

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、地震强度及群桩布置形式对桩周土孔隙水压力、土体加速度及桩身弯矩等动力响应的影响。结果表明: 相同输入条件下, Taft 地震波振动循环次数更多, 相较 El-Centro 地震波, 更易引起桩周土体液化; El-Centro 地震波的主频更接近模型地基的固有频率, 该地震波输入时会导致更大的土体加速度和桩身弯矩响应。在用钢量相同的情况下, 9 桩基础桩周土的超孔压比响应显著高于 4 桩基础; 全部加载工况中, 浅层土体更易发生液化, 且 4 桩基础浅层液化程度更低, 因此, 4 桩基础浅层土体加速度时程响应更强, 深层土层则呈现相反规律; 9 桩基础桩身弯矩分布更均匀, 抗震性能优于 4 桩基础。总体来看, 9 桩基础整体抗震性能更优。

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(2026)05-0101-11

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 a seismic threat. A 1g shaking table model test was utilised 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 findings indicate that, under analogous conditions, the Taft seismic wave is more prone to induce liquefaction of the soil surrounding the piles, exhibiting a greater number of cycles and a lower principal frequency in comparison 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 excess pore pressure ratio response of the soil around the piles of the nine-pile arrangement is stronger than that of the four-

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 item: 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.

pile arrangement; under all the loading conditions, the acceleration response of the four-pile foundation is stronger due to the fact that the soil is 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. On the whole, the seismic performance of the nine-pile foundation is superior.

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

鉴于海上桩基施工难度大、成本高,多数海洋工程选用大直径管桩施工方案。大型海洋平台、跨海大桥、海上风电场采用的高桩群桩桩型逐步趋向更大直径的大直径管桩群桩^[1]。中国大部分近海工程地处强震活动区,因此,海洋大直径群桩的地震响应规律是海上工程建设的研究重点。

在以往针对群桩地震动力响应的相关研究中,学者主要关注桩的长径比、桩距比等传统群桩效应影响因素。Lang等^[2]通过正交试验系统分析高承台群桩基础承载性能的各类影响因素,结果表明,增大边桩倾斜角,其竖向、水平及抗弯承载力均会提高;增加边桩桩长,同样可提升其竖向、抗弯承载力。在海上风机群桩横向响应的研究中,Wang等^[3]利用离心机试验系统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,随桩数的增加,群桩基础的侧向承载力呈显著增强趋势。刘涉川等^[4]结合FLAC3D数值模拟与振动台模型试验研究了地震作用下劲芯复合桩的桩身弯矩和桩周土孔压,提出通过调整桩土模量比来增强可液化地基中桩的抗震性能。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、硬土层分界面处桩动力响应最为强烈,还指出了该部位桩体抗弯、抗剪设计的重要性。

针对地震作用下群桩传统影响因素的研究已较为全面,但相关研究普遍忽略了场地上覆水层对群桩地震响应的影响。为更精确地计算地震引起的动水压力,Penzien等^[6]、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套解析解方法,用于研究单相介质内管桩在竖向、水平动力荷载下的响应特性,同时探讨了风浪荷载对桩-土-海上风机(OWT)系统的综合影响。郑长杰等^[10]通过构建桩-土-流体耦合模型,推导得到桩位移的解析解,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规律。然而,在群桩地震响应的相关研究中,解析理论方

法难以考虑复杂地质条件与桩-土的相互作用,常需引入简化假设。

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,结果表明,波浪与地震同向加载时结构受力增大,反向加载时则减小。针对大直径桩型,马晓东^[12]开展了波流条件下群桩布置形式的冲刷规律研究,结果表明,相同流速下群桩的冲刷深度和影响范围均小于大直径单桩。李芬等^[13]通过FLAC建模对比不同水深下钢管桩的动力响应,认为水层的存在会扩大地震影响范围。Wu等^[14]通过数值模拟考虑上覆水产生的动力荷载,提出桩距比对地震响应的影响最大。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后桩受力,且该相互作用具有不对称性。此外,群桩区域内的流体流速低于外部,导致内、外侧形成压力差,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式重力海上平台周围的液化区,在不同海底土体渗透率下,该平台周围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影响不可忽视。然而,现阶段相关研究大多以数值模拟为主要手段。受土体本构模型、桩-土接触面单元模拟复杂度的限制,数值模拟不仅建模流程烦琐、计算耗时较长,且模拟所得结果仍需依托物理模型试验进一步验证。目前考虑上覆水层条件的模型试验研究尚少。鉴于此,针对上覆水层条件下大直径群桩的地震响应,笔者设计了两种用钢量相等的模型布置形式:2×2群桩(4桩基础)和3×3群桩(9桩基础),并基于1g振动台试验结果深入探究地震强度、输入波频谱、群桩类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,台面尺寸为1.2 m×1.2 m。试验基于分离量纲分析开展

相似设计^[17],分别对上部结构、桩体、砂土及输入系统 4 个部分完成相似比设计。选取几何尺寸 L 、弹性模量 E 和等效质量密度 ρ 作为基本物理量。对于上部结构自重,忽略其对桩基产生的偏心作用,通过在桩顶布设质量块进行模拟,仅满足质量相似要求。对于桩体结构,需考虑形变参量(应变 ϵ)、几何参量(长度 L)及材性参量(密度 ρ 、弹性模量 E 、剪切模量 G 与抗弯刚度 EI)。由于试验输入荷载为水平方向,因此,依据抗弯刚度相似关系确定模型桩壁厚。砂土子系统设计的关键参量为内摩擦角 φ 、动剪切模量比 $G/G_{\max}$ 与黏聚力 c 。对于输入系统,需考虑地震三要素:峰值地面加速度(peak ground acceleration,PGA)、持续时间 t 及输入频率 ω 。综合振动台台面尺寸、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比如表 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,该砂土黏聚力 c 为 0,且内摩擦角、动剪切模量比的相似比均为 1;结合表 1 可知,砂土子系统的各项相似比条件均可满足。试验砂土的物理力学参数如表 2 所示。采用动剪切试验获取砂样的动力特性,结果如图 1 所示。试验初始固结压力为 100 kPa,以剪应变达到 3.75% 作

表 1 部分关键参数的试验相似比

Table 1 Test similarity ratios 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

为液化破坏判断标准,由图 1 可知,循环应力比 CSR 为 0.1 时对应的液化振次为 10,CSR 为 0.2 时对应的液化振次为 4。说明随着振动强度的增大,地基砂土更易发生液化。群桩类型的选择需考虑地基承载力等因素。参考周恩全等^[18]、Zhou 等^[19]的研究,选取两种用钢量相等的模型布置形式:2×2 群桩(4 桩基础)和 3×3 群桩(9 桩基础)。两种模型的桩身均采用弹性模量为 2.4 GPa 的亚克力空心管,控制两组模型的耗材总量、距径比相等,基于桩身抗弯刚度相似准则确定桩径与壁厚。具体而言,4 桩基础的桩径、内径、桩距分别为 35、31、140 mm,9 桩基础的桩径、内径、桩距分别为 17、13、68 mm;承台尺寸均为 200 mm×200 mm×15 mm。质量块采用实心铁块,铁块质量为 2.4 kg。

表 2 砂土物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of sandy soil used in the experiment

试验用砂	相对密实度 $D_r/\%$	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	40	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

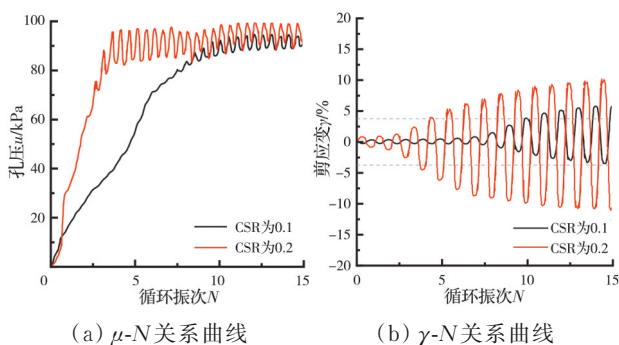


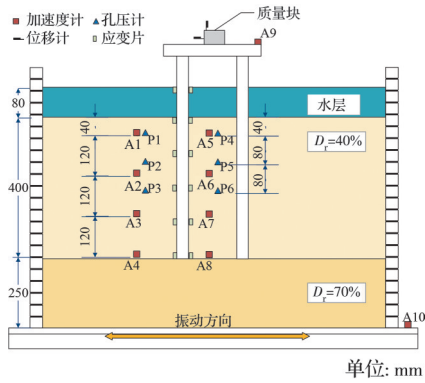
图 1 所用砂土的循环响应

Fig. 1 The cyclic response of the sand used

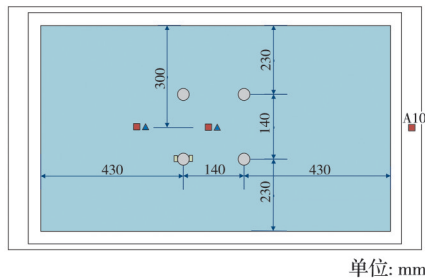
应变片采用等距对称方式沿桩身布设,每对应应变片中心的连线与振动方向平行,间距为 100 mm;另在水面位置布设应变片。4 桩基础模型仅在边桩布设应变片;9 桩基础模型则在角桩、边桩、中心桩均布设应变片。为对比两种工况下孔压的发展、消

散规律以及场地的液化特性,在距边桩 50 mm 处沿埋深 40、120、200 mm 位置埋置孔压计;同时沿埋深 40、160、280、400 mm 位置埋置加速度计。图 2、图 3 分别为两种模型各类传感器的布置情况。

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×0.6 m×0.8 m(长×宽×高)。参考徐光明等^[20]的研究,桩底至箱底铺设 250 mm 厚中密砂土,保证模型桩与箱体边界距离大于 3D(D 为大直径桩的桩径)。使用砂雨法分层填筑,随后通水饱和。通过控制出砂口距砂面距离控制砂土相对密实度,地基分为密实层(D_r 为 70%)和松软层(D_r 为 40%)。采用填埋方式将桩体嵌入地基,最后注入 8 cm 厚水层并静置 24 h。试验模型实物如图 5 所示。



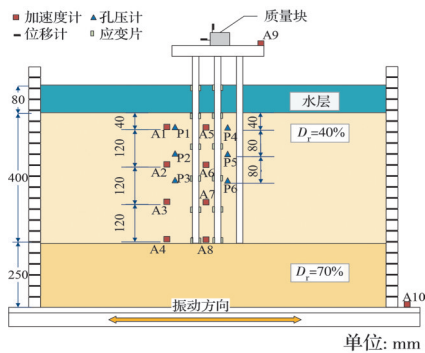
(a) 传感器布置剖面示意图



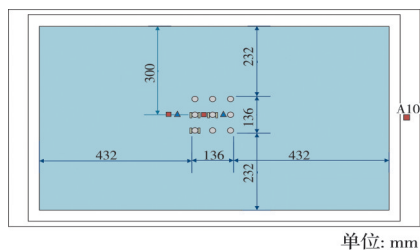
(b) 传感器布置俯视示意图

图 2 4 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) 传感器布置俯视示意图

图 3 9 桩模型传感器布置图

Fig. 3 Nine-pile model sensor layout

1.3 输入波及加载工况

选取 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)均对应 II 类场地,与中国海洋工程实际工况相符。Taft 地震波频率多集中于中、低频区域,El-Centro 地震波则包含更多中、高频成分,二者

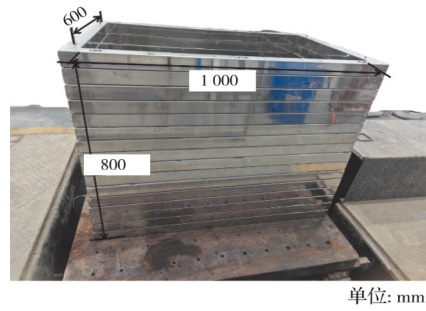


图 4 试验所用 ANCO 振动台台面及剪切箱

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

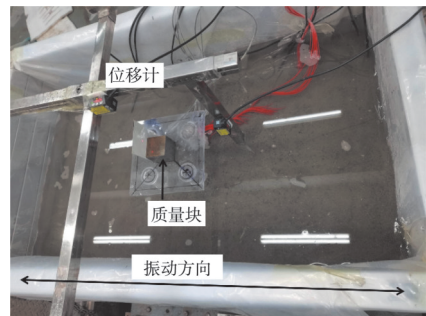
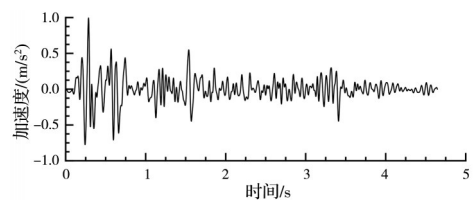


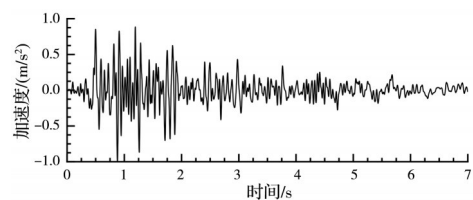
图 5 4 桩模型实物图

Fig. 5 Photograph of the four-pile model

频率成分的特点不同,可用于对比分析。按照时间比尺压缩、调幅后,PGA 为 0.1g 的波形如图 6 所示。图 7 为输入地震波的傅里叶谱。按模型相似比压缩后,Taft 地震波能量主要分布频域为 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、波形规整。为使对比分析更为直观,采用 5 Hz 正弦波(5 Hz_Sin),各输入工况见表 3;施加地震波前输入 30 s 能量均匀分布的白噪声,以获取两种地基模型的频谱。



(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-history curves

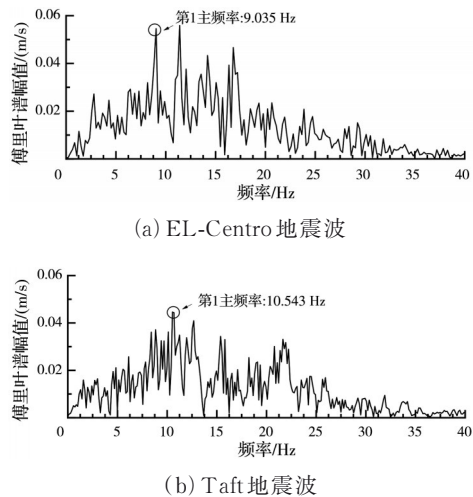


图 7 输入地震波的傅里叶谱
Fig. 7 Fourier spectrum of input seismic waves

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			

2 试验结果分析

2.1 地震波频谱

在预加载阶段施加 0.05g 的白噪声激励,记录桩体结构与地表土体的加速度时程,再利用傅里叶变换求解整体模型的固有频率^[21]。图 8 为 4 桩、9 桩工况下整体模型的频谱响应。由图 8 可知,在相同用钢量条件下,两种工况的主频近似相等,且通过半功率带宽法估算得到的阻尼比近似相等;9 桩模型以低阶振型为主,4 桩模型的振型分布范围更广,高阶振型占比更高。与图 7 对比可知,相较 Taft 地震波,El-Centro 地震波更靠近地基的第 1 主频率,因此,输入 El-Centro 地震波时模型将产生更强的动力响应。

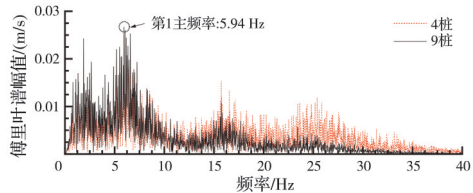


图 8 模型的频谱响应
Fig. 8 Spectral response of the model

2.2 超孔压比时程

不同地震波对结构与桩周土的影响程度通常存在差异,该现象由地震波频谱特性不同所致。根据闫志晓等^[22]的研究,上覆水层条件下深层土体不易液化,因此试验仅关注桩身中部以上区域。图 9 为 4 桩模型在不同 PGA 的 El-Centro、Taft 地震波输入下超孔压比(R_u)峰值的分布情况。由图 9 可知,超孔压比峰值整体随深度的增加呈减小趋势。在 0.05g、0.1g 地震波(El-Centro、Taft)输入下,3 个监测点(埋深 40、120、200mm)的超孔压均未达到液化标准。在 0.2g 地震波输入下,仅孔压计 P1(埋深 40 mm)处的超孔压达到液化标准。在 0.3g Taft 地震波作用下,孔压计 P1、P2(埋深 40、120 mm)处土体均发生液化;而在相同强度的 0.3g El-Centro 地震波作用下,仅 P1 处土体达到液化标准。

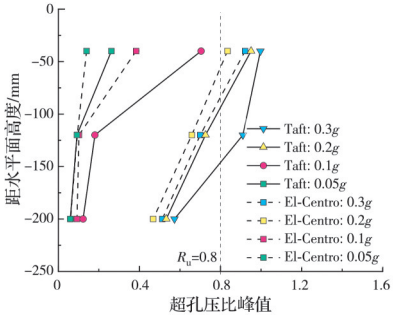


图 9 不同地震波输入下 4 桩模型的超孔压比峰值分布
Fig. 9 Distribution of peak excess pore pressure ratio under different seismic wave inputs for the four-pile model

根据超孔压比峰值分布情况可知,在上覆水层条件下,相比 El-Centro 地震波,主频较高的 Taft 地震波作用下桩周土的超孔压发展更快,土体更易发生液化。这一现象与闫志晓等^[22]考虑上覆水层的试验结果一致。上覆水层改变了土体的动力响应特性,高频地震波可使桩周土的超孔压累积速度更快。相较 El-Centro 地震波,Taft 地震波的循环周次更多、主频更高,因此更易引起桩周土体的液化。

为揭示地震作用下 4 桩、9 桩模型的孔压发展差异,对正弦波激励下两种模型桩周土的超孔压比时程进行对比分析。如图 10 所示,在 0.05g 正弦波条件下,4 桩模型桩周土的超孔压比缓慢增长,直至加载结束亦未达到稳定状态,而 9 桩模型桩周土的超孔压比快速达到液化状态;加载结束时,两种模型中仅 9 桩模型的孔压计 P1 处桩周土超孔压比超过 0.8,达到液化标准。在 0.1g 正弦波条件下,振动开始 1 s 内超孔压迅速上升并趋于稳定。两种模型的孔压计 P1 处超孔压比均超过 0.8,土体发生液化,且两者超孔压比峰值无显著差异。两种模型的孔

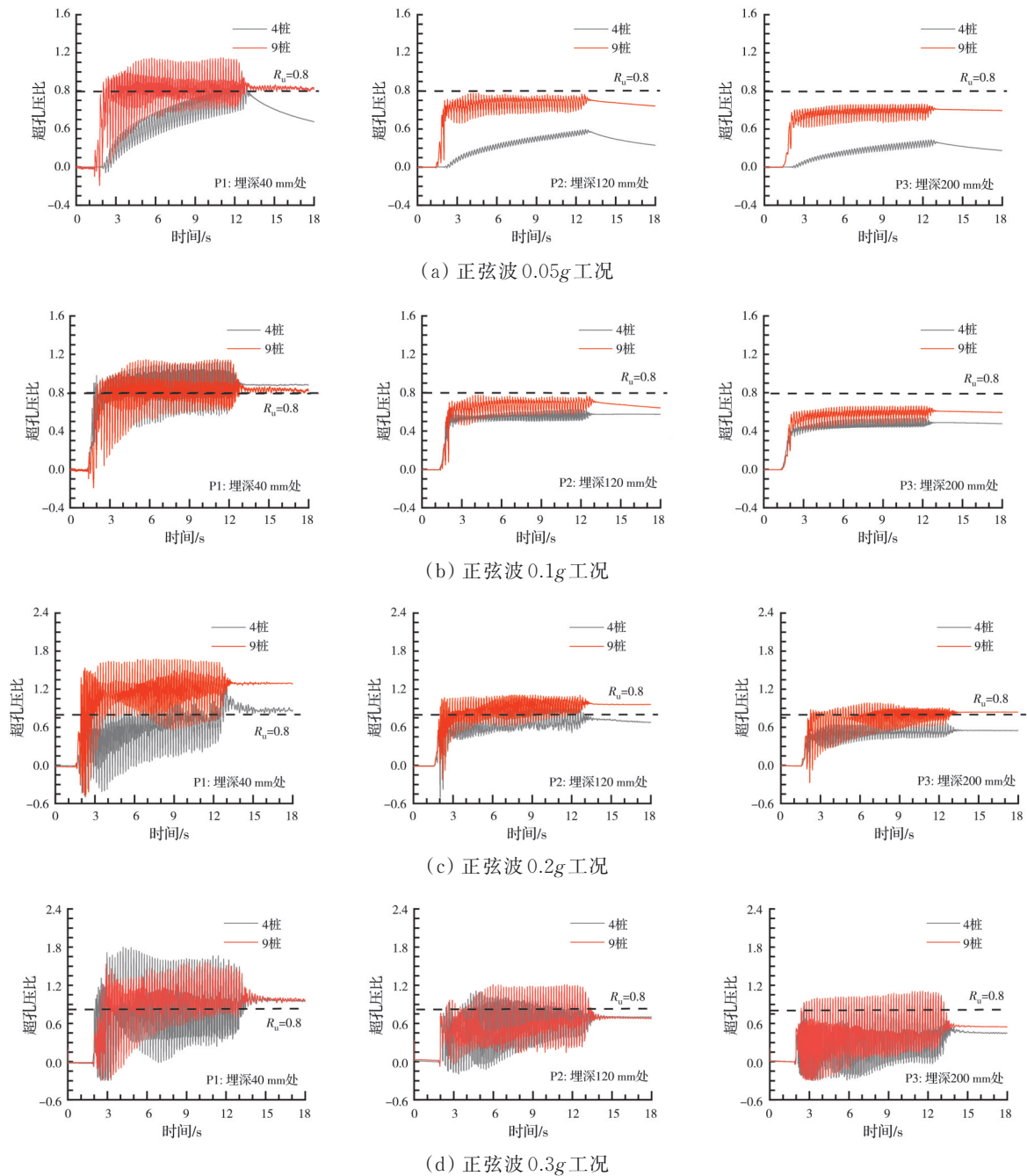


图 10 正弦波输入下不同测点桩周土超孔压时程图

Fig. 10 Time histories of excess pore pressure around piles at different measurement points under sinusoidal inputs

压计 P2、P3 处桩周土超孔压比均未达到液化标准；9 桩模型桩周土的超孔压比发展速度明显比 4 桩模型快，约为后者的 1.3 倍。随着 PGA 的增加，群桩类型带来的差异进一步扩大。在 0.2g 正弦波作用下，9 桩模型埋深 200 mm 以内的桩周土层由浅至深逐渐液化；而 4 桩模型在相同埋深处的超孔压比并未达到液化标准，仅孔压计 P1、P2 处桩周土的超孔压比大于 0.8。当 PGA 提升至 0.3g 时，两种模型在 200 mm 深度范围内的土层均达到了液化状态。

总体来看，9 桩模型的桩周土孔压响应更为剧烈；施震结束后，相较于 4 桩模型，9 桩模型的孔压消

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，9 桩模型的 3×3 布置形成更密集的群桩体系，桩间土体受振动干扰的重叠区域范围更大，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^[24]的试验结果一致。

观察地震 PGA 变化对孔压的影响可知，随着 PGA 的增大，液化区域逐渐从浅层土体向深层土体扩展。该变化趋势的内在机理在于，土层埋深越大，土体所受有效应力越高，土体的抗液化性能随之提升。而随着地震 PGA 的增大，深层砂土颗粒逐

步克服颗粒间的相互作用,促使液化区域向深处扩展,与图1结论一致。

2.3 加速度时程

在不同地震波输入下,4桩模型加速度放大系数的分布情况如图11所示。通常,密实土层内地震波向上传递时具有较显著的放大效应。但由图11可知,在不同输入条件下,从桩底测点向上,随着埋深的减小,桩底部分土层的桩周土加速度放大系数降低,且该土层厚度与输入波的PGA相关。这是因为桩体振动会提高桩周土的密实度,土体耗散更多地震能量,从而显著降低桩底土体的加速度响应。与常规砂土地基地震液化时加速度放大系数自下而上逐级递增的规律不同^[25],在埋深较浅区域,部分工况下出现加速度放大系数随埋深的减小而增加的现象;主要原因为上部土层约束作用较弱,叠加上部结构自重与上覆水层的动力作用,桩构件摆动幅度增大,最终造成加速度放大系数的增大。

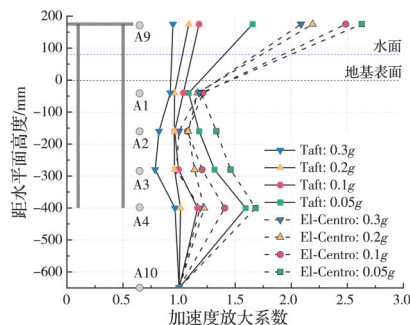


图11 不同地震波输入下4桩模型的加速度放大系数分布
Fig. 11 Distribution of acceleration amplification factor of the four-pile model under different seismic wave inputs

观察不同地震波输入下土体加速度放大特征可知,加速度放大系数随输入地震PGA的提升呈逐步下降趋势。根据超孔压比数据可知,随输入地震PGA的增大,土体超孔压不断上升,液化影响范围同步扩大。上述现象表明,地基土在液化过程中有效强度逐步丧失,致使桩-土间的相互作用力有所减弱。

对比两种地震波输入工况下的试验结果可知,EL-Centro地震波输入下各测点加速度放大系数均高于Taft地震波工况,该规律与频谱分析结果吻合。当结构受到与其固有频率相近的EL-Centro地震波作用时,易产生共振效应,造成结构振动幅度增大。地震波输入特性的差异导致不同位置土体的加速度放大系数存在显著差异。在埋深范围内,两种地震波条件下加速度放大系数的差异随着埋深的减小而减小。该现象与土体滤波效应有关:地震波自下而上传播过程中,输入地震波的高频段逐

渐被土体吸收,低频段逐渐成为主导,由此弱化了EL-Centro、Taft地震波因频率组分不同而产生的动力响应差异。观察承台处的加速度放大系数响应可知,不同地震波输入带来的响应差异再次显著增大。其原因在于群桩结构的自振频率较低,该频率与EL-Centro地震波主频率更为接近,使得承台处在两种地震波作用下的响应差异进一步扩大^[26]。

图12为不同PGA正弦波激励下加速度计A1(埋深40 mm)、A2(埋深160 mm)、A3(埋深280 mm)处的加速度时程曲线。由12(a)~(c)可知,0.1g正弦波输入下,A1处2种模型的加速度均显著降低。结合超孔压分析,该处桩周土体最先液化,且在整个振动过程中持续处于液化状态;与4桩模型相比,9桩模型桩周土体受到的扰动更为显著,液化程度更高,土体刚度退化更严重,因此其加速度响应明显更低。在A₂处,震动开始1 s内9桩模型的加速度出现轻微衰减,而4桩模型的加速度未出现衰减现象,因此,9桩模型的加速度略小于4桩模型。在A₃处,两种模型的加速度均未出现明显衰减,9桩模型的加速度整体高于4桩模型。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9桩基础与土体相互作用更强,振动过程中砂土密实度增大,从而提升了其刚度,导致加速度放大系数增大。由图12(d)~(f)可知,0.2g正弦波输入下,A₂处两种模型的加速度均出现了较大幅度衰减,4桩模型的加速度大于9桩模型;而在A₃处9桩模型的加速度略大于4桩模型。由图12(g)~(i)可知,0.3g正弦波输入下,加速度的时程变化规律与0.2g工况一致。该现象进一步印证,振动过程中9桩模型对土体具有更强的加固作用。

综上所述,浅层区域地基土更趋近于液化,且9桩模型的超孔压比增长更快,因此,相同用钢量下4桩模型的加速度放大系数大于9桩模型;深层区域规律与之相反。这种现象可能与桩-土应力传递特性有关,9桩模型的桩-土应力传递更为均匀,土体应力状态更稳定。在设防烈度较低的地区,土体液化范围相对较小,9桩模型的整体表现更好。

2.4 桩身弯矩分布

两种地震波输入下4桩模型的桩身弯矩包络图如图13所示。由图13可知,两种地震波输入对应的弯矩包络曲线形态基本一致;但桩身弯矩动力响应峰值存在明显差异;EL-Centro地震波激励下桩身弯矩响应更大,该规律与频谱分析结论吻合。EL-Centro地震波主频更接近模型的固有频率,其

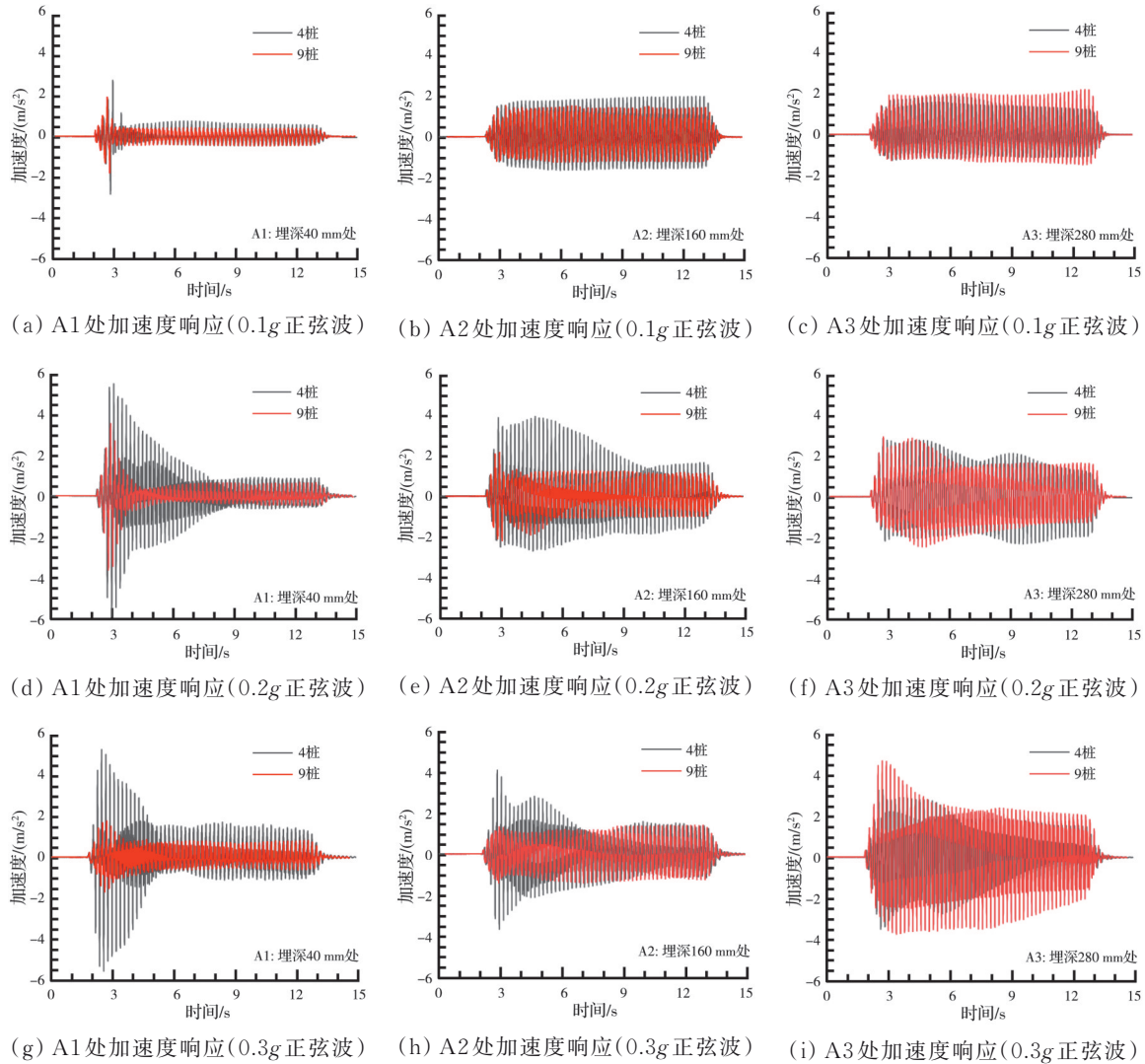


图 12 桩周土加速度时程图

Fig. 12 Time history of soil acceleration around the pile

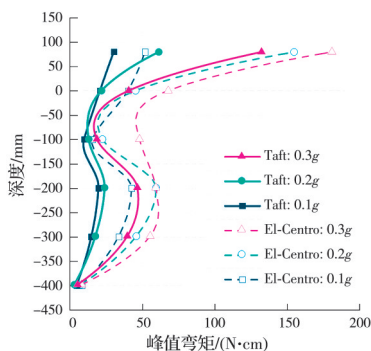


图 13 两种地震波输入下 4 桩模型的桩身弯矩峰值分布

Fig. 13 Distribution of peak bending moments of the four-pile model under two seismic wave inputs

地震动放大效应强于 Taft 地震波, 加速度响应幅值也更大, 从而使得桩身的弯矩响应更明显。随着输入地震波 PGA 的增大, 桩身最大弯矩出现的位置逐步向桩下部推移。结合超孔压比数据分析可知, 地震波输入 PGA 的提升使土体超孔压持续升高; 当超孔压比超过某特定阈值时, 土层的强度急剧下降,

该土层与其下部土层的力学性质差异显著增加, 进而使桩身产生较大弯矩, 该现象与 Hussien 等^[27]的研究结论一致。

图 14 为正弦波输入下 4 桩、9 桩模型的桩身弯矩响应峰值分布。由图 14 可知, 弯矩分布多呈 3 段式, 且分布状态与群桩布置形式、桩位均有关。正弦波输入条件下, 桩身在水面及水土界面以下 $0.63 L_p$ (L_p 为桩入土长度) 处弯矩较大, 该现象与承台的嵌固效应、水-土界面处桩体所受外力的突变有关。桩底弯矩最小是因为试验中桩端埋置于中密砂土中, 持力层对桩底的侧向约束作用较弱。

对比 4 桩、9 桩模型的弯矩分布情况可知, 4 桩模型的边桩弯矩峰值大于 9 桩模型的边桩、角桩及中心桩。该现象与试验特性有关: 振动台试验一般通过施加位移模拟地震波输入, 试验中 4 桩模型的桩径更大, 因而在正弦波输入下桩周土对 4 桩模型的桩体作用更强, 桩-土相互作用更剧烈。

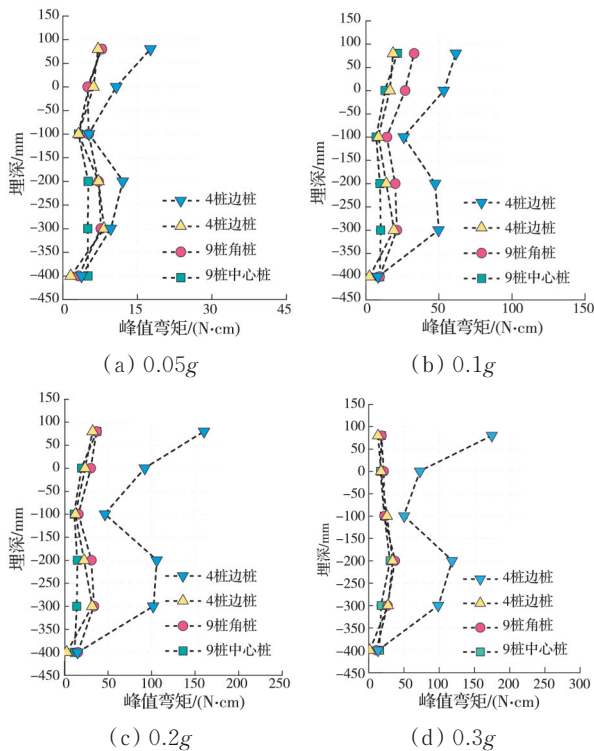


图14 正弦波输入下桩身弯矩峰值沿深度分布规律

Fig. 14 Depth distribution of peak bending moments of the pile body under sinusoidal wave input

对比9桩模型边桩、角桩及中心桩的弯矩峰值可知,在试验PGA范围内,角桩、边桩、中心桩弯矩峰值相差较小,地震作用下各基桩内力分配较为均匀。整体上,角桩弯矩峰值最大,边桩次之,中心桩最小。说明对于大直径群桩基础而言,各桩的内力分配存在一定差异,但差异有限,且该差异会随输入PGA的增大而减小。

随着正弦波PGA从0.05g增至0.1g,桩周土液化程度加深,4桩模型水面位置桩身弯矩峰值增大248.8%;PGA从0.1g增至0.2g时,该处桩身弯矩峰值增大160.5%;PGA进一步增至0.3g时,弯矩峰值仅增大9%。说明随着振动强度的提升,桩身弯矩峰值的增大幅度逐渐降低。正弦波PGA对9桩模型地震响应特性的影响规律与4桩模型相近。

3 结论

通过开展上覆水层条件下大直径群桩振动台模型试验,采用用钢量相等的两种群桩布置形式,研究地震强度与地震特性对桩周土超孔压、加速度及桩身弯矩等动力响应的影响,得到以下主要结论:

1)由于地震波频谱特性存在差异,不同地震输入对桩结构及桩周土的影响程度不同。相同作用时长下,相较El-Centro地震波,Taft地震波的循环

周次更多,更易引发桩周土液化。El-Centro地震波更靠近基础结构的第1主频率,致使桩基振动加速度与桩身弯矩响应峰值更大。因此,抗震设计中应考虑工程场地地震波的频谱特性。

2)在0.2g正弦波输入下,9桩模型桩周土超孔压比约为4桩模型的1.277~1.545倍,表明相较4桩模型,9桩模型的桩-土相互作用更强,桩周土的孔压响应更剧烈;土体液化导致砂土软化,在易发生液化的浅层土体中,4桩模型的加速度时程响应比9桩模型更显著,而深层桩周土的加速度响应则呈相反规律,原因在于9桩基础的桩-土应力传递更为均匀,土体应力状态更加稳定。因此,在设防烈度较低的地区,在用钢量相同情况下,9桩基础的整体抗震表现更好。海洋大直径群桩的抗震设计较为复杂,提升基础抗震性能需综合考虑钢管桩桩径、布置形式等多重因素。

3)桩身弯矩分布与输入地震波类型、群桩布置形式及桩位密切相关。根据弯矩峰值分布规律,建议工程设计中采取措施提升桩顶与承台连接部位、土表附近桩体的抗剪能力。

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.

(编辑 朱备)