

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.03.012

海上风力发电机桶形基础 竖向初始动阻抗影响因素分析

林捷^{1,2}, 贺瑞^{1,2}, 郑金海^{1,2}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用 ABAQUS 大型通用有限元软件, 建立弹性半空间中的海上风力发电机桶形基础(简称桶基)有限元模型。将数值解与已有解析解对比, 验证桶基数值模型的准确性。并研究不同因素对桶基竖向初始动阻抗的影响, 以及桶基与桶壁壳基础初始动阻抗的关系。结果表明, 桶基长径比、桶基厚径比、土体泊松比、土体剪切模量、土体非均匀性对初始动阻抗影响明显, 桶基材料对初始动阻抗影响不大; 桶基和桶壁壳基础初始动阻抗基本重合, 桶基可以退化为桶壁壳基础进行模拟。

关键词: 海上风力发电机; 桶形基础; 竖向初始动阻抗; 有限元分析方法

中图分类号: TU476 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)03-0263-08

Analysis of factors influencing vertical initial dynamic impedance of bucket foundations for offshore wind turbine

LIN Jie^{1,2}, HE Rui^{1,2}, ZHENG Jinhai^{1,2}

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A finite element model of bucket foundation embedded in an elastic half-space was established using the finite element software ABAQUS. The accuracy of simulated results of the model was verified by comparing the numerical solution with existing analytical solutions. The influences of different factors on the vertical initial dynamic impedance of bucket foundation and the relationship between initial dynamic impedances of the bucket foundation and shell foundation were studied. The results show that the length-to-diameter ratio and thickness-to-diameter ratio of the bucket foundation, soil Poisson's ratio, soil shear modulus, and soil nonhomogeneity have significant influence on the initial impedance, while bucket foundation material has little influence on the initial impedance. The initial impedances of the bucket foundation and shell foundation are nearly the same, and the bucket foundation can be simplified as the shell foundation in simulated calculation.

Key words: offshore wind turbine; bucket foundation; vertical initial dynamic impedance; finite element method

一直以来, 由于海上风力发电机(简称风机)设计时难以准确计算基础动阻尼, 导致风机设计太过保守, 建设成本高。桶形基础(简称桶基)作为近海风机的基础形式主要包括单桶基础或多桶基础, 它安装方便, 成本低。随着海上风电开发水深的不断增大, 从海上石油平台导管架结构演变而来的, 适应水深范围更广、

收稿日期: 2016-08-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51509082); 江苏省自然科学基金(BK20150804)

作者简介: 林捷(1991—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事工程结构物及其与周围介质的相互作用研究。E-mail: phlinjie@163.com

通信作者: 贺瑞, 讲师。E-mail: herui0827@163.com

承载力更大的三脚架及四脚架等多桶基础被应用到风机的基础中。吸力桶基础作为这些“多足”支撑结构的每个“脚”形成多桶基础,通过竖向反力抵抗风机塔架的倾覆弯矩^[1]。

初始动阻抗定义为极小应变时的动阻抗,类似于土动力学中的土体初始剪切模量 G_0 。将桶基初始动阻抗研究清楚后,将有利于进一步研究桶基在外部荷载作用下的演化过程,精确计算正常运行状态下的动阻抗,为海上风机设计提供准确的刚度和阻尼参数。2014年 Versteijlen 等^[2]发现实测风机的自振频率要高于设计值,这说明设计风机动阻抗偏小,并已着手开始研究小应变下的基础初始动阻抗。国内外对桶基进行了大量研究。Bhattacharya 等^[3]通过物理模型试验,研究了循环荷载作用过程中桶基自振频率和动阻抗的变化情况;Houlsby 等^[4-5]通过大比尺室外模型试验,测试了较高频率下,在砂土和黏土中模型桶基在动弯矩作用下的动阻抗;Liingaard 等^[6-7]通过耦合边界元-有限元方法研究了黏弹性半空间中桶基的动阻抗,同时通过实测海上风机塔架自振频率,反算得到桶基动阻抗;Versteijlen 等^[2]通过有限元法计算了弹性地基土小应变下桶基的初始刚度。贺瑞^[8]将桶基简化为埋置在海床中的弹性薄壳或刚性薄壳,研究了基础的竖向、水平及摇摆耦合振动特性及影响因素。总的来说,国内外学者对桶基基础安装特性和极限承载力及其影响因素进行了大量的研究^[9],但是对于桶基的竖向初始动阻抗研究很少,初始动阻抗的内在机理和影响因素亟待深入研究。本文通过有限元软件 ABAQUS,建立起弹性半空间上的桶基有限元模型。经过大量的数值计算,分析桶基壁厚、桶基长径比、桶基材料、土体泊松比、土体剪切模量、土体非均匀性等因素对桶基竖向初始动阻抗的影响。

1 桶基竖向初始动阻抗

研究桶基埋置于理想的均匀弹性土体半空间上的竖向初始动阻抗。竖向集中力作用在桶基顶盖的中心。桶基半径为 R ,桶基桶壁长为 L ,桶壁厚度为 t ,如图1所示。

假定桶基的质量为 m ,桶基竖向初始动阻抗定义为作用在桶基上简谐荷载的值和相应简谐位移的比值,其值是复数,实部表示动刚度,虚部表示动阻尼。根据单自由度线性系统振动方程,可得

$$P_v - kU_v - c\dot{U}_v = m\ddot{U}_v \quad (1)$$

其中

$$P_v(t) = P_{v0}e^{i\omega t} \quad U_v(t) = U_{v0}e^{i(\omega t - \varphi)}$$

式中: P_v ——作用在桶基顶盖中心处的简谐激振力; k ——系统刚度; U_v ——简谐荷载作用下桶基竖向位移; c ——系统阻尼; φ ——桶基竖向振动和激振力的相位差; ω ——激振力频率。

整理式(1),可得桶基竖向初始动阻抗表达式:

$$K_v = k + i\omega c = \frac{P_v(t)}{U_v(t)} = \frac{P_{v0}e^{i\omega t}}{U_{v0}e^{i(\omega t - \varphi)}} = \frac{P_{v0}}{U_{v0}}\cos\varphi - m\omega^2 + i\frac{P_{v0}}{U_{v0}}\sin\varphi \quad (2)$$

ABAQUS 软件计算时考虑了桶基的密度和质量。由于动阻抗 K_v 的计算值往往达到 10 的 n 次方数量级,而式中 $m\omega^2$ 一项数值很小,对动阻抗计算值影响很小。为了计算方便,计算中将 $m\omega^2$ 一项忽略。桶基竖向初始动阻抗表达式又可写为

$$K_v = \frac{P_{v0}}{U_{v0}}\cos\varphi + i\frac{P_{v0}}{U_{v0}}\sin\varphi \quad (3)$$

K_v 表达式中的实部为桶基竖向动刚度系数 k_v ,虚部为桶基竖向动阻尼系数 c_v 。 k_v 反映了土体的动刚度, c_v 反映了基础的能量损失和土体材料阻尼。即

$$k_v = \operatorname{Re}(K_v) = \frac{P_{v0}\cos\varphi}{U_{v0}} \quad c_v = \operatorname{Im}(K_v) = \frac{P_{v0}\sin\varphi}{U_{v0}} \quad (4)$$

将 k_v 和 c_v 无量纲化,可得无量纲竖向动刚度系数 $\bar{k}_v$ 和与频率无关的无量纲竖向动阻尼系数 $\bar{c}_v$,即

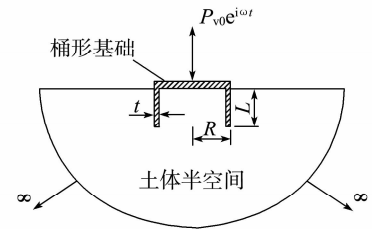


图1 桶基模型示意图
Fig.1 Sketch of bucket foundation model

$$\bar{k}_v = \frac{k_v}{GR} = \frac{P_{v0} \cos \varphi}{GR U_{v0}} \quad \bar{c}_v = \frac{c_v}{GR a_0} = \frac{P_{v0} \sin \varphi}{GR a_0 U_{v0}} \quad (5)$$

式中: a_0 ——作用在桶基上的激振力的无量纲频率; $a_0 = \omega R \sqrt{\rho/G}$; R ——桶基半径; ρ ——土体密度; G ——土体的剪切模量。

式(3)可改写为

$$K_v = GR(\bar{k}_v + i a_0 \bar{c}_v) = GR \bar{k}_v + i GR a_0 \bar{c}_v \quad (6)$$

2 有限元分析方法

2.1 有限元计算模型

由于桶基振动时会在土体中产生应力波,应力波传递到有限元模型边界后,反射回来,对模型计算结果的准确性会有很大影响,因此要选择合适的单元类型、边界条件和有限元土体的范围,才能使计算结果更加准确。有限元单元模型网格如图2所示。

为了准确模拟应力波在土体中的传播,土体有限单元尺寸受到土体剪切波长 λ 的影响。Kuhlemeyer 等^[10]和 Lysmer 等^[11]提出单元最大尺寸 $l_{\max}$ 应该满足:

$$l_{\max} \leq \left(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{5} \right) \frac{2\pi R}{a_0} \quad (7)$$

为避免应力波反射对计算结果产生影响,可在有限元区域外围设置吸收边界条件。黏滞阻尼边界条件^[12]和无限元边界条件^[13]是最常用的吸收边界条件。通过 ABAQUS 软件在有限元区域外面设置无限元单元边界条件,但是如果有限元区域不够大,仍会出现数值震荡。为了避免由于边界条件带来的误差,设置一个足够大的有限元区域^[14]。该计算区域满足:

$$L_r \geq \frac{2n\pi R}{a_0} \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (8)$$

式中: L_r ——有限元区域内应力波最短的反射距离; n ——激振的周期数; ν ——土体泊松比。

根据桶基结构和施加的荷载的对称性,选用 ABAQUS 轴对称边界条件。取桶基及土体的截面进行计算。土体和桶基都采用线弹性材料,有限元部分采用 CAX4R 单元,土体无限元采用 CINAX4 单元。桶壁和土体接触采用 Tie 接触,桶基顶部和土体接触法向采用硬接触,切向采用无摩擦接触,并在桶基顶部施加竖向均布简谐循环荷载,建立隐式动态分析步进行分析。

2.2 有限元计算

采用荷载控制法计算竖向动阻抗。在桶基顶部施加一个竖向的均布简谐循环荷载 P_v 。计算结束后,取桶基顶部土体所有节点的竖向位移进行平均;然后采用最小二乘法拟合位移曲线,求得位移公式 U_v 和相位差 φ 。将 P_{v0} 、 U_{v0} 和 φ 带入式(5),得到桶基竖向初始动阻抗。

3 桶基竖向动阻抗影响因素分析

3.1 ABAQUS 模型验证

为了验证 ABAQUS 模型的准确性,计算刚性圆盘基础竖向动阻抗,与已有的均匀弹性半空间的理论解析解进行对比。在圆盘基础顶部施加竖向简谐荷载。刚性圆盘半径 $R = 5$ m,厚度 1 m,弹性模量 $E_f = 210$ GPa,土体剪切模量为 1 MPa,泊松比为 0.33,密度为 1 800 kg/m³。通过(4)式计算得到 k_v 和 c_v ,并进行无量纲化 $\bar{k}_v = k_v/k_{v0}$, $\bar{c}_v = c_v/(k_{v0}a_0)$ 。与 Luco 等^[15]的理论解进行对比。从图3可以看出,在无量纲频率 $a_0 \in [0,1]$ 的范围内,刚性圆盘竖向动阻抗的有限元模型计算值与理论值吻合较好,误差均在 5% 内。说明有限元模型参数选取正确,能够用于准确计算基础的竖向初始动阻抗。

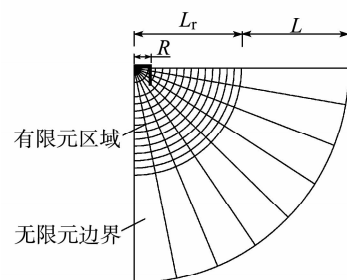


图2 有限元网格模型

Fig.2 Finite element mesh model

3.2 桶基及桶壁壳基础动阻抗关系

为了研究桶基和桶壁壳基础竖向动阻抗关系,在桶基和桶壁壳基础顶部施加单位竖向循环荷载。桶基半径 $R=5\text{ m}$,顶盖厚度 1 m ,桶壁厚度 $t=0.05\text{ m}$,长径比 $L/R=2$ 。桶基弹性模量 $E_t=210\text{ GPa}$,土体剪切模量为 1 MPa ,泊松比为 0.33 ,密度为 $1\,800\text{ kg/m}^3$ 。通过式(5)计算桶基和桶壁壳基础的竖向动刚度系数和动阻尼系数,如图4所示。

从图4可以看出,在无量纲频率 $a_0\in[0,1]$ 的范围内,桶基和桶壁壳基础的竖向动刚度系数和动阻尼系数基本重合,说明在研究竖向动阻抗时,桶基可以简化为壳基础进行模拟,如同贺瑞^[8]所述。

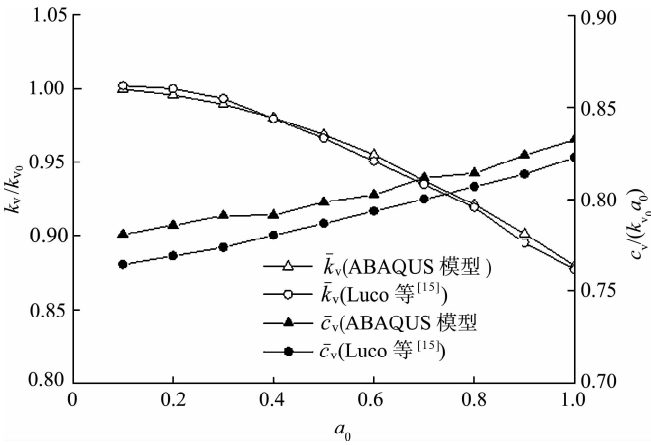


图3 圆盘有限元模型竖向动阻抗和Luco等竖向动阻抗解析解比较
Fig.3 Comparison of vertical dynamic impedance of circular foundation simulated by FEM with analytical solution of Luco et al. (1972)

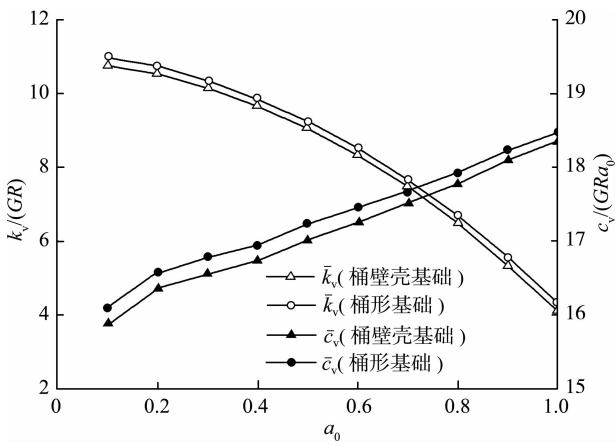


图4 桶基和桶壁壳基础竖向动阻抗比较
Fig.4 Comparison of vertical impedances of bucket foundation and shell foundation

3.3 竖向初始动阻抗影响因素分析

影响桶基竖向初始动阻抗的因素很多,笔者设计了6组不同条件的桶基模型研究不同因素对竖向初始动阻抗的影响,计算 $a_0\in[0,1]$ 范围内桶基竖向初始动阻抗的变化情况,研究桶基厚径比(桶壁厚度与半径比值 t/R)、桶基长径比(桶壁长度与半径比值 L/R)、桶基弹性模量 E_t 、土体泊松比 ν_s 、土体剪切模量 G_s 、土体非均匀性等对桶基竖向初始动阻抗的影响。计算模型参数如表1所示。

表1 计算模型参数
Table 1 Calculation model parameters

对比组次	土体参数			桶基参数			
	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G_s/MPa	ν_s	E_t/GPa	ν_t	t/R	L/R
桶基厚径比	1 800	1	0.33	210	0.25	0.005,0.01,0.05	2
桶基长径比	1 800	1	0.33	210	0.25	0.01	0.25,0.5,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
桶基材料	1 800	1	0.33	210,30	0.25,0.2	0.01	2
土体泊松比	1 800	1	0.25,0.33,0.45	210	0.25	0.01	2
土体剪切模量	1 800	1、10、50	0.33	210	0.25	0.01	2

3.3.1 桶基厚径比影响

为了分析不同的桶壁厚度对桶基竖向初始动阻抗的影响,分别计算了厚径比 t/R 为 0.005 、 0.01 和 0.05 时竖向初始动阻抗。计算结果如图5所示,可见桶基的动刚度系数 $\bar{k}$ 随着频率 a_0 变大而变小。桶壁的厚径比对 $\bar{k}$ 有明显影响,随着厚径比变大,基础动刚度明显增大。厚径比从 0.005 到 0.05 , $\bar{k}$ 至少增大 10% 。Doherty等^[16]研究表明桶基厚径比对竖向静刚度影响很小,厚径比从 0.001 到 0.01 的范围内,静刚度增大了不到 1% 。这说明厚径比对桶基竖向动刚度的影响很大。对于桶基动阻尼系数 $\bar{c}$, $\bar{c}$ 随着频率 a_0 近似线性缓慢增大,在 $a_0\in[0.1,1.0]$ 区间,不同厚径比的 $\bar{c}$ 均增长了 15% 左右。注意到厚径比对 $\bar{c}$

影响明显,厚径比越大, $\bar{c}$ 越大。这是由于桶壁变厚,整个桶基本身的刚度变大,所以基础的动刚度和动阻尼随着增大。

3.3.2 桶基弹性模量影响

为了研究桶基不同弹性模量 E_f 对桶基竖向初始动阻抗的影响,选取了混凝土和钢材 2 种桶基材料:混凝土 $E_f = 30 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu_f = 0.2$;钢材 $E_f = 210 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu_f = 0.25$ 。计算结果如图 6 所示。可以看出,不同弹性模量的桶基动刚度系数 $\bar{k}$ 曲线基本重合,桶基弹性模量对 $\bar{k}$ 的影响很小。对于动阻尼系数 $\bar{c}$,桶基弹性模量 E_f 影响明显,随着弹性模量变大, $\bar{c}$ 变小,但是差别不大。注意到在 a_0 较小时,钢桶基 $\bar{k}$ 比混凝土桶基 $\bar{k}$ 略微小,在频率较大时,钢桶基 $\bar{k}$ 比混凝土桶基 $\bar{k}$ 略微大。对于动阻尼,钢桶基 $\bar{c}$ 比混凝土桶基 $\bar{c}$ 大。因为从混凝土桶基到钢桶基,桶基的 E_f 变大,相当于桶基和土体的相对刚度增大。贺瑞^[8]研究发现当壳的长径比较小时,无论用钢壳还是混凝土壳,在不同砂土中都将得到相近的动力响应。本文计算结果与其一致。

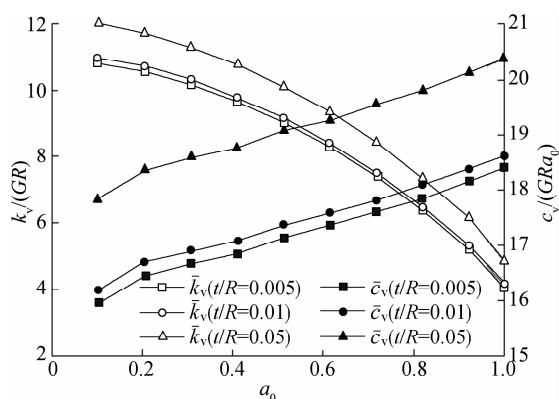


图5 不同厚径比桶基竖向初始动阻抗
Fig. 5 Vertical initial dynamic impedance of bucket foundations with different thickness-to-diameter ratios

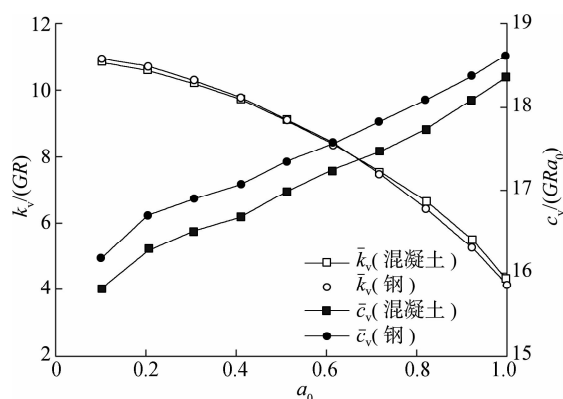


图6 不同材料桶基竖向初始动阻抗
Fig. 6 Vertical initial dynamic impedance of bucket foundations with different bucket materials

3.3.3 桶基长径比影响

为了分析不同的桶壁长径比对桶基竖向初始动阻抗的影响,分别计算了长径比 L/R 为 0.25、0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 时的竖向初始动阻抗。从图 7 可以看到, $a_0 \in [0.1, 0.5]$,不同长径比桶基的动刚度系数曲线都较为平缓,在 $a_0 \in [0.5, 1.0]$ 内,随着 a_0 增大,桶基的动刚度快速减小,且随着长径比增大, a_0 对动刚度的影响程度越来越大。在 $L/R = 10$, $a_0 \in [0.5, 1.0]$ 时, $\bar{k}$ 急剧减少了 80%。表明随着桶基长径比增大,基

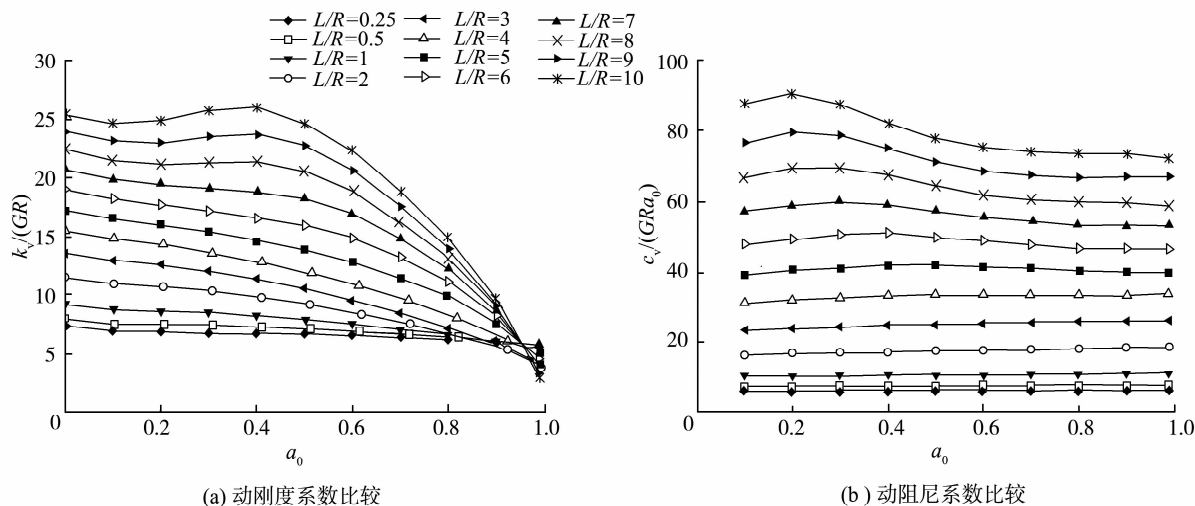


图7 不同长径比桶基竖向初始动阻抗
Fig. 7 Vertical initial dynamic impedance of bucket foundations with different length-to-diameter ratios

基础刚度对无量纲频率越来越敏感。同时还发现当 $a_0 < 0.9$ 时,长径比对 $\bar{k}$ 影响明显,随着桶壁长度不断增长,动刚度不断变大。但随着 a_0 增大,长径比对动刚度的影响逐渐减小,在 $a_0 = 0.95$ 时,不同长径比下的动刚度系数相差不大。当 $a_0 > 0.95$ 后,长径比越大, $\bar{k}$ 反而越小。而 Doherty 等^[17] 的研究发现,随着桶基长径比增加,桶基竖向静刚度不断增大。所以长径比对桶基动刚度和静刚度产生的影响并不一致。

对于无量纲竖向动阻尼系数 $\bar{c}$,其受长径比影响明显,随着长径比增大, $\bar{c}$ 也增大。不同长径比桶基的 $\bar{c}$ 随着 a_0 增大,变化不大,曲线平缓。注意到随着长径比增大, a_0 对桶基 $\bar{c}$ 的影响变得更加明显。当长径比 $L/R \leq 5$ 时,随着 a_0 增大, $\bar{c}$ 缓慢增大,但是当 $L/R > 5$ 时,随着 a_0 增大, $\bar{c}$ 却减小了。说明随着桶基长径比变大,桶基变得细长,桶基相对刚度变小,柔度变大,对无量纲频率变得更加敏感。

根据贺瑞^[8] 的研究,长径比较小的刚性桶基初始动阻抗受长径比和无量纲频率影响最大。为了工程实际应用方便,在大量 ABAQUS 模型数值计算基础上,对不同长径比和无量纲频率下,桶基 $\bar{k}_v = k_v/(GR)$ 和 $\bar{c}_v = c_v/(GRa_0)$ 进行最小二乘法拟合,拟合公式如下:

$$\bar{k} = 8.175 + (1.679 + 2.267a_0 - 4.086a_0^2) \frac{L}{R} - (13.99 - 24.75a_0 + 13.84a_0^2)a_0 \quad (9)$$

$$\bar{c} = 7.403 + 7.099 \frac{L}{R} - 3.86a_0 \quad (10)$$

$\bar{k}_v$ 拟合后,确定系数为 0.9916。 $\bar{c}_v$ 拟合后,确定系数为 0.9971。说明式(9)和式(10)能够很好地计算不同长径比和不同无量纲频率下桶基的竖向初始动阻抗。

3.3.4 土体泊松比影响

图 8 描述了不同泊松比 ν_s 时桶基竖向初始动阻抗, ν_s 取 0.25、0.33、0.45。从图 8 中可以看出 $\bar{k}$ 受 ν_s 影响明显, ν_s 越大,桶基动刚度越大。当 a_0 较小时, $\bar{k}$ 受 ν_s 影响较大。对于 $\bar{c}$, ν_s 对 $\bar{c}$ 的影响与厚径比的影响类似, $\bar{c}$ 随着 a_0 近似线性缓慢增大, ν_s 越大, $\bar{c}$ 越大,也就是动阻尼越大。

3.3.5 土体剪切模量影响

图 9 反映剪切模量 G_s 对桶基竖向动阻抗影响, G_s 取 1 MPa、10 MPa、50 MPa。对于 $\bar{k}$, $a_0 \in [0.5, 0.7]$ 时, G_s 对 $\bar{k}$ 影响不大。当 $a_0 = 0.6$ 时, $\bar{k}$ 基本相等。当 $a_0 < 0.5$ 或者 $a_0 > 0.7$ 时, G_s 对 $\bar{k}$ 影响较明显。注意到当 $a_0 < 0.5$ 时, G_s 越大,动刚度越小。当 $a_0 > 0.7$ 时, G_s 越大,动刚度越大。

对于无量纲动阻尼系数 $\bar{c}$,同样地随着 a_0 增大, $\bar{c}$ 逐渐增大。 $\bar{c}$ 受 G_s 影响明显,但是与土体泊松比产生的影响不一样,随着 G_s 增大, $\bar{c}$ 反而变小。 Liingaard 等^[7] 研究表明,随着土体剪切模量增大,桶基的桶壁与土体的相对刚度变小,当土体剪切模量很大时,桶基竖向动阻抗与刚性圆盘基础竖向动阻抗接近。所以从图 9 中看到随着土体剪切模量增大,桶基竖向动阻尼减小。这与图 6 的结果是一致的,图 6 中混凝土桶基动阻尼比钢桶基动阻尼小,因为混凝土桶基的剪切模量小,相当于桶基和土体的相对刚度减小,所以动阻尼也变小。

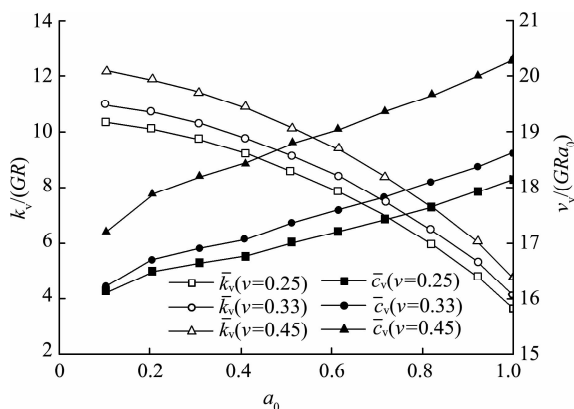


图 8 不同土体泊松比下桶基竖向初始动阻抗
Fig. 8 Vertical initial dynamic impedance of bucket foundations in different Poisson's ratios of soil

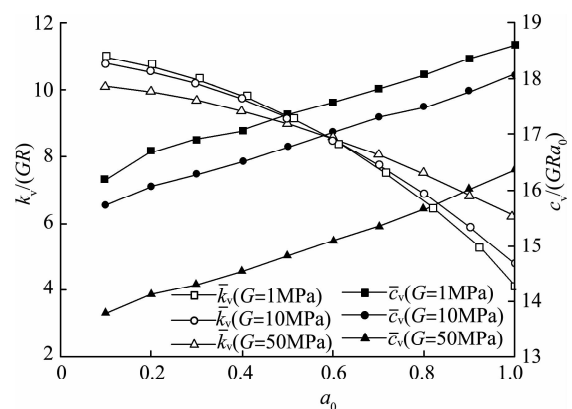


图 9 不同土体剪切模量下桶基竖向初始动阻抗
Fig. 9 Vertical initial dynamic impedance of bucket foundations in different shear moduli of soil

3.3.6 土体非均匀性的影响

在实际工程中,土体的弹性模量往往随着深度的变化而变化。为了更好地研究实际情况下土体非均匀性对桶基动阻抗的影响,采用 Gibson 模型^[18]。Gibson 模型较好地描述了土体的非均匀性质,认为土体的剪切模量为随深度变化的线性函数。Gibson 模型土体剪切模量公式为

$$G(z) = G_0 + bz \quad (11)$$

式中: z ——土体深度; G_0 ——土体在桶基半径 R 深处的剪切模量, $G_0 = 50 \text{ MPa}$; b ——剪切模量随深度的变化率。

实际情况下,一些类型的土(如超固结黏土)在深度方向上剪切模量变化很小,此时 $b = 0$,相当于均匀的土体。大部分正常固结的黏土剪切模量沿着深度大致线性变化,不同的土体剪切模量变化率不一样($b \neq 0$)。本文计算了 $b = 0$ 、 $b = 1$ 、 $b = 5$ 共 3 种不同的非均匀基础(如图 10 所示),研究土体非均匀性对桶基的动阻抗的影响。模型其他参数:桶基厚径比 $t/R = 0.01$,长径比固定为 $L/R = 2$, $E_f = 210 \text{ GPa}$,土体参考点处 $G_0 = 50 \text{ MPa}$, $\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\nu_s = 0.33$ 。

利用 G_0 对计算结果无量纲化,结果如图 11 所示。对于 $\bar{k}$,随着 b 增大,基础的 $\bar{k}$ 不断增大。这与 Doherty 等^[16]研究发现桶基在不均匀地基上静刚度随着不均匀系数 α 变大而增大的变化趋势一致。说明土体的不均匀性对桶基静刚度和动刚度造成类似的影响。

对于 $\bar{c}$, b 对 $\bar{c}$ 有明显影响,随着 b 增大, $\bar{c}$ 不断减少。注意到在频率比较低时, b 对 $\bar{c}$ 的影响更加明显,随着 b 增大, $\bar{c}$ 急剧减小。同时发现 b 变大, $\bar{c}$ 在低频时对 a_0 变得更加敏感。对于均匀土体 $b = 0$, $\bar{c}$ 随着 a_0 增大而近似线性缓慢增大。当 $b = 5$ 时,随着 a_0 增大, $\bar{c}$ 快速增大。

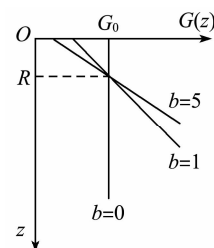


图 10 土体剪切模量随深度变化

Fig. 10 Variation of soil shear modulus with depth

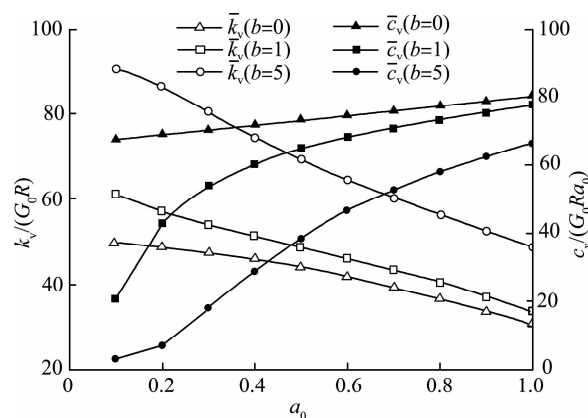


图 11 非均匀土体下桶基竖向初始动阻抗

Fig. 11 Vertical initial dynamic impedance of bucket foundation embedded in nonhomogeneous soil

4 结 论

a. 桶基长径比对桶基动阻抗有明显影响,长径比较大时,动刚度在 $a_0 \in [0.5, 1.0]$ 时,随频率变化很大。由于长径比增大,使得桶基变得更加“柔”,动阻抗对频率变化更加敏感。

b. 在研究竖向初始动阻抗时,桶基可以简化为壳基础进行模拟。

c. 桶基动刚度和动阻尼随着桶基厚径比、泊松比增大而变大。

d. 当长径比较小时,无论用钢桶基还是混凝土桶基,都将得到相近的动力响应。

e. 土体剪切模量的增大使得桶基-土体相对刚度减小。剪切模量增大,在频率较低的范围内,桶基动刚度和动阻尼均变小。同时,土体的非均匀性变大,产生影响类似于土体剪切模量增大,土体不均匀系数越大,动刚度和动阻尼越小。非均匀性变大,动阻尼对无量纲频率变得更敏感,动阻尼在低频时迅速减小并趋于零。

参考文献:

- [1] SENDERS M. Tripods with suction caissons as foundations for offshore wind turbines on sand[C]//Taylor and Francis Group. International Symposium on Frontiers on Offshore Geotechnics (ISFOG 2005). London: Taylor and Francis Group, 2005: 397-410.
- [2] VERSTEIJLEN W G, VAN DALEN K N, METRIKINE A V, et al. Assessing the small-strain soil stiffness for offshore wind turbines based on in situ seismic measurements[J]. Journal of Physics (Conference Series), 2014, 524(1): 12-88.
- [3] BHATTACHARYA S, NIKITAS N, GARNSEY J, et al. Observed dynamic soil-structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 54(11): 47-60.
- [4] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine foundations

- [J]. Géotechnique, 2005, 55(4): 287-296.
- [5] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in sand for offshore wind turbine foundations [J]. Géotechnique, 2006, 56(1): 3-10.
- [6] LIINGAARD M, ANDERSEN L, IBSEN L B. Impedance of flexible suction caissons [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(14): 2249-2271.
- [7] LIINGAARD M. Dynamic behaviour of suction caissons [D]. Aalborg: Aalborg University, 2006.
- [8] 贺瑞. 海底基础动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [9] 武科. 滩海吸力式桶形基础承载力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [10] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div, 1973, 99(5): 421-427.
- [11] LYSMER J, UDAKA T, TSAI C F, et al. FLUSH-A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 1975.
- [12] LYSMER J. Finitodynamic model for infinite media [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1969, 95(4): 859-878.
- [13] LYNN P P, HADID H A. Infinite elements with $1/rn$ type decay [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1981, 17(3): 347-355.
- [14] BORJA R I, WU W H, SMITH H A. Nonlinear response of vertically oscillating rigid foundations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(5): 893-911.
- [15] LUCO J E, WESTMANN R A. Dynamic response of circular footings [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1971, 97: 1381-1395.
- [16] DOHERTY J P, HOULSBY G T, DEEKS A J. Stiffness of flexible caisson foundations embedded in nonhomogeneous elastic soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1498-1508.
- [17] DOHERTY J P, DEEKS A J. Elastic response of circular footings embedded in a non-homogeneous half-space [J]. Géotechnique, 2003, 53(8): 703-714.
- [18] GIBSON R E. Some results concerning displacements and stresses in a non-homogeneous elastic half-space [J]. Géotechnique, 1967, 17(1): 58-67.

· 简 讯 ·

水利部、教育部、共青团中央联合举办“全国防汛抗旱知识大赛”

2017年5月12日,在我国第九个“国家防灾减灾日”到来之际,由水利部、教育部、共青团中央联合举办的“全国防汛抗旱知识大赛”在京启动。水利部副部长、大赛组委会主任叶建春出席启动仪式并讲话。启动仪式上,水利部、教育部、共青团中央等单位代表发言,大赛标识、宣传画和宣传片发布,大学生代表宣读倡议书。水利部总规划师、大赛组委会副主任张志彤主持启动仪式。

叶建春强调,举办本次大赛,是贯彻落实防灾减灾新理念的具体举措之一,旨在通过集知识性、实用性、趣味性、科普性于一体的比赛,充分利用融媒体传播手段,广泛吸引在校大中学生、广大社会公众特别是灾害易发多发地区的群众参与,大力普及防汛抗旱防台风相关知识,提升社会公众防灾避险意识和能力,夯实防汛抗旱防台风工作的社会基础,加快构建“政府主导、社会协同、全民参与”的防汛抗旱减灾工作新格局。

据了解,竞赛内容包括4个方面,一是我国江河水系分布、水旱灾害规律及特点;二是我国防汛抗旱减灾工作的方针政策和理念;三是不同类别灾害发生时的防灾避险常识、险情处置、自救常识等;四是我国古今治水成就、治水典故、历史重大水旱灾害事件、水文化传承(含诗词歌赋)等。在题目设置上,将侧重不同类别灾害的防灾避险常识。

水利部、教育部、共青团中央有关司局负责人,各流域机构和各地水利部门的代表,清华大学、北京大学等7所高校代表,人民日报、光明日报、经济日报、中央人民广播电台、澎湃新闻等媒体记者参加了启动仪式。与会代表纷纷签名,响应大赛倡议。

(本刊编辑部供稿)