

基于多源数据融合的地基基础 智能检测监测技术研究

张智远¹, 韩通达²

(1. 青岛海大工程检测鉴定有限公司; 2. 青岛合力嘉检测科技有限公司)

【摘要】针对传统地基基础检测方法存在的离散性大、时效性差及复杂地质适应性不足等问题, 本研究探讨了地质雷达缺陷三维量化、静压桩施工实时监测与人工智能(AI)数据融合等新技术。通过实验室模型试验和典型工程应用案例, 验证了技术的有效性。通过技术指标对比表明, 新方法在效率、精度和经济性方面优势显著, 为工程安全管控提供了有效支撑。

【关键词】地基基础检测; 地质雷达; 静压桩; 人工智能

中图分类号: TU470

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.07.036

Research on Intelligent Detection and Monitoring Technology of Foundation Based on Multi Source Data Fusion

ZHANG Zhi-yuan¹, HAN Tong-da²

(1. Qingdao Haida Engineering Testing and Appraisal Co., Ltd.; 2. Qingdao Helijia Testing Technology Co., Ltd.)

【Abstract】In view of the problems of large discreteness, poor timeliness and insufficient adaptability to complex geology existing in the traditional foundation detection methods, this study systematically discusses new technologies such as 3D quantification of geological radar defects, real-time monitoring of static pressure pile construction and artificial intelligence(AI) data fusion. The effectiveness of the technology is verified by laboratory model tests and typical engineering application cases. The comparison of technical indicators shows that the new method has significant advantages in efficiency, accuracy and economy, which provides effective support for engineering safety control.

【Keywords】foundation detection; ground penetrating radar; static pressure pile; artificial intelligence

1 引言

地基基础作为工程结构安全的核心, 其检测监测对防灾减灾和工程耐久性至关重要。传统检测监测方法存在局限。现有研究表明^[1], 分布式光纤传感测量精度可达 $0.1\mu\text{e}$; 地质雷达可通过三维拟合完成缺陷体积量化, 其计算相对误差通常 $<16\%$ 。但二者联合应用过程中, 多源数据融合难度大、复杂地质条件适应性较差, 仍是当前技术应用的主要瓶颈。本文系统梳理了智能传感—数据融合—工程应用全链条技术框架, 结合典型案例验证可行性, 提出规范协同优化路径。

2 传统检测监测方法的局限性与技术挑战

2.1 传统方法原理与应用瓶颈

传统地基基础检测监测以钻探取样、平板载荷试验、人工沉降观测为核心手段, 其原理依靠单点取样获取局部地质信息, 完成土体静态力学性能评价。

整套技术体系在实际应用中存在多重应用瓶颈。

一是勘察参数完整性不足: 丙级地基设计项目常缺失压缩模量等关键变形指标^[2], 地基变形验算难以精准开展。二是检测结果离散误差突出: 钻探取样仅能表征局部土体状态, 同一湿陷性黄土场地内, 不同探井实测湿陷量差值介于 $212\text{mm}\sim 425\text{mm}$, 无法客观反映场地工程地质特性。三是监测时效性较差: 传统人工沉降观测采集周期为 24h , 难以捕捉基坑开挖等动态施工工况下的短时瞬时变形; 工程实测表明该类施工场景中土体 1h 内沉降可达 5mm , 现有监测频次无法满足施工全过程安全管控要求^[3-4]。

这些局限导致传统方法对复杂地质场地适配性较差, 难以给地基基础设计、现场施工提供高精度、动态化的数据支撑。

2.2 工程需求驱动下的技术痛点

在工程需求驱动下, 传统检测监测技术面临复杂地质条件适应性不足与规范执行矛盾的双重挑战。复杂地质适应性差, 表现为大厚度湿陷性黄土

场地(厚度超60m)因浸水引发深层土体湿陷时,传统载荷试验无法实现10m以下土层变形监测,难以捕捉整个湿陷性土层的工程响应特征。在规范执行层面存在显著矛盾,地基基础设计等级与基坑监测要求不统一^[5],如甲级设计需监测基坑底隆起,而丙级设计无需监测,但实际工程中丙级项目仍可能出现失稳风险;同时丙级设计常需进行变形验算却缺乏必要的勘察数据支持,形成技术标准与工程实践的脱节。这些痛点凸显了传统技术体系在现代工程安全控制中的局限性。

3 建筑地基基础检测监测新技术的理论基础

3.1 新型智能传感技术

智能传感技术创新体现在地质雷达无损检测与静压桩监测系统的突破。地质雷达采用800MHz高频电磁波,通过介质介电常数差异识别地下缺陷,其核心原理是通过影像面积、埋深及介电常数系数的三维拟合关系实现缺陷体积的量化测算。静压桩监测系统采用 $\phi 159 \times 8$ 无缝钢管桩,通过油压传感器及双轴倾角传感器分别获取压桩力与桩身垂直度参数,压桩力有效监测量程0~703kN,桩身垂直度监测控制偏差 $\leq 1\%$ 。监测数据通过无线传感网络同步传输至监测平台,实现了施工全过程力学性能的动态追踪。

3.2 数据处理与AI算法融合

数据处理与AI算法融合是实现检测监测智能化的核心环节。通过MATLAB对地质雷达采集的影像面积、埋深等参数进行非线性拟合,构建“影像面积—埋深—体积”关系模型,模型拟合优度 R^2 达0.966;采用Origin软件验证显示,埋深与影像面积的相关性系数 R 为0.958,表明模型具有较高的可靠性。针对介质差异导致的测算误差,引入贝叶斯网络对介电常数系数进行动态修正,比如针对地下空心金属类缺陷构件,将介电常数修正系数动态调整至0.8,依托贝叶斯概率推理削弱介电常数参数的随机不确定性,有效提升缺陷体积定量测算精度,为复杂地层条件下精细化定量识别提供算法支撑。

3.3 物联网与云平台集成技术

物联网与云平台集成架构,可实现地基全流程

监测数据的实时采集、云端存储与三维可视化管控。现场实时监测系统布设无线传感采集节点,以10Hz采样频率连续采集静压桩沉降速率等核心监测参数,沉降速率监测分辨率可达0.02mm/d;原始监测数据经边缘计算节点完成本地化预处理,云端传输时延控制在500ms以内,保障施工工况动态预警与处置的时效性。系统融合BIM与GIS搭建一体化三维可视化平台,能够直观呈现地基土体变形与上部结构的耦合变形响应规律;以顶升纠偏工程为例,平台可实时区分区域差异化抬升特征:项目南区9根基桩同步抬升30mm,北区6根基桩抬升15mm,为现场施工动态决策提供空间维度量化数据支撑。

4 新技术融合应用框架与优化

4.1 多源异构数据融合框架

多源异构数据融合框架通过跨尺度数据整合实现复杂地质条件下的精准分析。在湿陷性黄土地应用中,该框架融合探井检测获取的桩间土压缩系数、土工试验确定的最优含水量及沉降观测记录的柱间沉降差,构建“地质条件—变形特征—加固方案”关联模型,实现从数据采集到方案输出的全流程映射。为提升数据可靠性,采用卡尔曼滤波算法对地质雷达影像与探井实测数据进行融合校验,通过动态权重分配修正多源数据偏差。

4.2 实时监测与分级预警系统架构

系统基于物联网感知层采集的压桩力、沉降速率等实时参数,构建三级递进式预警体系:沉降速率超过预设阈值0.04mm/d时触发一级预警,系统自动推送预警信息并提示开展坑式静压桩加固处置。相邻桩基沉降差大于12mm时触发二级预警,采用100t千斤顶以30mm/d的速率实施同步顶升纠偏。若压桩力出现20%以上的骤降则触发三级预警,立即暂停施工并启动地基空洞排查程序。该架构通过参数阈值与工程措施的精准匹配,实现从风险识别到处置的全流程闭环管理,为复杂地质条件下的施工安全提供有效保障。

针对湿陷性黄土地,静压桩设计不考虑10m以上湿陷性土层摩阻力,桩端进入非湿陷性土层 ≥ 6 m,通过“压桩力—桩长双控”(22m桩压桩力674kN)确保承载力。在岩溶区探测中,采用地质雷达与钻孔雷达组合策略,可识别直径 ≥ 0.5 m的地下

溶洞。

4.3 规范协同优化路径

为充分发挥新技术效能,亟需推动技术规范与行业实践的协同优化。国家地基检测设计类规范标准应增补地质雷达地下缺陷体积量化测算专用计算公式,同时明确丙级设计项目补充压缩模量等关键变形参数检测的管控要求,从根本上解决勘察参数缺失引发的规范执行矛盾。行业需构建涵盖施工期压桩力监测、使用期沉降预警及维护期防水评估的全链条监测理念。

5 工程案例验证与技术性能分析

5.1 典型工程应用案例

本研究从实验室验证与现场加固两个维度验证了新技术体系的可行性。

在地质雷达缺陷体积测算实验中,搭建含水率5%的沙土模型,埋置直径16cm、体积1206cm³的树脂薄壳模拟地下缺陷,通过800MHz地质雷达扫描获取影像面积1101.83cm²,代入三维拟合公式测算体积为1016.48cm³,误差为15.74%,验证了“影像面积—埋深—介电常数”量化模型的可靠性。

针对湿陷性黄土地某学校餐饮楼,采用22m静压桩(单桩承载力220kN)结合局部顶升纠偏技术(最大抬升56mm)实施加固,监测数据显示加固后地基沉降速率降至0.02mm/d,柱间沉降差控制在12mm以内,满足三级预警机制中的安全阈值要求,实现了复杂地质条件下的变形精准控制。

5.2 技术指标对比分析

技术指标对比分析从效率、精度与经济性三个维度验证了新技术体系的综合优势(见图1)。

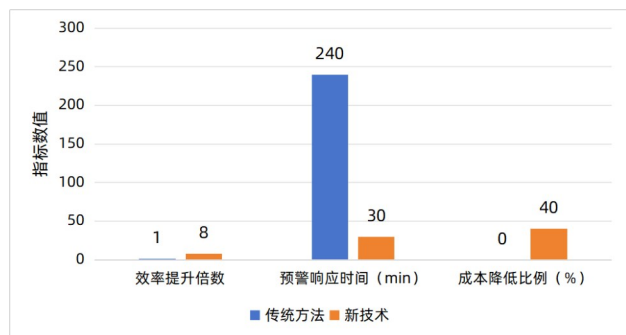


图1 传统方法与新技术的技术指标对比

在效率提升方面,地质雷达单测线扫描时长仅需5min,相较传统钻探取样作业效率提升8倍,大幅

压缩场地勘察工期;在管控精度层面,静压桩智能监测系统采样频率为10Hz,依托边缘计算本地化算力,将风险预警响应时长缩短至30min,实现施工风险快速识别、分级处置。经济性分析表明,地质雷达无损探测无需开挖探井,检测成本较传统钻探工艺降低40%,且单桩全周期监测费用控制在2000元/桩以内,有效缩减工程勘察监测造价。效率、精度、造价三项指标协同优化,全面提升了新技术体系在复杂地质场地的工程适配能力。

针对埋深>5m深层隐蔽缺陷探测需求,需研发400MHz低频+1.2GHz高频双频协同地质雷达系统,弥补现有单一800MHz中频雷达深层穿透能力不足的短板。后续行业需深耕地基工程全周期监测理念,推进地质灾害监测、结构变形监测多源跨学科数据融合研究,加快新技术检测算法、管控指标纳入行业通用技术标准。

6 结语

研究表明,融合地质雷达三维量化、静压桩实时监测与AI数据融合的智能化技术体系,有效解决了传统检测监测方法存在的离散性大、时效性差及复杂地质适应性不足等问题。经工程实践证实,结合多源数据融合框架、分级智能预警机制及规范协同优化路径,可实现地基变形的全流程精准控制,显著提升了施工安全保障能力。

未来研究需重点突破深层地质探测技术瓶颈,深化多频雷达融合应用,助力建筑地基基础监测向高精度、实时化、智能化方向持续发展,为工程安全与智慧化管理提供更可靠的技术基础。

参考文献

- [1] 杨昌民, 潘元乐, 常博源. 基于地质雷达测算地基基础缺陷的体积研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 237-247.
- [2] 蒙瑜, 李振. 建筑物地基基础设计等级有关问题[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1840-1843.
- [3] 魏常宝, 滕文川, 钱铭. 某大厚度湿陷性黄土地既有建筑不均匀沉降地基基础检测鉴定与加固设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(23): 130-139.
- [4] 韩冰. 建筑地基基础稳定性检测新技术及工程实例分析[J]. 住宅与房地产, 2025(17): 77-79.
- [5] 王盼乐. 某底层框架砖房结构检测鉴定[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(5): 168-170.