

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240220002

# 桩土结构对软土地震动场地效应影响的 离心模型试验研究\*

刘翔宇<sup>1</sup>, 兰景岩<sup>1,2</sup>, 咸甘玲<sup>1</sup>, 任鸿燚<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学土木工程学院, 广西 桂林 541004;  
2. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:**为探讨既有结构体系对地震动场地效应的影响,设计一组以软土地基桩基础为工程背景的动态离心模型试验,分别于近桩处和远桩处布置了加速度传感器阵列并获取试验记录,用以研究分析桩土结构体系和自由场的地震动场地放大响应,结合传统谱比法对比分析了近桩处与远桩处所在局部场地的基础频率、卓越频率及场地反应的差异。结果表明:①由于软弱介质对地震波的滤波作用,地震波由基底向地表传播的过程中,波形越来越稀疏,且各层位峰值加速度时刻均出了先减后增的趋势,并存在一定的滞后性;②由于桩土结构的存在,近桩处各层位峰值加速度略大于远桩处,而放大倍数小于远桩处;③桩土结构对局部场地的放大作用影响显著,同一土层位置,远桩局部场地的放大作用明显高于近桩局部场地,但二者均在第二振型表现出了明显的放大作用;④随着场地土层变浅,各阵型下的场地放大反应并非是一直增加的,在某些振型下,近基底层位的场地放大反应要高于中间层位,小于近地表层位。

**关键词:**地震动场地效应;场地基础频率;动态离心模型试验;传统谱比法

**中图分类号:** TU447; TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0897-09

## Centrifuge Model Test Study on Influence of Pile-soil Structure Interaction on Ground Motion Site Effects in Soft Soil

LIU Xiangyu<sup>1</sup>, LAN Jingyan<sup>1,2</sup>, XIAN Ganling<sup>1</sup>, REN Hongyi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** To explore the influence of existing structural systems on ground motion site effects, a series of dynamic centrifuge model tests with pile foundations in soft soil as the engineering background were designed. Accelerometer arrays were arranged at the near-pile and far-pile locations to collect test records, which were used to investigate and analyze the ground motion site amplification response of the pile-soil structural system and the free field. The traditional spectral ratio method was used to compare and analyze the differences in base frequency, predominant frequency, and site response between the near-pile and far-pile locations. The results showed that: (1) due to the filtering effect of the weak medium on seismic waves, as the waves propagated from the base to the surface, the wave-

\* 收稿日期:2024-02-20;修回日期:2024-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52368068,52168067)资助

作者简介:刘翔宇(1999—),女,硕士研究生。主要从事地震动场地效应研究。E-mail: 1132237781@qq.com

通信作者:兰景岩(1981—),男,教授,博士。主要从事岩土地震工程研究。E-mail: lanjy1999@163.com

forms became increasingly sparse, and the timing of peak acceleration at each layer showed a trend of first decreasing and then increasing, with a certain degree of hysteresis. (2) Due to the presence of pile-soil structure, the peak acceleration at each layer at the near-pile location was slightly larger than that at the far-pile location, while the amplification factor was smaller than that at the far-pile location. (3) The amplification effect of the pile-soil structure on the local site was significant. At the same soil layer, the amplification effect of local site at the far-pile location was significantly greater than that at the near-pile location, though both showed pronounced amplification effects in the second vibration mode. (4) As the soil layers of the site became shallower, the site amplification response did not always increase across all vibration modes. In certain modes, the amplification response near the base layer was higher than that in the intermediate layers, but lower than that in the near-surface layer.

**Keywords:** ground motion site effects; site base frequency; dynamic centrifuge model tests; traditional spectral ratio method

## 0 引言

地震灾害调查及理论研究均表明,局部场地条件对地震动有显著影响,关系到地表灾害的破坏程度和建(构)筑物的工程安全<sup>[1-2]</sup>,而场地反应分析是估计地震动场地效应的有效途径和重要方法,在工程抗震和地震安全性评价工作中发挥着重要作用。当前较为流行的场地反应分析方法有经验法<sup>[3]</sup>、数值模拟法<sup>[4-5]</sup>和间接估计法<sup>[6]</sup>。由于软土等特殊场地条件在地震作用下通常呈现出大变形和强非线性效应<sup>[7]</sup>,地震工程学界对软土地震动场地放大效应的认识尚存在较大的争议<sup>[8]</sup>。

随着模型试验技术的广泛应用与深入推广,及实践经验的不断积累,越来越多的科研人员利用土工离心机动力试验开展地震动场地效应研究<sup>[9-11]</sup>。曹杰等<sup>[12]</sup>开展了均质软黏土自由场离心模型试验研究,探讨了软弱土层中不同强度地震荷载作用下的场地动力响应。兰景岩等<sup>[13]</sup>进行了上覆有水和无水的两组饱和软黏土地基的动态离心模型试验,通过比对加速度、反应谱和场地基本周期等试验结果的差异,发现上覆水对地震动场地效应有显著影响<sup>[14]</sup>。现有关于场地反应分析的研究成果大多以自由场为研究对象,对于实际重大工程的地震安全性评价中场地反应分析已日趋成熟并形成了工作规范<sup>[15]</sup>。但上述自由场是一种较为理想的场地工况条件,随着国内城市化进程的大力推进,大多数的工程场地条件会受到既有建(构)筑物或地下隧道等结构体的影响,进而对地震动的放大效应造成

附加作用<sup>[16-18]</sup>。英国剑桥大学研究团队开展了一组含隧道场地的离心模型试验,探讨了含隧道列与自由场列的加速度反应和反应谱的差异以及场地放大效应随深度的变化规律<sup>[19-20]</sup>。黄茂松等<sup>[21]</sup>进行隧道响应的动力离心模型试验研究,总结出隧道和地基土的地震响应与地震强度和边界条件密切相关。O. Abuhajar等<sup>[22]</sup>结合离心机振动台试验和数值模拟进行了土-涵洞动力相互作用研究,结果表明土-涵洞相互作用降低了地面的运动输入。J. Zhang等<sup>[23-24]</sup>设计并实施了砂土地基中的竖向和斜向群桩的动态离心模型试验,研究分析了饱和砂土的地震液化对不同桩型动力响应的影响。

综上所述,地震作用下软黏土地场地放大效应尚存在争议,对于既有建(构)筑物影响的软土地场地震反应分析的理论研究鲜有报道。在此背景下,本文设计了一组含有群桩基础的软黏土地基离心模型。于近桩处和远桩处设置加速度传感器阵列,在实际地震波作用下获取不同位置、不同深度的加速度记录,对试验结果进行分析,进而探讨既有桩土结构体对地震动场地效应的影响。研究成果有助于深化对软土地场地震动放大效应的认识,对于揭示既有结构体对场地反应的影响规律具有一定的工程意义和科学价值。

## 1 动态离心模型试验方案设计

本次动态离心模型试验设备采用中国地震局工程力学研究所DCIEM-40-300型离心机及振动台系统(如图1所示),此离心机有效半径为5 m,振动

台采用电液伺服驱动,实现水平单向振动,在50g离心加速度下最大振动加速度为30g,振动频率为10~300 Hz,可较真实地模拟地震动荷载。模型箱采用铝制叠环式剪切模型箱(如图2所示),内部尺寸为1 200 mm×500 mm×600 mm(长×宽×高)。



图1 动态离心模型试验系统  
Fig.1 Dynamic centrifuge model test system

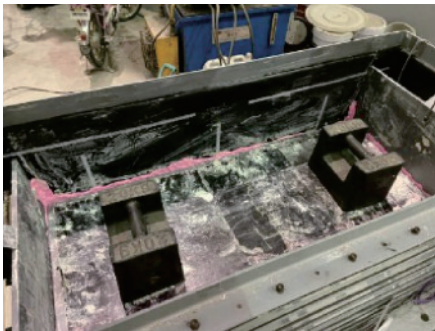


图2 层状剪切模型箱  
Fig.2 Laminated shear model box

由于土体与上部建筑、地下桩土结构之间均存在运动相互作用和惯性相互作用<sup>[25]</sup>,在分析实际工程场地的场地放大效应时,应考虑上部建筑与地下结构对局部场地的影响。因此本试验设计了一组均质成层覆盖的软黏土模型,以模拟总深为27 m的实际软土工程场地(上覆1.5 m、底部埋深8 m的砂土层,中部埋深17.5 m的软土层),如图3所示。将马来西亚高岭土与水按比例混合后,经分层预固结方式制作软黏土层。并采用砂雨器落砂的方法,以90 cm的落距,每4 cm为一层,分层制作软土底部埋置8 m深的砂土用于模拟基岩场地。于模型中压入一组上部质量集中的桩基础,且分别在近桩处(Ab列位置,实际距离桩4 m)、远桩处(Ay列位置,实际距离桩17 m)布设两组由浅至深的加速度计用于记录并分析不同局部场地条件、不同深度处地震动加速度的变化。

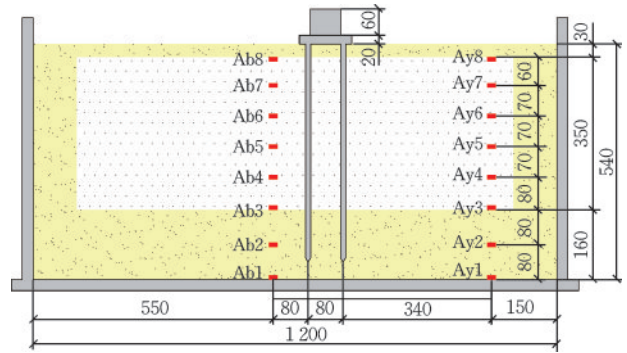


图3 试验模型制作方案  
Fig.3 Construction scheme of test model

按照离心相似比为1:50<sup>3</sup>(模型/原型),采用2 kg的集中质量铝块模拟上部结构250 t的自重。本次试验以1940年美国Imperial Valley 7.1级地震为原型,从振动台底板处输入,并以水平方向激振。采用50g的离心加速度,其主要相似常数(模型/原型)为:加速度相似常数 $C_a=1/50$ ,位移相似常数: $C_l=50$ ,振动时间相似常数: $C_t=50$ 。

## 2 动态离心模型试验地震反应分析

### 2.1 基线校正与滤波

为了消除噪声对试验数据的影响,最大程度地还原结构的真实地震响应<sup>[26]</sup>,在分析场地反应前,先使用Seismo Signal软件对采集到的地震动记录进行基线校正,采用0.1~25 Hz的4阶Butterworth带通非因果滤波器对校正后的地震动记录进行滤波处理,得到最终地震动加速度记录如图4所示。

如图4所示,地震波从基底向地表传播的过程中,由于受到软弱介质的滤波作用且在土层内多次折射与反射,而呈现出波动周期增大、波动频率降低、波形越来越稀疏的特点。受到行波效应的影响,随着土体层位变浅,各层位加速度的峰值时刻表现出一定的滞后性。

为比较不同深度的软弱土层对加速度时程的放大作用,引入参数 $K_{r/s}$ 来描述各层位峰值加速度放大倍数:

$$K_{r/s} = \left| \frac{A_{r\max}}{A_{s\max}} \right| \quad (1)$$

式中, $K_{r/s}$ 表示层间峰值加速度放大倍数的绝对值; $A_{r\max}$ 表示地表及地表下各层位峰值加速度; $A_{s\max}$ 表示参考层位(基底输入层位)的峰值加速度。据此

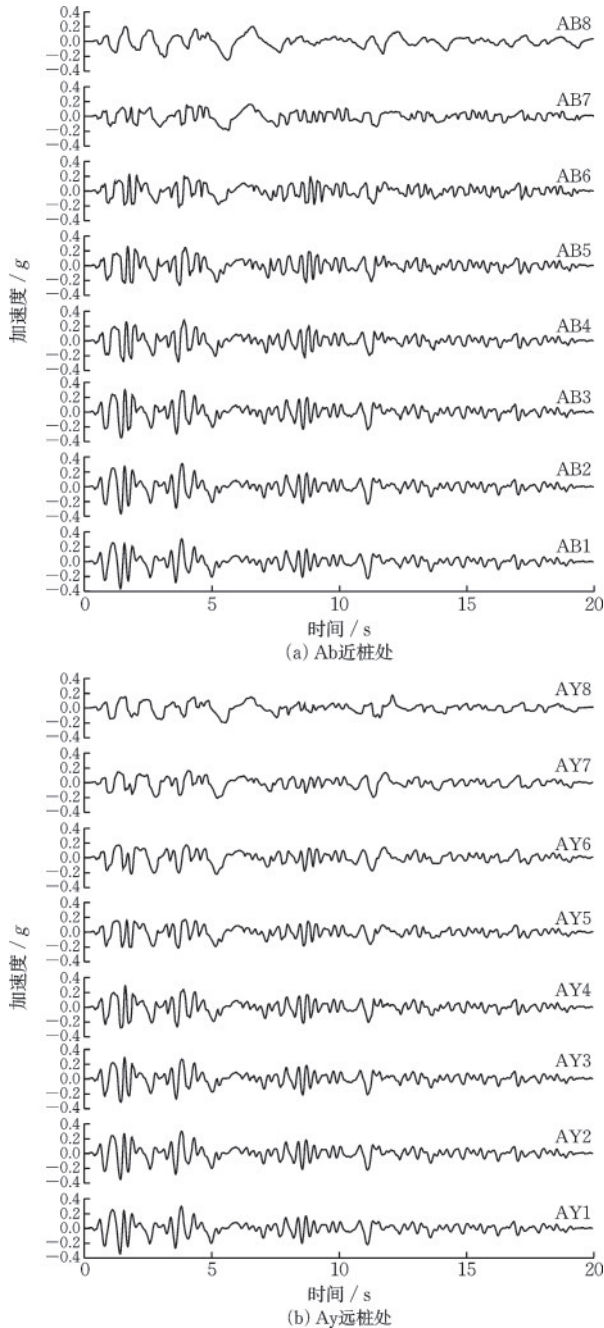


图4 输入地震动作用下土体加速度时程响应

Fig.4 Acceleration time history response of soil under input ground motion

利用试验获取的加速度记录(图4)计算得到各层位峰值加速度放大倍数,见表1。

由表1可知,同一层位远桩处的峰值加速度及其放大倍数略小于近桩处,表明因桩基础的存在对自由场地震动具有一定的影响。根据表1结果,绘制了各层位峰值加速度及其放大倍数随深度的关系如图5所示。由图5可以看出,在近桩和远桩两种不同场地工况条件下,峰值加速度及其放大倍数

表1 各层位峰值加速度及放大倍数

Table 1 Peak acceleration and amplification factor at each soil layer

深度/m	近桩		远桩	
	$A_{max}/g$	$K_{r/s}$	$A_{max}/g$	$K_{r/s}$
-1.5	0.251	0.690	0.262	0.752
-4.5	0.186	0.511	0.205	0.587
-8.0	0.223	0.612	0.224	0.642
-11.5	0.262	0.720	0.212	0.609
-15.0	0.285	0.781	0.291	0.836
-19.0	0.348	0.956	0.319	0.914
-23.0	0.364	0.998	0.353	1.014
-27.0	0.364	1.000	0.349	1.000

与地下埋深的关系曲线均表现为从基底到地表先减小后增大的趋势,近地表处的峰值加速度放大倍数小于1,表明软土地基有削弱和抑制地震动的放大作用。相似地,曹杰等<sup>[12]</sup>在研究均质软弱土层中不同强度地震荷载作用下的场地反应时,也得到了类似的结论,只不过相比于本次试验所得峰值放大倍数略小,差异原因与地基土物理力学性质密切相关。同时也表明由于含水量较高的软弱地层承受地震剪切荷载能力较差,因此地震波在向地面传播的过程中其强度衰减较为明显。

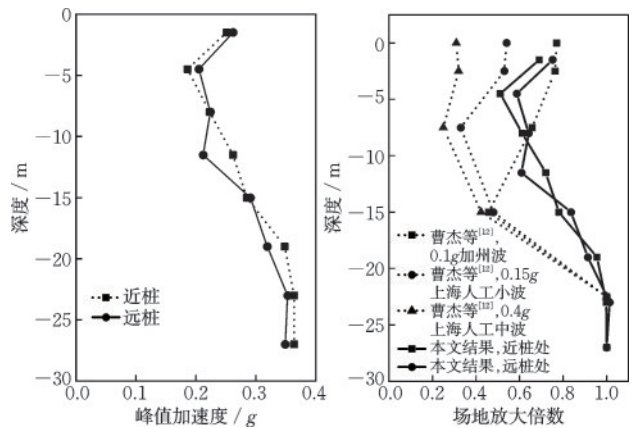


图5 峰值加速度及峰值加速度放大倍数随深度的变化

Fig.5 Variation of peak acceleration and peak amplification factor with depth

## 2.2 加速度反应谱随深度变化的分析

加速度反应谱是场地地震动分析的一项重要内容,常用以表征和描述地震动频谱特性<sup>[27]</sup>。图6展示了不同深度位置近桩处和远桩处的加速度反应谱。观察各层位加速度反应谱,可发现无论是近

桩处还是远桩处,加速度反应谱的谱型整体上呈现双峰状态,并在达到第二次峰值后,逐渐衰减,直到趋于0。在短周期内,深层土体层位的反应谱值较大,在长周期则表现为近地表位置的反应谱值更大,说明土层对加速度反应谱的放大主要体现在周期大于1 s的长周期方向。

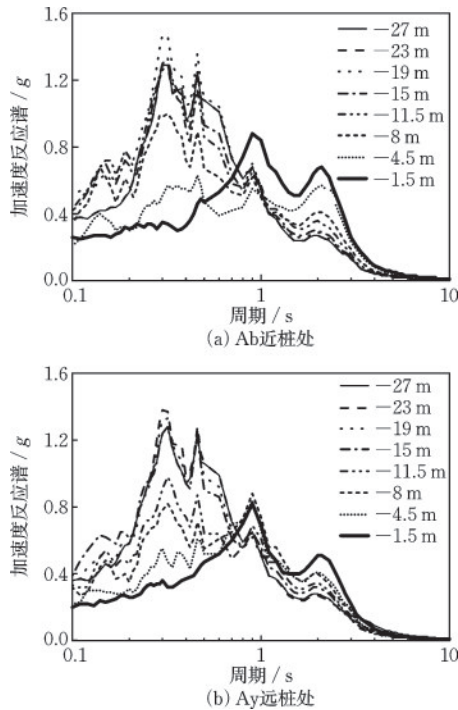


图6 输入地震动作用下土体加速度反应谱  
Fig.6 Acceleration response spectra of soil under input ground motion

在地震动作用下,近桩处和远桩处的加速度反应谱峰值均表现出随深度减小而减小的趋势(表2),受到桩土结构的影响,同一深度,近桩处的谱峰值略高于远桩处。但无论是近桩处还是远桩

表2 地震作用下各深度加速度反应谱峰值及对应周期  
Table 2 Peak acceleration response spectra and corresponding periods at different depths under seismic loading

深度/m	近桩		远桩	
	反应谱峰值/g	周期/s	反应谱峰值/g	周期/s
-1.5	0.87	1.00	0.80	0.90
-4.5	0.91	0.90	0.84	0.90
-8.0	1.00	0.32	0.88	0.90
-11.5	1.29	0.32	0.98	0.32
-15.0	1.33	0.32	1.28	0.32
-19.0	1.47	0.30	1.33	0.30

处,反应谱峰值相对应的周期均表现出深土层周期较小,而近地表土层周期较大的特性。

### 2.3 传统谱比法分析场地反应

局部场地条件对地震动有显著影响,尤其是在软土地条件下,表层土对地震波放大作用的影响不容忽视。地震发生时,在地表观测到的地震波数据,是由震源区介质通过急速破裂和运动释放的地震波,后经地壳介质的传播,最终在浅层局部场地的放大作用下而产生的。因此地震动的产生与传播可归纳为由震源效应、传播路径中以及局部场地效应三部分构成。D. M. Boore<sup>[28]</sup>提出在频域中,地震动的傅里叶谱值可以表示为震源效应( $S$ )、路径效应( $P$ )、场地效应( $G$ )和仪器响应( $I$ )这四个物理过程的乘积,即:

$$A(M_0, R, f) = S(M_0, f) \times P(R, f) \times G(f) \times I(f) \quad (2)$$

式中, $M_0$ 为地震矩; $R$ 为震源距; $f$ 为频率。而在本试验中,各测点位置间距较小,可看成具有相同的路径效应,且各测点所记录的地震波可看作由同一震源发出。通过求解各土层位置与基岩位置观测记录的傅里叶谱比的绝对值,即可消除式(2)中震源效应与路径效应的影响,得到真实的场地反应,可表示为:

$$A_{r/s}(f) = \left| \frac{G_r(f)}{G_s(f)} \right| \quad (3)$$

式中, $A_{r/s}(f)$ 为放大系数(Amplification factor),表示层间放大谱频率反应函数的绝对值; $G_r(f)$ 表示地表及地表下各层位傅里叶谱; $G_s(f)$ 表示参考层位(基底层位)的傅里叶谱。

地震波由基底向地表传播的过程中,不同速度界面反射地震波产生的下行波场与上行波场间存在相消干涉作用,会导致参考场地的傅里叶谱在特定频段的幅值大幅降低,产生假共振现象,导致场地放大系数高于实际值,无法反映真实的场地反应<sup>[29]</sup>。为了有效抑制假共振现象的发生,Steidl提出采用求解某层位与参考场地间的相干函数,并与放大系数卷积得到场地反应的可靠方法<sup>[30]</sup>,相干函数可表示为:

$$r_{ij}(f) = \frac{S_{ij}(f)}{\sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)}} \quad (4)$$

式中, $S_{ii}(f)$ 表示为地表及地下某层位*i*处地震动记

录的自功率谱;  $S_{jj}(f)$  表示为参考场地  $j$  (基岩位置) 处地震动记录的自功率谱;  $S_{ij}(f)$  表示为地表及地下某层位  $i$  处与参考场地  $j$  (基岩位置) 处地震动记录的互功率谱。

本文首先计算地表及地下各层位与参考场地

的傅里叶谱值, 后采用 0.4 Hz 的 Parzen 窗对所求结果进行平滑, 再求解地表及地下各层位与参考场地的傅里叶谱比, 最后乘以相干函数, 得到地震作用下, 近桩处与远桩处各层位的场地反应如图 7 所示。

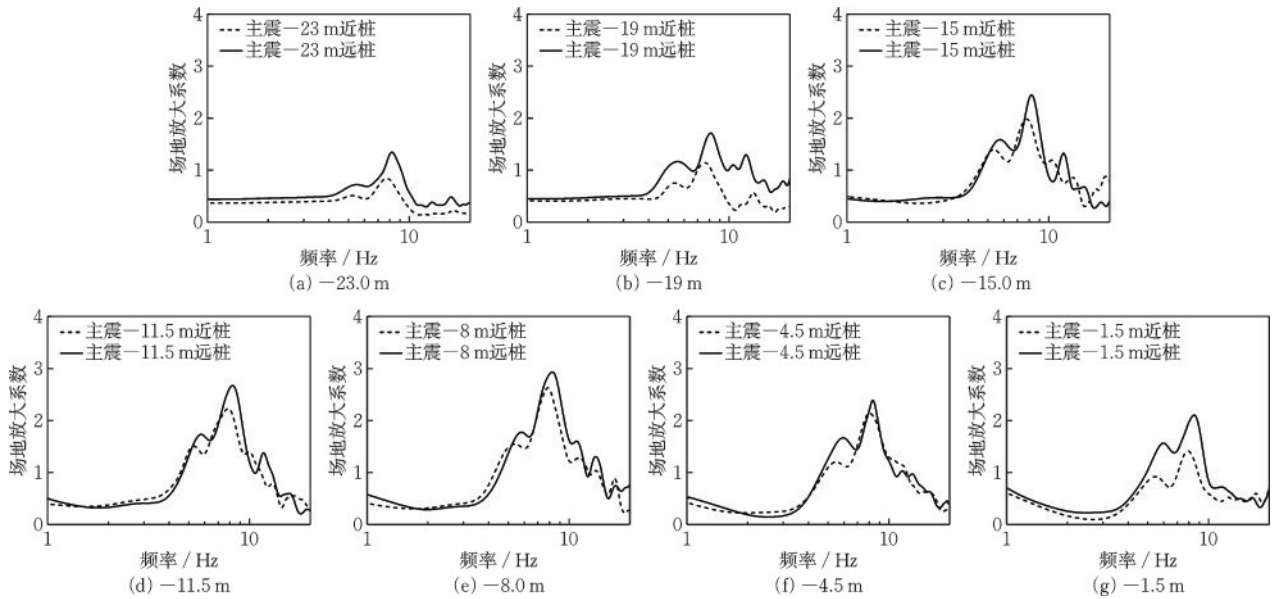


图 7 不同深度场地放大系数与频率的关系

Fig. 7 Relationship between amplification factor and frequency for sites at different depths

由图 7 可知, 无论是近桩处还是远桩处, 各深度位置场地放大系数与频率的关系曲线均表现为先增后减的趋势, 且能被明显识别为两个峰值状态。受到桩土结构的影响, 近桩处的地震动放大作用被抑制, 同一土层位, 近桩处的场地放大作用整体低于远桩处。

由于土体为多自由度体系, 两组试验的场地反应均在 0.1~20 Hz 的有效频段表现出了多个放大系数峰值, 能被明显识别为两个振型, 且均在第二振型表现出了显著的放大作用。在场地反应分析中, 通常将第一振型对应的频率, 也就是场地反应曲线中出现第一个放大系数峰值所对应的频率定义为基础频率, 将最大放大系数对应的频率定义为卓越频率。依据各层位场地反应结果, 归纳出近桩处、远桩处两种工况下的基础频率、卓越频率见表 3。

由表 3 可知, 无论是近桩处还是远桩处, 土层位置越靠近地表, 各阵型的自振频率越大。同一深度, 远桩处各阵型的自振频率略高于近桩处。依据表 3 绘制出近桩处、远桩处各振型地震动放大系数随深度的变化图 (图 8)。无论近桩处还是远桩处, 随着土层位变浅, 各阵型地震动放大系数随深度

表 3 不同振型自振频率随深度的变化

Table 3 Variation of natural frequency with depth for different vibration modes

工况	深度/m	一阶振型		二阶振型	
		$f_a$ /Hz	AF	$f_a$ /Hz	AF
近桩处	-1.5	5.46	0.95	7.96	1.45
	-4.5	5.51	1.20	8.01	2.14
	-8.0	5.36	1.55	7.86	2.63
	-11.5	5.36	1.51	7.86	2.23
	-15.0	5.31	1.40	7.81	1.98
	-19.0	5.31	0.75	7.61	1.14
	-23.0	5.26	0.51	7.76	0.84
远桩处	-1.5	6.01	1.56	8.51	2.10
	-4.5	5.96	1.67	8.36	2.39
	-8.0	5.81	1.77	8.26	2.93
	-11.5	5.76	1.73	8.26	2.67
	-15.0	5.71	1.59	8.21	2.45
	-19.0	5.56	1.17	8.21	1.34
	-23.0	5.51	0.72	8.11	1.71

的变化曲线并不是单一的线性递增, 而是在 -8 m 层位表现出了较强的放大效应, 近地表层位次之, 近基层位放大效应最小。

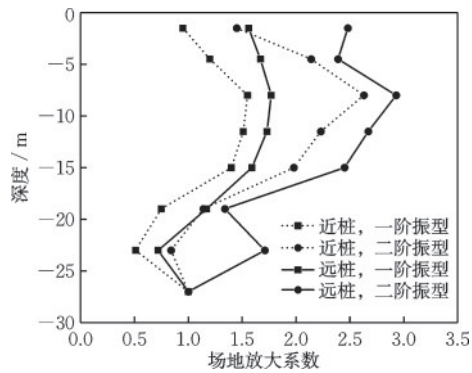


图8 各振型地震动放大系数随深度的变化

Fig.8 Variation of ground motion amplification factor with depth for different vibration modes

### 3 结 论

为探讨既有结构体系对地震动场地效应的影响,设计并实施了一组含有群桩基础的软黏土地基动态离心模型试验,通过在近桩处和远桩处设置加速度传感器阵列,在实际地震波作用下获取不同位置不同深度的加速度记录结果,采用传统谱比法计算并分析了桩土结构体系和自由场的场地反应结果及基础频率、卓越频率的差异,得到以下结论:

(1)受软弱介质滤波作用与行波效应影响,地震波由基底向地表传播的过程中,表现出波形稀疏、峰值加速度滞后的特点;高含水量饱和软弱土层对地震波强度衰减的影响较大,峰值加速度随土层埋深变浅呈现先降后升的趋势;因桩土结构的影响,同一层位近桩处峰值加速度及放大倍数略高于远桩位置。

(2)本文试验显示,两种并不同场地条件均在一8 m深度表现出显著场地放大效应,近地表次之,基底层最小,且两者各振型频率均随土层埋深变浅而增大。桩土结构致近桩土体压实、刚度增大,导致同一层位远桩处场地放大效应强于近桩处、远桩处自振频率略高于近桩位置。

(3)体系反应通常以第一振型为主,但桩土结构的影响使得近、远桩局部场地在第二振型中表现出显著放大效应。说明研究带地下桩土结构的局部工程场地抗震时,需兼顾高阶振型反应,不可仅关注第一振型。

综上所述,桩土结构对地震动场地效应具有不可忽视的影响,简单地将工程场地简化为自由场开展地震反应分析工作可能会对地震动参数结果带

来较大的误差和抗震设防上的极大风险,因此在进行工程抗震设计中,对既有结构体应给与充分考虑和重视。

### 参考文献:

- [1] 薄景山,李秀领,李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 11-15.  
Bo J S, Li X L, Li S Y. Some progress of study on the effect of site conditions on ground motion [J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 11-15. (in Chinese)
- [2] 刘启方,李家祥,温瑞智. SV波入射下斜坡地形对上覆土层地震动放大的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 92-99.  
Liu Q F, Li J X, Wen R Z. Study on the effect of ground motion amplification of slope topography to overlying soil layer under incident SV waves [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 92-99. (in Chinese)
- [3] Bonilla L F, Steidl J H, Lindley G T, et al. Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(3): 710-730.
- [4] Hashash Y M A, Park D. Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment [J]. Engineering Geology, 2001, 62: 185-206.
- [5] 袁晓铭,李瑞山,孙锐. 新一代土层地震反应分析方法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 95-103.  
Yuan X M, Li R S, Sun R. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 95-103. (in Chinese)
- [6] 李小军. 地震动参数区划图场地条件影响调整[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 21-29.  
Li X J. Adjustment of seismic ground motion parameters considering site effects in seismic zonation map [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup2): 21-29. (in Chinese)
- [7] 缪涵,王彦臻,方怡,等. 海湾深厚海床场地二维非线性远场强地震反应特征[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 637-649.  
Miao H, Wang Y Z, Fang Y, et al. 2D Nonlinear site response characteristics of a cross-bay deep seabed sub-

- jected to far-field strong earthquakes [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(4): 637-649. (in Chinese)
- [8] 兰景岩, 王延伟, 刘娟. 基于离心模型试验的中硬自由场放大效应研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(3): 558-565, 625.  
Lan J Y, Wang Y W, Liu J. Ground motion amplification effect of medium-stiff free field based on centrifugal model tests [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(3): 558-565, 625. (in Chinese)
- [9] Kutter B L, James R G. Dynamic centrifuge model tests on clay embankments[J]. *Geotechnique*, 1989, 39(1): 91-106.
- [10] Taboada-Urtuzuastegui V M, Martinez-Ramirez G, Abdoun T. Centrifuge modeling of seismic behavior of a slope in liquefiable soil [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(9): 1043-1049.
- [11] Lee C J, Wei Y C, Kuo Y C. Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 34(1): 37-51.
- [12] 曹杰, 韩黎明, 冯昌明. 软弱土层自由场动力离心模型试验[J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(2): 78-82.  
Cao J, Han L M, Feng C M. Centrifugal modelling tests of free-field dynamics in weak soils [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(2): 78-82. (in Chinese)
- [13] 兰景岩, 宋锡俊, 王婷. 上覆海水层对自由场基本周期影响的离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4): 768-775.  
Lan J Y, Song X J, Wang T. Centrifugal model tests on influences of overlying sea layer on basic period of free field [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 768-775. (in Chinese)
- [14] Lan J Y, Liu J, Wang T, et al. A centrifuge study on the effect of the water cover on the ground motion of saturated marine sediments [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 152: 107044.
- [15] 工程场地地震安全性评价: GB17741—2005[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2005.
- [16] 蔡金豆, 兰景岩, 史庆旗. 地下隧道对地震动峰值加速度及反应谱的影响[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(3): 141-148.  
Cai J D, Lan J Y, Shi Q Q. Influence of underground tunnel on peak ground acceleration and response spectrum [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 141-148. (in Chinese)
- [17] 何伟, 陈健云, 于品清. 地下结构开发对场地地表反应谱影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(6): 1098-1102.  
He W, Chen J Y, Yu P Q. A study on influence of underground structure on ground surface response spectra [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(6): 1098-1102. (in Chinese)
- [18] 王彤辉, 李小军, 陈红娟, 等. 场地-隧道-地上建筑结构体系地震响应的振动台试验[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(4): 742-751.  
Wang T H, Li X J, Chen H J, et al. Shaking table test of seismic response of site-tunnel-aboveground building structure system [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(4): 742-751. (in Chinese)
- [19] 兰景岩, 蔡金豆, 吴连斌, 等. 含隧道场地地震动放大效应的深度变化规律研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2083-2091.  
Lan J Y, Cai J D, Wu L B, et al. Study on variation law of ground motion amplification effects along depth in tunnel site [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2083-2091. (in Chinese)
- [20] Lanzano G, Bilotta E, Russo G, et al. Centrifuge modeling of seismic loading on tunnels in sand [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(6): 854-869.
- [21] 黄茂松, 曹杰. 隧道地震响应简化分析与动力离心试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 271-280.  
Huang M S, Cao J. Simplified analysis of tunnel earthquake response and centrifuge modelling calibration [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 271-280. (in Chinese)
- [22] Abuhajar O, El Naggar H, Newson T. Experimental and numerical investigations of the effect of buried box culverts on earthquake excitation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 79: 130-148.
- [23] Zhang J, Li Y R, Yan Z X, et al. Experimental study of vertical and batter pile groups in saturated sand using a centrifuge shaking table [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2022, 21(1): 23-26.
- [24] Zhang J, Li Y R, Rong X, et al. Dynamic p-y curves for vertical and batter pile groups in liquefied sand [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2022, 21(3): 605-616.
- [25] 汪刚. 土-桩基-核岛动力相互作用试验与数值模拟[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.

