

基于智能化技术的公路边坡监测与预警系统研究

袁新鹏, 王 慧

(陕西省汉中市公路局抢险救援中心, 陕西 汉中 723099)

摘 要 针对秦岭山区陡坡路堤边坡在膨胀土与河水冲刷耦合作用下的复杂变形机理, 本文提出并实施了一套基于多源传感数据融合的智能监测预警系统。系统集成 GNSS 地表位移、深部位移、多参数水文监测及视频 AI 识别技术, 构建了“感知—传输—分析—预警—响应”五位一体的技术框架。工程实践表明, 该系统实现了毫米级位移监测精度与秒级预警响应, 数据完整率达 97.78%, 为山区公路边坡灾害防控提供了可复制的技术范式。

关键词 公路边坡; 智能监测; 多源数据融合; 预警机制; 应急响应

中图分类号: U416.14

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.001

0 引言

国家交通基础设施安全战略对公路防灾减灾提出更高要求。秦岭地区陡坡路堤兼具膨胀土特殊岩性与河水冲刷动力作用, 传统监测手段难以捕捉其蠕滑渐变特征。本研究依托陕西省 10 处公路边坡监测试点工程, 聚焦汉中市 G108 线 K1592+740 ~ K1592+900 段典型陡坡路堤, 构建覆盖地表—深部—环境多维度的智能监测系统, 旨在探索适应复杂地质条件的监测技术体系与预警阈值判定方法。

1 工程地质背景与风险分析

1.1 地质环境特征

试点段位于秦岭南麓金水镇, 属低山侵蚀地貌, 坡体高程 493 m ~ 510 m, 相对高差 47.34 m, 地形坡度约 35°。地层结构为: 人工填土、强风化片岩及中风化片岩。场地处于金水—西水断裂带(F1), 岩体破碎, 地下水富集, 地震烈度为 VI 度区。

1.2 灾害发育特征

该段老滑坡体呈圈椅状, 规模 100 m × 120 m, 滑面深度约 14 m。次级滑坡 H-1 (K1592+800 ~ K1592+900) 经钢管桩加固, 但支护结构异响表明残余滑动力可能未完全消除; H-2 段 (K1592+740 ~ K1592+800) 未经处治, 路面拱起、水沟损坏, 存在变形迹象。

1.3 预警监测预期目的

通过预警监测系统, 实时监测滑坡体位移与地裂缝发展态势, 判定边坡稳定状况, 为应急处治及后续处置措施提供依据。

2 智能监测系统设计

系统采用“井”字型三维监测网, 构建“感知层—网络层—应用层”架构。感知层 16 个测点集成 9 类传感器, 包括 GNSS 地表位移、固定式测斜仪、裂缝计、雨量计、雷达水位计、含水率仪、孔隙水压计、视觉位移计及视频 AI 监控。

3 监测设备选型与精细化布设

3.1 布设原则

1. 空间控制: 3 条纵向测线覆盖主滑方向, 每条线 ≥ 2 个测点。

2. 深浅结合: 地表 GNSS 与深部测斜仪同孔布设, 滑动面下延 5 m ~ 10 m。

3. 重点加密: H-2 未处治段布设 3 套 GNSS、2 孔深部位移监测。

4. 环境同步: 雨量计设于开阔区, 水位计布设于金水河岸, 含水率仪埋深 1 m/3 m/5 m。

3.2 核心设备配置

1. 地表位移监测: 7 台 GNSS 接收机 (1 基站 + 6 测点), 静态精度平面 ± (2.5 + 0.5 ppm × D) mm, 动态精度 ± (8 + 1 ppm × D) mm, 采样频率 15 s, 输出频率 1 次/h, 异动时 1 次/30 min。

2. 水文环境监测: 雨量计分辨率 0.2 mm, 雨强范围 0.01 mm/min ~ 4 mm/min; 雷达水位计量程 40 m, 精度 0.1% F·S; 孔隙水压计量程 0 MPa ~ 0.35 MPa, 精度 0.025% F·S; 含水率仪采用 FDR 原理, 精度 ± 3% RH^[1]。

作者简介: 袁新鹏 (1985-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 公路桥梁设计和建设管理。

4 预警机制与应急响应体系

4.1 动态阈值预警模型

采用单参数预警与多参数综合预警双模式（见表 1、表 2）。预警值依据《崩塌、滑坡、泥石流监测规范》（DZ/T 0221）及现场专家经验综合确定。

预警指数采用改进的综合判据：

$$A=\omega1\cdot vcv+\omega2\cdot aca+\omega3\cdot hc\Delta h$$
 (1)

式（1）中：v 为位移速率，vc 为对应预警等级阈值；a 为加速度，ac 取 0.1 mm/h²；Δh 为地下水位变化量，hc 为水位预警阈值；权重系数 ω1=0.6，ω2=0.3，ω3=0.1，经层次分析法确定^[2]。

表 1 项目监测预警值及等级

预警等级监测项目		蓝色	黄色	橙色	红色	备注
地表位移监测	变化速率（连续 3 d）	5 mm/d	8 mm/d	12 mm/d	20 mm/d	
	报警值	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	
深部位移监测	合位移值变化速率（连续 3 d）	5 mm/d	8 mm/d	12 mm/d	15 mm/d	
	累计合位移报警值	20 mm	30 mm	45 mm	60 mm	
倾斜监测	变化速率（连续 3 d）	0.015° /d	0.05° /d	0.1° /d	0.25° /d	
	报警值	0.3°	0.6°	1.0°	1.5°	
地下水位	变化速率	200 mm/d	400 mm/d	500 mm/d	600 mm/d	
	报警值	500 mm	700 mm	900 mm/d	1 000 mm/d	

表 2 监测预警响应措施

预警级别	预警指数	预警联系人	现象	建议应对策略
蓝色	A > 0.5	监测单位技术人员	地质灾害发生的可能性小，有一定的变形特征，在一年内发生的概率不大	项目监测技术负责人应去现场对宏观迹象进行巡查，并将有关情况反馈至业主负责人
黄色	A > 1.0	监测单位技术人员和项目负责人	地质灾害体变形进入加速阶段初期，有明显的变形特征，在数月内或一年内发生大规模地质灾害的概率较大，定为黄色预警	项目监测技术负责人应去现场对宏观迹象进行巡查，加强监测数据分析，开展中期预警，预测发展趋势，并到现场进一步核查，将有关情况反馈至业主负责人。持续开展监测，提高数据采集频率
橙色	A > 1.5	监测单位人员和管养单位工作人员	地质灾害体变形进入加速阶段中后期，有一定的宏观前兆特征，在几天内或数周内发生大规模地质灾害的概率大，定为橙色预警	项目监测负责人、技术负责人应去现场对宏观迹象进行巡查，加强对宏观变形迹象的监测，加强监测数据分析，调整自动监测采集频率，开展短期预警，预测发展趋势，并到现场进一步核查，将有关情况反馈至业主负责人，提醒公路边坡管养单位加强关注，加强人工巡查
红色	A > 2.0	监测单位人员和管养单位工作人员及分管领导	地质灾害体变形进入加速阶段，各种短临前兆特征显著，在数小时或数周内发生大规模地质灾害的概率很大，定为红色预警	项目监测负责人及技术负责人应去现场对宏观现象进行排查，加强宏观变形监测及短临前兆监测，开展短临预警，由其根据现场宏观变形等实际情况判定是否提前组织地质灾害危险区群众进行转移。业主和技术服务单位前往现场进一步调查处置，若确属险情，则立即按照应急预案和灾险情速报机制采取相应行动。向边坡管养单位发送预警，采取应急避险措施，如临时交通管制、限制通行等

4.2 秒级应急响应设施

响应系统采用“光+声+电”三级警示：

1. 警告区：坡体两端 100 m 外各设 2 套声光报警器（110 dB/套）+1 块交通诱导屏（800 mm×1 200 mm），预警触发后 10 s 内启动。
2. 反应区：设置柔性阻拦标识，提供制动安全距离。
3. 灾害区：LED 照明设施（120 W）+ 视频 AI 监控，夜间保障视觉识别。

系统通过 PLC 控制器与监测平台直连，红色预警经人工视频复核后，一键启动应急设施，响应延迟 $<15\text{ s}$ ^[3]。

5 系统实施与监测成效

5.1 施工部署

2025 年 1 月启动，2025 年 6 月完成，16 个测点安装调试。

5.2 运行效能评估

2025 年 7 月 13 日正式投入监测，截至 2026 年 1 月 14 日，系统连续运行 6 个月，完整经历 2025 年汛期（8 月-9 月）和秋霖期（10 月-11 月）考验，各项指标运行正常。

1. 数据完整性：在线率 97.78%，达到行业优秀水平（95%）。
2. 监测精度：GNSS 静态观测 RMSE=0.8 mm（与全站仪对比）；测斜仪深部位移重复性误差 $\pm 1.2\text{ mm}$ ；视觉位移计与 GNSS 同步观测相关系数 $R^2=0.96$ 。
3. 预警时效：从数据异常到平台推送平均延迟 8 s，应急响应设施启动延迟 12 s，优于规范要求的 30 s 阈值。
4. 预警成效：累计引发蓝色预警，均属于 BD04 号路肩外 GNSS 测点变化速率预警（3.2 mm/d $\sim$ 4.8 mm/d），触发原因为降雨后膨胀土吸水膨胀导致浅表层微变形。现场核查未出现宏观裂缝扩展或深部滑移迹象，系统灵敏度高，无误报。该现象揭示膨胀土边坡具有“微动频发、整体稳定”的典型特征，为阈值动态调整提供了数据支撑^[4-5]。

5.3 科研数据分析

监测数据揭示以下规律：

1. 变形时序特征：H-2 段 BD04 号路肩外 GNSS 测点变化速率预警，深部测斜仪、其他点位监测点均未触发预警，表明变形以地表浅层膨胀土胀缩为主，非深部整体滑移。
2. 水文耦合效应：雨后地下水位上升 0.3 m $\sim$ 0.5 m，

孔隙水压力增幅 0.05 MPa $\sim$ 0.08 MPa，位移速率峰值滞后降雨峰值 12 h $\sim$ 18 h，验证“降雨-渗流-软化-变形”的链式机理。

3. 预警阈值验证：蓝色预警平均位移速率 4.1 mm/d，低于黄色预警阈值 25 mm/d，系统预警保守度合理，有效避免漏报风险。

6 结论与展望

1. 技术适配性：提出“GNSS+测斜仪+水文监测”核心组合，避免遥感技术在地形遮挡区的局限性。实测静态精度达 $\pm 0.8\text{ mm}$ ，满足二级风险边坡预警需求。

2. 预警科学性：基于变形-水力双控指标构建动态阈值模型，实现预警前移 12 h $\sim$ 18 h。蓝色预警均有效识别膨胀土微变形，无误报。

3. 响应时效性：应急设施与监测平台毫秒级联动，响应延迟 $<15\text{ s}$ ，填补传统监测“预警无响应”的短板。

6.1 存在问题与改进方向

1. 阈值优化：膨胀土微变形频发导致蓝色预警次数较多，需引入降雨强度修正系数，实现阈值自适应调整。

2. 数据融合：当前多参数预警模型为线性加权，后续拟引入 LSTM 时序预测算法，提升非线性耦合分析能力。

6.2 应用前景

基于智能化技术的公路边坡监测与预警系统已纳入陕西省公路边坡监测技术推广清单，技术成果可复用于：黄土高原区湿陷性黄土边坡；西南山区降雨型滑坡；既有公路改造中的高风险边坡。

参考文献：

- [1] 交通运输部. 全国公路边坡监测工作实施方案(2024-2030 年)[R]. 北京：交通运输部办公厅, 2024.
- [2] 自然资源部. 地质灾害自动化仪器监测预警规范：DZ/T 0460-2023[S]. 北京：中国标准出版社, 2023.
- [3] 自然资源部. 崩塌、滑坡、泥石流监测规范：DZ/T 0221-2006[S]. 北京：中国标准出版社, 2006.
- [4] 陕西省交通运输厅. 陕西省公路边坡监测工作实施方案(2024-2030 年)[S]. 2024.
- [5] 王恭先, 李焯芬. 滑坡防治的关键技术问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(05): 1-12.