

DOI: 10.11779/CJGE2023S20003

# 桩顶荷载对软土地基-群桩基础动力相互作用的 影响与机理分析

咸甘玲<sup>1</sup>, 兰景岩<sup>\*1,2</sup>, 潘旦光<sup>1,3</sup>, 王永志<sup>4</sup>, 卢彬荣<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; 3. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 4. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 设计并实施了软黏土地基-群桩基础体系的动态离心模型试验, 通过设置两组不同桩顶荷载的模型预制桩, 在50g重力加速度环境下, 获取了天然地震动作用下软黏土层的加速度、承台横向位移及桩身弯矩, 并据此推导计算了桩身竖向变形、桩土相对位移与桩周土抗力, 分析研究了桩顶荷载对软黏土-群桩基础体系地震动响应的影响及作用机理。结果表明: ①在地震作用下桩身弯矩的反应结果比较复杂, 当桩身弯矩沿深度方向出现唯一零点时, 桩身弯矩随埋深的增加呈现出先减小后增大又减小的趋势, 且桩顶荷载增加时出现这一情况的概率提高了7.58%; ②桩顶荷载对桩身弯矩有一定的影响, 桩顶荷载增加时, 桩身弯矩的最大值随之减小7%, 桩周土抗力随之增大25.32%; ③软黏土发生震陷时, 土体相对位移在桩-土相互作用中起主导作用, 桩周土抗力与桩身弯矩的最大值均出现在土体相对位移最大值附近。

**关键词:** 软土地基; 桩顶荷载; 桩身弯矩; 桩土相对位移; 离心模型试验

中图分类号: TU447; TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0067-06

**作者简介:** 咸甘玲(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事桩基础抗震方面的研究。E-mail: 702629040@qq.com。

## Influences and mechanisms of loads at pile top on dynamic interaction between soft soil-foundation with pile groups

XIAN Ganling<sup>1</sup>, LAN Jingyan<sup>\*1,2</sup>, PAN Danguang<sup>1,3</sup>, WANG Yongzhi<sup>4</sup>, LU Binrong<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; 3. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 4. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** A dynamic centrifugal model test is designed and implemented for the soft clay—pile group foundation system. Two sets of prefabricated piles with different vertical loads are arranged, and the acceleration of the soft clay layer, lateral displacement of the bearing platform, and bending moment of the pile under natural seismic action are obtained under 50g gravity acceleration environment. Thus, the vertical deformation of the piles, relative displacement of the piles and soil, and soil resistance around the piles are derived and calculated. The influences and mechanisms of vertical loads on the seismic response of soft clay—pile group foundation system are analyzed and studied. The results indicate that: (1) The results of the response of bending moment of the piles under seismic action are complicated. When the unique zero point of bending moment of the piles occurs along the depth direction, the bending moment of the piles exhibits a decreasing tendency, then increases and decreases with the increase of the buried depth, and the probability of this case increases by 7.58% with the increase of the loads at pile top. (2) The loads at pile top have a certain effect on the bending moment of the piles, and the maximum of the bending moment of the piles decreases by 7% and the resisting force of the soils around the piles increases by 25.32% with the increase of the loads at pile top. (3) When the soft clay soil undergoes seismic subsidence, the relative displacement of the soils plays a dominant role in the pile—soil interaction, and the maximum values of the resistance and bending moment of the soils around the piles both appear near the maximum value of the relative displacement of the soils.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52368068, 52168067); 广西自然科学基金项目(2021GXNSFAA220017)

收稿日期: 2023-11-30

\*通信作者(E-mail: lanjy1999@163.com)

**Key words:** soft soil foundation; load at pile top; bending moment of pile; relative displacement of pile-soil; centrifugal model test

0 引言

桩基础具有较高的上部结构承载力，因而被广泛应用于软土等不良地基<sup>[1-2]</sup>。随着工程结构建设愈加趋于复杂，对桩基础形式和要求也越来越高，特别是几次大地震的震害调查中发现较多因软土层发生震陷而导致桩基础失效甚至破坏的震害<sup>[3-4]</sup>。大量桩基震害实例，使得研究者们意识到在桩基的抗震设计中，要重视地震荷载作用下桩-土-上部结构动力相互作用的影响<sup>[5]</sup>。

近年来，国内外众多学者采用物理模型试验及数值模拟等方法，对桩土动力响应特性进行大量研究，并取得了丰富的成果。Kumar 等<sup>[6]</sup>利用有限元建立了软土地桩筏体系数值模型，通过计算发现地震作用下桩的水平位移峰值出现在桩头以下  $0.038d$  ( $d$  为桩径)。Banerjee 等<sup>[7]</sup>开展了一系列软土地桩基体系地震响应的离心机试验，研究了地震烈度、桩身刚度及材料、桩顶竖向荷载对桩筏-软土体系地震响应的影响。李龙起等<sup>[8]</sup>开展了数值模拟和室内模型试验，研究表明增大桩顶间距、桩身倾角、层厚比、承台顶竖向荷载均有利于提高倾斜桩基的横向承载力。另外，部分学者采用简化分析的方法对桩土相互作用进行研究，主要有  $p$ - $y$  曲线法、地基水平抗力法和有限元法<sup>[9-12]</sup>。前两种方法假设条件相对较多，推导过程较为繁杂<sup>[13]</sup>，而有限元法能充分考虑土体的非线性力学特性，但所采用的数学模型仍存在争议<sup>[14]</sup>。

上述研究极大地促进并推动了桩基动力响应与相互作用这一领域的发展，但地震作用下桩顶荷载对软土-桩基础体系中的桩身弯矩、桩周土抗力与相对水平位移的影响鲜有报告，至今仍未有准确定论。为探讨地震作用下不同桩顶荷载对软土地基-群桩基础体系地震动响应的影响，本文以软黏土地基预制桩基为背景原型，开展软黏土地基群桩基础动力离心模型试验，初步揭示地震作用下软土地基群桩基础动力相互作用机理。

1 试验设备与方案设计

1.1 试验系统

采用中国地震局工程力学研究所 DCIEM-40-300

大型土工动力离心机系统<sup>[15]</sup>，如图 1 所示。离心机有效半径为 5 m，在 50g 离心加速度下最大振动加速度为 30g，台面尺寸长 1.6 m×宽 0.8 m。试验采用尺寸为长 1.2 m×宽 0.5 m×高 0.67 m 的层状剪切模型箱。



图 1 DCIEM-40-300 大型离心机振动台

Fig. 1 Main parameters of shaking table system

1.2 试验模型

(1) 相似率

试验采用 50g 的离心加速度。群桩基础按照 2×2 对称布置，桩间距均为 80 mm，大于  $4d$  ( $d$  为桩径)。集中质量为实心钢块；承台为实心铝块，如图 2 所示。试验模型参数如表 1 所示。为模拟不同的桩顶荷载，试验设计 I、II 两组仅改变上部质量的模型桩，其中 I 试桩上部质量为 2 kg，II 试桩上部质量为 4 kg。

(2) 传感器布设

本次试验在地基土不同埋深处布置了中国地震局工程力学研究所自主研发的高精度 DSP-II 型孔压传感器<sup>[16]</sup>；加速度传感器；用于记录土体及桩竖向位移的差动式位移传感器 (LVDT)；在桩身按一定的间距粘贴电阻式应变片，目的是获得桩身轴心位置处的应变，为分析桩身弯矩分布提供数据。具体试验传感器布设如图 3 所示。

(3) 试验土料与软黏土模型的制备

采用马来西亚高岭土配置试验模型的桩周软黏土，将高岭土与水按 1 : 0.65 的比例混合经分层预固结与离心机整体固结后，测得其内部含水率为 41%接近液限值。试验所用粗砂通过砂雨器分层制作底部持力层及排水层，高岭土及粗砂的基本物理参数见表 2，3 所示。

表 1 试验模型参数及相似比

Table 1 Model parameters and ratios of similitude

部件 参数	集中质量	承台		桩				
	质量/kg	质量/kg	尺寸/(m×m×m)	抗弯刚度/(N·m <sup>2</sup> )	直径/mm	壁厚/mm	长度/m	杨氏模量/GPa
原型	250000	90000	6×6×1	9.616×10 <sup>8</sup>	800	28	20	206
模型	2	0.78	0.12×0.12×0.02	153.86	16	2	0.4	70
相似率	50 <sup>3</sup>	50 <sup>4</sup>	50	50 <sup>3</sup>	50	50 <sup>4</sup>	50	50

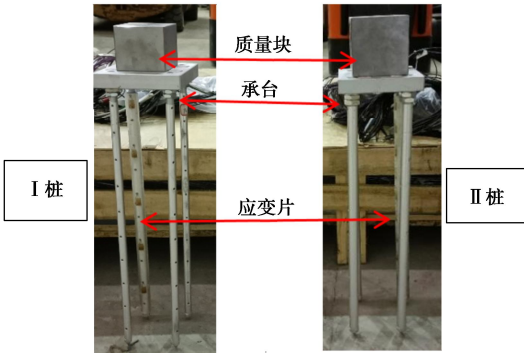


图 2 群桩基础试验模型  
Fig. 2 Model for foundation with pile groups

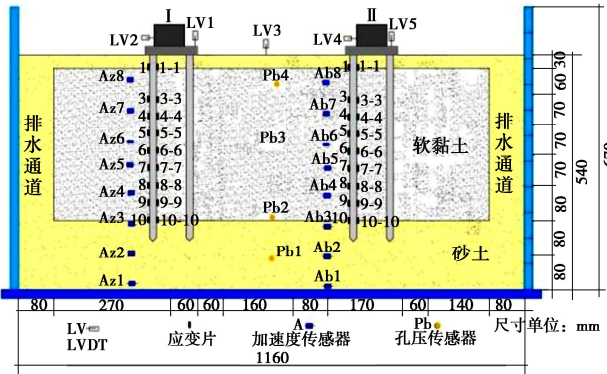


图 3 模型概况及传感器布置  
Fig. 3 Model overview and placement of sensors

表 2 高岭土基本物理力学性质指标

Table 2 Basic physical and mechanical parameters of kaolin						
相对质量密度	饱和重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	孔隙比	液限/ %	塑限/ %	$C_v^*/$ ( $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	渗透系数/ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
2.66	16.5	1.56	42.8	22.4	2.517	$2.0\times 10^{-6}$

注: \* $C_v$  为 100 kPa 时土的固结系数。

表 3 粗砂基本物理力学性质指标

Table 3 Basic physical and mechanical parameters of coarse sand					
最大干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最小干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	相对密实度	不均匀系数	曲率系数	渗透系数/ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1.89	1.49	0.90	1.864	0.804	0.0122

## 2 试验结果分析

### 2.1 桩身弯矩分析

用下式将应变信号转换为弯矩:

$$M = \frac{\Delta \varepsilon E I_z}{y} \quad (1)$$

式中:  $M$  为桩身应变采样点某一时刻的横截面弯矩;  $y$  为桩身半径 (中性轴与截面应变点的距离);  $\Delta \varepsilon$  为轴心应变信号;  $E$  为桩身弹性模量;  $I_z$  为截面对中性轴的惯性矩。

以输入地震动瞬间为 0 s, 按 0.01 s 等间隔选取 2901 组 (包括震后) 不同时刻的桩身应变数据进行分析。不同时刻, 桩身弯矩沿深度方向可能存在多个零

点、一个零点或是无零点, 针对 3 种情况从中选取有代表性的数据进行作图展示, 以解释在地震动作用下桩身弯矩沿深度方向的分布及发展规律。

图 4 为地震动作用下不同时刻群桩基础桩身弯矩图。在 1.05 s 时两桩的桩身弯矩随深度增加由正值变为负值, 在桩身中下部出现最大值。在 6.5 s 时两桩的桩身弯矩随深度增加由负值变为正值。在 13.7 s 时 II 桩全身出现负弯矩, 19.2 s 时两桩弯矩图出现两个零点。对上述 3 种情况, 桩身弯矩图的特性有所不同, 但弯矩随深度的变化趋势一致, 均为先减小后增大至  $-8 \sim -14 \text{ m}$  (即  $10 \sim 17.5 \text{ d}$ ) 处又减小。出现此现象的原因可能是地震动本身具有不规则性。统计发现 I、II 试桩桩身弯矩图出现仅有唯一零点的概率分别是 22.71%, 30.32%。桩顶荷载增加时, 桩身弯矩图出现仅有唯一零点的概率提高 7.58%。图 5 为两桩不同深度处弯矩时程曲线, 在地震初期受输入加速度控制呈现高频响应后转为低频。但桩身弯矩绝对值的最大值 (以下简称弯矩最大值) 出现的时间在 4~7 s。

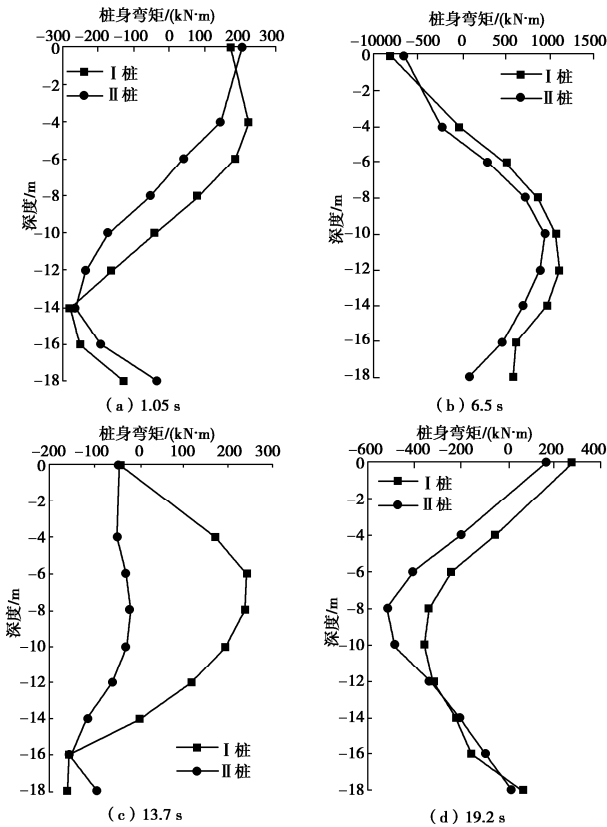


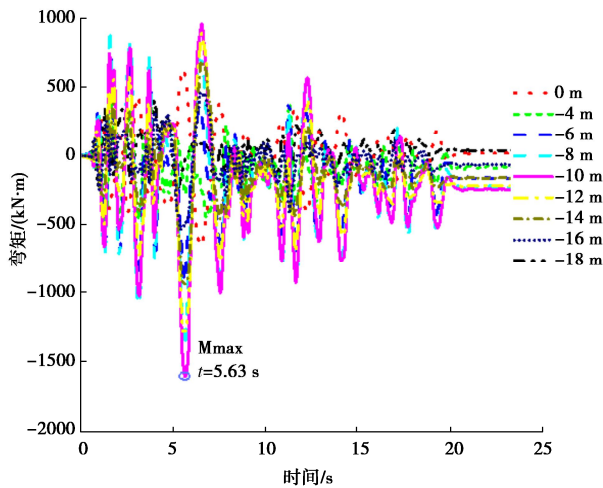
图 4 桩身弯矩不同时刻随深度的变化曲线

Fig. 4 Curves of bending moment of piles at different time with depth

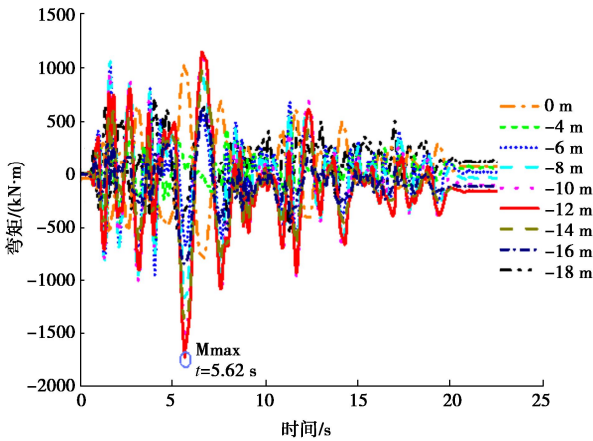
在桩身不同深度处的弯矩时程曲线中选出极值做图 6。桩身正、负弯矩最大值随深度变化的曲线以弯矩为零的轴线大致对称。两桩的桩身弯矩最大值分别为 1725, 1605  $\text{kN}\cdot\text{m}$ , 分别出现于 15d, 12.5d 处。可见桩顶竖向荷载增加时, II 桩的桩身弯矩较 I 桩的桩



身弯矩小 7%，弯矩最大值出现的位置也上升了  $2.5d$ 。



(a) I 桩不同深度弯矩的时程曲线



(b) II 桩不同深度弯矩的时程曲线

图 5 桩身弯矩时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of bending moment of piles

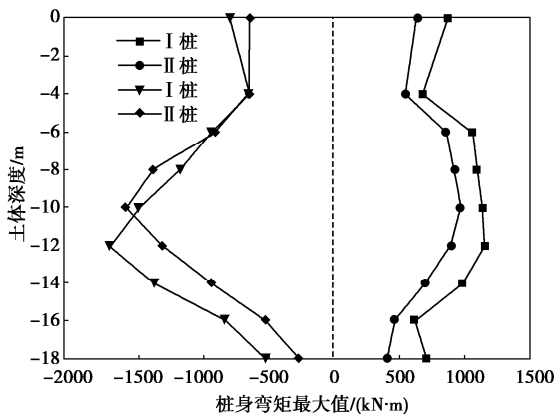


图 6 桩身不同深度正、负弯矩最大值

Fig. 6 Maximum positive and negative bending moments at different depths of piles

## 2.2 桩土地震动响应过程分析

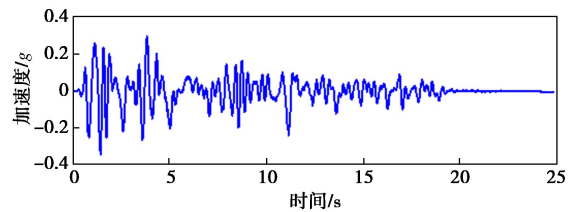
根据弹性地基梁理论<sup>[17]</sup>，在横向动力荷载下，桩身弯矩是深度和时程的函数，满足关系式 (2)。桩身弯矩与桩周土抗力满足关系式 (3)。其中  $EI$  为桩身抗弯刚度； $\varepsilon$  为桩身应变； $h$  为桩外表面到中性轴的距离； $y_p$  为某一深度  $x$  处桩的横向挠度。

$$M(x, t_i) = EI \frac{d^2 y_p}{dx^2} = EI \frac{\varepsilon}{h}, \quad (2)$$

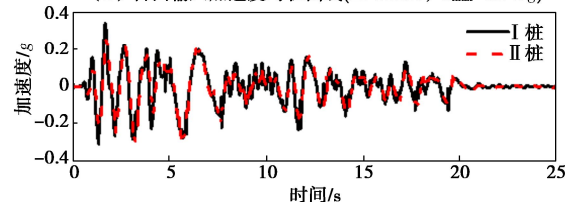
$$P(x, t_i) = \frac{d^2 M(x, t_i)}{dx^2} = EI \frac{d^4 y_p}{dx^4}. \quad (3)$$

用一个六阶多项式对桩身弯矩变化曲线进行拟合，拟合曲线存在待定系数，需通过假定边界条件<sup>[18-19]</sup>来确定，假定边界条件会给计算结果带来不确定性。因此再用三次样条函数根据实测桩身弯矩进行插值得到其他位置的弯矩值。用上述两种方法得到的弯矩值计算出桩周土抗力后取平均值。某一深度处土的横向位移可以通过加速度传感器二次积分的方法获得。桩土横向相对位移可由土体的横向位移减去桩身挠度获得。

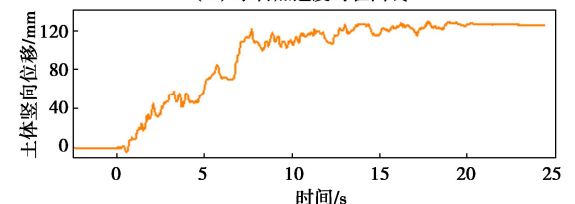
图 7 (a)，(b) 分别为台面输入加速度、承台加速度时程曲线，可见两试桩的承台加速度时程曲线无显著差别。地震作用下土体竖向位移时程曲线如图 7 (c) 所示，土体的沉降量在震动初期急剧增长，其沉降速率随着地震动加速度的减弱而减缓，地震动结束时土体总沉降量达 126.32 mm。图 7 中 (d)，(e)，(f)，(g) 分别为 -10 m 处桩周土横向位移时程曲线；桩土横向相对位移、桩周土抗力时程曲线；孔压比时程曲线。峰值加速度出现在 1.5 s，而桩周土抗力、桩身弯矩的最大值出现在 5.6 s 附近。表明土体位移出现最大时桩周土抗力和桩身弯矩也出现最大值，而不是出现在输入峰值加速度对应的时刻，此时桩身中部弯矩大于地表处桩身弯矩。二者并不随着输入加速度的衰减而减小，而是随位移产生显著的幅值反应。土体位移出现最大值时孔压比仍在上升，表明输入地震动初期，孔压比较小时上部结构摇摆的惯性力对桩身横向承载力起主导作用。软黏土发生震陷，孔压比达到 0.3 时转变为位移主导。



(a) 台面输入加速度时程曲线 (El Centro,  $a_{max}=0.347g$ )



(b) 承台加速度时程曲线



(c) 土体竖向位移时程曲线

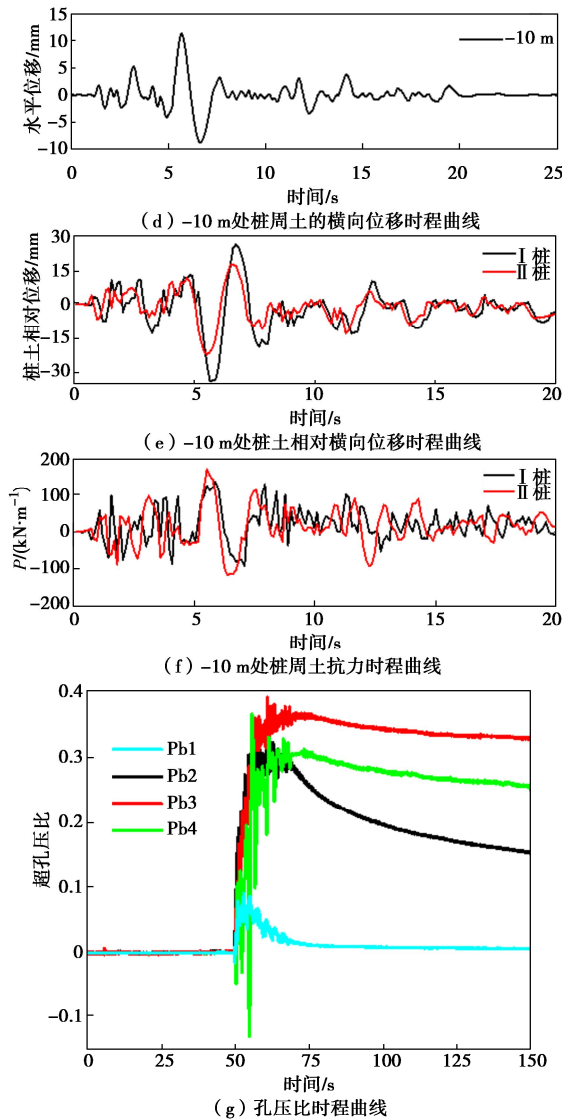


图 7 桩土动力响应过程

Fig.7 Dynamic response process of pile-soil

以地表下-10 m 处为例, I、II 试桩的桩土横向相对位移最大值分别-33.81, -26.67 mm, 桩周土抗力最大值分别为 136.68, 171.29 kN/m。桩顶荷载的增加导致桩土横向相对位移最大值减小, 桩周土抗力却随之增大了 25.32%。

### 3 地震作用下软土地基-群桩相互作用的机理初步分析

输入地震动初期, 桩头上部摇摆所产生的惯性力传递到桩身上部, 因此桩顶的弯矩较大, 此时为桩推土的过程。软黏土发生震陷, 土体受到扰动, 孔压累积, 土的横向位移持续发展, 桩周土抗力大于桩头的惯性力, 使得桩身产生较大的弯矩, 因此横向位移出现最大值时, 桩周土抗力与桩身弯矩也出现最大值, 此时为土推桩的过程。

对于弹性桩且地震动强度较小时, 桩基在横向荷载作用下产生挠度并挤压桩周土, 导致桩周土发生变

形而产生作用于桩身的横向抗力, 可看作是桩土间的相互作用力。当承台受到的桩顶荷载增大时, 桩侧上部土层被压的更密实因而提高了桩周土抗力, 进而增强对桩基的约束能力并减小了桩基横向位移。桩身横向变形的减小同时会减弱对桩周土的挤压, 桩土相互作用力与桩身弯矩随之减小。因此, 增大施加于承台上的桩顶荷载反而能减小桩身弯矩与桩身挠度, 此为“地基强化效应”<sup>[20]</sup>。当地震作用较强时, 桩身弯矩才会随竖向荷载的增加而增加(可称之为“增强效应”)。当地震作用较小时, 地基强化效应的作用大于增强效应, 此时桩基在桩顶处的弯矩随竖向荷载的增大而减小。上部质量的增加虽同时增大了桩顶竖向荷载和桩顶的惯性力, 但惯性力的影响仅在桩顶以下 10 倍桩径以内的范围<sup>[21]</sup>, 而本文试验中桩身弯矩最大值出现在惯性力的影响范围外, 说明土体的作用强于桩顶的惯性力。

## 4 结 论

通过开展饱和软土地基-群桩基础动态离心机振动台试验, 探讨了桩顶荷载对桩身弯矩分布、群桩基础地震响应规律的影响, 并阐述了地震作用下桩土相互作用的机理, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 地震作用下桩身弯矩的反应结果比较复杂, 仅有唯一零点时, 桩身弯矩随埋深的增加呈现出先减小后增大又减小的趋势。桩顶荷载增加时, 弯矩图出现仅有唯一零点的概率提升了 7.58%。

(2) 桩顶竖向荷载的增加提高了桩侧上部土层的强度, 桩周土抗力随之增大, 桩土相互作用更为显著。桩身弯矩最大值出现在桩顶以下  $10d$  范围外, 而不是桩顶处。桩顶荷载增加时, 桩身弯矩减小 7%, 弯矩最大值出现的位置上升  $2.5d$ 。

(3) 软黏土-群桩基础体系在地震动作用下桩周土抗力、桩身弯矩的最大值出现在土体位移最大值附近, 而不是在输入峰值加速度之后。地震动初期, 软黏土层孔压比较小, 桩顶惯性力对桩身横向承载力起主导作用, 孔压比达 0.3 时转变为位移主导。

值得说明的是桩顶荷载小于一定值时, 其增加才利于桩基横向承载力, 即存在临界值, 该数值与地震动强度、上部结构、地基土特性及桩基特性等有关, 临界值的确定仍需开展更多试验及相关计算。

### 参考文献:

- [1] XIE Y F, LIU C G, GAO S Y, et al. Lateral load bearing capacity of offshore high-piled wharf with batter piles[J]. Ocean Engineering, 2017, 142: 377-387.
- [2] 徐 江, 龚维明, 张 琦, 等. 大口径钢管斜桩竖向承载特性数值模拟与现场试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2434-2440.

2447. (XU Jiang, GONG Weiming, ZHANG Qi, et al. Numerical simulation and field test study on vertical bearing behavior of large diameter steel of inclined piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(8): 2434-2440, 2447. (in Chinese))
- [3] MENDOZA M J, AUVIBET G. The Mexico Earthquake of September 19, 1985—behavior of building foundation in Mexico City[J]. Earthquake Spectra, 1988, **4**(4): 835-853.
- [4] 江席苗. 汶川地震地基基础震害调查研究[D]. 上海: 同济大学, 2009. (JIANG Xie-miao. Investigation on Earthquake Damage of Foundation in Wenchuan Earthquake[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))
- [5] 汪刚, 景立平, 李嘉瑞, 等. 桩-土-上部结构动力相互作用振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(增刊 2): 3414-3424. (WANG Gang, JING Li-ping, LI Jia-rui, et al. Shaking table test study on seismic-soil-pile-superstructure-interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(S2): 3414-3424. (in Chinese))
- [6] KUMAR A, CHOUDHURY D, KATZENBACH R. Effect of earthquake on combined pile-raft foundation [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, **16**(5): 04016013.
- [7] BANERJEE S, GOH S, LEE F. Earthquake-induced bending moment in fixed-head piles in soft clay[J]. Géotechnique, 2014, **64**(6): 431-446.
- [8] 李龙起, 赵皓璆. 组合荷载作用下倾斜桩基横向承载特性[J]. 工程科学与技术, 2022, **54**(6): 124-134. (LI Longqi, ZHAO Haoqiu. Lateral bearing characteristics of inclined pile foundation under combined load[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, **54**(6): 124-134. (in Chinese))
- [9] 曹卫平, 吴奇兴, 夏冰, 等. 考虑上拔荷载影响的水平受荷斜桩  $p$ - $y$  曲线[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(7): 1189-1198. (CAO Weiping, WU Qixing, XIA Bing, et al.  $P$ - $y$  curve of laterally loaded batter piles considering effect of uplift loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(7): 1189-1198. (in Chinese))
- [10] 江杰, 付臣志, 王顺苇, 等. 考虑实际分布形式的水平受荷桩周土抗力分析方法[J]. 工程力学, 2021, **38**(11): 199-211. (JIANG Jie, FU Chenzhi, WANG Shunwei, et al. Analytical method of soil resistance around laterally loaded piles considering its actual distribution[J]. Engineering Mechanics, 2021, **38**(11): 199-211. (in Chinese))
- [11] 张家骏. 考虑桩-土-结构动力相互作用的基础隔震结构地震响应分析[D]. 广州: 广州大学, 2021. (ZHANG Jiajun. Seismic Response Analysis of Base-Isolated Structure Considering Pile-Soil-Structure Dynamic Interaction[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021. (in Chinese))
- [12] 袁廉华, 陈仁朋, 孔令刚, 等. 轴向荷载对斜桩水平承载特性影响试验及理论研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1958-1964. (YUAN Lianhua, CHEN Rempeng, KONG Linggang, et al. Test and theoretical research on influence of axial load on lateral bearing capacity of batter piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1958-1964. (in Chinese))
- [13] MATLOCK H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay[C]// Proc 2nd Annu Offshore Technol Conf, Dallas, Texas, 1970: 577-594.
- [14] REESE L C, WELCH R C. Lateral loading of deep foundation in stiff clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 1975, **101**(6): 633-649.
- [15] 王体强, 王永志, 张雪东, 等. 超重力振动台柔性叠层箱剪切效能评价方法[J]. 岩土力学, 2022, **43**(3): 719-728, 736. (WANG Tiqiang, WANG Yongzhi, ZHANG Xuedong, et al. Shear performance evaluation of a flexible laminar container with hypergravity shaking table tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(3): 719-728, 736. (in Chinese))
- [16] 汤兆光, 王永志, 段雪锋, 等. 分体高频响应微型孔隙水压力传感器研制与性能评价[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(7): 1210-1219, 后插 3-后插 4. (TANG Zhaoguang, WANG Yongzhi, DUAN Xuefeng, et al. Development and performance evaluation of separable high-frequency response miniature pore water pressure transducer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(7): 1210-1219, 后插 3-后插 4. (in Chinese))
- [17] TING J M. Full-scale cyclic dynamic lateral pile response[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(1): 30-45.
- [18] 姜忻良, 吴薪柳. 复杂结构-桩-土体系下的桩-土动力  $p$ - $y$  曲线[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 911-916. (JIANG Xi-liang, WUXin-liu. Dynamic  $p$ - $y$  curves of pile-soil under complex structure-pile-soil system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 911-916. (in Chinese))
- [19] JEANJEAN P. Re-assessment of  $p$ - $y$  Curve for soft clay centrifuge testing and finite element modeling[C]// Technology Conference, Houston, 2009.
- [20] LU W J, ZHANG G. Influence mechanism of vertical-horizontal combined loads on the response of a single pile in sand[J]. Soils and Foundations, 2018, **58**(5): 1228-1239.
- [21] 张楠. 考虑结构-桩-土相互作用的 PHC 管桩抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2013. (ZHANG Nan. Study on Seismic Performance of Pipe Piles Considering Soil-Pile-Superstructure Interaction[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))