

谢朋,王秋良,李井冈,等.SPAC 法在江汉平原地层结构分层中的应用[J].地震工程学报,2019,41(3):717-723.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.717

XIE Peng, WANG Qiuliang, LI Jinggang, et al. Application of SPAC Method on Stratification of Stratigraphic Structure in Jianghan Plain[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 717-723. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.717

SPAC 法在江汉平原地层结构分层中的应用

谢 朋¹, 王秋良^{1,2}, 李井冈¹, 廖武林¹, 沈雨忆^{1,3}

(1. 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 湖北 武汉 430071; 2. 浙江省地震局, 浙江 杭州 310013;
3. 厦门万科房地产有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 微动探测可以确定岩土性质差异较大的地质界面。利用微动探测方法, 获取 S 波速度剖面, 对潜江市浩口中学地下介质结构分层, 并与该场地地震监测井项目的钻孔对比。结果表明, 微动探测方法能较好分辨地层结构, 对岩土性质差异较大的地层探测效果良好, 可为地层分层提供重要依据。

关键词: 微动探测; 空间自相关法; 地层结构; 岩土性质差异

中图分类号: P315.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0717-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.717

Application of SPAC Method on Stratification of Stratigraphic Structure in Jianghan Plain

XIE Peng¹, WANG Qiuliang^{1,2}, LI Jinggang¹, LIAO Wulin¹, SHEN Yuyi^{1,3}

(1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. Earthquake Agency of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, Zhejiang, China;

3. Xiamen Vanke Co., Ltd, Xiamen 361000, Fujian, China)

Abstract: The microtremor survey can be used to evaluate geologic interfaces with large differences in their geotechnical properties. Using the microtremor survey method to obtain the S-wave velocity profile, we then compared the stratigraphic strata at the Haokou middle school in Qianjiang City with the borehole results obtained by the earthquake monitoring project at the site. The results show that this method has the advantages of high resolution of the stratigraphic structure and good exploration of strata with different geotechnical properties, which can provide an important basis for understanding the stratigraphic stratification.

Keywords: microtremor survey; spatial autocorrelation method; stratigraphic structure; geotechnical property

0 引言

微动探测法是通过瑞利波频散曲线反演, 获得 S 波速度结构的地球物理探测方法^[1-4]。近年来,

国内外许多学者利用微动台阵观测方法探测地层速度结构。2001 年, Satoh 利用微动台阵方法探测, 获取台湾 Taichung 盆地 1.4 km 深度范围的速度结构^[5]; 2003 年, Scherbaum 根据微动相关资料, 用单

收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(41572354); 中国地震局地震研究所发展基金项目(IS201616251)

第一作者简介: 谢 朋(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微动探测理论及应用研究。E-mail: xipa813@126.com。

通信作者: 王秋良(1972—), 男, 副研究员, 主要从事地震地质、勘探地震学等方面的研究。E-mail: wql0703@163.com。

台和台阵技术测出了德国 Cologne 市附近的浅层横波速度剖面^[6]。2007 年,何正勤等利用嵌套正三角形台阵进行地热勘探时,获得了深度 3 km 范围内的 S 波速度结构^[7]。2014 年,李细兵等采用微动探测技术,探测盆地浅部地层结构,获取了基本的地层层位信息^[8]。2017 年,翟法智等利用二重圆形观测台阵探测城市暗浜,埋埋物深度误差 0.2 m 以内^[9]。

地层岩土性质差异是微动测深划分地层的物理前提^[10]。不同时代地层分界面岩土性质差异较大,地层波速差异也较大。2011 年,魏运浩利用微动台阵方法探测江汉平原、长江大堤地下结构,分别采用 SPAC^[11]法和 F-K 法获取 S 波速度结构,两种方法都较好揭示出深度为 60 m 和 110 m 处的砾石层^[12]。2013 年,徐佩芬等将微动探测技术应用于地热井选址,利用嵌套正三角形台阵划分岩层,获得了 3 km 深度范围内的地层速度结构,对比地热井钻探结果,认为探测岩性差异较大的地层分界面时,微动探测的误差较小。

本文利用微动台阵技术,探测潜江市浩口镇浩口中学以及监利县新沟镇福娃集团的地层分层情况,如图 1 所示,利用 SPAC 法获取 S 波速度结构并反演地层结构。将微动探测的地层结构情况与潜江市地震监测井项目钻孔对比,分析微动探测方法在地层探测中的应用前景。

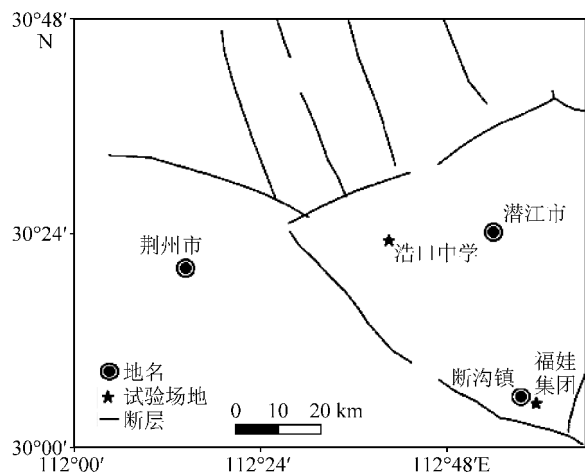


图 1 潜江浩口中学观测点位置

Fig.1 Location of observation points at Haokou middle school, Qianjiang

1 观测场地与观测系统

1.1 场地区域地质概况

实验测区位于江汉平原,江汉平原主体属扬子准地台江汉断拗,中国东部新华夏构造体系沉陷带的一部分,地势平缓,其构造框架在侏罗纪末期发生

的燕山运动期间已成雏形;目前江汉平原的基本轮廓,则是自第四纪以来在新构造运动的作用下,由 12 个构造单元组合而成的复式断陷盆地上重新陷落逐步形成的^[13]。该区第四纪以来新沟一带成为沉降中心,沉积厚度范围为 200~300 m,岩相特点主要为河湖相,较薄的湖沼相黏土、淤泥以及淤泥质黏土与较厚的河床相砂砾交替出现。因为受到地质构造的控制,江汉盆地具有明显的多层环状分带性。由海拔 1 000 m 以上的构造侵蚀或剥蚀山地,向内过渡到 300 m 以内的丘陵、岗地和阶地,以及中部高程 50 m 以内的河湖交错平原。

1.2 观测系统

本文采用 SPAC 法进行探测及数据处理,该方法由 Aki 在 1957 年提出,是一种基于平稳随机过程理论,从微动信号中提取面波频散信息的方法^[14],一般采用圆形台阵布设。其基本原理如下。

设在 A、B 两个测点观测,其位置矢量分别为 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$,其分别用式(1)、(2)表示:

$$X(t, \mathbf{r}_1) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \exp\{i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r}_1\} dZ(\omega, k) \quad (1)$$

$$X(t, \mathbf{r}_2) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \exp\{i\omega t + i\mathbf{k}\mathbf{r}_2\} dZ(\omega, k) \quad (2)$$

式中: ω 为角频率; k 为波数; Z 为正交随机过程。

对于 A、B 两点得到的记录,其空间自相关函数 S 可定义如下:

$$S(t, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) = E[X^*(t, \mathbf{r}_1) \cdot X(t, \mathbf{r}_2)] \quad (3)$$

式中: E 为数学期望; $*$ 是复数共轭。

假定微动主要由面波的基阶振型构成,波数 k 为角频率 ω 的单值函数,即 $k = k(\omega)$,因此式(3)可写成如下形式,即:

$$S(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{2\pi} \exp\{ik(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \cos(\theta - \varphi) \cdot h(\omega, \varphi) d\varphi \right] d\omega \quad (4)$$

定义空间自相关系数 $\rho(r, \omega)$ ^[15]:

$$\rho(r, \omega) = J_0 \left(\frac{\omega r}{c(\omega)} \right) \quad (5)$$

式中: $c(\omega)$ 为角速度。

由以上可知,通过半径 $r = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ 的圆形台阵得到的空间自相关系数与频率有关,呈零阶第一类 Bessel 函数形式变化。

为了使不规则的人工震源少,微动的稳定性好,实验选择晚上或清晨观测。布设台阵时,须采用多个观测台阵组成的多重观测系统,以满足探测的深度和精度要求,通常探测深度 $H > (3 \sim 5r)$ ^[16]。本文选取的测区台阵布设成三重圆形台

阵,由 10 个观测点组成,1 个置于圆心、9 个分别置于内接三角形顶点,半径 $R=17.3\text{ m}$,台阵布局如图 2(a) 所示。福娃集团测区为水泥路,场地空间有限,因而台阵布设成直线型,间距范围为 $10\sim 50\text{ m}$,

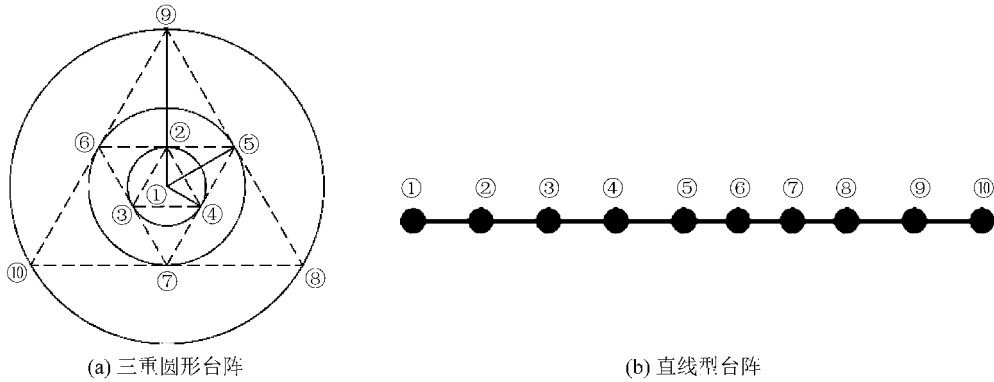


图 2 三重圆形、直线型台阵测点布局

Fig.2 Layout of measuring points at circular array and straight array

台阵布局如图 2(b)所示。

观测时,采用仪器的技术参数如表 1 所列,其频带范围为 $1\sim 100\text{ Hz}$,采用 GPS 授时,确保台阵观测方法中不同仪器记录的同步性。选定的采样率为 100 Hz ,每个测点有效观测时长不少于 30 min 。

1.3 仪器一致性检测

在野外进行数据采集之前,须对仪器进行一致性检测,计算获得的自相关系数以及功率谱如图 3 所示,结果表明,在有效频率范围内仪器一致性高于 95% ,能满足微动探测实验的要求。

表 1 微动仪器的技术参数

Table 1 Technical parameters of the microtremor instrument

速度输出带宽 /Hz	速度输出 v /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最低杂波 共振/Hz	交叉灵敏度 /dB	工作电压 /V	工作电流 /mA
1~100 (标准)	2×400 (标准)	$>450\text{ Hz}$	>65	10~36	38

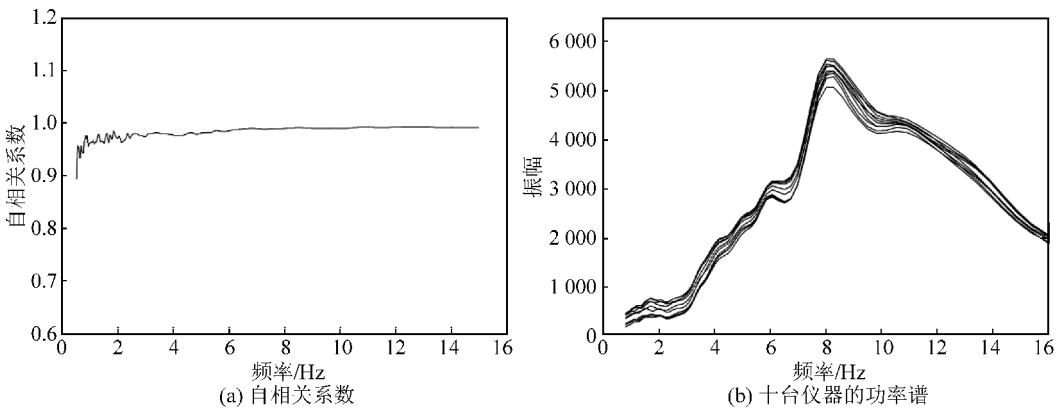


图 3 一致性测试结果

Fig.3 Result of consistency tests

2 微动数据处理及结果

2.1 数据处理方法

对于测区微动记录的数据,先滤掉 $1.5\sim 15\text{ Hz}$ 之外的频段,然后按 20.48 s 的时窗长度将数据分成若干段,分别计算每个时窗段内的傅氏谱和功率谱,再计算不同台阵对的空间自相关函数,通过方向平

均获得空间自相关系数,同时拟合零阶第一类 Bessel 函数。通过给定的频率值 f_r ,算出其对应相速度 v_r ,从而获得测点的相速度频散曲线如图 4 所示。

2.2 数据处理结果

本文微动探测方法只需要得到岩土性质的相对变化情况,因此从实测微动数据中提取相速度频散

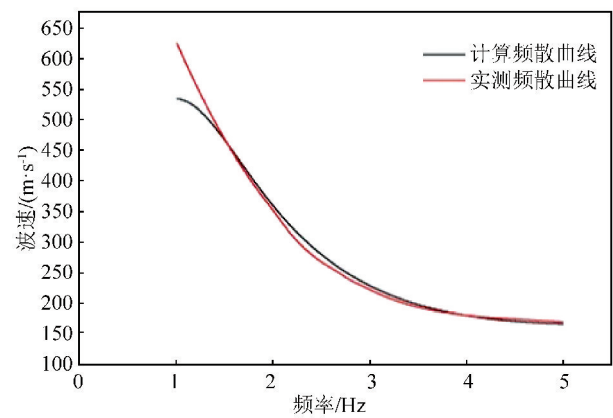


图 4 测点点位频散曲线

Fig.4 Observed dispersion curves at each point

曲线后,需要依据公式(6)计算出 S 波速度 v_x :

$$v_{x,i}=\left(\frac{t_i\cdot v_{r,i}^4-t_{i-1}\cdot v_{r,i-1}^4}{t_i-t_{i-1}}\right)^{\frac{1}{4}}\tag{6}$$

式中: v_r 为瑞利波波速; t_i 为周期^[17]。

3 结果与讨论

3.1 潜江浩口中学观测场地

根据潜江市区域地质情况,建立地层结构分层模型,使用近邻法反演地下速度结构,并与潜江市地震监测井项目钻孔对比分析(图 5)。在潜江市地震监测井项目钻孔深度范围内,地层揭示为 4 层:第一层,0~15 m,粉质黏土,局部夹薄层粉土;第二层,

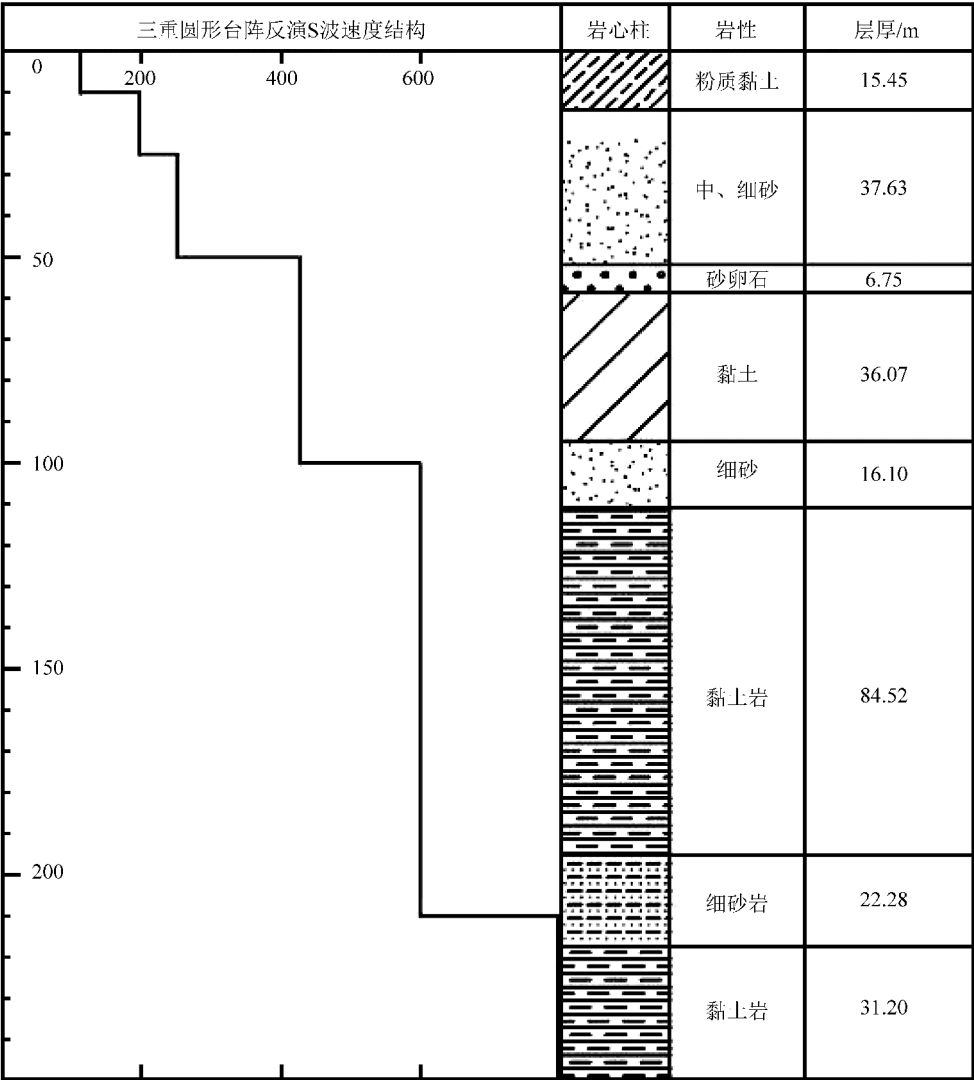


图 5 测点反演 S 波速度结构模型及与潜江地震监测项目钻孔对比

Fig.5 Inversion of S-wave velocity structure model and comparison with drilling of Qianjiang earthquake monitoring project

15~60 m,细砂、中砂、砂卵石;第三层,60~112 m,黏土,夹细砂;第四层,112~219 m,黏土岩与细砂

岩互层;第五层,219 m 以下为黏土岩。

(1) 我们对实测频散曲线反演,获得如表 2 所

列 S 波速度分层结果,波速分布上低下高,没有回旋低速层,大致可以分为 5 层;第 1 层深度在 10~20 m,横波速度约为 200 m/s;第 2 层深度在 50 m 左右,横波速度约 350 m/s;第 3 层深度在 100 m 左右,横波速度约 500 m/s;第 4 层深度在 210 m,横波速度 750 m/s;第 5 层深度在 210 m 以下,横波速度 750 m 以上。

(2) 微动测深结果与在潜江市地震监测井项目

表 2 微动探测与潜江地震监测项目钻探结果对比

Table 2 Comparison of drilling results of microtremor survey and Qianjiang earthquake monitoring project

地层 序号	岩性	层波速 v $/(m \cdot s^{-1})$	微动测深 $/m$	地层底界 $/m$
1	粉质黏土	113	10	15.45
2	中细砂	198	25	-
3	砂卵石	251	50	59.83
4	黏土	427	100	112
5	黏土岩	598	210	196.52
6	细砂岩	796	250	250

钻孔对比如表 2 所列,较好揭示深度 50 m 处砂卵石与黏土之间的界面深度以及 100 m 左右处细砂和黏土岩之间的界面

(3) 表 2 所列,微动探测法能确定岩性差异较大的地层分界面,探测效果良好。同时,微动探测结果仍存在一定误差,由于测点区离 G318 国道较近约 100 m,该道路交通繁忙,干扰较大。

3.2 监利福娃集团观测场地

王秋良等^[18]在观测场地附近开展了沉积学钻孔研究。钻孔揭示,深度 0~20 m 为黏土层;深度 20~60 m 为粉砂和细砂;深度 60~110 m 为粗砂层并含厚层砾石;深度 110~150 m 由多层厚度不一的砾砂层和粗砂层相间组成;深度 150~200 m 为稳定的湖相沉积黏土层;深度 200~300 m 由多层相间的细砂层、粗砂层以及夹杂砾砂组成。钻孔揭示结果如图 6 所示。

(1) 我们对实测频散曲线反演,获得如图 6 所

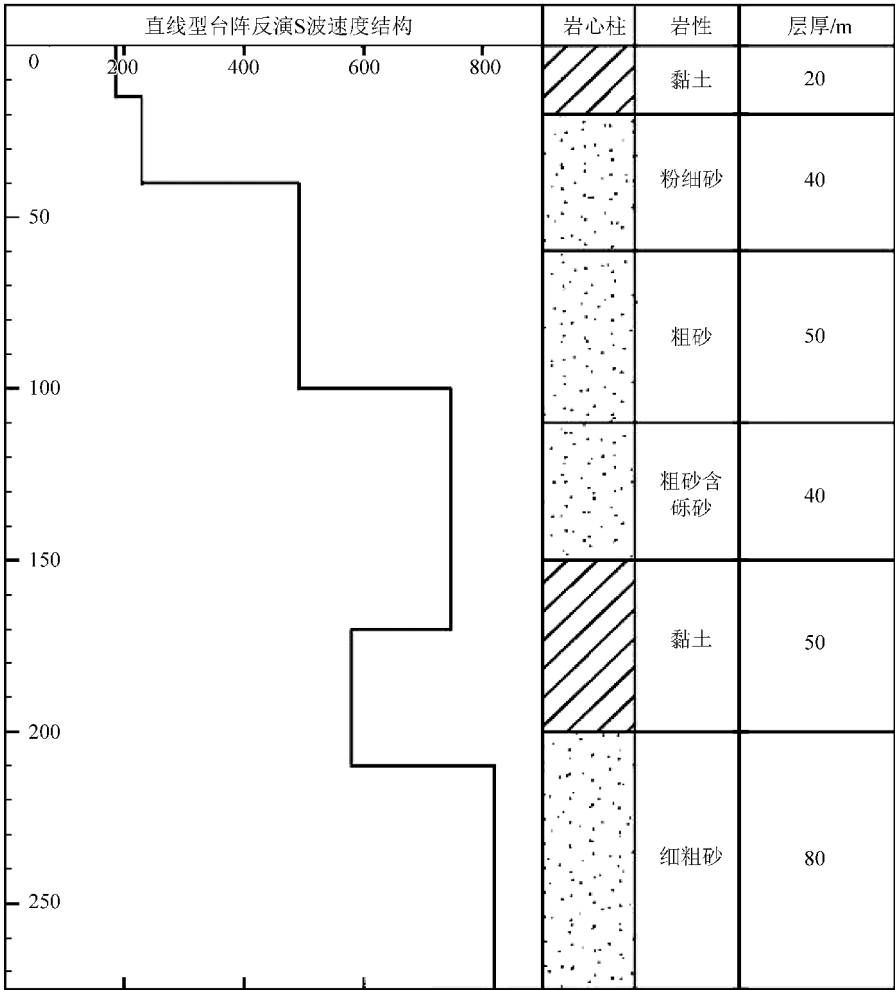


图 6 测点反演 S 波速度结构模型及与周老孔对比

Fig.6 Inversion of S-wave velocity structure model and comparison with Zhoulao borehole

示 S 波速度分层结果,微动测深结构与钻孔对比如表 5 所列,S 波速度分布基本为上低下高,在 170~210 m 处有回旋低速层,较好揭示 15 m 左右处砂土层与黏土之间的界面和 170 m 左右粗砂和黏土的分界面以及 210 m 左右处黏土和细粗砂的分界面。

(2) 推测在 170~210 m 处的低速层为沉积的老黏土。微动探测结果 60 m 处为粉砂、细砂,而钻孔结果 40 m 处为粗砂,微动深度有一定误差,分析其原因主要是粗砂和粉砂及细砂岩土性质差异不太大,以及密度都较高,导致探测精度不够高。

(3) 表 3 所列,微动探测法能确定岩性差异较大的地层分界面,探测效果良好。同时,微动探测结果仍存在一定误差,由于测点区离城市主干道较近约 100 m,该道路交通繁忙,干扰较大。

表 3 微动探测与新沟镇钻探结果对比
Table 3 Comparison of microtremor survey results and drilling results in Xingou town

地层 序号	岩性	层波速 V ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	微动测深 /m	地层底界 /m
1	黏土	186	15	20
2	粉砂、细砂	229	40	60
3	粗砂	492	100	110
4	粗砂含砾砂	746	170	150
5	黏土	581	210	200
6	细粗砂	820	280	280

4 结论

微动探测法通过获得 S 波速度结构,反演地层结构,能直观显示岩土性质的纵向变化,对于地层岩性差异较大的结构,其探测效果良好,与钻探法相比,微动探测法不受场地条件限制,成本较低,是经济、高效的地球物理探测手段,可应用于岩土层结构的快速探测。

本文所做观测实验因场地外界干扰大,场地空间有限,酷暑季节影响,微动数据产生一定影响。以后实验尽量考虑此因素,保证微动信号的纯净。

本文基于微动探测方法,得到江汉平原地区潜江及监利地层分层结构,对比钻孔结构显示,微动探测法能有效探测地层分层结构,对于岩性差异较大的地层,其探测效果良好。同时,本文的探测结果可为江汉平原的其他区域提供地层结构分层的参考依据,也为第四系等松散沉积层的地层结构探测提供借鉴。

参考文献(References)

[1] 徐佩芬,侍文,凌苏群,等.二维微动剖面探测“孤石”:以深圳地

铁 7 号线为例[J].地球物理学报,2012,55(6):2120-2128.
XU Peifen,SHI Wen,LING Suqun,et al.Mapping Spherically Weathered“Boulders”Using 2D Microtremor Profiling Method:A Case Study Along Subway Line 7 in Shenzhen[J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(6):2120-2128.
[2] 宗成兵,田恒星.花岗岩地层地铁隧道盾构孤石探测及处置新方法[J].科学技术与工程,2015,15(26):11-18.
ZONG Chengbing,TIAN Hengxing.Boulder Detection and Treatment Methods in Granite Formation Subway Shield Tunnel[J].Science Technology and Engineering,2015,15(26):11-18.
[3] 李井冈,姚运生,张丽芬,等.微动探测方法软件的实现[J].地震工程学报,2017,39(2):376-380.
LI Jinggang,YAO Yunsheng,ZHANG Lifen,et al.Implementation of the Microtremor Survey Method Software[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(2):367-380.
[4] 严武建,吴志坚,车爱兰,等.岷县漳县 6.6 级地震黄土场地放大效应地脉动测试研究[J].地震工程学报,2013,35(3):477-482.
YAN Wujian,WU Zhijian,CHE Ailan,et al.Microtremor Measurement Research of Amplification Effect in the Loess Site of the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):477-482.
[5] SATOH T.S-Wave Velocity Structure of the Taichung Basin,Taiwan,Estimated from Array and Single-Station Records of Microtremors[J].Bulletin of the Seismological Society of America,2004,91(5):1267-1282.
[6] SCHERBAUM F,HINZEN K G,OHRNBERGER M.Determination of Shallow Shear Wave Velocity Profiles in the Cologne,Germany Area Using Ambient Vibrations[J].Geophysical Journal International,2003,152(3):597-612.
[7] 何正勤,丁志峰,贾辉,等.用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J].地球物理学报,2007,50(2):492-498.
HE Zhengqin,DING Zhifeng,JIA Hui,et al.To Determine the Velocity Structure of Shallow Crust with Surface Wave Information in Microtremors[J].Chinese Journal of Geophysics,2007,50(2):492-498.
[8] 李细兵,范小平.基于微动技术探测盆地浅部地层速度结构[J].震灾防御技术,2014,9(4):821-828.
LI Xibing,FAN Xiaoping.Detection of Shallow Basin Velocity Structure Based on the Microseism Technology[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2014,9(4):821-828.
[9] 翟法智,徐佩芬,潘丽娜,等.宁波轨道交通暗浜路勘察物探方法研究[J].地球物理学进展,2017,32(4):1856-1861.
ZHAI Fazhi,XU Peifen,PAN Lina,et al.Study on Geophysical Methods of Underground Silt Exploration in Ningbo Rail Transit[J].Progress in Geophysics,2017,32(4):1856-1861.
[10] 徐佩芬,李世豪,杜建国,等.微动探测:地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J].岩石学报,2013,29(5):1841-1845.
XU Peifen,LI Shihao,DU Jianguo,et al.Microtremor Survey Method:A New Geophysical Method for Dividing Strata and Detecting the Buried Fault Structures[J].Acta Petrologica

Sinica,2013,29(5):1841-1845.

[11] 徐佩芬,李世豪,凌甦群,等.利用 SPAC 法估算地壳 S 波速度结构[J].地球物理学报,2013,56(11):3846-3854.

XU Peifen, LI Shihao, LING Suqun, et al. Application of SPAC Method to Estimate the Crustal S-wave Velocity Structure[J].Chinese Journal of Geophysics,2013,56(11):3846-3854.

[12] 魏运浩,李井冈,姚运生.微动阵列法探测地下结构的实验研究[J].大地测量与地球动力学,2015,35(1):167-171.

WEI Yunhao,LI Jinggang,YAO Yunsheng,et al.Experimental Study on Detecting the Subsurface Structure Using Microtremor Array Survey Method[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2015,35(1):167-171.

[13] 吴立.江汉平原中全新世古洪水事件环境考古研究[D].南京:南京大学,2013.

WU Li. Environmental Archaeology of the Mid-Holocene Palaeofloods in the Jiangnan Plain, Central China [D]. Nanjing: Nanjing University,2013.

[14] AKI K. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors [J]. Bull. Earthq. Res. Inst,1957,35:415-456.

[15] 李传金,徐佩芬,凌甦群.微动勘探法圆形阵列台站数量和分布方式研究[J].科学技术与工程,2016,16(7):27-30,46.

LI Chuanjin,XU Peifen,LING Suqun.Study on Staton Number and Arrangement of Circle Array in Microtremor survey Method[J]. Science Technology and Engineering,2016,16(7):27-30,46.

[16] 孙勇军,徐佩芬,凌甦群,等.微动勘查方法及其研究进展[J].地球物理学进展,2009,24(1):326-334.

SUNYongjun,XU Peifen,LING Suqun, et al. Microtremor Survey Method and Its Progress[J].Progress in Geophysics,2009,24(1):326-334.

[17] 付微,徐佩芬,凌苏群,等.微动勘探方法在地热勘查中的应用[J].上海国土资源,2012,(3):71-75.

FU Wei,XU Peifen,LING Suqun,et al.Application of the Microtremor Survey Method to Geothermal Exploration [J]. Shanghai Land &. Resources,2012,(3):71-75.

[18] 王秋良,胡思辉,李长安.周老镇钻孔砾石层重矿物特征及地质意义[J].中国地质,2009,36(4):878-884.

WANG Qiuliang HU Sihui, LI Chang'an. Heavy Mineral Characteristics of Gravel Layers in the Zhoulao Town Borehole[J].Geology in China,2009,36(4):878-884.

(上接第 709 页)

[12] 陈国兴,谢君斐,张克绪.土的动模量和阻尼比的经验估计[J].地震工程与工程振动,1995,15(1):73-84.

CHEN Guoxing, XIE Junfei, ZHANG Kexu. The Empirical Evaluation of Soil Moduli and Damping Ratio for Dynamic Analysis[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1995,15(1):73-84.

[13] HARDIN B O,DRNEVICH V P.Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects[J].Journal of Terramechanics,1973,9(2):102.

[14] VUCETIC M, DOBRY R.Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response[J].Journal of Geotechnical Engineering,1991,117(1):89-107.