

文章编号: 1000-7598(2012)12-3833-08

导管架平台桩-土相互作用试验系统研制及应用

李志刚¹, 袁志林², 段梦兰², 钟超², 王建国², 张瑜²

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452; 2. 中国石油大学(北京)海洋油气研究中心, 北京 102249)

摘要: 海洋环境中的导管架平台承受着风浪、地震等水平荷载, 而平台的稳定对桩基础有严格要求, 故研究水平荷载下导管架平台桩-土系统变形规律和相互作用机制具有重要意义。研制了1套导管架平台桩-土相互作用试验系统, 主要由导管架平台试验模型子系统、电动伺服加载子系统、传感器与数据采集子系统、振动测试子系统组成, 可用于研究冲击荷载、静载、循环荷载下导管架平台的桩身变形规律、桩基周围土体响应及平台的振动特性。通过初步试验结果表明, 该系统能够如实反映水平荷载下桩-土间的相互作用和导管架平台的振动特性, 验证了该系统的有效性。

关键词: 水平荷载; 导管架平台; 桩-土相互作用; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Development of pile-soil interaction test system for jacket platform and its application

LI Zhi-gang¹, YUAN Zhi-lin², DUAN Meng-lan², ZHONG Chao², WANG Jian-guo², ZHANG Yu²

(1. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China;

2. Offshore Oil & Gas Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Jacket platform suffers the wind, waves, earthquake and other lateral loads; while the stability of platform has strict requirements for pile foundations. Therefore, studies of the behavior and deformation mechanism of pile foundation under lateral loads are of great significance. A new test system has been developed to simulate the response of pile foundations subjected to lateral loads. The system consists of a jacket platform test model subsystem, an electric servo loading subsystem, a sensor and data acquisition subsystem, and a vibration test subsystem. It can be used to study the deformation mechanism of pile foundations, the response of soil around pile foundations and the vibration characteristics of jacket platform subjected to lateral impact, static and cyclic loads. The test results show that the system can simulate pile-soil interaction and vibration characteristics of jacket platform effectively.

Key words: lateral loads; jacket platform; pile-soil interaction; model test

1 引言

导管架平台是近海采油平台的重要形式, 海洋环境中的导管架平台除了承受自身的重力荷载外, 还承受着风、波浪、海流、海冰、船舶撞击等各种水平荷载的作用, 由此造成的桩基础承载能力的下降对平台的安全性有重要影响。水平荷载下由于土体中累计孔隙水压力的上升而导致其抗剪强度下降的现象称为土的弱化^[1], 现役导管架平台的桩基水平承载特性的设计规范是基于 API-RP2A(American Petroleum Institute) 的 $p-y$ (土反力-桩身位移) 曲

线法^[2], 采用的是 1970 年 Matlock^[3]于塞宾和奥斯廷通过现场试验建立了水平荷载作用下软黏土 $p-y$ 曲线公式, Reese 等^[4]基于砂土中的钢管桩的试验分析与研究获得的砂土的分段 $p-y$ 曲线, 然而试验中没能综合考虑水平荷载下桩周土体的弱化性质, 不能如实反映桩-土-结构间的相互作用。故设计并建造 1 套水平荷载下导管架平台桩-土试验系统, 以深入研究水平荷载下导管架平台的桩基承载特性对现役导管架平台的安全评估具有重要意义。

近年来, 国内外学者针对水平荷载条件下桩-土-结构间的相互作用做大了工作, 建立了各种模拟

收稿日期: 2012-05-22

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划“基于振动检测的现役海洋平台结构安全评估技术研究”子课题——“海洋平台桩基弱化及其对平台响应的研究”(No. 2008AA092701-3)。

第一作者简介: 李志刚, 男, 1965 年生, 硕士学历, 总工程师, 主要从事海洋工程方面的研究工作。E-mail: lzg@mail.cooc.com.cn

通讯作者简介: 段梦兰, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋工程方面的研究工作。E-mail: mlduan@cup.edu.cn

水平荷载下桩-土相互作用的试验系统, El Naggar 等^[5-6]通过单桩动载试验研究了动荷载下桩-土间的相互作用, 建立了相应的动力 $p-y$ 曲线公式, 并对考虑桩-土相互作用的导管架平台的动力特性进行了研究, Jeanjean^[7]建立了离心机试验系统, 并结合有限元计算对水平荷载下单桩的承载特性进行分析, Chandrasekaran 等^[8], Doyle 等^[9]分别建立离心机试验系统对水平荷载下群桩的承载特性进行研究, 通过对不同排桩的承载力进行对比, 得到了对应的折减系数。国内的王建华等^[10]建立了能够对土体施加反压的桩-土试验系统, 以模拟具有残余孔压的弱化饱和砂土层, 研究了弱化饱和砂土中单桩的水平承载特性, 荣冰等^[11]为研究风力电机桩基承载特性, 建立了能够实现多种荷载同时作用的试验系统。

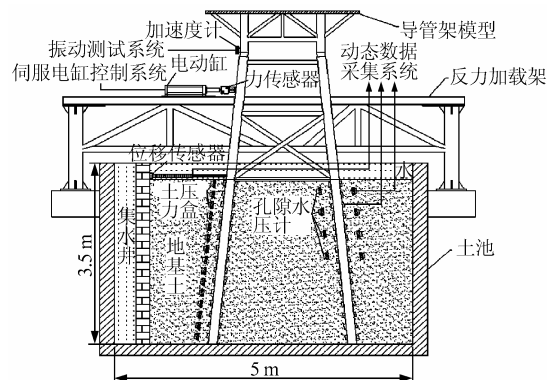
综上所述, 目前对桩基础的承载特性的研究主要为离心机试验和场地的模型试验, 但受到试验规模的限制, 试验中所采用的模型多为单桩和由单桩相互牵连构成的群桩模型, 虽然能够定性研究水平荷载下桩基础的承载特性, 但未能如实反映环境荷载作用下导管架平台桩-土-上层结构之间的相互作用及桩基土体的弱化性质, 鉴于此, 本文建立了水平荷载下导管架平台桩-土相互作用的大比例模型试验系统, 该系统以 1:10 的 JZ20-2MUQ 导管架平台为试验模型, 有针对性的研究风、波浪、冰荷载作用下导管架平台的桩基承载特性, 同时引入了振动测试系统, 以研究桩基础稳定性对导管架平台动力特性的影响, 该系统对研究现役导管架平台的安全性有重要意义。

2 导管架平台桩-土相互作用试验系统设计

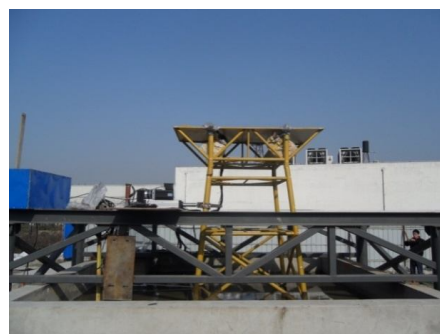
为研究环境荷载下导管架平台的桩基水平承载特性, 同时分析动荷载下桩基土体弱化对导管架平台动力特性的影响, 建立了如图 1 所示的试验系统, 该系统主要由 4 部分组成: 导管架平台试验模型系统、电动伺服加载系统、传感器与数据采集系统、振动测试系统。

2.1 导管架平台试验相似模型系统

为使模型试验能够尽可能真实地反映原型桩-土-结构间相互作用, 必须考虑模型与原型之间的物理相似性。基于 Buckingham π 定理建立的人工质量相似律和忽略重力相似律在工程模型试验中得到了广泛应用, 本文将基于 Buckingham π 定理, 主要采用量纲分析法推导试验模型的相似关系。



(a) 试验系统结构示意图



(b) 试验系统实物图

图 1 导管架平台桩-土试验系统

Fig.1 The pile-soil test system of jacket platform

本试验系统的研究目的在于: 研究循环荷载下桩基土体的弱化特性; 研究桩基弱化对导管架平台桩-土-结构系统的动力的影响。据此确定模型设计的基本原则如下:

(1) 为了较好地模拟桩-土-结构件的动力相互作用, 导管架模型的所有尺寸具有 1 个相似常数, 即正太几何相似,

(2) 通过设置人工质量 (以不影响结构的刚度为宜) 的方法近似考虑重力加速度的模拟, 以补充重力效应和惯性效应的不足, 力争结构重力不失真。

(3) 作为模拟桩基础弱化条件下导管架平台桩-土-结构动力相互作用的试验系统, 应考虑有效上覆土压力与土中动力响应孔隙水压力的相似关系。

(4) 控制施加荷载的参数, 以有效模拟风、波浪、冰荷载作用下导管架平台的桩基承载特性及结构的动力响应。

针对上述试验目的及相似设计基本准则, 采用长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 及质量 $[M]$ 作为基本量纲, 则物理现象 $[P]$ 的量纲可以表示为 $[P] = [M]^a [L]^b [T]^c$, 本试验相似模型设计所考虑的主要物理量及其量纲如表 1 所示, 物理量的控制方程为

$$f(L, \rho, E, \sigma, \omega, F, t, \omega', g, s, v, a, \sigma', u) = 0 \quad (1)$$

该物理现象包含物理参数个数 $n = 14$, 基本量纲个数 $k = 3$, 则独立的 π 的个数为 $n - k = 11$ 。由相似定理将式 (1) 写成无量纲方程:

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3 \cdots, \pi_{11}) = 0 \quad (2)$$

则任一无量纲项可表示为

$$\pi = [L]^{\alpha_1} [\rho]^{\alpha_2} [E]^{\alpha_3} [\sigma]^{\alpha_4} [\omega]^{\alpha_5} [F]^{\alpha_6} [t]^{\alpha_7} [\omega']^{\alpha_8} [g]^{\alpha_9} [s]^{\alpha_{10}} [v]^{\alpha_{11}} [a]^{\alpha_{12}} [\sigma']^{\alpha_{13}} [u]^{\alpha_{14}} \quad (3)$$

将表 1 中各量纲公式带入式 (3), 根据量纲齐次原则可得模型的相似判据及相似关系:

$$\pi = \left[\frac{E}{\rho L^2 \omega^2} \right]^{\alpha_3} \left[\frac{\sigma}{\rho L^2 \omega^2} \right]^{\alpha_4} \left[\frac{F}{\rho L^4 \omega^2} \right]^{\alpha_6} [T\omega]^{\alpha_7} [\omega]^{\alpha_8} \left[\frac{g}{L\omega^2} \right]^{\alpha_9} \left[\frac{s}{L} \right]^{\alpha_{10}} \left[\frac{v}{L\omega} \right]^{\alpha_{11}} \left[\frac{a}{L\omega^2} \right]^{\alpha_{12}} \left[\frac{\sigma'}{\rho L^2 \omega^2} \right]^{\alpha_{13}} \left[\frac{u}{\rho L^2 \omega^2} \right]^{\alpha_{14}} \quad (4)$$

根据量纲分析法得到了相似常数之间的关系式, 为解出所有相似常数, 对试验系统特性作如下分析: 整个试验过程中重力加速度 g 是不可改变的, 所以应满足 $C_g = C_a = 1$ 的条件; 试验中为考虑重力加速度 g 的近似模拟, 要求 $C_g = 1$, 则可以取质量密度的相似系数 $C_\rho = 1$ 。基于以上分析可以确定各相似常数, 如表 1 所示, 其中 C_L 为几何尺寸相似常数。

表 1 模型主要物理量及其量纲

Table 1 Dimensions and key physical parameters of model

序号	物理量	物理量纲	相似常数	1/10 模型
1	几何尺寸 L	$[L] = [L]$	C_L	0.100
2	质量密度 ρ	$[\rho] = [M][L]^{-3}$	$C_\rho = 1.0$	1.000
3	弹性模量 E	$[E] = [M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$C_E = C_L$	0.100
4	材料应力 σ	$[\sigma] = [M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$C_\sigma = C_L$	0.100
5	振动频率 ω	$[\omega] = [T]^{-1}$	$C_\omega = C_L^{-1/2}$	3.162
6	激励大小 F	$[F] = [M][L][T]^{-2}$	$C_F = C_L^3$	0.001
7	激励持时 t	$[T] = [T]$	$C_t = C_L^{1/2}$	0.316
8	激励频率 ω'	$[\omega'] = [T]^{-1}$	$C_{\omega'} = C_L^{-1/2}$	3.162
9	重力加速度 g	$[g] = [L][T]^{-2}$	$C_g = 1.0$	1.000
10	位移响应 s	$[s] = [L]$	$C_s = C_L$	0.100
11	速度响应 v	$[v] = [L][T]^{-1}$	$C_v = C_L^{1/2}$	0.316
12	加速度响应 a	$[a] = [L][T]^{-2}$	$C_a = 1.0$	1.000
13	有效土覆压力 σ'	$[\sigma'] = [M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$C_{\sigma'} = C_L$	0.100
14	孔隙水压力响应 u	$[u] = [M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$C_u = C_L$	0.100

如前文所述, 本导管架模型试验基于 Buckingham π 定理建立的人工质量相似律, 考虑对重力加速度的近似模拟, 采用文献[12]中的方法确定人工质量

为

$$m_o = C_L^3 m_p - m_m \quad (5)$$

式中: m_o 为人工质量; m_p 为结构的原型质量; m_m 为模型自身质量; $C_L^3 m_p$ 为模型的总质量, 因为质量相似常数 $C_m = C_L^3$ 。

需要说明的是, 在 $1g$ 重力场下的缩比模型试验, 由于土体为弹塑性材料, $1g$ 重力场下的小尺寸模型试验土体的应力、应变、强度特征与原型有较大不同, 之所以建立 1:10 的大比例导管架模型试验系统就是为了降低土体难以相似对试验结果的影响。目前能够实现模拟 ng 重力场的离心机模型试验应用较广, 但受离心机规模限制, 一般只能进行较小尺寸模型试验, 边界效应会引起土层边界受力和变形条件的改变^[13], 且目前国内的离心机设备较少。基于目前的研究背景, 本文建立的大比例模型系统对于研究环境荷载下导管架平台桩-土作用机制及平台的振动响应具有重要意义。

所建立的导管架平台试验模型系统主要由导管架模型、混凝土土池、反力加载架组成, 导管架为基于以上相似理论分析建立的 1:10 JZ20-2MUQ 导管架平台模型 (如图 2 所示)。根据中国船级社《海上固定平台入级与建造规范》^[14] 规定, 对桩基的处理采用沿导管架主桩腿方向延长 6 倍桩径在底端固支, 且实际平台设计报告中也仅对 28 倍桩径内的桩基横向承载特性进行分析, 故试验中选择对桩腿进行截断以简化试验, 模型建立中保守选择在 33 倍桩径处对桩腿进行截断, 导管架模型如图 3 所示, 平台高为 6 m, 桩长为 3 m, 桩径为 0.09 m, 两桩腿间最大间距为 2.36 m。

试验地基为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 的混凝土土池, 如图 1 所示, 土池四周有宽为 1 m 的混凝土基础, 并设置有 4 组高强度地脚螺栓, 以保证反力加载架的稳定性, 土池一角筑有 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的集水井, 集水井壁与地基土间设置有多组排水孔, 实现了水体的循环, 实践证明, 集水井的设置对于实现地基土体的充分饱和有重要意义。试验用地基土包括砂土和黏土, 根据研究目的不同, 合理进行地基土的填筑 (包括均质黏土、均质砂土及黏土和砂土分层填筑), 土体参数如表 2、3 所示 (其中 ε_{50} 为原状土不排水试验在 $1/2$ 最大应力时出现的应变), 地基土采用振动夯实和多次填土的方法进行填筑, 控制每次填土夯实后的土层厚度为 0.2 m, 注水充分饱和后再进行下次填土。为确保试验的准确性, 反力加载架的稳定性尤为重要, 它是由 $\Phi 245\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的无缝钢管和 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的工字钢

焊接而成的钢结构,通过数值计算验证,拟用最大荷载条件下,反力加载架的最大位移及应力均满足试验要求。



图2 JZ20-2MUQ 导管架平台
Fig.2 JZ20-2MUQ jacket platform



图3 导管架平台试验模型
Fig.3 The test model of jacket platform

表2 砂土参数
Table 2 Parameters of sand

含水率 w /%	相对 密度 D_r /%	有效 重度 γ /(kN/m ³)	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
21.1	45	19.6	33	21	0.1	20

表3 黏土参数
Table 3 Parameters of clay

含水率 w /%	有效重度 γ /(kN/m ³)	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	ϵ_{50}
27.9	18.0	51	27	11.6	17.3	0.021 7

2.2 电动伺服加载系统

为模拟环境荷载对导管架平台的作用,选用高精度伺服电动缸作为加载系统,该系统主要由伺服电动缸、驱动控制器、控制软件组成,电动缸型号为 WEC160,行程为 0.35 m,配以 13.3 kw 的意大利交流伺服电机,能提供的最大推力为 50 kN,最大速度为 0.2 m/s,能够实现 0~5 Hz 的循环加载。控制系统选用 Parker 驱动控制器(型号为 C3S300V4 F12I11T40M00),配以位移和力传感器能够实现位

移和力的控制,在此基础上笔者开发了本试验系统的控制软件,该软件能控制电动缸输出冲击荷载、静荷载、循环荷载,同时考虑冰荷载对目标平台的重要影响,根据 JZ20-2MUQ 平台锥体压力盒实测得到的冰力时程曲线^[15]编制控制程序,冰力时程曲线如图 6 所示,能够模拟导管架平台在冰荷载下的桩-土间相互作用及振动响应。



图4 伺服电动缸
Fig.4 Servo electric cylinder



图5 驱动控制器
Fig.5 Drive controller

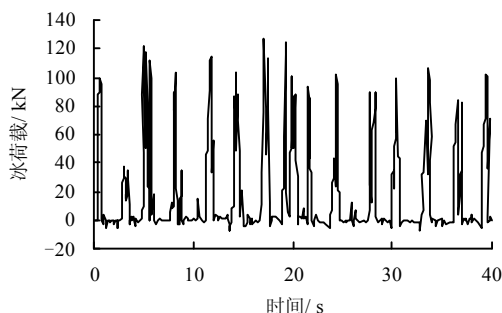


图6 实测 JZ20-2MUQ 导管架平台冰力时程曲线
Fig.6 Ice load recorded by the load panels on JZ20-2 MUQ platform

2.3 传感器与数据采集系统

导管架平台桩-土试验系统中需要的传感器包括电阻应变片、土压力盒、孔隙水压计、位移传感器,图 7 为桩身应变片和土压力盒的布置,沿桩身均匀布置 15 组电阻应变片用于测量动静荷载下的

桩身弯矩, 并封胶进行保护和防水处理, 且采用桩体内部布线的方法, 以减少电缆对桩-土间相互作用的影响。为研究水平荷载下导管架平台的承载特性, 需要测定不同深度处的 p - y 曲线, 以往研究中多采用实测桩身应变换算成桩身弯矩^[1, 16], 通过对弯矩二次微分求得桩身土抗力 p , 对弯矩进行二次积分求得桩身位移, 积分计算中产生的积分常量利用土抗力为 0 的点和位移传感器测量的桩顶位移确定。然而微分对于实测桩身弯矩非常敏感, 易产生较大误差, 故本试验系统通过沿桩身布置微型土压力盒的方法实测桩身土抗力。动荷载下土体中累积孔压的产生对桩基承载力有重要影响, 即随着桩身位移的增大, 土体中的孔隙水压力升高, 导致土体的有效强度降低, 产生桩基弱化效应, 本试验系统中在桩身前后分别布置了微型孔隙水压计, 以测量试验中桩周土体孔隙水压力的变化。所布置微型孔隙水压计和土压力盒表面与桩身外表面齐平, 均位于沿加载方向两侧, 如图 1(a)所示。以上传感器的测量数据通过 TST5915 动态信号采集仪进行采集, 该仪器能自动进行桥路的平衡和调 0, 测试速度快, 抗干扰能力强, 能够实现所有静态数据的全程记录, 如图 8 所示。试验中的传感器使用前均进行过标定, 为试验数据的准确性提供保证。



图 7 应变片及土压力盒布置

Fig.7 Strain gauges and earth pressure cell layout

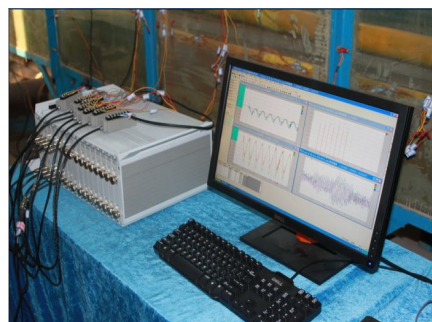
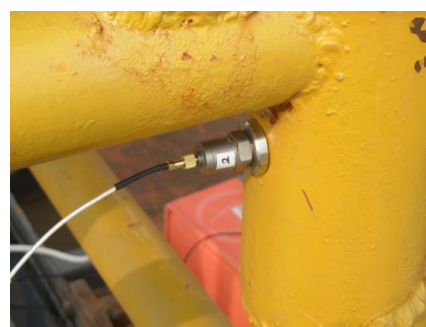


图 8 TST 系列动态信号采集仪

Fig.8 TST series of dynamic signal collection device

2.4 振动测试系统

振动测试系统包括加速度传感器、力锤、信号放大器、数据采集仪及结构模态分析软件组成, 准确测量外荷载作用下导管架平台的振动响应, 对研究环境荷载作用下桩-土-结构间的相互作用有重要意义, 本试验通过测定桩基在不同弱化状态导管架模型的振动响应, 来研究桩基础的稳定性对平台振动特性的影响。系统中选用进口的加速度传感器, 该传感器稳定性好, 安装方便, 可直接通过高强度磁头安装在测试件表面, 图 9(a)为安装在导管架节点处的加速度传感器。数据采集仪和分析软件为安正 CRAS 系列结构模态分析系统, 如图 9(b)所示。



(a) 加速度传感器



(b) 振动采集系统与分析软件

图 9 振动测试系统

Fig.9 Vibration test system

3 试验系统应用

3.1 系统有效性测试

利用本文所述试验系统已成功完成了对导管架模型的静力和循环加载试验, 本文将对试验结果进行简单说明以验证试验系统的有效性。首先对加载系统的有效性进行测试, 如图 10 所示, 设定加载系统输出振幅为 100 N, 频率为 0.1 Hz 的循环荷载, 由图可知, 荷载的幅值和频率均比较稳定, 上述测试结果表明, 本文所述试验系统加载及其控制有效, 能够满足导管架平台模型试验中荷载施加的要求。

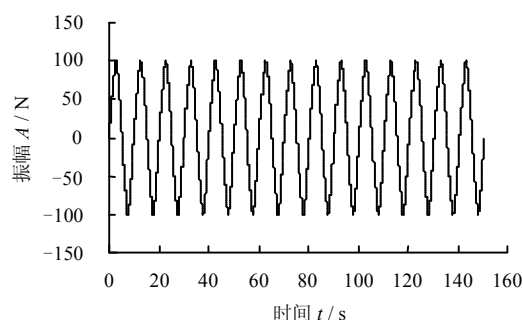


图 10 水平循环加载测试曲线

Fig.10 Curves of horizontal cyclic loading test

3.2 桩身变形分析结果

根据梁的弯曲变形与应力分析理论, 桩身任意截面处的弯矩表达式为

$$M = \frac{2EI\varepsilon}{d} \quad (6)$$

式中: M 为桩身弯矩; E 为导管架平台桩的弹性模量; I 为模型桩的截面惯性矩; ε 为实测的桩身应变; d 为桩径。

图 11 为实测的不同位移荷载下的桩身弯矩变化曲线, 由图可以看出, 随着荷载量级的增加, 桩身弯矩增大, 桩身的最大弯矩点及反弯点逐步向深处扩展, 反弯点从泥下 2 m 下降到 2.5 m 处, 即导管架平台模型受到水平荷载时, 浅层的土体由于强度低, 首先达到塑性破坏, 进而桩身挠曲不断向深处发展, 造成深处土体不断受到桩的水平向挤压, 逐渐发挥出土体的水平抗力。

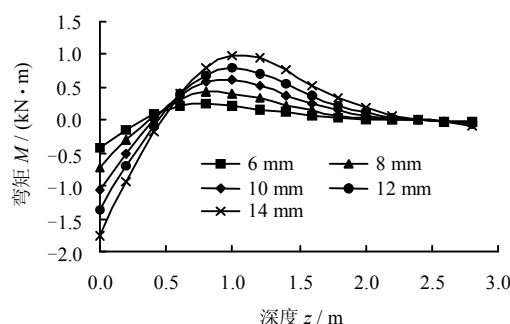


图 11 桩身弯矩变化曲线

Fig.11 Curves of bending moment of the pile

3.3 桩周土体响应分析结果

图 12 是泥下 0.6 m 处微型土压力盒实测的土抗力变化曲线, 可以看出, 随着水平荷载的施加, 桩周土体受到桩的水平向挤压逐步发挥出土体的水平抗力, 荷载较小时, 土体尚处于弹性变形阶段, 土抗力增加较明显, 随着荷载增大, 土体接近屈服状态, 土抗力的增加幅度减小, 逐渐达到土体的极限

承载力, 故试验中土压力盒测得的土抗力数据能够很好地反映土体的弹塑性性质, 满足试验要求。

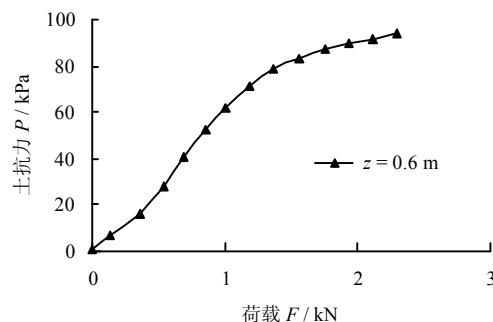


图 12 土抗力变化曲线图

Fig.12 Curves of soil pressure

循环荷载作用下, 桩周围土体受到循环应力作用, 从而使饱和土体中产生超孔隙水压力, 图 13 为泥下 0.2 m 处微型孔隙水压计测得的循环荷载下桩周土体孔隙水压力的变化曲线, 可以看出, 随着外荷载的施加, 土体中产生了明显的孔压累积, 超孔隙水压力的累积对地基土体有效强度有重要影响, 尤其是砂土地基, 超孔隙水压力的累积容易引起土体的液化, 从而对桩基础的安全性造成影响。

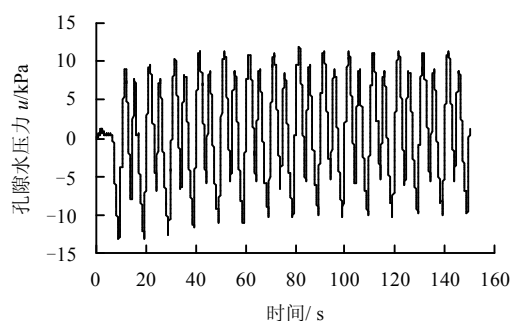


图 13 超孔隙水压力变化曲线

Fig.13 Curves of excess pore pressures

3.4 导管架模型模态分析结果

本试验通过测定桩基在不同弱化状态导管架模型的振动响应, 来研究桩基础的稳定性对平台振动特性的影响, 图 14 为土体扰动前测得的试验导管架模型一阶弯曲和一阶扭转阵型, 其一阶弯曲阵型频率为 7.613 Hz, 一阶扭转阵型频率为 9.516 Hz。通过 abaqus 有限元得到的一阶弯曲频率为 9.012 Hz, 一阶扭转阵型频率为 12.912 Hz, 而有限元计算中采用 6 倍桩径处固定, 这可能与实际导管架模型状态有一定差异, 使频率数值略高于实测结果, 所以振动测试系统能较准确测定试验模型的振动特性。

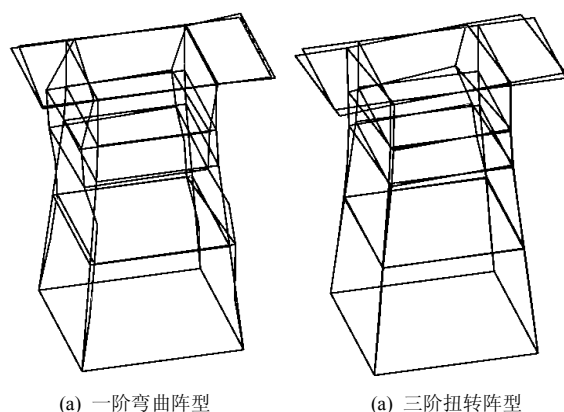


图 14 导管架模型阵型

Fig.14 Mode of jacket platform model

4 结 论

(1) 基于 Buckingham π 定理建立的人工质量相似律, 采用量纲分析法推导试验模型的相似关系, 建议应用人工质量法实现对重力加速度的近似模拟, 力争结构重力不失真。

(2) 研制的水平荷载作用下导管架平台桩-土相互作用试验系统, 创新性的采用实际平台大比例模型对导管架平台桩-土相互作用进行分析, 能够有针对性的研究风荷载、波浪荷载和冰荷载下导管架平台的桩基承载特性。

(3) 本试验系统采用伺服电动缸作为加载系统, 配以可编程控制器, 输出荷载精度高、稳定性好, 能够准确模拟不同频率和幅值的环境荷载。试验中采用电阻应变片和位移传感器测量桩基础的变形特性, 同时为避免对弯矩进行二次微分求得土抗力的误差, 采用沿桩身布置微型土压力盒的方法直接测量桩基础的水平土抗力。动荷载下超孔隙水压力的累积对桩基础的稳定性有重要影响, 故本试验系统在桩周围不同深度布置了多组微型孔隙水压计, 能够实时监测动荷载下桩周土体孔隙水压力的变化情况, 对研究动荷载下桩基弱化特性有重要意义。数据采集系统采用多通道高频率的动态数据采集系统, 能够完整记录荷载作用下桩身变形、土抗力及孔隙水压力的变化情况。

(4) 研制的试验系统中包括振动测试系统, 能够准确测量外荷载作用下导管架平台的振动响应, 对研究环境荷载作用下桩-土-结构间的相互作用有重要意义。

(5) 初步试验结果表明, 研制的导管架平台桩-土相互作用试验系统能够模拟各种环境荷载, 同时能够准确测定外荷载下桩基变形特性、桩基周围土体响应及平台的振动特性, 该试验系统的研制对研

究环境荷载下导管架平台的桩基稳定性具有重要意义, 可为现役导管架平台的安全评估提供重要依据。

参 考 文 献

- [1] 王建华, 戚春香, 余正春, 等. 弱化饱和砂土中桩的 p - y 曲线与极限抗力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 309—315.
WANG Jian-hua, QI Chun-xiang, YU Zheng-chun, et al. p - y curves and lateral resistances of piles in saturated degradation sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(3): 309—315.
- [2] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, RP2A-WSD[S]. Dallas: API, 2000.
- [3] MATLOCK H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay[C]//Proceedings of 2nd Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1970.
- [4] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Analysis of laterally loaded pile in sand[C]//Proceedings of 6th Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1974.
- [5] EL NAGGAR M H, BENTLEY K J. Dynamic analysis for laterally loaded piles and dynamic p - y curves[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(6): 1166—1183.
- [6] MOSTAFA Y E, EL NAGGAR M H. Response of fixed offshore platforms to wave and current loading including soil — structure interaction[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(4): 357—368.
- [7] JEANJEAN P. Re-Assessment of p - y Curves for soft clays from centrifuge testing and finite element modeling[C]//Proceedings of 41st Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 2009.
- [8] CHANDRASEKARAN S S, BOOMINATHAN A, DODAGOUDAR G R. Experimental investigations on the behaviour of pile groups in clay under lateral cyclic loading[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2010, 28(5): 603—617.
- [9] DOYLE E H, DEAN E R T, SHARMA J S, et al. Centrifuge model tests on anchor piles for tension leg platforms[C]//Proceedings of 36th Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 2004.
- [10] 王建华, 戚春香. 按土强度参数确定弱化砂土层水平极限抗力的探讨[J]. 天津大学学报, 2008, 41(4): 454—460.
WANG Jian-hua, QI Chun-xiang. Ultimate lateral

- resistances of degradation stratum determined based on soil strength parameter[J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(4): 454—460.
- [11] 荣冰, 张嘎, 王富强. 离心场中风力电机桩基复杂加载测试设备的研制[J]. *岩土力学*, 2011, 32(4): 1596—1600.
- RONG Bing, ZHANG Ga, WANG Fu-qiang. Complicated loading device for pile foundation of wind-driven generator in centrifugal field[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(4): 1596—1600.
- [12] 凌贤长, 王臣, 王成. 液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用振动台试验模型相似设计方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 450—456.
- LING Xian-chang, WANG Chen, WANG Cheng. Scale modeling method of shaking table test of dynamic interaction of pile-soil-bridge structure ground of soil liquefaction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 450—456.
- [13] 姚燕明, 周顺华, 李尧臣. 离心模型试验边界效应分析[J]. *力学季刊*, 2004, 25(2): 291—296.
- YAO Yan-ming, ZHOU Shun-hua, LI Yao-chen. Boundary effect analysis of centrifuge test[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2004, 25(2): 291—296.
- [14] 中国船级社. 海上固定平台入级与建造规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1992.
- [15] 屈衍. 基于现场实验的海洋结构随机冰荷载分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [16] 王腾, 王天霖. 粉土 p - y 曲线的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1343—1346.
- WANG Teng, WANG Tian-lin. Experimental research on silt p - y curves[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1343—1346.

第十一届全国桩基工程学术会议（一号通知 征文）

2013 年 10 月 16 日—18 日 江苏 宜兴

主办单位

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会

中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会

江苏省土木工程学会

承办单位

宜兴市建设局; 建基建设集团有限公司; 浙江理工大学

会议主题

理论与试验研究; 桩基工程设计研究与实践; 桩基施工技术与质量控制; 高铁、路桥、码头工程中的桩基技术; 特殊岩土中的桩基工程; 撞击工程事故处理与典型案例; 桩基检测与桩基风险评估; 桩基工程技术标准有关问题

论文格式要求

1. 论文字数一般不要超过 6000 字（含图表公式）。论文经评审择优后，将在《岩土工程学报》2013 年增刊上发表，来稿请严格按《岩土工程学报》格式排版。

2. 寄两份打印稿和一份电子文本，论文中请务必注明详细通讯地址、邮编、联系电话及 Email 地址。

重要日期

2013 年 5 月 15 日前 提交论文全文（以当地邮戳为准）

2013 年 5 月 31 日前 通知作者是否录用

2013 年 6 月 15 日前 提交修改后的论文

2013 年 10 月 16-18 日 会议召开

联系方法

论文投稿及相关事宜请联系：

中国建筑科学研究院地基所 李大展

（信封或邮件上注明“第十一届全国桩基工程学术会议”字样）

地址：北京市北三环东路 30 号 邮编：100013

联系电话：010-64517585

传真：010-84283086

电子邮箱：lidazhan22@163.com