

DOI:10.11918/202209087

砂土场地桩-筒复合基础地震响应离心振动台试验

杨 威¹, 张泽旺², 梁发云², 王奕康², 田会元³

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092;
3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘 要: 地震作用容易引起砂土地基中的海上风机基础液化失效, 单桩-筒型复合基础(简称桩-筒复合基础)结合了单桩基础和吸力筒基础的优势, 是一种新颖的海上风机基础形式。针对砂土场地桩-筒复合基础地震响应, 开展干砂及饱和砂的单桩和桩-筒复合基础的离心振动台试验, 采用白噪声和具有不同频谱成分的地震波进行激振, 得到两种基础形式在砂土场地中的自振频率、超孔压累积、风机加速度响应以及基础弯矩分布等。结果表明: 饱和场地中筒基下的浅层土体, 其超孔压累积会有所衰减, 加速度幅值则被相应放大; 饱和场地中单桩浅部弯矩响应较大, 风机产生明显的残余位移, 相比单桩, 桩-筒复合基础加速度响应更大, 但其在限制水平位移方面具有明显优势。研究结论对于桩-筒复合基础的抗震分析具有参考价值。

关键词: 砂土场地; 桩-筒复合基础; 离心振动台; 地震响应

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)02-0095-10

Seismic response of the monopile-bucket hybrid foundation in offshore sand deposit through centrifuge modeling

YANG Wei¹, ZHANG Zewang², LIANG Fayun², WANG Yikang², TIAN Huiyuan³

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of China Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: Seismic action tends to result in the liquefaction failure of offshore fan foundation in the sand deposit. Monopile-bucket hybrid foundation is a novel type of offshore fan foundation, combining the advantages of monopile and suction bucket foundations. To investigate the seismic response of this hybrid foundation in sand, a series of centrifugal shaking table model tests of monopile and the hybrid foundations in dry and saturated sand were conducted. White noise and seismic waves with different frequency spectrum components were used to stimulate the vibration for obtaining the natural vibration frequency, excess pore pressure accumulation of foundation soil, acceleration response of the offshore wind system and foundation bending moment distribution of the two foundation forms in sandy soil. The results show that the excess pore pressure of soil in saturated soil decreases in shallow depth under the bucket component of the hybrid foundation, while the acceleration amplitude is enlarged correspondingly. The shallow bending moment response of the monopile in saturated site is relatively larger with the turbine exhibiting obvious residual displacement. Compared with the monopile, the hybrid foundation shows greater acceleration response and smaller horizontal displacement in tests. The study provides a fresh reference for the seismic design of offshore wind structures with monopile and monopile-bucket hybrid foundations.

Keywords: sand deposit; monopile-bucket hybrid foundation; centrifuge shaking table; seismic response

中国近海的部分海上风电场位于饱和的软弱砂层, 地震可能会造成土体强度降低, 导致风机结构水平位移、加速度响应等不利影响。关于近海砂土场地受荷的动力响应规律, 许多学者进行了相关研究。对于单桩的地震响应规律, Haeri 等^[1]和张鑫磊等^[2]通过 1g 振动台试验考虑了砂土场地的倾角、

砂土层埋深等因素对单桩基础动力特性的影响, Boulanger 等^[3]通过一系列离心振动台试验, 评估了 p - y 方法对桩土相互作用的分析能力。对于群桩基础地震响应规律, Abdoun 等^[4-5]开展了离心机振动台试验, 分析了桩土相互作用以及基础的弯矩分布规律; Brandenberg 等^[6]进行了不同桩径的单桩与群

收稿日期: 2022-09-20; 录用日期: 2023-01-06; 网络首发日期: 2023-03-20

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230317.1659.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(52178346); 上海勘测设计研究院有限公司科研项目(2021FD(8)-021)

作者简介: 杨 威(1991—), 男, 硕士; 梁发云(1976—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 梁发云, fyliang@tongji.edu.cn

桩场地离心试验,探究了地震荷载作用下桩周土的侧向位移;梁发云等^[7]开展了单桩和群桩的动力离心试验,分析了土层厚度、输入波振幅等对体系的影响。为探究环境荷载与地震荷载耦合作用下的基础响应规律,Zheng 等^[8]通过缩尺振动台试验,测试了波浪、地震耦合荷载下单桩风机的动力响应;朱斌等^[9]和 Zheng 等^[8]分别考虑了单桩基础海上风机承受风浪荷载以及风浪、地震耦合作用的情况开展离心试验,比较了不同工况下的结构响应。

为保障风机在复杂海域环境和地质条件下安全平稳运行,一种新型的单桩-筒型复合基础(简称桩-筒复合基础)被提出,该基础结合了单桩基础与吸力筒基础的优点,可同时发挥两种基础形式的承载优势。对于吸力筒基础以及新型复合基础的地震响应研究,丁红岩等^[10-11]研究了桩-筒组合基础的水平承载性能,考虑了基础的几何尺寸以及土层特性对组合基础承载特性的影响。Li 等^[12]和 Wang 等^[13]针对桩-筒复合基础与桩盘复合基础等新型海上风电基础开展了离心振动台试验,研究了其在饱和砂土层中的地震响应规律。陈广思^[14]对筒型基础等宽浅式基础结构的风机开展了数值模拟和模型试验研究,结果发现,在倾覆荷载作用时,基础较显著的变形与内力响应值集中于荷载作用平面内的筒体边缘处。Wang 等^[15]和汪嘉钰等^[16]也采用离心试验对复合基础开展了动力响应分析。

目前研究中的结构设计由于忽略了对体系自振频率的控制,可能会导致地震波传递过程与实际情况有较大的差异。此外,现存的研究大多是针对海上风机单桩在砂土地基中的工况而展开的,对于桩-筒复合基础等新型基础形式的研究还不够深入。为了更好地掌握桩-筒复合基础遭遇震害后的响应规律,探究砂土地基中复合基础相对于传统单桩基础的优势与不足,基于离心振动台试验,通过输入不同地震波,开展了近海风机单桩和桩-筒复合基础的地震响应模拟研究,对比分析了砂土地基中两种基础形式的地震响应规律差异。

1 试验装置与模型设计

本次模型试验是在同济大学岩土及地下工程教

育部重点实验室的 TLJ-150 型岩土复合离心机上进行的,试验设置的超重力场为 50g,有效激震频率 20 ~ 200 Hz。试验的模型箱尺寸为 50 cm × 40 cm × 40 cm。参考单桩埋深的常见范围为 20 ~ 50 m,以及小兆瓦涡轮风机的塔筒高度为 15 ~ 30 m^[17],本次试验模拟的单桩、柱-筒复合基础以及风电塔结构模型如图 1 所示,模型与原型的主要材料与尺寸参数见表 1。将机舱和叶片等结构通过等质量的方式简化为添加到塔架顶部的集中铁质立方块(部件 P-T 和 PB-T),其边长为 50 mm,此等效方法可较好地等效模拟海上风电塔的机舱和叶片对基础的影响^[18-23]。为对比桩-筒复合基础与传统单桩的承载性能,采用的复合基础的单桩部分(部件 PB-P)横截面尺寸与单桩基础的一致(部件 P-P),其桩长则被大幅缩短,复合基础的筒盖顶增设了两块环形铁板来模拟实际筒型基础的堆料设计(部件 PB-W),表现出基础对浅部土层的附加应力作用(筒盖底附加应力约 80 kPa)。结合本试验所用离心模型中设备与模型箱尺寸,基于离心模型的缩尺比例准则,得到如表 2 所示的模型试验各常数相似表。由于在实际工程中,风机的建造往往会追求在控制成本的前提下使其刚度有所保障,风机塔筒设计的自振频率通常需要依据“软-刚”原则在 0.20 ~ 0.35 Hz 选取。

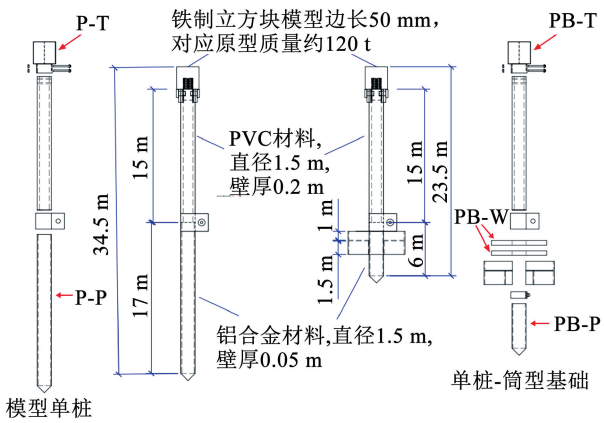


图 1 模型单桩及单桩-筒型基础尺寸及组成

Fig. 1 Dimensions and composition of model monopile and monopile-bucket hybrid foundation

表 1 离心试验模型结构主要参数

Tab. 1 Parameters of centrifugal model structure

类别	塔筒				桩段				筒基部分			
	直径/m	长度/m	壁厚/m	弹性模量/ GPa	直径/m	埋深/m	壁厚/m	弹性模量/ GPa	直径/m	裙边 高度/m	弹性模量/ GPa	筒盖底附加 应力/kPa
模型	0.03	0.3	0.004	2.4(PVC)	0.03	0.34	0.001	70(铝合金)	0.128	0.05	210(钢材)	80
原型	1.50	15.0	0.200		1.50	17.00	0.050		6.400	2.50		80

本次试验中选用的模型土为福建标准砂,在此基础上混合 10% 粒径约 0.08 mm 的石英砂,以模拟原场地中分布的细小颗粒。土样颗粒的颗分曲线见图 2,可以看出,干砂粒径分布较为集中。

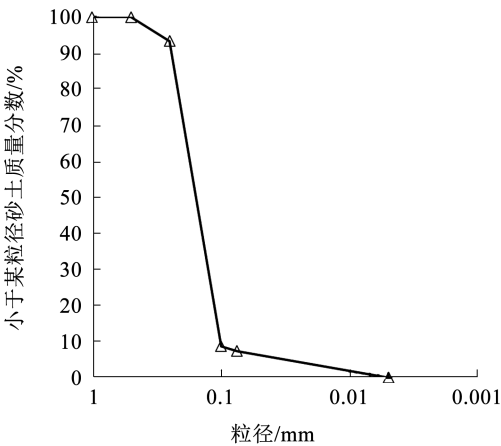


图2 模型用砂颗分曲线

Fig. 2 The distribution curve of particle size of sand

测试得到模型土样最小干密度为 1.36 g/cm³,最大干密度为 1.81 g/cm³。模型砂土的填筑过程如下:干砂土体的填筑通过砂雨法来实现,以得到均匀性以及密实度可控的模型场地。本次试验落砂使用的设备为 TJU 砂雨装置,其落砂口为鸭嘴式,移动路径为弓字形。实际操作过程如下:首先,填筑基础底部的砂垫层,根据设定落距固定好砂桶,使出砂口与模型箱底部与出砂口距离符合落距,然后,以每层砂土 2 cm 厚度计,称量所需干砂质量装入砂桶内,之后,撤去堵砂装置,按照弓字形路线移动导轨和砂桶,让干砂颗粒均匀落入箱内,直到装填至最下层传感器高度时(此时满足所填土层在纵向堆积以及颗粒排列方面都有更高的均匀性^[24]),布设对应传感器并预留连接通道的导线;继续以上步骤进行填土至 15 cm 厚度后,定点装入单桩基础模型并校核结构顶部高度;后续重复填土及安装传感器的步骤;当装填至 30 cm 厚度时,定点装入筒型基础模型;最后,填土至 40 cm 厚度后安装结构顶部传感器及激光位移计。本试验饱和砂土地基土的制备采用同干砂模型一样的砂雨法步骤,首先,得到干砂场地,之后,利用真空饱和装置静置 24 h 以实现模型土层的饱和过程。由表 2 可知,液体渗流的时间模型比尺为 N^2 ,而动力作用时间比尺为 N ,由此可知在超重力环境下,场地内动力作用时间与渗流反应时间存在 N 倍的比例偏差。因此,在砂土饱和的过程中,采用室温条件下运动黏度约为 50 mm²/s 的甲基纤维素溶液(运动黏度为原型场地中渗流水的 N 倍)作为真空饱和阶段掺入场地内的渗流液体。

表2 离心模型试验各基本物理量相似关系

Tab. 2 Scale factors of parameters in centrifuge tests

物理量	相似比(模型值:原型值)
加速度 a	50:1
速度 v	1:1
位移 x	1:50
长度	1:50
液体渗透时间	1:50 ²
动力作用时间	1:50
频率 f	50:1
密度 ρ	1:1
结构应力	1:1

本离心振动台试验使用叠环式剪切模型箱,可以大大减轻模型箱侧壁反射地震波对基础地震响应造成的边界效应,剪切模型箱还可以较好地模拟自由场在地震作用下的真实地震反应,以较小的误差精确地捕捉如土层的加速度反应峰值和波形等数据^[24-25]。为减小边界效应和两种基础的相互干扰,模型的布置过程中两基础中心沿对角线错落摆放,中心距模型箱侧壁均为 15 cm(超过两倍筒径),两基础中心距约为 22 cm,如图 3 所示。图 4 为试验的传感器布置。对于场地和结构的地震动响应的测量,通过加速度计可得到桩、筒基础附近土体的加速度时程,以及传递至风机顶部的加速度响应;孔隙水压力时程与分布的测量通过布设在筒型基础下方的孔压计实现;对于风机体系的变形特征,利用 LVDT 测得风机塔顶部在受震方向上的水平位移情况;沿单桩基础布置的双桥应变片,可测算在地震过程中单桩基础的弯矩响应。

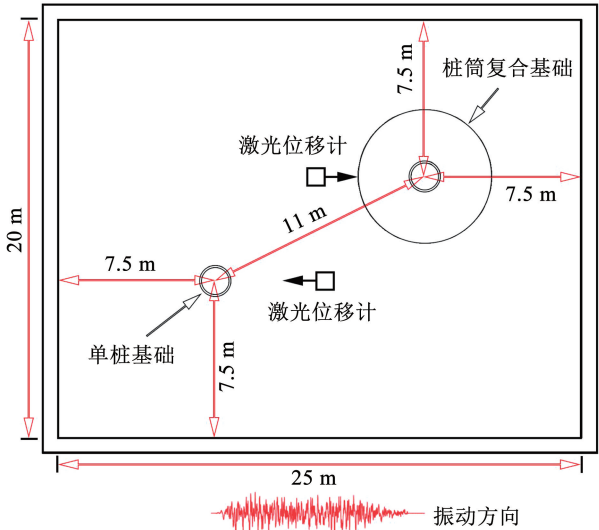


图3 装置平面布置

Fig. 3 Layout of equipment

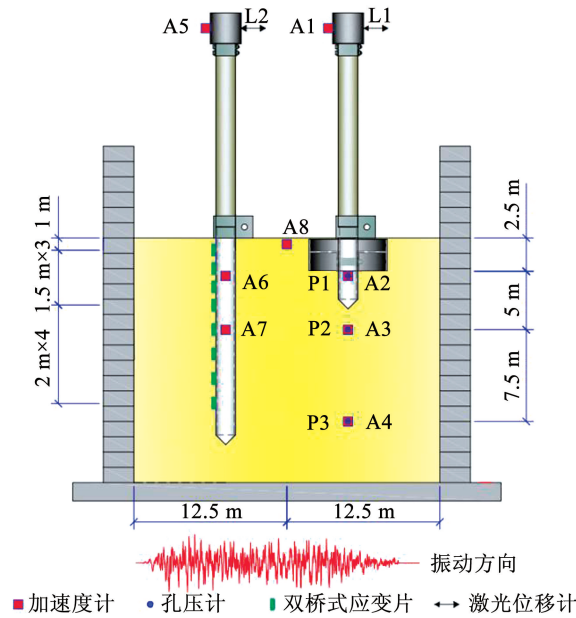
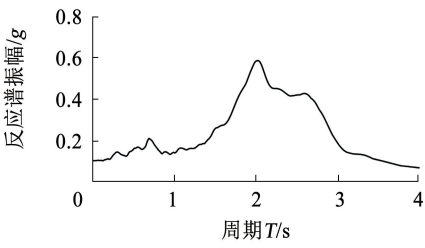
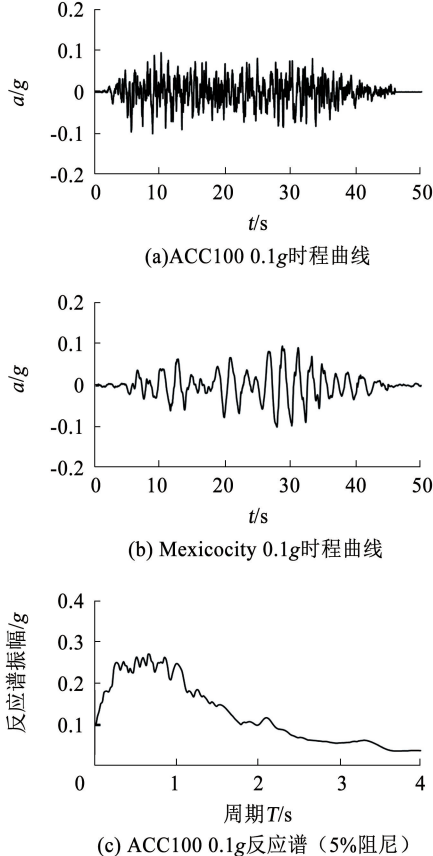


图 4 传感器布置

Fig. 4 Arrangement of the transducers

2 试验工况设计

本次模型试验主要研究不同振幅与频谱成分地震波作用下砂土地基中两种基础的动力响应,因此,挑选了高频成分较为丰富的 ACC100 波与低频成分较丰富的 Mexicocity 波作为基岩地震动输入。两种地震波分别调幅至 0.1g 和 0.25g 作为实际输入,其中,幅值为 0.1g 的两种地震波波形与反应谱如图 5(a)~(d)所示。



(d) Mexicocity 0.1g反应谱(5%阻尼)

图 5 输入的地震波时程及加速度反应谱曲线

Fig. 5 The acceleration histories and acceleration response spectrum of the input earthquake motions

离心试验中场地模型包含干砂及饱和砂两类,用以对比两种场地土层中结构物的地震响应。每种场地中进行的主要试验为以上两种地震波各两次输入的工况,因此,总体的试验工况为 10 组(干砂地层: Wd-1, Ad-1, Ad-2, Md-1, Md-2;饱和砂地层: Ws-1, As-1, As-2, Ms-1, Ms-2)。在试验模型装填完毕、进行主荷载施加前,对干砂与饱和砂模型均进行白噪音扫频(干砂地基为 Wd-1;饱和砂地基为 Ws-1),观测对比体系的自振频率。本次离心振动台试验的各工况组别如表 3 所示。

表 3 试验工况

Tab. 3 Summary of the testing program

地基土	工况	输入地震波	理论峰值加速度/g	实际台面输入峰值加速度/g
干砂	Wd-1	白噪声	0.05	0.047
	Ad-1	ACC100	0.10	0.092
	Ad-2	ACC100	0.25	0.210
	Md-1	Mexico City	0.10	0.088
	Md-2	Mexico City	0.25	0.220
饱和砂	Ws-1	白噪声	0.05	0.051
	As-1	ACC100	0.10	0.094
	As-2	ACC100	0.25	0.222
	Ms-1	Mexico City	0.10	0.092
	Ms-2	Mexico City	0.25	0.232

3 试验结果及分析

3.1 模型固有频率测试结果

图 6 为台面反馈以及 A2、A4 加速度计记录值转换的傅里叶谱。台面反馈图的单值波峰所对应频率值即为干砂与饱和砂情况下模型输入地震波的卓越频率,分别为 3.56、3.47 Hz。土体在深部土层(埋深 15 m 处)出现了明显的双峰,地震波体现出了场地的特性;当地震波传递至埋深 2.5 m 处时,输入波的特性被显著弱化,得到的干砂场地和饱和场地的自振频率分别为 1.64、1.39 Hz,后者比前者下降约 15%。干砂场地中傅里叶谱为单峰谱样,而饱和场地浅层谱样在 2~3 Hz 附近。由于场地滤波效应出现波谷,在 3.47 Hz 的输入波卓越频率处仍有

波峰存在,由此可知地震波在土层中传递时会积累土层的固有动力特性,干砂场地特性累积则更为明显。

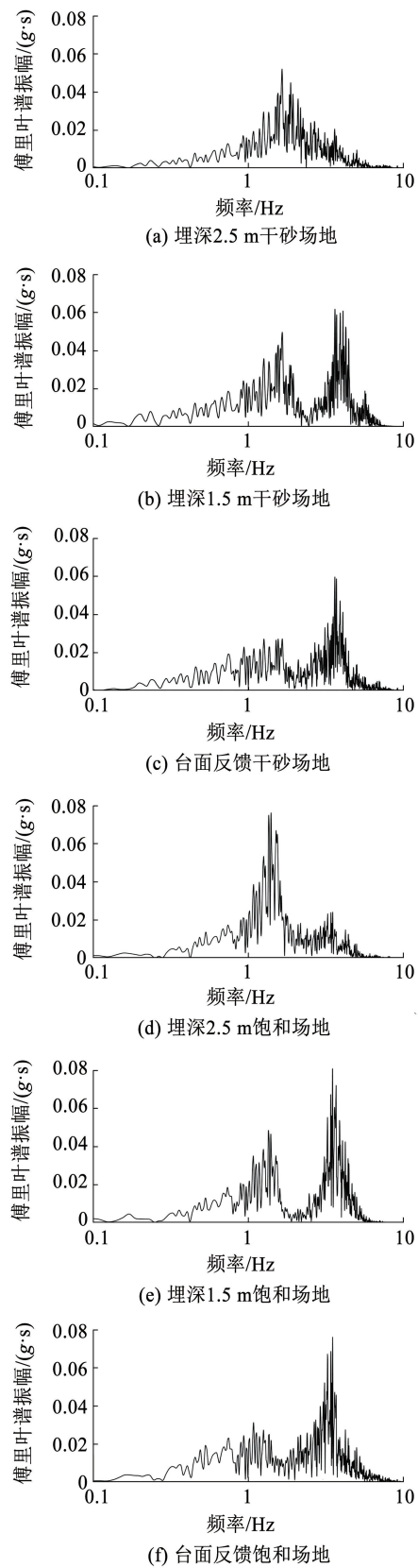


图 6 两种场地白噪声扫频得到的加速度傅里叶谱 (水平轴为半对数坐标)

Fig. 6 Fourier spectra obtained by white noise sweeping (the horizontal axis is semi-logarithmic coordinate)

作为高耸结构,海上风机自身也具有较高的频率敏感性,应当关注模型自振频率是否在安全范围内。图 7 展示了白噪声扫频后干砂和饱和场地中两种基础顶部质量块测定的加速度进行傅里叶变化后的频谱曲线,频谱展现的一阶自振频率所在频段与地震输入波和土体自振频率所在频段相差较大,由此读取的自振频率误差会较小。根据 De Risi 等^[26]的研究,现场风机结构设计的安全频段主要在 0.20 ~ 0.35 Hz,本次试验中两种基础在干砂场地中的体系自振频率为 0.329 Hz,而饱和场地中为 0.313 Hz,均在安全的频率范围内,表明在本离心试验中,模型体系自振频率主要取决于出土塔筒段,受场地影响较小。

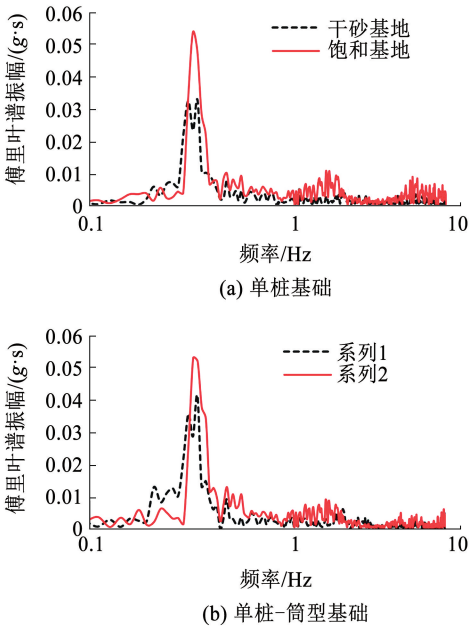


图 7 两种基础顶部质量块的白噪声扫频加速度傅里叶谱 (水平轴为半对数坐标)

Fig. 7 Fourier acceleration spectra of two kinds of foundation top masses through white noise sweeping (the horizontal axis is semi-logarithmic coordinate)

3.2 场地土层动力响应

加速度升至 50g、运行平稳后,按表 3 中不同的工况对应施加地震波激励。图 8、9 为 As-2 和 Ms-2 试验组别所得到的孔压和加速度响应曲线,其中,超孔压比曲线纵坐标为超静水压力与测量点原静孔压的比值($\Delta u/\sigma'$)。从图 8、9 可以看出,在土体深处的土体孔压不易累积,两种工况下埋深 15 m 处的超孔压比均未超过 0.4,地震波幅值也较输入值增大。到了土层中部(地表下 7.5 m 处),超孔压比显著上升,As-2 工况中超孔压比达到 0.6,ACC100 波的加速度幅值由 0.265g 衰减至 0.188g,降幅为 29.1%;对于 Ms-2 工况,超孔压比接近 1.0,Mexicocity 波加速度幅值由 0.264g 衰减至 0.128g,降幅为 51.5%。图 9(d) ~ (f) 中,在复合基础下 2.5 m 处,超孔压比小于 0.8,地震动幅值放大至 0.143g,表明接近复合基础的浅表底层范围内孔压上升受到抑制,液化现

象不显著。但从图 8 可以看出,As-2 工况中孔压显著上升至液化,加速度幅值也较深部土层进一步下降,加速度高频成分也显著弱化。

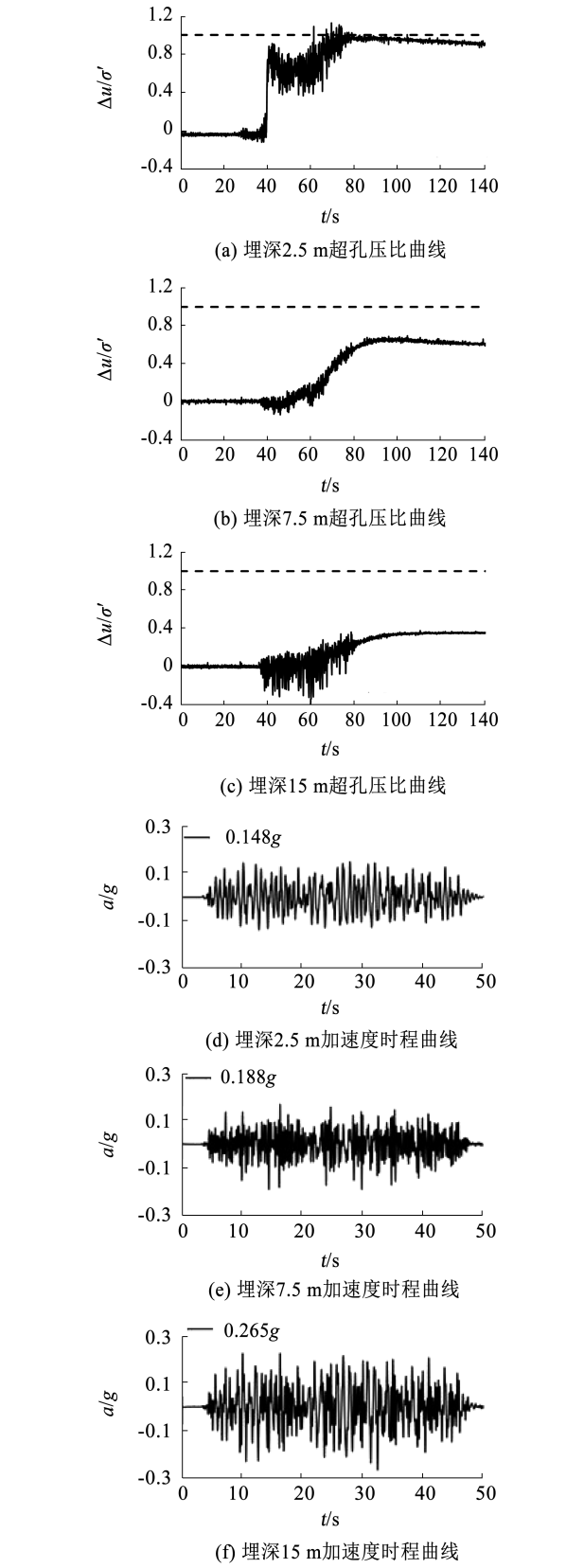


图 8 As-2 工况各深度处超孔压比和加速度响应 (ACC100 波,0.222g)
Fig. 8 Excess pore pressure ratio and acceleration response (ACC100 wave, 0.222g) at various depths in case As-2

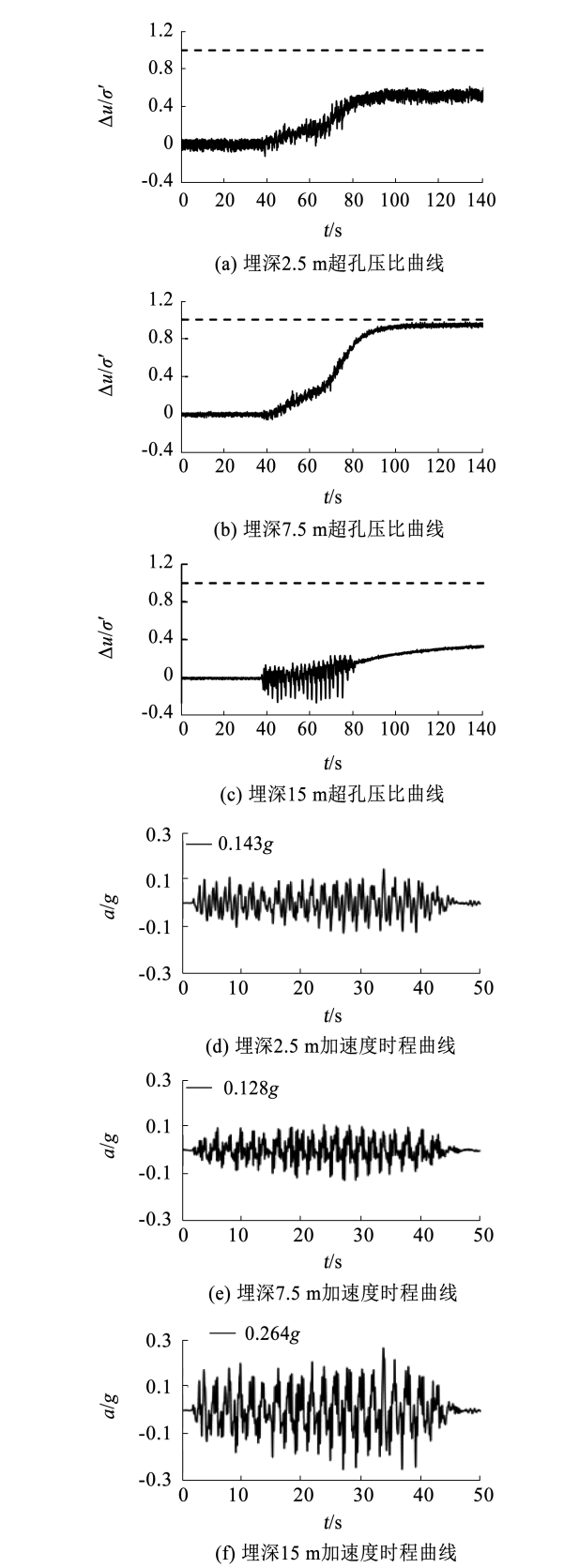


图 9 Ms-2 工况各深度处超孔压比和加速度响应 (Mexico city 波,0.232g)
Fig. 9 Excess pore pressure ratio and acceleration response (Mexico city wave, 0.232g) at various depths in case Ms-2
为解释上述土层响应现象出现的原因,绘制了两种工况下的输入波频谱曲线,如图 10 所示。

ACC100 输入波卓越频率为 1.39 Hz, Mexicocity 输入波卓越频率为 0.49 Hz, 而图 6(d) ~ (f) 得到的白噪声扫频曲线表明本饱和场地在 2.5 m 处测得固有频率为 1.39 Hz, 与 ACC100 输入波卓越频率相近, 发生了共振现象, 且 ACC100 波在高频段仍有显著丰富的成分, 因此, 会导致浅部土层发生液化现象。故可推知, 同一振幅水平的强震作用下, 荷载频率对液化区分布有影响, 7 m 左右的中部土层是易液化区, 但高频荷载使得浅部土层仍有液化隐患。

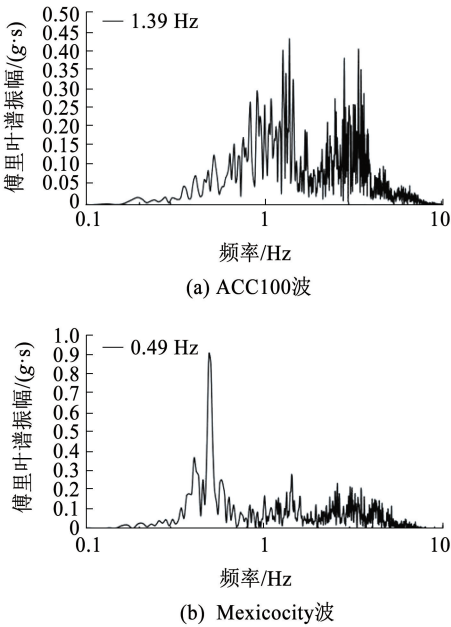


图 10 As-2、Ms-2 工况台面输入波傅里叶谱 (水平轴为半对数坐标)

Fig. 10 Fourier acceleration spectra of output motion in cases As-2 and Ms-2 (the horizontal axis is semi-logarithmic coordinate)

3.3 风机结构动力响应

3.3.1 风机水平加速度

台面输入波幅值 (A_{PB}) 和结构加速度响应幅值 (A_{PR}) 的关系曲线如图 11 所示, 由于土层和结构存在阻尼, 风机水平加速度幅值明显小于输入波幅值。由图 11 可以看出, A_{PB} 增大则 A_{PR} 也显著增大, 在两种砂土地基中复合基础上质量块加速度均大于单桩基础, 表明地震波沿单桩基础传递时能量耗散更多, 到达风机顶部的地震强度相比复合基础更小。在同种基础形式下, 饱和地基中地震波传递到结构顶部的加速度峰值更大, 尤其是在强震输入的试验组别, 饱和场地传递至风机顶部的加速度幅值与干砂场地差别更大, 可以推断饱和砂场地土层受震弱化, 基础承担的加速度比例更大, 地震强度越大弱化越严重。图 11(a) 中 ACC100 波几组工况的结构地震响应随 A_{PB} 增大而增长的趋势较为一致; 而 Mexicocity 波中

无论干砂还是饱和砂情况, 在本离心试验中, 复合基础上结构加速度幅值均大于同等输入水平下的单桩基础, 且荷载水平增大后风机响应差异更显著。结合 3.2 节, ACC100 波和 Mexicocity 波输入到复合基础吸力筒底部的加速度峰值接近, 但由于 Mexicocity 波卓越频率较小, 更接近风机塔筒的自振频率, 经塔筒传递后到达风机顶部的加速度响应强度越大, 该影响在复合基础中表现更显著, 且随 A_{PB} 增大而增强。

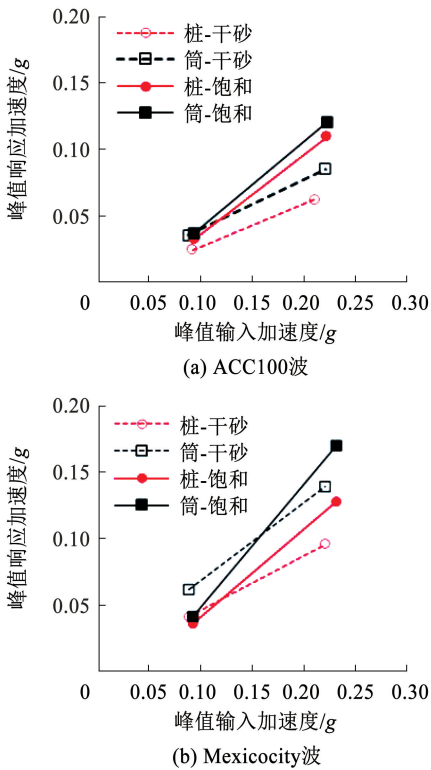


图 11 不同工况下 A_{PB} 与 A_{PR} 的关系

Fig. 11 Relationship between A_{PB} and A_{PR} in different cases

3.3.2 风机结构水平位移

为比较不同工况下复合基础的水平位移响应, 采用激光位移计测试了顶部集中质量块的水平位移, 位移响应峰值与输入加速度峰值的关系如图 12 所示。对于不同的风机基础类型和工况, 强震作用下的峰值位移约为小震时峰值位移的 2 ~ 4 倍, Wang 等^[15] 和 Rahmani 等^[27] 的研究中对不同基础上 13 m 高度的风机进行 50g 超重力振动台试验, 也得到了与本文类似的结论。从图 12 可以看出, 同等工况下复合基础上的结构水平向位移小于单桩基础, 输入加速度增加后复合基础位移峰值增加的幅度也更小, 表明复合基础在结构抗水平变形方面有更好的性能。另外, 在强震作用下, 饱和场地中的结构水平位移明显大于干砂的情况, 而单桩模型处于饱和场地时在各输入波情况下水平位移峰值也均明显大于其余工况。

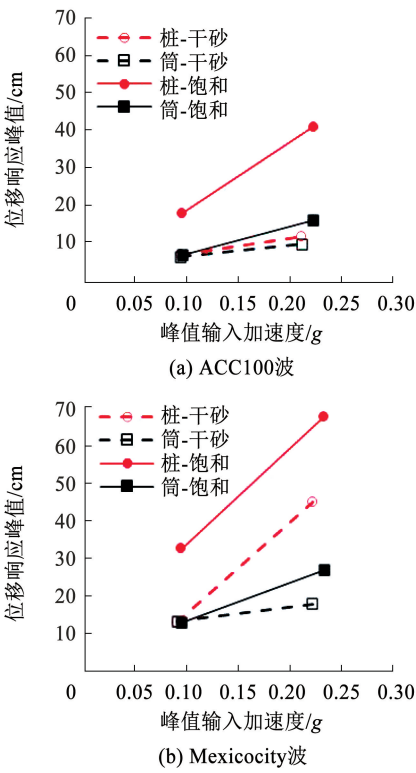


图 12 不同工况下 A_{PB} 与风机水平位移幅值的关系
Fig. 12 The relationship between A_{PB} and horizontal displacement amplitude of wind turbines in different cases

图 13、14 为 ACC100 与 Mexicocity 在强震幅输入情况下的结构水平位移时程曲线,可以看出,强震作用后单桩与复合基础上质量块均产生了自由振动,振动后结构又恢复到了平衡位置。从图 13(b)、14(b)可看出,饱和场地中单桩基础上的结构在振动后产生了明显的残余位移,而复合基础的残余位移相对较小。

3.3.3 单桩的弯矩响应

单桩基础模型上粘贴应变片可测试出振动过程中模型的应变发展,以此推算出各测点的弯矩响应。为使桩身表面更加粗糙便于粘贴应变片,在模型桩表面使用砂纸沿与圆径向呈 $\pm 45^\circ$ 的方向交叉打磨。按照图 3 所示在桩身外表面对称粘贴 8 对弯矩型应变片 (BF120-3AA),其电阻为 $(120 \pm 0.5) \Omega$,灵敏度系数为 2.08 ± 0.01 。为了保护应变片以及进行防水处理,在其表面及四周涂抹了环氧树脂。通过采用四分之一桥接法,将应变片连接于 DH3816 型应变箱上,根据式(1)通过采集到的应变片应变变化,计算得到不同深度处的桩身弯矩:

$$M = \frac{EI \times \Delta \varepsilon}{D_p} \quad (1)$$

式中: EI 为桩的抗弯刚度, $\Delta \varepsilon$ 为同一桩身深度应变片的差值。

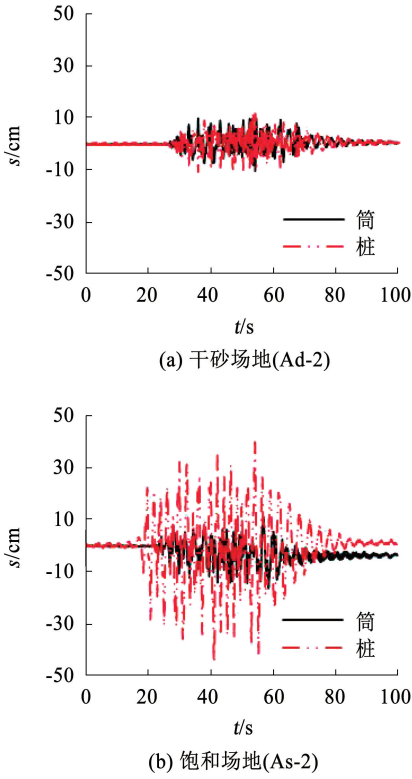


图 13 Ad-2、As-2 位移时程 (ACC100 输入波)
Fig. 13 Displacement time history of superstructure in cases Ad-2 and As-2

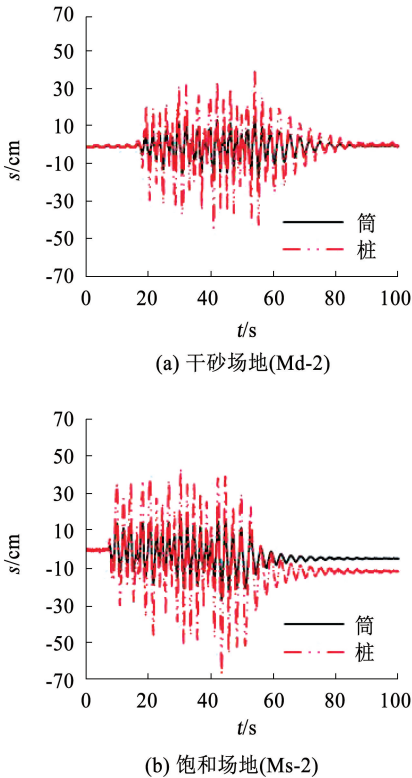


图 14 Md-2、Ms-2 位移时程 (Mexicocity 输入波)
Fig. 14 Displacement time history of superstructure in cases Md-2 and Ms-2

根据材料力学理论,杆件弯矩与应变呈线性关系,但实际模型中由于应变片方位、粘合剂厚度等因素会导致每个应变片对应的线性系数不同,因此,本次试验在常重力下吊装砝码施加静载,对应变片进行标定。将应变片按照从上到下依次编排为 Y1 ~ Y8,标定结果绘制于图 15 中,可通过标定趋势线公式对应变片所测示数开展后续弯矩换算工作。

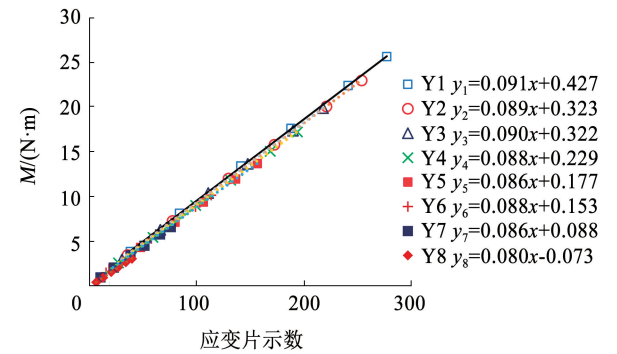


图 15 应变片示数-弯矩标定结果

Fig. 15 Calibration result of strain gauge indication-bending moment

经数据处理后,激振过程中单桩部分的弯矩响应包络线如图 16 所示,由于饱和场地试验时 Y8 应变片受损,未能有效监测到此处应变值。

总体上看,单桩基础由浅部至深层的弯矩分布呈现先迅速减小后小幅增大的趋势,反映了深层土体对桩底的嵌固作用。随地震强度的提升,桩身的整体弯矩值明显提高。两种输入波工况下的桩身弯矩变化均表明,在小震组别,干砂和饱和砂的弯矩包络线较为接近,而大震情况下饱和场地组别的弯矩响应明显大于干砂情况,尤其是在浅部桩头处,表明土体弱化使得浅部单桩基础承担了更大比例的弯矩荷载,这也解释了图 13、14 中,单桩基础上风机在饱和场地组别中展示出明显残余位移的现象。

饱和和试验组别各工况下浅部 Y1 应变片(埋深约 1 m)的峰值弯矩汇总如表 4 所示,另将 A6 传感器桩周浅部土层加速度幅值也一并记录。可以看出,不同波形、同一输入强度水平的荷载传递至浅部土层后,其加速度较为接近,但 Mexicocity 波无论小震还是大震组别中的 Y1 峰值弯矩都比 ACC100 波的情况大 40% 以上。结合风机水平加速度的分析可知,由于 Mexicocity 波卓越频率更接近风机自振频率,风机响应更剧烈,该组别中风机传递至桩体的弯矩值也更大。

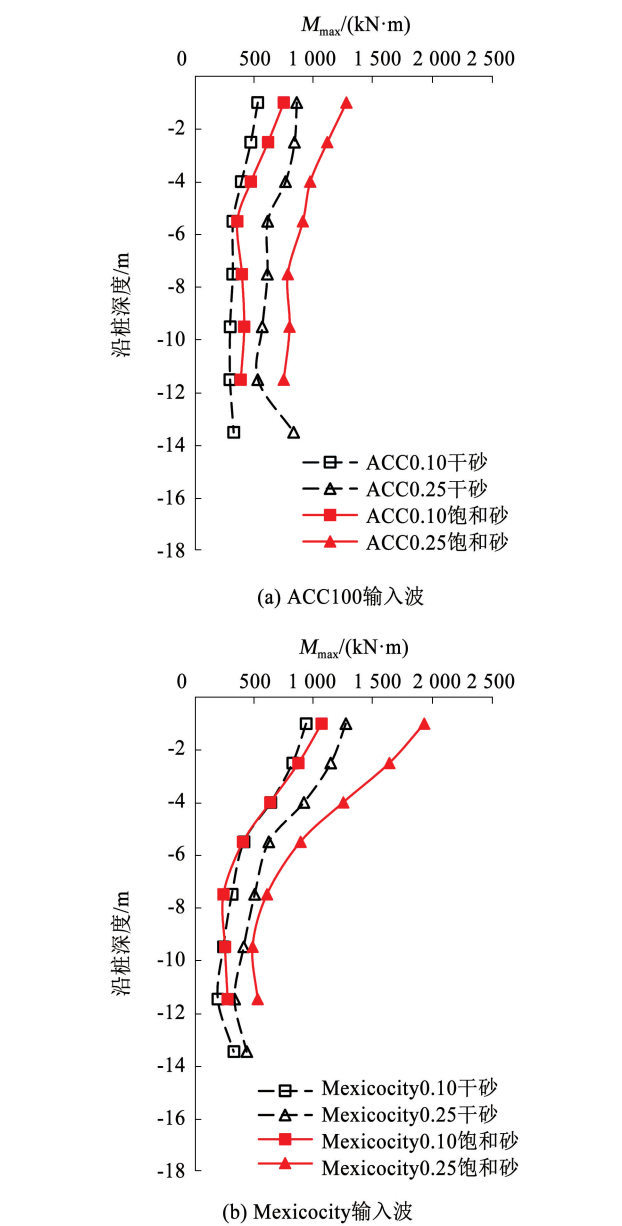


图 16 各工况下的单桩基础弯矩包络线

Fig. 16 Bending moment envelope of the monopile foundation in various cases

表 4 饱和场地各工况下 Y1 峰值弯矩
Tab. 4 Peak bending moment of Y1 in saturated site under various cases

输入波	A_{PB}/g	A6 桩周浅部加速度/ g	峰值弯矩 $M_{max}/(kN \cdot m)$
ACC100	0.094	0.078	751
	0.222	0.151	1 279
Mexicocity	0.092	0.083	1 067
	0.232	0.142	1 934

4 结 论

针对两种砂土地基中的单桩与桩-筒复合基础风机模型,通过离心振动台在 50g 的超重力环境下

施加高频成分丰富的ACC100波与卓越频率在低频段的Mexicocity波作为模型底部激励,比较两种基础在不同地震荷载作用下的动力响应。主要结论如下:

1) 饱和场地的自振频率比干砂场地下降约15%,而风机结构体系的自振频率主要由塔筒段频率决定,其受风机基础形式的影响较小。

2) 饱和场地中7 m左右深度的中部土层为超孔压累积幅度较大的易液化区域,地震波在此区域有所衰减,但到达吸力筒下浅部土层后超孔压累积情况下降,加速度幅值也相应放大。

3) 与单桩的风机响应相比,桩-筒复合基础加速度响应更大,但水平位移响应较小。饱和场地中的单桩风机在两种输入波下均有较为明显的残余位移,而复合基础对应工况观察到的残余位移值较小。

4) 单桩弯矩呈现由上至下先减小后增大的趋势,饱和地基中的弯矩响应大于干砂地基。浅部桩段承受的较大弯矩以及地基土的弱化导致饱和场地在强震作用时风机顶部观测到明显残余位移。

参考文献

- [1] HAERI S, KAVAND A, RAHMANI I, et al. Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 38: 25. DOI:10.1016/j.soildyn.2012.02.002
- [2] 张鑫磊, 王志华, 许振巍, 等. 土体液化大位移条件下群桩动力反应振动台模型试验[J]. *工程力学*, 2016, 33(5): 150. ZHANG Xinlei, WANG Zhihua, XU Zhenwei, et al. Haking table model tests on dynamic response of pile groups under liquefaction-induced large ground displacement[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(5): 150. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.09.0828
- [3] BOULANGER R, KUTTER B, CURRAS C, et al. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(9): 750. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:9(750)
- [4] ABDOUN T, DOBRY R, O'ROURKE T, et al. Pile response to lateral spreads; centrifuge modeling[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(10): 869. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:10(869)
- [5] ABDOUN T, DOBRY R, ZERVA A. Evaluation of pile foundation response to lateral spreading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(9/10/11/12): 1051. DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00130-6
- [6] BRANDENBERG S, BOULANGER R, KUTTER B, et al. Behavior of pile foundations in laterally spreading ground during centrifuge tests[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(11): 1378. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:11(1378)
- [7] 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. 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.09.017
- [8] ZHENG Xiangyun, LI Hongbin, RONG Weidong, et al. Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: an experimental study[J]. *Marine Structures*, 2015, 44: 125. DOI:10.1016/j.marstruc.2015.08.003
- [9] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1807. ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jinchao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(10): 1807
- [10] 丁红岩, 胡彩清, 张浦阳, 等. 桩-筒组合基础在单层黏土中水平承载性能分析[J]. *海洋工程*, 2014, 32(2): 30. DING Hongyan, HU Caiqing, ZHANG Puyang, et al. Analysis of horizontal bearing capacity performance of pile-bucket foundation for offshore wind turbines in single-layer clay[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(2): 30. DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2014.02.015
- [11] 朱东剑. 筒型基础与单桩相结合的新型复合风电基础研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. ZHU Dongjian. Research of a new type of foundation for offshore wind turbines with the combining of monopile foundation and bucket foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012
- [12] LI Xinyao, ZENG Xiangwu, YU Xiong, et al. Seismic response of a novel hybrid foundation for offshore wind turbine by geotechnical centrifuge modeling[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 1404. DOI: 10.1016/j.renene.2020.11.140
- [13] WANG Xuefei, ZENG Xiangwu, LI Xinyao, et al. Liquefaction characteristics of offshore wind turbine with hybrid monopile foundation via centrifuge modelling[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 2358. DOI:10.1016/j.renene.2019.07.106
- [14] 陈广思. 海上风电宽浅式筒型基础地基承载力极限分析及试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. CHEN Guangsi. Limit analysis and model test on bearing capacity of large diameter and shallow buried bucket foundation of offshore wind power turbine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014
- [15] WANG Xuyue, ZHANG Puyang, DING Hongyan, et al. Experimental study on wide-shallow composite bucket foundation for offshore wind turbine under cyclic loading[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 37(1): 1. DOI: 10.1080/1064119X.2018.1424971
- [16] 汪嘉钰, 刘润, 陈广思, 等. 海上风电宽浅式筒型基础竖向极限承载力上限解[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(3): 294. WANG Jiayu, LIU Run, CHEN Guangsi, et al. Upper bound solution limit analysis of vertical bearing capacity of shallow bucket foundation for offshore wind turbines[J]. *Acta Energaie Solaris Sinia*, 2022, 43(3): 294. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0664
- [17] MALHOTRA S. Design and construction considerations for offshore wind turbine foundations in North America[M]. *GeoFlorida*: [s. n.], 2010
- [18] DNV. Design against accidental loads[M]. [S. l.]: Det Norske Veritas AS, 2010
- [19] ZUO Haoran, BI Kaiming, HAO Hong. Using multiple tuned mass dampers to control offshore wind turbine vibrations under multiple hazards[J]. *Eng Struct*, 2017, 141: 303. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.03.006
- [20] MOULAS D, SHAFIEE M, MEHMANPARAST A. Damage analysis of ship collisions with offshore wind turbine foundations[J]. *Ocean Eng*, 2017, 143: 149. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.050
- [21] HAO Ertong, LIU Chunguang. Evaluation and comparison of anti-impact performance to offshore wind turbine foundations: monopile, tripod, and jacket[J]. *Ocean Eng*, 2017, 130: 218. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.12.008
- [22] WEI K, MYERS A T, ARWADE S R. Dynamic effects in the response of offshore wind turbines supported by jackets under wave loading[J]. *Eng Struct*, 2017, 142: 36. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.03.074
- [23] 马险峰, 孔令刚, 方薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1791. MA Xianfeng, KONG Linggang, FANG Wei, et al. Parallel tests on preparation of samples with sand pourer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(10): 1791. DOI: 10.11779/CJGE201410005
- [24] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗纲. 离心机振动台试验叠环式模型箱边界效应[J]. *北京工业大学学报*, 2008(9): 931. LIU Jingbo, LIU Xiangqing, WANG Zonggang, et al. Boundary effect of laminar model box for shaking table tests on geotechnical centrifuge system[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008(9): 931
- [25] LEE C J, WEI Y C, KUO Y C. Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2012, 34(1): 37. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.10.011
- [26] DE RISI R, BHATTACHARYA S, GODA K. Seismic performance assessment of monopile-supported offshore wind turbines using unscaled natural earthquake records[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 109: 154. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.03.015
- [27] RAHMANI A, PAK A. Dynamic behavior of pile foundations under cyclic loading in liquefiable soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 40: 114. DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.09.002

(编辑 刘 彤)