

降雨渗透作用下砂质边坡剪切特性研究

Shear Characteristics of Sandy Slopes under Rainfall Infiltration Effects

谭俊^{1,2}, 赵伟玲^{1,2}, 张正昊³, 太骄阳^{1,2}, 朱小龙^{1,2},
王志广^{1,2}, 吴斌⁴, 文学渊⁵

- (1. 河北省地质环境监测院, 石家庄 050021; 2. 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 石家庄 050021;
3. 河海大学 水利水电学院, 南京 210024; 4. 新藏铁路公司筹备组, 拉萨 850000;
5. 中铁三局集团第四工程有限公司, 北京 102300)

摘要: 为了研究降雨渗透作用对砂质边坡剪切特性的影响, 通过开展降雨作用下砂质边坡的模型试验, 研究了不同降雨强度下砂质边坡不同位置处在降雨全过程的竖向和水平位移变化规律。结果表明: 不同位置砂质边坡土体竖向位移在降雨全过程中表现出先快速后缓慢增加的趋势, 同一深度土体竖向位移大小关系为坡顶 > 坡底 > 坡中; 而各位置砂土体水平位移在降雨的不同阶段变化明显, 降雨初期坡顶位置处变化明显, 降雨中后期水平位移以坡中为主; 同一法向应力下峰值剪切应力和峰值剪切位移与含水率变化呈负相关, 含水率的增加使颗粒间的咬合作用降低, 含水率从 5% 增加至 30%, 内摩擦角从 34.4° 减小至 22.7°。直剪试验结果较好地验证了降雨渗透作用下砂质边坡的变形特性及失稳机理。

关键词: 降雨渗透; 模型试验; 边坡含水率; 剪切特性

中图分类号: TU391.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 04-0068-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.013

TAN Jun^{1,2}, ZHAO Weiling^{1,2}, ZHANG Zhenghao³, TAI Jiaoyang^{1,2}, ZHU Xiaolong^{1,2},
WANG Zhiguang^{1,2}, WU Bin⁴, WEN Xueyuan⁵

- (1. Hebei Environmental Geology Exploration Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang 050021, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;
4. Preparatory Group of Xinjiang-Tibet Railway Company, Lasa 850000, China; 5. China Railway No. 3 Engineering Group Fourth Engineering Co., Ltd., Beijing 102300, China)

Abstract: In order to study the influence of rainfall infiltration on the shear characteristics of sandy slopes, this paper conducted a model test of sandy slopes under rainfall to investigate the vertical and horizontal displacement variation laws of sandy slopes at different positions during the entire rainfall process under different rainfall intensifies. The results show that the vertical

作者简介: 谭俊 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 水文地质、工程地质、环境地质。

通信作者: 朱小龙 (1981—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水文地质、环境工程。

收稿日期: 2025-01-15

displacement of the soil on the sandy slope at different positions showed a trend of increasing rapidly at first and then slowly throughout the entire rainfall process. The relationship of the magnitude of the vertical displacement of the soil at the same depth was the top of the slope > the bottom of the slope > the middle of the slope; However, the horizontal displacement of the sandy soil at each position changed significantly at different stages of rainfall. The change was obvious at the top of the slope in the early stage of rainfall, and the horizontal displacement was mainly in the middle of the slope in the middle and later stages of rainfall; Under the same normal stress, the peak shear stress and peak shear displacement are negatively correlated with the change of moisture content. The increase of moisture content reduces the interlocking effect between particles. When the moisture content increases from 5% to 30%, the internal friction Angle decreases from 34.4° to 22.7° . The direct shear test results have well verified the deformation characteristics and instability mechanism of sandy slopes under rainfall infiltration.

Key words: rainfall infiltration; model test; slope water content; shear characteristics

0 引言

降雨是诱发边坡滑坡灾害的重要影响因素,雨水入渗会劣化边坡土体力学性质,降低边坡土体的剪切性能^[1-2]。而砂质边坡的渗透性较强,在降雨作用下极易引发滑坡工程灾害^[3-4],因此研究降雨渗透作用下砂质边坡的剪切特性具有重要工程意义。

目前学者们就降雨入渗对边坡稳定性的研究开展了大量的工作。江杰斌^[5]通过对降雨条件下边坡位移变形和抗剪强度参数两方面分析了降雨历时对边坡稳定性影响,结果表明降雨使土体抗剪强度参数明显降低。袁中夏等^[6]对不同含水量的黄土进行直剪试验,分析了黄土抗剪强度参数与含水量的关系,并揭示了含水量对黄土边坡稳定系数的影响作用。陈帅等^[7]通过降雨渗透物理模型试验,研究了不同降雨强度条件对边坡剪切力学参数、渗透系数及破坏模式的影响。丁天等^[8]通过有限元数值模拟分析了降雨强度和降雨类型对边坡渗流特性的影响,得出降雨强度与边坡安全稳定系数呈负相关,且峰值型降雨对边坡稳定性影响最大。刘付海^[9]通过开展一系列室内降雨入渗试验,分析得到泥岩边坡下降雨历时和降雨强度均与降雨入渗深度呈正相关。贾豫蓉等^[10]基于原位测试根据双渗透模型,研究了非饱和边坡在相对高吸力条件下土体体积含水率和孔隙压力变化特点,并得到了土体持水能力极限状态下的基质流临界排水曲线。而对于边坡剪切性能研究方面,刘洪波等^[11]通过图像采集技术分析了砂质边坡土体剪切变形破坏特点,揭示了边坡土体剪切带区域形成的机制及土压力特点。何飞等^[12]开展了降雨条件下黏土边坡现场剪切试验并对边坡侧向

变形进行监测,分析了边坡土体的剪应力-剪切位移关系曲线特点。刘志伟等^[13]通过开展不同含水率和干密度的花岗岩边坡直剪试验,得出高含水率下剪应力易发生剪切硬化,含水率越高抗剪强度和最大剪胀量越小。杨迪惠等^[14]利用离散元数值模拟软件建立了黏土边坡数值模型,得出黏土边坡剪应变与降雨强度变化呈正相关。魏锋等^[15]利用数值模拟方法分析得到了软土边坡滑坡时破坏位置及渗流特性的变化规律。可以看到,多数学者对多种土体在降雨条件下的边坡稳定性展开了研究,但目前对于降雨条件下砂土边坡的模型试验研究较少,对降雨渗透作用下砂土边坡的剪切性能研究也较为缺乏。

综上所述,以某砂土边坡为研究背景,结合当地水文条件,开展降雨渗透作用下砂土边坡相似模型试验,根据模型含水率测试结果及受力特点,开展不同含水率的砂土试件的恒定法向应力条件下的直剪试验,分析含水率对砂土抗剪强度参数的影响,为砂土边坡模型试验提供理论和数据支撑。

1 工程概况

工程地形起伏偏大,砂质边坡普遍呈现较陡的坡度,坡面由疏松的砂质土构成,砂粒粒径大小分布不均,整体稳固性较差。从地貌状态来看,边坡处在丘陵地带过渡地段,周围地形复杂,四周环绕低矮山丘,又有开阔的河谷,风化作用对边坡上部影响明显,表面砂土呈现松散状态。

当地气候属于温带大陆性气候类型,季节性降水对水文地质条件的影响较为显著,区内出现间歇性河流发育,雨季最大洪峰流量达 $2100 \text{ m}^3/\text{s}$,年度内地下水位变幅可达 10 m,年均降水量约 350 mm,

岩土力学

其中 70% 集中于 6~9 月，最大日降雨量达 160 mm，短时强降雨往往会引发坡面侵蚀。

2 降雨渗透砂质边坡相似模型试验

2.1 降雨系统及试验设计

降雨系统由进水系统、水箱、供水管道、支撑、进水口以及降雨盒所组成。试验开始前利用进水系统向水箱中注水，试验过程中借助管道里的水流来模拟降雨环境。设计了 2 组降雨强度的降雨试验，其中强降雨工况对应降雨量为 180 mm，弱降雨工况对应降雨量为 120 mm，降雨时间均设置为 2 h。

2.2 砂质边坡配制

通过相似模型试验模拟降雨渗透作用对砂质边坡的影响，模型由亚克力板制作而成，尺寸为 1.8 m × 1.0 m × 0.5 m。该模型底部设有排水洞方便雨水排出。选用某砂质边坡砂土，通过筛分试验得到该砂土的级配特征，如图 1 所示。不均匀系数 $C_u = 7.5$ ，曲率系数 $C_c = 1.25$ ，表明该砂土级配良好，颗粒分布较为均匀。利用烘干法测得砂土天然含水率为 5%，采用分层装填的方式进行砂土堆填，将各监测传感器埋入预设位置，并及时进行调试。砂质边坡坡角设置为 40°。

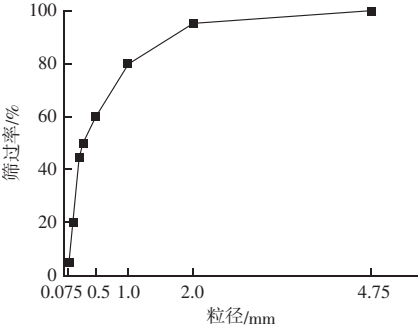


图 1 砂土级配曲线
Fig. 1 Grading curve of sandy soil

2.3 模型设计

对降雨过程中砂质边坡地表变形和含水率等参数进行监测，具体如下：在模型边坡坡顶、坡中以及坡底位置埋设应变采集仪及测斜仪器，深度分为 30 和 50 cm，测得不同深度土体竖向位移和水平位移，利用湿度传感器监测降雨过程中含水率的变化情况，各监测装置布置图如图 2 所示。

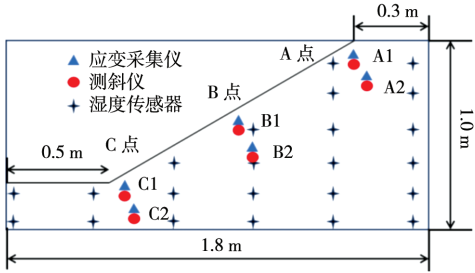


图 2 模型及监测装置布置示意图
Fig. 2 Schematic layout of the model and monitoring device

3 模型试验结果分析

3.1 边坡含水率分布

降雨结束后对砂质边坡某一剖面取样，进行含水率测定，根据各点含水率分布情况，拟合得出两种降雨强度下砂质边坡含水率变化云图，如图 3 所示。

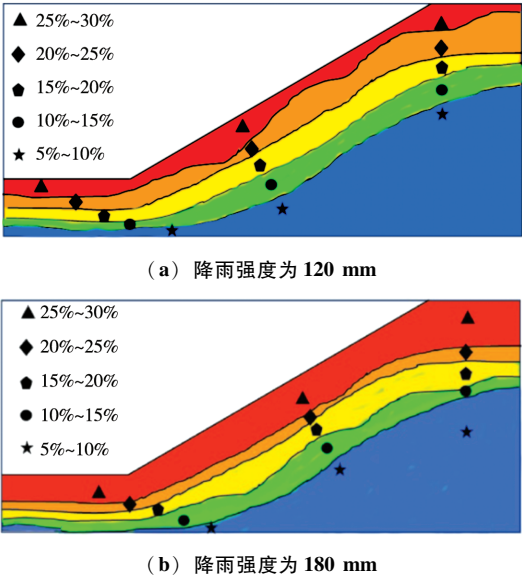


图 3 砂质边坡含水率变化云图
Fig. 3 Cloud map of water content change in sandy slopes

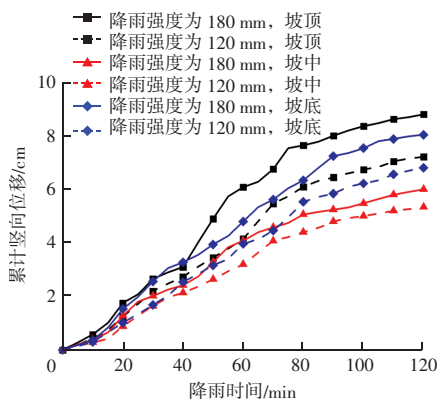
含水率分布区间位于 5%~30% 之间，对比可知，强降雨工况下（图 3（b））达到饱和含水率的砂土深度相比于弱降雨工况下（图 3（a））的明显增加，这是由于强降雨工况下降雨强度高于砂土入渗能力，雨水渗入量和渗入速度明显提升，砂土孔隙水压力增大进而影响了砂质边坡的渗流能力。

3.2 边坡位移监测

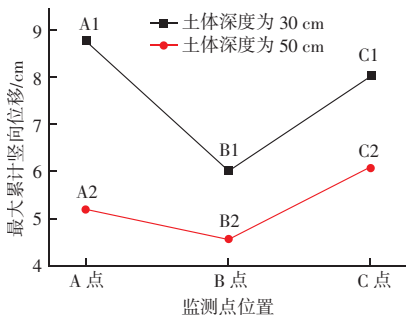
3.2.1 竖向位移

两种降雨强度下竖向监测结果如图 4 所示，各监测点竖向位移均随降雨时间进程表现出先快速后缓

慢增加的趋势。降雨初期雨水渗入砂土, 引起表面砂土轻微沉陷, A1 点处累计竖向位移缓慢增加, 随着降雨的继续, 降雨强度超过雨水渗入速度, 坡顶处雨水积蓄导致土体自重应力增加, 累计竖向变形速率加快。通过观察边坡的宏观变形破坏得到, 降雨开始 47 min 时坡顶处发生破坏, 图中观察发现 40~60 min 阶段土体竖向变形速率规律加剧, 随着降雨时间的继续增加, 砂土颗粒结构调整后重新达成平衡状态, 土体累计竖向变形增加缓慢。



(a) 降雨过程中各点累计竖向位移变化



(b) 各测点最大累计竖向位移图

图 4 不同位置土体降雨全程累计竖向位移变化图

Fig. 4 Variation of cumulative vertical displacement of soil at different locations over the whole rainfall period

与强降雨工况相比, 弱降雨工况下边坡坡顶在降雨开始 64 min 时才出现失稳, 观察到 60~80 min 阶段坡顶土体竖向变形速率加剧。对比同一深度土体监测点的竖向位移发现, 存在坡顶 > 坡底 > 坡中的大小关系, 这是由于边坡顶部由于自重应力较小, 且受到降雨作用时, 土体孔隙水压力快速上升而有效应力逐渐下降, 导致土体抗剪强度明显下降, 产生剧烈的滑移现象。此外, 对比两种降雨强度竖向位移图发现, 各监测点竖向位移随降雨强度的增大而增加, 并且降雨强度大的工况砂质边坡变形速率

和变形量均明显增加, 坡顶位置处砂土在更短时间内达到饱和状态, 在有效应力迅速减小和自重应力增加的耦合作用下剪切变形加速, 竖向变形相对明显。

不同位置及不同深度监测点处位移变化差异显著。具体来看 (图 4 (b)), 降雨强度为 180 mm 时, 对于坡顶位置, A1 监测点距离边坡表层更近, 其变形程度较 A2 监测点增加明显, A1 监测点处最大竖向位移达到 8.8 cm, 为 A2 监测点出的 1.22 倍。

3.2.2 水平位移

两种降雨强度下, 不同土体位置的监测点处水平位移随降雨时间变化规律如图 5 所示。降雨初期, 同一深度砂土在不同边坡位置处水平位移大小关系有坡顶 > 坡中 > 坡底, 这是由于雨水首先渗透到坡顶附近的浅层非饱和土体, 引发基质吸力迅速丧失, 土体抵抗剪切的强度下降, 引发坡顶明显的拉张变形。而坡中由于雨水下渗的滞后性, 且剪应力尚未充分发展, 位移响应的速度偏慢, 随着降雨持续增加, 水平位移大小关系变成坡中 > 坡顶 > 坡底, 这是由于渗流作用和坡顶砂土的滑移联合作用下, 坡中位置处土体自重应力上升, 引起剪切变形增强, 促使水平位移迅速上升且超越坡顶, 成为造成边坡失稳的主要区域。

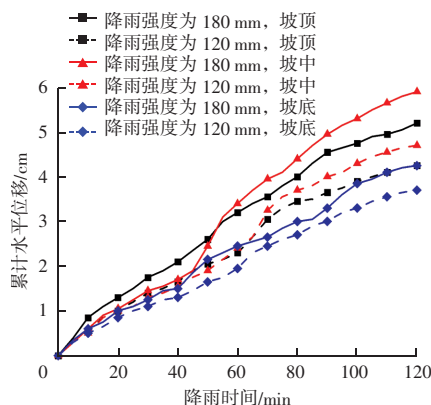


图 5 不同位置土体降雨全程累计水平位移变化

Fig. 5 Changes in cumulative horizontal displacements of soils at different locations throughout a rainfall event

4 砂土试件直剪试验

4.1 试验原理及方案

分析坡面处砂土的受力状态, 得出砂土在承受上部土层自重所提供的法向应力下, 土层错动所引起的剪切作用使砂质边坡失稳破坏加剧。依据此,

岩土力学

对该工况下单元体力学模型进行简化概括,力学模型和基本原理如图6所示。

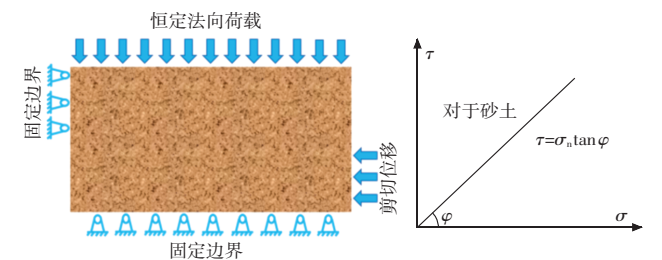


图6 直剪试验力学模型及基本原理

Fig. 6 Mechanical model and basic principle of straight shear test

以低速率进行慢剪模拟砂土剪切过程,通过探究不同含水率及不同法向应力下砂土剪切力学特性变化规律,以探究降雨渗透作用对砂质边坡剪切特性的影响。法向应力分别设置为100、200、300 kPa,含水率分别取5%、10%、20%、30%。

4.2 试验结果分析

4.2.1 剪应力-剪切位移曲线

法向应力 σ_n 为200 kPa下不同含水率砂土试件的直剪试验曲线,如图7所示。

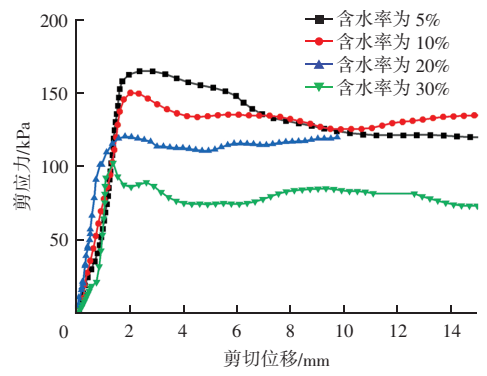


图7 不同含水率砂土试件直剪试验曲线

Fig. 7 Direct shear test curves of sand soil samples with different water contents

以含水率为10%的工况为例,由于法向应力的压实作用,砂土试件在剪切初期压密阶段并不明显,并快速进入弹性变形阶段,剪应力随着剪切位移的增多呈线性增加趋势。第三阶段为试件的损伤破坏阶段,此阶段试件的剪应力-剪切位移曲线斜率逐渐减小,内部损伤逐渐加剧,裂纹开始形成并贯通。随着剪切位移的继续增加,剪应力逐渐达到峰值。峰后阶段由于滑动摩擦力的影响仍具有一定的剪切承载力,剪应力逐渐维持在特定值范围。

不同法向应力下砂土试件含水率为10%的直剪

试验曲线如图8所示。观察可知,剪切应力-剪切位移曲线随法向应力的增加整体上移,这是由于法向应力的增加使砂土试件间的咬合力增加,增强了其抗剪性能。此外,法向应力的增加使砂土试件处于剪切压密阶段的时间大大缩减,曲线上凹部分明显减少。

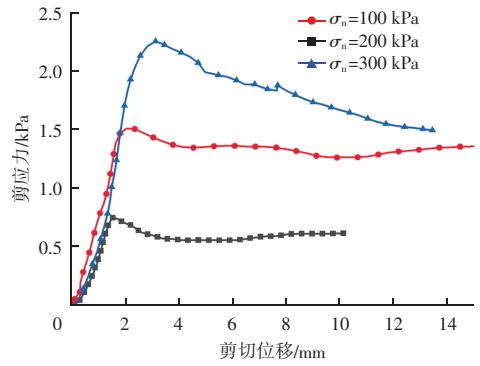


图8 不同法向应力下砂土试件直剪试验曲线

Fig. 8 Direct shear test curves of sand soil specimens under different normal stresses

4.2.2 抗剪强度参数变化

图9为 $\sigma_n = 200$ kPa时不同含水率的峰值剪切力与峰值剪切位移变化曲线。含水率为5%的砂土峰值抗剪强度达164.7 kPa,峰值剪切位移为2.378 mm;而含水率为30%的砂土峰值抗剪强度仅为102.5 kPa,峰值剪切位移为1.41 mm,相比于含水率为5%砂土分别降低了37.8%和40.7%。这是由于砂土的黏聚力较小,其抗剪性能主要由内摩擦角决定,而含水率的增加使砂土间摩擦系数降低,剪切强度也随之下降。此外,含水率的增加使砂土间的孔隙水压力增加,而有效应力随之减小,从而影响了砂土的剪切性能。

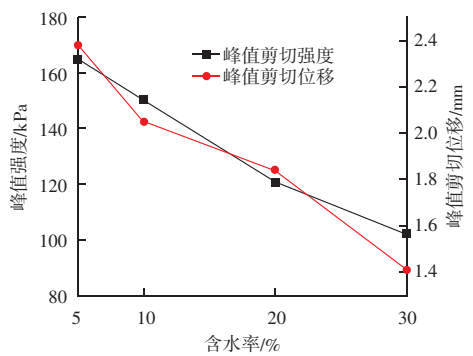
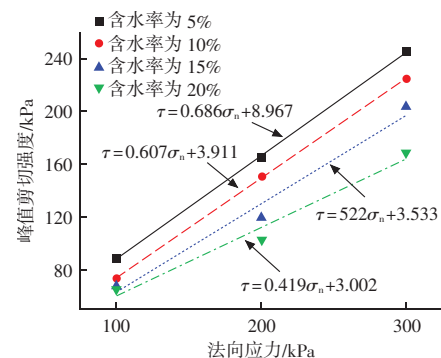


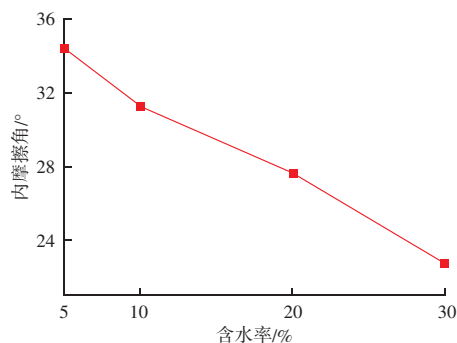
图9 $\sigma_n = 200$ kPa下不同含水率峰值剪切参数

Fig. 9 Peak shear parameters for different water contents at $\sigma_n = 200$ kPa

图 10 (a) 总结了不同法向应力和不同含水率的直剪试验下各工况峰值剪切强度变化情况。对任一法向应力下, 峰值剪切强度与含水率呈负相关。通过对不同含水率砂土试件在不同法向应力的剪切峰值强度进行拟合发现, 其拟合关系式高度符合一次线性方程, 即满足库仑抗剪强度线, 由此得到不同含水率砂土试件的内摩擦角参数, 如图 10 (b) 所示。内摩擦角随含水率的增加明显减小, 由含水率为 5% 对应的 34.4° 降低至含水率为 30% 所对应的 22.7° , 降低了 34.01%, 这是因为水分多造成颗粒间的咬合作用变弱, 水的润滑作用降低了颗粒相互间的摩擦阻力, 内摩擦角减小会引起砂质边坡稳定性降低, 降雨强度大时边坡在自重与外力作用下更易产生剪切破坏。



(a) 抗剪参数拟合曲线



(b) 内摩擦角

图 10 不同含水率砂土试件抗剪强度参数变化

Fig. 10 Variation of shear strength parameters of sandy soil specimens with different water contents

5 结论

通过开展降雨渗透作用下砂土边坡相似模型试验, 研究了降雨作用下砂土变形规律及含水率分布结果, 然后通过砂土小尺寸单元直剪试验, 分析了

含水率对砂土抗剪性能的影响, 得到以下主要结论:

(1) 砂土边坡土体累计竖向位移随降雨进程呈先快速后缓慢增加的变化规律, 最大竖向位移大小存在坡顶 > 坡底 > 坡中, 而累计水平位移初期由坡顶为主, 后期转为坡中位置。

(2) 降雨强度的增加使边坡土体竖向和水平位移加剧, 同一深度土体在强降雨工况 (降雨量为 180 mm) 的累计竖向位移为弱降雨工况 (降雨量为 120 mm) 的 1.12 ~ 1.22 倍, 且坡顶位置失稳出现时间提前 17 min 左右。

(3) 直剪试验结果表明, 砂土抗剪强度参数随含水率增加明显降低, $\sigma_n = 200$ kPa 下含水率从 5% 增加至 30%, 内摩擦角降低了 34.01%, 这说明水的润滑作用削弱了颗粒间摩擦力和咬合效应, 同时孔隙水压力增加导致有效应力减小使得抗剪强度降低。

参 考 文 献

- [1] 李学华. 边坡稳定性分析中的降雨入渗效应研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025 (5): 106-108.
- [2] 陈佳, 董世勇, 王永甫, 等. 某水库岩质高切坡在降雨及施工条件下的稳定性及破坏规律研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 29-35.
- [3] 程昌明, 陈行, 田明杰, 等. 降雨入渗对砂质边坡变形和稳定性的影响 [J]. 金属矿山, 2015 (5): 175-180.
- [4] 冯威雄. 降雨入渗作用下的边坡稳定性数值模拟研究 [J]. 西部交通科技, 2024 (1): 12-15, 33.
- [5] 江杰斌. 降雨渗透下岩土边坡稳定性评价及勘察技术分析 [J]. 江西建材, 2025 (2): 190-192, 196.
- [6] 袁中夏, 赵未超, 叶帅华, 等. 含水量对黄土边坡稳定性的影响 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30 (3): 37-43.
- [7] 陈帅, 王永奇, 何玉琼, 等. 人工堆积体相似材料与物理模型试验研究 [J/OL]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 1-7 [2025-06-25].
- [8] 丁天, 裴晓峰, 孙虎, 等. 降雨入渗对地下综合管廊基坑边坡的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 18-22.
- [9] 刘付海. 强降雨条件下易崩解泥岩边坡失稳机理研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (4): 37-41.
- [10] 贾豫蓉, 邵云海, 李育红. 非饱和土边坡在相对高吸力条件下与降雨相关的渗透行为特征 [J]. 勘察科学技术, 2024 (3): 1-7, 27.
- [11] 刘洪波, 李水江, 叶永康, 等. 边坡土体变形和剪切带形成机制室内试验与数值模拟研究 [J]. 广东土木与建筑, 2021, 28 (8): 47-52.

表 3 滑坡变形的 MF-DFA 分析结果

阶数 q	ZG1	ZG2	ZG3	ZG4
-8	0.961	0.933	0.952	0.927
-6	0.924	0.894	0.913	0.880
-4	0.843	0.818	0.837	0.811
-2	0.778	0.736	0.767	0.726
0	0.685	0.666	0.677	0.635
2	0.614	0.586	0.601	0.569
4	0.573	0.552	0.564	0.544
6	0.531	0.512	0.529	0.497
8	0.493	0.488	0.485	0.467

4 结论

通过对顺层深层岩质古滑坡肇灾演化流程分析及稳定性评价，主要得出如下结论：

（1）古滑坡肇灾影响因素较多，其复活是在内、外两类营力作用下耦合促成，其中，肇灾内部因素是古滑坡复活的固有因素，肇灾外部因素是古滑坡复活的诱发因素。

（2）在监测时段内，滑坡变形具持续增加趋势，其变形速率虽具波动特征，但波动规律性较强；各监测点现阶段均处于稳定状态，但随着时间持续，其稳定程度逐步减弱，滑坡变形仍会进一步增加，稳定性后续趋于不利方向发展。

参 考 文 献

[1] 张富灵. 库水及降雨作用下滑移-弯曲型滑坡形成条件与演化机制研究 [D]. 宜昌：三峡大学，2021.

[2] 田倩，吴健，赵东. 基于神经网络和多标度特征分析的古滑坡变形预测及趋势评价 [J]. 大地测量与地球动力学，2022，42

(10)：1056-1062.

[3] 谭琳，刘芳. 水合物开采中深海古滑坡体的再启滑机制初探 [J]. 工程地质学报，2021，29（6）：1907-1915.

[4] 卫童瑶，殷跃平，高杨，等. 三峡库区巫山县塔坪 H1 滑坡变形机制 [J]. 水文地质工程地质，2020，47（4）：73-81.

[5] 何坤，胡卸文，马国涛，等. 四川省盐源玻璃村特大型玄武岩古滑坡复活机制 [J]. 岩土力学，2020，41（10）：3443-3455.

[6] 黄达，匡希彬，罗世林. 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究 [J]. 水文地质工程地质，2019，46（5）：127-135.

[7] 丁保艳，翟向华，张卫雄，等. 大型高位堆积体滑坡稳定性分析与数值模拟 [J]. 地震工程学报，2022，44（4）：786-793，802.

[8] 宁波，刘玉健，王安东. 巨型古滑坡的稳定性评价及发展趋势分析 [J]. 大地测量与地球动力学，2022，42（5）：515-519.

[9] 赵淑敏. 基于信息分解条件的滑坡变形预测 [J]. 水土保持通报，2021，41（3）：181-186.

[10] 王晨辉，赵贻玖，郭伟，等. 滑坡位移 EEMD-SVR 预测模型 [J]. 测绘学报，2022，51（10）：2196-2204.

[11] 付智勇，陈文强，唐伟雄，等. 基于 CEEMD-RF 模型的渣土边坡地下水埋深预测 [J]. 人民长江，2020，51（1）：141-148.

[12] 熊春宝，王猛，于丽娜. 桥梁 GNSS-RTK 变形监测数据的多滤波联合去噪处理 [J]. 测绘通报，2020（7）：93-96，142.

[13] 邓小鹏. 基于信息分解的滑坡变形稳定性评价及预警分析 [J]. 人民长江，2021，52（5）：101-107.

[14] 田成成，张盛生，张磊，等. 基于尖点突变理论及非趋势波动分析的滑坡稳定性及变形特征研究 [J]. 大地测量与地球动力学，2018，38（8）：806-810.

[15] 常瑶. 基于尖点突变理论和 MF-DFA 法的隧道大变形监测 [J]. 人民长江，2019，50（1）：118-123.

（上接第 73 页）

[12] 何飞，穆锐，韩力，等. 降雨作用下红黏土边坡的变形及现场剪切试验研究 [J/OL]. 水利水电技术（中英文），1-13 [2025-06-25].

[13] 刘志伟，丁波涛，梁崇旭. 含水率对花岗岩边坡风化层界面剪切特性的影响 [J]. 华南地震，2021，41（4）：115-120.

[14] 杨迪惠，李建华. 降雨入渗条件下非饱和黏土边坡稳定性分析 [J]. 四川地质学报，2017，37（3）：475-477，481.

[15] 魏锋，赵玉成，王朋. 渗流影响下边坡稳定性与破坏性研究 [J]. 煤炭技术，2017，36（1）：168-169.