

天津港填海造陆区地震场地效应分析

曹付阳, 毕金孟, 谭毅培, 郭巍

Analysis of seismic site effects in the Tianjin port sea reclamation region

Cao Fuyang, Bi Jinmeng, Tan Yipei, and Guo Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-073>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

龙头山集镇局部场地地震动效应分析

Analysis of the local site effect in Longtoushan town

地震科学进展. 2022(12): 566–573

2020年7月12日唐山古冶5.1级地震揭示的北京城区地震动场地效应分析

Analysis on site effect of ground motion in Beijing urban area revealed by strong-motion records in *M*_{5.1} Guye, Tangshan earthquake on 12th July, 2020

地震科学进展. 2020(7): 14–19

海域地震区划关键技术研究项目及研究进展

Project plan and research progress on key technologies of seismic zoning in sea areas

地震科学进展. 2020(1): 2–19

上海及周边潜在震源区对上海长周期基岩地震动参数影响分析

Analysis of the influence of Shanghai and its surrounding potential seismic sources on long-period bedrock ground motion parameters in Shanghai

地震科学进展. 2022(8): 382–387

321响水爆炸的地震学分析及谱比法研究

Seismic analysis and amplitude-style spectrum ratio study of the 21 March blast at Xiangshui

地震科学进展. 2021(5): 215–222

龙江特大桥场地强震动观测系统设计

Design of site strong motion observation system for the Longjiang bridge

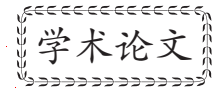
地震科学进展. 2020(6): 8–13



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹付阳, 毕金孟, 谭毅培, 等. 天津港填海造陆区地震场地效应分析 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(9): 507-513. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-073

Cao F Y, Bi J M, Tan Y P, et al. Analysis of seismic site effects in the Tianjin port sea reclamation region[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(9): 507-513. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-073



天津港填海造陆区地震场地效应分析

曹付阳¹⁾ 毕金孟^{1,2)*} 谭毅培¹⁾ 郭 巍¹⁾

1) 天津市地震局, 天津 300201

2) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 为了更好地分析填海造陆区的地震场地效应,为工程建设抗震设计提供科学依据。本文以天津市东疆港填海造陆区为例,利用一体化短周期流动地震计采集场地的地脉动噪声,基于噪声水平和垂直向谱比法(H/V谱比法),通过26 d固定点位的长时间观测采集场地地脉动噪声,分析了研究场地H/V曲线峰值的一致性。基于固定点位的观测经验,利用卓越频率和深度的转换关系式,通过H/V曲线数据归一化处理得出测线归一化处理剖面图。分析得出东疆港填海造陆区下低频段有不稳定的H/V峰值,推测在浅层存在吹填土的弱波阻抗界面,在50~200 m深度附近存在较为明显的软沉积界面,场地卓越频率在0.6~1.6 Hz之间,具有1.96~3.99倍的放大倍数下限。本文可对东疆港填海造陆区的场地效应估计提供一定的参考价值。

关键词 场地效应; 填海造陆区; H/V方法

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2025)09-0507-07

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2024-073

Analysis of seismic site effects in the Tianjin port sea reclamation region

Cao Fuyang¹⁾, Bi Jinmeng^{1,2)}, Tan Yipei¹⁾, Guo Wei¹⁾

1) Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract To better analyze the seismic site effects in land reclamation areas and provide a scientific basis for earthquake-resistant engineering design, this study investigates the Dongjiang port land reclamation area in Tianjin. Integrated short-period flow seismometers were used to collect ground motion noise at the site, and the consistency of horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio peaks was analyzed using noise level and H/V ratio methods. Based on long-term observations at fixed points for 26 days, ground motion noise was recorded, and a normalized profile map was generated by converting the H/V curve data using a formula based on dominant frequency and depth. The analysis

收稿日期: 2024-05-07; 采用日期: 2024-09-10。

基金项目: 天津市自然科学基金青年项目(22JCQNJC01070)、天津市地震局科研项目(Yb202205)和中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202401109)联合资助。

第一作者: 曹付阳(1995-), 男, 工程师, 主要从事地震监测预警和地震数据分析工作。E-mail: elon_cfyang@163.com。

* 通信作者: 毕金孟(1989-), 男, 高级工程师, 主要从事地震预测研究工作。E-mail: jimmengbi@126.com。



revealed unstable H/V peak values in the low-frequency range below depths of 50~200 m, suggesting that weak wave impedance interfaces caused by backfill soil exist in the shallow subsurface, with relatively distinct soft sediment interfaces near depths of 50~200 m. The dominant frequencies at the site range of 0.6~1.6 Hz, with amplification factors of 1.96~3.99. This study provides a useful reference for estimating site effects in the Dongjiang port land reclamation area.

Keywords site effect; sea reclamation region; H/V method

0 引言

场地效应是指场地的地下介质对地震波的放大或衰减影响^[1],由于地下土层、岩体以及复杂的地质构造体具有不均匀性和不连续性,场地可以看成是一个滤波器,它能够对不同大小和周期的波进行影响,造成不同程度的放大或缩小甚至是滤除^[2]。例如基岩场地响应接近于1,而土层则可能高达10以上,而且对不同频率的信号,场地响应不同,所以近地表覆盖土层对地震信号的放大或衰减影响是场地效应中最主要的表现之一^[3]。

历史上多次远场大震造成的破坏远远超出人们的估计,给当地人民的生命财产安全造成巨大的损失^[4]。最为人们熟知的就是1985年墨西哥7.8级地震,距离400 km以外的墨西哥城35%的建筑物遭到不同程度的破坏,软土层上很多中高层建筑都遭受了一定的破坏,而震中附近的很多老建筑却破坏较轻^[5]。后续的许多研究认为,近地表的沉积层所产生的长周期场地效应是造成墨西哥城受灾严重的主要因素^[6]。第四纪沉积物的厚度通常在一个区域内变化很大^[7],近地表沉积层的分布很复杂,在沉积层覆盖的地区,需要考虑场地放大效应,才能对地震的震动效应给出正确的估计,为地震应急和震害评估提供可靠信息,从而指导减灾规划和抗震设防^[8]。

在众多场地效应评估方法中,通过钻孔生成详细的岩土技术数据造价较高且缓慢,并且由于城市化和成本的原因,在理想地点(远离噪声源)安装地震观测站往往也不可行。在没有强震动运动记录的情况下,利用环境微噪声观测可以评估局部共振周期。1971年Nogoshi和Igarashi^[9]首先提出了H/V谱比方法,1989年Nakamura^[10]对其进行了推广。1999年Ibs-von Seht和Wohlenberg^[11]首先提出了卓越频率与沉积物厚度之间的经验方程。2008年陈棋福等^[12]采用H/V谱比分析法得到了高分辨的北京城区沉积层卓越频率和放大倍数,以及沉积盖层厚度的分布情况;2009年Pilz等^[13]计算出智利首都Santiago地震的放大倍数,并指出通过H/V谱比可以得出地区

放大倍数的下界;2017年Yilar等^[14]使用570个观测点的数据分析了波士顿地区的基岩深度并用于微震区划;2020年彭菲等^[15]基于H/V法得出三河一平谷地区的沉积结构和地震场地响应特征;2022年阮明明等^[16]利用HVSr法获得渭河盆地近地表第四系沉积层结构埋深。H/V法作为一种便捷、廉价的场地分析方法^[17],在过去的十几年被广泛地应用于低地震活动性地区^[18]。

如今很多沿海港口城市的建成区都建设在大量软土夹层填海场地上,大型填海港口开发区内高层建筑的地震危险性值得深入研究。本文以天津市滨海新区东疆港为研究对象,研究港内填海造陆区的沉积层厚度、场地卓越频率和放大倍数等场地因素,初步分析得出天津港填海造陆区的场地效应,为地区工程建设提供防震参考。

1 分析方法与数据处理

1.1 H/V方法原理

H/V方法理论认为地脉动中面波占相当大的一部分,而场地放大效应主要是由覆盖于弹性半空间上的软弱土层引起的^[15]。假设二维模型为松散的沉积软土层覆盖在坚硬的基岩上,当松散覆盖层和下伏的基岩层相比,有比较大的波阻抗比(大于2.5)时^[11],地脉动噪声会表现出明显的H/V峰值,H/V峰值对应的频率和浅层松散土层的卓越频率一致或接近,此时卓越频率可以表示为:

$$f_n = n(v_s/4D) \quad (1)$$

式中, v_s 为横波速度; D 为沉积层厚度;当 $n=1$ 时, f_n 是基阶卓越频率,其他则为高阶共振。

近地表土层厚度相对较薄,用常规接收函数方法获得较为困难,利用地脉动噪声的H/V峰值频率变化则可得到近地表土层界面的变化。沉积层的卓越频率由S波速度和厚度决定,由此利用已知的S波速度和H/V峰值频率求得土层的厚度^[19]。沉积层H/V曲线的峰值频率具有良好的稳定性,与沉积层主要界面对应关系较好。因此,可以根据式(1)将卓越频率转化为对应的深度界面:

$$D = v_s / (4f_0) \quad (2)$$

1.2 流动观测

流动观测前对短周期流动观测仪器和观测方法进行测试。在天津市东疆港大沽基准站内架设 1 台 CME-40TDE 便携式短周期地震计进行初始观测, 仪器采样率 100 Hz, 地震计安装在大沽基准站内观测墩上, 采用无线传输的方式将记录数据回传至存储数据库, 记录天然源地震、环境噪声等信号, 获得 26 d 的长时间连续观测数据。

天津东疆港区位于天津市滨海新区(图 1), 2004 年开始动工建设, 2006 年完成吹填造陆。此次将天津东疆港区水平于东侧海岸线的南北方向作为测线, 从南端至北端 7.68 km 的距离分别布设了 11 个流动点位(从北到南, 依次为 1~11 号)(图 2), 点位之间平均距离 768 m。观测仪器均按要求布设于场地平整、远离居民生活区、工业区且无明显工程振动的

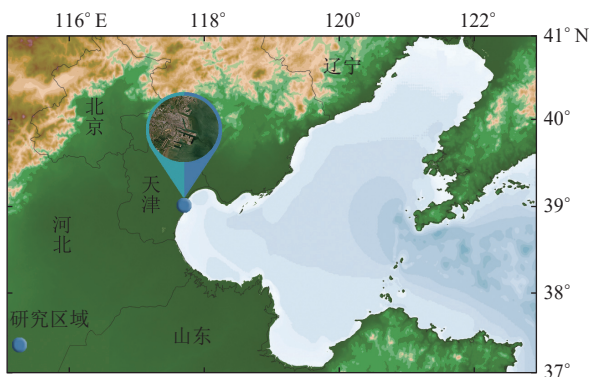


图 1 研究区域区位图

Fig. 1 Location map of the study area



图 2 流动观测点位分布图

Fig. 2 Distribution map of flow observation points

位置, 在架设流动观测点位时避开地下水和通信管道的区域。为了降低大风、温度变化等对地震背景噪声观测的影响, 流动地震仪均采用加装不锈钢保温防护面罩的方式布设, 每个观测点位记录大于 3 h 的观测数据。

1.3 数据处理与计算

H/V 方法处理时, 首先将 CME-40TDE 短周期地震仪所记录的数据传回数据库, 并通过配置文件去除仪器响应, 把下载的 SEED 文件转换为 SAC 格式, 并对采集数据进行必要的预处理, 进行截取、对齐、去均值、去倾斜等预处理工作, 尤其对人为活动干扰造成的突跳进行了识别和处理(图 3), 再对处理完成的数据分段计算 H/V 曲线, 并取均值计算出观测点位的 H/V 曲线。

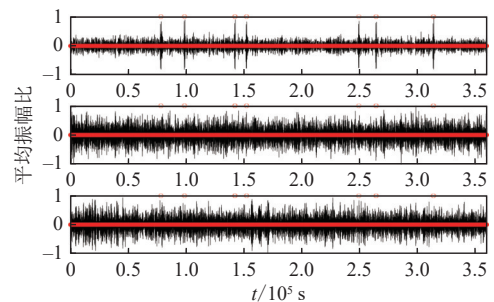


图 3 8 号测点噪声数据突跳标记处理

Fig. 3 Processing of spike markers in noise data at Point 8

计算时采用 Tukey Windows 平滑方法进行平滑处理($R=0.25$), 频率采用 0.2~20 Hz 带通滤波。将连续数据分成若干个时间窗, 分别计算出每个时间窗的水平分量和垂直分量的频谱比曲线, 计算 NS 和 EW 方向频谱矢量和与 UD 方向频谱平方相比的算数平方根得到每个时间窗的 H/V 谱比曲线, 将所有时间窗的频谱比曲线取平均值和中值, 得到该测点的 H/V 曲线。图 4 为流动观测 8 号点位的频谱分析

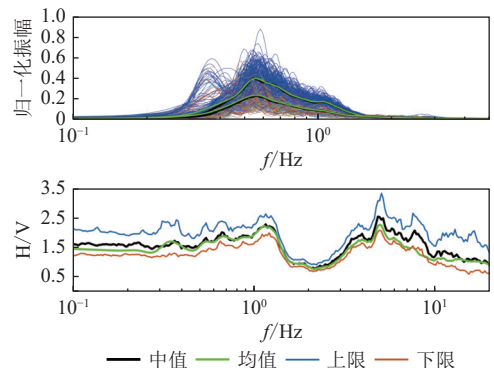


图 4 8 号测点的频谱分析和 H/V 曲线

Fig. 4 Spectrum analysis and H/V curve of Point 8

和 H/V 曲线, 取与中值相关的误差值计算出 H/V 曲线的上限和下限。

2 结果分析

2.1 一致性分析

在大沽基准站进行了连续 26 d 的观测, 分析 H/V 方法的峰值是否稳定。在图 5 中, H/V 曲线呈现双峰值特征, 在 0.4~1 Hz 的低频段和 9~11 Hz 的高频段存在两个 H/V 峰值, 可以明显看出, 左侧低频段 H/V 峰值有较高的峰值和较大的变化范围, 而右侧高频段 H/V 峰值具有相对较小的峰值且较为稳定。图 6 为分别计算两个频段范围内的峰值分布, A 段对应图 5 中低频峰值, H/V 峰值分布具有离散度高, H/V 值分散在 2~10 之间; B 段对应高频峰值, H/V 峰值分布一致性较好, H/V 值集中在 2.7~4 之间。

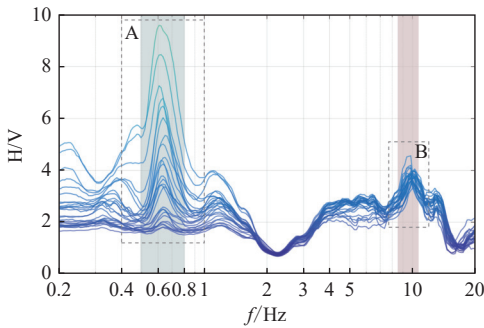


图 5 连续观测 H/V 曲线叠绘图

Fig. 5 Superposition of H/V curves from continuous observations

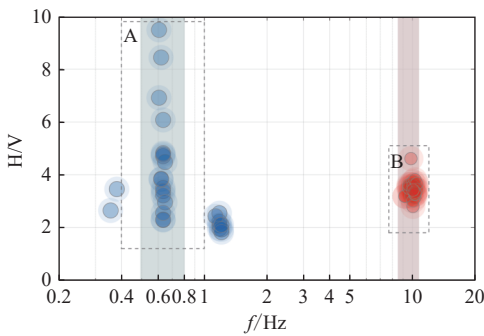


图 6 连续观测 H/V 峰值分布图

Fig. 6 Distribution of H/V peaks from continuous observations

2.2 测线 H/V 数据分析

基于固定点位的观测经验, 以每个流动点位的 H/V 曲线的峰值进行归一化处理, 找出 H/V 曲线峰值对应的卓越频率, 近似地看作观测场地的卓越频率, 表 1 为各个测点 H/V 卓越频率及放大系数。依

据 H/V 峰值频率与沉积层厚度的关系, 利用王伟君等^[20]的厚度经验关系式, 采用频率-厚度($f-h$)经验关系式 $h=96 \times f^{-1.388}$, 使用 H/V 卓越频率计算出沉积层界面深度剖面, 将 H/V 剖面图进行归一化放大并插值处理, 得出较为清晰的分层界剖面图(图 7)。可以看出测线剖面在浅层有一个不明显的分界面, 深部有一个较明显的分界面, 我们以浅层分界面和深层分界面来区分两个分界面。

表 1 测线各测点 H/V 卓越频率及放大系数

Table 1 Resonance frequency and amplification factor for H/V curves at each measuring point along the survey line

测点	浅层分界面		深层分界面	
	卓越频率/Hz	放大系数	卓越频率/Hz	放大系数
1	5.63	1.45	0.67	2.44
2	6.72	1.05	0.63	3.88
3	8.79	1.59	0.62	3.99
4	7.52	1.48	0.64	2.46
5	6.58	1.71	1.32	2.20
6	5.63	1.60	1.65	2.62
7	5.15	1.62	1.26	2.36
8	4.92	1.83	1.13	2.42
9	4.92	1.30	1.01	1.97
10	6.02	1.51	0.69	1.96
11	6.16	1.58	0.62	2.41

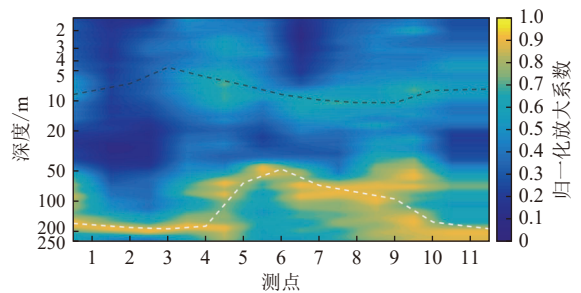


图 7 测线归一化处理剖面图

Fig. 7 Normalized H/V section diagram of the survey line

将 H/V 峰值作为场地放大系数的下限, 由图 7 可见, 在剖面 5~12 m 的深度范围内有一个的浅层界面, 分界面整体深度变化不大, 平均深度为 8.03 m; 在 50~200 m 的深度范围可见有起伏的深分界面, 在 2 号和 3 号测点分界面较深, 其他测点趋于相对平缓, 平均深度为 128.23 m。浅层分界面 H/V 峰值对应的卓越频率主要集中在 5~7 Hz 范围内, 平均放大

系数为 1.52; 深层分界面具有较大的起伏, 可能是由于地层的起伏或观测环境的干扰使得清晰度不足造成的, 对应的卓越频率主要集中在 0.6~1.6 Hz, 平均卓越频率 0.93 Hz, 该层的放大系数为 1.96~3.99。

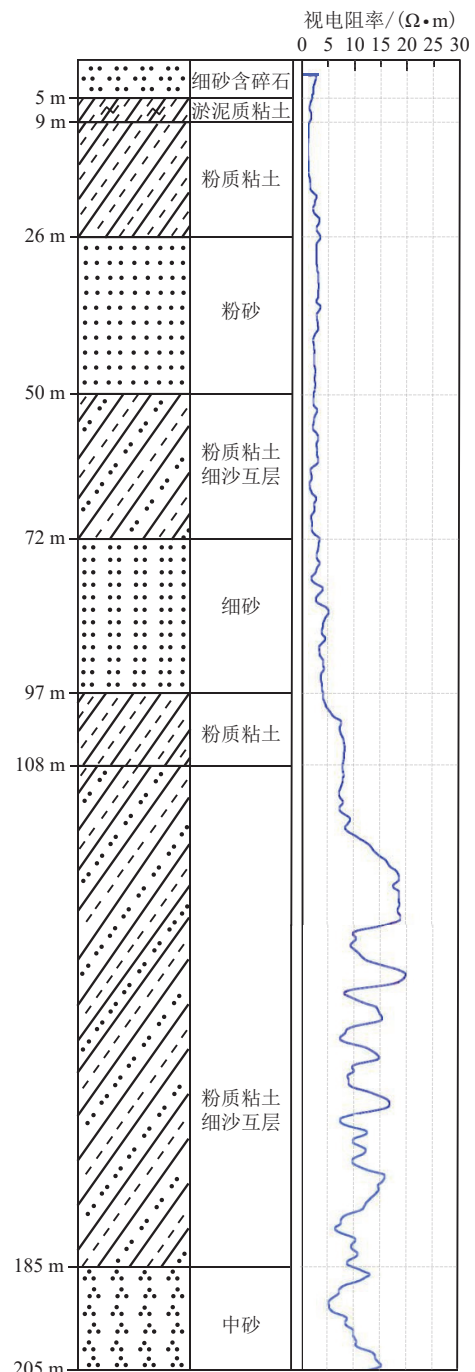
3 讨论

3.1 与钻孔数据对比

根据大沽观测井钻井报告和钻孔柱状图(图 8), 在 5~9 m 处的岩芯采样, 发现含建筑垃圾的碎石层与含有机质和少量贝壳的淤泥质粉质粘土分界层, 可以推测对应图 7 中 H/V 曲线中浅层弱波阻抗界面, 可能是填海造陆吹填土与原海洋沉积表层的界面, 但低频段的 H/V 峰值分布一致性不好, 需进一步探究其他因素的影响; 在 100~125 m 的深度, 土层存在视电阻率快速增大, 岩性上为粉质粘土与细砂互层, 推测存在土层性质的突变层, 与 H/V 探测出的深层分界面深度大致相同, 推测在大致 90~140 m 深度的范围内存在岩性变化的深层分界面。大沽观测井钻孔未能揭穿沉积层至基岩, 根据王秋实等^[21]和罗艳等^[22]的研究表明, 天津沿渤海区域的沉积层厚度在 1 000 m 以上, 此次研究的沉积层界面对应的可能是沉积层内部波阻抗界面。由于缺少更多的钻孔资料, 此次给出的沉积厚度分布还需经进一步的资料收集和钻井对比等工作来进行确认和优化。

3.2 与其他研究结果对比

将本文结果与其他研究者在附近区域的研究结果进行对比分析。2012 年, 王伟君^[23]使用 HVSR 方法研究表明, 北京唐山天津以南平原地区存在高频共振频率, 主要在 1.0 Hz 附近变化, 反映了沉积层内存在波阻抗分层界面, 可能对应晚更新世底界面, 厚度主要在 100~300 m 之间; 2019 年, Bao 等^[24]使用 HVSR 方法研究了唐山地区存在两个峰值, 唐山断裂带的共振频率集中在 0.15~3.0 Hz 之间, 一个峰值在 0.15~0.60 Hz 之间, 另一个峰值在 1 Hz 附近。彭菲等^[15]使用 H/V 谱比法研究了三河—平谷地区的场地效应和浅层沉积结构, 结果表明研究区内的卓越频率主要集中在 0.4~2.0 Hz 之间; 2024 年, 王秋实等^[21]使用接收函数自相关方法研究了渤海湾北部沉积层结构, 研究表明, 在本文研究区域附近存在 0.3~0.77 Hz 的共振频率, 沉积层厚度主要介于 120~500 m 之间。目前, 对于华北临海区域的研究还尚少, 根据以上比较, 本文研究的 H/V 卓越频率与前人研究结



蓝色曲线为钻孔视电阻率曲线

The blue curve represents the apparent resistivity log

图 8 大沽观测井钻孔柱状图

Fig. 8 Borehole column diagram of the Dagu observation well

果较为一致。

4 结论

本文通过对天津市东疆港地脉动噪声的流动观测和 H/V 数据计算分析, 讨论了东疆港填海造陆区地震场地效应的影响。

(1) 通过在东疆港填海造陆区架设流动观测台站, 在 50~200 m 深度附近存在软沉积界面, 场地卓越频率为 0.6~1.6 Hz, 对地震波具有 1.96~3.99 倍的放大倍数下限。在港口建设和高层建筑物设计时, 尽量避免填海区内新增建筑物卓越频率与土层卓越频率一致。

(2) 东疆港低频段的 H/V 峰值需要进一步研究和讨论, 海浪对于海岸的冲刷会对观测结果造成一定的影响, 怎样剔除环境干扰和人为干扰是影响 H/V 场地探测的关键之一。但 H/V 方法是简易便捷、成本较低的浅层结构探测方法, 仍可广泛适用于城市区域沉积层探查和场地效应。

参考文献

- [1] 郭宗斌, 陈其峰, 冯恩国, 等. 工程地震场地分类方法研究进展 [J]. 内陆地震, 2021, 35(4): 346-353
Guo Z B, Chen Q F, Feng E G, et al. Progress of site classification in earthquake engineering[J]. Inland Earthquake, 2021, 35(4): 346-353
- [2] 陈兰生, 冀昆, 温瑞智, 等. 考虑场地放大效应的全国地震危险分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(6): 177-185
Chen L S, Ji K, Wen R Z, et al. Seismic hazard analysis for China considering site amplification effect[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(6): 177-185
- [3] 吕旭升. 场地地震动效应分析方法的差异性与 HVSR 方法的修正研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023
Lü X S. Research on the differences of analysis methods for site seismic effects and the modification of HVSR method[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023
- [4] 李启成, 张尉, 郑新娟, 等. 考虑介质对地震波吸收衰减作用的场地放大效应估计 [J]. 震灾防御技术, 2021, 16(3): 476-484
Li Q C, Zhang W, Zheng X J, et al. Estimation of site amplification effect considering the absorption and attenuation of seismic waves by the medium[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(3): 476-484
- [5] 王信博, 刘启方. 1970 年通海 $M_s7.7$ 地震中通海盆地地震动模拟 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(4): 169-179
Wang X B, Liu Q F. Simulation of ground motion in the Tonghai Basin during the 1970 Tonghai $M_s7.7$ earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(4): 169-179
- [6] 于生生, 张熙胤, 陈兴冲, 等. 场地地震反应分析研究现状及展望 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 181-192
Yu S S, Zhang X Y, Chen X C, et al. Present research situation and prospect on analysis of site seismic response[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 181-192
- [7] Tian B Q, Du Y N, You Z W, et al. Measuring the sediment thickness in urban areas using revised H/V spectral ratio method[J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105223
- [8] 宗健业. 利用背景噪声研究广州地区场地效应及估算地震灾害结构 [D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2020
Zong J Y. Site effect and earthquake disaster characteristics in Guangzhou area by ambient noise[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2020
- [9] Nogoshi M, Igarashi T. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2)[J]. Journal of the Seismological Society of Japan, 1971, 24(1): 26-40
- [10] Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Quarterly Report of RTRI, 1989, 30(1): 25-33
- [11] Ibs-von Seht M, Wohlenberg J. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(1): 250-259
- [12] 陈棋福, 刘澜波, 王伟君, 等. 利用地脉动探测北京城区的地震动场地响应 [J]. 科学通报, 2008, 53(18): 2229-2235
Chen Q F, Liu L B, Wang W J, et al. Site effects on earthquake ground motion based on microtremor measurements for metropolitan Beijing[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(2): 280-287
- [13] Pilz M, Parolai S, Leyton F, et al. A comparison of site response techniques using earthquake data and ambient seismic noise analysis in the large urban areas of Santiago de Chile[J]. Geophysical Journal International, 2009, 178(2): 713-728
- [14] Yilar E, Baise L G, Ebel J E. Using H/V measurements to determine depth to bedrock and V_{330} in Boston, Massachusetts[J]. Engineering Geology, 2017, 217: 12-22
- [15] 彭菲, 王伟君, 寇华东. 三河—平谷地区地脉动 H/V 谱比法探测: 场地响应、浅层沉积结构及其反映的断层活动 [J].

- 地球物理学报, 2020, 63(10): 3775-3790
- Peng F, Wang W J, Kou H D. Microtremor H/V spectral ratio investigation in the Sanhe-Pinggu area: Site responses, shallow sedimentary structure, and fault activity revealed[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(10): 3775-3790
- [16] 阮明明, 王帅军, 田晓峰, 等. 利用 HVSR 法探测渭河盆地浅部构造 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(6): 584-587, 621
- Ruan M M, Wang S J, Tian X F, et al. Near-surface structure of Weihe basin detected by HVSR method[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(6): 584-587, 621
- [17] 张瑞青, 况春利, 张笑晗, 等. 沉积层结构被动源探测方法及其在典型盆地的应用 [J]. 地球与行星物理论评(中英文), 2023, 54(1): 12-26
- Zhang R Q, Kuang C L, Zhang X H, et al. Advances in passive seismic analysis of sediment structure and applications in some typical basins[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, 54(1): 12-26
- [18] 秦彤威, 王少瞳, 冯宣政, 等. 微动 H/V 谱比方法 [J]. 地球与行星物理论评, 2021, 52(6): 587-622
- Qin T W, Wang S T, Feng X Z, et al. A review on microtremor H/V spectral ratio method[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, 52(6): 587-622
- [19] 王伟君, 陈棋福, 陈凌. 松散浅层结构的地震噪声探测综述 [J]. 中国地震, 2012, 28(4): 335-350
- Wang W J, Chen Q F, Chen L. Review on near-surface soft structure investigation with seismic noise[J]. *Earthquake Research in China*, 2012, 28(4): 335-350
- [20] 王伟君, 陈棋福, 齐诚, 等. 利用噪声 HVSR 方法探测近地表结构的可能性和局限性: 以保定地区为例 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1783-1797
- Wang W J, Chen Q F, Qi C, et al. The feasibilities and limitations to explore the near-surface structure with microtremor HVSR method: A case in Baoding area of Hebei Province, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(7): 1783-1797
- [21] 王秋实, 李永华, 武岩. 使用接收函数自相关约束渤海湾北部沉积层结构 [J]. 地球物理学报, 2024, 67(6): 2191-2203
- Wang Q S, Li Y H, Wu Y. Sedimentary structures beneath the Northern Bohai basin constrained by the autocorrelation of receiver function[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(6): 2191-2203
- [22] 罗艳, 崇加军, 倪四道, 等. 首都圈地区莫霍面起伏及沉积层厚度 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1135-1145
- Luo Y, Chong J J, Ni S D, et al. Moho depth and sedimentary thickness in Capital region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1135-1145
- [23] 王伟君. 利用地震噪声调查华北平原场地作用和浅层结构 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012
- Wang W J. The site effect and shallow structure investigations based on seismic noise analysis in North China Plain[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012
- [24] Bao F, Li Z W, Tian B F, et al. Sediment thickness variations of the Tangshan fault zone in North China from a dense seismic array and microtremor survey[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 185: 104045