

微动勘探技术在岩土工程精细化勘察中的应用研究

王恒中¹, 敖 标², 郑海波², 张诗林², 朱传跃¹

(1. 江苏省地质工程勘察院深圳分院, 广东 深圳 518000;

2. 深圳市苏勘岩土工程有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要 传统岩土工程勘察依赖钻探等技术, 存在点式数据代表性不足、复杂地质体识别难等问题, 难以满足勘察需求。本文聚焦微动勘探技术的应用, 阐述其通过天然振动信号反演地下结构的原理, 分析该技术在建筑场地类别确定、微动观测台搭建、数据处理及多参数协同反演中的关键要点。结合商业综合体工程实例, 验证其在地层划分、场地分类及软弱夹层识别中的有效性, 结果与钻探数据相对误差在合理范围内, 可精准提供岩土体力学参数与三维结构信息, 为岩土工程设计提供有益参考, 具有良好的应用前景。

关键词 微动勘探技术; 岩土工程; 精细化勘探

中图分类号: P642

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.021

0 引言

随着城镇化进程的加快, 超高层建筑、深埋隧道等复杂岩土工程项目日益增多, 对勘察精度的要求愈发严格。传统勘察方法以钻探为主, 虽能获取局部数据, 但存在成本高、对环境干扰大、难以反映地层横向非均质性等局限, 难以满足精细化勘察需求^[1]。

微动勘探技术的出现, 很好地解决了这方面的问题, 其作为一种非侵入性地球物理方法, 利用天然微动信号反演地下结构, 具有大范围探测、成本低、环境友好等优势^[2]。其通过分析面波频散特性获取剪切波速, 为岩土体划分、参数评估提供关键依据。本文围绕该技术原理, 探讨其在建筑场地类别确定、观测台搭建等方面的应用, 并结合实例验证效果, 旨在为岩土工程精细化勘察提供技术参考。

1 微动勘探技术原理

微动勘探 (Microtremor Survey) 是一种基于天然微弱振动信号的地球物理探测技术, 其核心原理是通过分析振动信号中面波的传播特性反演地下岩土体结构^[3]。天然微动信号来源广泛, 具有随机性、连续性和宽频带特征, 其中面波成分携带了丰富的地下介质信息^[4]。

从理论基础来看, 面波在传播过程中, 其相速度随频率的变化与地下岩土体的剪切波速密切相关。低频面波传播深度大, 可反映深部地层信息; 高频面波

则集中在浅部, 能揭示浅层结构细节。通过提取不同频率对应的面波相速度, 可建立频散曲线, 进而反演得到地下不同深度的剪切波速分布^[5]。

该技术的关键在于信号采集与处理, 采集阶段需通过专用拾震器捕捉微小振动信号, 观测系统需根据勘察目标设计台站阵列形式与密度; 处理阶段则通过滤波、去噪等预处理消除干扰, 再采用频率一波数法或空间自相关法提取频散曲线, 最终结合反演算法构建地下岩土体的速度结构模型, 为岩土工程勘察提供量化依据^[6]。

2 岩土工程精细化勘察中微动勘探技术的应用

2.1 建筑场地类别确定

建筑场地类别是岩土工程抗震设计的核心参数, 其准确划分直接关系到建筑物的抗震安全性和经济性。场地类别划分的主要依据为场地覆盖层厚度以及土层等效剪切波速, 这两个参数共同决定了场地对地震波的放大效应和反应特征。微动勘探技术通过反演获取的剪切波速剖面, 可精准计算等效剪切波速与覆盖层厚度, 为场地类别判定提供量化支撑。其中, 等效剪切波速计算公式如式 (1) 所示。

$$v_{se} = d_0 / t \quad (1)$$

式 (1) 中, d_0 为覆盖层厚度, t 为剪切波在覆盖层中的传播时间。利用微动勘探获得的不同深度剪切波速数据, 可分段计算传播时间并累加, 结合钻探

证的覆盖层界面深度,实现等效剪切波速的精确计算。

场地类别划分需满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)要求,具体对应关系如表1所示。

表1 场地类别

场地类别	等效剪切波速 v_{se} (m/s)	覆盖层厚度 d_0 (m)
I类	$v_{se} > 500$	$d_0 < 5$
II类	$250 < v_{se} \leq 500$	$5 \leq d_0 < 50$
III类	$140 < v_{se} \leq 250$	$50 \leq d_0 < 80$
IV类	$v_{se} \leq 140$	$d_0 \geq 80$

相较于传统钻探方法依赖少量点位数据的局限,微动勘探通过连续剖面探测,能够全面反映场地内剪切波速的空间变化特征,可有效识别场地内的剪切波速异常区,如局部软弱夹层或坚硬地层突起等情况,从而避免因局部数据偏差导致的类别误判,显著提升了场地分类的精细化水平,为后续的抗震设计提供了更为精准的依据。

2.2 微动观测台搭建

微动观测台搭建是数据质量控制的核心环节,需兼顾设备性能、阵列布局与环境适配性,形成系统性观测体系。在设备选型上,拾震器需采用灵敏度 ≥ 100 V/m/s的宽频传感器,频带覆盖0.05~100 Hz,确保捕捉微弱低频信号与高频细节;数据采集仪需支持24位模数转换,采样率可在50~200 Hz范围内调节,同步精度通过GPS授时控制在0.1 ms以内,避免多台站数据时差干扰。

阵列设计需匹配勘察深度,对勘察目标进行分层优化。浅层用5~20 m边长的三角形/圆形阵列,台站间距2~5 m,形成“1+6”观测单元,如图1所示;中深层(30~100 m)探测则扩展为边长50~100 m的复合阵列,在圆形阵列基础上增设外围辅助台站,总数 ≥ 9 个,提升低频信号解析能力。

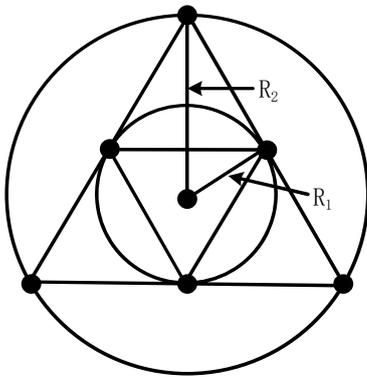


图1 微动观测台阵示意图

台站布设需执行严格的环境控制标准,避开距离交通干道50 m内、施工振动源100 m内的区域;地表需清除杂草、碎石,采用30×30×10 cm混凝土基座固定传感器,基座与地面间隙用细砂填充,确保耦合刚度不小于106 N/m;传感器安装前需进行水平校准,倾斜角控制在0.5°以内。此外,各台站配备防风雨屏蔽罩,主站连接不间断电源,保障连续观测时长 ≥ 8 小时,为数据处理提供高质量原始素材^[7]。

2.3 数据处理

数据处理是微动勘探技术转化为勘察成果的核心环节,主要包括预处理、频散曲线提取和反演计算三个阶段。

预处理阶段需对原始信号进行系统的降噪与校正,采用0.5~50 Hz带通滤波,剔除高频电磁干扰与低频环境噪声;通过基线校正消除仪器漂移,利用方差分析剔除突发脉冲干扰;对多台站数据进行时间同步校验,确保采样起点偏差 ≤ 0.5 ms。经预处理后,信号信噪比需提升至20 dB以上,为后续分析奠定基础。

频散曲线提取需结合空间自相关法(SPAC)与频率一波数法(FK)的优势,SPAC法通过计算圆形阵列中不同间距台站的自相关系数,拟合得到各频率对应的面波相速度;FK法则对信号进行二维傅里叶变换,在频率一波数域识别面波能量集中区,提取频散特征。实际应用中需结合两种方法优势,对低频段采用SPAC法提高稳定性,高频段用FK法提升分辨率。

反演计算通过迭代优化实现地下结构的精准建模,以频散曲线为约束条件,采用阻尼最小二乘法构建初始剪切波速模型,通过对比理论频散曲线与实测曲线的残差(控制在5%以内),逐步调整模型参数。反演过程中需引入钻探数据作为先验约束,避免多解性,最终输出分层清晰、与地质规律吻合的剪切波速剖面。

2.4 多参数协同反演

多参数协同反演是提升微动勘探解释精度的关键手段,通过融合多种地球物理参数与地质数据,构建约束条件更丰富的反演模型,有效降低单一技术反演的多解性。该方法以微动勘探获取的剪切波速(v_s)为核心,协同电阻率(ρ)、纵波速度(v_p)及钻探地层界面数据,形成多维度约束体系。其中,协同反演的核心公式为多目标优化函数,如式(2)所示。

$$\min F = \alpha F_{v_s} + \beta F_{\rho} + \gamma F_{v_p} + \delta F_{geo} \quad (2)$$

式(2)中, F_{v_s} 、 F_{ρ} 、 F_{v_p} 分别为微动剪切波速、电阻率、纵波速度的理论与实测数据残差; F_{geo} 为地质

界面约束项； α 、 β 、 γ 、 δ 为权重系数，根据各参数可靠性动态调整。

在实现过程中，首先利用微动反演结果构建初始速度模型，再将电阻率法获取的岩土体导电特性作为约束条件，通过 v_s 与 ρ 的经验关系修正模型；同时引入地震折射法的数据，通过泊松比验证地层力学特性的合理性。最终结合钻探揭示的地层界面深度，对反演模型进行边界约束，使输出的三维岩土体结构模型同时满足多种物理场特征与地质规律，显著提升精细化勘察的可靠性。

3 实例应用分析

3.1 工程概况

本工程为某城市新区商业综合体项目，地处区域断裂带影响范围边缘，场地总面积约 8.6 万 m^2 ，拟建建筑包括 3 栋 25 层写字楼、5 栋 12 层商业楼及整体地下 2 层车库，基础形式拟采用桩筏基础，设计荷载最大达 35 kN/m^2 。

场地原始地貌为冲洪积平原，地表覆盖 2~5 m 厚人工填土，其下为第四系冲洪积层，其主要物理力学性质如表 2 所示。

表 2 第四系冲洪积层物理力学性质

地层编号	岩土名称	层厚范围 (m)	状态 / 密实度	天然重度 (kN/m^3)
①	粉质黏土	3~8	软塑—可塑	18.0~19.5
②	粉砂	2~6	中密—密实	19.0~20.5
③	圆砾	5~10	密实	20.0~21.5

深部为白垩系砂岩，属强风化及中风化砂岩，较破碎。区域水文地质条件较复杂，地下水位埋深 1.5~3.0 m，主要赋存于粉砂及圆砾层中，属孔隙潜水。

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)，场地抗震设防烈度 7 度、地震加速度 0.15 g，需查明覆盖层、剪切波速及隐伏断层等。采用微动勘探+钻探，设 42 个微动观测点、28 个钻探孔，构点面勘察网。

3.2 结果分析

本次勘察通过微动勘探与传统钻探数据的对比验证，充分体现了微动技术在岩土工程精细化勘察中的优势。微动勘探获取的剪切波速剖面与钻探揭示的地层结构吻合度达 90% 以上，各主要地层的剪切波速测试结果如表 3 所示。

在场地类别判定上，微动勘探算得等效剪切波速 285 m/s、覆盖层平均厚 32 m，依规范定为 II 类场地，与钻探结果一致，验证其可靠性。不良地质体识别中，

微动发现场地西北波速异常区 (190~220 m/s)，结合多参数反演推断为 1.5~2.0 m 厚、350 m^2 的粉质黏土软弱夹层，钻探证实且其参数较差，为桩基避让提供依据。此外，微动三维模型显圆砾层横向不均，厚度 5~10 m 波动、波速差 150 m/s，优化桩基设计，提升勘察空间代表性。

表 3 各地层剪切波速测试结果对比

地层编号	岩土名称	微动勘探剪切波速 (m/s)	钻探取样测试波速 (m/s)	相对误差 (%)
①	人工填土	120~180	130~170	5.2~7.6
②	粉质黏土	180~250	190~240	3.8~5.3
③	粉砂	250~350	260~340	2.1~4.7
④	圆砾	350~500	360~490	1.8~3.5
⑤	强风化砂岩	500~700	520~680	2.3~4.1
⑥	中风化砂岩	700~900	720~880	1.5~3.2

4 结束语

微动勘探技术凭借非侵入性、高效率等特点，在岩土工程精细化勘察中展现出显著优势。通过明确其在建筑场地类别确定、观测台搭建、数据处理及多参数协同反演中的应用要点，结合工程实例验证，表明该技术能精准刻画地下岩土体结构，为工程设计提供可靠数据。未来需进一步优化数据处理算法与反演模型，提升复杂地质条件下的探测精度。随着技术不断完善，微动勘探技术将在岩土工程领域发挥更大作用，推动勘察行业向高效化、精细化发展。

参考文献:

- [1] 安林. 微动勘探技术在建筑岩土工程勘察中的应用[J]. 四川建材, 2025, 51(04): 119-121.
- [2] 叶水青, 黄霖. 微动勘探技术在地铁勘察中的应用[J]. 西部交通科技, 2024(05): 162-164, 172.
- [3] 夏辉, 唐浩, 刘艺, 等. 微动勘探在城市岩土工程勘察中的应用效果研究[J]. 山西建筑, 2025, 51(08): 88-93.
- [4] 闫希东, 陈钢. 微动勘探技术在软土地基处理检测中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(07): 95-97.
- [5] 夏鹏. 微动勘探在大埋深地下管线探测中的应用研究[J]. 中国市政工程, 2025(01): 39-41, 144.
- [6] 晏雁. 微动勘探技术在煤矿隐蔽致灾地质因素探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(04): 578-586.
- [7] 蔡勤波, 田学军, 刘肖肖, 等. 微动勘探在城市勘察中的应用[J]. 勘察科学技术, 2023(06): 61-64.