深呈正相关	下降
孔隙水压力/kPa	线性分布	42.04	58.91	72.31	逐渐增加	下降
地下水水位	—	—	—	—	逐渐上升	
饱和区	—	—	—	—	由初始水位线以下逐渐向坡脚处聚集,沿坡面发展	

注:负孔隙水压力表示基质吸力,两者存在负相关性,故降雨入渗过程中基质吸力逐渐降低,斜坡稳定性持续下降。

5 结论

(1) 南川东路 H7 滑坡属于“牵引—推移”式滑坡,运动模式为坡脚失稳牵引、中部变形滑移及顶部失稳推移。滑坡基本特征和变形特征受滑坡体失稳机制的控制,产生裂隙、裂缝及孔洞的关键因素为降雨入渗。

(2) 雨水入渗促使地下水水位线上升,斜坡浅层土体出现饱和区,逐步从坡脚沿坡面顺延,引发斜坡土体的基质吸力消散,有效应力降低,抗剪强度衰弱,导致斜坡整体下滑力增大,抗滑力减小,稳定性持续降低。

(3) 模拟降雨 72 h 后,滑坡坡脚处水平位移最大,为 6.89 cm,坡体上部竖向位移最大,为 5.98 cm;浅层土体内形成贯穿的圆弧形塑性滑动面,安全系数从 1.17 降至 1.01,此时斜坡处于“暂时稳定—变形”的欠稳定状态,威胁道路、建筑及居民安全,需要重视潜在的滑坡风险。建议雨季时应定期对南川东路滑坡灾害群进行连续监测。

(4) 降雨是南川东路浅层 H7 滑坡变形失稳的主要诱因,地形地貌、地质构造及人类工程活动是重要的孕灾环境,而“天—空—地”协同观测技术可为灾害调查与数值模拟提供高效的数据支撑。

参考文献 (References)

[1] 孙萍萍,张茂省,贾俊,等.中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J].西北地质,2022,55(3):96-107.
Sun Pingping, Zhang Maosheng, Jia Jun, et al. Geohazards research and investigation in the loess regions of Western China [J]. Northwest Geology, 2022, 55

(3):96-107.

- [2] 周保,魏刚,魏赛拉加,等.降雨对多年冻土区浅层滑坡失稳的影响研究[J].冰川冻土,2023,45(5):1564-1574.
Zhou Bao, Wei Gang, Wei Sailajia, et al. Study on influence of rainfall on active layer detachment failure in the permafrost region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(5):1564-1574.
- [3] 魏正发,应忠敏,王守兴,等.西宁市南川东路地质灾害形成机理及防治研究[J].青海大学学报,2022,40(5):89-97.
Wei Zhengfa, Ying Zhongmin, Wang Shouxing, et al. Study on the formation mechanism and prevention of geological disasters of Nanchuan East Road in Xining [J]. Journal of Qinghai University, 2022, 40(5):89-97.
- [4] 刘义,武选民,王兵虎,等.青海东部西宁盆地北缘红层滑坡成因机制与稳定性评价:以石板滩滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):34-41.
Liu Yi, Wu Xuanmin, Wang Binghu, et al. Formation mechanism and stability evaluation of a bedding landslide in red-bed strata in Xining north basin, Eastern Qinghai Province: A case study of Shibantan landslide [J]. the Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3):34-41.
- [5] 魏正发,张俊才,曹小岩,等.青海西宁南北山滑坡、崩塌成因及影响分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(4):47-55.
Wei Zhengfa, Zhang Juncai, Cao Xiaoyan, et al. Causes and influential factor analysis of landslides and rockfalls in north & south mountain areas of Xining City, Qinghai Province [J]. the Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4):47-55.
- [6] 吕文斌,耿海深,魏赛拉加.基于极限平衡法和 Midas/

- GTS的张家湾滑坡稳定性[J].科学技术与工程,2021,21(11):4369-4378.
- Lü Wenbin, Geng Haishen, Wei Sailajia. Stability of Zhangjiawan landslide based on limit equilibrium method and Midas/GTS [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(11): 4369-4378.
- [7] 赵东亮,兰措卓玛,侯光良,等.青海省河湟谷地地质灾害易发性评价[J].地质力学学报,2021,27(1):83-95.
- Zhao Dongliang, Lancuo Zhuoma, Hou Guangliang, et al. Assessment of geological disaster susceptibility in the Hehuang Valley of Qinghai Province [J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(1): 83-95.
- [8] 许强,朱星,李为乐,等.“天—空—地”协同滑坡监测技术进展[J].测绘学报,2022,51(7):1416-1436.
- Xu Qiang, Zhu Xing, Li Weile, et al. Technical progress of space-air-ground collaborative monitoring of landslide [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1416-1436.
- [9] 张晓伦,甘淑,袁希平,等.基于“天—空—地”一体化的东川区沙坝村滑坡体时序监测与分析[J].云南大学学报(自然科学版),2022,44(3):533-540.
- Zhang Xiaolun, Gan Shu, Yuan Xiping, et al. Integrated space-air-ground time series monitoring and analysis for Shaba landslide in Dongchuan District [J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2022, 44(3): 533-540.
- [10] 郭长宝,张永双,刘定涛,等.基于离心机模型试验的甘肃江顶崖古滑坡复活机理研究[J].工程地质学报,2022,30(1):164-176.
- Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Liu Dingtao, et al. Centrifuge model test of reactivation mechanism of Jiangdingya ancient landslide in Gansu Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1): 164-176.
- [11] 王力,南芳芸,王世梅,等.三峡库区降雨型滑坡入渗特征及变形机制:基于一维和二维模型试验研究[J].岩土力学,2023,44(5):1363-1374.
- Wang Li, Nan Fangyun, Wang Shimei, et al. Infiltration characteristics and deformation mechanism of rainfall-induced landslides in Three Gorges Reservoir area based on 1D and 2D model tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1363-1374.
- [12] 孟生勇,江兴元,杨义,等.降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J].水文地质工程地质,2023,50(1):104-112.
- Meng Shengyong, Jiang Xingyuan, Yang Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 104-112.
- [13] 崔亮,崔可锐.基于 ABAQUS 对降雨条件下非饱和土坡稳定性的研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(11):1560-1564.
- Cui Liang, Cui Kerui. Stability studies of unsaturated soil slope under rainfall conditions based on ABAQUS [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2012, 35(11): 1560-1564.
- [14] 王述红,何坚,杨天娇.考虑降雨入渗的边坡稳定性数值分析[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(8):1196-1200.
- Wang Shuhong, He Jian, Yang Tianjiao. Numerical analysis on stability of slope considering rainfall infiltration [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2018, 39(8): 1196-1200.
- [15] 徐晗,朱以文,蔡元奇,等.降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J].岩土力学,2005(12):1957-1962.
- Xu Han, Zhu Yiwen, Cai Yuanqi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(12): 1957-1962.
- [16] 张群,许强,甯娜.降雨条件下低缓浅层土质滑坡稳定性影响因素及耦合研究[J].水文地质工程地质,2014,41(5):90-94.
- Zhang Qun, Xu Qiang, Ning Na. A study of the stability influence factors and coupling for inclined-shallow soil landslides under the condition of rainfall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 90-94.
- [17] 谢强,田大浪,刘金辉,等.土质边坡的饱和—非饱和渗流分析及特殊应力修正[J].岩土力学,2019,40(3):879-892.
- Xie Qiang, Tian Dalang, Liu Jinhui, et al. Simulation of seepage flow on soil slope and special stress-correction technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 879-892.
- [18] Fredlund G D, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soil [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [19] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [20] 高冯,李小军,迟明杰.基于有限元强度折减法的单双面边坡稳定性分析[J].工程地质学报,2020,28(3):650-657.
- Gao Feng, Li Xiaojun, Chi Mingjie. Analysis of stability of single and double side soil slopes with FEM strength reduction method [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 650-657.
- [21] 马还援.西宁市南川东路滑坡地质灾害发育特征研究[J].中国西部科技,2015,14(6):44-45.
- Ma Huanyuan. Study on development characteristics of geological hazards of landslide in East Nanchuan Road, Xining City [J]. Science and Technology of West China, 2015, 14(6): 44-45.

- [22] 彭亮,杜文学,田浩.西宁市特大滑坡监测预警示范[J].科学技术与工程,2021,21(18):7806-7813.
Peng Liang, Du Wenxue, Tian Hao. Monitoring and early warning demonstration of huge landslide in Xining City [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18):7806-7813.
- [23] 费康,彭劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2017.
Fei Kang, Peng Jie. Application of ABAQUS in Geotechnical Engineering [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2017.
- [24] 杨玲.青海省西宁市南川东路滑坡稳定性分析与研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
Yang Ling. Analysis and research on East Road landslide stability of the Nanchuan in Xining City, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2014.
- [25] Mein G R, Larson L C. Modelling infiltration during a steady rain [J]. Water Resources Research, 1973, 9(2):384-393.
- [26] 中国国家标准化管理委员会.滑坡防治工程勘察规范:GB/T32864—2016.[S].北京:中国标准出版社,2016.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for Geological Investigator of Landslide Prevention: GB/T 32864—2016. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [27] 王占巍,赵发睿,谢文萃,等.青海省高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价[J].水土保持通报,2020,40(3):81-87.
Wang Zhanwei, Zhao Farui, Xie Wenping, et al. Formation condition analysis and stability evaluation of Gaojiawan landslide in Qinghai Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3):81-87.
- [28] 任东兴,薛鹏,叶飞,等.降雨入渗条件下黏性土基坑浅层边坡稳定性分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2022,49(2):204-212.
Ren Dongxing, Xue Peng, Ye Fei, et al. Shallow slope stability analysis of cohesive soil foundation pit under rainfall infiltration [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(2):204-212.
- [29] 洪心怡,刘志强,胡春洋,等.降雨入渗条件下双层非饱和土边坡渐进性破坏数值分析[J].自然灾害学报,2023,32(2):71-80.
Hong Xinyi, Liu Zhiqiang, Hu Chunyang, et al. Numerical analysis of progressive failure of double-layered unsaturated slope due to rainfall infiltration [J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(2):71-80.
- [7] 林孝松,郭跃.滑坡与降雨的耦合关系研究[J].灾害学,2001,16(2):88-93.
Lin Xiaosong, Guo Yue. A study on coupling relation between landslide and rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(2):88-93.
- [8] 谢守益,张年学,许兵.长江三峡库区典型滑坡降雨诱发的概率分析[J].工程地质学报,1995,12(2):60-69.
Xie Shouyi, Zhang Nianxue, Xu Bing. Probability analysis of precipitation-induced slide of typical landslides in Three Gorge area of the Yangtze River [J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 12(2):60-69.
- [9] 李晓,张年学,廖秋林,等.库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3714-3720.
Li Xiao, Zhang Nianxue, Liao Qiulin, et al. Analysis on hydrodynamic field influenced by combination of rainfall and reservoir level fluctuation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21):3714-3720.
- [10] 谢剑明,刘礼领,殷坤龙,等.浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J].地质科技情报,2003,22(4):101-105.
Xie Jianming, Liu Liling, Yin Kunlong, et al. Study on the threshold values of rainfall of landslide hazards for early-warning and prediction in Zhejiang Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(4):101-105.
- [11] 张勇,温智,程英建.四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J].水文地质工程地质,2020,47(2):178-182.
Zhang Yong, Wen Zhi, Cheng Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2):178-182.
- [12] 李长江,麻土华,孙乐玲,等.降雨型滑坡预报中计算前期有效降雨量的一种新方法[J].山地学报,2011,29(1):81-86.
Li Changjiang, Ma Tuhua, Sun Leling, et al. A new approach to calibrate antecedent precipitation for rainfall-triggering landslide forecast [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(1):81-86.
- [13] 王小龙.前期降雨及雨型对土质高边坡稳定性影响分析[J].山西交通科技,2017(3):16-18.
Wang Xiaolong. The analysis of the influence of antecedent rainfall and rainfall pattern on the stability of soil high slope [J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2017(3):16-18.

(上接第 222 页)