

海上风机支撑结构动力特性模型试验研究^①

余璐庆^{1,2}, 王立忠¹, BHATTACHARYA Subhamoy³, 国振¹, 李玲玲¹, 邢月龙²

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;

2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310012;

3. University of Surrey, Department of Civil Engineering, Guildford, Surrey GU2 7XH, UK)

摘要:海上风机是一种高柔性海洋结构物,其支撑结构动力响应受风、浪、流等环境因素,风机荷载及基础刚度的影响异常敏感。本文在结构动力特性试验平台上,建立了以基础—塔架—顶部集中质量为一体的风机简化分析模型,并利用新型循环加载装置,在砂土中开展了4组针对风机模型长期动力特性变化规律的试验。主要研究在一定的加载频率下,支撑结构一阶自振频率在不同幅值的循环荷载作用下的变化规律,并从土体力学行为特性及循环荷载下土颗粒运移规律角度对试验现象进行分析。通过该模型试验所获得的结论,并基于一系列的相似性准则,在一定程度上可以揭示长期循环荷载下,海上风机支撑结构动力特性的变化规律,并对今后实际工程中有关基础选型及支撑结构设计上给出了相关建议。

关键词:海上风机;模型试验;相似性;长期动力特性;循环荷载

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0797-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0797

Scaled Model Test Study of the Dynamic Behavior of an Offshore Wind Turbine Support Structure

YU Lu-qing^{1,2}, WANG Li-zhong¹, BHATTACHARYA Subhamoy³,
GUO Zhen¹, LI Ling-ling¹, XING Yue-long²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 2. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou, Zhejiang 310012, China;

3. University of Surrey, Department of Civil Engineering, Guildford, Surrey GU2 7XH, UK)

Abstract: Offshore wind is a safe, clean, and stable source of renewable energy, which is a strategic option for overcoming the problems of energy shortage and environment contamination. Because of their high, slender, and flexible nature, accompanied with mass and stiffness distribution, offshore wind turbines are dynamically sensitive structures in which their dynamic behavior is strongly affected by environmental loading and the stiffness of their foundations. The first natural frequencies of these structures are very close to the forcing frequencies imposed by the environment and the onboard machinery. Changes in the foundation stiffness under cyclic loading will ultimately result in changes to the natural frequency of the structure. However, little is known about the long-term dynamic behavior of the entire offshore wind turbine structure. Therefore, the design of foundations and prediction of long term performance remain challenging. In the design work of offshore wind turbines, the soft-stiff type is usually chosen under general circumstances

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51325901); 国家自然科学基金青年科学基金(51109184, 51209183)

作者简介: 余璐庆(1986—), 男, 博士, 工程师, 主要从事海洋岩土工程方面研究. E-mail: yuluqingcugb@126.com

通讯作者: 王立忠(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋岩土工程方面的研究. E-mail: wlzju@163.com

in which the natural frequency is between 1P and 3P bands. This study establishes a simplified wind turbine model based on the dynamic model test platform at the University of Surrey. The model system includes a foundation, tower, and top mass. On the basis of the novel cyclic loading provide system, four groups of tests were conducted to study the long-term dynamic behavior of a wind turbine model supported on a pile foundation. This investigation focused on changes of the model turbine's first natural frequency and studied the influence from the amplitude of cyclic loading. For the observed tests results, detailed analysis was performed on the basis of soil behavior and its migration pattern. The test results and a series of similitude relationships reveal the dynamic behavior of an wind turbine structure. Moreover, suggestions for foundation and structure selection for a prototype wind turbine are given.

Key words: offshore wind turbine; model test; similitude; long-term dynamic behavior; cyclic loading

0 引言

海上风能作为一种安全、清洁的可再生能源,是缓解当前能源短缺、解决环境污染问题的战略选择。我国具有漫长的海岸线,海上风能储量大,开发前景好。但与欧洲风电强国相比,由于国内开发海上风电起步较晚,各项技术还不成熟^[1]。基础结构的安全、稳定是风机正常运行的保证,且基础造价所占比重较大。因此,如针对当前 20~30 m 水深条件下的海上风机所采用的大直径单桩、吸力桶等基础形式,国内外学者就其在水平循环荷载作用下的性状开展了大量理论与试验研究^[2-6]。但迄今为止,却鲜有关于以风机支撑结构、基础和地基为一体的整体结构动力特性方面的研究。

如图 1 所示,一座 3.5 MW 海上风机在正常运行工况下叶片转动速率大约为 6.9~12.1 RPM (Round Per Minute), 1P 荷载频率为 0.115~0.2 Hz;对于三叶片风机,由于叶片转动对塔架“遮蔽效应”,所产生的 3P 荷载频率为 0.345~0.6 Hz^[7]。

图 1 还给出了北海环境下典型的风和波浪频谱图,从中可见波浪的峰值频率为 0.1 Hz。对于目前海上风机设计中所主要参考的 DNV^[8] 规范,又在 1P 及 3P 频率带基础上提出了风机结构设计时应预留出的±10%的安全度。因此,在风机支撑结构设计中,为了避免其自振频率落到这些荷载的频率带内而发生共振危险,可供选择的安全频率范围非常有限。目前从结构安全与经济角度出发,一般选择“刚-柔(soft-stiff)”性(支撑结构设计自振频率介于 1P 与 3P 频率带之间)的设计目标(图 1)。

海上风机是一种自身动力特性受基础刚度变化非常敏感的高、柔性结构物。在其 20~25 年的设计使用周期内,大约要经历 107~108 次上部循环荷载

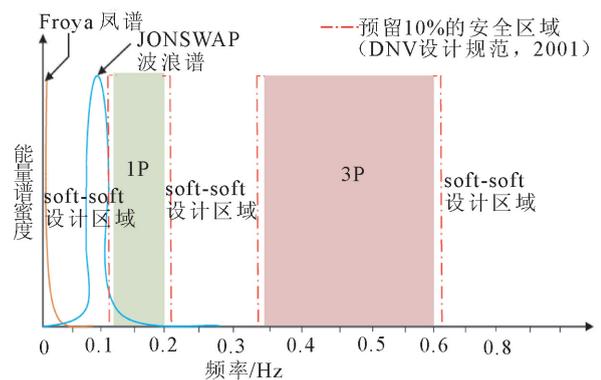


图 1 典型风浪频谱图及 1P、3P 频率带

Fig.1 Typical spectrum of wind, wave, 1P and 3P

作用^[7]。基础刚度在循环荷载下将发生变化,而目前就基础刚度变化对支撑结构动力特性的影响规律还缺少相应的研究。据相关研究报道,荷兰 Lely 风电场在建成运行 6 年后,部分风机结构自振频率已由初始设计值的 0.41 Hz 增大到了 0.63 Hz^[9]。另外,据英国的 Hornsea 风电场实测资料显示,运行 3 个月后风机结构的自振频率已由初始的 1.23 Hz 降到了 1.13 Hz^[10]。风机结构自振频率的变化势必对其造成严重的安全隐患。因此,研究长期循环荷载下风机支撑结构动力特性变化规律是当前大力发展海上风机背景下亟待解决的一项艰巨任务。

针对海上风机支撑结构动力特性,本文利用英国 Surrey 大学结构动力特性试验平台,开展了砂土中以基础、塔架和顶部集中质量为一体的风机整体结构在长期循环荷载下的动力特性试验研究,主要研究了在一定的循环加载频率下,支撑结构自振频率随循环加载次数及荷载幅值的变化趋势。并从土体基本力学行为及循环荷载下桩周砂土运移规律出发,对试验中观察到的结果给出了机理性的解释。

通过本文模型试验结果,并基于一定的相似性理论,对实际海上风机基础选型及支撑结构设计具有一定的指导意义。

1 整体动力特性研究装置

1.1 相似性理论

室内模型试验的最终目标是要指导实际工程设计,所以应保证在小比尺模型试验下得到的结果按照一定的比尺关系能体现到原型中。无论是模型还是原型,每一个物理过程都可用无量纲化的式子表示。因此在模型试验前首先介绍 Bhattacharya 等^[11]提出的一系列无量纲化相似性准则。在推导和引入无量纲化相似性关系时,主要基于以下几方面考虑:

(1) 将风机整体简化为基础(M1)、塔架(M2)和顶部集中质量(M3)三部分,在模型试验中为确保与原型结构在动力荷载下基础性状、基础周围土体排水状况和支撑结构动力特性的一致性,应满足相应的几何与质量比尺的相似。

(2) 从控制基础刚度变化的周围土体应变场的相似性确定加载幅值。

(3) 从基础周围土体的排水条件、加载频率与结构自振频率之比所应满足的关系确定循环加载频率。

据此,确定本模型试验中的无量纲相似性关系(表 1)^[11]。

表 1 无量纲相似性关系

Table 1 Non-dimensional similarity relationships

物理意义	无量纲相似性关系	备注
几何相似	h/D L/D	h, D 分别为基础高度和直径; L 为塔架高度; H 为加载幅值; G 为土剪切模量; f 和 $f_{n-initial}$ 为加载频率和结构自振频率; $M=Hy$ (y 为加载高度)
质量相似	$M1 : M2 : M3$	
与土体应变场有关	H/GD^2	
考虑加载高度影响	M/GD^3	
加载频率的相似	$f/f_{n-initial}$	

1.2 新型循环加载装置

若考虑通过传统激振器提供循环加载,则需利用刚性杆连接激振器和模型塔架。由于本试验中,每隔一定时间需断开连接杆测试支撑结构自振频率,所以传统循环加载装置存在着操作繁琐和对土体扰动的问题。因此本文引入了新型循环加载装置,该装置原理简单、操作方便、制作成本低,并能输出满足本试验要求的循环荷载波形。如图 2 所示,该循环加载装置的基本原理是利用质点 m 沿着半

径为 r 的圆弧做角频率为 ω 的匀速圆周运动时,将产生一个大小为 $F_n = m r \omega^2$ 的离心力。

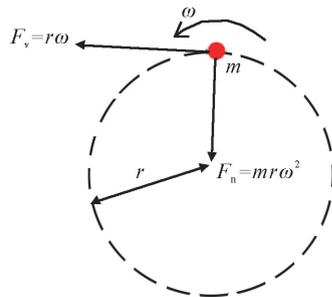
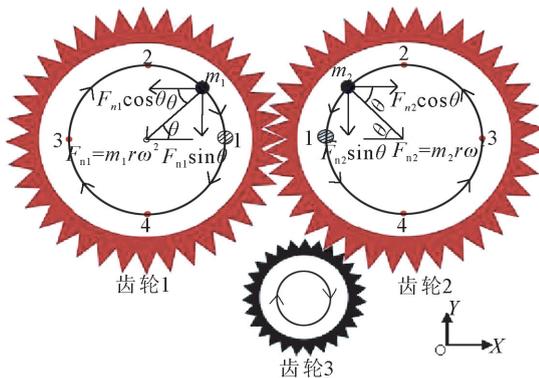
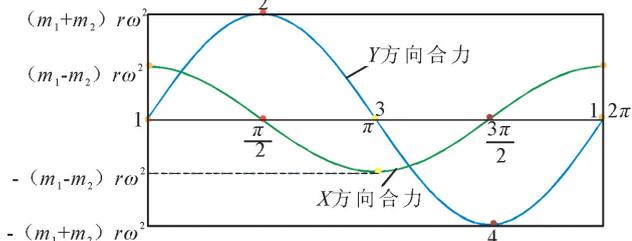


图 2 质点做圆周运动示意图

Fig.2 Sketch of the circular motion of a mass point



(a) 受力分析图



(b) 离心力随旋转角度关系

图 3 齿轮系统受力和离心力随旋转角度关系图

Fig.3 Analysis graphics and relation between centripetal of gear system

据此,在图 3(a)所示的由三个相互咬合的齿轮组成的转动系统里,当小齿轮由马达驱动以一定速率顺时针方向旋转时,将会带动左右两个大齿轮各自向不同方向旋转。假设初始时刻在大齿轮的位置 1 处各有一个质量分别为 m_1 和 m_2 的质点(忽略齿轮本身质量),则左右质点随齿轮旋转时将会对圆心分别产生一个大小为 $F_{n1} = m_1 r \omega^2$ 和 $F_{n2} = m_2 r \omega^2$ 的离心力。当左右质点在整个旋转过程中的位置保持对称时,从图 3(a)的受力分解图中可见离心力沿 X 和 Y 方向分解后,将会对整个齿轮系统产生一个

相互正交且大小分别为 F_X 和 F_Y 的合力,图 3(b)给出了沿 X 和 Y 方向的合力随旋转角 θ 的形态图。

$$F_X = (m_1 - m_2) r \omega^2 \cos\theta \quad (1)$$

$$F_Y = (m_1 + m_2) r \omega^2 \sin\theta \quad (2)$$

根据上述原理最终设计出新型循环加载装置(图 4(a))。将该齿轮系统固定在风机模型塔架上一定高度,通过调整质量 m_1 、 m_2 和图 4(b)中马达驱动装置的输出电压 U 来得到不同幅值和频率的简谐荷载。而在试验前通过测速计校核出的输出电压 U 与加载频率 f 间满足。

$$f = 1.959 \cdot U \quad (3)$$

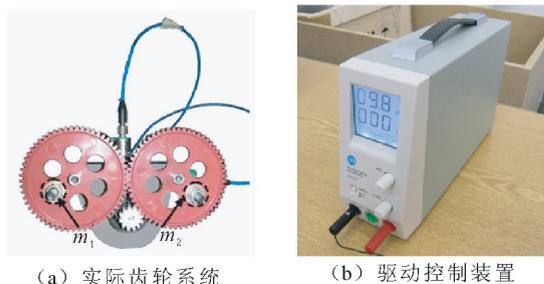


图 4 新型循环加载装置

Fig.4 The new cyclic loading device

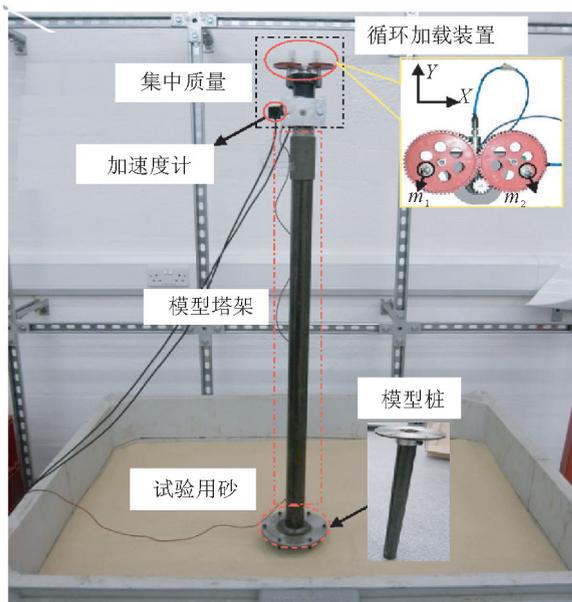


图 5 单桩基础支撑的模型装置结构图

Fig.5 Model turbine supported by single pile foundation

1.3 试验流程与数据采集、分析

根据上述介绍的相似性原理及新型循环加载装置,本文模型试验装置如图 5 所示。结合图 6 的试验流程图,整个模型试验的步骤及相应数据采集与分析工作可概括为:

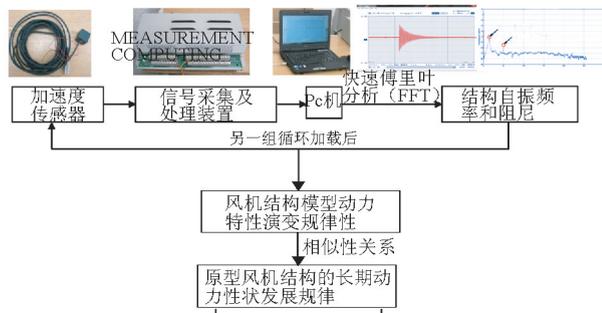


图 6 数据采集与分析流程

Fig.6 The process of data acquisition and analysis

(a) 循环加载前,通过塔顶加速度计采集结构自由振动阶段加速度信号,并通过快速傅里叶变换(FFT)将其转化到频域内相应的功率谱密度函数。功率谱密度曲线的前两个峰值即对应结构的前两阶自振频率。

(b) 调整图 4 中的输出电压 U 及质量 m_1 和 m_2 ,对结构施加特定频率和幅值的循环荷载。当加载次数达 N_1 时,暂停对结构的循环加载,并采用与上述相同的方法测试此时结构的自振频率。

(c) 重启循环加载装置,进行下一轮的加载并重复上述操作步骤,直到总的加载次数 $N(N = N_1 + N_2 + \dots + N_n)$ 达到试验所需的量级为止(本试验中 N 控制在 $10^5 \sim 10^6$ 量级)。

(d) 通过上述步骤即可得到结构自振频率随循环加载次数的变化规律,并研究循环荷载特性(如荷载幅值、加载频率、方式和次数等因素)对结构自振频率的影响规律。

表 2 单桩支撑的模型结构各部分尺寸

Table 2 Detailed parameters of the model turbine supported by single pile

部位	长度(L, h)/cm	直径 D /cm	壁厚 th /mm	质量/kg
模型桩	45.0	4.3	2.0	3.3
模型塔架	100	4.3	2.0	2.2
顶部质量块	—	—	—	1.76

2 模型试验方案及结果分析

2.1 模型试验方案

为研究单桩支撑的模型结构在循环荷载下的动力特性变化规律,本文在图 5 所示的 $115 \text{ cm} \times 95 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)模型箱内用硅质细砂开展了 4 组模型试验。表 2、表 3 分别给出了模型结构各部分几何尺寸和所用砂土的基本物理力学参数指标,各组试验循环加载具体方案在表 4 中给出。由于在循环加载中始终保持齿轮系统上的质量点满足

$m_1 = m_2$, 故输出的荷载波形为沿 Y 单一方向的循环荷载。

表 3 试验用土基本物理力学参数

Table 3 Basic physical and mechanics parameters of the sand used in tests

物理量	数值
比重 G_s	2.65
中值粒径 D_{50}/mm	0.144
内摩擦角/ $^\circ$	36.0
最大孔隙比 e_{\max}	1.035
最小孔隙比 e_{\min}	0.608
剪切模量 G/MPa	10.0
相对密实度 D_r	0.63

表 4 循环加载试验方案

Table 4 Cyclic loading test program

试验编号	加载类型	$f/f_{n\text{-initial}}$	H/GD^2	加载次数
MT-1	单向循环	1.302	2.43×10^{-5}	185 432
MT-2	单向循环	1.302	1.798×10^{-4}	114 336
MT-3	单向循环	1.302	1.876×10^{-4}	157 212
MT-4	单向循环	1.302	1.945×10^{-4}	196 515

针对表 1 所列的无量纲关系式,表 5 整理了模型试验与原型间相应无量纲值的对比。从表中可见本文模型试验几何和质量比尺和原型基本一致。但由于表 5 中计算实际海上风机无量纲值(H/GD^2)时,所用水平荷载幅值 H 为其运行工况下所受的最大总水平力,故所得到的无量纲值比本文模型试验中大,但本文模型试验中的无量纲值(H/GD^2)与 Lombardi 等^[12]所开展的试验中该值基本一致。在表 5 中通过无量纲式 M/GD^3 ($M = H \cdot L$, H 为循环荷载幅值; L 为模型塔架高度)反映了模型试验中循环加载高度的相似性。而反映加载频率 f 动力效应并与支撑结构的疲劳寿命有关的无量纲值($f_n/f_{n\text{-initial}}$)也与原型一致。因此通过本文模型试验所得到的结论具有一定实际工程应用的价值。

2.2 模型试验结果及分析

图 7 给出了试验 MT-1 至 MT-4 中,支撑结构自振频率与其初始值之比随循环加载次数的关系。

在这 4 组试验中,结构经历了大约 10^5 次量级的循环加载作用。从表 4 可见,除试验 MT-1 外,其余 3 组试验中反映桩周土体应变水平的无量纲值(H/GD^2)大体处于同一量级(10^{-4})。从图中 4 条曲线的变化中可见,在试验 MT-1 中,随着循环加载的进行,支撑结构自振频率基本维持在初始值附近不变;而在试验 MT-2 至 MT-4 中,结构自振频率与其初始值之比($f_n/f_{n\text{-initial}}$)随加载次数的变化趋势基本一致,表现为随着循环加载的进行结构自振频率也随着不断增大,但增大到一定程度后又有一个短暂的平稳阶段,过了该阶段,随着循环荷载的继续施加结构自振频率又出现了一定程度的下降。此外,从图中还可明显看出,随着循环荷载幅值(H)的增大结构自振频率的增幅也在增大。

本文认为,对于试验所用的中等密实度的砂($D_r = 0.63$),在循环剪切作用下,随着土体孔隙比的减小砂土相对密实度不断提高,引起基础刚度的增大,进而导致支撑结构自振频率的稳步提高。当砂土达到最大密实度后继续剪切则会出现剪胀现象,因此,在图中表现出当结构达到最大自振频率后,随着循环剪切的继续进行,又会出现不同程度的跌落。

从循环荷载下桩周砂土运移规律考虑,土颗粒一方面将进行空间相对位置的调整和小范围内的有序迁移,引起桩周砂土孔隙体积的减小,使得相对密实度增大,并导致基础刚度变大;另一方面,土颗粒将会在桩—土界面摩擦力作用下,发生一种向更大范围的有序迁移和物质流动现象,造成桩周局部区域范围内的土颗粒损失。在试验 MT-3 中则表现出如图 8 所示现象,随着循环加载的进行,桩周会出现漏斗形凹陷面,且形态随循环加载次数的增大而有所发展。桩周土体凹陷面的形成和发展,一方面使得土体对桩所能提供的约束减小,另一方面则会引起桩周同一深度土中竖向有效应力的降低,这些因素均促成了循环加载后期所观察到的支撑结构自振频率有所下降的趋势。相关学者针对北海实际条件

表 5 模型试验与原型间的无量纲关系比较

Table 5 Comparison of the non-dimensional values between model and prototype

无量纲式	本文模型试验	其他学者试验 ^[12]	现场原型 ^[12]
h/D	10.5	22.7	4.1~7.9
L/D	23.3	45.5	14.0~23.4
$M1 : M2 : M3$	1.9 : 1.3 : 1.0	21.8 : 6.6 : 1.0	(1.3~2.8) : 1.2 : 1.0
H/GD^2	$(0.24 \sim 1.94) \times 10^{-4}$	$(2.0 \sim 34) \times 10^{-4}$	$(7.7 \sim 45) \times 10^{-4}$
M/GD^3	$(0.57 \sim 4.57) \times 10^{-3}$	$(9.1 \sim 155) \times 10^{-3}$	$(14.3 \sim 96) \times 10^{-3}$
$f/f_{n\text{-initial}}$	1.3	0.5~0.8	0.09~2.37

下所报道的类似现象,在室内模型试验中,通过桩周铺洒彩色砂的方法,更系统、全面地研究了水平循环荷载作用下桩周砂土的运移规律^[13]。

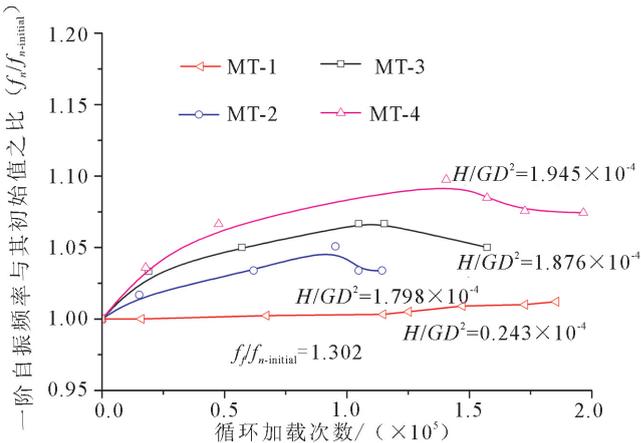


图7 结构自振频率随循环加载次数关系

Fig.7 Change of natural frequency with number of cycles

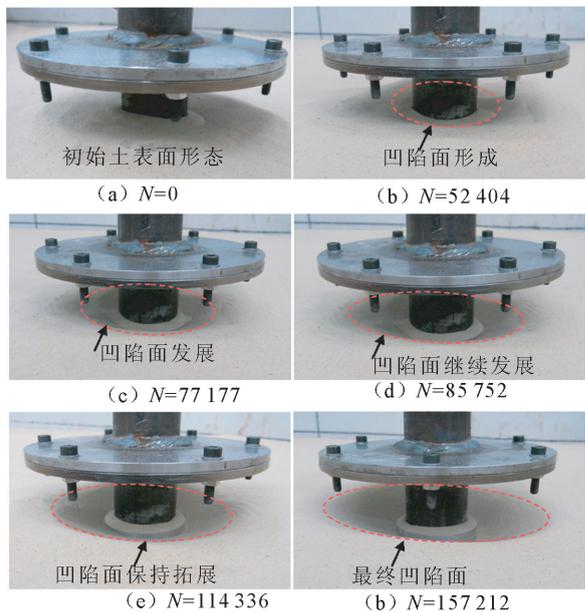


图8 桩周土形态随循环加载变化过程

Fig.8 Change of soil around the pile during the cyclic loading

从本质上说,支撑结构自振频率的增大是由桩周土体在循环荷载下的应变累积所造成的,而土体应变累积速率随荷载幅值的增大而增大^[14]。故在图7中表现出支撑结构自振频率增长的速率及幅度随着反映桩周土体应变水平的无量纲值(H/GD^2)的增大而增大。

图9为其他学者通过共振柱试验得到的在不同应变水平下,砂土剪切模量随循环加载次数关系曲线^[15]。从图中可见,当土体应变水平较小时(如 γ_c

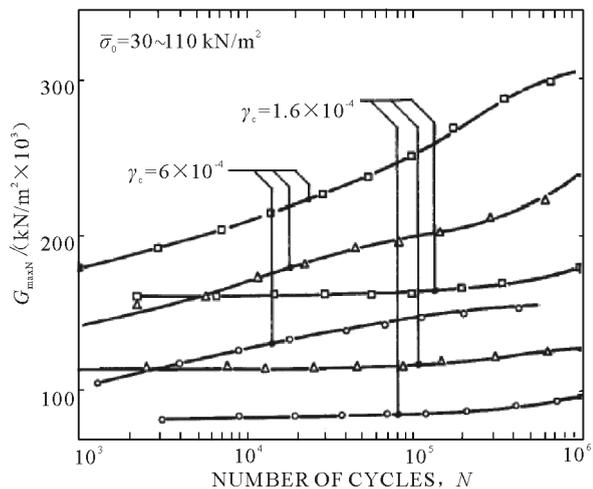


图9 不同应变水平下砂土剪切模量随加载次数关系^[15]

Fig.9 The relation between shear modulus and number of cycles under different strain level

$=1.6 \times 10^{-4}$),其剪切模量随循环加载次数变化并不明显;而当土体应变水平达某一值后(如 $\gamma_c = 6 \times 10^{-4}$),其剪切模量随循环加载进行而不断增大。结合图7所示试验现象可知,当反映桩周土体应变水平的无量纲值(H/GD^2)较小时,结构自振频率随循环加载变化并不明显(试验MT-1);而当(H/GD^2)超过一定值后,结构自振频率随循环加载的进行而不断变大,并且频率增长的速率和幅度随着(H/GD^2)的增大而增长(试验MT-2、MT-3和MT-4)。因此从传统土单元试验结果也很好解释了本文模型试验中所观察到的现象。

2.3 实际工程的建议

根据上述试验结果及本文模型试验所遵循的无量纲化相似性关系,从实际工程设计角度考虑:当海上风机所在场地为应变硬化型土体时(如砂性土),对于“刚—柔”性的支撑结构设计方案,为避免结构自振频率接近于风机荷载频率带而发生共振危险,一方面宜将支撑结构的设计频率靠近1P频率带上限区域(见图1);另一方面,在同等条件下选择较大直径的桩基础可以降低桩周土中的应变水平(H/GD^2),减小循环荷载作用下结构自振频率变化幅度,确保整体结构的安全、稳定性。

3 结语

(1) 针对传统循环加载装置的缺陷,本文发展了一种新型循环荷载施加系统。该装置原理简单、操作方便、制作成本低,且能输出满足试验要求的稳

定简谐荷载波形。

(2) 砂土中由单桩支撑的简化风机模型,结构一阶自振频率随循环加载的进行而稳步增长,加载后期结构频率值趋于稳定并出现一定程度降低。在某一加载频率下结构自振频率的增速及增幅随着荷载幅值的增大而提高。

(3) 本文认为,风机模型支撑结构自振频率的提高,是由桩周砂土在循环荷载下相对密实度的变大而引起基础刚度的增大所造成的。砂土达到最大密实度后的剪胀,土颗粒的运移引起桩周局部范围内的物质流失,使得支承桩体的土体约束减小及桩周竖向有效应力的降低,造成了后期结构自振频率的下降。

参考文献(References)

- [1] 林毅峰,李健英,沈达,等.东海大桥海上风电场风机地基基础特性及设计[J].上海电力,2007(2):153-157.
LIN Yi-feng, LI Jian-ying, SHEN Da, et al. Structure Characteristics and Design Technique Keys of Wind Turbine Foundation in Shanghai Donghai-bridge Offshore Wind Farm [J]. Shanghai Power, 2007(2):153-157. (in Chinese)
- [2] 周健,张刚,曾庆友.主动侧向受荷桩模型试验与颗粒流数值模拟研究[J].岩土工程学报,2007,29(5):650-656.
ZHOU Jian, ZHANG Gang, ZENG Qing-you. Model Tests and PFC Numerical Analysis of Active Laterally Loaded Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5):650-656. (in Chinese)
- [3] Houslyby G T, Ibsen L B, Byrne B W. Suction Caissons for Wind Turbines [C]. Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG, 2005, Perth:75-93.
- [4] Leblanc C, Byrne B W, Houslyby G T. Response of Stiff Piles in Sand to Long Term Cyclic Loading [J]. Geotechnique, 2010, 60(2):79-90.
- [5] Kuo Y S, Achmus M, Raham K A. Minimum Embedded Length of cyclic Horizontally Loaded Monopoles [J]. Journal of

Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(3):357-363.

- [6] 闫澍旺,霍知亮,孙立强,等.海上风电机组筒型基础工作及承载特性研究[J].岩土力学,2013,34(7):2036-2042.
YAN Shu-wang, HUO Zhi-liang, SUN Li-qiang, et al. Study of Working Mechanism and Bearing Capacity of Bucket Foundation for Offshore Wind Turbine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7):2036-2042. (in Chinese)
- [7] Bhattacharya S, Cox J, Lombardl D, et al. Dynamics of Offshore Wind Turbines Supported on Two Foundations [J]. Geotechnical Engineering, 2012, 165(GE1):1-11.
- [8] Det Norske Veritas. Offshore Standard; Design of Offshore Wind Turbine Structures. DNV-OS-J101 [S]. Hovek, Norway, 2007.
- [9] Zaaier M B. Foundation Modeling to Assess Dynamic Behavior of Offshore Wind Turbines [J]. Applied Ocean Research, 2006, 28:45-57.
- [10] Lowe J A. Demonstration of the 'Twisted Jacket' Design, SmartWind, <http://www.smartwind.co.uk/>, 2012.
- [11] Bhattacharya S, Lombardl D, Wood D M. Similitude Relationships for Physical Modelling of Monopile-supported Offshore Wind Turbines [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2011, 11(2):28-68.
- [12] Lombardl D, Bhattacharya S, Wood M. Dynamic Soil-structure Interaction of Monopile Supported Wind Turbines in Cohesive Soil [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49:165-180.
- [13] Cuellar P, Baebler M, Rucker W. Ratcheting Convective Cells of Sand Grains Around Offshore Pils Under Cyclic Lateral Loads [J]. Granular Matter, 2009, 11(6):379-390.
- [14] Christian K. Modelling of Strain Accumulation Due to Low Level Vibrations in Granular Soils [D]. Gent, Belgium: Ghent University, 2007.
- [15] Drnevich, V P, Hall, J R, Richart, F E. Effects of Amplitude of Vibration on the Shear Modulus of Sand [C] // Proceedings of International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Mat Albuquerque, 1967: 189-199.