

微动探测方法在烟台地区典型岩溶勘察中的应用

张祥恒^{1,2,3}, 王廷宁^{1,2,3}, 王振⁴, 党伟^{1,2,3}, 姜晓峰^{1,2,3*}, 王晨⁵, 王强⁵

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004; 2. 浅海与陆域深部地质钻探山东省工程研究中心, 山东烟台 264004; 3. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004; 4. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 5. 烟台鲁东勘察测绘有限公司, 山东烟台 264004)

摘要:烟台地区作为典型的岩溶发育区,其复杂的地质构造和隐伏岩溶形态对工程安全构成显著威胁。传统岩溶勘察手段(如钻探、地质雷达等)受限于分辨率不足、成本高昂或适用场景受限等问题,难以满足精细化探测需求。本研究以微动探测方法为核心,针对烟台地区岩溶发育的复杂性,研究团队选用了合理可行的微动探测阵列布设方案,采用微动谱比法分析地层结构,并结合地质钻孔数据进行验证,系统探讨了该方法在岩溶勘察中的适用性与技术优势。实际应用表明,该方法可有效识别隐伏溶洞及岩溶塌陷隐患体,提升探测精度。

关键词:微动探测;微动谱比法;岩溶勘察;钻孔取心;烟台地区

中图分类号:P631 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0386-05

Application of microtremor survey method in typical karst exploration in the Yantai area

ZHANG Xiangheng^{1,2,3}, WANG Yanning^{1,2,3}, WANG Zhen⁴, DANG Wei^{1,2,3},
JIANG Xiaofeng^{1,2,3*}, WANG Chen⁵, WANG Qiang⁵

(1. Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China; 2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Neritic and Continental Deep Geological Drilling, Yantai Shandong 264004, China; 3. Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China; 4. China Ordnance Industry Survey & Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China; 5. Yantai Ludong Survey and Mapping Co., Ltd., Yantai Shandong 264004, China)

Abstract: As a typical karst development area, the Yantai area faces significant challenges to engineering safety due to its complex geological structures and hidden karst formations. Traditional exploration methods (e. g., drilling, ground-penetrating radar) are constrained by limitations such as insufficient resolution, high costs, or restricted applicability, making them inadequate for refined detection needs. This study focuses on the microtremor survey method and addresses the complexity of karst development in the Yantai area. The research team selected a reasonable and feasible microtremor detection array layout scheme, employed the microtremor spectral ratio method to analyze the stratum structure, and verified the results using geological drilling data. Systematic investigations demonstrate the method's applicability and technical advantages in karst exploration. Field applications confirm its effectiveness in identifying buried caves and karst collapse hazards, significantly enhancing the detection accuracy.

Key words: microtremor survey; microtremor spectral ratio method; karst investigation; core drilling; the Yantai area

收稿日期:2025-05-30; 修回日期:2025-07-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.063

第一作者:张祥恒,男,汉族,1990年生,高级工程师,注册岩土工程师,地质学专业,主要从事地质灾害治理及岩土工程研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,1246232527@qq.com。

通信作者:姜晓峰,男,汉族,1993年生,工程师,水工环地质专业,主要从事地质灾害治理及岩土工程研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,798737089@qq.com。

引用格式:张祥恒,王廷宁,王振,等.微动探测方法在烟台地区典型岩溶勘察中的应用[J].钻探工程,2025,52(S1):386-390.

ZHANG Xiangheng, WANG Yanning, WANG Zhen, et al. Application of microtremor survey method in typical karst exploration in the Yantai area[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1):386-390.

0 引言

岩溶地区因其复杂的地质结构和强烈的不均匀性,是工程地质勘察中的难点区域。岩溶发育过程中形成的溶洞、裂隙、地下暗河等隐蔽性地质体,易诱发地面塌陷、地基失稳等地质灾害,对基础设施建设与城市安全构成严重威胁^[1-2]。传统勘察方法如钻探、高密度电法和地震反射波法虽在部分场景中有效,但受限于岩溶地层的高非均质性、浅地表强干扰及复杂地形条件,常面临勘探精度不足、成本高昂和施工效率低等问题^[3-4]。近年来,微动探测技术作为一种新型被动源地球物理方法,凭借其环境适应性强、抗干扰能力优、探测深度可调等优势,逐渐成为岩溶地质调查领域的研究热点^[5]。

微动探测基于天然场源微弱振动信号,通过台阵观测提取面波频散特性,反演地下横波速度结构^[6-7]。该方法无需人工震源,尤其适用于城市密集区、复杂地形区等传统方法难以实施的场景^[8]。在岩溶地区,微动探测技术通过识别低速异常体可有效圈定溶洞位置,通过速度分层特征判断岩溶发育程度,为工程选址和灾害评估提供重要依据。

本文系统探讨微动探测技术在岩溶勘察中的应用机理,结合典型工程案例验证其有效性,旨在为复杂岩溶区地质调查提供新的技术路径,推动被动源地球物理方法在工程实践中的深化应用。

1 微动探测方法

1.1 工作原理

微动谱比法是用微动仪在探测点上同时接受来自南北、东西、垂直3个方向上随时间的振动信息,通过快速傅里叶变换将时域信号转换成利于分析的频域信号,得到对应频宽上水平方向的平均振动幅度和垂直方向的振动幅度之比 H/V ,以此来推断测点下方的地质结构。通过对大量地震和地脉动信息的观测研究发现,在不同速度结构的地层上,被动源面波的垂直分量和水平分量大小变化不同,二者傅里叶变换的频谱之比也不同。谱比法就是利用面波的垂直分量与水平分量傅里叶之比来分辨地层。

地表记录的水平和垂直分量的傅里叶谱可以写为:

$$\begin{cases} H_f = A_h H_b + H_s \\ V_f = A_v V_b + V_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_h 、 A_v ——垂直入射体波的水平分量和垂直分量放大系数; H_b 、 V_b ——基岩内的水平分量和垂

直分量傅里叶谱; H_s 、 V_s ——面波的水平分量和垂直分量傅里叶谱。

H/V 谱比值为:

$$H/V = \frac{H_f}{V_f} = \frac{A_h H_b + H_s}{A_v V_b + V_s} = \frac{H_b}{V_b} \cdot \frac{[A_h + H_s/H_b]}{[A_v + V_s/V_b]} \quad (2)$$

其中, $H_b/V_b \approx 1$,即基岩没有放大作用,当面波能量可以忽略时,微动主要沉积层内的反射横波组成, H/V 近似为 A_h 的值,由于微动中面波占主要成分,所以 H/V 近似为 H_s/V_s ,即 H/V 比近似为面波的水平分量和垂直分量的傅里叶谱比:

$$H/V = H(f)/V(f) \quad (3)$$

1.2 数据处理

数据处理软件AmbiSeis具有操作简单、界面简洁和计算迅速等特点。软件既支持SAC(Seismic Analysis Code,美国天然地震数据默认记录格式)、TRD(RefTec公司默认格式),也支持主动源地震方法中常见的SEG-2和SEG-Y格式。

该软件不仅提供了4种目前应用比较成熟的被动源面波方法:地震干涉方法、空间自相关方法、微动折射方法和路边被动源方法,也提供了谱比分析方法,可单台或多台。这些方法经过多年在全球范围的实践,勘探效果良好。

通过对大量地震和地脉动信息的观测研究发现,在不同速度结构的地层上,被动源面波的垂直分量和水平分量大小变化不同,二者傅里叶变换的频谱之比也不同。谱比法就是利用面波的垂直分量与水平分量傅里叶之比来分辨地层^[9-10]。微动谱比法的技术参数设定与布局要素需综合考虑场地条件、目标频率范围和工程需求。在参数设定方面,采样频率通常设为50~200 Hz以满足Nyquist采样定理,特殊情况下低频研究可降至1~10 Hz;单次记录时长10~30 min,低频分析需延长至1 h以上;分析频带范围多采用0.1~20 Hz覆盖工程地震频段,高频研究可扩展至50 Hz。在测点布局方面,单点HVSr适用于场地卓越频率估算,阵列观测(如圆形、L形)基线长度宜为20~100 m以覆盖目标波长;传感器布设要求水平分量调平误差 $<1^\circ$,并远离干扰源50 m以上;区域勘察网格间距通常为50~200 m,重点区域需加密至10~30 m;观测时段宜选择夜间或低人类活动时段,并保证至少3次重复测量。需特别注意通过主动源数据校准频带可靠性,在复杂地形中修正地形放大效应,使用

Geopsy或SESAME等专业软件进行标准化数据处理。处理流程为:读入原始数据—导入信号波形—设置分段长度、频率范围等—设置表层速度—谱比分析—保存成图。

2 工程实例

2.1 工程概况

烟台市黄渤海新区某项目挡墙工程,项目选址位于烟台市黄渤海新区开封路以东、大赵家村西南区域,勘察场区现存3个边坡,勘察场区南侧东西向边坡(以下简称南侧边坡)长约160 m,边坡高度15~25 m,为岩质边坡;场区东北侧南北向边坡(以下简称东北侧边坡)长约160 m,边坡高度16~22 m,为土岩组合边坡;场区东南侧南北向边坡(以下简称东南侧边坡)长约240 m,边坡高度20~25 m,为岩质边坡,本次勘察需查明边坡区域基岩界面起伏以及岩溶发育情况,为后期边坡支护提供建议。

拟建工区内发育滹沱系粉子山群张格庄组白云石大理岩、方解石大理岩,上部被燕山早期玲珑序列大庄子组侵入岩侵入,西侧临近九曲河,东侧临近黄海,地下水流通较强,下伏岩溶作用较为发育。

2.2 数据采集

微动台阵方法是通过多个微动仪器组合成特殊的阵列,进行数据采集。常见的有一字形、十字形、圆形、内嵌三角形等,可按工区场地条件合理选择台阵类型。根据测线方向及工作场地的实际地形,兼顾质量及效率,本次微动测量采用直线型布设,布设微动剖面测线3条,编号分别为D1、D2、D3,共计41个物理点,剖面长共计300 m,频带范围1~50 Hz,采样率250,同步观测时长15 min,见图1。

微动谱比法测量时,挖除测点表层松散土,使

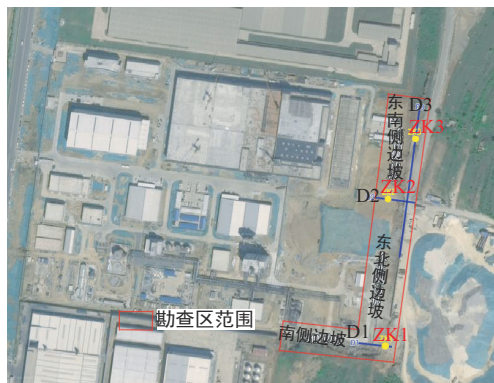


图1 微动测线及验证钻孔布设

测点地面密实平整;将仪器的水平方向拾震器分别朝向南北和东西方向,调平仪器且与地面紧密耦合;仪器开机后,人或车辆不应在仪器附近活动。

野外观测时,GPS同步授时,同时电脑WiFi接收原始数据并同步显示谱比等值线图像。工作参数为基本点距5、10 m,采样率250,每个点有效同步观测时长15 min。通过微动4G远程实时数据传输,设置作业参数,实时查看频散曲线,回收数据,远程进行数据质量控制,实现智能化,全周期质量控制。工作过程中严格执行《微动探测技术规程》(DZ/T 0485—2024)。

2.3 微动探测结果处理及解释

2.3.1 D1剖面微动探测成果解释

D1线微动法测量放置三分量数字加速度仪8台,测线长35 m,点距5 m,采样率250,每个点有效同步观测时长为15 min。

从D1剖面微动谱比法 H/V 等值线断面图(图2)看,整条剖面 H/V 比值由浅到深总体呈由低到高特征反映,反映实际深度界面特征;该剖面在里程10 m处地面标高40 m处等值线呈相对低比值封闭特征,推测该处岩层较破碎或有溶蚀发育;在地表里程25~30 m处地面标高50 m处有一明显低比值封闭异常,异常中心比值 <0.7 ,推测该处低比值异常由风化层较破碎引起的反映,在地表里程25~30 m处地面标高37 m处有一明显低比值异常,异常中心比值 <1 ,推测该处有溶蚀发育或岩石破碎裂隙较发育,根据微动探测结果显示,圈定异常区A。

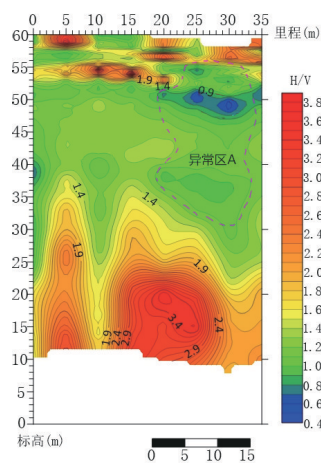


图2 D1剖面微动谱比法 H/V 等值线断面

2.3.2 D2剖面物探测量成果解释

D2线微动法测量放置三分量数字加速度仪10台,测线长45 m,点距5 m,采样率250,每个点有效

同步观测时长为15 min。

从D2剖面微动谱比法 H/V 等值线断面图(图3)看,整条剖面 H/V 比值与D1剖面相比大很多,这与D2剖面所在硬化路面表层速度值大有关。该剖面在地面标高50~55 m处等值线呈低比值特征,推测为第四系覆盖层;向深部 H/V 比值增高,推测为风化基岩面深度,反映出土石界面不同介质的差异性。该剖面在里程5、15 m处地面标高45 m处有两个明显低比值封闭异常,且出现低值下传现象,异常中心比值均 <1.6 ,异常两侧比值增大,推测这两处异常岩层较破碎或有溶蚀发育,根据微动探测结果显示,圈定异常区B。

2.3.3 D3剖面物探测量成果解释

D3线微动法测量放置三分量数字加速度仪12台,测线长220 m,点距10 m,采样率250,每个点有效同步观测时长为15 min。每次挪站平移全部台站,直到剖面测量完成为止。

从D3剖面微动谱比法 H/V 等值线断面图(图4)看,该剖面在里程40~60 m地面标高30~40 m处有一明显面积性低比值异常特征体,异常体均值 <1 ,推测该处异常为岩体互层或者局部地层岩体与

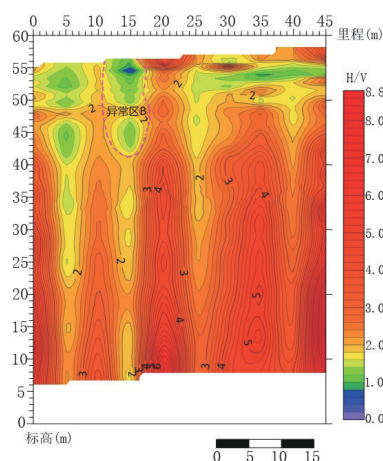


图3 D2剖面微动谱比法 H/V 等值线断面

周边岩体矿物成分不同引起的比值异常特征;在地表里程90 m地面标高40 m处有一明显低比值封闭异常,异常中心比值 <1 ,推测该处有溶蚀发育或岩石破碎裂隙较发育;在地表里程150 m地面标高42 m处有一较小相对低比值异常,异常中心比值 <1.4 ,推测该处有溶蚀发育或岩石破碎裂隙较发育;在地表里程200 m地面标高34 m处有一相对低比值异常,推测该处有溶蚀发育或岩石破碎裂隙较发育,根据微动探测结果显示,圈定异常区C、D。

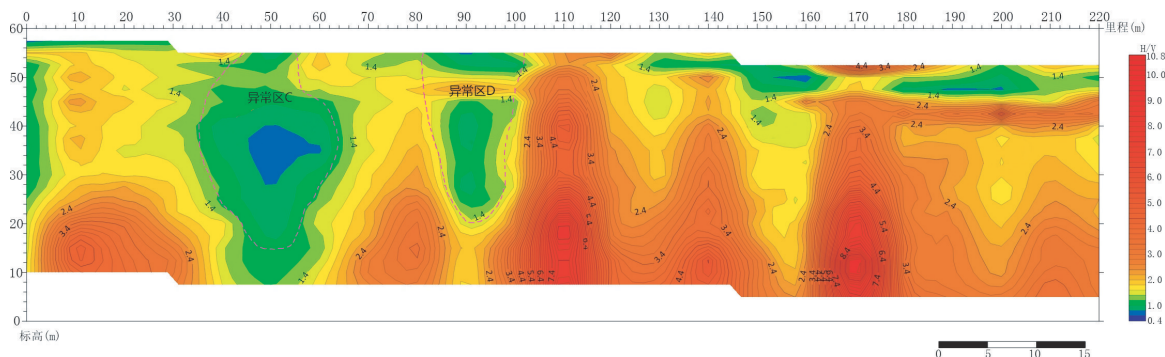


图4 D3剖面微动谱比法 H/V 等值线断面

2.4 钻孔取心验证

针对微动探测的A、B、C三处异常分别进行钻孔取心验证,钻孔布置参见图1。

2.4.1 异常区A钻孔取心验证

D1剖面线微动测试结果与ZK1钻孔取心结果对比见图5,对应D1剖面线里程0+28 m处,ZK1钻孔埋深2.3~6.8 m段揭露溶洞,黄褐色,充填度 $>90\%$,充填物多以大理岩岩屑为主,混杂岩块及黏性土,分选差,无磨圆,溶洞揭露厚度4.5 m,钻孔埋深6.8~20.0 m为强风化角砾状大理岩,该段岩心整体

破碎较严重,岩心成角砾状,局部见微弱溶蚀痕迹,溶隙、溶坑可见发育,反映在微动 H/V 等值线上数值为0.7~1.4,整体处于低值区,溶洞发育位置、基岩破碎位置与微动测试结果有着较好的吻合性。

2.4.2 异常区B钻孔取心验证

D2剖面线微动测试结果与ZK2钻孔取心结果对比见图6,对应D2剖面线里程0+15 m处,ZK2钻孔埋深1.3~4.2、6.8~9.0、10.5~11.5 m段揭露溶洞,黄褐-红褐色,充填度 $>90\%$,充填物多以大理岩岩屑为主,混杂岩块及黏性土,分选差,无磨圆,

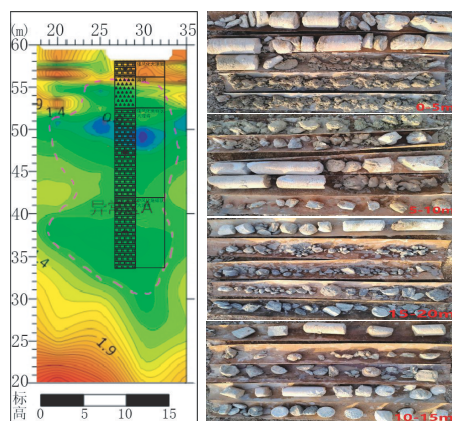


图5 异常区A与ZK1钻孔取心结果对比

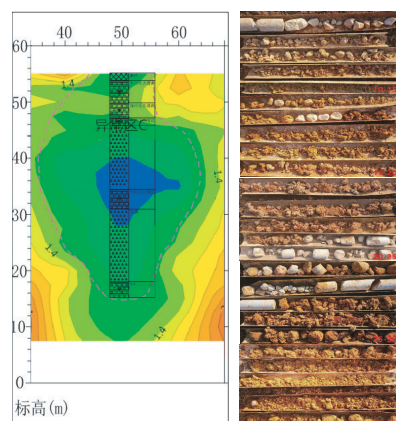


图7 异常区C与ZK3钻孔取心结果对比

溶洞揭露厚度在1.0~2.9 m,反映在微动 H/V 等值线上数值为0.7~1.4,整体处于低值区,溶洞发育位置与微动测试结果有着较好的吻合性。

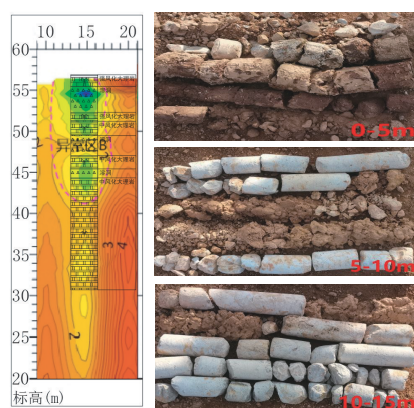


图6 异常区B与ZK2钻孔取心结果对比

2.4.3 异常区C钻孔取心验证

D3剖面线微动测试结果与ZK3钻孔取心结果对比见图7,对应D2剖面线里程0+50 m处,ZK3钻孔埋深10.5~23.3、27.3~35.0 m段揭露溶洞,黄褐-红褐色,充填度 $>80\%$,充填物多以大理岩岩屑为主,混杂岩块及黏性土,分选差,无磨圆,溶洞揭露厚度在7.7~12.8 m,反映在微动 H/V 等值线上数值为0.7~1.2,整体处于低值区,溶洞发育位置与微动测试结果有着较好的吻合性。

3 结语

(1)依托烟台市黄渤海新区某项目挡墙工程,采用微动谱比法对勘察区进行物探勘查,发现异常4处,并通过钻探取心验证,结果表明,微动 H/V 等值线对岩溶敏感,大理岩岩溶发育段的微动 H/V 等值线上

数值多集中在为0.5~1.5,整体处于低值区,与围岩整体存在较大差异,微动测试结果可作为判断岩溶的依据,同时为相似工程提供了工程类比经验。

(2)综合微动探测方法与对应位置钻孔取心结果分析,通过微动探测方法圈定的异常区域,能够很好地识别地下软弱区域位置,经钻孔验证准确度高。

(3)微动测试解释中的数据采集受地表地形条件、干扰程度等因素影响,推断解释的异常空间位置可能存在一定程度的探测误差,后期可结合其他探测手段进行复解修正。

参考文献:

- [1] 龙称心,陈喜峰,牛广天.微动探测方法在城市隐伏岩溶探查中的应用[J].路基工程,2024,(6):133-138.
- [2] 范长丽,贾慧涛,蔡向阳.微动在城区岩溶勘探中的效果研究[J].工程地球物理学报,2020,17(5):652-657.
- [3] 卓启亮,于强.微动探测方法在城市工程地质勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2020,17(5):658-664.
- [4] 朱红兵,陈国光,赵东东,等.微动探测技术在地层结构研究中的应用——以福州滨海新城核心区为例[J].华东地质,2022,43(3):297-305.
- [5] 黄光明,徐佩芬,李长安,等.覆盖区岩溶溶洞的微动探测试验研究——以福建永安大湖盆地为例[J].煤炭学报,2019(2):536-544.
- [6] 傅庆凯.微动 H/V 谱比法提取基岩面埋深的方法技术研究与应用[J].工程地球物理学报,2024,21(3):372-382.
- [7] 侯智超,柴新朝,方成,等.微动技术在轨道交通勘察地质分层中的应用[J].工程勘察,2024,52(6):65-71.
- [8] 洪欧洲.微动在马鞍山市某铁矿采空区勘察中的应用研究[J].地下水,2025,47(1):198-199,252.
- [9] 孟科,杨浩,顾勤平,等.利用微动台阵初勘目标区断裂位置及地层分布情况——以滨海区评为例[J].防灾减灾工程学报,2024,44(4):969-976.
- [10] 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(5):162-164,172.

(编辑 王文)