

基于HVSr法的微动探测技术在富水砂卵石层地铁工程中的应用研究

李伟强¹, 霍曼琳¹, 田新丽², 房师涛²

¹兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

²中电建铁路建设投资集团有限公司, 北京

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年3月19日; 发布日期: 2023年3月29日

摘要

在自稳性差的高富水砂卵石复杂地层中进行地铁盾构法施工, 不仅施工技术难度大, 而且工程风险极高, 为降低施工风险及施工成本, 迫切需要在盾构施工前获取更全面、更精准的区域地质信息, 传统地勘方法存在明显的不足与缺陷, 难以提供全面、精准的地质信息。本文以成都地铁18号线一期工程土建2标为依托工程, 针对成都富水砂卵石复合地层地质勘探问题, 将基于H/V谱比法的微动探测技术引入传统地铁盾构施工项目, 该技术能够最大程度地弥补地质信息盲区, 进而帮助施工单位减小地铁盾构区间滞后沉降风险, 降低盾构区间地勘施工成本, 同时为今后类似地勘工程提供宝贵的经验。

关键词

盾构隧道, 富水砂卵石层, H/V谱比法, 微动探测技术

Study on the Application of Micromotion Detection Technology Based on HVSr Method in Water-Rich Sand Pebble Layer in Stone Layer Subway Engineering

Weiqiang Li¹, Manlin Huo¹, Xinli Tian², Shitao Fang²

¹School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²Power China Railway Construction and Investment Group Co., Ltd., Beijing

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: Mar. 19th, 2023; published: Mar. 29th, 2023

文章引用: 李伟强, 霍曼琳, 田新丽, 房师涛. 基于HVSr法的微动探测技术在富水砂卵石层地铁工程中的应用研究[J]. 土木工程, 2023, 12(3): 307-320. DOI: 10.12677/hjce.2023.123035

Abstract

In the poor self-stability of rich water sand pebble complex formation in underground shield construction, not only construction technology is difficult, but also engineering risk is high, to reduce the construction risk and construction cost, an urgent need before shield construction to more comprehensive and more accurate regional geological information, traditional geological exploration method has obvious deficiencies and defects, it is difficult to provide comprehensive and accurate geological information. In this paper, civil engineering Standard 2 of Phase I project of Chengdu Metro Line 18 is taken as the supporting project. Aiming at water-rich sand pebble composite formation geological exploration problems in Chengdu, the micromotion detection technology based on the H/V spectrum ratio method is introduced into the traditional subway shield construction project, the technology can maximize the geological information blind area, and help construction units reduce the risk of subway shield interval lag settlement, reduce the cost of shield interval geological exploration construction, and provide valuable experience for similar geological exploration engineering in the future.

Keywords

Shield Tunnel, Water-Rich Sand Pebble Layer, H/V Spectral Ratio Method, Micromotion Detection Technology

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济的增长,城镇化进程明显加快,城市轨道交通的重要性也就凸显了出来。地铁属于城市轨道交通建设范畴,早期的轨道交通建设地勘手段单一,随着轨道交通线网的加密,地铁建设区域的情况越来越复杂,施工难度越来越大。以成都地区地铁建设为例,在盾构施工过程中常常会遇到地面密集建筑群、富水砂卵石复合地层、地下管网错综复杂等一系列问题。面对这样的情况,以钻探和传统地球物理手段为主的地勘方法存在明显缺陷和不足:场地条件限制多、抗干扰能力差、容易出现数据失真、探测准确性不够等。由此带来的地质信息盲区会导致潜在的施工安全隐患及额外经济损失[1]。

微动探测技术作为一种新型技术,微动信号的采集具有抗干扰能力强、易采集、无损害等优点,微动探测方法具有施工形式灵活、施工效率高、无需人工震源等优点,可以提供卓越周期、不同岩性层厚度、地层横波速度等信息,在探测城市地质结构、场地效应评估上能发挥巨大作用,为城市地下空间精细探测提供有力手段[2]。

微动探测方法的基本理论是在 20 世纪 50 年代提出的,1957 年,日本地震学家安艺敬一(Aki)详细推导论述了一种从微动记录中提取面波频散曲线的空间自相关方法(SPAC 法) [3]。1971 年, Nogoshi 等提出了新的分析方法——单点谱比法(HVSR, H/V 谱比法) [4]; 1989 年,日本学者 Nakamura 推广了 Nogoshi 和 Igarashi 于 1971 年首先引入的单点微动 H/V 谱比法,该方法认为,通过竖向和水平向记录的频谱比值结果,可以提取出场地的卓越频率和震动放大系数[5]。

2020 年,张若晗和徐佩芬等人基于 H/V 谱比法来探测研究济南城市中心的土石分界面[6],得到了灰岩的频率-深度关系,结果较为准确地确定了土石分界面。同年,张新等将微动探测技术运用于城市地铁盾构隧道施工[1],采用微动 H/V 方法,获得了分辨率较高的近地表地层结构剖面,所得剖面地质信息

丰富、细节揭示清楚,能够反映测区范围内复杂的地质情况,为地铁盾构施工提供参考,降低了不良地质体对工程的影响。

鉴于此,本文以成都地铁 18 号线一期工程土建 2 标为依托工程,主要研究基于 H/V 谱比法微动探测技术在地铁工程中的应用,以期对新型微动探测技术在城市轨道交通建设中的推广和应用起到积极的作用。

2 微动无损探测理论

2.1. 微动的定义

地球表面即便没有发生明显可以感知的地震,也始终存在着各种频率的振动,这类振动称为微动(Microtremor)。它的主要特点是没有特定的震源和具有很宽的频谱,在空间上具有很好的稳定性。研究表明,不同频段的微动能反映不同深度的构造特性[7]。其振动幅值大约为 10^{-4} 至 10^{-2} mm 之间,加速度只有 $1\sim 100 \mu\text{m/s}^2$,频率范围主要集中在 $0.1\sim 50$ Hz 范围,这远远低于人们能够感知的幅度。直到 19 世纪末,检波器的出现使得地震学家可以观察地表细微的运动。微动的产生源自人类日常活动和自然因素,而人类活动和自然因素所产生的振动是伴随时间变化的,因此微动信号同样也是时间的函数,并且变化复杂。

从成分构成上来看,微动信号中包含有体波和面波成分,其本身在时间和空间上是不规律的,高度变化的。微动信号带有丰富的信息。这些信息与微动信号源、传播机制以及地层结构等有关。微动源由观测场地周围所有振源所构成,存在很强的随机性,但是在一定的时间尺度内,可以认为它是一种平稳随机过程。由于多重反射和折射,微动信号在传播中,积累了场地地层原始特征的信息[8]。正是这种不随时间变化的地层固有特性,使得微动信号存在某种统计性规律。因此,可以通过采集微动信号来分析观测点下覆地层的结构信息。

2.2. H/V 谱比法

研究表明,在场地上仅用一个三分量检波器观测到的微动的水平向一垂直向(H/V)谱比与场地垂直入射 S 波的放大因子相似。这表明,微动的 H/V 谱可以反映场地的 V_S 剖面,因此如果已知深部地层的 V_S 值,则可以估计出相应地层厚度的变化。基于 Harkrider 提出的面波在层状半空间传播的理论[9],Arai 和 Tokimatsu 提出了考虑基阶及高阶面波影响的模拟微动 H/V 谱的理论公式[10]。他们指出,通过场地 V_S 剖面计算出的理论 H/V 谱与在场地观测的微动 H/V 谱能很好地匹配,相反,通过对场地微动 H/V 谱的反演能估计出场地的 V_S 结构。因此,H/V 谱比法可以作为浅层勘探工具,得出浅地表地层结构。

图 1(a)显示了用于推导理论 H/V 谱的地层模型。该地层模型假设由 N 层相互平行的均匀各向同性半无限弹性介质组成[11]。每一层以其厚度 H 、密度 ρ 、P 波速度 V_P 和 S 波速度 V_S 为特征。同时,假设角频率为 ω 的垂直及水平点力的傅里叶时间变换 $L_V(\omega)$ 和 $L_H(\omega)$ 在距观测点(原点)距离大于一个波长时是随机分布的(见图 1(b)) [12]。虽然每个点源都产生面波和体波,并它们都在介质中传播,但体波比面波衰减快因此瑞利波和勒夫波在距点源大于一个波长[13] [14] (见图 1(b))时占优势。

因此,从第 i 个垂直点源在频率为 ω 时产生的第 m 阶瑞利波的垂直和水平分量的功率可表示为:

$$P_{VRm}^V(\omega) = L_V^2(\omega) A_{Rm}^2(\omega) \left| H_0^{(2)}(k_{Rm} r_i) \right|^2 \exp(-2hk_{Rm} r_i) \quad (2.1)$$

$$P_{HRm}^V(\omega) = L_V^2(\omega) A_{Rm}^2(\omega) \left(\frac{u}{\omega} \right)_m^2 \left| H_1^{(2)}(k_{Rm} r_i) \right|^2 \exp(-2hk_{Rm} r_i) \quad (2.2)$$

式中, A 为介质响应因子, k 是波数, u/ω 是瑞利波在自由表面的 H/V 比[15],下标 R 表示瑞利波, r 是点源到原点的距离, $H_1^{(2)}$ 是 n 阶的第二类 Hankel 函数, h 是地层的散射阻尼比($h > 0$)。同理可得,从第 i 个水平点源产生的频率为 ω 的第 m 阶勒夫波的水平分量的功率为:

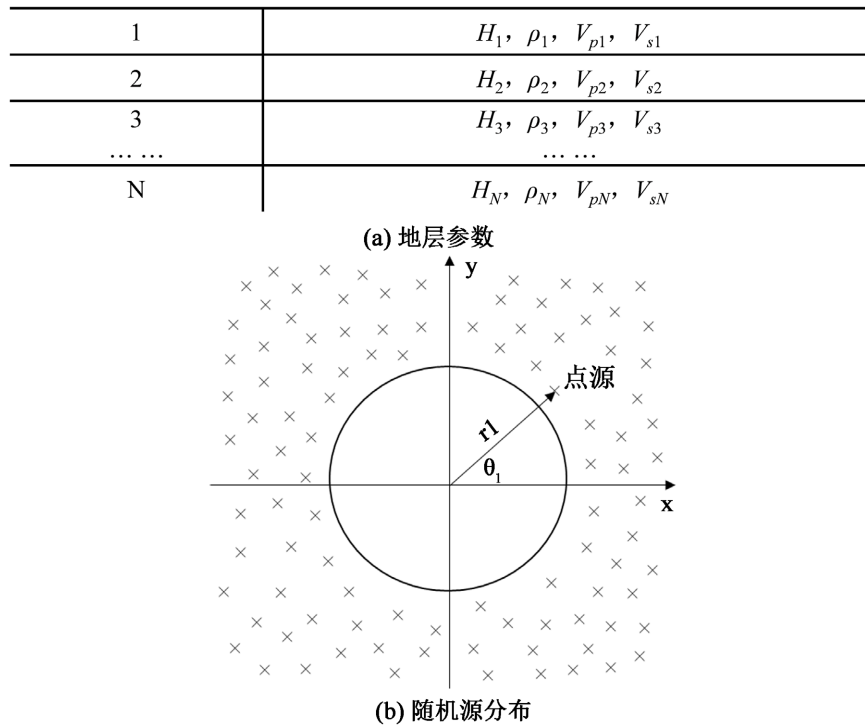


Figure 1. The theoretical model
图 1. 理论模型

$$P_{HLm}^H(\omega) = \frac{1}{2} L_H^2(\omega) A_{Lm}^2(\omega) \left| H_0^{(2)}(k_{Lm} r_i) \right|^2 \exp(-2hk_{Lm} r_i) \tag{2.3}$$

式中，下标 L 为勒夫波。

假设在所有点源加载阶段统计独立，将各式中所有点源及各阶段瑞利波和勒夫波合并，可以得到原点处观测到的所有波在频率为 ω 时产生的垂直及水平分量的功率。当 $r_i > \lambda_{Rm/Lm}$ 时， $H_n^{(2)}$ 近似为：

$$\left| H_0^{(2)}(k_{Lm} r_i) \right|^2 \cong \frac{2}{\pi z} \tag{2.4}$$

将近似式带入后，进行积分，积分结果为：

$$P_{VS}(\omega) = P_{VR}(\omega) = P_{VR}^V(\omega) + P_{VR}^H(\omega) = kL_V^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{A_{Rm}}{k_{Rm}} \right)^2 \left[1 + \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{u}{\omega} \right)_m^2 \right] \tag{2.5}$$

$$P_{HS}(\omega) = P_{HR}(\omega) + P_{HL}(\omega) \tag{2.6}$$

其中：

$$P_{HR}(\omega) = P_{HR}^V(\omega) = P_{HR}^H(\omega) = kL_V^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{A_{Rm}}{k_{Rm}} \right)^2 \left(\frac{u}{\omega} \right)_m^2 \left[1 + \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{u}{\omega} \right)_m^2 \right] \tag{2.7}$$

$$P_{HL}(\omega) = P_{HL}^H(\omega) = kL_V^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{\alpha^2}{2} \right) \left(\frac{A_{Lm}}{k_{Lm}} \right)^2 \tag{2.8}$$

式中， $k = (2/h)\exp(-4\pi h)$ ， α 是微动加载源的 H/V 比 LH/LV， $P_{VS}(\omega)$ 和 $P_{HS}(\omega)$ 表示在原点观测到的所有波在频率为 ω 时产生的垂直及水平功率。

可得在频率为 ω 时瑞利波 H/V 比 $\left(\frac{H}{V}\right)_R$ 、面波 H/V 比 $\left(\frac{H}{V}\right)_S$ 及水平运动的瑞利波和勒夫波振幅比 R/L :

$$\left(\frac{H}{V}\right)_R(\omega) = \sqrt{\frac{P_{HR}(\omega)}{P_{VR}(\omega)}} \quad (2.9)$$

$$\left(\frac{H}{V}\right)_S(\omega) = \sqrt{\frac{P_{HS}(\omega)}{P_{VS}(\omega)}} = \sqrt{\frac{P_{HR}(\omega) + P_{HL}(\omega)}{P_{VR}(\omega)}} \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{R}{L}\right)(\omega) = \sqrt{\frac{P_{HR}(\omega)}{P_{HL}(\omega)}} \quad (2.11)$$

Matsushima 和 Okada 指出, R/L 的值稳定在 0.4~1.0 之间, 在 0.1~5 s 的周期范围内其平均值约为 0.7 [16] [17] [18]。因此, 以下计算中在所有频率下 R/L 的值均取 0.7。

则频率为 ω 的微动 H/V 谱比 $\left(\frac{H}{V}\right)_m(\omega)$ 表达式为:

$$\left(\frac{H}{V}\right)_m(\omega) = \sqrt{\frac{P_{NS}(\omega) + P_{EW}(\omega)}{P_{UD}(\omega)}} \quad (2.12)$$

式中, $P_{UD}(\omega)$ 是垂直运动的傅里叶功率谱, $P_{NS}(\omega)$ 和 $P_{EW}(\omega)$ 是两个相互正交的水平运动傅里叶功率谱。

3. 富水砂卵石复杂地层微动数据采集

3.1. 地质概况

本工程盾构下穿自稳性差的高富水砂卵石泥岩复合地层, 该套地层上部的砂卵石地层不仅卵石多、分布随机, 而且含沙含水量大, 具有高渗水性。下部泥岩层, 不仅渗透性差、阻水能力强, 且横向上分布不均, 存在多处软弱带。在此类复杂地层中进行地铁盾构法施工, 不仅施工技术难度大, 而且工程风险极高, 因此查明该区间地层地质详情对整个盾构工程具有重大意义。

3.2. 数据采集仪器

采用 7 台 EPS-2 便携式微功耗宽频带地震仪进行微动数据采集。内置配有三分量地震传感器、高灵敏度的北斗 + GPS 模组、电子罗盘、姿态传感器、ZIGBEE 模块、Bluetooth 模块以及可充电锂电池, 无需任何外部电源即可连续工作 30 天以上, 各测点的数据独立采集, 仪器之间的同步和时间校正通过接收 GPS 卫星信号自动实现。

3.3. 观测系统设计

根据观测系统设计原则, 结合依托工程——成都轨道交通 18 号线世纪城站南北段工程参数, 根据依托工程现场的实际情况及工程需求, 为保证更高的勘探精度, 采用 7 节点圆形台阵, 半径为 3 m。当场地条件无法布设 3 m 半径且偏移超限时, 改用 2.5 m 台阵半径进行。

4. 微动数据处理与解释

4.1. 微动数据标准化

1) 数据格式

微动采集的原始数据为 MiniSEED 格式, 采用 Steim 2 方式压缩, 这会对三分量地震数据处理带来不

便, 不推荐直接采用该格式进行微动数据处理。推荐采用 SAC 数据格式。该格式具有三分量数据等点存储、节省存储空间、传输效率高等特点, 并且具有较高的跨平台编译性。

2) 预处理

微动原始数据存在不同程度的噪音干扰, 在实际数据采集过程中, 主要的干扰源有公交车、重型卡车、工程施工及交通灯交替导致的周期性车流, 靠近这些干扰源的测点信号受到很大干扰。预处理环节需要对原始数据进行一系列处理, 提高原始数据的信噪比, 主要的处理方式为三种: 信号平滑、修正趋势偏移、数字滤波。

4.2. H/V 谱比法数据处理

4.2.1. H/V 曲线提取

从采集的原始微动数据信号中提取面波成分并求出频散曲线是微动数据处理的关键环节。由 Nakamura 提出的 H/V 谱比法, 是利用地表噪声信号的水平分量频谱和垂直分量频谱比来反演近地表地层结构, H/V 曲线提取的具体步骤如下:

1) 三分量数据提取

使用三分量地震仪采集的微动数据不仅有垂直分量, 同时还包含了水平分量。处理微动数据时, 首先将实测记录分成若干个数据段, 剔除干扰明显的的数据段, 如图 2 所示, 将各数据段通过中心频率不同的窄带滤波器, 分别提取各个频率成分。

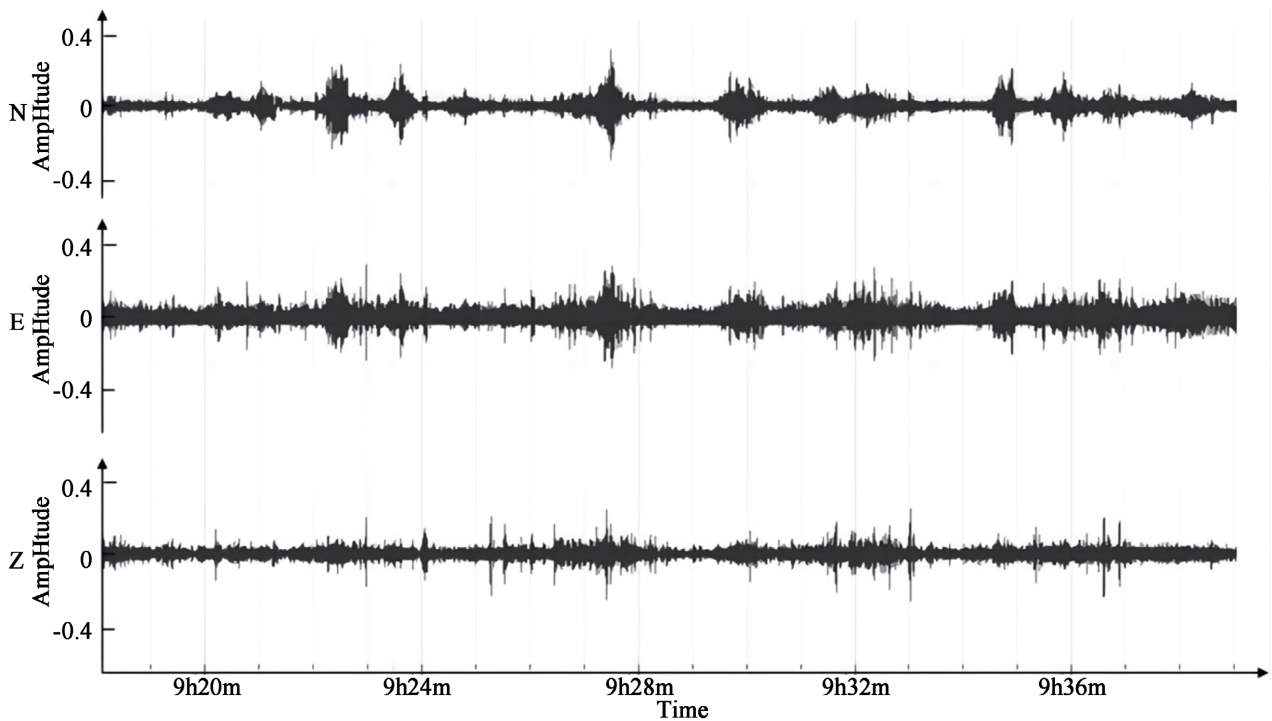


Figure 2. Three-component data extraction

图 2. 三分量数据提取

2) 观测系统定义

采用圆形台阵 7 节点采集微动数据, 每一节点自成体系, 可单独提取 H/V 曲线, 又可利用台阵节点求取平均值, 保证数据的稳定性。

3) 有效时间段截取

微动现场数据采集是以连续记录方式进行的, 每台仪器记录的信号时长包含了当次测量的所有测点的测试时间, 在对每个测点单独处理时, 应首先选取该点对应的时段信号, 本项目每个测点采集 20 分钟

4) 开窗去噪

时域信号中常存在瞬态尖峰脉冲, 在数据处理时会造成一定的影响, 可通过在时域“开窗”的方式对这类干扰噪音进行识别和定位, 进而将其剔除。如图 3 所示, 为开窗去噪前后微动信号的对比。

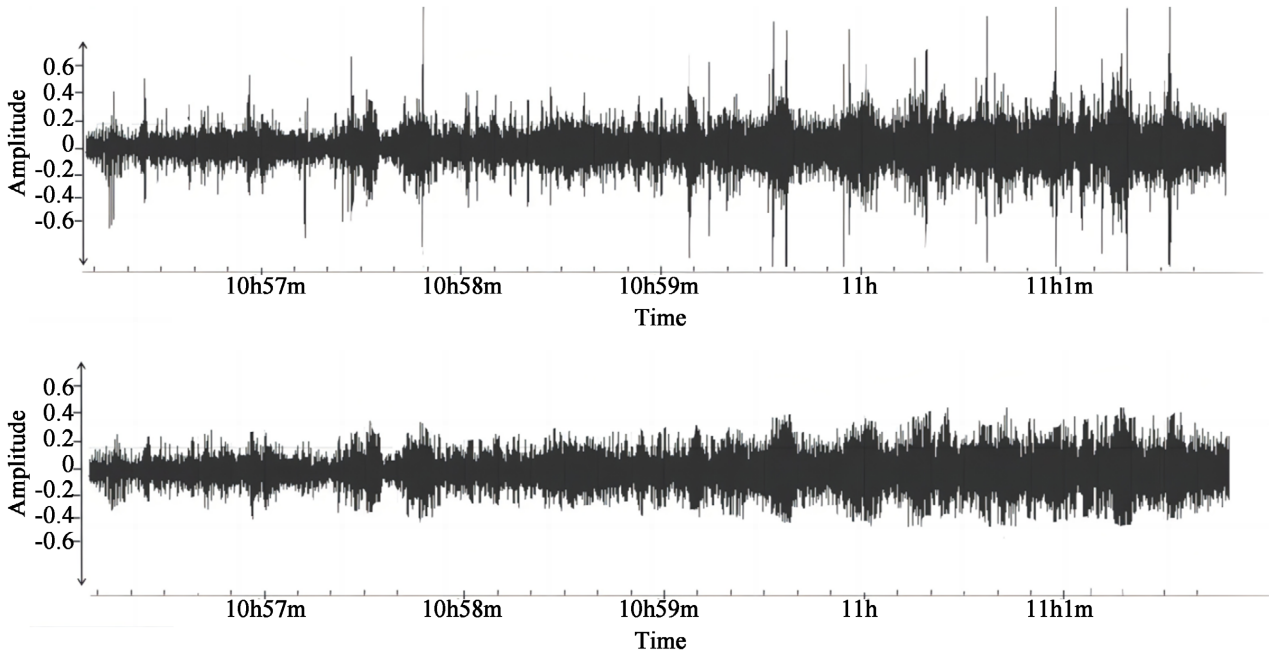


Figure 3. Fenestration for denoising
图 3. 开窗去噪

5) H/V 曲线提取

微动实测数据的 H/V 谱定义为角频率为 ω 的水平方向的功率谱与垂直方向的功率谱之比, 根据公式(2.12), 将每道中的 Q 个数据分成 L 段, 每段 N 个数据点 ($Q = L * N$), 对第 j 道、第 i 段进行傅里叶变换, 对 X 方向上所有数据段(共 L 段), 进行求和分别求取 NS、EW、UK 三方向上的功率谱, 进而求取 H/V 谱比, 绘制曲线, 如图 4 所示。

H/V 谱比法基于微动信号的水平分量与垂直分量的比值, 如图 5 所示, 利用三分量地震仪采集数据可以独立处理求取 H/V 曲线, 在测点条件变化不大的区域, 也可利用台阵 7 节点仪器分别求取的 H/V 曲线进行平均处理, 以提高数据的稳定性。

4.2.2. H/V 反演

1) H/V 曲线处理

① 去除低频干扰区间

由实测数据处理得到的 H/V 曲线在低频段存在扰动现象, 可能是仪器自身分辨率及现场采集条件的影响造成, 为提高反演拟合精度, 结合实际情况将小于 2 赫兹的区间段进行剔除, 如图 6 所示。

② H/V 曲线拟合频率段选取

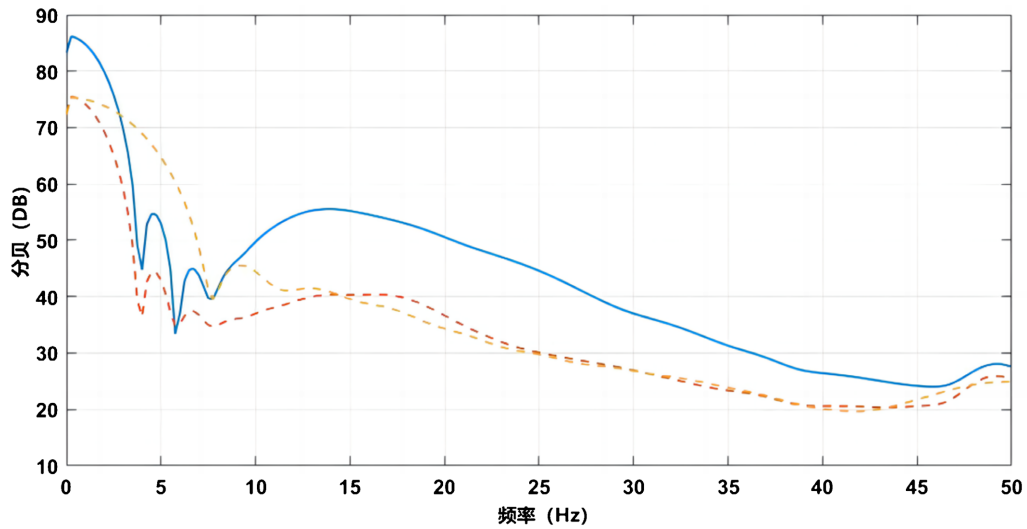


Figure 4. Three-component power spectrum
图 4. 三分量功率谱

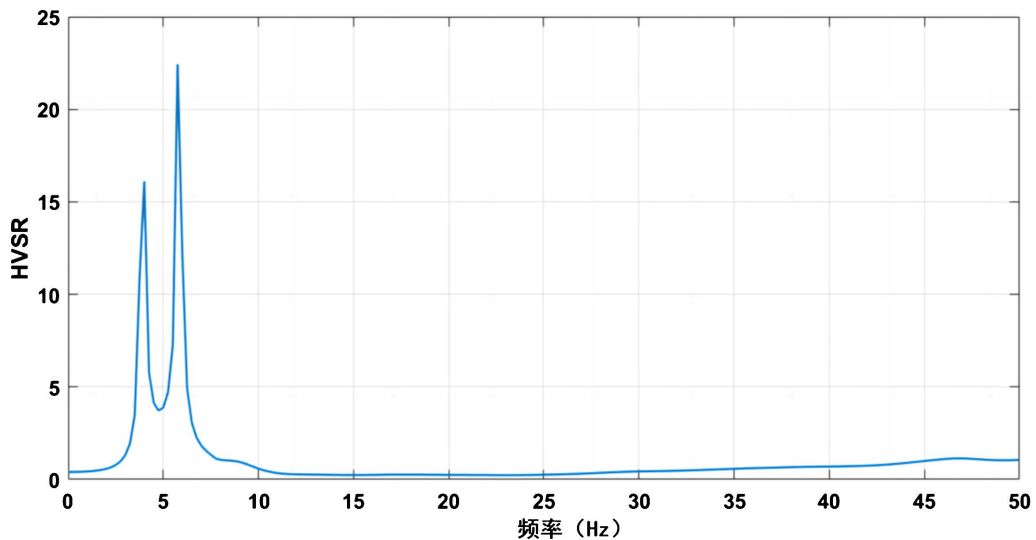


Figure 5. H/V curve calculation results
图 5. H/V 曲线计算结果

对于 H/V 曲线单峰特征明显的测点，一般对应较为简单的地层结构，对于频段的要求较低，可选择峰值频率 F_0 、2~6 Hz 频率区间段或全频率区间段进行拟合，如图 7(a)所示；对于图 7(b) H/V 曲线表现为双峰特征等曲线不平滑的情况，一般对应较为复杂的地层结构，需要较多的频率信息以满足探测要求，因此选取全频率区间段进行拟合。

在得到 H/V 曲线之后，进行定量模拟匹配地层情况时，根据测区实际情况，采用单一峰值频率 F_0 及全段 H/V 曲线两种拟合方法实现对不同类型测点 H/V 曲线的拟合。

2) 反演结果

① 单一峰值频率 F_0 拟合

以 YDK15 + 940 测点为例，如图 8 所示，H/V 曲线表现为典型的单峰值特点，采用单一峰值频率 F_0 拟合方法，较好的拟合了峰值频率 F_0 ，提取得到 V_s 速度剖面，与实际钻孔标定的地层信息基本一致。

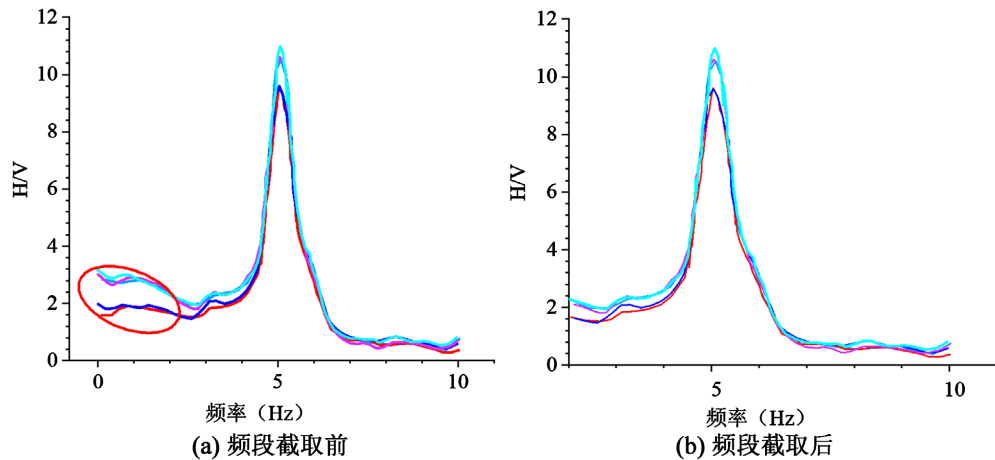


Figure 6. Test point ZDK 15 + 135 data points to intercept the contrast
图 6. 测点 ZDK15 + 135 数据点截取对比

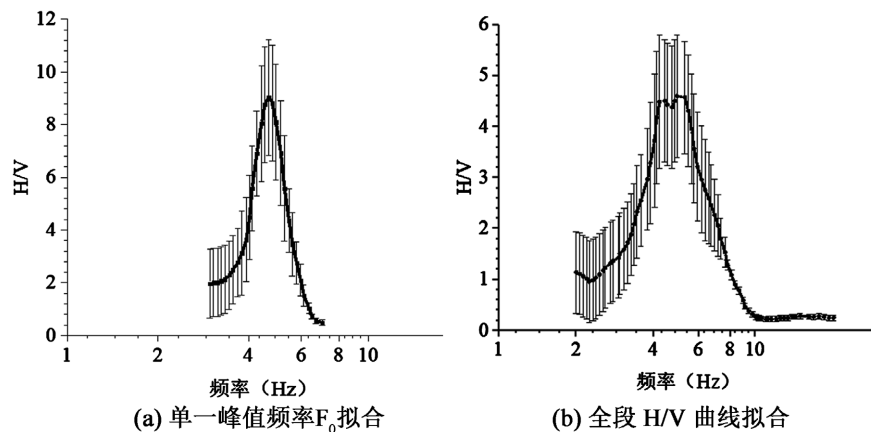


Figure 7. H/V curve fitting frequency band selection
图 7. H/V 曲线拟合频段选取

② 全段 H/V 曲线拟合

在盾构掘进完成后的滞后沉降监测过程中,以 YDK15 + 330 测点为例,如图 9 所示, H/V 曲线表现为双峰值特点,采用全段 H/V 曲线拟合的方法,较好的拟合了 H/V 曲线形态,对双峰值频率 F_0 拟合存在一定误差,提取得到 V_s 速度结构剖面,可明显识别出地层中包含有盾构区间的低速层段。

4.3. 岩性标定

1) 人工填土

本区横波速度 $V_s < 250 \pm \text{m/s}$,埋深较浅的岩层解释为人工填土。与钻孔揭示的第四系全新统人工填筑土(Q_4^{ml})对应,前期地勘钻孔对该层的揭示厚度约 0.4~5 m,且厚薄不均,普遍分布于场地内。主要成分为黏土、卵石、建筑废渣等,有些含生活垃圾或砖块等建筑垃圾,压实程度横向分布不均匀,在综合地球物理解释成果图中用符号 I 标记。

2) 粉质粘土

横波速度 $V_s \approx 250\sim 318 \text{ m/s}$ 的岩层解释为粉质粘土层,与钻孔揭示的第四系全新统冲积、冲洪积层($Q_4^{\text{al+pl}}$)对应,成分包含粘土、粉质黏土、粉土等,呈层状分布于人工填土之下,局部地段缺失,前期地

勘钻孔对该层的揭示厚度约 0.4~8.7 m，在综合地球物理解释成果图中用符号 II 标记。

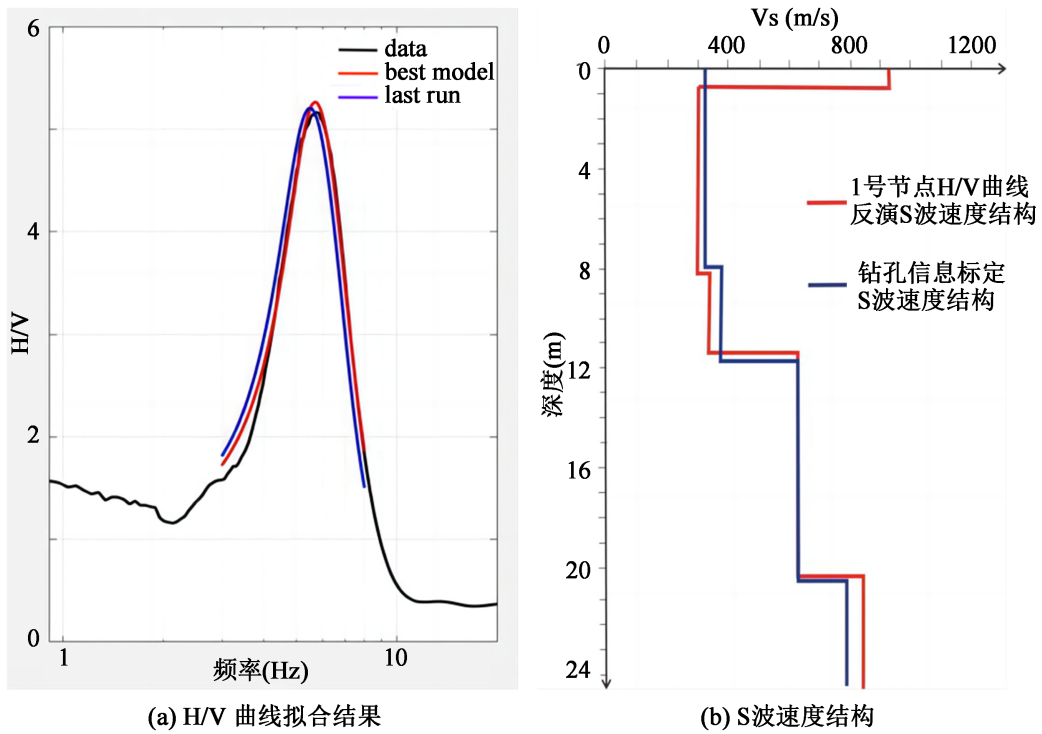


Figure 8. Test point YDK 15 + 940 inversion results
图 8. 测点 YDK15 + 940 反演结果

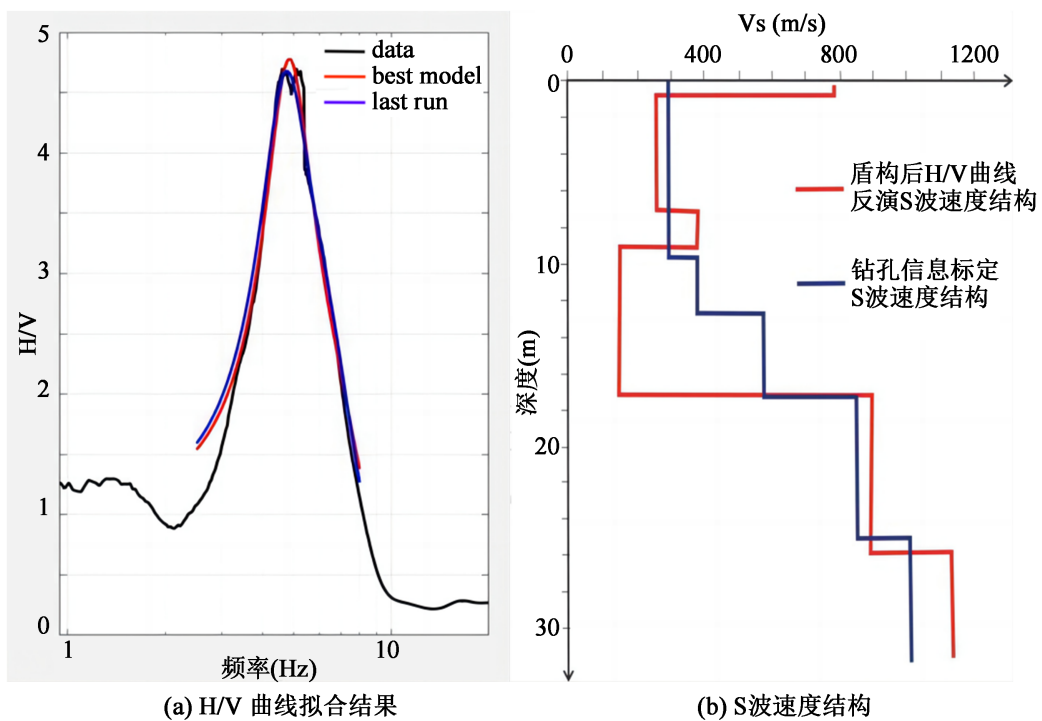


Figure 9. Test point YDK 15 + 330 inversion results
图 9. 测点 YDK15 + 330 反演结果

3) 砂层

横波速度 $V_S \approx 318\sim 357$ m/s 的岩性解释为砂层, 主要包括细砂、中砂, 对应于钻孔揭示的第四系上更新统冰水沉积(Q_3^{gl+al}), 前期地勘钻孔对该层的揭示厚度约 0.5~3.4 m, 在综合地球物理解释成果图中用符号III标记。

4) 卵石层

横波速度 $V_S \approx 357\sim 630$ m/s 的岩性解释为卵石层, 呈层状分布于泥岩之上, 与钻孔揭示的第四系上更新统冰水沉积(Q_3^{gl+al})卵石土层对应, 多由粉细砂充填, 卵石粒径 20~150 mm, 在综合地球物理解释成果图中用符号IV标记。

5) 泥岩层

横波速度 $V_S \approx 630\sim 795$ m/s 的岩性解释为泥岩层, 为本次探测深度范围内(0~30 m)较稳定分布于底部的岩层, 对应于钻孔揭示的白垩系上统灌口组(K_2g)泥岩, 在综合地球物理解释成果图中用符号V标记。

4.4. 微动剖面图解释

1) 锦城广场~世纪城站区间(YDK15 + 50~YDK15 + 350 段)

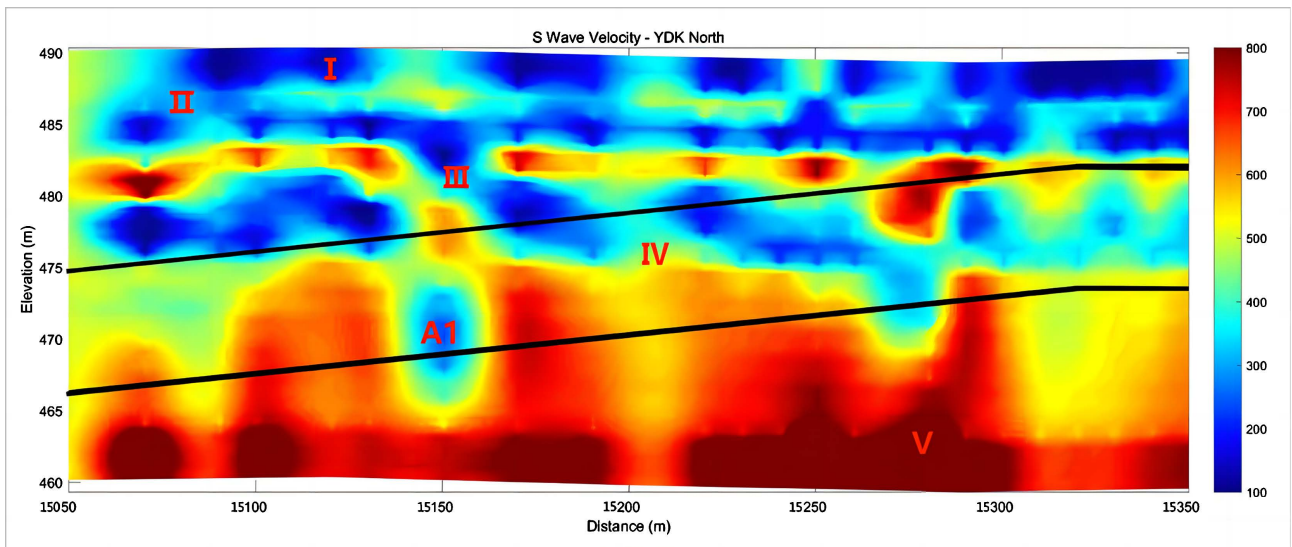


Figure 10. YDK 15 + 50~YDK 15 + 350 segments

图 10. YDK15 + 50~YDK15 + 350 段

图 10 为锦城广场~世纪城区间(YDK15 + 50~YDK15 + 350 段)微动解释成果图, 图中黑色实线为隧道洞身边线。该段盾构掘进通道范围横波速度分布较左线相同里程段更为复杂, 主要反映在以下两点:

① 泥岩层不再是沿隧道平行方向横向均匀分布, 里程 YDK15 + 50~YDK15 + 90、YDK15 + 245~YDK15 + 290 范围存在低速异常区、YDK15 + 300~YDK15 + 340 范围存在低速异常区, 可能对应强风化泥岩层。该段岩层稳定性极差, 利用微动探测技术确定了该属性岩层分布范围, 施工过程中应给予高度重视, 防止塌陷、沉降等地质灾害发生。

② 探测影响范围内存在高速异常体, 异常体中轴埋深大约在 8 m 左右, 其速度明显高于围岩, 其横向连续性较好, 厚度约 1.5~1.8 m, 且对成果剖面渐变趋势有一定影响, 解释工作期间多次与盾构技术部进行论证, 认为该处响应来自地下 DN1600 污水管砧结构的概率较高, 建议施工前做好该管道对施工影响的整体评估工作。

里程 YDK15 + 150~YDK15 + 250 范围, 盾构自下倾斜向上, 同时钻遇泥岩层及速度相对较低的卵石层、砂层, 建议掘进前做好出渣量的预算及施工过程中加强该段监控。YDK15 + 250~YDK15 + 350 在稳定性较差的卵石层、砂层掘进, 同样需要做好施工前参数论证及施工过程中监控。

另外, 图中 A1 (YDK15 + 150)处位于隧道掘进通道内泥岩层中, 横波速度相对围岩较低, 可能存在全风化或强风化泥岩, 查阅资料, 该处属于资料空白区, 建议盾构机掘进前在该处增加验证性钻孔。

5. 工程实际应用与分析

5.1. 工程需求分析

根据风险评估情况, 盾构施工单位对项目安全提出了以下两点需求:

1) 确定岩性分界面, 用于指导盾构掘进过程控制, 提前预防盾构姿态失控、盾构内部突泥、涌水及盾构刀盘卡死现象的发生。

2) 盾构掘进前, 探明地下混凝土结构的埋深、大小及形态特征, 为盾构施工提前扫清隐患; 盾构掘进后, 进行动态滞后沉降监测, 并一定程度上检测注浆加固效果, 对出现的地层空洞或松散区及时进行回填或注浆加固。

5.2. 解决方案

1) 利用基于微动数据的高分辨城市近地表结构反演技术, 划分地层岩性及刻画地层结构特征, 用于帮助施工单位提前判断盾构掘进中出现盾构姿态失控、螺旋输送机循环“涌水”及盾构机“结泥饼卡死”现象的概率, 并提前做出必要的施工方案优化及调整。

微动技术对岩性关键地球物理参数——横波速度具有较高的敏感度和分辨力, 如图 11 所示, 微动探测技术较为细致的刻画了地层结构特征, 能够满足盾构工程中对地层岩性和结构的探明要求。

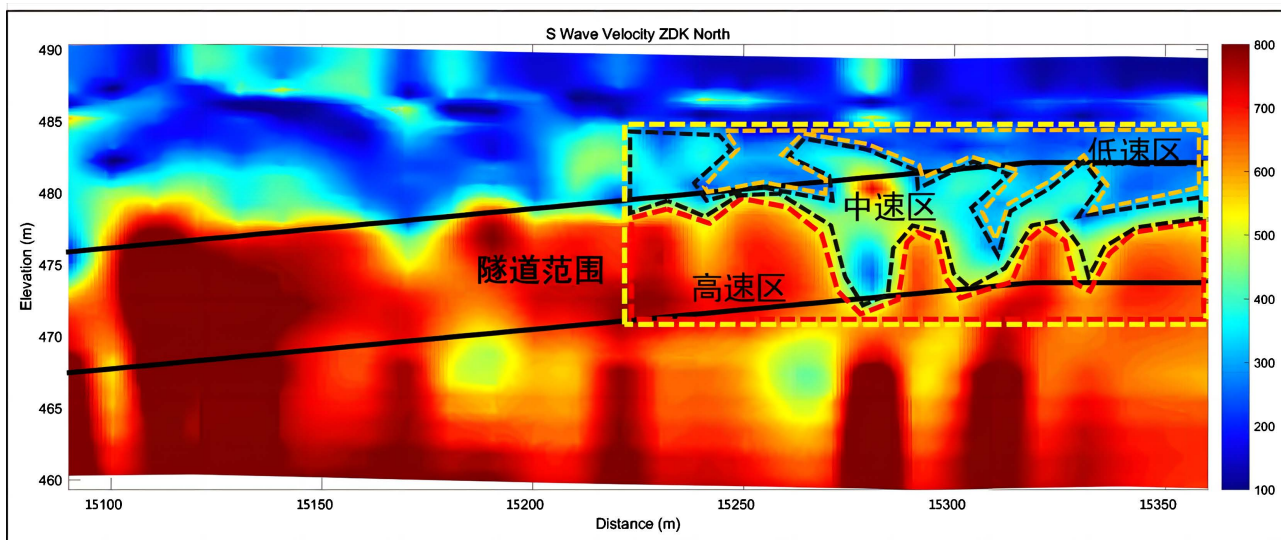


Figure 11. Profile of the microdynamic detection results

图 11. 微动探测成果剖面

2) 利用微动探测技术, 能够较为准确地探明砗结构的埋深、大小及形态特征。在实际应用中, 微动探测技术探明了砗结构位置、大小及形态, 同时探明了砗结构围岩情况及砗结构内部注浆填实效果, 如图 12 示。根据微动探测结果, 发现了几处注浆不实情况, 盾构施工方在盾构前根据方案进行了二次注浆

填实处理，最终顺利完成了在盾构掘进过程中对大型污水管的安全切割作业。

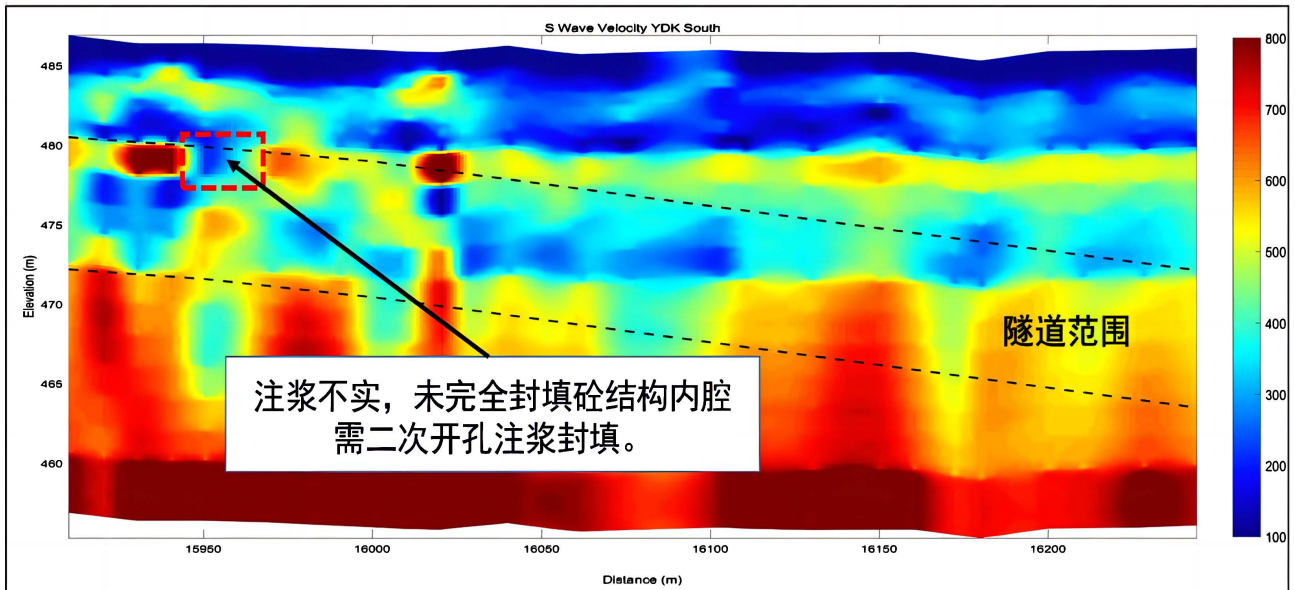


Figure 12. Evaluation of sealing effect of sewage pipe in underground concrete structure

图 12. 地下砼结构污水管封填效果评估

6. 结论

本课题依托成都地铁 18 号线一期工程土建 2 标，在结合依托工程具体情况和国内外研究现状的基础上，采用了高精度微动数据采集方法、高分辨率数据处理及 H/V 反演算法，进行了地铁盾构区间微动勘测新技术研究，得出的主要结论如下：

1) 微动探测技术在整个探测过程中，不钻孔、不开挖、不打桩，不会对城市路面及设施造成任何破坏；不扬尘、不生噪，不会对城市交通、居民生活带来任何影响，是一项绿色环保的新型地勘技术。

2) 利用 H/V 反演算法，获取了测点的高分辨率 S 波速度结构，并基于地质统计学方法，形成了测区连续的 S 波速度剖面，综合已有的地质信息，能够得到盾构区间较为完整的地质信息，避免了因地质信息盲区带来的各种工程风险。

3) 利用 H/V 反演法，进行速度结构反演，得到测区内的地质信息，排查地层空洞，对高风险范围进行抢险钻孔注浆回填。研究发现，微动探测技术不仅施工形式灵活、施工效率高，而且不需要人工震源、抗干扰能力强，在复杂地层的空洞、软弱带、软硬交界面勘察方面，具有较高的准确性，探测准确率超过 90%，能大幅降低盾构施工过程中发生地层垮塌、地表沉降等工程事故的风险。

4) 应用微动法定位地下大型混凝土结构，评估地下大型混凝土结构管线在盾构前的注浆填实效果。通过实际工程对比发现，微动探测技术对地下建筑物结构体响应灵敏，能够定位地下大型混凝土结构，评估其注浆填实效果，避免盾构切割过程中发生因填充不实导致的局部管空腔塌陷。

参考文献

- [1] 张新. 基于随机源模型的新型微动探测技术在上软下硬地层盾构隧道中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5): 43-50. <https://doi.org/10.13807/2020.05.005>
- [2] 田宝卿, 丁志峰. 微动探测方法研究进展与展望[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1306-1316.
- [3] Aki, K. (1957) Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Bul-*

- letin of the Earthquake Research Institute*, **35**, 415-456.
- [4] Nogoshi, M. and Igarashi, T. (1971) On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2). *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan, 2nd series)*, **23**, 281-303. https://doi.org/10.4294/zisin1948.23.4_281
- [5] Nakamura, Y. (1989) A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on Ground Surface. *Quarterly Report of RTRI*, **30**, 25-33.
- [6] 张若晗, 徐佩芬, 凌甦群, 等. 基于微动 H/V 谱比法的土石分界面探测研究——以济南中心城区为例[J]. 地球物理学报, 2020, 63(1): 339-350.
- [7] 冯少孔. 微动勘探技术及其在土木工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 1029-1036.
- [8] 王振东. 微动的空间自相关法及其实用技术[J]. 物探与化探, 1986, 10(2): 123-133.
- [9] Harkrider, D.G. (1964) Surface Waves in Multilayered Elastic Media I. Rayleigh and Love Waves from Buried Sources in a Multilayered Elastic Half-Space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **54**, 627-679. <https://doi.org/10.1785/BSSA0540020627>
- [10] Arai, H. and Tokimatsu, K. (2000) Effects of Rayleigh and Love Waves on Microtremor H/V Spectra. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, 30 January-4 February 2000, 1-8.
- [11] 张立, 刘争平, 熊自英. 利用地脉动 H/V 谱比反演地层 Vs 结构剖面[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(S1): 4-5.
- [12] Lachet, C. and Bard, P.-Y. (1994) Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *Journal of Physics of the Earth*, **42**, 377-397. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.42.377>
- [13] Horike, M. (1985) Inversion of Phase Velocity of Long-Period Microtremors to the S-Wave-Velocity Structure down to the Basement in Urbanized Areas. *Journal of Physics of the Earth*, **33**, 59-96. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.33.59>
- [14] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 凌苏群, 郭慧丽, 田宝卿. 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.
- [15] Haskell, N.A. (1953) The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **43**, 17-34. <https://doi.org/10.1785/BSSA0430010017>
- [16] Matsushima, T. and Okada, H. (1990) Determination of Deep Geological Structures under Urban Areas Using Long-Period Microtremors. *Geophysical Exploration*, **43**, 21-33.
- [17] Okada, H., Suto, K. and Asten, M.W. (2003) The Microtremor Survey Method. Geophysical Monograph Series No. 12, Society of Exploration Geophysicists, Houston, 1-5. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801740>
- [18] Okada, H. (2006) Theory of Efficient Array Observations of Microtremors with Special Reference to the SPAC Method. *Exploration Geophysics*, **59**, 73-85. <https://doi.org/10.1071/EG06073>