



海上风电桩筒复合基础承载性能研究

孙艳国 许成顺 杜修力 王丕光 席仁强 孙毅龙

Bearing characteristics of pile–bucket composite foundations for offshore wind turbines

SUN Yan–guo, XU Cheng–shun, DU Xiu–li, WANG Pi–guang, XI Ren–qiang, SUN Yi–long

引用本文:

孙艳国, 许成顺, 杜修力, 王丕光, 席仁强, 孙毅龙. 海上风电桩–筒复合基础承载性能研究[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(3): 489–498. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.02.11.001

SUN Yan–guo, XU Cheng–shun, DU Xiu–li, WANG Pi–guang, XI Ren–qiang, SUN Yi–long. Bearing characteristics of pile – bucket composite foundations for offshore wind turbines[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(3): 489–498. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.02.11.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.02.11.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非均质土中海上风电单桩基础动力响应特性

Dynamic response characteristics of an offshore, wind–power monopile foundation in heterogeneous soil

工程科学学报. 2021, 43(5): 710 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.03.19.004>

冲刷深度对海上风电塔地震动力响应的影响分析

Analysis of the influence of scour depth on the dynamic response of offshore wind turbine towers under earthquake action

工程科学学报. 2019, 41(10): 1351 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.01.20.001>

黏土中静压沉桩离心模型

Centrifuge modeling of jacked pile in clay

工程科学学报. 2018, 40(3): 285 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.03.004>

双钢板混凝土组合剪力墙轴压承载力研究

Study on axial compressive bearing capacity of composite shear wall with double–skin steel plate

工程科学学报. 2017, 39(11): 1765 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.11.020>

开口管桩贯入特性的大尺度模型试验

Large–scale model test on installation characteristics of open–ended pipe pile

工程科学学报. 2019, 41(2): 269 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.02.015>

考虑楼板效应的外环板式梁柱节点抗弯承载力

Flexural capacity of beam–to–column joints with external diaphragm considering the slab effect

工程科学学报. 2019, 41(6): 824 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.06.015>

海上风电桩–筒复合基础承载性能研究

孙艳国, 许成顺[✉], 杜修力, 王丕光, 席仁强, 孙毅龙

北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124

✉通信作者, E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn

摘要 基于有限元软件 ABAQUS 平台, 建立了非匀质饱和黏土场地的海上风电桩–筒复合基础数值计算模型, 对比研究竖向荷载 V 、水平荷载 H 和弯矩荷载 M 作用下不同筒结构尺寸的桩–筒复合基础的承载力系数, 并采用正交试验法开展桩–筒复合基础各向承载性能的影响因素研究。结果表明, 饱和黏土的非匀质特性系数 K 对竖向承载力系数 N_{cV} 影响较小; K 对水平承载力系数 N_{cH} 和抗弯承载力系数 N_{cM} 的影响呈指数型递减。筒结构直径 D 和入土深度 L 对各向承载力系数的影响存在交互作用。 D 对桩–筒复合基础承载力系数的影响最大, 可以通过增加筒结构直径从而有效地提高桩–筒复合基础的承载性能。研究结果为海上风电桩–筒复合基础的设计提供了依据。

关键词 海上风电; 桩–筒复合基础; 非匀质饱和黏土; 承载力系数; 正交试验

分类号 TU47

Bearing characteristics of pile–bucket composite foundations for offshore wind turbines

SUN Yan-guo, XU Cheng-shun[✉], DU Xiu-li, WANG Pi-guang, XI Ren-qiang, SUN Yi-long

Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

✉ Corresponding author, E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn

ABSTRACT Offshore wind power has been the fastest-growing form of renewable energy for the last few years, owing to its effectiveness in achieving carbon neutrality through a reasonable and efficient utilization of wind power resources. With offshore wind farms gradually developing into the deep and far sea, greater attention is paid to the bearing characteristics of foundations for offshore wind turbines. Therefore, it becomes significantly important to explore new foundations, effectively promoting the development of offshore wind power. Numerous researchers have substantially investigated novel foundations for offshore wind turbines to help with offshore wind farm construction. Compared to other foundations, the pile–bucket composite foundation has obvious advantages in terms of bearing performance. In this paper, a series of numerical calculation models for pile–bucket composite foundations in heterogeneous saturated clay are established using the finite element software ABAQUS. Additionally, the undrained shear strength changes with depth are examined *via* field variables to explain soil heterogeneity in the finite element model. Next, the displacement control method is adopted to apply the vertical loading V , horizontal loading H , and bending moment M at the top of the foundation. Simultaneously, the ultimate bearing capacity of the foundations is obtained by the double tangent method, and the bearing capacity factors of each load direction are obtained by normalizing the ultimate bearing capacity in different calculations. To obtain the preliminary design method for the size of pile–bucket composite foundation, the priority of influencing factors is studied through the orthogonal test. The results show that the saturated clay coefficient K has a nominal effect on the vertical bearing capacity coefficient N_{cV} . When K is different, N_{cV} remains almost unchanged for a certain foundation. Concerning the impact of bucket shapes on the bearing capacity coefficient in three directions, great interaction is observed between the diameter D and the buried depth L of the bucket structure. The diameter of the bucket has the greatest influence on the bearing characteristics of the pile–bucket composite foundations, wherein increasing the former

收稿日期: 2022–02–11

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51722801)

can significantly improve the latter. The research results provide a reference for the design of the pile–bucket composite foundation of an offshore wind turbine.

KEY WORDS offshore wind turbine; pile–bucket composite foundations; heterogeneous saturated clay; bearing capacity factor; orthogonal test

生态环境事关人类生存和可持续发展,需要世界各国共同应对挑战^[1]. 随着能源短缺以及环境污染等问题的加剧,世界各国都在加快探索和发展新型可再生能源技术. 碳中和不仅是人类应对全球气候变化的共识,也是世界各国的共同目标. 到 2060 年我国将实现“碳中和”的宏伟目标,这促进了我国新能源技术的发展^[2]. 海上风电相对其他新能源具有安全、有效发电时间长以及不占用陆地资源等优势,在世界多个国家得到快速发展^[3]. 我国海岸线较长,具有丰富的海上风能资源,大量的海上风电场已经建成或正在建设中^[4].

目前,已建成的海上风电场主要位于近海,且装机风力发电机功率较小. 但随着海上风电场逐渐向深远海和大兆瓦风力发电机发展^[5-6],对海上风电基础的承载性能提出了更高的要求,同时场地条件对于海上风电基础承载性能有较大的影响^[7-8]. 为应对这些变化,众多学者对多种适用于海上风电的新型基础进行了开拓性的研究. Faizi 等^[9]基于复合三筒基础的研究指出,在原有基础上增加圆形平板可有效提高基础的抗倾覆能力,进而提升结构的整体承载性能. Yang 等^[10]和 Li 等^[11]通过模型试验以及数值模拟对新型伞形基础在正常场地以及冲刷场地情况下动力响应进行了研究,其研究成果表明在单桩周围增加伞状附属结构能提高基础稳定性. Wang 等^[12]提出在单桩基础周围增加平台结构,其离心机模型试验的研究表明平台结构的增加可极大提升基础的承载性能,为复合基础的研究提供参考依据. 朱东剑^[13]结合单桩基础与筒型基础,构造出一种新型复合基础,并对新型复合基础承载性能的影响因素进行研究. 刘润等^[14-15]对单桩复合筒基础的共同承载机制与复合基础承载的包络线进行了研究,其结果表明复合基础中桩主要承担竖向荷载和大部分弯矩,而筒结构主要承担水平荷载和部分弯矩,并指出复合基础有效地提高了基础结构的承载性能. Wang 等^[16]对单桩基础、单筒基础以及桩–筒复合基础进行对比研究,研究结果表明相比于砂土,在软黏土中的基础上增加筒结构对结构整体承载能力的提升效果更好. Chen 等^[17]在桩–筒复合基础静荷载和动荷载的响应研究中指出,复合

基础能够减小桩的入土深度,且附加的筒结构可以减小环境荷载作用下基础的转角和水平位移. 刘红军等^[18]对桩–筒复合基础结构进行了优化,推动了桩筒复合基础在实际工程中的应用. Li 等^[19]在筒基础上部进行抛石构造桩–筒复合基础,在筒结构上部所增加的竖向荷载使得筒与土之间的摩擦力以及主动土压力的增加,从而提高了基础的承载能力,同时其研究成果证明这种复合基础在松软场地中提升效果更加明显,这与 Wang 等^[16]的研究成果相同. 综上所述,将单桩和筒结构结合起来构造桩–筒复合基础可以有效的提高基础的承载性能,尤其适合应用于以软弱场地条件为主的海上风电工程.

现有研究主要针对匀质黏土或砂土,而关于筒结构尺寸与土体非匀质特性系数对桩–筒复合基础承载性能的影响还缺少系统研究. 本文基于有限元软件 ABAQUS 平台,建立了一系列桩–筒复合基础三维有限元模型,研究了饱和黏土地中不同的筒结构尺寸和饱和黏土非匀质特性系数时,竖向荷载 V 、水平荷载 H 以及弯矩荷载 M 作用下基础承载特性,并通过正交试验法对承载力系数的影响因素进行分析,所得到的研究成果可为桩–筒复合基础在海上风电场中的广泛应用提供参考.

1 有限元模型

1.1 计算模型

通过钢管桩与钢筒组合的形式构建桩–筒复合基础,筒结构与钢管桩之间可以通过注浆的方式连接^[13]. 本文建立有限元模型研究筒结构尺寸以及饱和黏土非匀质特性系数对桩–筒复合基础承载性能的影响. 桩与附加筒结构之间采用绑定接触. 钢管桩尺寸固定,桩入土深度 $l = 30$ m,壁厚 $t = 0.05$ m,外部直径 $d = 5$ m. 筒入土深度 $L = 2, 6, 10$ m,筒直径 $D = 10, 15, 20$ m,壁厚为 $T = 0.05$ m. 桩和筒结构采用钢材,模型中采用线弹性本构模型,钢材密度 $\gamma_s = 7800$ kg·m⁻³,弹性模量 $E_s = 10^{13}$ kPa(相对土体弹性模量足够大,视为刚体),泊松比 $\lambda_s = 0.3$,采用六面体八节点线性减缩积分单元(C3D8R)模拟. 复合基础中筒结构、桩与土体

之间绑定,限制基础结构与地基土体之间的相对位移。

现有研究表明基于 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构模型能够有效地模拟饱和黏土的力学行为,众多学者基于 Tresca 屈服准则开展了大量的饱和黏土地中基础承载性能研究^[20-24]。为验证本文有限元模型的可靠性,对文献 [20] 中相同尺寸的筒型基础进行水平和竖向的各单向极限承载力研究,计算结果如图 1 所示,图 1 中 A_b 为文献 [20] 中筒基础上部的表面积, H_{ult} 为水平极限承载力, V_{ult} 为竖向极限承载力。由图 1 可看出,本文的数值计算结果与 Mehravar 等^[20] 的计算结果吻合较好,说明本文模型具有一定的可靠性。

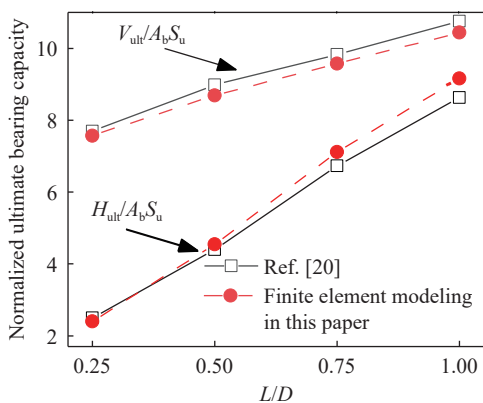


图 1 有限元模型验证

Fig.1 Validation of the model

本文研究的地基土体中采用非匀质饱和黏土,土体单元类型采用六面体八节点杂交单元 (C3D8RH)。土体有效重度为 $\gamma = 6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比 $\lambda_d = 0.49$,土体弹性模量 $E_d = 400S_u$, S_u 为饱和黏土的不排水抗剪强度, S_u 随着深度变化如下式:

$$S_u = S_{um} + kz \quad (1)$$

式中, S_{um} 为泥面处的不排水抗剪强度, z 为泥面下某点的深度, k 为不排水抗剪强度随着深度变化率,如图 2 所示。

现有研究成果表明非匀质饱和黏土地中,基础的承载性能不仅仅取决于某一个单因素 S_{um} 或 k ^[21,23-24],而是与量纲一参数 kD/S_{um} 有关。因此,饱和黏土地的非匀质特性采用参数 $K=kD/S_{um}$ 表达,取 $D = 10 \text{ m}$,具体参数如表 1 所示。 S_u 随着 k 在 $1.2 \sim 1.3 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 内变化,通过改变泥面处的不排水抗剪强度 S_{um} 值即可得到不同的饱和黏土的非匀质特性系数 K 。

为兼顾计算效率及计算精度,桩-筒复合基础周围土体网格尺寸较小,并对网格数量进行敏感

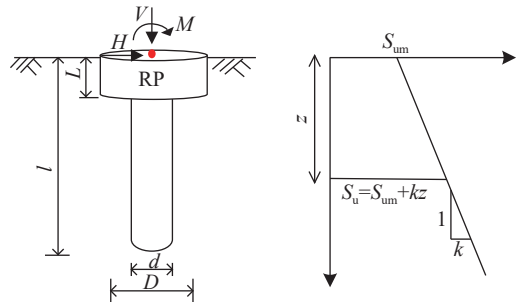


图 2 桩-筒复合基础形状、荷载加载条件及土体条件

Fig.2 Pile-bucket composite foundation geometry, load conventions, and saturated clay conditions

表 1 饱和黏土非匀质特性

Table 1 Inhomogeneous characteristics of saturated clay

$K = kD/S_{um}$	S_{um} / kPa	$k / (\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1})$
2	6.25	1.25
4	3.25	1.3
6	2	1.2
10	1.25	1.25
30	0.4	1.2

性分析,最终确立网格划分方法,如图 3 所示为筒直径为 20 m,筒入土深度为 2 m 时桩-筒复合基础以及周围土体的有限元网格。为减小模型边界效应对有限元计算结果的影响,通过多次试算得到合理的土体边界取值范围,最终确定土体高度为 60 m,直径为 100 m。对计算案例进行编号,采用 ‘ D +筒的直径+ L +筒的入土深度+非匀质特性系数+荷载作用方向’表示,例如 D15L6K4-V 表示饱和黏土非匀质特性系数为 4,桩-筒复合基础中筒直径为 15 m 且入土深度为 6 m 时竖向荷载作用下基础承载特性。

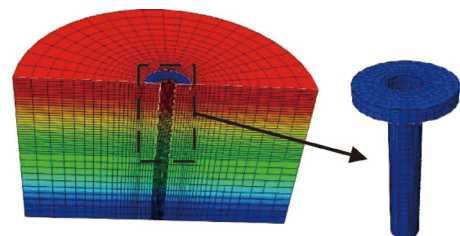


图 3 有限元计算模型

Fig.3 Finite element model

1.2 极限承载力的确定

如图 2 所示,在泥面处基础的中心点建立参考点 RP 作为荷载加载点,竖向荷载 V 、水平荷载 H 以及弯矩荷载 M 通过位移控制法进行施加。各向荷载作用下桩-筒复合基础的极限承载力通过位移-荷载曲线中两条切线的交点获得^[25],如图 4

为 D15L10K4-H 水平极限承载力 H_{ult} 确定的方法, 将切线交点处所对应的水平荷载视为基础的水平极限承载力, 所得基础各单向极限承载力通过几何尺寸以及饱和黏土抗剪切强度进行量纲为 1 处理得到承载力系数, 如表 2 所示, 表中 $A = \pi D^2/4$, D 为筒结构直径; S_{u0} 为某一深度处黏土不排水抗剪强度, 根据 Butterfield 等^[26] 与 Byrne 和 Cassidy^[27] 所建议的评判标准, S_{u0} 取复合基础中间深度处黏土不排水抗剪强度。

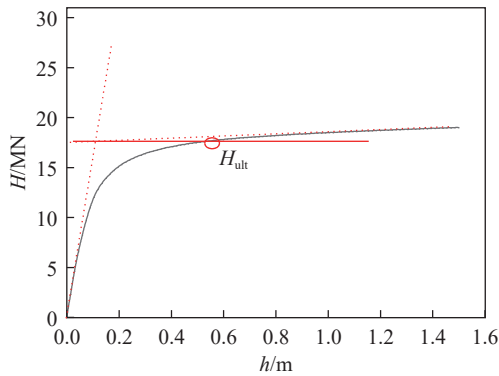


图 4 极限承载力确定

Fig.4 Determination of the ultimate bearing capacity

表 2 荷载及位移符号规定

Table 2 Sign conventions for loads and displacements

Parameter	Vertical loading	Horizontal loading	Bending moment
Loading	V	H	M
Ultimate bearing capacity	V_{ult}	H_{ult}	M_{ult}
Bearing capacity factor	$N_{cV} = V_{ult}/AS_{u0}$	$N_{cH} = H_{ult}/AS_{u0}$	$N_{cM} = M_{ult}/ADS_{u0}$
Displacement	v	h	θ

2 桩-筒复合基础水平承载特性

2.1 系数 K 对水平极限承载力的影响

通过有限元计算, 得到不同筒结构尺寸以及不同饱和黏土非匀质特性系数时桩-筒复合基础

的水平极限承载力. 为进行归一化研究, 将水平极限承载力转化为水平承载力系数 N_{cH} , $N_{cH} = H_{ult}/AS_{u0}$. 图 5(a)、(b)、(c) 分别为筒直径 $D=10、15、20$ m 时, 桩-筒复合基础水平承载力系数 N_{cH} 与饱和黏土的非匀质特性系数 K 之间的关系. 从图中可以看出水平承载力系数 N_{cH} 随着 K 的增加逐渐减小, 且两者关系可以用指数函数来描述. 这是由于随着 K 的增加, 桩-筒复合基础深度内土体不排水抗剪强度均值减小。

2.2 筒直径 D 和入土深度 L 对水平承载特性的影响

图 6(a) 和 (b) 分别为桩-筒复合基础水平承载力系数 N_{cH} 与筒直径 D 、筒入土深度 L 之间的关系. 如图 6(a) 所示, N_{cH} 与 D 之间呈曲线关系, 且随着 D 增加逐渐减小, 非线性拟合结果见式 (2); 如图 6(b) 所示, N_{cH} 随 L 的增加而线性增加, 其线性回归结果见式 (3). 为保证拟合公式量纲统一, 取单位长度 $O = 1$ m. 从式 (2) 和式 (3) 中可以看出, D 和 L 对复合基础水平承载特性影响的交互作用明显. 图 7 为 N_{cH} 与 $D、L$ 之间的三维关系图, 从图中可以看出 D 和 L 对 N_{cH} 的影响存在明显的交互作用。

$$N_{cH} = c \times \left(\frac{D}{O}\right)^{(0.04 \times L/O - 1.66)} \quad (2)$$

$$N_{cH} = \left(-0.002 \times \frac{D}{O} + 0.21\right) \times \frac{L}{O} + d \quad (3)$$

式 (2) 为 N_{cH} 与 D 的关系, 式中 c 为与 L 和 K 相关的值, 它在 302.7 ~ 146.3 之间变化, 且随着 K 的增加而减小; 式 (3) 为 N_{cH} 与筒入土深度 L 的关系, 式中 d 为与 D 和 K 相关的值, 它在 -0.72 ~ 0 之间变化, 且随着 K 的增加而减小。

3 桩-筒复合基础竖向承载特性

3.1 系数 K 对竖向承载力系数的影响

桩-筒复合基础的竖向承载力特性通过竖向

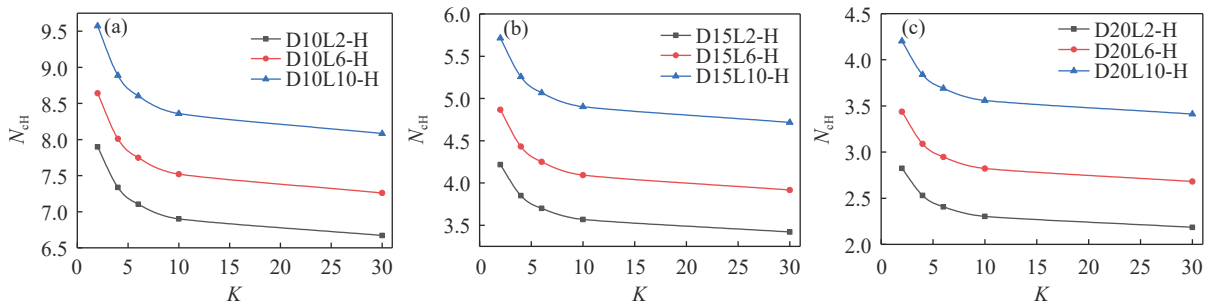


图 5 桩-筒复合基础水平承载系数 N_{cH} 与 K 之间的关系. (a) $D=10$ m; (b) $D=15$ m; (c) $D=20$ m

Fig.5 Horizontal bearing capacity factors of the pile-bucket composite foundations (N_{cH}) with K : (a) $D=10$ m; (b) $D=15$ m; (c) $D=20$ m

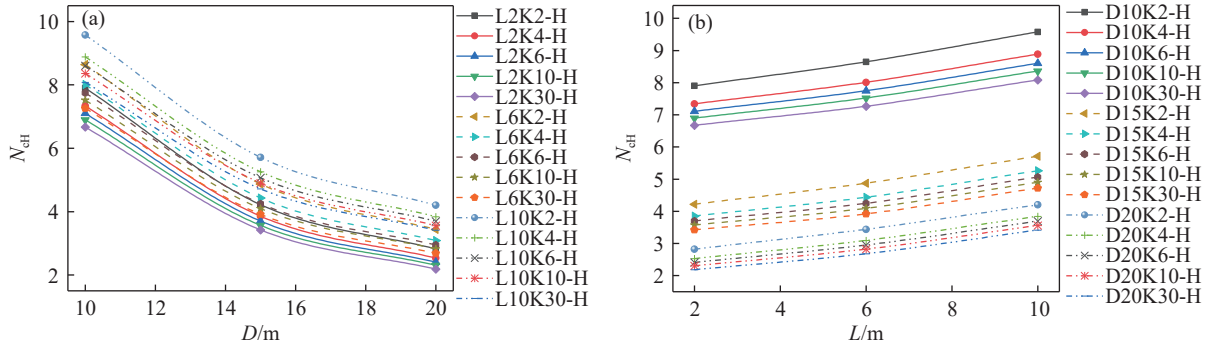


图 6 桩-筒复合基础水平承载系数 N_{ch} 与 D (a) 和 L (b) 的关系

Fig.6 Horizontal bearing capacity factors of the pile-bucket composite foundations (N_{ch}) with D (a) and L (b)

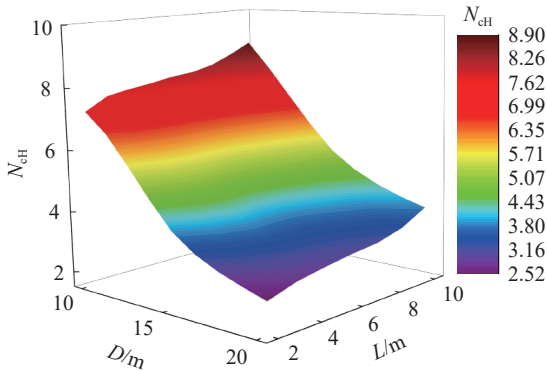


图 7 D 和 L 对水平承载特性的影响

Fig.7 Effect of D and L on the horizontal bearing capacity factors

承载力系数值 N_{cV} 描述, $N_{cV} = V_{ult}/AS_{u0}$. 图 8(a)、(b)、(c) 分别为筒直径 $D = 10、15、20$ m 时, N_{cV} 与 K 之间的关系. 从图中可以看出 K 对 N_{cV} 影响较小, 随着 K 的增加 N_{cV} 大小变化较小. 筒入土深度较小时, N_{cV} 与 K 呈较缓变化的指数关系, 且随着 K 的增加 N_{cV} 逐渐减小; 当 K 的增加到一定值时, N_{cV} 大小趋于稳定. 当筒入土深度 L 较大时, N_{cV} 不随着 K 变化而变化, N_{cV} 大小基本保持不变, 如 D20L10-V 中, $K = 2$ 时, $N_{cV} = 8.94$; $K = 30$ 时, $N_{cV} = 8.93$, 两者大小几乎相等.

图 9(a) 为 D20L10K2-V 在竖向荷载达到竖向极限承载力时土体等效塑性应变云图, 从图中可

知土体在筒底尖端处塑性应变最大, 此处土体最先开始破坏, 且在筒与桩之间土体形成锥形破坏连通区. 图 9(b) 为 D20L10K2-V 在竖向荷载达到竖向极限承载力时基础位移矢量图, 从图中可知桩-筒复合基础在竖向荷载作用下呈锥形竖向刺入破坏模式.

3.2 筒直径 D 和入土深度 L 对竖向承载特性的影响

图 10 为桩-筒复合基础竖向承载力系数与筒结构尺寸的关系图. 图 10(a) 为 D 与 N_{cV} 的关系图, 图 10(b) 为 L 与 N_{cV} 的关系图. 图 10(a) 中 N_{cV} 随着 D 增加逐渐变小; 当 L 较小时, N_{cV} 与 D 之间为明显的曲线递减关系; 当 L 较大时, N_{cV} 与 D 之间为曲线递减关系, 但随着 D 增加, N_{cV} 减小趋势变缓. 图 10(b) 中 N_{cV} 随着 L 增加逐渐增加; 当 D 为 10 m 和 15 m 时, N_{cV} 与 L 为线性关系. 图 11 为桩-筒复合基础竖向承载力系数与 $D、L$ 之间的三维关系图, 图中可以看出当 L/D 较小时, N_{cV} 变化较小. 研究结果表明 D 与 L 对桩-筒复合基础的 N_{cV} 的影响存在交互作用关系.

4 桩-筒复合基础抗弯承载特性

4.1 系数 K 对抗弯承载力系数的影响

同上两节相似, 桩-筒复合基础的抗弯承载特性通过抗弯承载力系数值 N_{cM} 描述, 其中 $N_{cM} =$

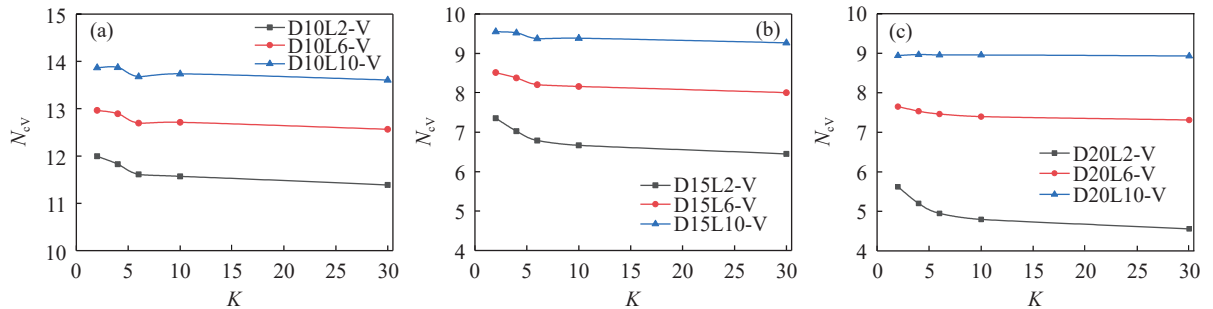


图 8 桩-筒复合基础竖向承载系数 N_{cV} 与 K 之间的关系. (a) $D = 10$ m; (b) $D = 15$ m; (c) $D = 20$ m

Fig.8 Vertical bearing capacity factors of the pile-bucket composite foundations (N_{cV}) with K : (a) $D = 10$ m; (b) $D = 15$ m; (c) $D = 20$ m

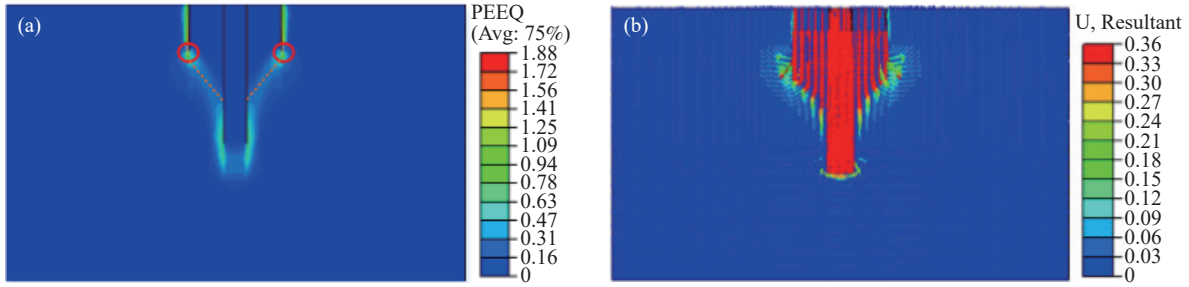


图 9 竖向加载极限状态基础等效塑性应变云图 (a) 和位移矢量图 (b)(D20L10K2-V)

Fig.9 Equivalent plastic strain distribution (a) and displacement vector diagram (b) under the ultimate vertical bearing state

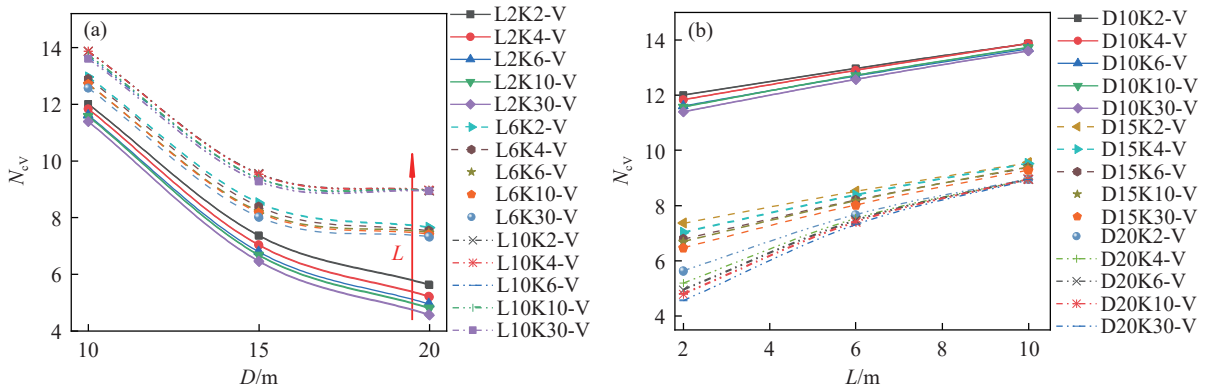


图 10 桩-筒复合基础竖向承载系数 N_{cv} 与 D (a) 和 L (b) 的关系

Fig.10 Vertical bearing capacity factors of the pile–bucket composite foundations (N_{cv}) with D (a) and L (b)

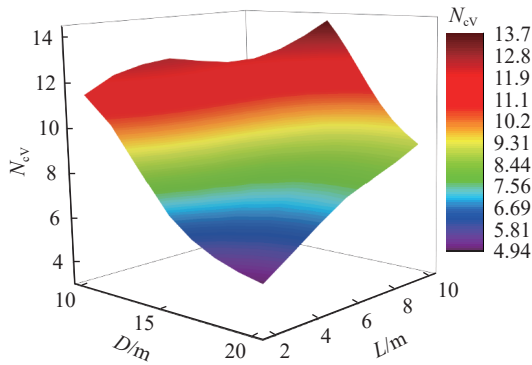


图 11 D 和 L 对竖向承载特性的影响

Fig.11 Effect of D and L on vertical bearing capacity factors of pile–bucket composite foundations

M_{ult}/ADS_{u0} . 图 12(a)、(b)、(c) 分别为筒直径 $D = 10、15、20$ m 时, 桩-筒复合基础 N_{cM} 与 K 之间的关系. 从图中可以看出 N_{cM} 与 K 之间为指数型关系, 并随着 K 的增加逐渐减小. N_{cM} 与 K 之间的关系进行拟合, 得到以下公式:

$$N_{cM} = f \times e^{(-0.25K)} + g \quad (4)$$

式 (4) 中系数 $f、g$ 与筒结构尺寸相关, 关系见图 13. 图 13(a) 所示 f 随着 L 的增加呈先增大后减小的趋势且随着 D 的增大而减小; 图 13(b) 所示 g 随着 L 的增加呈线性增加且随着 D 的增大而减小.

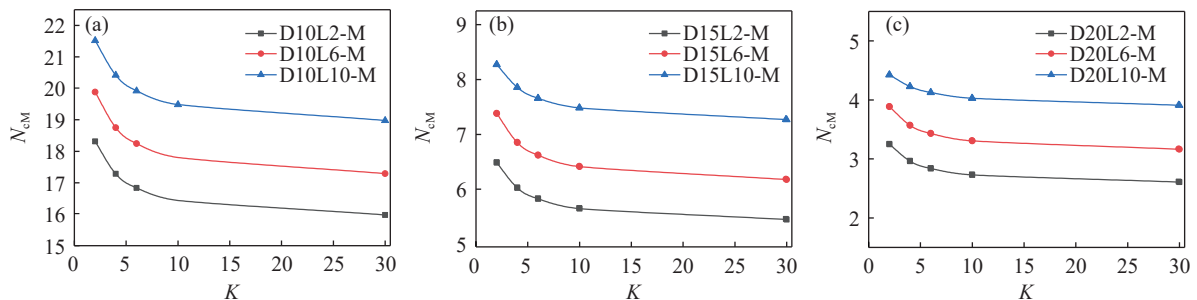


图 12 桩-筒复合基础抗弯承载系数 N_{cM} 与 K 之间的关系. (a) $D = 10$ m; (b) $D = 15$ m; (c) $D = 20$ m

Fig.12 Moment bearing capacity factors of the pile–bucket composite foundations with K : (a) $D = 10$ m; (b) $D = 15$ m; (c) $D = 20$ m

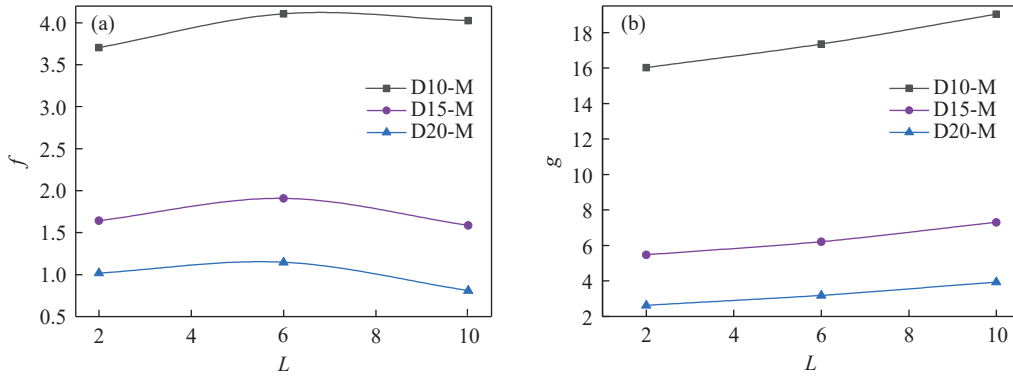


图 13 公式 (7) 中的系数. (a) f ; (b) g
Fig.13 Coefficients in Equation (7): (a) f ; (b) g

4.2 筒直径 D 和入土深度 L 对抗弯承载特性的影响

图 14 为桩-筒复合基础抗弯承载力系数 N_{cM} 与筒结构尺寸的关系. 图 14(a) 为 D 与 N_{cM} 的关系

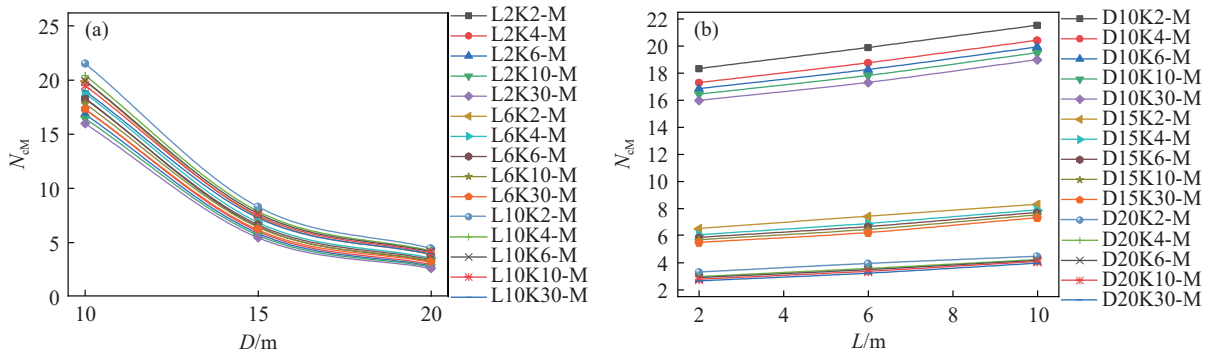


图 14 桩-筒复合基础抗弯承载力系数 N_{cM} 与 D (a) 和 L (b) 的关系
Fig.14 Moment bearing capacity factors of the pile-bucket composite foundations with D (a) and L (b)

同水平承载力系数 N_{cH} 的影响规律相似, D 与 L 对桩-筒复合基础的 N_{cM} 的影响也存在交互作用, 且 D 对 N_{cM} 的影响相对 L 的效果更为显著, 如图 15 所示.

5 影响因素的主次分析

正交试验法是一种可以安排多因素多水平试验的方法, 根据均衡分布的思想, 能够合理而高效地对影响因素进行分析. 正交试验法具有正交性、均衡分散性以及综合可比性等特点, 通过正交试验表可以合理试验, 有效降低试验次数. 正交试验法主要包含因素、水平和正交试验表^[28]. 桩-筒复合基础的各向承载力系数与基础尺寸和饱和黏土非匀质特性有很大的关系, 通过正交试验法对影响因素权重进行分析, 为桩-筒复合基础在工程中的应用提供依据.

5.1 正交试验方案

本文正交试验通过合理安排影响因素大小,

图, 图 14(b) 为 L 与 N_{cM} 的关系图. 由图 14(a) 可知, N_{cM} 随着 D 增加逐渐减小; D 相同时, N_{cM} 大小相近, 且随着 D 增加, N_{cM} 逐渐向某一数值靠拢. 图 14(b) 中 N_{cM} 随着 L 增加呈线性增加.

研究桩直径 d 、桩入土深度 l 、筒直径 D 、筒入土深度 L 以及黏土非匀质特性系数 K 对桩-筒复合基础水平承载特性、竖向承载特性和抗弯承载特性的影响. 试验因素水平取 4, 即每种因素分别均匀取 4 个水平. 因素水平表见表 3.

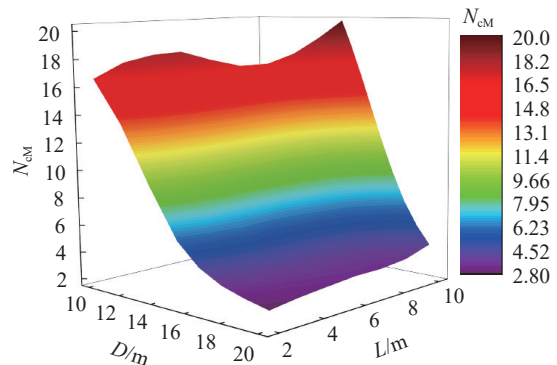


图 15 D 和 L 对抗弯承载特性的影响
Fig.15 Effect of D and L on the moment bearing capacity factors of the pile-bucket composite foundations

表 3 因素水平表

Table 3 Factors and levels

Levels	d/m	l/m	D/m	L/m	K
1	5	25	10	2	2
2	6	30	15	6	4
3	7	35	20	10	6
4	8	40	25	14	8

由因素水平表分析, 根据正交试验表选取方法, 选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表. 对正交试验表进行设计, 得到正交试验方案, 如表 4 所示. 表 4 中前 6 列为正交试验方案, 后 3 列为试验计算结果.

表 4 正交试验方案及结果

Table 4 Orthogonal scheme and results

Case	d/m	l/m	D/m	L/m	K	N_{cH}	N_{cV}	N_{cM}
1	5	25	10	2	2	6.94	11.27	1.13
2	5	30	15	6	4	3.67	7.21	0.48
3	5	35	20	10	6	3.50	7.31	0.37
4	5	40	25	14	8	3.44	8.24	0.33
5	6	25	15	10	8	5.10	10.75	0.72
6	6	30	10	14	6	10.02	16.46	1.65
7	6	35	25	2	4	1.89	4.16	0.17
8	6	40	20	6	2	3.76	7.17	0.36
9	7	25	20	14	4	4.35	10.80	0.54
10	7	30	25	10	2	3.65	8.44	0.34
11	7	35	10	6	8	10.26	18.29	1.83
12	7	40	15	2	6	5.35	9.83	0.66
13	8	25	25	6	6	2.80	7.09	0.28
14	8	30	20	2	8	3.09	6.85	0.34
15	8	35	15	14	2	7.69	12.86	0.86
16	8	40	10	10	4	12.18	21.36	2.14

5.2 结果分析

通过合理地分析正交试验结果, 可以确定试验因素的主次、各试验因素的优水平及试验范围内的最优组合. 极差分析法 (R 法) 可以直观简便的分析试验结果, 确定因素的主次. 表 5、表 6 和表 7 分别为对 N_{cH} 、 N_{cV} 、 N_{cM} 的极差分析结果. 上述表格中 $N_{cH(1)}$ 、 $N_{cH(2)}$ 、 $N_{cH(3)}$ 、 $N_{cH(4)}$ 分别代表各因素在不同水平时水平承载力系数 N_{cH} 之和, R 为不同因素的极差.

由表 5 可以看出, 5 个因素在 4 个不同水平时, 对桩-筒复合基础水平承载力系数影响的因素从主到次的顺序为 $D > d > L > l > K$. D 对水平承载特

表 5 水平承载力系数 N_{cH} 极差分析

Table 5 Range analysis of N_{cH}

Coefficient	d/m	l/m	D/m	L/m	K
$N_{cH(1)}$	17.68	19.26	39.57	17.49	22.13
$N_{cH(2)}$	20.73	20.48	21.99	20.55	22.15
$N_{cH(3)}$	23.79	23.41	14.71	24.48	21.84
$N_{cH(4)}$	25.85	24.91	11.79	25.53	21.93
R of N_{cH}	8.18	5.65	27.78	8.03	0.32
Priority of factors	$D > d > L > l > K$				

表 6 竖向承载力系数 N_{cV} 极差分析

Table 6 Range analysis of N_{cV}

Coefficient	d/m	l/m	D/m	L/m	K
$N_{cV(1)}$	34.66	40.32	67.70	32.11	40.41
$N_{cV(2)}$	39.26	39.55	41.46	40.32	43.63
$N_{cV(3)}$	47.40	43.33	32.54	48.51	41.54
$N_{cV(4)}$	48.79	46.90	28.40	49.16	44.52
R of N_{cV}	14.13	7.36	39.29	17.05	4.12
Priority of factors	$D > L > d > l > K$				

表 7 抗弯承载力系数 N_{cM} 极差分析

Table 7 Range analysis of N_{cM}

Coefficient	d/m	l/m	D/m	L/m	K
$N_{cM(1)}$	28.25	24.91	104.27	30.94	35.60
$N_{cM(2)}$	36.86	35.04	36.70	42.98	49.91
$N_{cM(3)}$	46.74	49.12	17.33	52.80	40.97
$N_{cM(4)}$	57.82	60.59	11.38	42.96	43.19
R of N_{cM}	29.57	35.67	92.89	21.86	14.31
Priority of factors	$D > l > d > L > K$				

性影响最大, D 因素的影响极差为 27.78, 而其他影响因素对水平承载系数的极差都低于 10. 结果表明桩-筒复合基础的水平承载特性主要受横向尺寸 (D 和 d) 影响.

由表 6 可以看出, 5 个因素在 4 个不同水平时, 对桩-筒复合基础竖向承载力系数影响的因素从主到次的顺序为 $D > L > d > l > K$. 桩-筒复合基础的筒直径 D 对竖向承载特性影响最大, D 因素的影响极差为 39.29, 而其他影响因素对竖向承载系数的极差相对较小. 结果表明桩-筒复合基础的竖向承载特性主要受筒结构尺寸 (D 和 L) 影响, 对桩-筒复合基础竖向承载力进行设计时应优先考虑筒结构尺寸.

由表 7 可以看出, 5 个因素在 4 个不同水平时, 对桩-筒复合基础抗弯承载力系数影响的因素

从主到次的顺序依次为筒直径 D > 桩入土深度 l > 桩直径 d > 筒入土深度 L > 饱和黏土非匀质特性系数 K 。桩-筒复合基础的筒直径 D 对抗弯承载特性影响最大,筒直径 D 因素的影响极差为 92.89,而其他影响因素对抗弯承载系数的极差相对较小。结果表明筒直径 D 对桩-筒复合基础的抗弯承载特性影响较大。

综上所述,筒直径 D 对桩-筒复合基础各向承载特性都有很大的影响,在单桩基础周围增加筒结构组成复合基础可以有效地提高基础的承载性能。

6 结论

本文考虑了饱和黏土非匀质特性系数 K 、筒结构直径 D 和入土深度 L 等因素,通过数值计算方法得到不同荷载作用下桩-筒复合基础的极限承载力,并转化为承载力系数,研究了筒结构尺寸对饱和黏土中桩-筒复合基础承载性能的影响,并通过正交试验法对桩-筒复合基础承载性能的影响因素进行分析,得到以下结论:

(1)筒结构尺寸对桩-筒复合基础各向极限承载力系数影响较大, D 和 L 对各向承载力系数的影响具有交互作用。

(2) K 对竖向承载力系数 N_{cV} 影响较小,并且随着筒结构入土深度增加, K 对 N_{cV} 的影响越小。水平承载力系数 N_{cH} 和抗弯承载力系数 N_{cM} 随 K 的增大而呈指数型减小。

(3) N_{cV} 、 N_{cH} 和 N_{cM} 随着 D 的增加而指数型减小,随着 L 增加而线性增大。

(4)正交试验结果表明, D 对桩-筒复合基础承载性能的影响最大,而 K 的影响最小。在建造成本可控的条件下,增加筒结构直径是提高桩-筒复合基础的承载能力最有效的方式。

参 考 文 献

- [1] Sun X J, Huang D G, Wu J pomg Q. The Current state of offshore wind energy technology development. *Energy*, 2012, 41(1): 298
- [2] Zou C N, Xiong B, Xue H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral. *Petroleum Explor Dev*, 2021, 48(2): 480
- [3] Esteban M D, Diez J J, López J S, et al. Why offshore wind energy? *Renew Energy*, 2011, 36(2): 444
- [4] Díaz H, Soares C G. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. *Ocean Eng*, 2020, 209: 107381
- [5] Veers P, Dykes K, Lantz E, et al. Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, 2019, 366(6464): eaau2027
- [6] Desmond C, Murphy J, Blonk L, et al. Description of an 8 MW reference wind turbine. *J Phys: Conf Ser*, 2016, 753: 092013
- [7] Kong D S, Liu Y, Deng M X, et al. Dynamic response characteristics of an offshore, wind-power monopile foundation in heterogeneous soil. *Chin J Eng*, 2021, 43(5): 710
(孔德森, 刘一, 邓美旭, 等. 非均质土中海上风电单桩基础动力响应特性. *工程科学学报*, 2021, 43(5): 710)
- [8] Song B, Zhao W N, Shuang M. Analysis of the influence of scour depth on the dynamic response of offshore wind turbine towers under earthquake action. *Chin J Eng*, 2019, 41(10): 1351
(宋波, 赵伟娜, 双妙. 冲刷深度对海上风电塔地地震动力响应的影响分析. *工程科学学报*, 2019, 41(10): 1351)
- [9] Faizi K, Faramarzi A, Dirar S, et al. Investigating the monotonic behaviour of hybrid tripod suction bucket foundations for offshore wind towers in sand. *Appl Ocean Res*, 2019, 89: 176
- [10] Yang Q, Yu P, Liu Y F, et al. Scour characteristics of an offshore umbrella suction anchor foundation under the combined actions of waves and currents. *Ocean Eng*, 2020, 202: 106701
- [11] Li H J, Liu H J, Liu S Y. Dynamic analysis of umbrella suction anchor foundation embedded in seabed for offshore wind turbines. *Geomech Energy Environ*, 2017, 10: 12
- [12] Wang X F, Zeng X W, Yang X, et al. Feasibility study of offshore wind turbines with hybrid monopile foundation based on centrifuge modeling. *Appl Energy*, 2018, 209: 127
- [13] Zhu D J. *Research of a New Type of Foundation for Offshore Wind Turbines with the Combining of Monopile Foundation and Bucket Foundation* [Dissertation]. Tianjin: Tianjin University, 2012
(朱东剑. 筒型基础与单桩相结合的新型复合风电基础研究[学位论文]. 天津: 天津大学, 2012)
- [14] Liu R, Li B R, Lian J J, et al. Bearing characteristics of pile-bucket composite foundation for offshore wind turbine. *J Tianjin Univ (Sci Technol)*, 2015, 48(5): 429
(刘润, 李宝仁, 练继建, 等. 海上风电单桩复合筒型基础桩筒共同承载机制研究. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2015, 48(5): 429)
- [15] Liu R, Qi Y, Li B R, et al. Failure envelopes of single-pile composite bucket foundation of offshore wind turbine under combined loading conditions. *Rock Soil Mech*, 2016, 37(5): 1486
(刘润, 祁越, 李宝仁, 等. 复合加载模式下单桩复合筒型基础地基承载力包络线研究. *岩土力学*, 2016, 37(5): 1486)
- [16] Wang J Y, Sun G D, Chen G S, et al. Finite element analyses of improved lateral performance of monopile when combined with bucket foundation for offshore wind turbines. *Appl Ocean Res*, 2021, 111: 102647
- [17] Chen D, Gao P, Huang S S, et al. Static and dynamic loading behavior of a hybrid foundation for offshore wind turbines. *Mar Struct*, 2020, 71: 102727
- [18] Liu H J, Zhang P, Wang Q D, et al. Optimum structural design and loading advantage analysis of pile-bucket foundation. *J Harbin Eng Univ*, 2018, 39(7): 1165
(刘红军, 张鹏, 王荃迪, 等. 桩筒复合基础筒体结构优化及承载

- 性能分析. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(7): 1165)
- [19] Li X Y, Zeng X W, Wang X F. Feasibility study of monopile-friction wheel-bucket hybrid foundation for offshore wind turbine. *Ocean Eng*, 2020, 204: 107276
- [20] Mehravar M, Harireche O, Faramarzi A. Evaluation of undrained failure envelopes of caisson foundations under combined loading. *Appl Ocean Res*, 2016, 59: 129
- [21] Hung L C, Kim S R. Evaluation of combined horizontal-moment bearing capacities of tripod bucket foundations in undrained clay. *Ocean Eng*, 2014, 85: 100
- [22] Yun G, Bransby M F. The horizontal-moment capacity of embedded foundations in undrained soil. *Can Geotech J*, 2007, 44(4): 409
- [23] Hung L C, Kim S R. Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads. *Mar Georesources Geotechnol*, 2014, 32(1): 76
- [24] Xiao Z, Wang Y, Wang Y Z, et al. Effect of bucket separation distance on bearing capacity of tetrapod bucket foundations and determination of optimal separation distance. *Rock Soil Mech*, 2018, 39(10): 3603
(肖忠, 王琰, 王元战, 等. 桶间距对四桶吸力式基础各单向承载力的影响及最优间距的确定. *岩土力学*, 2018, 39(10): 3603)
- [25] Hung L C, Kim S R. Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay. *Ocean Eng*, 2012, 52: 75
- [26] Butterfield R, Housby G T, Gottardi G. Standardized sign conventions and notation for generally loaded foundations. *Géotechnique*, 1997, 47(5): 1051
- [27] Byrne B W, Cassidy M J. Investigating the response of offshore foundations in soft clay soils // *Proceedings of ASME 2002 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Oslo, 2009: 263
- [28] Ren L Q. *Experimental Design and Optimization*. Beijing: Science Press, 2009
(任露泉. 试验设计及其优化. 北京: 科学出版社, 2009)