

高海拔山区高陡加筋路堤边坡变形监测与分析研究

张庆斌¹, 陈 榕^{2,3}, 郝冬雪^{2,3*}, 朱根深⁴, 马跃原⁴, 拜 杰^{5,6,7}

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²东北电力大学岩土工程研究所, 吉林 吉林

³东北电力大学吉林省电力基础设施安全评估与灾害防治重点实验室, 吉林 吉林

⁴中交一航局第五工程有限公司, 河北 秦皇岛

⁵新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 新疆 乌鲁木齐

⁶新疆高寒高海拔山区交通基础设施安全与健康重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

⁷新疆维吾尔自治区山地交通基础设施灾害防治技术工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年11月9日; 录用日期: 2025年11月30日; 发布日期: 2025年12月17日

摘 要

为评估新疆高海拔山区高陡加筋路堤在季节性冻融环境下的稳定性, 本研究依托G0711乌鲁木齐至尉犁段高速公路K24+270~K24+928高陡填方路堤(最大坡高28.06 m), 采用深孔位移监测与坡面全站仪立体监测网相结合的方法, 系统分析揭示了边坡变形动态规律。监测结果表明: (1) 边坡变形具有显著深度差异性, 10 m深度处单日位移峰值达15.68 mm; 路肩区则以22~24 m深层固结变形为主(最大变形1.10 mm); (2) 6~10 m浅层与10~14 m中层为位移集中带, 占监测剖面总变形量的35%~40%, 是潜在滑移面发育区; (3) 降雨事件(如5月21日)显著加剧局部变形, K24+410~K24+470段单次沉降量突增37.9 mm, 位移速率由0.71 mm/d骤增至10.27 mm/d; (4) 防护结构有效改善了坡体应力分布状态, 土压力数据表明, 防护结构施作后坡体应力状态迅速趋于稳定, 整体边坡位移时态曲线呈收敛趋势, 深层未形成贯通性滑移面。研究表明, 当前防护方案可维持边坡稳定, 但极端工况下局部仍存在失稳风险, 建议运营期加密雨季监测并强化变形集中带预警。

关键词

高陡边坡, 边坡监测, 深孔位移监测, 高海拔山区

*通讯作者。

Experimental Study on Deformation Monitoring and Analysis of High and Steep Reinforced Embankment Slopes in High-Altitude Mountainous Areas

Qingbin Zhang¹, Rong Chen^{2,3}, Dongxue Hao^{2,3*}, Genshen Zhu⁴, Yueyuan Ma⁴, Jie Bai^{5,6,7}

¹School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Institute of Geotechnical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin

³Key Lab of Electric Power Infrastructure Safety Assessment and Disaster Prevention of Jilin Province, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin

⁴CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Fifth Engineering Co., Ltd., Qinhuangdao Hebei

⁵Xinjiang Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

⁶Xinjiang Key Laboratory for Safety and Health of Transportation Infrastructure in Alpine and High-Altitude Mountainous Areas, Urumqi Xinjiang

⁷Xinjiang Engineering Research Center for Disaster Prevention and Control Technology of Mountain Transportation Infrastructure, Urumqi Xinjiang

Received: November 9, 2025; accepted: November 30, 2025; published: December 17, 2025

Abstract

To evaluate the stability of high and steep reinforced embankment slopes in seasonal freeze-thaw environments within Xinjiang's high-altitude mountainous areas, this study employed a combined method of deep-hole displacement monitoring and a slope-surface total station stereoscopic monitoring network. The research was conducted on the high-steep fill embankment at sections K24 + 270~K24 + 928 of the G0711 Urumqi-Yuli Expressway (maximum slope height: 28.06 m). The study systematically analyzed and revealed the dynamic deformation patterns of the slope. Monitoring results indicate: (1) Slope deformation exhibits significant depth-dependent variation, with a peak daily displacement of 15.68 mm observed at a depth of 10 m; deformation in the shoulder area is primarily deep consolidation at 22~24 m depth (maximum deformation: 1.10 mm). (2) The 6~10 m shallow layer and 10~14 m middle layer constitute displacement concentration zones, accounting for 35%~40% of the total deformation within the monitored profile, and represent potential sliding surface development areas. (3) Rainfall events (e.g., May 21st) significantly exacerbated localized deformation; a single settlement surge of 37.9 mm occurred in section K24 + 410~K24 + 470, with the displacement rate sharply increasing from 0.71 mm/d to 10.27 mm/d. (4) The protective structure effectively improved the stress distribution state within the slope body. Earth pressure data show that the slope stress state rapidly stabilized after the protective structure was implemented, the overall slope displacement-time curve exhibited a convergent trend, and no continuous deep sliding surface formed. The study demonstrates that the current protection scheme can maintain slope stability, but local instability risks persist under extreme conditions. It is recommended to intensify monitoring during the rainy season in the operational phase and enhance early warning for deformation concentration zones.

Keywords

High-Steep Slope, Slope Monitoring, Deep-Hole Displacement Monitoring, High-Altitude

Mountainous Area

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高海拔山区复杂地质环境下的高陡填方路堤建设是国家重大交通工程的关键技术挑战之一[1]，其稳定性直接关系到工程安全、运营效率及区域社会经济发展。此类工程常面临地形陡峭、地质构造复杂、岩土体力学性质多变、水文条件特殊以及施工扰动等不利因素叠加作用，极易诱发边坡失稳灾害，如浅层滑动、深层蠕变乃至大规模滑坡，不仅造成巨大经济损失，更严重威胁生命财产安全。特别是对于采用加筋技术处理的高陡路堤，其内部应力应变响应机制、筋土相互作用效能以及外部环境(如降雨、冻融)影响下的长期变形规律，仍需基于精细监测数据进行深入揭示与验证。因此，发展系统、精准的变形监测技术，实时捕捉边坡从深部到表面的动态响应，科学评估其稳定性演化过程及防护措施有效性，对保障工程安全、优化设计理论、指导风险防控具有重要的理论价值和实践意义[2]。

当前，边坡稳定性监测技术呈现多元化发展[3]，涵盖地质巡查、简易测量、深部位移监测(如测斜仪、多点位移计)、地表位移监测(如全站仪、GPS、InSAR、无人机摄影测量)以及应力应变监测等多种手段。然而，在高陡加筋路堤这一特定场景下，仍存在显著挑战：一方面，深部潜在滑移面(特别是多层滑面)的精确定位与变形特征捕捉[4]，传统单点监测方法往往存在盲区或精度不足[5]；另一方面，施工期重型机械作业产生的剧烈扰动对浅层变形的瞬时影响，以及降雨入渗引发的快速水-力耦合效应，要求监测系统具备高频响应与空间全覆盖能力[6]。现有研究虽在单一技术应用或特定工况分析方面取得进展，但在融合深孔精细化位移监测与坡面大范围立体位移监测网络[7][8]，系统分析高陡加筋路堤在施工扰动、固结沉降及极端气候等多因素耦合作用下的时空变形分异规律方面，仍缺乏深入系统的工程实践与理论总结[9]-[11]。

本研究基于 G0711 乌鲁木齐至尉犁段高速公路(国家南北疆交通干线及国防要道) WYTJ-1 标段 K24+270~K24+928 段高陡加筋路堤(最大坡高 28.06 m)。针对该路段地质条件复杂、填方高度大、稳定性风险突出的特点，创新性地构建了“深孔位移钻孔监测”与“坡面全站仪立体监测网”相结合的综合监测体系。旨在通过高精度、多维度、全过程的实时监测数据，实现以下核心目标：(1) 系统揭示高陡加筋路堤在不同施工阶段(特别是填土扰动期)、不同空间位置(中央分隔带、路肩)及不同深度(浅层、中层、深层)的变形动态演化特征与主导机制；(2) 定量评估强降雨等极端环境事件对边坡局部变形加速及潜在失稳风险的触发效应；(3) 科学验证所采用防护结构(加筋技术)对改善坡体应力分布状态、控制变形发展的实际效果；(4) 基于监测数据综合判据，客观评价边坡整体及局部稳定性状态，识别关键风险区域与变形集中带，为后续工程安全运营、优化防护措施及建立预警机制提供坚实的科学依据。本研究的成果预期将为类似复杂环境下的高陡路基工程设计、施工与长期安全维护提供重要的理论参考和实践指导。

2. 工程概况

G0711 乌鲁木齐至尉犁段高速公路(以下简称本项目)是国家高速公路 G0711 乌鲁木齐至若羌的组成部分，是自治区交通运输十三五规划“6678”工程“六横六纵”高速、高等级公路网中“第3纵”的重要组成部分，作为新疆跨越天山连接南北疆的交通干线，是南北资源通道和国防通道，在区域路网中占

有重要地位。其中 K24 + 270~K24 + 928 段长 658 m，边坡最低高度为 8.92 m，最大高度为 28.06 m。

3. 高边坡稳定性监测方案

3.1. 监测方法

在地下深部位移变形监测中，目前有人工测斜法、固定测斜法、振弦式多点位移计、柔性监测绳和多点位移计监测法。本工程采用多点深部位移钻孔监测法，用 $\phi 30\sim 35$ mm 钻头打孔，钻孔内不同深度安装多根直径 5 mm 金属软管(内 0.8 mm 的不锈钢丝)，根据监测深度准备多根带不锈钢丝绳的软管，埋入地下一头用镀锌锚头固定，另一头全部集中并排一起并编号，塑钢软管按 1~2 m 间隔分段，断开处用胶带包好见图 1 所示：

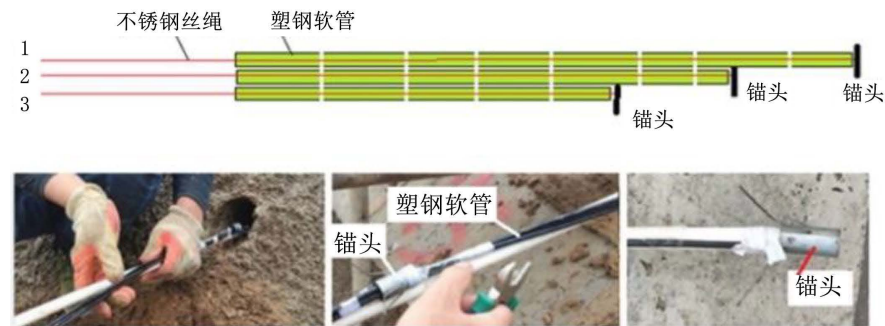


Figure 1. Installation of monitoring lines
图 1. 监测侧线安装图片

见图 2，全部测线引出地面分别与各位移传感器连接，通过遥测终端将位移变形实时采集、处理、报警、传输。在位移测线埋入地下时，如果有需要还可把孔隙水压力计埋入到指定位置，与位移一起监测。

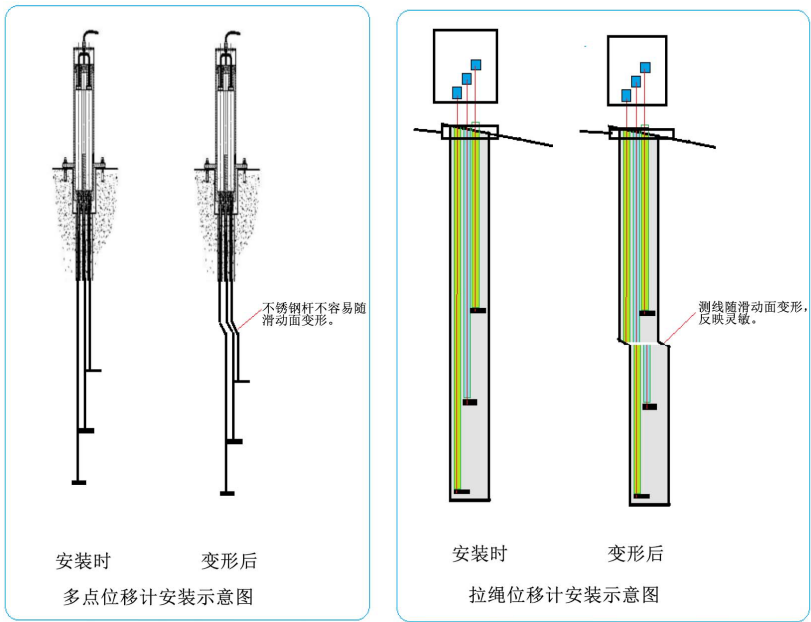


Figure 2. Schematic diagram of deep displacement monitoring
图 2. 深部位移监测示意图

优点:

- (1) 不需要知道滑动深度部位, 只要钻孔深度超过滑动面就行;
- (2) 采用塑钢软管作保护管, 可以随着错动面一起变形, 响应精度可达到毫米级;
- (3) 量程一般为 0~1 m, 采用多预警不锈钢钢丝绳可以扩大到 2~5 m;
- (4) 使用维护方便: 传感器安装在地面的保护箱中, 便于维护和回收;
- (5) 对于较深的钻孔, 可采用多预留测线方式, 通过分析测量数据换接测线, 以较精确的确定滑面位置。

多点深部位移钻孔监测法相比其他多种深部多点变形监测设备相比, 具有测量范围大, 可监测更大的边坡变形, 适用范围大, 反应更灵敏, 钻孔要求小, 成本低, 安装简单, 输出线缆少, 可直接读出位移等优点。

3.2. 监测方案设计与实施

见图 3, 针对高陡加筋路堤稳定性监测中需同时捕捉深部精细变形机制与坡面大范围动态响应的双重需求, 本研究采用了深孔位移监测与坡面全站仪立体监测网相结合的综合方案。深孔位移监测(如多点位移计)的核心优势在于其能够精准定位和量化不同深度(尤其是潜在滑移面所在的中深层)岩土体的相对位移。其内置的多点传感器可沿钻孔轴向连续或分段监测, 毫米级的高精度响应能力使其能够有效识别如 6~14 m 深度区间这类位移集中带和潜在滑移面的发育动态(如监测到的单日峰值位移 15.68 mm), 并辨析深层固结变形(如 22~24 m 处)的特征, 为理解边坡内部变形机制提供关键数据。而坡面全站仪立体监测网则通过在地表关键位置(如坡顶、平台、坡脚)布设密集测点, 利用高精度全站仪进行周期性或连续的三维坐标测量, 实现了对坡体表面大范围沉降、水平位移及其空间分布格局的全方位、高效率捕捉。这对于监测由外部因素(如强降雨)触发的快速、大面积坡面变形(如 K24 + 410~K24 + 470 段雨后单次沉降突增 37.9 mm, 位移速率剧增至 10.27 mm/d)以及识别局部异常区域(如雨后回弹)至关重要。二者结合, 深孔监测“由内而外”揭示变形根源与深度差异, 坡面监测“由表及里”掌控整体变形场与灾害先兆, 共同构成了一个从微观机理到宏观响应的立体化监测体系, 克服了单一方法的局限性, 为全面评价边坡稳定性和防护效果提供了坚实的数据基础。

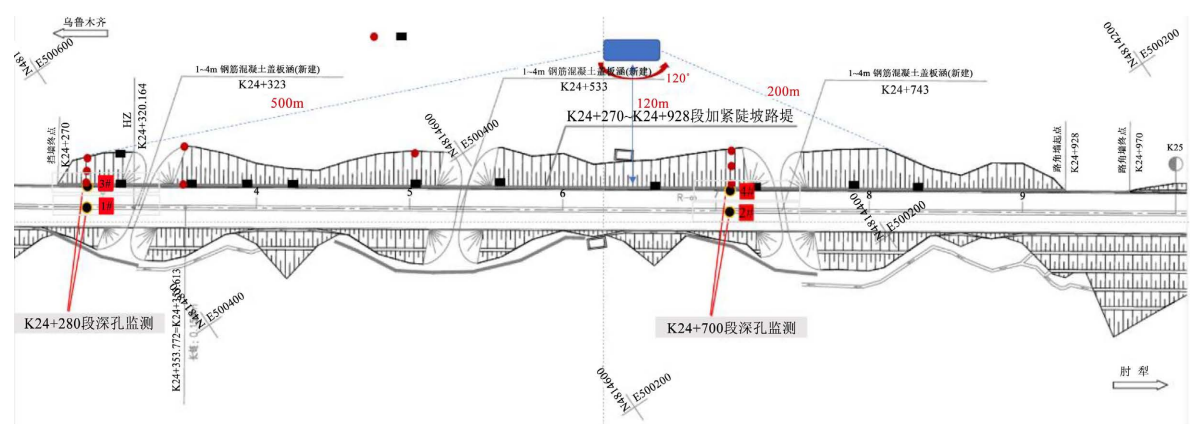


Figure 3. Schematic diagram of deep-hole monitoring point layout
图 3. 深孔监测点位布设示意图

该高边坡监测项目涵盖位移与应力两类内容。位移监测聚焦于坡体地表及深部岩土体的形变(通过多点位移计实现), 应力监测则主要依托土压力传感器。实施位移监测旨在精准捕捉土体变形量及方向, 而应力监测则用于解析坡体内部的受力状态。综合这两类监测数据, 可深入剖析边坡内部应力分布规律与

外部变形特征，为科学评估其整体稳定性奠定数据基础。尽管已实施分级防护措施，鉴于边坡高度突出、地质条件复杂，仍需强化监测力度。为此，构建了坡体变形监测网，利用坡面全站仪实施坡面立体化动态监测。此外，由于边坡岩土体风化显著、裂隙与节理发育，局部路段存在倾角介于 45° 至 56° 的潜在滑移面。为防范浅层滑坡风险，特别在坡体内部布设多点位移计，实时监测内部位移动态。所有监测点位埋设完成后，将严格遵循预设频率进行持续监测，并深入分析监测数据，对异常区域及时采取加固措施。

4. 监测结果与分析

4.1. 不同危险滑动面处位移变化

如图 4 所示 2025 年 4 月 28 日至 2025 年 6 月 2 日期间，从 2 m 至 16 m 深度处的一个月内的最大变形量分别为 0.54 mm、0.50 mm、2.05 mm、1.00 mm、0.67 mm、1.80 mm、1.76 mm、0.21 mm，在 6 m 深度处位移变化量最大，且 6m 深度处的日最大变形量也最为明显，12 m~14 m 深度的形变量同样较大。

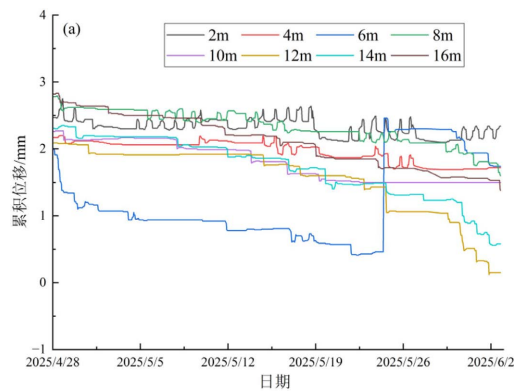


Figure 4. Displacement time-history curves at different depths for deep-hole monitoring point 1# at K24 + 280 (Median Strip)
图 4. K24 + 280 深孔监测 1#点位不同深度位移时程曲线(中央分隔带处)

如图 5 所示，从 2 m 至 16 m 深度处的一个月内的最大变形量分别为 1.74 mm、1.98 mm、1.91 mm、2.05 mm、15.68 mm、4.51 mm、2.42 mm、2.53 mm，各深度的位移变形量较其他位置均较大，在 10 m 深度处位移变化量达到最大，且 10m 深度处的日最大变形量也最为明显。

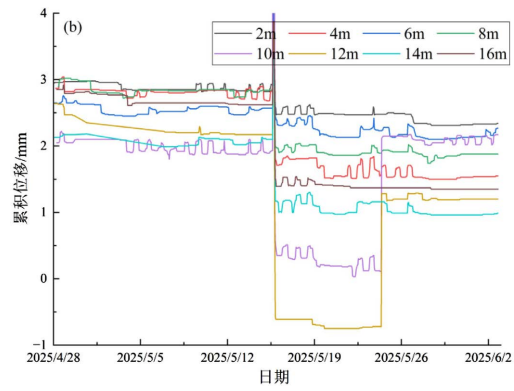


Figure 5. Displacement time-history curves at different depths for deep-hole monitoring point 2# at K24 + 700 (Median Strip)
图 5. K24 + 700 深孔监测 2#点位不同深度位移时程曲线(中央分隔带处)

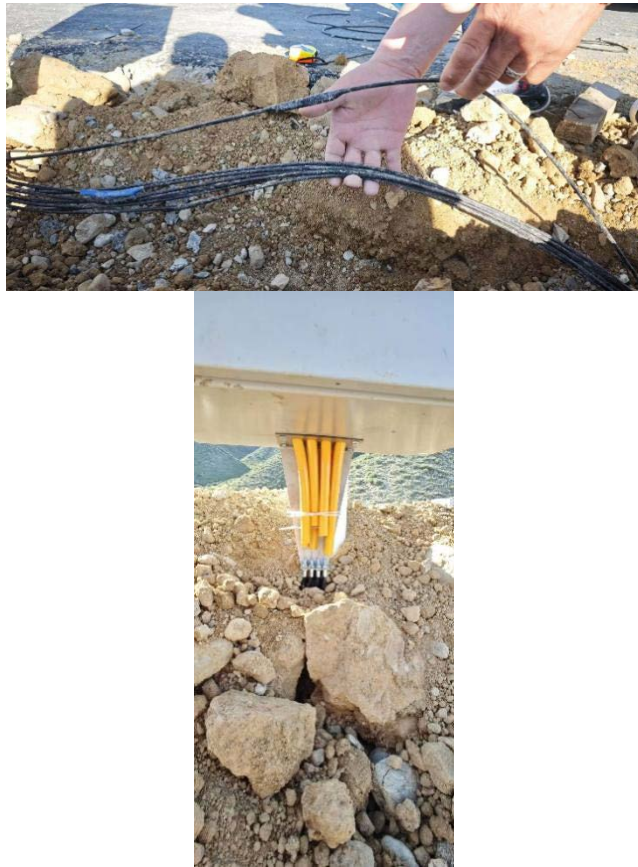


Figure 6. Field verification of deep-hole monitoring point 2# (Median Strip)
图 6. 深孔监测 2#点位现场确认(中央分隔带处)

见图 6，监测数据系统揭示了高陡加筋路堤变形的三维分异特征。在垂向分布上，变形呈现显著的深度依赖性：浅层扰动敏感区(0~10 m 深度)在中央分隔带表现尤为突出。典型如 K24 + 700-2#监测孔，10 m 深度处出现单日位移峰值 15.68 mm (图 5)，远高于其他层位。变形贡献量分析表明，6~10 m 深度位移占剖面总量的 35%~40%，符合浅层潜在滑移面发育特征。中层位移集中带(6~14 m 深度)在多剖面持续显现位移隆起。以 K24 + 280-1#孔为例，6 m 深度累积位移达 2.05 mm (图 4)。结合地质勘察资料，此区间恰为粉质黏土与砾石层交界面。岩性差异导致渗透系数突变，在降雨入渗或地下水位波动时易产生孔隙水压力差异，诱发层间剪切变形，形成应力集中薄弱带。深层固结主导区(>20 m 深度)主要分布于路肩区域。

4.2. 深部位移变化

深部位移监测数据系统揭示了高陡加筋路堤在垂向上的变形分异规律及主导机制，其空间变异性与工程活动、地质条件和外部环境密切相关。在中央分隔带区域(图 7、图 9)，变形表现出显著的浅层扰动敏感性。监测点显示，10 m 深度处填土，单日位移峰值高达 15.68 mm，远超其他深度。进一步分析表明，6~10 m 浅层位移占监测剖面总变形量的 35%~40%，符合浅层潜在滑移面发育特征，揭示了施工期该区域是变形控制的薄弱环节。

相比之下，路肩区域(图 8、图 10)的变形则以深层过程为主导。监测数据显示 22~24 m 深度存在持续但缓慢的位移累积(最大变形 1.10 mm)，表现为典型的深层固结变形模式。此变形主要受上覆填土荷载长

期作用下的土体压密排水过程控制。深层位移时程曲线形态平缓,无明显突变点,表明该区域受短期施工扰动影响较小,稳定性相对较高。

值得注意的是,位移集中带的空间定位具有重要工程意义。监测数据一致表明,6~14 m 深度区间(涵盖浅层与中层)是多个剖面的位移高值区。结合地质勘察资料,此区间恰为粉质黏土与砾石层的交界面。岩性差异导致的渗透系数突变,使得该层位在降雨入渗或地下水位波动时易产生孔隙水压力差异,诱发层间剪切变形,形成应力集中薄弱带。此发现为识别潜在滑移面位置及优化针对性防护措施提供了关键依据。

此外,防护结构对变形发展的抑制效应在深部位移数据中得到验证。对比防护结构施作前后的位移时程曲线可见,无论是中央分隔带的敏感区还是路肩的深层固结区,其位移累积速率在防护完成后均显著降低,整体曲线呈现收敛趋势。特别是中央分隔带 10 m 深度处,虽曾出现单日峰值位移,但在后续监测中未发展为持续性加速变形,表明加筋结构有效约束了浅层土体的剪切滑移,改善了坡体内部应力传递路径,阻止了潜在滑移面的贯通发展。土压力监测数据同步印证了应力状态在防护后迅速趋于稳定,进一步佐证了防护措施的有效性。然而,极端工况(如强降雨)下部分区域(如 6~14 m 层位)位移集中现象仍存,提示需持续关注其长期演化风险。

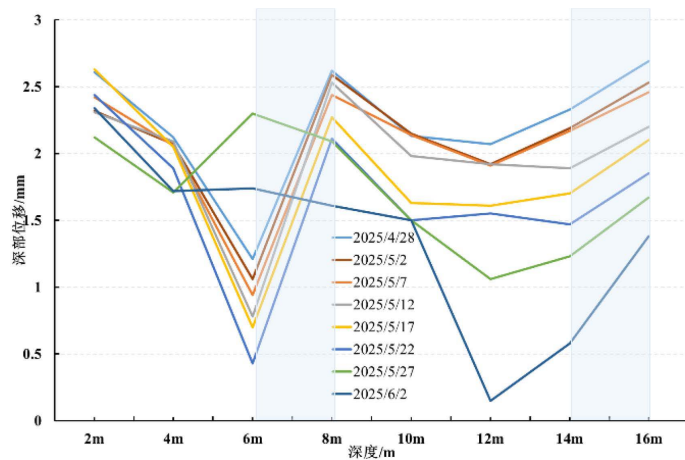


Figure 7. Deep displacement 1 (Median Strip)
图 7. 深部位移 1 (中央分隔带)

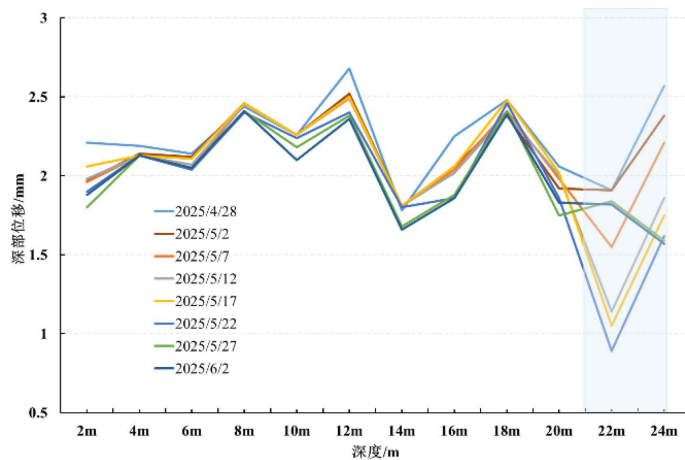


Figure 8. Deep displacement 3 (Shoulder)
图 8. 深部位移 3 (路肩)

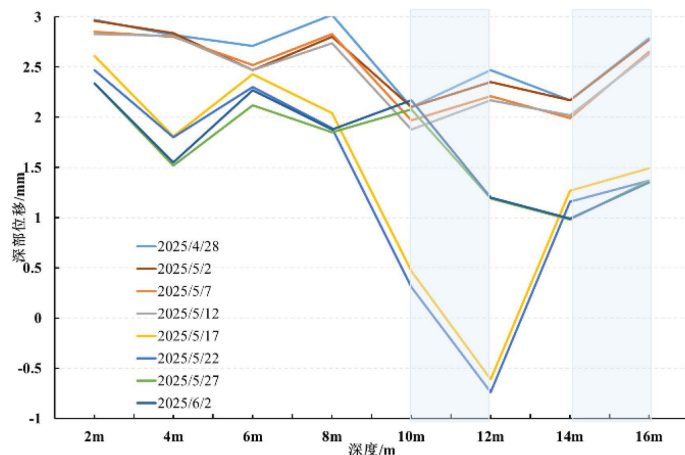


Figure 9. Deep displacement 2 (Median Strip)

图 9. 深部位移 2 (中央分隔带)

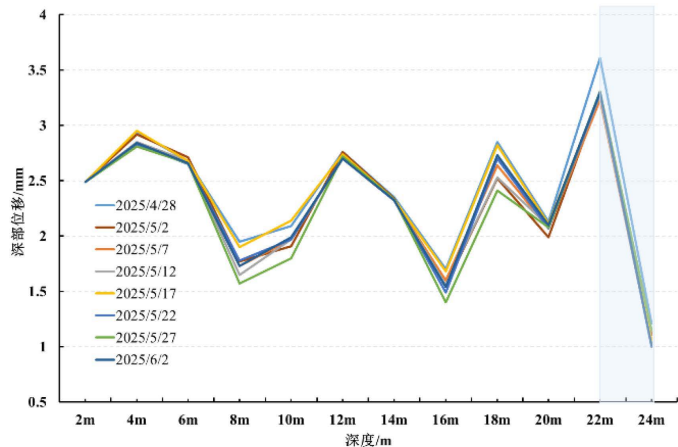


Figure 10. Deep displacement 4 (Shoulder)

图 10. 深部位移 4 (路肩)

4.3. 坡面位移变化

如图 11 所示, 降雨会导致 K24 + 410~K24 + 470 产生区域沉降突变: 降雨后(5.21) K24 + 410~K24 + 470 区域沉降量急剧增加。410-2 点: 降雨后单次沉降量达 37.9 mm (累计沉降从 24.7 mm 增至 62.6 mm), 远超降雨前日均沉降量(3.9 mm/天→12.6 mm/天)。410-1 点: 累计沉降从 20.1 mm 增至 42.5 mm, 增幅超 100%。K24 + 290~K24 + 350 区域持续沉降: 如 290-2 点降雨后单次沉降 10.6 mm (累计达 26.2 mm), 但增速低于 K24 + 410~K24 + 470 区域。位移加速现象: K24 + 410~K24 + 470 区域位移剧增: 410-2 点位移速率从 0.71 mm/天(降雨前)飙升至 10.27 mm/天(降雨后), 单次位移量 30.8 mm。410-1 点位移量从 5.95 mm 增至 19.5 mm, 增幅 227%。其他区域相对稳定: 如 470、560 区域位移变化平缓(<3 mm/天)。局部回弹异常: K24 + 410~K24 + 470 区域: 470-1 点降雨后出现上升(负沉降-3.2 mm→1.6 mm), 可能因局部地质吸水膨胀。K24 + 290~K24 + 350 区域: 350-5 点降雨后沉降量-6.8 mm (回弹), 但后续恢复沉降趋势。水平空间上, 降雨事件对变形的触发效应应具有显著区域性。5 月 21 日强降雨后, K24 + 410~K24 + 470 段表现出剧烈响应, 410-2 测点沉降量单次突增 37.9 mm, 位移速率由 0.71 mm/d 飙升至 10.27 mm/d (超规范警戒值 156%)。此突变源于雨水快速入渗导致非饱和土基质吸力丧失, 依据 Terzaghi 有效应力原理,

土体有效应力降低引发抗剪强度衰减，同时渗流力加剧颗粒运移，共同驱动浅层土体加速变形。局部异常现象如 470-1 点雨后抬升 1.6 mm，与含蒙脱石黏土矿物吸水膨胀相关，但短暂回弹后变形持续发展，反映浅层土体暂态软化不可逆。

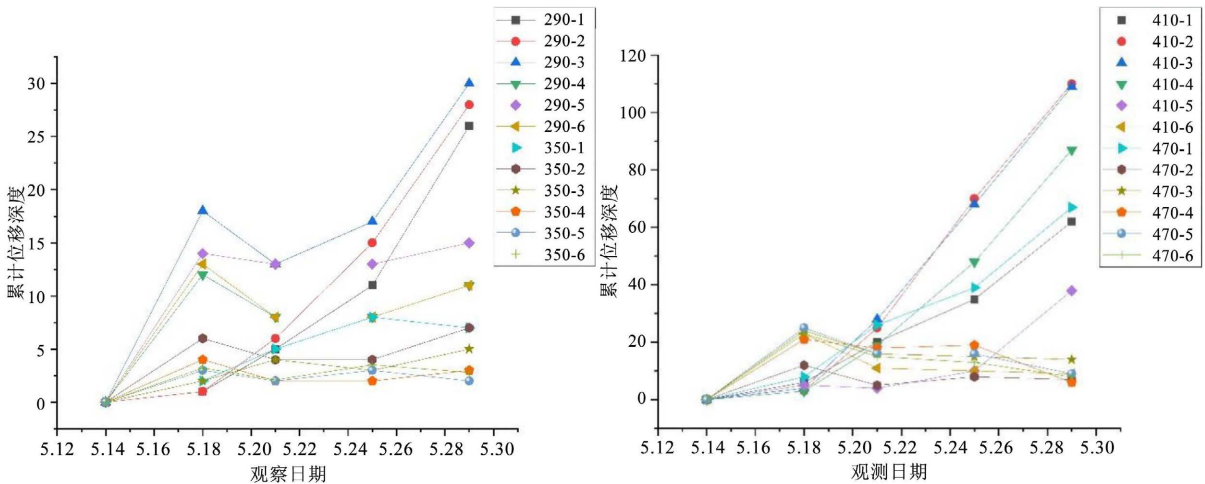


Figure 11. Cumulative displacement depth
图 11. 累计位移深度

5. 结语

本监测工程基于深孔位移监测与坡面全站仪立体监测网的综合分析，系统揭示了 G0711 乌鲁木齐至尉犁段高速公路高陡加筋路堤边坡的变形动态规律：

- (1) 边坡变形具有显著深度差异性中央分隔带区域：10 m 深度处出现单日位移峰值 15.68 mm。路肩区域：变形以深层固结为主，22~24 m 深度最大变形仅 1.10 mm。
- (2) 位移集中带与潜在滑移面发育区：6~14 m 深度区间(涵盖浅层与中层)是位移集中带，占监测剖面总变形量的 35%~40%。该区间位于粉质黏土与砾石层交界面，因岩性差异导致渗透系数突变，易在降雨或地下水位波动时诱发层间剪切变形，形成潜在滑移面。
- (3) 降雨对变形的显著触发效应：强降雨(如 5 月 21 日)导致 K24 + 410~K24 + 470 段发生剧烈变形。雨水入渗导致非饱和土基质吸力丧失，土体有效应力降低，抗剪强度衰减，引发浅层加速变形。
- (4) 防护结构的有效性：加筋防护措施显著改善坡体应力分布，土压力监测表明，防护施作后应力状态迅速稳定，位移时态曲线呈收敛趋势，深层未形成贯通性滑移面。但极端工况(如强降雨)下，6~14 m 位移集中带仍存在局部失稳风险。

基金项目

国家自然科学基金项目(52078108)；吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目(20210509058RQ)；吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20210103KJ)。

参考文献

- [1] 赵卫冬, 张兴波, 史艳. 库区公路高边坡滑坡治理技术[J]. 公路, 2020, 65(3): 64-67.
- [2] 刘蓓蓓, 张孟喜, 王东. 基于强度折减法的土工格室加筋路堤稳定性分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(2): 287-295.
- [3] 李雪峰. 高陡边坡监测试验研究[J]. 工程机械与维修, 2023(1): 157-159.

-
- [4] 何智, 李娟娟. 高陡边坡监测技术与稳定性应用分析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(10): 70-72.
 - [5] 杨强, 洪成雨, 许承恺, 等. 土工格栅加筋边坡的光纤布拉格光栅监测研究[J]. 中国测试, 2022, 48(12): 22-28, 34.
 - [6] 张传亮, 苏军. 露天矿山采场边坡表面位移监测技术分析与应用研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(S1): 269-274.
 - [7] 彭德秀, 穆锐. 公路边坡的位移监测及其影响因素分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2141-2146.
 - [8] 黄鑫. 高速公路路堑边坡位移监测施工核心探索[J]. 智能城市, 2019, 5(13): 190-191.
 - [9] 吴志刚. 深部位移监测在边坡开挖中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(7): 110-111.
 - [10] 徐佳伟, 蒋玮. 地震及降雨作用下路堤边坡变形破坏特性研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 76-86.
 - [11] 赵建军, 余建乐, 解明礼, 等. 降雨诱发填方路堤边坡变形机制物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2933-2940.