

岩土勘察中分布式光纤感测与土体变形关联分析技术

沈华南

(深圳市勘察测绘院(集团)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 分布式光纤感测技术通过将传感光纤埋入岩土体或附着于工程结构, 实现了土体变形场从离散点位监测到全域连续精准感知的突破性升级。该技术以布里渊散射、瑞利散射等为核心物理机理, 搭配多维度科学布设策略, 可实时捕捉边坡滑移、地基不均匀沉降、基坑潜在滑移带等关键变形特征, 构建覆盖工程全域的立体化监测体系。基于实测连续应变数据, 通过深度融合岩土体物理力学模型与智能算法, 建立从光纤传感信号到土体变形机理的完整关联分析体系, 有效破解了传统监测的空间盲区难题, 显著提升了岩土工程风险的早期识别能力、预警时效性及防控精准度, 为工程安全管控提供了全新的技术支持。

关键词 岩土勘察; 分布式光纤感测; 土体变形

中图分类号: TU4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.038

0 引言

岩土体变形监测是筑牢工程安全防线的核心环节, 其数据质量直接决定风险研判的可靠性。传统点式监测方法受限于离散布设特性, 存在明显空间盲区, 难以完整刻画变形场的连续演化规律, 易错失关键预警信号。分布式光纤感测技术的问世, 凭借长距离覆盖、高精度测量、全域分布式感知的独特优势, 为岩土变形监测提供了革命性解决方案。如何将海量连续的光纤传感数据, 与土体实际变形状态及力学响应精准关联, 已成为当前岩土工程智能监测领域亟待突破的关键科学问题与技术瓶颈。

1 岩土工程变形监测的重要性

1.1 保障工程安全运营的生命线

岩土工程变形监测的核心价值在于构建起重大安全事故的主动预警防线。地下岩土体的性状具有显著的不确定性与隐蔽性, 其失稳破坏多源于内部变形的缓慢累积, 最终引发突发性灾变。缺乏系统监测时, 工程师对工程潜在风险的判断如同盲人摸象, 难以精准把控安全边界。通过对边坡、基坑、隧道围岩及地基的位移、沉降数据进行持续追踪, 可及时捕捉超出设计阈值的异常变形信号, 为管理人员争取宝贵的预警时间——在变形进入加速阶段、整体坍塌或滑移尚未发生前, 迅速启动应急预案, 采取加固、卸载、人

员疏散等针对性措施, 从根本上规避群死群伤与巨额财产损失的恶性工程事故, 实现风险管控从被动应对向主动预防的转变^[1]。

1.2 优化设计与验证理论的关键反馈机制

变形监测绝非工程建设的收尾环节, 而是贯穿项目全生命周期、衔接理论设计与工程实践的重要桥梁。在施工阶段, 实测变形数据是检验设计假设与施工工艺合理性的直接依据。通过对比实测值与理论预测结果, 能够清晰辨识实际地质条件与勘察报告的偏差, 精准评估支护结构受力效能及施工工序的科学性, 进而推动设计方案的动态调整与施工过程的信息化管控。进入运营阶段, 长期积累的监测数据形成工程结构性能演化的完整台账, 为评估结构长期耐久性、预判剩余服役寿命提供坚实的科学支撑。更为重要的是, 这些源自工程实践的海量实测数据, 是修正并完善岩土力学理论、优化计算模型与设计规范的核心素材, 推动岩土工程设计从经验估算逐步迈向基于实测反馈的精准化循环, 持续赋能行业技术水平迭代升级。

2 分布式光纤感测技术原理

2.1 基于布里渊散射的分布式应变与温度传感

布里渊散射是支撑分布式光纤感测技术实现应变与温度监测的核心机制。激光脉冲在光纤中传输时, 与光纤材料内热激发声子发生非弹性相互作用, 进而

作者简介: 沈华南(1989-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 岩土勘察。

产生布里渊散射光。该散射光的显著特性在于，其频率相对入射光存在固定偏移，即布里渊频移，且这一频移量对光纤所处的温度与应变状态极度敏感，二者的变化均会引发频移呈线性规律改变。借助高精度光学检测技术，捕捉光纤沿线各点位的布里渊频移特征，再通过预先标定分离温度与应变的交叉耦合影响，便能同步获取整根光纤空间维度上的应变分布与温度场数据。以布里渊光时域分析技术为典型代表，该技术可实现数十公里范围的测量覆盖，且具备米级空间分辨率，已然成为当前岩土工程长距离、分布式变形监测中的主流技术方案^[2]。

2.2 基于瑞利散射的分布式应变与振动传感

瑞利散射的相干探测机制，构成了分布式光纤检测技术的另一重要分支。瑞利散射源于光纤内部折射率的微观不均匀性，属于弹性散射范畴，散射光频率与入射光保持一致，且其散射强度分布具备光纤专属的“光学指纹”特性。当光纤局部产生微小应变或温度波动时，对应位置的瑞利散射光谱会出现可量化的漂移现象。通过比对测量状态与初始基准状态的瑞利散射光谱，能够以极高空间分辨率反演光纤沿线的应变及温度变化，应变测量精度可达到微应变级别。以光频域反射技术为核心的该类方案，尤其适用于小变形场景下的高精度监测。此外，通过高速捕捉瑞利散射光信号的相位或强度时序波动，该原理还可延伸为分布式声学传感技术，能够灵敏感知沿光纤传播的振动与声波信号，广泛应用于工程周界安防、地质活动实时监听等场景。

2.3 基于拉曼散射的分布式温度传感

拉曼散射效应则为分布式光纤温度传感提供了另一项基础技术原理。光脉冲在光纤中传播时与介质分子发生相互作用，会产生两种非弹性拉曼散射光——频率高于入射光的反斯托克斯光与频率低于入射光的斯托克斯光。二者的核心差异在于，反斯托克斯光强度对温度变化极具敏感性，而斯托克斯光强度基本不受温度扰动影响。基于这一特性，通过测算光纤各点位反斯托克斯光与斯托克斯光的强度比值，可直接解算出该位置的绝对温度值，无需额外设置温度参考基准。这类分布式温度传感技术专门面向温度场监测需求，具有系统结构简洁、成本可控的优势，在岩土工程领域，常被用于大坝渗漏监测、地下管线泄漏排查、冻土区域温度动态追踪等与温度场异常密切相关的场景，是分布式温度监测的可靠技术手段^[3]。

3 传统点式监测技术现状

3.1 传统点式监测技术的应用与成熟性

传统点式监测技术作为岩土工程监测领域的基石，历经数十年发展积淀，技术体系已趋于完善成熟。该技术通过在地表或地下结构关键部位预埋、安装测斜仪、沉降标、钢筋计、土压力盒等独立传感器单元，直接捕获特定点位的位移、沉降、应力等核心物理参数。其工作原理简洁直白，数据解译无需复杂转化，易于工程技术人员理解与应用。经过长期工程实践打磨，从设计选型、现场安装，到数据采集规范与预警阈值设定，均已形成完备的标准化流程，积累了海量工程实例数据与实操经验。诸多成功应用案例印证了其在常规地质条件、监测目标明确场景下的可靠性，这套技术体系也成为现有岩土工程安全评估规范制定的核心依据，至今仍是绝大多数工程项目中不可或缺的基础监测配置，为工程安全初步评判提供核心数据支撑。

3.2 传统点式监测技术固有的空间局限性与代表性缺陷

传统点式监测技术的核心短板源于离散化布设的本质属性，这使其监测信息在空间维度上存在显著盲区。传感器仅能精准反映自身安装点位的物理状态，测点之间的岩土体力学状态始终处于监测盲区。岩土体失稳破坏，如滑坡滑动面、基坑深层潜在滑移带的萌生与发展，往往集中于力学性质最薄弱的区域，而这些关键区域未必能被预设测点覆盖。这种以点代面的监测模式，极易错失关键变形区域的预警信号，导致灾害预警滞后甚至失效。同时，为弥补空间覆盖不足的缺陷，需加密布设测点，不仅会显著提升钻孔、安装及长期运维的成本与工作量，过度钻孔还可能扰动岩土体原有结构，反而影响工程自身稳定性。此外，点式传感器的存活率受施工扰动影响较大，在潮湿、腐蚀等复杂工程环境中，其长期稳定性易受侵蚀而下降，常出现数据中断问题，极大地限制了其在恶劣工况下的适用性^[4]。

4 岩土勘察中分布式光纤感测与土体变形关联分析技术

4.1 分布式光纤感知技术实现土体变形场的空间连续捕获

分布式光纤感测技术在岩土勘察中的核心价值在于从根本上重塑了监测数据的获取范式，实现了监测数据从离散点位采样到全域连续捕获的突破性转变。传统点式监测恰似在复杂岩土体中靠零星“探头”摸索，

而分布式光纤技术则如同点亮了贯穿全域的“感知光带”。数公里长的传感光纤可直接埋入土体内部或附着于工程结构表面,自身兼具信号传输与传感探测双重功能。依托布里渊或瑞利散射原理,激光脉冲在光纤中传输时,背向散射光的特征参数会随光纤沿线各点位的应变、温度变化同步改变。这种“空间扫描”能力,可直观捕捉边坡滑动面、基坑潜在滑移带、地基不均匀沉降区域等关键变形特征,清晰呈现变形的具体位置、影响范围、形态特征及演化趋势,为揭示岩土体失稳破坏机制提供了以往难以企及的全景式数据支撑。

4.2 多维度布设与网络化构建形成立体感知体系

单一维度的线性监测难以完整刻画岩土体复杂的三维变形特征,因此,通过科学布设策略构建分布式光纤多维度传感网络,是实现土体变形精准关联分析的核心前提。在勘察与监测方案设计阶段,需结合具体地质条件、工程类型及监测目标,针对性规划光纤布设拓扑形态。在垂直方向上,可分层埋设光纤以捕捉不同深度土体的压缩、剪切变形规律;在水平方向上,采用网格状或放射状布设模式,实现平面范围内应变分布的全面覆盖;针对桩基、隧道等构筑物,可环绕桩基侧壁或沿隧道衬砌环向布设,精准监测结构周边土体的变形形态。这种预设式网络化布设,使传感光纤从一维“监测线”延伸为二维“感知面”,进而构建起三维“监测体”^[5]。

4.3 基于物理力学机理的应变—变形转换与模型构建

在获取连续应变数据的基础上,核心在于将这些光学传感信号转化为具有工程指导意义的土体变形特征与力学状态参数,这一转化过程需依托物理力学机理构建科学的关联分析模型。针对分层沉降监测这类一维简单场景,可通过对沿深度方向的光纤应变数据实施数值积分,直接解算出各土层的压缩量。而针对二维、三维复杂变形问题,则需结合岩土力学理论开展反演分析。以边坡稳定性监测为例,光纤应变曲线上出现的峰值突变点或应变陡增区段,通常与潜在滑动面位置及剪切变形带高度吻合。通过搭建融入土体本构关系的数值模型(有限元模型等),将实测分布式应变数据作为输入条件或校准依据,可反向解译出土体位移场、应力场分布及稳定性系数。这种实测数据与力学模型深度融合的分析思路,既验证了理论模型的适用性,又实现了对工程状态的科学诊断与前瞻性预判,推动监测工作从单纯现象描述迈向深层机理揭示^[6]。

4.4 数据驱动与智能算法赋能变形模式识别与预警

分布式传感技术产生的海量高频数据,远超传统人工分析的处理能力,数据驱动型智能关联分析技术由此成为领域发展的核心方向。通过深度挖掘历史与实时应变数据,可提取出表征土体变形演化规律的关键特征,诸如应变速率、应变空间梯度、异常波动频率等。借助机器学习算法,可实现变形特征的智能解析——利用卷积神经网络开展空间模式识别,能自动定位变形异常区域;依托长短期记忆网络进行时间序列分析,可精准预判变形发展趋势。另外,可构建融合物理定律(平衡方程、本构关系等)与数据算法的混合智能模型,物理信息神经网络是典型代表。该类模型既能从数据中习得规律,又能严格遵循物理约束,即便在数据稀疏或工况超出历史经验范围时,仍具备可靠的外推预测性能。最终,通过设定多级智能预警阈值,系统可从连续背景噪声中自动捕捉预示失稳风险的早期微弱异常信号,实现从“事后解释”到“事前预警”的根本性转变,大幅提升岩土工程风险防控能力与智能化监测水平^[7]。

5 结束语

分布式光纤感测与关联分析技术的迭代发展,正推动岩土工程监测从离散化、表象化描述,向连续化、机理化分析的深度转型。该技术不仅破解了隐蔽性岩土灾害预警的难题,实现了风险的精准预判与防控,更以数据赋能推动岩土工程设计、施工全流程的智能化升级。未来,随着该技术与物联网、数字孪生等先进技术的深度融合,必将在重大基础设施全生命周期安全管控中发挥更为核心的支撑作用,为岩土工程领域的技术革新注入持续动力。

参考文献:

- [1] 林本锐. 岩土工程勘察存在的问题及解决对策[J]. 散装水泥, 2025(06):186-188.
- [2] 张钰. 公路工程岩土勘察与地质灾害评估技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(34):113-115.
- [3] 杜亚军, 王鹏. 人工智能在岩土工程勘察领域的应用[J]. 中国科技信息, 2025(15):38-40.
- [4] 李文恩. 数字化技术在城市建设岩土勘察工程中的应用[J]. 城市开发, 2025(09):119-121.
- [5] 席泽伟. 水文地质对岩土工程勘察的影响及应对措施研究[J]. 中国金属通报, 2024(12):140-142.
- [6] 洪成雨, 周子平, 姜在明, 等. 基于分布式声波光纤传感技术的岩土勘察方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(01):171-178.
- [7] 刘晓东, 张建, 赵伟河, 等. 基于岩土工程勘察的基岩支护技术研究[J]. 科学技术创新, 2024(01):122-125.