

上海软土地层中岩土工程勘察精度提升策略研究——基于多源数据融合技术

李宏程

上海山南勘测设计有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16835

[摘要] 上海软土地层因灵敏度高、压缩性大且地层分布不均,传统岩土工程勘察技术常受数据单一、软土扰动等问题制约,勘察精度难以满足城市更新与地下空间开发需求。本文聚焦多源数据融合技术,系统分析上海软土地层特性与勘察数据特征,论证多源数据融合的必要性和可行性,构建涵盖数据预处理、技术选型、地质建模的融合技术体系,进而提出数据采集优化、融合参数调整、成果验证反馈的精度提升策略。研究表明,该技术体系与策略可有效提高上海软土地层地层划分精度、力学参数计算准确性,为同类软土地区岩土工程勘察提供可靠技术参考,助力工程建设安全高效推进。

[关键词] 上海软土地层; 岩土工程勘察; 多源数据融合; 勘察精度

中图分类号: TU195 文献标识码: A

Research on Strategies for Improving the Accuracy of Geotechnical Engineering Investigation in Shanghai Soft Soil Strata—Based on Multi-Source Data Fusion Technology

Hongcheng Li

Shanghai Shannan Geotechnical Engineering Investigation & Design Co., Ltd.

[Abstract] The soft soil strata in Shanghai, characterized by high sensitivity, significant compressibility, and heterogeneous stratigraphic distribution, pose considerable challenges to conventional geotechnical investigation techniques. These conventional methods are often constrained by issues such as limited data sources and soil disturbance, making it difficult to achieve the investigation accuracy required for urban regeneration and underground space development. This study focuses on the application of multi-source data fusion technology, systematically analyzing the properties of Shanghai soft soil strata and the characteristics of investigation data. It demonstrates the necessity of multi-source data integration and establishes a comprehensive technical framework encompassing data preprocessing, technique selection, and geological modeling. Furthermore, the study proposes accuracy enhancement strategies involving optimized data acquisition, adjusted fusion parameters, and rigorous verification and feedback mechanisms. The research findings indicate that the proposed technical framework and strategies can effectively improve the accuracy of stratigraphic classification and the reliability of mechanical parameter calculations in Shanghai soft soil areas. This study provides a valuable technical reference for geotechnical engineering investigations in similar soft soil regions, contributing to safer and more efficient construction practices.

[Key words] Shanghai Soft Soil Strata; Geotechnical Engineering Investigation; Multi-Source Data Fusion; Investigation Accuracy

引言

上海城市更新加速,地下管廊、老旧小区改造等工程对岩土工程勘察精度要求提高。上海软土地层淤泥质黏土占比高、含水率超40%、压缩系数大于 0.8MPa^{-1} ,传统勘察依赖单一钻探易因取样扰动致参数失真,物探数据多解性增加地层判断误差,难

精准识别隐蔽地质体。多源数据融合技术能整合多类型数据,降低地质不确定性。本文分析地层特性与数据特征,构建适配技术体系,提出精度提升策略,为工程提供精准地质依据,推动勘察技术发展。

1 上海软土地层特性与岩土工程勘察数据特征

1.1 上海软土地层地质与工程特性

上海软土地层主要形成于第四纪全新世,以滨海相、河口相沉积为主,自地表向下依次分布人工填土层、淤泥质黏土层、粉质黏土层、黏土层等。其中淤泥质黏土层厚度可达5-20m,天然含水率45%-60%,孔隙比1.2-1.8,黏聚力10-18kPa,内摩擦角 2° - 6° ,具有高压缩性、低强度、高灵敏度的工程特性,受外力扰动后力学性能显著衰减,取样过程中易出现土样扰动,导致室内试验参数与原位实际参数偏差超过15%。此外,上海软土地层存在大量隐蔽地质体,如历史河道填埋形成的暗浜,其分布范围不规则,浜内填土成分复杂,含大量建筑垃圾与有机质,承载力较周边正常软土低20%-30%;同时,部分区域受工业活动影响,存在局部污染土,进一步增加地质条件复杂性,给岩土工程勘察带来极大挑战。

1.2 上海软土地层岩土工程勘察多源数据类型

上海软土地层岩土工程勘察多源数据主要包括四类:一是钻探数据,通过钻孔获取地层柱状图,采集土样进行室内试验,得到含水率、密度、压缩模量、黏聚力等参数,数据具有点源精准性,可直接反映钻孔处地层岩性与力学特性,但覆盖范围有限,单孔影响半径仅3-5m,且取样扰动易导致数据偏差;二是物探数据,包含地震反射波数据、地质雷达数据、电法勘探数据,地震反射波数据可探测20-50m深度地层界面,分辨率达0.5m,助力划分地层分层;地质雷达数据对浅层(0-15m)隐蔽体识别效果显著,可捕捉暗浜、地下管线的异常反射信号;电法勘探数据能反映地层电阻率差异,区分污染土与正常软土,但受电磁干扰影响,数据多解性较强;三是原位测试数据,如标准贯入试验(SPT)、静力触探试验(CPT)、十字板剪切试验(VST)数据,CPT可连续获取锥尖阻力、侧壁摩阻力,反映软土原位力学特性,测试效率高,但受探头选型影响,数据精度存在波动;四是历史工程数据,涵盖周边既有工程勘察报告、施工监测数据、地质灾害记录,可反映区域地层长期变形规律,补充当前勘察数据时效性不足的问题,但需验证数据兼容性与准确性^[1]。

2 上海软土地层多源勘察数据融合的必要性

上海软土地层传统勘察依赖单一数据类型,存在明显局限性,多源数据融合具有迫切必要性。从数据覆盖范围看,钻探数据仅能反映离散钻孔点信息,难以呈现大范围地层分布连续性,物探数据虽实现面域覆盖,但精度受外界干扰,二者融合可通过钻探数据校准物探数据,解决“点少面广”导致的勘察盲区问题,例如在地下管廊勘察中,仅靠钻探难以确定长距离管廊沿线暗浜分布,融合地质雷达数据后,暗浜识别覆盖范围可扩大至管廊全线,识别效率提升3倍以上。从数据精度角度,室内试验受软土扰动影响,压缩模量测试值较原位实际值偏低10%-20%,融合CPT数据后,通过建立室内试验参数与CPT锥尖阻力的关联模型,可修正扰动带来的误差,使参数计算精度提升15%。从地质体识别能力看,单一物探数据难以区分暗浜与地下管线的异常信号,融合钻探验证孔数据与历史工程数据,可降低物探数据多解性,暗浜识别率从75%提升至95%以上^[2]。另外,上海软土地层工程需求

多样化,地下管廊、老旧小区改造对勘查精度要求不同,多源数据融合可按需整合数据,提供定制化勘查成果,满足不同工程设计需求,避免因数据单一导致的勘查成果与工程需求适配性不足问题。

3 上海软土地层多源勘察数据融合技术体系

3.1 多源勘察数据预处理技术

多源勘察数据预处理是融合的基础,需通过三步确保数据质量。第一步为数据清洗,针对钻探数据,采用3 σ 原则剔除异常值,如某钻孔压缩模量测试值超出同区域平均值3倍标准差,判定为异常值并剔除,同时结合取样记录,筛选扰动程度低的土样数据;对物探数据,地震反射波数据采用带通滤波去除低频干扰与高频噪声,地质雷达数据通过背景去除、增益调整消除电磁干扰,电法勘探数据修正地形影响,减少数据失真;原位测试数据需校准设备误差,如CPT数据根据探头标定曲线修正锥尖阻力,确保不同设备测试数据一致性。第二步是数据标准化,统一数据单位与坐标系统,将含水率(%)、密度(g/cm^3)、压缩模量(MPa)等参数单位按《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)标准化,坐标系统采用上海城市平面坐标系与1985国家高程基准,通过坐标转换工具将不同勘察阶段的钻孔坐标、物探剖面坐标统一,避免空间位置偏差。第三步为数据配准,实现多源数据空间匹配,采用线性插值法将离散钻探数据与连续物探数据在相同网格节点上对齐,例如将50m \times 50m网格内的钻探孔位数据与地质雷达剖面数据对应,通过空间坐标映射,确保融合时数据空间位置一致性,为后续融合分析奠定基础。

3.2 多源勘察数据融合技术选型与适配性分析

针对上海软土地层特性,需选择适配的多源勘察数据融合技术,从数据层、特征层、决策层分别选型。数据层融合选用加权平均法,适用于钻探数据与原位测试数据的参数整合,根据数据精度赋予权重,如室内试验压缩模量数据精度高,权重设为0.6,CPT反演压缩模量数据权重设为0.4,加权计算得到融合后参数,该方法计算简便,适配软土参数的初步融合;特征层融合采用神经网络算法,构建BP神经网络模型,以物探数据的地层界面特征(如地震反射波旅行时)、原位测试数据的力学特征(如CPT锥尖阻力)为输入,地层岩性类别为输出,通过训练样本优化网络权重,模型收敛速度快,对软土地层分层特征融合效果显著,地层划分误差可控制在0.2m以内;决策层融合选用贝叶斯推理法,整合钻探验证数据、物探异常信号、历史工程数据,计算隐蔽地质体(如暗浜)存在的后验概率,当概率超过90%时判定存在暗浜,该方法可有效处理数据不确定性,适配上海软土地层隐蔽地质体识别。适配性分析表明,加权平均法适用于参数精度要求较低的初步勘查阶段,神经网络算法适配详细勘查中的地层划分,贝叶斯推理法适合对隐蔽地质体识别要求高的专项勘查,三者结合形成覆盖不同勘查阶段的融合技术体系^[3]。

3.3 基于多源数据融合的上海软土地层地质模型构建

基于多源数据融合构建上海软土地层地质模型,分为三步实现。第一步为地层框架建模,以融合后的地震反射波数据与钻

探数据为基础,确定各主要地层(人工填土层、淤泥质黏土层、粉质黏土层)的顶面与底面标高,采用三角剖分法构建地层界面三维网格,网格分辨率设为 $5\text{m}\times 5\text{m}$,确保模型能反映地层起伏变化,例如在暗浜分布区域,通过融合地质雷达数据,修正淤泥质黏土层顶面标高,使界面起伏呈现暗浜的漏斗状特征。第二步为力学参数建模,将融合后的压缩模量、黏聚力、内摩擦角等参数,采用克里金插值法赋值到地层网格中,克里金插值可利用数据空间相关性,避免传统插值的“平滑效应”,使参数分布更贴合实际,如在CPT数据密集区域,插值误差控制在5%以内,准确反映软土力学参数的空间渐变规律。第三步为隐蔽地质体建模,基于贝叶斯推理法的融合结果,在三维模型中标记暗浜、污染土的分布范围与深度,暗浜区域采用红色网格区分,污染土区域标注电阻率值与污染物类型,模型支持交互式查询,点击任意网格节点可查看对应的地层岩性、力学参数与隐蔽体信息。构建的地质模型可导入BIM软件,与工程设计模型联动,为地基处理、基坑支护设计提供可视化、精细化的地质依据,模型精度满足上海软土地层工程设计要求。

4 基于多源数据融合的上海软土地层勘查精度提升策略

4.1 多源数据采集方案优化策略

多源数据采集方案优化要结合上海软土地层特性与工程需求,从采样密度、设备选型、采集时序三方面着手。采样密度采用“动态加密”原则,常规区域钻探孔按 $50\text{m}\times 50\text{m}$ 布设,物探剖面间距 100m ;疑似暗浜、污染土区域,钻探孔加密至 $20\text{m}\times 20\text{m}$,物探剖面间距缩至 50m ,增加CPT测试点。如老旧小区改造,用微型钻探设备在建筑间隙布孔,采样密度提升后,地层划分误差从 $\pm 0.5\text{m}$ 降至 $\pm 0.2\text{m}$ 。设备选型适配软土特性,钻探用薄壁取土器,内径不小于 100mm ,取样质量达I级;物探用高频地质雷达增强浅层隐蔽体识别;CPT用带孔隙水压力传感器探头。采集时序采用“先物探后钻探”流程,如地下管廊勘查,先采集物探数据圈定异常区域,再针对性布设钻探孔与原位测试点,采样效率提升40%,成本降低。

4.2 融合技术参数优化策略

融合技术参数优化需针对不同技术类型,结合上海软土地层数据特点调整。加权平均法通过敏感性分析确定权重,如压缩模量融合,室内试验数据权重0.6、CPT数据权重0.4时,参数误差最小为8%。神经网络算法优化网络结构,输入层6个节点,隐含层2层共20个节点,输出层4个节点,激活函数用Sigmoid,训练迭代

1000次,学习率0.01,模型地层分类准确率从85%提至96%。贝叶斯推理法调整先验概率,上海软土地层暗浜先验概率0.3,更新后验概率模型,暗浜识别漏判率从15%降至3%。建立动态调整机制,依不同区域软土特性定期更新参数数据库,确保参数适配地层变化,维持高融合精度^[4]。

4.3 勘查成果精度验证与反馈策略

勘查成果精度验证建立多维度体系,通过反馈调整提升精度。第一步现场揭露验证,工程施工时对比勘查成果与实际地层,如基坑开挖测地层界面标高,上海某地下管廊工程偏差仅 $\pm 0.15\text{m}$;开挖验证暗浜范围与深度,修正融合模型参数。第二步监测数据反演验证,采集施工监测数据反演计算实际力学参数,与融合勘查参数对比,偏差超10%则调整参数,如某老旧小区改造,增加CPT数据权重后参数偏差降至7%。第三步长期稳定性验证,跟踪工程运营阶段地层变形数据,分析融合勘查参数反映长期变形特性的准确性。建立反馈机制,记录精度问题形成数据库,定期研讨分析成因,调整数据采集与融合参数,如提升污染土识别精度,通过“验证-反馈-调整”循环提升勘查精度。

5 结束语

本文围绕上海软土地层岩土工程勘查精度提升问题,深入分析软土地层特性与勘查数据特征,论证多源数据融合必要性,构建涵盖数据预处理、技术选型、地质建模的融合技术体系,提出数据采集优化、融合参数调整、成果验证反馈的精度提升策略。未来可进一步结合人工智能技术,实现多源数据自动融合与精度实时优化,同时拓展数据类型,融入无人机遥感、物联网实时监测数据,构建更全面的融合技术体系,推动上海软土地层岩土工程勘查向更高精度、智能化方向发展,为同类软土地区勘查技术创新提供参考。

[参考文献]

- [1]贾唯龙,常鹏飞,李亚军,等.基于多源数据融合的土体空间参数不确定性缩减[J].水资源与水工程学报,2024(3):183-191.
- [2]周玮.岩土工程勘查技术在地下隧道设计中的应用与实践[J].工程技术研究,2024,6(6):98-100.
- [3]徐浩.复杂地形地质条件矿山岩土勘查技术的应用分析[J].工程机械与维修,2023(1):93-95.
- [4]许一鹏,李阳,吴坤.复杂地质条件下岩土工程勘察设计方案研究[J].世界有色金属,2020(3):255-256.