

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.032



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



海洋大直径群桩地震响应振动台模型试验研究

张园园¹, 丁选明¹, 郑长杰², 赵津桥¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 福建理工大学 土木工程学院, 福州 350118)

摘要: 中国近海海域地处环太平洋地震带, 海洋工程中常用的大直径群桩基础面临地震威胁。采用 1g 振动台模型试验研究地震动特性、地震强度及排桩方式对桩周土孔隙水压力、土体加速度及桩体弯矩等动力响应的影响。结果表明: 在相同条件下, Taft 地震波因循环周次更多, 相较于 El-Centro 地震波更易引起桩周土体的液化; El-Centro 地震波的主频更接近模型地基的固有频率, 在 El-Centro 地震波输入下会导致更强的地基加速度和弯矩响应。在耗材量相同的情况下, 九桩基础的桩周土超孔压比响应较四桩基础更显著; 在所有加载工况下, 由于浅层区域更易液化, 且四桩基础液化程度较低, 四桩基础的加速度时程响应更为强烈, 而在深层区域, 这种规律相反; 九桩基础的弯矩分配更均匀, 抗震性能较四桩基础强。总体而言, 九桩基础的整体抗震性能表现更好。

关键词: 大直径群桩; 桩-土系统; 振动台试验; 地震响应; 海洋平台

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Shaking table model study of seismic response of marine large diameter group piles

ZHANG Yuanyuan¹, DING Xuanming¹, ZHENG Changjie², ZHAO Jinqiao¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P. R. China)

Abstract: China's offshore waters are located in the Pacific Rim seismic zone, and the large-diameter group pile foundations commonly used in marine engineering are facing seismic threat. A 1g shaking table model test was used to investigate the effects of ground vibration characteristics, seismic intensity and pile arrangement on the dynamic responses of pore water pressure, soil acceleration and pile bending moment of the soil surrounding the pile. The results show that, under the same conditions, the Taft seismic wave is more likely to cause liquefaction of the soil around the piles more cyclic cycles number and lower principal frequency compared with the El-Centro seismic wave; the principal frequency of the El-Centro seismic wave is closer to the intrinsic frequency of the modelled foundation, which leads to the more significant peaks in the base acceleration and bending moment responses. Under the same amount of consumables, the superporous pressure ratio response of the soil around the piles of the nine-pile arrangement is stronger than that of the four-pile arrangement; under all the loading conditions, the acceleration response of the four-pile foundation is stronger due to the fact that it is

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(52178318)

作者简介: 张园园(1999-), 女, 主要从事海上风机基础相关研究, E-mail: zhangyy.cqu@foxmail.com。

丁选明(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: dxmhu@163.com。

Received: 2024-12-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52178318)

Author brief: ZHANG Yuanyuan (1999-), main research interest: pile foundation, E-mail: zhangyy.cqu@foxmail.com

DING Xuanming (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: dxmhu@163.com.

easier to liquefy in the shallow region, and the degree of liquefaction of the four-pile foundation is lower, whereas this pattern is opposite in the deeper region; the bending moment distribution of the nine-pile foundation is more uniform, and the seismic performance of the nine-pile foundation is stronger than that of the four-pile foundation. Overall, the overall seismic performance of nine-pile foundation is better.

Keywords: large-diameter group piles; pile-soil system; shaking table test; seismic response; offshore platforms

鉴于海上桩基施工存在较大难度且成本高昂,多数海洋工程选择大直径管桩作为施工方案。大型海洋平台、跨海大桥或海上风电场的高桩群桩桩型逐渐趋向于直径更大的大直径管桩群桩^[1]。中国大部分近海工程分布于强震活动区,因此海洋大直径群桩的地震响应规律已成为海上工程建设的研究重点之一。

在过去的群桩地震动力响应研究中,学者们主要着眼于包括桩的长径比、桩距比等传统群桩效应影响因素。Lang等^[2]通过正交试验,系统地探讨了影响高承台群桩基础承载性能的各种因素,研究发现,边桩的倾斜角增大时,其竖向、水平和弯曲承载力都会有所提升;边桩长度的增加也会增强其竖向和弯曲承载力。Wang等^[3]在海上风机群桩横向响应的研究中,利用离心机试验,系统地探索了不同桩数及布置类型对群桩基础侧向承载力的影响,结果表明,随着桩数的增加,群桩基础的侧向承载力呈现出明显的增强趋势。刘涉川等^[4]运用FLAC3D数值模拟和振动台模型试验方法研究了地震作用下劲芯复合桩的弯矩和桩周土孔压,提出通过调整桩土模量比来增强可液化地基中桩的抗震能力。冯忠居等^[5]则以翔安大桥工程实例为背景,构建FLAC3D桩土相互作用模型,分析了大直径变截面群桩在地震作用下的动力响应特征,结果表明,软硬土层分界面处的桩动力响应最为强烈,强调了该位置桩体抗弯抗剪设计的重要性。

关于地震作用下群桩的传统影响因素研究已经相当全面,但这些研究普遍忽略了场地上覆水层对地震响应的影响。为更精确地计算地震引起的动水压力,Penzien等^[6]和Yang等^[7]对Morison方程进行了拓展。Ding等^[8-9]基于Winkler地基梁模型,提出了一种解析解方法,用于研究单相介质中管桩在垂直和水平动力荷载作用下的响应特性,并研究了风浪对桩-土-OWT系统的综合影响。郑长杰等^[10]通过耦合桩-土-流体模型,得到了桩位移的解析解,提出了桩顶水平动力柔度因子,并分析了多个参数对桩动力响应的影响。然而,在群桩地震响应研究中,解析理论方法难以考虑复杂的地质条件与桩土相互作用,常需做简化假设。

基于数值模拟方法,武崇福等^[11]利用ANSYS

软件模拟高桩承台结构在波浪和地震共同作用下的动力响应,研究发现波浪与地震同向作用时结构受力增大,反向则减小。对于大直径桩型,马晓东^[12]对波流条件下群桩布置形式的冲刷规律进行研究,发现相同流速下群桩相比大直径单桩冲刷深度和影响范围都较小。李芬等^[13]通过FLAC建模对比不同水深下钢管桩的动力响应,认为水层的存在会加大地震影响范围。Wu等^[14]通过数值模拟研究考虑上覆水产生的动力荷载,提出间距比对地震响应影响最大。时健等^[15]使用Fluent建立二维数值模型,发现前桩泄涡产生的低压区会影响到后桩的受力,且这种相互作用不对称。此外,群桩区域内的流体流速低于外部,导致内侧与外侧之间形成压力差,进而产生由内向外的压力。Cui等^[16]发现波高和流速显著影响固定重力结构的海上平台周围的液化区,在不同土壤渗透率的海底,结构附近的最大液化深度大致相同。

综上所述,场地上覆水层对大直径群桩地震响应的的影响不容忽视。然而,现阶段的研究大多以数值模拟技术作为主要手段。受土体本构模型及桩-土面单元模拟的复杂性影响,数值模拟建模过程不仅极为烦琐、计算过程漫长,而且采用数值模拟得出的结论仍需要通过物理模型试验进行验证。目前开展考虑上覆水条件的模型试验研究尚属少见。鉴于此,笔者针对上覆水层影响大直径群桩的地震响应,设计了2种用钢量相等的布置形式:2×2群桩(四桩基础模型)和3×3群桩(九桩基础模型)两种形式,并基于1g振动台试验结果,深入探究地震强度、输入波频谱及桩型等因素对大直径群桩地震响应规律的影响。

1 试验概况

1.1 相似比设计

模型试验使用美国ANCO振动台系统,其台面尺寸长1.2 m、宽1.2 m。试验采用分离量纲分析的相似设计方法^[17],分别对上部结构、桩体、砂土及输入系统4个部分进行相似设计。试验选取几何尺寸 L 、弹性模量 E 和等效质量密度 ρ 为基本物理量。对于上部结构施加的重力,忽略其对桩基的偏心作用,通过在桩顶设置质量块模拟,仅考虑质量相似。

对于桩体结构,需考虑到形变参量(应变 ϵ)、几何参量(长度 L)及材性参量(密度参量 ρ 、弹性模量 E 、剪切模量 G 及抗弯刚度 EI)。由于试验输入方向为水平方向,因此按照抗弯刚度相似关系确定模型桩壁厚。砂土子系统的设计关键参量为摩擦角 φ 、动剪切模量比 $G/G_{\max}$ 和黏聚力 c 。对于输入系统,需考虑到地震三要素:输入加速度幅值 a 、输入时间 t 及输入频率 ω 。考虑到振动台系统台面大小、加速度限制、水动力相似等因素,选取几何相似比 $C_l=1:60$,等效密度相似比 $C_\rho=1:1$,模量相似比 $C_E=1:60$ 。部分关键参数的相似设计要求如表1所示。

1.2 模型制作与传感器布置

采用重庆河砂作为模型土,由于其黏聚力 c 为0,且内摩擦角与动剪切模量比的相似比值为1,根据表1,砂土系统的相似比条件均得以满足,所用砂土参数如表2所示,同时通过动剪切实验获得砂样的动力性能,如图1所示,初始固结压力为100 kPa,在 $CSR=0.1$ 时,液化振次为10;在 $CSR=0.2$ 时,液化振次为4(破坏标准为剪应变达到3.75%)。说明随着振动强度的增大,地基土会更易液化。桩型的取用需考虑地基的承载能力等因素,参考周恩全

表1 部分关键参数的试验相似率
Table 1 Test similarity laws for some key parameters

子系统	物理量	相似关系	相似比
桩体	几何尺寸 L	S_L	1:60
	抗弯刚度 EI	$S_{EI} = S_E S_L^4$	1:60 ⁵
	等效密度 ρ_m	S_ρ	1:1
砂土	摩擦角 φ	S_φ	1
	动剪切模量比 $G/G_{\max}$	$S_{G/G_{\max}}$	1
	黏聚力 c	S_c	1:60
上部结构	质量 m	$S_m = S_\rho S_L^3$	1:60 ³
时间	时间 t	$S_t = S_L^{1/2}$	1:7.75

等^[18]、Zhou等^[19]的研究,选取用钢量相等的布置形式:2×2群桩(四桩基础模型)和3×3群桩(九桩基础模型)。四桩基础和九桩基础桩身采用亚克力空心管,其弹性模量为2.4 GPa,控制其耗材、距径比相等,基于桩的抗弯刚度相似原则确定桩径和壁厚。具体而言,四桩基础桩径35 mm,内径31 mm,桩间距为140 mm;九桩基础桩径17 mm,内径13 mm,桩间距为68 mm;承台尺寸均为200 mm×200 mm×15 mm。集中质量采用实心铁块,质量为2.4 kg。

表2 试验所用砂土参数
Table 2 Parameters of sandy soil used in the experiment

试验用砂	相对密实度/%	曲率系数	最大干密度/(g/cm ³)	最小干密度/(g/cm ³)	内摩擦角/(°)	不均匀系数	比重
松软层河砂	41	0.54	1.822	1.375	29	5.6	2.648
密实层河砂	70	0.54	1.822	1.375	35	5.6	2.648

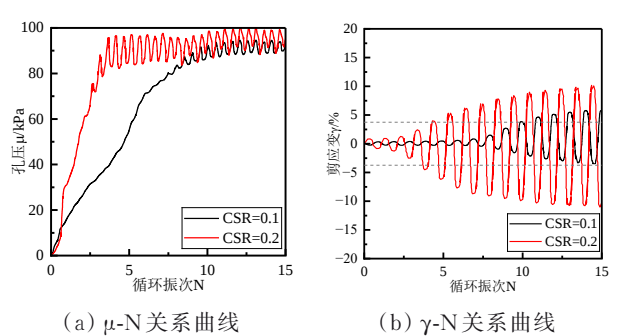


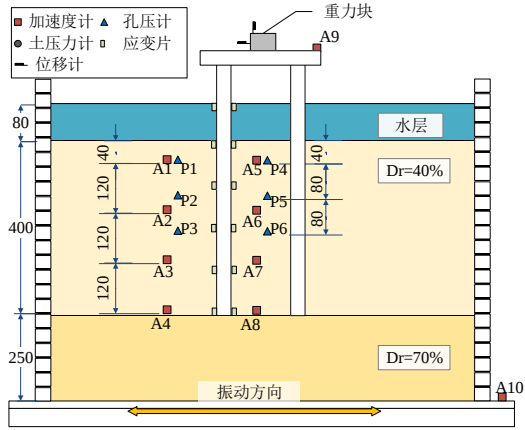
图1 所用砂土的循环响应
Fig.1 The cyclic response of the sand used

应变片采用等距对称的方式沿桩身布置,每对应变片的中心连线与振动方向平行,间距为100 mm,并在水面位置布设应变片。对于四桩布置工况,仅在边桩设置应变片。九桩布置工况则在角桩、边桩、中心桩均设置检测点。为比较四桩和九桩工况的孔压发展与消散规律和场地的液化特性,在两组工况距边桩50 mm位置处,沿埋深方向的40、120、200 mm处埋置孔压计。沿埋深方向的40、160、280、400 mm处埋置加速度计。图2、图3为传

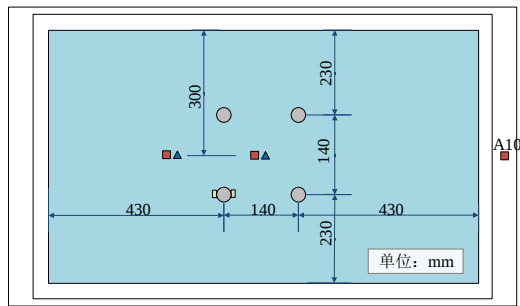
感器布置情况。
为避免边界效应影响,试验采用叠梁式剪切箱(图4),箱体内部尺寸为:1 m(长)×0.6 m(宽)×0.8 m(高)。参考徐光明等^[20]的研究,桩底到箱底铺设250 mm厚中密砂土以满足模型桩与边界距离大于3D的条件。使用砂雨法分层填筑通水饱和。砂土相对密实度通过控制出砂口距砂面距离控制,使其分为密实层(70%)和松软层(41%)。在地基制备过程中按照设计位置放置加速度计、孔压计。通过填埋方式将桩体嵌入地基,最后添加8 cm高水层并静置24 h。整体模型见图5。

1.3 输入波及加载工况

选用Taft地震波、El-Centro地震波和正弦波作为输入波,这2种天然地震波(Taft地震波、El-Centro地震波)都属于二类场地,符合中国海洋工程的实际情况。其中Taft地震波的频率更多集中在中低频区域,而El-Centro地震波包含了更多的中高频成分,二者频率成分特点不同,形成对照。按照时间比尺进行压缩并调幅后PGA(Peak Ground Acceleration,峰值地面加速度)为0.1g的波形如图

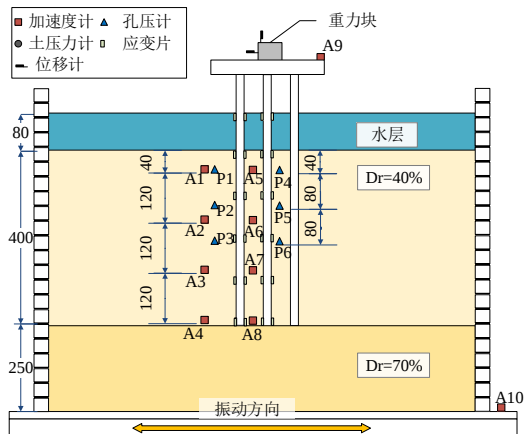


(a) 传感器布置剖面示意图

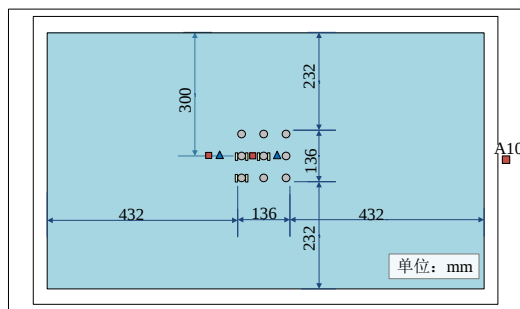


(b) 传感器布置剖面俯视图

图2 四桩模型传感器布置图
Fig. 2 Four-pile model sensor layout



(a) 传感器布置剖面示意图



(b) 传感器布置剖面俯视图

图3 九桩模型传感器布置图
Fig. 3 Nine-pile model sensor layout

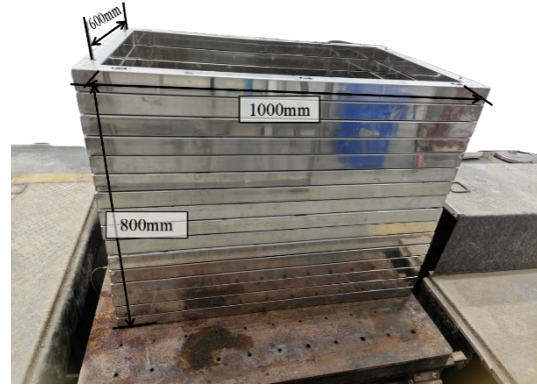


图4 试验所用 ANCO 振动台台面及剪切箱

Fig.4 ANCO shaker table and shear box used for the test

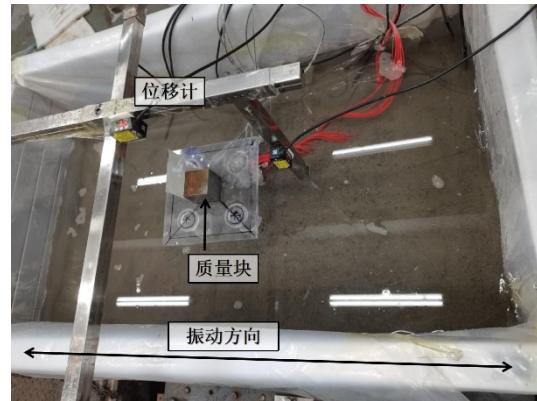


图5 四桩整体模型

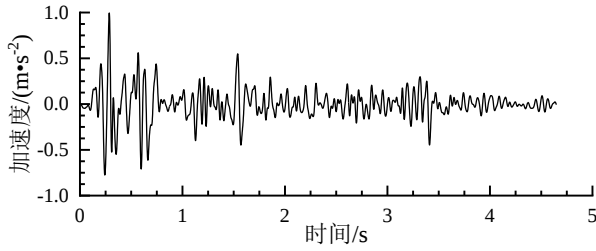
Fig. 5 Overall model of the four piles

6所示。图7为输入地震波傅氏图,经过模型试验压缩后,Taft地震波能量主要分布的频域为6~22.5 Hz,主频率为10.5 Hz;El-Centro地震波能量主要分布的频域更广,为2.5~20 Hz,主频率为9.035 Hz。正弦波频率成分单一且波形规律,为对比分析更加直观,试验采用5 Hz的正弦波,试验输入工况见表3,在输入地震波前输入30 s能量分布均匀的白噪声以获得两种地基模型的频谱。

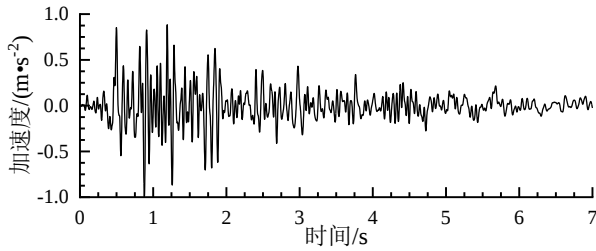
2 试验结果分析

2.1 地震波频谱分析

在预加载阶段,采用0.05g白噪声激励以记录桩体结构与地表土体的加速度时程,随后利用傅里叶变换提取了整体模型的固有频率^[21]。图8为四桩与九桩工况的整体模型频谱响应。结果显示,在相同用钢量条件下,2种工况的主频近似相等,且过半功率带宽法估算阻尼比近似相等;九桩基础主要表现为低阶振型,四桩的振型分布更广泛,高阶振型也有较多分布。与图7对比可知,El-Centro地震波相较Taft地震波,更接近地基的第1主频率,因此在El-Centro地震波输入下会造成更强的动力响应。



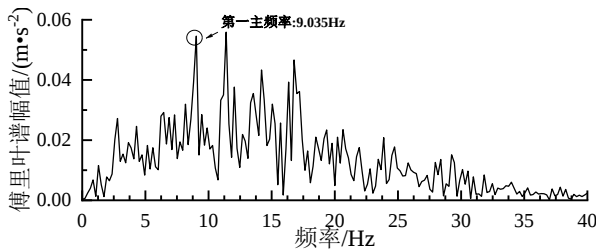
(a) EL-Centro地震波



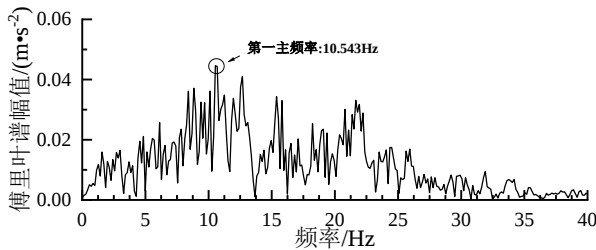
(b) Taft地震波

图 6 输入地震波加速度时程曲线

Fig. 6 Input seismic wave acceleration time course curve



(a) EL-Centro地震波



(b) Taft地震波

图 7 输入地震波傅里叶谱图

Fig. 7 Fourier spectrum of input seismic waves

表 3 地震加载工况

Table 3 Seismic loading conditions

加载 工况	输入地震 激励	加速度 幅值	加载 工况	输入地震 激励	加速度 幅值
1	白噪声	0.05g	8	El-Centro	0.2g
2	El-Centro	0.05g	9	Taft	0.2g
3	Taft	0.05g	10	5 Hz_Sin	0.2g
4	5 Hz_Sin	0.05g	11	El-Centro	0.3g
5	El-Centro	0.1g	12	Taft	0.3g
6	Taft	0.1g	13	5 Hz_Sin	0.3g
7	5 Hz_Sin	0.1g			

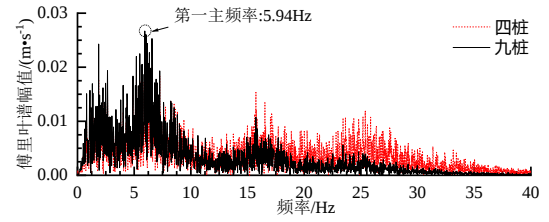


图 8 地基频谱响应

Fig. 8 Ground-based spectral response

2.2 超空压比时程分析

一般来说,不同地震波对结构及桩周土的影响程度存在差异,这是地震波频谱特性不同导致的。根据闫志晓等^[22]的研究,在上覆水层的条件下,深层土不易液化,因此试验仅关注桩中部以上的部分。图 9 为四桩工况下不同峰值的 El-Centro 地震波与 Taft 地震波输入下超孔压比峰值的分布情况,可以看出,超孔压比峰值整体呈现随深度增大而减小的趋势。在 0.05g、0.1g 地震波输入下,3 个监测点超孔压均未达到液化水平。在 0.2g 地震波输入下,只有 P1 位置(埋深 40 mm)测得的孔压发展情况达到了液化。在 0.3g Taft 地震波作用下, P2 位置(埋深 120 mm)处的土体已发生了液化;而在相同强度(PGA 为 0.3g)的 El-Centro 地震波影响下,仅 P1 埋深处的监测点显示出土体达到了液化的水平。

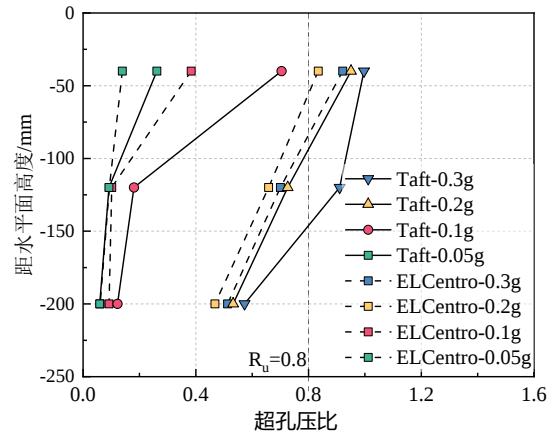


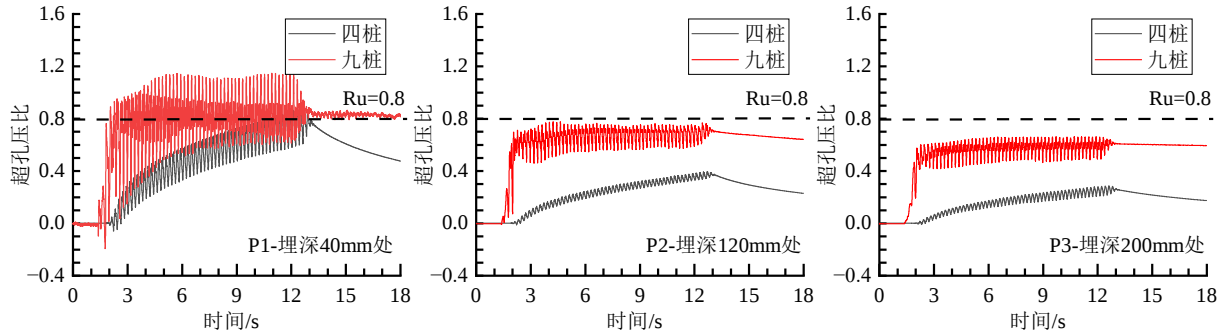
图 9 四桩工况不同地震波输入下超孔压比峰值分布

Fig. 9 Distribution of peak super-hole pressure ratio under different seismic wave inputs for four pile conditions

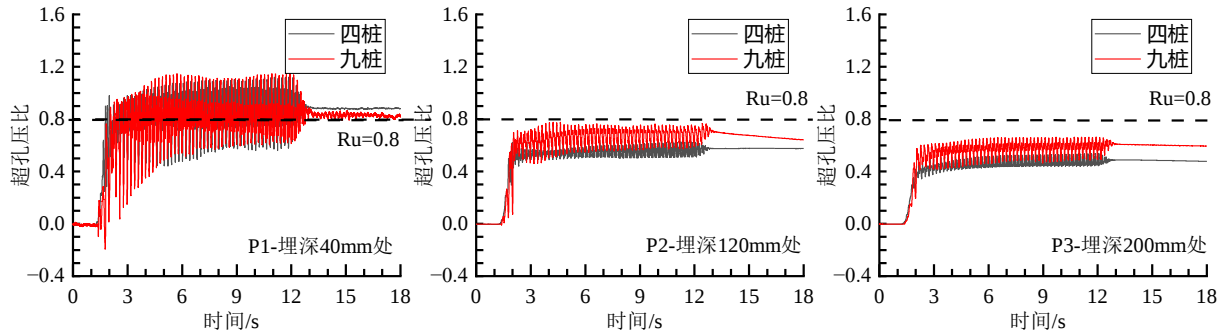
根据超孔压比峰值分布情况可以得出,在上覆水层条件下,主频率较高的 Taft 地震波工况桩周土超孔压发展更快,比 El-Centro 地震波输入更易导致桩周土液化。这一现象与闫志晓等^[22]在考虑上覆水层的试验结果一致。由于上覆水层改变了土体的动力响应特性,使得高频地震波在桩周土中引起更快的超孔压累积。此处由于 Taft 地震波因循环周次更高,相较于 El-Centro 地震波表现出更高主频,因此更易引起桩周土体的液化。

为揭示地震作用下四桩和九桩基础的孔压发展差异,对正弦波激励下两种基础桩周土超孔压比(R_u)时程进行对比分析。如图10所示,在0.05g强度振动下,直到施震结束,四桩基础桩周土的超孔压比缓慢增长且未达到稳定状态,而九桩基础桩周土超孔压比很快达到了液化状态,此时仅九桩基础

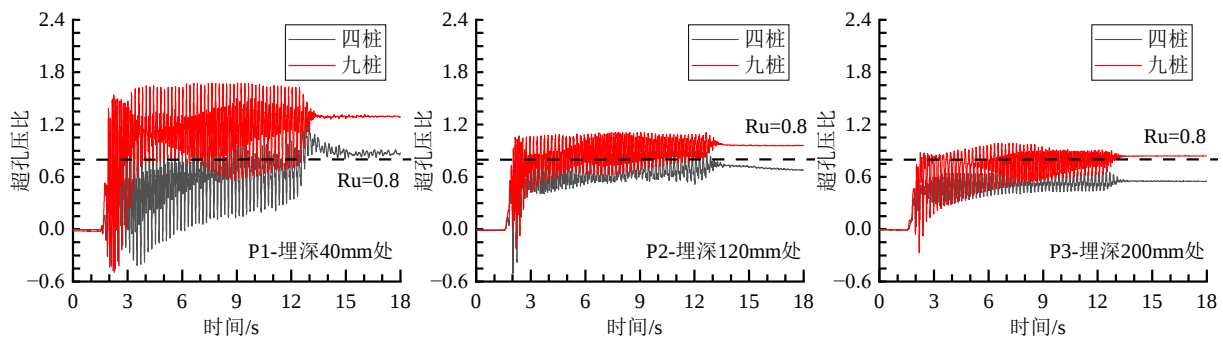
P1位置的超孔压比超过了0.8,达到液化标准。在输入幅值为0.1g正弦波的情况下,振动开始1s内孔压迅速上升并趋于稳定。无论是四桩基础还是九桩基础,P1位置超孔压比都超过了0.8,发生液化,但此时超孔压比峰值大小没有明显区别。P2和P3(埋深200mm)位置,两种基础桩周土的超孔压



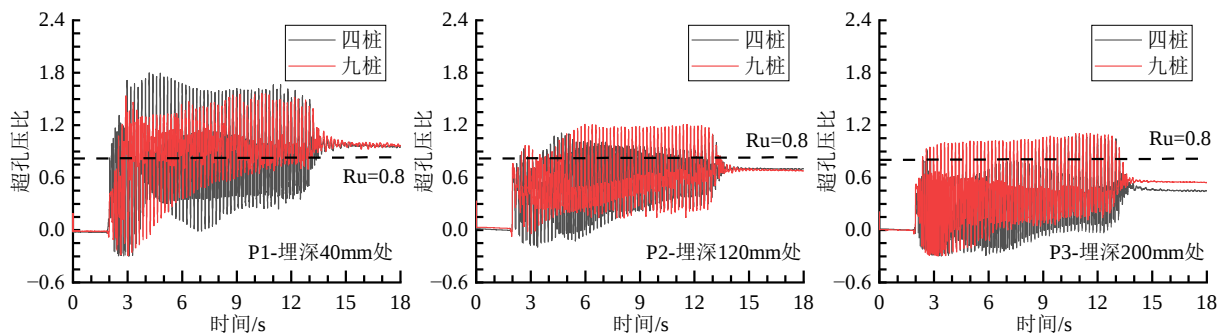
(a) 正弦波0.05g工况



(b) 正弦波0.1g工况



(c) 正弦波0.2g工况



(d) 正弦波0.3g工况

图10 正弦波输入下不同测点地基土超孔压时程图

Fig. 10 Time course of foundation soil superpore pressure at different measurement points under sinusoidal inputs

比发展均未达到液化标准,且九桩工况的超孔压比发展速度明显比四桩工况快,约为四桩工况的 1.3 倍。随着地震动幅值的增加,桩型带来的差异进一步变大。在 0.2g 正弦波作用下,九桩基础埋深 200 mm 以内的桩周土层由浅至深逐渐液化;而四桩工况在相同埋深处的超孔压比发展并未达到液化标准,仅 P1、P2 处超孔压比大于 0.8。当地震动幅值提升至 0.3g 时,两种基础在 200 mm 深度范围内的土层均达到了液化状态。

总体来看,九桩工况的桩周土孔压响应更为剧烈,施震结束后,相较于四桩工况,九桩的孔压消散速率较慢。这是因为孔压上升速度与土体的剪切作用相关,3×3 布置形成更密集的群桩体系,桩与桩之间的土体受振动干扰区域重叠更显著,桩土相互作用更强,桩周土的剪切应变更大,更易导致土体孔隙水压力的上升^[23]。这一结论与吴琪的试验结果一致^[24]。

观察地震动幅值变化对孔压的影响可以发现,随着地震动幅值的增大,液化区域逐渐从浅层土体向深层土体扩展。这一趋势的原因在于,随着土层埋深的增加,土体所承受的有效应力随之增大,进而增强了土体的抗液化性能。而随着地震动幅值增加,深层土颗粒砂克服原来颗粒间的相互作用,使得液化区域向深处扩大,与图 1 结论一致。

2.3 加速度时程

四桩工况在不同地震波输入下加速度放大系数的分布情况如图 11 所示。一般来说,如中密层结果所示,地震波向上传递时具有较显著的放大效应。但试验结果表明,在不同输入条件下,从桩底测点向上观察,普遍现象是随着埋深减小,桩底部部分土层的桩周土加速度放大系数降低,且这一土层厚度与输入波加速度峰值相关。这是因为桩体

振动增加了桩周土的密实度,且土体耗散地震能量,显著降低了加速度响应。与常规砂土地基地震液化的加速度放大系数自下而上逐级递增的规律不同^[25],在较浅的埋深区域,部分工况出现了加速度放大系数随埋深减小而增加的情况,主要因为上部土层的约束不足,以及上部结构质量和上覆水层的动力影响,导致桩构件摆动幅度增大,进而使得加速度放大系数增大。

观察不同强度下加速度放大情况,加速度放大系数随着输入强度的提升而呈现出逐渐降低的趋势。根据超孔压比的数据分析,随着输入强度的增加,超孔压不断上升,液化的影响范围也随之扩大。上述现象表明,地基土在发生液化过程中逐渐丧失了其强度,进而导致桩与土之间的相互作用力有所减弱。

对比两种地震波输入工况的结果可知,EL-Centro 地震波输入下得到的加速度峰值分布结果均高于 Taft 地震波输入下的结果,这与频谱分析的结果吻合。当结构受到与其固有频率相近的 EL-Centro 地震波作用时,可能发生共振效应,导致结构振动幅度增大。地震波输入的差异导致不同位置的加速度放大系数存在显著差异。在埋深范围内,加速度放大系数的差异随着埋深减小而减小。这与土体滤波效应有关,在地震波向上的传播过程中,输入地震波高频段被吸收,低频波逐渐成为主导,进而使得 EL-Centro 地震波与 Taft 地震波因频率组分不同而引起的响应差异有所减弱。观察承台部位的加速度放大系数响应情况,因输入地震波的不同产生的差异再次变得突出。这是由于群桩结构构件的自振频率较低,也更接近 EL-Centro 地震波主频率,使得在承台处两种地震波作用下的响应差异进一步拉大^[26]。

图 12(a)~(c)为在幅值为 0.1g 的正弦波激励下,A1(埋深 40 mm)、A2(埋深 160 mm)、A3(埋深 280 mm)3 处的加速度时程曲线。从图中可以看出,在 A1 位置,2 种桩型的加速度均显著降低。根据孔压分析,该处桩周土体首先液化,且整个振动过程中持续液化,其中九桩周围的土体受到的扰动更为显著,液化程度高于四桩,土体刚度退化更严重,导致九桩的加速度明显低于四桩。在 A2 位置,九桩加速度在震动开始 1 s 内出现了轻微的衰减,而四桩加速度未出现衰减现象,此时九桩加速度略小于四桩加速度。在 A3 位置,两种桩型的加速度时程均未出现明显衰减,但九桩加速度整体高于四桩加速度。结合孔压比分析可知,该测点位置此时并未达到液化,这可能是因为九桩基础与土体相互作

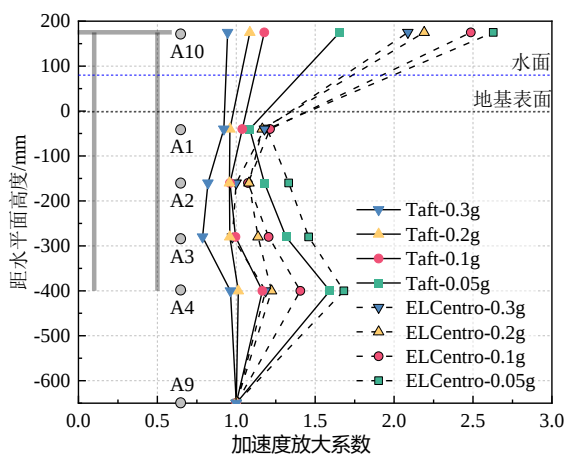


图 11 四桩工况不同地震波输入下加速度放大系数分布

Fig.11 Distribution of acceleration amplification factor under different seismic wave inputs for four pile conditions

用更强,振动过程中使砂土密实度增大,从而提升了砂土的刚度,导致加速度放大系数增大。如图 12 (d)~(f)所示,0.2g 正弦波输入下两种桩型在 A2 位置都出现了较大幅度的加速度衰减,四桩基础加速

度大于九桩加速度。但在 A3 位置,九桩加速度则略大于四桩加速度。0.3g 强度输入下该结果与 0.2g 相同。这也印证了振动过程中九桩基础对土体具有更强的加固作用。

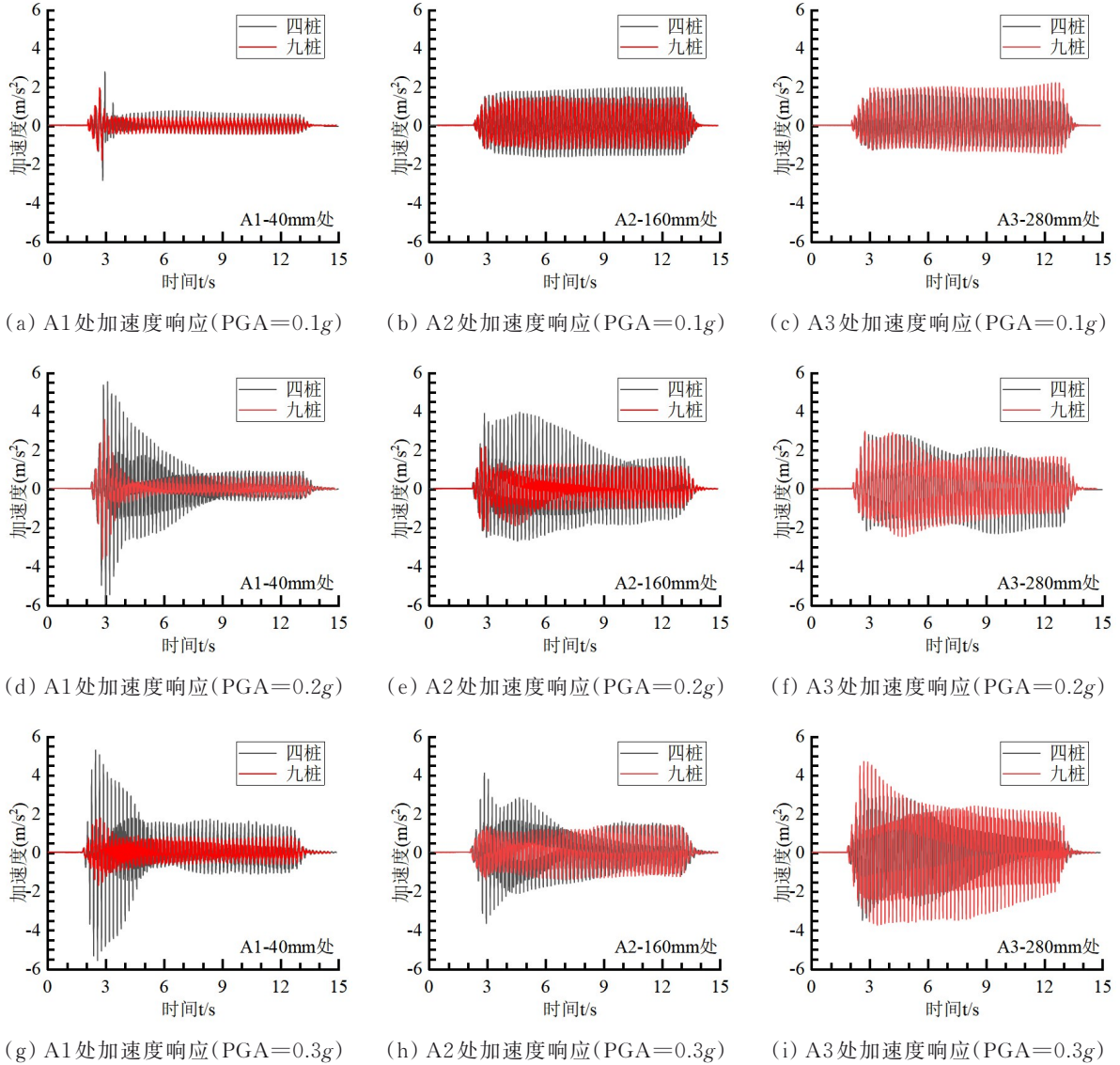


图 12 桩周土加速度时程图

Fig. 12 Time course of soil acceleration around the pile

综上所述,在浅层区域,由于浅层地基土更趋近于液化,且九桩基础超空压比值增长更快,使得相同用钢量的四桩型大直径群桩基础的加速度放大系数大于九桩。而深层区域则规律相反,这可能与桩土应力传递有关,九桩基础的桩土应力传递更均匀,土体应力状态更稳定。因此在设防烈度较低的地区,液化范围相对较小,九桩的整体表现更好。

2.4 桩身弯矩分布

两种地震波输入下桩身弯矩包络图如图 13 所示。由图 13 可以发现,二者形态基本一致。观察弯矩分布曲线可知,两种地震波输入下桩身弯矩动力响应大小存在较为明显区别:EL-Centro 地震波激

励下桩身弯矩响应相对较大。这与频谱分析所得的结论一致,由于 EL-Centro 地震波主频更接近模型的固有频率,因此 EL-Centro 地震波输入下地震强度放大作用强于 Taft 地震波,加速度响应幅值也更大,从而使得桩构件结构的弯矩响应更明显。随着振动强度的增加,桩身弯矩的峰值位置逐步向下方推移。根据超孔压比的数据分析,输入强度的提升导致超孔压持续升高。当超孔压比超过某一特定阈值时,土层的强度急剧下降,与下方土层的性质差异显著增加,这一差异在土层交界面引发了较大的弯矩,与 Hussien 等^[27]研究结果一致。

图 14 为四桩工况和九桩工况桩身弯矩响应峰

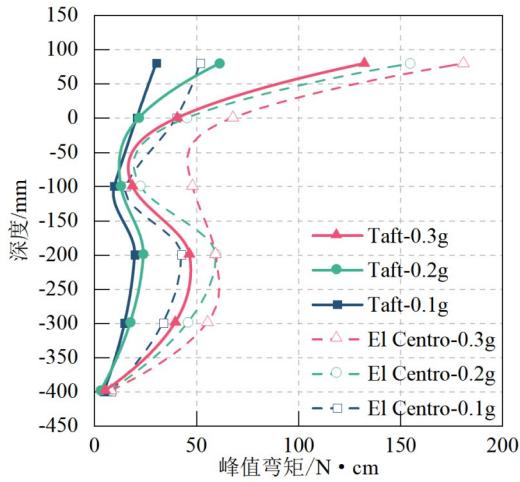


图 13 不同地震波输入下四角桩桩弯矩峰值分布

Fig. 13 Distribution of peak bending moments of the four-pile corner piles under different seismic wave inputs

值分布。由图 13 可见,弯矩分布大多呈现出三段式,且分布状态与桩数及桩的位置均有关。正弦波输入下,在水面、土表及泥面以下 $0.63 L_p$ (桩入土长

度)处的弯矩较大,这与承台的嵌固效应及在水土界面桩构件所受外力的突变有关。底部测点的弯矩最小是因为在试验中桩头是以埋入中密层砂土的方式设置,持力层对桩基底部的侧向约束作用较小。

对比四桩和九桩的弯矩分布情况,显然四桩工况的边桩弯矩峰值大于九桩边桩、角桩及中心桩的弯矩峰值。这与试验特性有关:振动台试验一般通过施加位移来模拟输入地震波,试验中四桩的桩构件桩径更大,因而在地震输入下桩周土对四桩工况的桩体作用更强,桩土相互作用更剧烈。

对比九桩工况的边桩、角桩及中心桩的弯矩峰值可以看出,在试验所用振动强度下,中心桩、边桩及角桩的弯矩差距不明显,即地震作用下桩之间的内力分配比较均匀。整体来看,角桩弯矩最大,边桩次之,中心桩弯矩最小。这表明对于大直径群桩基础的各桩内力分配存在一定的差异性,但差异不大,且该差异度随着输入加速度峰值的增大而

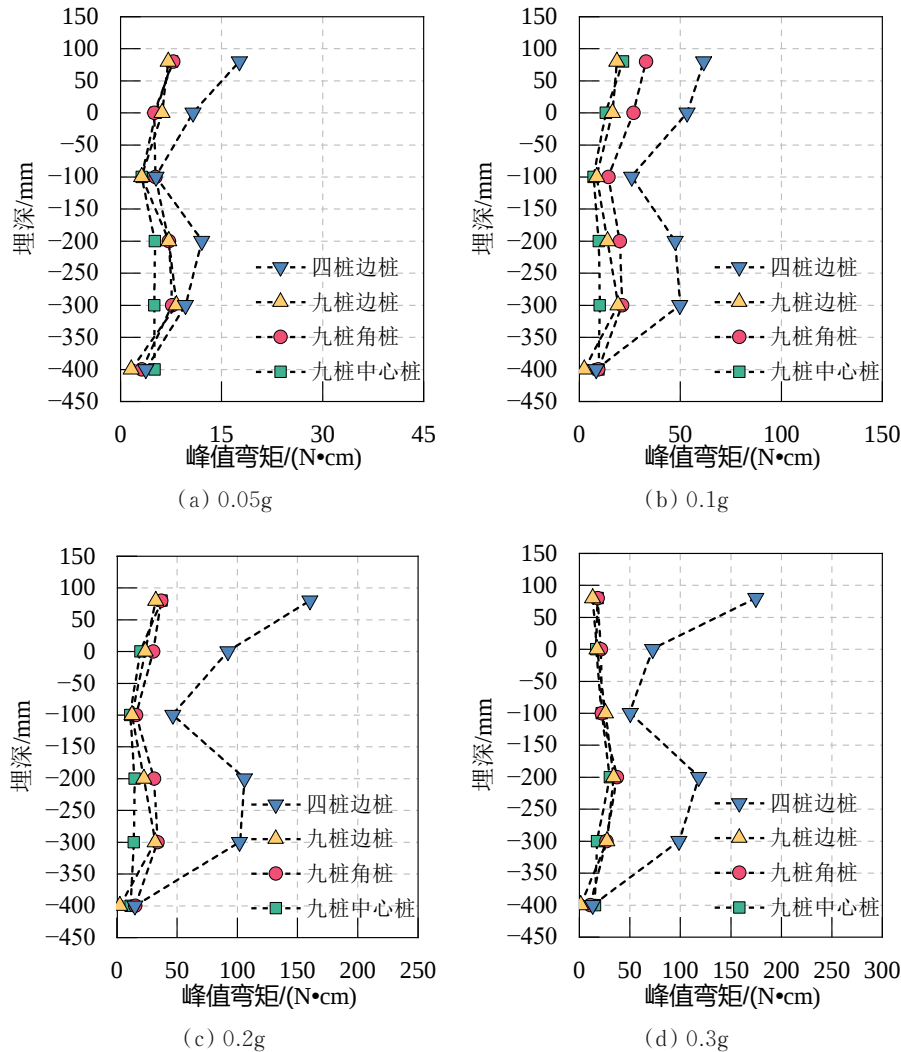


图 14 正弦波输入下桩身弯矩峰值沿深度分布规律

Fig. 14 Peak bending moment depth distribution of pile body under sinusoidal wave input

减小。

随着振动强度从 $0.05g$ 增至 $0.1g$, 液化程度加深, 四桩工况水面处桩身弯矩峰值增大 248.8% 。当振动强度从 $0.1g$ 增至 $0.2g$ 时, 水面处桩身弯矩峰值增大 160.5% 。进一步增至 $0.3g$ 时, 该值仅为 9% 。说明随着振动强度的提升, 桩身弯矩峰值增大幅度逐渐减小。输入加速度峰值对九桩地震反应特性的影响与四桩相似。

3 结论

通过开展上覆水层条件下的大直径群桩振动台模型试验, 考虑两种耗材相等但布置形式不同的群桩布置形式, 研究了地震强度和地震特性对桩体弯矩、桩周土孔压以及加速度等动力响应的影响, 得到以下主要结论:

1) 由于地震波频谱特性不同, 不同地震输入对结构及桩周土的影响程度存在差异。在相同作用时间内, Taft 地震波的循环周次更高, Taft 地震波输入比 El-Centro 地震波输入更容易导致桩周土液化。试验中 El-Centro 地震波更靠近基础结构的第一主频率, 其导致结构振动加速度与构件弯矩响应峰值更大。在抗震设计中应将工程场地地震波频谱特性考虑在内。

2) 在 $0.2g$ 正弦波输入下, 九桩基础桩周土超孔压比约为四桩基础的 $1.277\sim 1.545$ 倍, 表明与四桩基础工况相比, 九桩基础与土的相互作用更强, 因而桩周土孔压响应更为剧烈; 液化导致砂土软化, 在较易液化的浅层区域, 四桩基础的加速度时程响应比九桩基础更为显著, 而在较深层的桩周土加速度呈现相反的规律, 这是因为九桩基础的桩土应力传递更均匀, 土体应力状态更稳定。因此, 在耗材相同的情况下, 对于设防烈度较低的地区, 九桩基础的整体表现更好。海洋大直径群桩的抗震设计是一个更复杂的课题, 提高基础的抗震性能需要综合考虑钢管桩的直径、布置方式等因素的影响。

3) 桩身弯矩分布与输入地震波类型, 桩数及桩的位置均有关。根据弯矩峰值分布情况, 建议在设计中加强桩顶与承台连接部位以及土表附近桩体的抗剪性能处理。

参考文献

- [1] 曹光伟, 丁选明, 张鼎新, 等. 水平循环荷载下软黏土大直径单桩承载性状离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(8): 1574-1585.
- CAO G W, DING X M, ZHANG D X, et al. Bearing

behaviors of large-diameter monopiles in soft clay under horizontal cyclic loading based on centrifugal model tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1574-1585. (in Chinese)

- [2] LANG R Q, LIU R, LIAN J J, et al. Study on load-bearing characteristics of a new pile group foundation for an offshore wind turbine [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(1): 394104.
- [3] WANG X F, LI S X, LI J L. Effect of pile arrangement on lateral response of group-pile foundation for offshore wind turbines in sand [J]. Applied Ocean Research, 2022, 124: 103194.
- [4] 刘涉川, 王安辉, 章定文, 等. 可液化土中劲芯复合桩的地震响应特征[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(6): 42-51.
- LIU S C, WANG A H, ZHANG D W, et al. Seismic response of strength composite piles in a liquefiable soil [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 42-51. (in Chinese)
- [5] 冯忠居, 李元鹏, 王伟, 等. 不同厚度液化土层大直径变截面六桩基础振动台模型试验研究[J]. 振动工程学报, 2025, 38(3): 595-603.
- FENG Z J, LI Y P, WANG W, et al. Experimental study on shaking table model of six piles with large diameter and variable section in different thickened soil layers [J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(3): 595-603. (in Chinese)
- [6] PENZIEN J, KAUL M K. Response of offshore towers to strong motion earthquakes [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1972, 1(1): 55-68.
- [7] YANG W L, LI Q. The expanded Morison equation considering inner and outer water hydrodynamic pressure of hollow piers [J]. Ocean Engineering, 2013, 69: 79-87.
- [8] DING X M, CHIAN S C, LIAN J, et al. Wind-wave combined effect on dynamic response of soil-monopile-OWT system considering cyclic hydro-mechanical clay behavior [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 154: 105124.
- [9] DING X M, LIU H L, KONG G Q, et al. Time-domain analysis of velocity waves in a pipe pile due to a transient point load [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 58: 101-116.
- [10] 郑长杰, 林浩, 曹光伟, 等. 水平动荷载作用下海洋大直径管桩动力响应解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 810-819.
- ZHENG C J, LIN H, CAO G W, et al. Analytical solution for dynamic response of offshore large-diameter pipe piles subjected to horizontal dynamic loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 810-819. (in Chinese)
- [11] 武崇福, 刘贝贝. 波浪和地震作用下高桩承台-土-结构

- 动力响应[J]. 土木建筑与环境工程, 2011(6): 7-12, 58.
- WU C F, LIU B B. Dynamic response analysis of high-rise pile cap-soil-structure under the wave and earthquake action [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011(6): 7-12, 58. (in Chinese)
- [12] 马晓东. 群桩布置形式及非均匀沙对局部冲刷影响的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- MA X D. Study on the influence of pile group arrangement and non-uniform sediment on local scour around piles [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [13] 李芬, 彭晓宇, 黄蔚源, 等. 动水压力对深水桥梁单桩地震响应的影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 70-79.
- LI F, PENG X Y, HUANG W Y, et al. Study on the effects of hydrodynamic pressure on the seismic responses of monopile embedded in deep water [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 70-79. (in Chinese)
- [14] WU A J, YANG W L. Numerical study of pile group effect on the hydrodynamic force on a pile of sea-crossing bridges during earthquakes [J]. Ocean Engineering, 2020, 199: 106999.
- [15] 时健, 蒋宗南, 孔德森. 水流荷载作用下海洋群桩受力特性研究[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(3): 63-71.
- SHI J, JIANG Z N, KONG D S. Study on stress characteristics of marine pile groups under the action of water flow load [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(3): 63-71. (in Chinese)
- [16] CUI L, JENG D S, LIU J W. Numerical analysis of the seabed liquefaction around a fixed gravity-based structure (GBS) of an offshore platform and protection [J]. Ocean Engineering, 2022, 249: 110844.
- [17] 王志佳, 李胜民, 何旭, 等. 基于分离量纲分析理论的模型试验系统相似设计方法: 以土-地下管廊振动台试验为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2553-2569.
- WANG Z J, LI S M, HE X, et al. System similar design method for shaking table test based on separated dimensional analysis and its application in soil-underground pipe gallery interaction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2553-2569. (in Chinese)
- [18] 周恩全, 许想, 陆建飞. 海上风机桩筒复合基础的水平承载性能分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 235-241.
- ZHOU E Q, XU X, LU J F. Horizontal bearing capacity of pile-bucket composite foundation of offshore wind turbine [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 235-241. (in Chinese)
- [19] ZHOU Z J, WANG K C, FENG H M, et al. Centrifugal model test of post-grouting pile group in loess area [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 151: 106985.
- [20] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80-86.
- XU G M, ZHANG W M. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 80-86. (in Chinese)
- [21] 湛建霖, 丁选明, 吴琪, 等. ECC 混凝土桩板墙支挡边坡抗震性能振动台模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(5): 81-93.
- SHEN J L, DING X M, WU Q, et al. Shaking table model test on seismic performance of retaining slope with ECC anti-sliding sheet pile wall [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(5): 81-93. (in Chinese)
- [22] 闫志晓, 李雨润, 王东升, 等. 覆水砂土地中桥梁群桩基础地震响应离心试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 861-872.
- YAN Z X, LI Y R, WANG D S, et al. Centrifugal experimental study on seismic response of bridge pile group foundation in overlaying water sandy field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 861-872. (in Chinese)
- [23] LÓPEZ JIMÉNEZ G A, DIAS D, JENCK O. Effect of the soil-pile-structure interaction in seismic analysis: Case of liquefiable soils [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(5): 1509-1525.
- [24] 吴琪. 地震作用下珊瑚砂地基-基础-上部结构动力响应特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- WU Q. Study on the dynamic response of coral sand-foundation-superstructure under earthquakes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [25] ZHAO J Q, OU Q, LIU X C, et al. Shaking table tests on seismic responses of silica sand foundation reinforced by vibroflotation [J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(7): 04024114.
- [26] WANG C L, DING X M, CHEN Z X, et al. Seismic response of utility tunnels subjected to different earthquake excitations [J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 24(1): 67-79.
- [27] HUSSIEN M N, TOBITA T, IAI S, et al. Soil-pile-structure kinematic and inertial interaction observed in geotechnical centrifuge experiments [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 89: 75-84.