

DOI: 10.11779/CJGE2024S10022

# 软黏土中含桩地下结构地震响应离心试验模拟

黄茂松<sup>1,2</sup>, 姚钧天<sup>1,2</sup>, 俞剑<sup>\*1,2</sup>, 王浩然<sup>3</sup>, 张中杰<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 针对大空间含桩地下结构(如地下车行系统)在地震作用下的动力响应特性以及场地震陷、结构上浮等危害展开离心振动台试验。试验采用饱和软黏土作为地基土, 设计了自由场、整体浅埋地下结构以及等效单元浅埋地下结构 3 种试验情况, 利用层状剪切箱消除边界反射效应, 在 50g 的离心加速度下开展水平地震试验。试验结果表明, 不同结构在地震过程中会产生自振在特定的频率区段放大响应, 在整体质量、静态浮力及转动惯量等效的前提下, 整体结构相对单元结构形式能够降低地震作用下结构的自振效应, 且整体结构具有更好地震后抗浮性能。

**关键词:** 离心振动试验; 桩基; 地震; 相互作用; 频域特性

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0001-05

**作者简介:** 黄茂松(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn。

## Centrifugal mode tests on seismic response of underground structures with pile foundations in soft clay

HUANG Maosong<sup>1,2</sup>, YAO Juntian<sup>1,2</sup>, YU Jian<sup>\*1,2</sup>, WANG Haoran<sup>3</sup>, ZHANG Zhongjie<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design

& Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** The centrifuge shaking table tests are conducted to investigate the dynamic response characteristics of large underground structures with piles, such as underground transportation systems, under seismic loading. In addition, the potential hazards like ground liquefaction and structural buoyancy are examined. The saturated soft clay is used as the foundation soil in the tests, which are designed to represent three scenarios: free field condition, integrated shallowly-buried underground structure, and equivalent single-cell shallowly-buried underground structure. To eliminate the boundary reflection effects, a layered shear box is utilized. The horizontal seismic tests are conducted at 50g centrifugal acceleration. The test results indicate that different structures amplify the response at specific frequency bands associated with their natural vibrations. Under the premise of the equivalent overall mass, static buoyancy and moment of inertia, the integrated structure reduces the effects of the natural vibrations during seismic events compared to the single-cell configuration and exhibits superior post-seismic buoyancy resistance properties.

**Key words:** dynamic centrifuge test; pile foundation; earthquake; interaction; frequency characteristic

## 0 引言

饱和软黏土场地在地震作用下会产生明显的整体沉降即震陷现象。震陷作用会导致场地发生显著的瞬时位移, 挤压浅埋地下结构如设置桩基的地下车道等, 造成结构上浮破坏。研究饱和软黏土中含桩地下结构物的地震响应特性以及场地整体震陷效应对于预防工程灾害具有重要意义。

国内外学者对软黏土在地震作用下的响应规律展开了一系列的研究。目前认为震陷效应主要与软黏土的结构性<sup>[1]</sup>、软黏土软化效应<sup>[2]</sup>、以及惯性效应相关<sup>[3]</sup>。

针对地震下的动力响应和震陷问题一般有理论分析方法、数值模拟方法以及试验方法 3 类<sup>[4-6]</sup>。其中动力试验方法能够较好的还原实际情况整体模型的应力状态, 被广泛用于研究地震作用下工程问题。Wilson<sup>[7]</sup>通过动力离心试验, 分析了在软黏土中含桩地上结构物动力响应规律, 为地震作用下桩基础拟静力分析提供了参考; 黄茂松等<sup>[8]</sup>, 钟锐等<sup>[9]</sup>通过离心试验分析了砂土的土层动力响应特性及土中桩基础以及沉箱基

收稿日期: 2024-05-01

\*通信作者 (E-mail: 002yujian@tongji.edu.cn)

础的动力响应特性,提出了沉箱加桩复合基础的抗震优势;梁发云等<sup>[10]</sup>研究了非饱和粉土地基中单桩及群桩承台结构的动力响应特性以及桩基受力情况;田兆阳等<sup>[11]</sup>根据振动台试验研究了软黏土震陷及其引发的桩基负摩阻力,根据桩侧土体和接触面的抗剪强度可初步估算软土地基中桩基可能受到的负摩阻力值;上述研究主要聚焦于基础地震动响应特性。刘鸿哲等<sup>[12]</sup>开展离心动力试验探究了砂土中不同埋深的无桩地下隧道结构抗震性能,Yang 等<sup>[13]</sup>进一步研究了砂土中无桩浅埋隧道在地震作用下的抗浮性能。

目前离心动力试验主要用于研究含桩地上结构和无桩地下结构,对于软黏土中含桩地下大空间结构地震动响应和抗浮性能的研究较少。同时针对饱和和软黏土地基震陷特性以及震陷作用下结构物位移的研究也并不完善。为此,本文主要针对饱和和软黏土地基自由场、及含桩地下结构(地下车道)开展动力离心试验。分析软黏土中地震传播及饱和和软黏土的震陷规律,探究地下结构对土层加速度响应的影响及互作用规律。探讨土层震陷和结构上浮特征,为该类问题的分析模拟提供理论支撑。

## 1 离心模型试验设计

### 1.1 试验仪器及设备

研究采用同济大学 TLJ-150 型岩土离心试验机开展试验,该离心机可稳定运转的最大离心加速度为 50g,振动台的最大振动加速度为 20g,最大振动持续时间为 1 s。试验模型箱采用层状剪切箱,剪切箱内壁包裹橡胶膜吸收边界对地震波的反射。

### 1.2 模型准备

本次试验模拟自由场、多桩浅埋整体地下空间结构、等效单元浅埋地下空间结构 3 种工况。整体结构设计根据地下车行系统实际情况进行相似缩放,单元结构按照质量、刚度以及所受静载浮力进行分配后将多桩上部结构等效为立方体地下空间模型作为对照。

试验模型结构以及桩基均采用铝合金制成,其泊松比、弹性模量和质量密度分别为 0.25, 72000 MPa, 2.70 g/cm<sup>3</sup>。其中桩基主要为抗弯构件,在考虑相似比时主要根据截面的抗弯刚度来控制,兼顾截面抗压;地下结构在地震作用时会发生结构摇摆以及整体位移,所以在设计时主要考虑了质量  $m$  和侧向转动惯量  $J$  的相似关系。等效单元结构模型在质量、结构所受静载浮力和转动惯量上均设计为整体结构的 1/8。试验结构与实物的相似比参数见表 1。

本文主要研究结构物对于土层振动响应以及震陷的影响。试验过程中关注的参数有:不同深度土层

的动力响应、结构物自身动力响应以及结构物和土体的竖向位移,模型布置如图 1 所示。

表 1 试验模型相似比  
Table 1 Similarity ratios of model

构件	相似常数			
	$EI/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$	$EA/\text{N}$	$m/\text{kg}$	$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
桩	1 : 50 <sup>4</sup> (1 : 49.8 <sup>4</sup> )	1 : 50 <sup>2</sup> (1 : 50 <sup>2</sup> )	—	—
整体结构	—	—	1 : 50 <sup>4</sup> (1 : 49.6 <sup>4</sup> )	1 : 50 <sup>5</sup> (1 : 49.8 <sup>4</sup> )

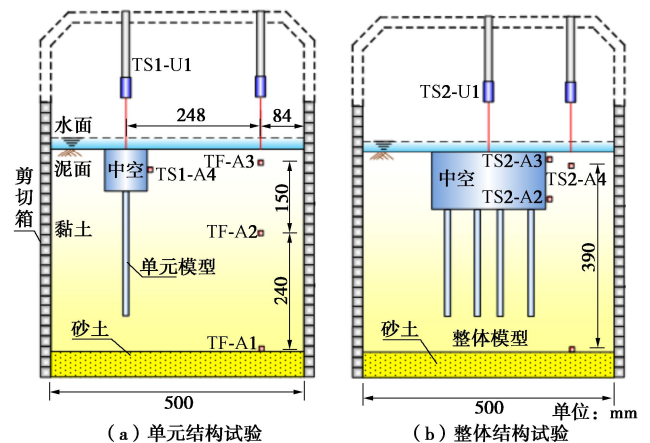


图 1 模型试验布置

Fig. 1 Model set up

试验用土为饱和和马来西亚高岭土。在制备土样时,马来西亚高岭土粉和水的质量为 1 : 1.2,经真空搅拌后制成饱和土浆。模型箱底部铺设 5 cm 排水砂层,再填入黏土土浆,并在离心机内固结 8 h 后。完成试验结构模型安装后,再次离心固结 2 h,以消除结构压入对土体造成的扰动。

### 1.3 地震波

本文试验土体底部输入的地震荷载时程及频域曲线如图 2 所示,主要的分析频率在 0~10 Hz。地震荷载频谱中 4 个较突出的峰值已在图中标出,分别对应频率为#1 峰(0.46 Hz)、#2 峰(0.77 Hz)、#3 峰(1.12 Hz)和#4 峰(2.08 Hz)。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 自由场、单元及整体结构加速度响应

地震波在自由场土层中传播时加速度时程响应曲线结果如图 3 所示。通过比较图 2, 3 中土层加速度由深到浅的变化趋势,可以发现地震波在饱和和软黏土传递过程中加速度峰值逐渐衰减。

图 4 显示了地震荷载下单元结构及整体结构加速度响应。通过比较结构底部(图 4(b))与自由场加速度(图 3(b))可知,由于地下结构的振动吸收了

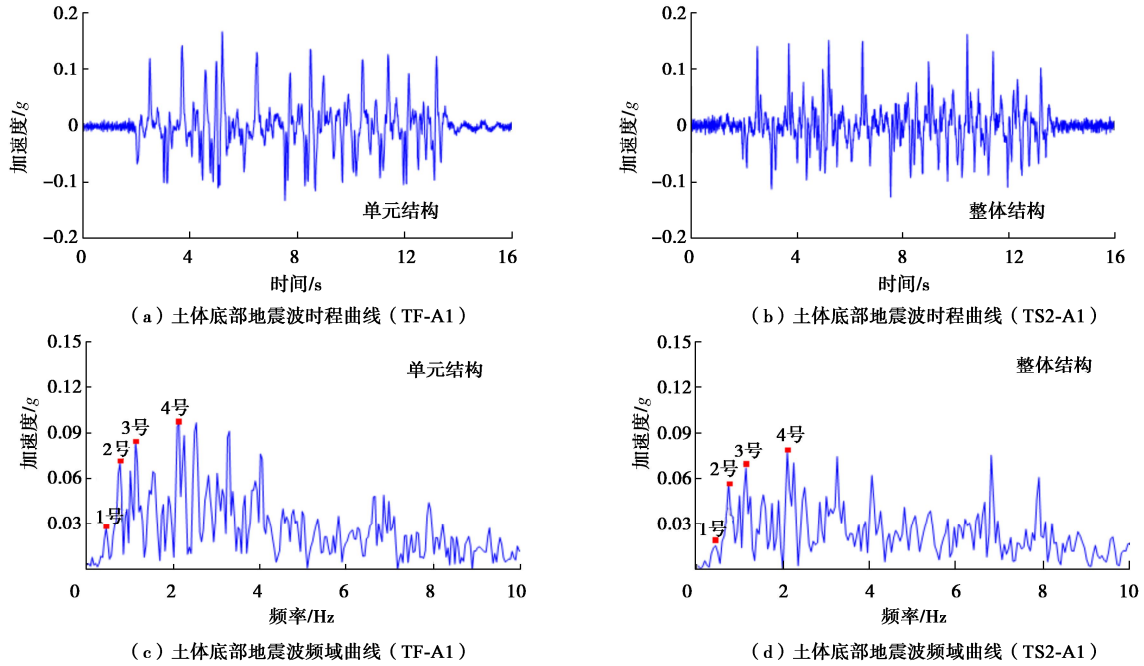


图 2 离心试验土体底部地震波

Fig. 2 Seismic waves at base of soil in centrifuge tests

较多的能量, 结构底部加速度峰值要低于自由场。相较于单元结构, 地震波在整体结构的多桩间传递过程中产生反射, 进一步加剧了能量耗散, 因而整体结构加速度峰值要低于单元结构 (图 4 (a), (c))。最后, 由于整体结构刚度较大, 在地震荷载下发生整体摇摆, 因而结构顶部加速度相较于结构底部发生明显的放大现象 (图 4 (b), (c))。

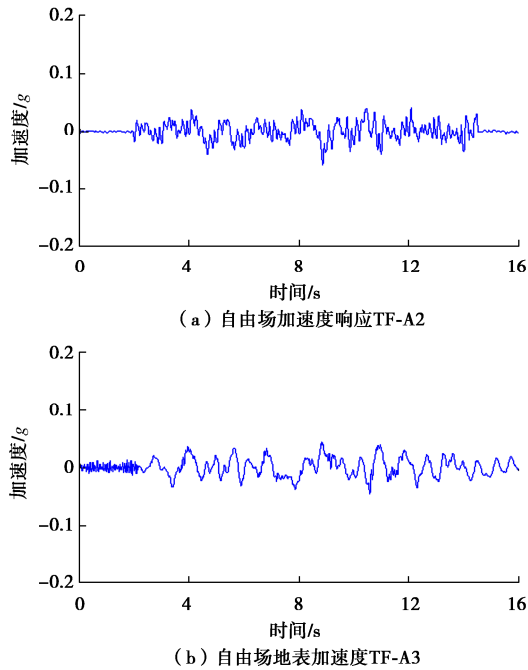


图 3 自由场加速度时程响应

Fig. 3 Accelerations at free field

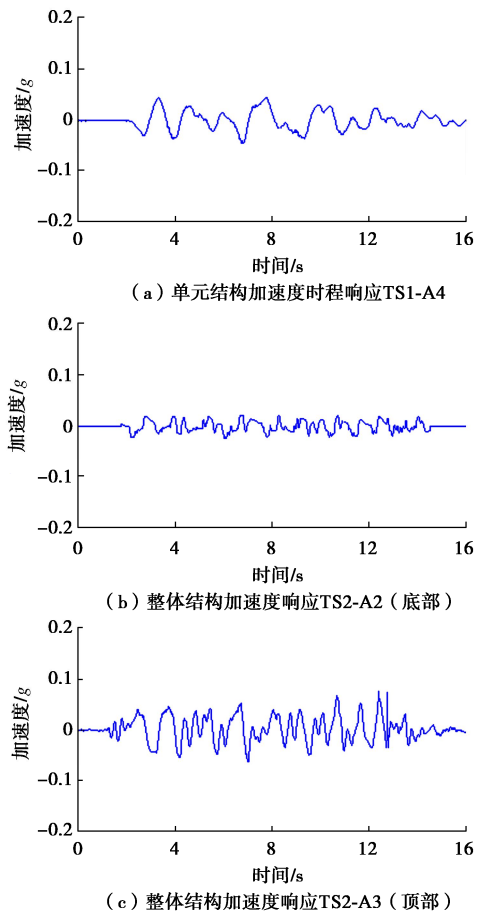


图 4 结构加速度时程响应

Fig. 4 Accelerations of structures in tests

## 2.2 自由场、单元及整体结构竖向位移

试验观测到的自由场地表以及单元及整体浅埋

地下空间结构物在地震荷载下的竖向位移如图 5 所示。试验过程中自由场发生震陷,且结构物均出现了整体上浮的现象。在静载浮力等效前提下,单元结构物的上浮位移显著大于整体结构物。

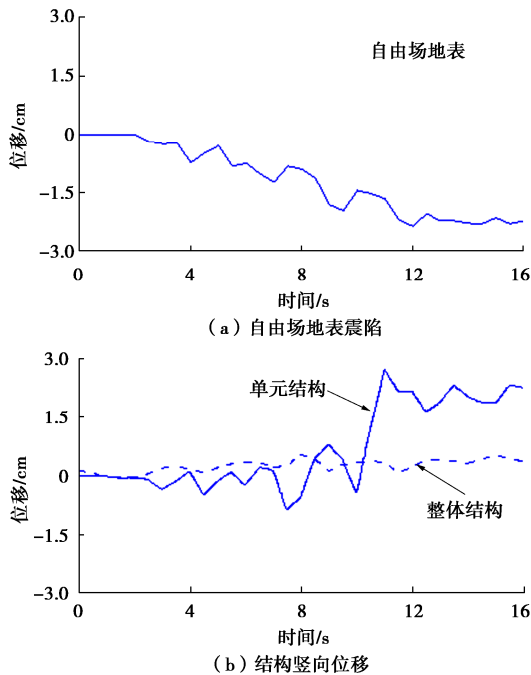


图 5 自由场及结构竖向位移

Fig. 5 Vertical displacements of free field and structures

### 2.3 频率响应分析

为探究整体结构的上浮位移明显小于单元结构的原因,图 6 比较了单元结构及整体结构试验中结构物频域响应情况。如图 6 所示,单元结构试验中响应的主要峰值频率为 0.44, 0.72 Hz, 接近#1 和#2 峰值;整体结构主要峰值频率为 0.76, 1.12 Hz, 更接近#2 和#3 峰值。单元结构加速度频谱峰值高于整体结构,且峰值频率接近单元结构自振频率。由于整体结构具有更大规模和更多桩基,地震波会在桩间反射衰减,因而单元结构频谱面积要明显大于整体结构(图 6),表明其受到了更强的地震激励作用,因而产生了更大的上浮位移。

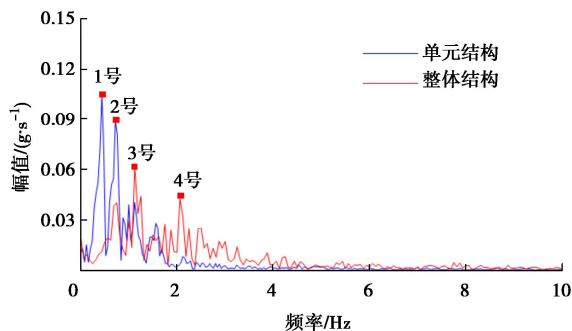


图 6 结构中加速度频谱对比

Fig. 6 Comparison of structure displacements between numerical and centrifugal model

## 3 结 论

基于某软土地区地下大空间车行系统,开展了动力离心模型试验模拟震陷响应。通过对比探究了软黏土含桩浅埋地下空间结构震陷特征和震后抗浮特性,主要得到 4 点结论。

(1)地基土体类型以及结构物会对场地中地震波能量传递产生明显影响。在饱和软黏土地基中地震波的高频成分能量的衰减速度远大于低频成分,传至地表的主要为地震波的低频成分。同时在地震传播过程中结构物会吸收能量发生自振,降低地震波在土体中传播的能量。

(2)结构物在地震作用下会积蓄能量产生自振,且自振在地震结束后仍会持续一段时间直至能量耗尽。地震波在结构传递过程中会发生放大,不同结构振动过程中会大其对应的特定频域幅值。

(3)试验中饱和软黏土地表在地震作用下会产生震陷,在地震过程中,地表的竖向位移随地震逐渐累加,当地表位移达到最大值后基本稳定,位移峰值出现的时间晚于加速度峰值出现的时间。

(4)对于存在大范围空腔导致等效重度小于土体重度的浅埋地下空间结构,受震后会出现显著上浮位移。尽管单元和整体结构等效的静载抗浮能力,但规模更大的、桩数更多的整体结构能有效抵抗地震激励,进而产生更好地抗浮效果。

### 参考文献:

- [1] 张虎臣. 淤泥地基地震触变研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(3): 78-85. (ZHANG Huchen. Study on seismic thixotropy of silt foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(3): 78-85. (in Chinese))
- [2] SEED H B, CHAN C K. Clay strength under earthquake loading conditions[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(2): 53-78.
- [3] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [4] 冯忠居, 王逸然, 蔡 杰, 等. 桩-震陷土层耦合作用下变截面单桩动力响应[J]. 振动工程学报, 2023, (https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20230328.0904.002.html. (FENG Zhongju, WANG Yiran, CAI Jie. Dynamic response characteristics of diameter variable section single pile under the coupling action of pile-splinter soil layer[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20230328.0904.002.html. (in Chinese)))

- [5] GOH S H, ZHANG L. Estimation of peak acceleration and bending moment for pile-raft systems embedded in soft clay subjected to far-field seismic excitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, **143**(11): 04017082.
- [6] 周燕国, 陈云敏, 社本康广, 等. 软粘土地基上建筑物不均匀震陷离心机试验研究[J]. *中国科学(E 辑: 技术科学)*, 2009, **39**(6): 1129-1137. (ZHOU Yanguo, CHEN Yunmin, SHE Benkangguang, et al. Centrifuge experimental study on uneven seismic subsidence of buildings on soft clay foundation[J]. *Science in China (Series E (Technological Sciences))*, 2009, **39**(6): 1129-1137. (in Chinese))
- [7] WILSON D W. Soil-pile-superstructure Interaction in Liquefying Sand and Soft Clay[D]. Davis: University of California, Davis. 1998.
- [8] 黄茂松, 钟 锐, 任 青. 层状地基中沉箱加桩复合基础的水平-摇摆振动[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(5): 790-797. (HUANG Maosong, ZHONG Rui, REN Qing. Lateral vibration of caisson-pile composite foundation in layered soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(5): 790-797. (in Chinese))
- [9] 钟 锐, 黄茂松. 沉箱加桩复合基础地震响应离心试验[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(2): 380-388. (ZHONG Rui, HUANG Maosong. Centrifuge tests for seismic response of caisson-pile composite foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(2): 380-388. (in Chinese))
- [10] 梁发云, 陈海兵, 黄茂松, 等. 结构-群桩基础地震响应离心振动台模型试验[J]. *建筑结构学报*, 2016, **37**(9): 134-141. (LIANG Fayun, CHEN Haibing, HUANG Maosong, et al. Model test on seismic response of superstructure and pile group[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, **37**(9): 134-141. (in Chinese))
- [11] 田兆阳, 李 平, 朱 胜, 等. 强震作用下软土地桩基负摩阻力振动台试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, **44**(3): 550-559. (TIAN Zhaoyang, LI Ping, ZHU Sheng, et al. Shaking table tests on negative friction of piles in soft soils under strong earthquake motion[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(3): 550-559. (in Chinese))
- [12] 刘鸿哲, 黄茂松. 不同埋深矩形隧道地震响应的离心振动台试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(增刊 2): 3404-3412. (LIU Hongzhe, HUANG Maosong. Centrifugal shaking table test of seismic response of rectangular tunnels with different buried depths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(S2): 3404-3412. (in Chinese))
- [13] YANG D, NAESGAARD E, BYRNE P M, et al. Numerical model verification and calibration of George Massey Tunnel using centrifuge models[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, **41**(5): 921-942.

(编校: 胡海霞)