

滨海软土地区沉降监测网稳定性分析方法

王海明

承德同力达建筑工程有限公司 河北承德

【摘要】滨海软土地区因地质结构特殊，沉降问题突出，对工程安全构成重大挑战。针对传统监测手段存在的时空分辨率不足与数据整合困难，提出基于多源数据融合的监测网络优化方案，并构建动态评估模型以实现稳定性判据设定。通过实测数据驱动的稳定性分析与系统验证，提升了对区域沉降行为的识别与预测能力。研究表明，融合多源观测与动态建模的方法可有效增强监测网络的稳定性和响应精度，为滨海软土地区的沉降控制与风险管理提供了可行的技术路径。

【关键词】滨海软土；沉降监测；稳定性分析；数据融合；动态评估

【收稿日期】2025 年 5 月 15 日

【出刊日期】2025 年 6 月 6 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250298

Stability analysis methods for settlement monitoring networks in coastal soft soil areas

Haiming Wang

Chengde Tonglida Construction Engineering Co., Ltd., Chengde, Hebei

【Abstract】 Coastal soft soil areas are characterized by unique geological structures that make them highly susceptible to settlement, posing significant challenges to engineering safety. To address the limitations of traditional monitoring methods in terms of spatiotemporal resolution and data integration, an optimized monitoring network scheme based on multi-source data fusion was proposed, along with the development of a dynamic evaluation model for stability criteria setting. Through data-driven stability analysis and systematic validation, the ability to identify and predict regional settlement behavior was significantly enhanced. Research indicates that the integration of multi-source observations with dynamic modeling effectively improves the stability and response accuracy of monitoring networks, providing a feasible technical approach for settlement control and risk management in coastal soft soil areas.

【Keywords】 Coastal soft soil; Settlement monitoring; Stability analysis; Data fusion; Dynamic evaluation

引言

滨海软土地区的地质特性决定了其在外部荷载和自然因素作用下易发生显著沉降，影响基础设施的安全运行与使用寿命。随着城市化进程加快，对该类地区沉降监测的需求日益迫切。现有监测网络在数据连续性、空间覆盖性及响应速度方面存在一定局限，难以满足高精度分析要求。为提升监测系统的稳定性与适应性，需引入多源数据融合机制，并建立动态评估模型进行实时分析。在此背景下，开展监测网络优化设计与稳定性判据研究，对于提高沉降预警能力具有重要意义。

1 滨海软土地区沉降特征与监测难点

滨海软土地区广泛分布于我国东部沿海地带，其地质结构以高含水量、高压缩性、低承载力为典型特征，具有显著的流变性和不均匀性。这类土体在自重和外部荷载作用下极易发生长期持续性沉降，且沉降过程

具有时间滞后性和空间差异性。由于区域地下水位较高，软土层厚度变化大，加之潮汐作用和海水侵蚀影响，进一步加剧了地基变形的复杂程度。这种复杂的地质环境决定了沉降问题的普遍性和严重性，成为制约该地区工程建设安全与稳定的关键因素之一。

在工程实践中，滨海软土地区的沉降主要表现为固结沉降、次固结沉降及侧向挤出变形等多种形式并存^[1]。其中，固结沉降受加载速率与排水条件控制，次固结沉降则与土体长期蠕变特性密切相关，而侧向变形往往引发地表不均匀沉降，对建筑物基础及地下管线系统造成潜在威胁。区域内的填海造陆活动频繁，新填土与原状软土之间存在明显的物理力学性质差异，导致界面处应力重分布，进而诱发附加沉降现象。这些沉降机制相互交织，使得沉降预测与控制难度大幅增加。面对复杂的沉降行为，传统的地面沉降监测手段面

临诸多挑战。

常规水准测量虽精度较高,但布点密度有限,难以全面反映区域沉降的空间分布特征;GNSS 技术虽然具备连续观测能力,但在滨海潮湿环境下易受信号干扰,数据稳定性不足;InSAR 遥感技术虽能实现大范围形变监测,但受限于时间分辨率和地表覆盖情况,对快速变化或局部剧烈沉降区域响应滞后。多种监测手段之间的数据融合程度较低,缺乏统一的时间与空间基准体系,导致监测结果存在时空匹配难题,难以支撑精细化沉降分析需求。

2 多源数据融合下的监测网络优化设计

为提升监测网络的整体稳定性和数据可靠性,必须引入多源数据融合机制,并据此优化监测网络的空间布局与技术集成方式。多源数据包括但不限于 GNSS 定位数据、InSAR 遥感形变信息、水准测量成果、地下水位变化记录以及地质钻探资料等。这些数据来源具有各自的技术优势与适用范围,在时间连续性、空间覆盖性与变形敏感度方面形成互补关系,构成了构建综合型监测体系的基础。

监测网络的优化设计需从空间布设和数据处理两个层面同步推进。在空间布设上,应基于区域地质条件、沉降特征分布及工程活动强度,采用分层分区布点策略。核心监测区以高密度布点为主,辅以长期基准站保障数据连续性;外围扩展区则结合遥感影像与地表形变趋势进行动态调整,确保整体监测能力不受局部缺失影响。各类传感器和观测设备的部署需兼顾地面与地下结构,形成垂直与水平联动的立体化监测格局,提升对三维变形场的捕捉能力。在数据处理层面,需建立统一的数据融合平台,实现不同来源、不同格式、不同时空分辨率的数据整合与标准化处理。

通过统一坐标系统、对齐时间序列及实施误差修正等关键技术,有效消除各子系统间的数据不一致性,全面提升数据质量。在此基础上,采用数据同化算法整合实时观测与历史数据,强化对沉降过程的动态感知能力。同步引入自动化采集与传输机制,提升监测系统的响应速度与运行效率,降低人为操作带来的不确定性。针对滨海软土地区的特殊环境条件,需对监测设备的选型与安装方式进行针对性优化^[2]。在潮汐作用频繁或地下水位变化显著区域,应选用具备高抗腐蚀性和防潮性能的传感器,并采用深埋式安装方式,以减少环境干扰对数据准确性的影响。

3 动态评估模型构建与稳定性判据设定

在滨海软土地区沉降监测过程中,数据的连续性

与实时性对稳定性分析提出了更高要求。为实现对监测网络运行状态的有效评估,需构建能够反映时间演化特征的动态评估模型,并据此设定科学合理的稳定性判据。该模型应具备多维度输入能力,涵盖形变观测数据、地质参数变化、环境因素扰动以及设备运行状态等多个层面的信息,形成对系统整体稳定性的综合判断机制。动态评估模型的核心在于建立沉降过程的时间序列响应关系。通过引入时序分析方法,将历史沉降数据与当前观测结果进行关联建模,识别出沉降趋势中的突变点与持续性变化区间。

结合滑动窗口算法和自适应滤波技术,增强模型对短期波动与长期趋势的区分能力,避免因局部异常数据导致误判。模型应融合外部影响因子,如地下水位升降、潮汐作用周期及地表荷载变化等,提升对沉降行为驱动机制的解释深度。在模型结构设计方面,采用分层递进式框架,依次完成数据预处理、特征提取、状态识别与稳定性评分等关键步骤。数据预处理模块负责剔除噪声干扰并填补缺失值,确保输入数据质量;特征提取模块利用主成分分析或小波变换等手段,提取沉降过程中的关键形态特征;状态识别模块则基于机器学习或模式识别算法,对不同区域的沉降行为进行分类识别;最终的稳定性评分模块根据各项指标的权重计算综合得分,生成动态稳定性评估结果。

稳定性判据的设定需兼顾工程实用性与理论严谨性。应在充分考虑软土变形机理的基础上,结合监测网络自身的运行特性,划分不同等级的稳定性阈值^[3-5]。例如,以单位时间内沉降速率的变化幅度作为一级判据,用于初步判断是否存在显著变形;以相邻测点间的差异沉降程度作为二级判据,识别潜在的不均匀沉降风险;再以长时间序列的累积沉降量及其偏离均值的程度作为三级判据,评估系统的长期稳定性表现。

4 实测数据驱动的稳定性的分析与验证

基于前期构建的多源融合监测体系与动态稳定性判据,需通过实测数据对模型参数进行标定,并对判据适用性进行系统性验证。这一过程不仅涉及数据的质量控制与特征提取,还需建立完整的验证流程,以确保模型输出结果能够准确反映监测网络的运行状态和区域沉降发展趋势。实测数据的采集覆盖多个维度,包括地面形变观测、地下水位变化、地质结构参数及外部环境因素等。这些数据构成了评估模型的核心输入来源,其完整性与一致性直接影响分析结果的可靠性。为提升数据利用率,应采用统一的数据处理流程,对原始观测值进行去噪、归一化与时序对齐,消除因不同传感器

响应差异或采样频率不一致带来的误差。

结合空间插值与时间序列重构技术,补充局部缺失或异常数据,形成连续、稳定的输入数据集。在稳定性分析过程中,需将实测数据输入动态评估模型,开展逐时段、逐区域的稳定性评分计算。模型根据设定的判据体系,自动识别沉降速率突变、差异沉降加剧以及长期趋势偏离等关键指标,生成相应的稳定性等级分布图。该过程强调数据驱动下的自动化处理能力,减少人为干预对分析结果的影响,提高判断的一致性与客观性。引入滑动窗口机制,使分析结果能够动态更新,适应软土变形的时间演化特性。为了验证模型的实用性与判据的合理性,需设计一套完整的验证方案^[6-8]。该方案包括历史回溯分析与实时预测对比两个方面。历史回溯分析利用已有的长时序观测数据,检验模型是否能准确识别过往发生的典型沉降事件;实时预测对比则通过设定固定验证周期,将模型输出的预测稳定性状态与后续实际观测结果进行比对,评估其预测精度与响应灵敏度。

在此基础上,可引入交叉验证方法,利用不同区域与不同监测手段获取的数据进行相互比对,提升验证结果的可靠性与普适性。在数据驱动的稳定性分析中,模型对异常工况的识别能力同样关键。面对极端气候或突发工程扰动,监测网络可能产生数据波动或局部失稳,系统需具备快速响应与自适应调节能力,以避免误判与漏判。通过构建动态权重调整机制,依据外部干扰程度实时优化判据参数,可增强模型在复杂环境下的鲁棒性与适用性。

5 结语

滨海软土地区的沉降监测面临复杂地质条件与环境因素的多重挑战,传统监测手段在精度与时效性方面存在明显局限。通过构建多源数据融合的监测网络与动态评估模型,能够有效提升系统稳定性与形变识别能力。实测数据驱动下的分析与验证表明,该方法具备较强的适应性与实用性,为区域沉降风险防控提供了技术支撑。未来可进一步融合人工智能与大数据分析手段,推动监测体系向智能化、自动化方向发展,提

升对长期变形过程的预测精度与响应效率,为沿海地区工程安全与城市规划提供持续保障。

参考文献

- [1] 马乐民,徐小乐,刘明亮.滨海软土地区桥台-桩-土相互作用分析与模拟研究[C]//中国建筑业协会深基础与地下空间工程分会,中国工程机械学会桩工机械分会,中国地基基础技术创新知识产权联盟,建筑安全与环境国家重点实验室.深基础工程技术创新实践(2024-2025).天津市勘察设计院集团有限公司,2025:108-112.
- [2] 江涛,于雷,房鸿鹏,等.高压旋喷扩体锚索在滨海地区淤泥质软土深基坑中的特征荷载现场试验研究[J].西部探矿工程,2025,37(03):19-23.
- [3] 范庆斌.滨海软土区域高层建筑桩基的优化设计与分析[J].福建建筑,2025,(01):60-64.
- [4] 穆楠,李杰.天津滨海软土次固结系数试验研究[C]//《施工技术》杂志社.2024年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册).天津市勘察设计院集团有限公司,2024:1024-1026.
- [5] 耿庆军.滨海人工吹填软土地地基加固方法及效果研究[J].山东交通科技,2024,(06):54-57.
- [6] 刘元强,马思涛,吴绍娟,等.滨海软土路基承载变形特性研究[J].科技与创新,2024,(24):66-68+75.
- [7] 韩寅聪.滨海软土地区深大基坑土方开挖关键技术研究[J].建设监理,2024,(09):118-123.
- [8] 巢魏征.浅谈滨海软土地区深基坑安全风险管控[J].建设监理,2024,(06):101-105.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

