

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250324001

基于竖向台阵的土体小应变阻尼比随深度变化规律研究*

陈 苏^{1,2}, 龙增洋¹, 王苏阳¹, 姜伟平¹, 李小军^{1,2}

(1. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京工业大学, 北京 100124; 2. 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 目前, 场地地震反应分析中采用的土体小应变阻尼通常根据室内试验确定。然而, 由于室内试验仅能代表土体阻尼, 无法反映地震波在传播过程中由场地空间变异性引起的散射效应, 直接采用室内试验得到的小应变阻尼往往会导致预测的场地放大作用被明显高估。针对这一问题, 本研究从美国和欧洲选取了四个竖向地震台阵, 首先利用地震干涉测量法从地震数据中提取出场地的原位剪切波速结构, 然后使用模拟退火算法反演了原位小应变阻尼比结构, 之后讨论了土体小应变阻尼比随深度的变化规律, 最后比较了恒定阻尼假设和非恒定阻尼假设在重现和预测场地地震反应中的表现。结果表明: 利用地震干涉测量法和模拟退火算法反演得到的原位土动力学参数可以很好地重现并预测小应变条件下的场地地震反应。同时, 场地的原位小应变阻尼结构也未表现出明显的随深度变化的规律。此外, 在大多数情况下, 是否采用恒定阻尼假设对地表加速度反应谱模拟值几乎没有影响。因此, 在通常情况下, 场地地震反应分析可以直接采用恒定阻尼假设, 无需考虑阻尼比随深度的变化。

关键词: 场地地震反应; 小应变阻尼; 剪切波速结构; 竖向台阵; 地震干涉测量法

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1024-08

Research on Variation of Soil Small-strain Damping Ratio with Depth Based on Vertical Arrays

CHEN Su^{1,2}, LONG Zengyang¹, WANG Suyang¹, JIANG Weiping¹, LI Xiaojun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Currently, the small-strain damping of soil used in seismic site response analysis is generally determined based on laboratory tests. However, since laboratory tests can only represent material damping of soil, they cannot reflect the scattering effects caused by spatial variability of the site during seismic wave propagation. Therefore, directly using the small-strain damping obtained from laboratory tests often leads to a significant overestimation of the predicted site amplification. To address this issue, this study selected four vertical seismic arrays from the United States and Europe. First,

* 收稿日期: 2025-03-24; 修回日期: 2025-04-22

基金项目: 国家重点研发项目(2023YFB2390400)、国家自然科学基金项目(52192675)资助

作者简介: 陈苏(1986—), 男, 教授, 博导, 博士。研究方向: 工程设防地震动、AI工程应用。

E-mail: chensuchina@126.com

通信作者: 王苏阳(1990—), 男, 教授, 博导, 博士。研究方向: 场地地震反应及土动力学。E-mail: suyangwang@bjut.edu.cn

the in-situ shear wave velocity structures of these sites were extracted from the seismic data using the seismic interferometry method. Then, the in-situ small-strain damping ratio structures were inverted using the simulated annealing algorithm, and the variation of the small-strain damping ratio of the soil with depth was discussed. Finally, the performance of the uniform damping assumption and the non-uniform damping assumption in reproducing and predicting seismic site response was compared. The results showed that the in-situ soil dynamic parameters inverted using seismic interferometry and the simulated annealing algorithm could well reproduce and predict the seismic site response under small-strain conditions. Meanwhile, the in-situ small-strain damping ratio profile did not exhibit a clear variation pattern with depth. Moreover, in most cases, whether the uniform damping assumption was adopted had almost no effect on the simulated values of surface acceleration response spectra. Therefore, the uniform damping assumption could be directly adopted in seismic site response analysis under normal circumstances, without the need to consider the variation of damping ratio with depth.

Keywords: seismic site response; small-strain damping; shear wave velocity structure; vertical array; seismic interferometry

0 引言

历次震害调查表明,建筑物的震害与局部场地条件密切相关^[1]。这主要是由于近地表处波阻抗的降低和共振效应,导致局部场地对其固有频率附近频段范围内的地震动有显著的放大效应。因此,局部场地效应的评估对于确定重大工程设防地震动有着重要影响。目前,在工程实践中,场地地震反应的数值分析通常采用一维层状模型^[2-4],即假设场地为水平成层半空间并将输入地震动视为垂直入射条件下的剪切运动^[5-6]。根据一维波动理论,在不考虑材料非线性的情况下,场地放大作用主要受到剪切波速结构和小应变阻尼比的影响。其中,场地固有频率主要由剪切波速结构决定,而对应的放大倍数主要受到剪切波速结构和小应变阻尼比的共同影响^[7-8]。

准确估计包括场地浅层剪切波速结构和小应变阻尼比在内的土动力学参数对于场地地震反应的模拟与预测至关重要^[9-10]。目前,工程中场地剪切波速结构的确定主要依靠钻孔测试方法和面波测试方法^[11-12]。尽管与面波测试方法相比,钻孔测试法在测试精度和分辨率上展现出明显的优势,但由于传感器与钻孔侧壁难以完全贴合等原因,钻孔测试得到的剪切波速与原位剪切波速之间仍然存在一定的偏差^[13]。与此同时,土体小应变阻尼比主要

通过室内共振柱试验确定。然而,由于室内试验仅能代表土体阻尼,无法反映地震波在传播过程中由土体空间变异性引起的散射效应^[14],因此,在场地反应分析中直接采用室内试验测得的小应变阻尼比往往会导致预测的场地放大效应被显著高估^[15]。

受到测试技术和成本的限制,目前工程勘探或室内试验提供的土动力学参数有时难以准确反映土体的原位动力学特征。已有不少研究者利用竖向台阵地震数据开展了反演原位剪切波速结构和小应变阻尼比的研究^[16-17]。其中,基于解卷积的地震干涉测量法已被证实是一种适用于竖向台阵的高精度剪切波速成像技术,可敏锐捕捉到由环境扰动引起的剪切波速细微变化,满足场地反应数值分析对剪切波速测量精度的要求^[18-19]。然而,如何从竖向台阵地震数据中提取原位小应变阻尼比并给出其在深度方向上的分布规律仍然是一个具有挑战性的问题。究其原因,主要有二:其一,上行波与下行波之间的干涉效应导致难以直接从地震动记录中获得不同接收点之间单向行波的传递函数;其二,小应变阻尼比沿土层深度的分布规律仍然存在争议。

1 竖向台阵及地震记录

日本和美国已初步建成成规模的竖向台阵地震观测台网,包括由700余个竖向台阵组成的

KiK-net (Kiban Kyoshin network)、由 37 个竖向台阵组成的 CSMIP (California Strong Motion Instrumentation Program) 以及由 7 个竖向台阵组成的 NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation) 等。此外,已建成竖向台阵还包括我国的河北响瞳台阵、云南通海台阵、台湾罗东台阵和花蓮台阵,日本千叶台阵和神户人工岛台阵,欧洲地震试验台阵等。由于地震干涉测量法得到的是不同观测点之间的平均剪切波速,为了保证剪切波速结构在深度上的分辨率,本研究选取四个至少包含 5 个不同深度观测点的竖向台阵,分别为隶属 CSMIP 的金银岛岩土台阵 (Treasure Island Geotechnical Array, 简称 TI)、隶属国际数字地震台网联合会的欧洲地震试验台阵 (EuroSeisTest Array, 简称 EST)、隶属 NEES 的野生动物保护区液化台阵 (Wildlife Liquefaction Array, 简称 WLA) 以及德莱尼公园数字台阵 (Delaney Park Digital Array, 简称 DP)。地震动具体的筛选条件如下:(1)地表处地震动峰值加速度 (PGA) 介于 1~20 cm/s²; (2)震中距不超过 100 km; (3)震级不超过 5 级; (4)地震记录信噪比不低于 3。

2 场地波速结构确定方法与优化算法

2.1 场地原位剪切波速结构的确定方法

地震干涉测量法主要分为基于互相关和基于解卷积的地震干涉测量法^[20-22]。对于竖向地震台阵而言,与基于互相关的地震干涉测量法相比,基于解卷积的地震干涉测量法能够有效消除入射波场的干扰^[23-24],可以得到更为稳定的格林函数估计值^[25-27]。在本研究中,利用基于解卷积的地震干涉测量法估计近地表剪切波速的具体步骤如下:

(1)计算地表与不同深度处加速度记录之间的解卷积函数,具体公式如下:

$$W(f) = \frac{S_i(f)S_0^*(f)}{|S_0^*(f)|^2 + \epsilon} \quad (1)$$

式中, f 为频率; $S_0(f)$ 和 $S_i(f)$ 分别代表地表处和第 i 个强震仪处强震记录傅里叶谱;*为复共轭号; ϵ 为稳定因子,其取值为地表处加速度记录功率谱平均值的 0.5%,以此避免解卷积函数发散。

(2)利用傅里叶逆变换,将解卷积函数从频域转换到时域,并利用三次样条函数将时域中的解卷积函数重采样为 20 kHz,以此提高解卷积函数的时间分辨率,从而提高所估计的近地表剪切波速的精度。

(3)解卷积函数负半轴和正半轴上极大值对应的时间分别对应上行波和下行波的传播时间。通常情况下,上行波和下行波对应的传播时间差异非常小。鉴于此,本研究采用了正半轴上极大值对应的时间作为地震波传播时间。利用不同深度之间的距离除以相应的传播时间之差就可以得到两点之间的平均剪切波速。

2.2 模拟退火算法

模拟退火算法是一种基于固体退火原理和统计物理学原理的随机优化方法,采用蒙特卡罗迭代策略进行求解。模拟退火算法的步骤大体上分为四步:初始化、扰动、选择和降温^[28]。扰动过程的目的是确保物理系统在每个温度下都能达到平衡状态,随着系统逐渐冷却,系统的能量逐步降低,最终趋向于最小值。

初始化:确定初始温度 T_{in} 、终止温度 T_{ed} 、每一温度循环次数 L ^[29]。计算公式为:

$$X_0 = X_{min} + \text{Rand}(0,1)(X_{max} - X_{min}) \quad (2)$$

式中, X_0 为初始温度 T_{in} 下的解;Rand(0,1)表示 0 到 1 之间的随机数。

扰动:对解进行扰动得到对应的扰动解。温度 T_{sub} 下的解 X_i 对应的扰动解 U_i 的计算公式为:

$$U_i = X_i + p [\text{Rand}(0,1)(X_{max} - X_i) - \text{Rand}(0,1)(X_{min} - X_i)] \quad (3)$$

式中, p 为扰动系数,本研究设为 0.1。

选择:对比扰动解 U_i 与原解 X_i 确定进入下一次循环的新解 X_{i+1} 。模拟退火算法的选择方案具有与温度 T_{sub} 相关的随机性,计算公式为:

$$X_{i+1} = \begin{cases} U_i, Q(U_i) < Q(X_i) \text{ 或 } \text{Rand}(0,1) < \exp\left(\frac{Q(X_i) - Q(U_i)}{T_{sub}}\right) \\ X_i, \text{ 其余情况} \end{cases} \quad (4)$$

式中, Q 为目标函数,本研究设为解对应的均方根误差。在扰动和选择中任一温度 T_{sub} 下需循环 L 次才会进入降温操作。

降温:对于模拟退火算法,本研究选取的降温

策略为：

$$T_{\text{sub}} \leftarrow cT_{\text{sub}} \quad (5)$$

式中, c 为接近 1 的常数, 本研究设为 0.95。通过不断循环步骤扰动、选择和降温, 直至出现目标函数小于容许误差的解或温度降至终止温度。

3 结果与分析

3.1 原位小应变阻尼随深度的变化规律

本研究首先将不同台阵符合筛选条件的地震动数据按照时间排序, 然后从中选出前三分之二的数数据作为测试集, 剩余数据作为验证集。接着, 利用地震干涉测量法估计不同台阵原位剪切波速结构, 并将钻孔底部的地震时程作为输入地震动, 同时将正演得到的地表地震动加速度反应谱^[29]与观测值之间的均方根误差(RMSE)作为目标函数, 采用模拟退火算法从参数空间中寻找出目标函数最小值对应的原位小应变阻尼结构作为反演结果, 用于重现弱震作用下场地地震反应。其中, 正演采用频域刚度矩阵方法, 加速度反应谱的阻尼比取 5%。RMSE 的计算公式如下：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\ln(X_i) - (Y_i)]^2} \quad (6)$$

式中, X_i 和 Y_i 分别为第 i 个周期点对应的加速度反应谱模拟值和观测值; n 为周期点数目。通过对数尺度上等间隔插值, 本研究在 0.01~10 s 的周期范围内一共选取 201 个周期点用于计算 RMSE 值。

为了评估在场地反应分析中考虑阻尼比随深度变化的必要性, 本文在反演过程中对阻尼比的取值采用了两种不同假设: 其一, 恒定阻尼假设, 即假设土体小应变阻尼随深度不发生变化; 其二, 非恒定阻尼假设, 即假设不同土层的阻尼比可以独立变化。在两种不同假设条件下, 反演得到了原位小应变阻尼结构, 如图 1 所示。其中, 红色虚线为恒定阻尼假设条件下小应变阻尼比的反演结果; 灰色实线为非恒定阻尼假设条件下不同地震事件对应的小应变阻尼比反演结果, 红色实线为非恒定阻尼假设条件下反演结果的平均值; 右轴线上的圆点代表各台阵的钻孔位置。由图 1 可知, TI 台阵在钻孔底部附近的小应变阻尼比远大于上部土层对应的小应变阻尼比, 而 WLA 台阵钻孔深部处的小应变阻尼

比却显著小于表层处对应的小应变阻尼比。与此同时, EST 和 DP 台阵得到的小应变阻尼比随深度变化幅度相对较小, 并未表现出明显的随深度变化规律。

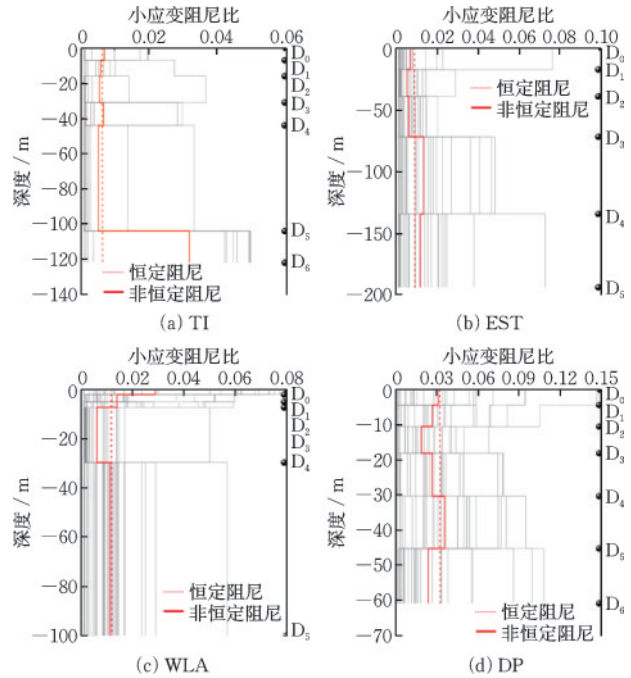


图 1 不同竖向台阵反演得到的小应变阻尼比结构

Fig.1 Small-strain damping ratios inverted from different vertical arrays

现以 EST 台站为例, 来进一步说明利用所提取的原位土动力学参数重现小应变条件下场地地震反应的有效性。图 2 和图 3 分别代表利用测试集中包含的 15 次地震记录重现不同水平上场地地震反应的结果。其中, 黑线代表地表加速度反应谱观测值, 青线和紫线分别代表恒定阻尼假设和非恒定阻尼条件下得到的地表加速度反应谱模拟值; 每个子图名中的 14 位数字编码代表地震事件发生的时间, 后缀中的 ew 代表东西方向, ns 代表南北方向。从图 2 和图 3 中可以发现: 总体上, 不同阻尼假设对应的模拟值均与观测值吻合良好, 验证了采用原位剪切波速和小应变阻尼比结构重现弱震作用下场地地震反应的有效性。此外, 对于大部分地震事件, 是否采用恒定阻尼假设对最终得到的地表加速度反应谱模拟值几乎没有影响。对于其它小部分地震事件, 采用非恒定阻尼假设得到的地表加速度反应谱模拟值与观测值之间的吻合程度总体上略优于采用恒定阻尼假设得到的结果。

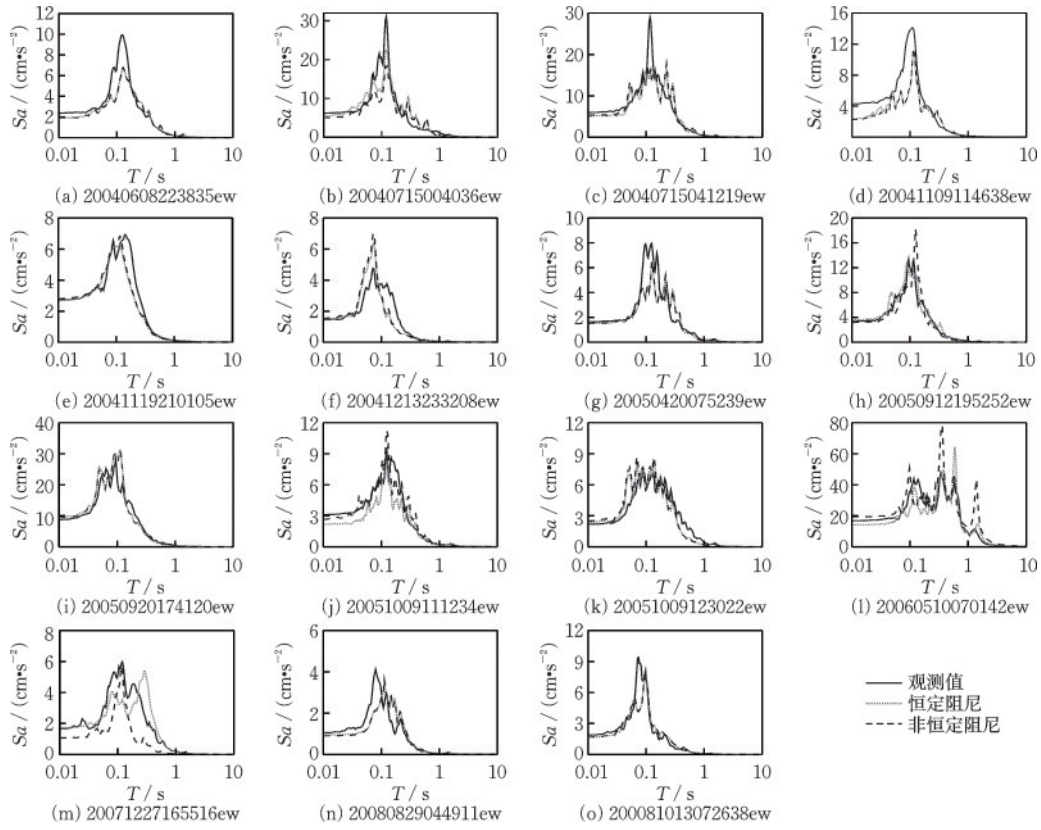


图2 利用原位土动力学参数重现EST台阵地表东西方向上加速度反应谱的结果

Fig.2 Acceleration response spectra in east-west direction at EST array reproduced using in-situ soil dynamic parameters

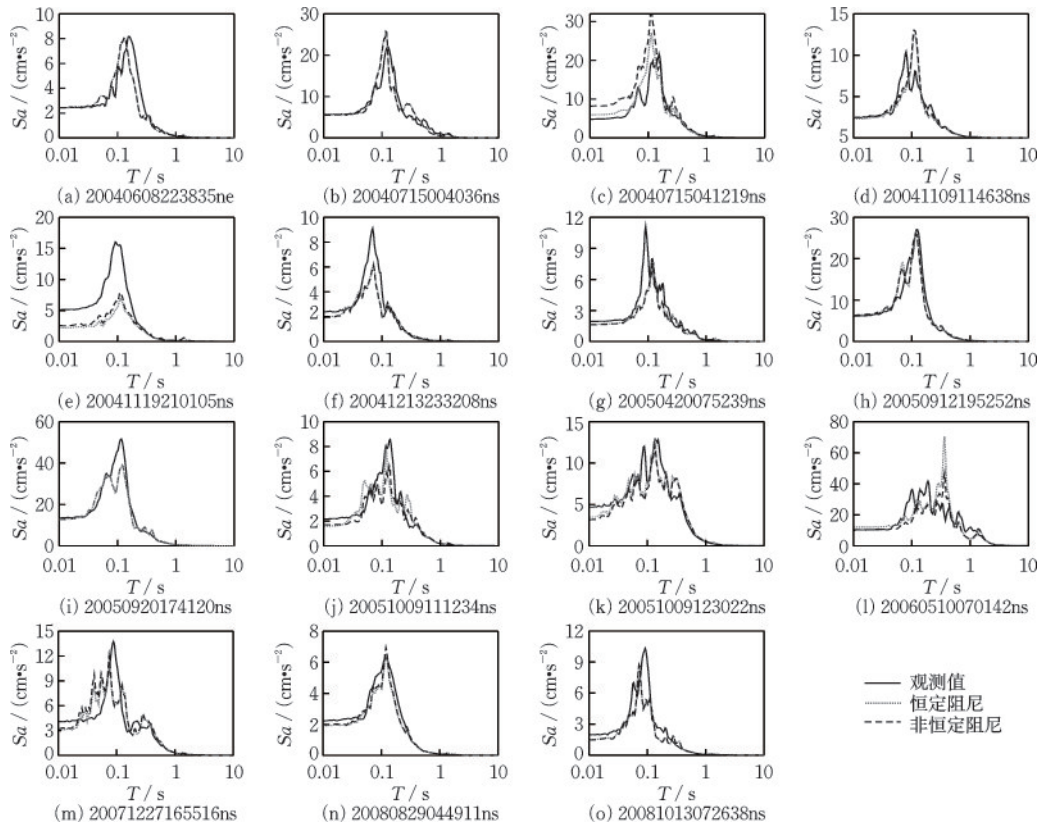


图3 利用原位土动力学参数重现EST台阵地表南北方向上加速度反应谱的结果

Fig.3 Acceleration response spectra in north-south direction at EST array reproduced using in-situ soil dynamic parameters

3.2 采用随深度变化的阻尼比模型的必要性分析

除地表加速度反应谱模拟值与观测值之间的均方根误差之外,本研究还统计了两者之间的皮尔逊相关系数(r),以此定量分析在场地地震反应分析中是否有必要采用非恒定阻尼。根据四个竖向台站中测试集数据得到的均方根误差和相关系数的统计分布如图4所示。从图4可知,反演最终得到的地表地震动加速度反应谱模拟值与观测值之间的吻合程度很高,两者之间的均方根误差在大多数情况下介于0.1~0.4,均方根误差平均值均在0.26到0.35;皮尔逊相关系数总体上不低于0.8,平均值在0.92到0.95。在此前场地反应的研究中,不少研究者将模拟的加速度反应谱和观测值之间的相关系数超过0.6作为评价场地反应分析方法可靠性的判断标准^[15,30-31]。由此可知,利用竖向台阵地震记录中提取的原位剪切波速结构和反演的小应变阻尼可以很好地重现小应变条件下的场地地震反应。通过对比图4中相同台阵在不同阻尼比假设条件下的均方根误差和相关系数平均值还可以发现,两种假设得到的结果平均差异很小,总体上非恒定阻尼表现略优于恒定阻尼。

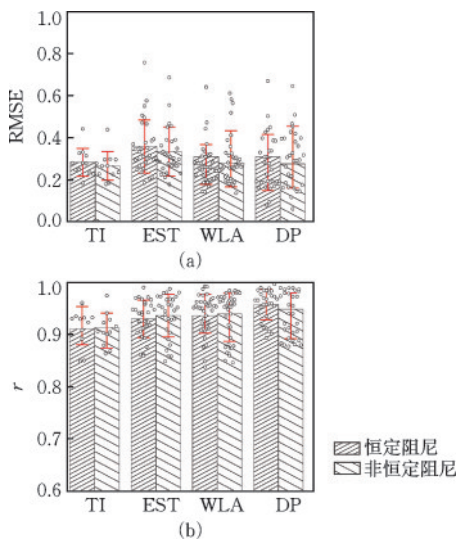


图4 利用测试集数据重现场地地震反应得到的均方根误差与皮尔逊相关系数
Fig.4 Root mean square error and Pearson correlation coefficient of seismic site response reproduced using test set

此外,本研究将测试集数据得到的平均剪切波速和小应变阻尼结构作为场地模型参数,然后使用验证集数据中钻孔底部记录作为地震动输入,并选

取均方根误差和相关系数作为地表地震动加速度反应谱模拟值与观测值之间吻合程度的评价指标,以此进一步验证利用原位土动力学参数预测小应变条件下场地地震反应的有效性,结果如图5所示。从图5可知,预测的地表地震动加速度反应谱模拟值与观测值之间的吻合程度也很高,与重现场地反应得到的结果相近。模拟值与观测值之间的均方根误差在大多数情况下介于0.1~0.5,均方根误差平均值均在0.22到0.35;皮尔逊相关系数总体上不低于0.8,平均值在0.90到0.97。通过对比图5中相同台阵在不同阻尼假设条件下得到的均方根误差和相关系数平均值还可以发现,对于WLA和DP台站来说,恒定阻尼和非恒定阻尼得到的结果基本相同;对于TI和EST台站来说,非恒定阻尼得到的结果略优于恒定阻尼假设。

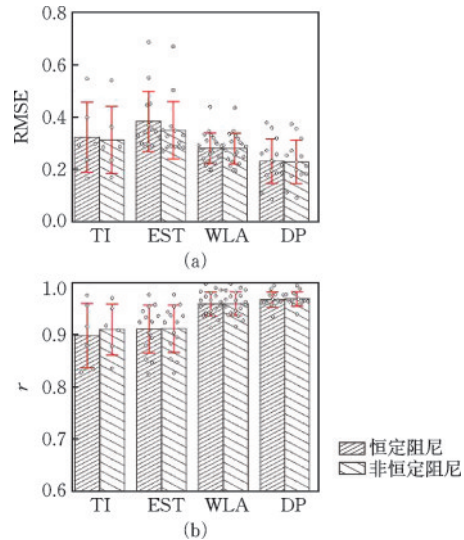


图5 利用验证集数据预测场地地震反应得到的均方根误差与皮尔逊相关系数
Fig.5 Root mean square error and Pearson correlation coefficient of seismic site response predicted using validation set

4 结 论

本研究在美国和欧洲选取了四个包含不少于五个不同深度观测点的竖向台阵,首先利用地震干涉测量法从竖向台阵地震数据中提取出场地的原位剪切波速结构,然后使用模拟退火算法反演了小应变阻尼比结构,讨论了阻尼比随深度变化规律,最后比较了恒定阻尼假设和非恒定阻尼假设在重

现和预测场地地震反应中的表现,可以得到以下结论:

(1) 利用地震干涉测量法和模拟退火算法反演得到的原位土动力学参数可以很好地重现并预测小应变条件下的场地地震反应。地表加速度反应谱模拟值与观测值之间的均方根误差在大多数情况下介于0.1~0.5,均方根误差平均值均在0.20到0.35;皮尔逊相关系数总体上不低于0.8,平均值不低于0.9。

(2) 利用不同台阵地震数据反演得到的原位小应变阻尼并未表现出明显的随深度变化规律。其中, TI台阵在钻孔底部附近的小应变阻尼比远大于上部土层对应的小应变阻尼比,而 WLA台阵钻孔深部处的小应变阻尼比却显著小于近地表处的小应变阻尼比。与此同时, EST和 DP台阵得到的小应变阻尼比随深度变化幅度相对较小,并未表现出明显的随深度变化规律。

(3) 在大多数情况下,是否采用恒定阻尼假设对最终得到的地表加速度反应谱模拟值几乎没有影响。少数情况下,采用非恒定阻尼假设得到的地表加速度反应谱模拟值与观测值之间的吻合程度总体上略优于采用恒定阻尼假设得到的结果。因此,本文推荐在场地地震反应分析中一般情况下可以采用恒定阻尼假设,无需考虑阻尼随深度的变化。

参考文献:

- [1] 夏坤,肖雪,董林,等.基于地震动参数的烈度评定标准对比研究:以岷县-漳县6.6级地震为例[J].防灾减灾工程学报,2024,44(4):960-968.
Xia K, Xiao X, Dong L, et al. A comparative study on seismic intensity evaluation standards based on ground motion parameters: A case study of the Minxian-Zhangxian M_s 6.6 earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(4): 960-968. (in Chinese)
- [2] Idriss I M, Seed H B. Seismic response of horizontal soil layers [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(4): 1003-1031.
- [3] 蒋通,邢海灵.水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法[J].岩土工程学报,2007,29(2):218-224.
Jiang T, Xing H L. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic re-
- ponse analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 218-224. (in Chinese)
- [4] Hallal M M, Cox B R, Vantassel J P. Comparison of state-of-the-art approaches used to account for spatial variability in 1D ground response analyses [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(5): 04022019.
- [5] Bardet J P, Ichii K, Lin C H. EERA—A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits[R]. Los Angeles: University of Southern California, 2000.
- [6] 齐文浩,薄景山.土层地震反应等效线性化方法综述[J].世界地震工程,2007,23(4):221-226.
Qi W H, Bo J S. Summarization on equivalent linear method of seismic responses for soil layers [J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 221-226. (in Chinese)
- [7] 吴志坚,王兰民,陈拓,等.汶川地震远场黄土场地震动场地放大效应机制研究[J].岩土力学,2012,33(12):3736-3740.
Wu Z J, Wang L M, Chen T, et al. Study of mechanism of site amplification effects on ground motion in far field loess during Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3736-3740. (in Chinese)
- [8] Thompson E M, Baise L G, Kayen R E, et al. Impediments to predicting site response: Seismic property estimation and modeling simplifications [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(5): 2927-2949.
- [9] 胡聿贤.地震工程学[M].第2版.北京:地震出版社,2006.
Hu Y X. Earthquake engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 陈龙伟,徐欢荣,袁晓铭.浅硬场地剪切波速不确定性对场地地震反应的影响[J].地震工程与工程振动,2014,34(4):123-129.
Chen L W, Xu H R, Yuan X M. Influence of shear-wave velocity uncertainty on seismic site response analysis for a shallow stiff site [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 123-129. (in Chinese)
- [11] Zalachoris G, Rathje E M. Evaluation of one-dimensional site response techniques using borehole arrays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(12): 04015053.
- [12] 卢颖,王海云,姜伟平,等.金银岛岩土台阵原位剪切波速剖面评估[J].世界地震工程,2022,38(4):

- 204-210.
- Lu Y, Wang H Y, Jiang W P, et al. In-situ shear wave velocity profile assessment of Treasure Island Geotechnical Array [J]. *World Earthquake Engineering*, 2022, 38(4): 204-210. (in Chinese)
- [13] Miao Y, He H J, Liu H B, et al. Reproducing ground response using in situ soil dynamic parameters [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2022, 51(10): 2449-2465.
- [14] Houston H. An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure [J]. *Physics Today*, 2003, 56(10): 66-67.
- [15] Tao Y M, Rathje E. Insights into modeling small-strain site response derived from downhole array data [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(7): 04019023.
- [16] Yang J. Interpretation of seismic vertical amplification observed at an array site [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(2): 275-285.
- [17] Han B, Zdravkovic L, Kontoe S, et al. Numerical investigation of multi-directional site response based on KiK-net downhole array monitoring data [J]. *Computers & Geotechnics*, 2017, 89:55-70.
- [18] Nakata N, Snieder R. Estimating near-surface shear wave velocities in Japan by applying seismic interferometry to KiK-net data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B1): 2011JB008595.
- [19] Miao Y, Shi Y, Zhuang H Y, et al. Influence of seasonal frozen soil on near-surface shear wave velocity in Eastern Hokkaido, Japan [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(16): 9497-9508.
- [20] Rubinstein J L. Evidence for widespread nonlinear strong ground motion in the M_w 6.9 loma prieta earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(5): 1595-1608.
- [21] Satoh T, Kawase H, Matsushima S. Differences between site characteristics obtained from microtremors, S-waves, P-waves, and codas [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, 91(2): 313-334.
- [22] Obermann A, Planès T, Larose E, et al. Imaging pre-eruptive and coeruptive structural and mechanical changes of a volcano with ambient seismic noise [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(12): 6285-6294.
- [23] Takagi R, Okada T. Temporal change in shear velocity and polarization anisotropy related to the 2011 $M9.0$ Tohoku-Oki earthquake examined using KiK-net vertical array data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(9): 2012GL051342.
- [24] Mehta K, Snieder R, Graizer V. Downhole receiver function: A case study [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(5): 1396-1403.
- [25] Yamada M, Mori J, Ohmi S. Temporal changes of subsurface velocities during strong shaking as seen from seismic interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B3): 2009JB006567.
- [26] Kalkan E, Wen W P, Heo Y. Delaney park geotechnical array dynamic properties inferred from the magnitude 7.1 2018 anchorage, Alaska, earthquake sequence [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147: 04020150.
- [27] Legates D R, McCabe Jr G J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 233-241.
- [28] Hwan K, Chan M. Berth scheduling by simulated annealing [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2003, 37(6): 541-560.
- [29] 程庆乐, 任昊天, 田源, 等. 考虑时域和频域特征的图片时序数据解析方法: 以地震动数据为例 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2025, 45(1): 110-118.
- Cheng Q L, Ren H T, Tian Y, et al. Image time-series data analysis method considering time and frequency domain characteristics: A case study of ground motion data [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2025, 45(1): 110-118. (in Chinese)
- [30] 樊燕燕, 吕显颖, 李子奇, 等. 地震灾害视角下四川省地震带区域城市韧性评价 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(6): 1323-1335.
- Fan Y Y, Lyu Y Y, Li Z Q, et al. Evaluation of urban resilience in Sichuan seismic belt from the perspective of earthquake disaster [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(6): 1323-1335. (in Chinese)
- [31] Thompson E M, Baise L G, Tanaka Y, et al. A taxonomy of site response complexity [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 41: 32-43.
- [32] Hallal M M, Cox B R. An H/V geostatistical approach for building pseudo-3D Vs models to account for spatial variability in ground response analyses Part I: Model development [J]. *Earthquake Spectra*, 2021, 37(3): 2013-2040.

(本文编辑:赵霞)