

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

刘 润¹, 祁 越¹, 李宝仁^{1,2}, 练继建¹, 丁红岩¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津市勘察院, 天津 300191)

摘 要: 海上风力发电机属于高耸结构物, 其地基基础不仅要承受上部结构传递的竖向荷载 V 、水平荷载 H , 更要抵抗巨大的弯矩荷载 M 。单桩复合筒型基础是新型的海上风力发电机基础型式, 建立复合加载模式下单桩复合筒型基础地基的破坏包络线, 并据此评价其稳定性是地基基础设计的重要手段。在 Swipe 加载方法和固定位移比加载方法的基础上, 通过数值分析研究了不排水饱和软黏土中单桩复合筒型基础在 $V-H$ 、 $V-M$ 、 $H-M$ 和 $V-H-M$ 加载模式下的地基承载力包络线, 开展了室内模型试验, 验证了数值分析结果的可靠性。研究表明, $V-H$ 和 $V-M$ 加载模式下地基承载力包络线具有对称性, 而 $H-M$ 加载模式下呈非对称性; $V-H-M$ 加载模式下地基承载力包络线的形状受弯矩荷载 M 的影响显著, 表现为随着弯矩荷载的增加, $V-H$ 平面内的破坏包络线逐渐缩小。实际工程中, 可根据受力状态与破坏包络面的相对关系, 评价单桩复合筒型基础的稳定性。

关 键 词: 单桩复合筒型基础; 复合加载; Swipe 试验方法; 破坏包络面; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 05-1486-11

Failure envelopes of single-pile composite bucket foundation of offshore wind turbine under combined loading conditions

LIU Run¹, QI Yue¹, LI Bao-ren^{1,2}, LIAN Ji-jian¹, DING Hong-yan¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, Tianjin 300191, China)

Abstract: The wind turbine is a high-rise structure, which is subjected to both the vertical loading due to structural weight and the horizontal loading and moment due to blade-induced or tower-induced loading. In designing offshore platforms, it is crucial to evaluate the overall stability and the failure mechanisms of the single-pile composite bucket foundation of the wind turbine under combined loading conditions. Based on the Swipe test loading method and the fixed displacement ratio loading method, this paper investigates the failure envelopes of the single-pile composite bucket foundation on the soft soil ground under undrained conditions in the $V-H$, $V-M$, $H-M$ and $V-H-M$ spaces by using the finite element method. It is shown that the failure envelopes in $V-H$ and $V-M$ space are symmetrical, while the failure envelope in $H-M$ space is asymmetrical. Moment load affects the shape of failure envelope in $V-H-M$ space, the failure envelopes of $V-H$ space recedes as the moment load increases. By using the relationship between the actual combined loading and the computed failure envelopes, the stability of single-pile composite bucket foundation can be evaluated in engineering practice.

Keywords: single-pile composite bucket foundation; combined loading; Swipe test procedure; failure envelope; model test

1 引 言

风能作为一种清洁的可再生能源, 越来越受到世界各国的重视。与陆上风电场相比, 海上风电场具有节省土地资源、风速高而且持续、不用考虑复杂地形对气流的影响、对周围环境的影响小等优点,

因而海上风电已成为未来风电发展的必然趋势^[1]。我国拥有十分丰富的近海风能资源, 可开发风能资源估计在 10 亿 kW 以上, 其中海上风电资源占 7.5 亿 kW, 具有很大的商业化、规模化发展的潜力^[2]。

由于海洋环境极其恶劣, 作为高耸结构物除受自重荷载长期作用外, 还受到暴风雨、海浪、海风

收稿日期: 2014-07-30

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目 (No. 51021004); 国家国际科技合作专项项目 (No. 2012DFA70490)。

This work was supported by the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (51021004) and the International Science & Technology Cooperation (2012DFA70490).

第一作者简介: 刘润, 女, 1974 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: liurun@tju.edu.cn

等瞬时或循环作用,因此,海上风机受到巨大的水平荷载作用。水平荷载通过塔筒等上部结构传至基础顶面,导致地基基础在承受竖向荷载作用的同时还需承受巨大的水平力和弯矩荷载。针对这一荷载作用特点,结合我国近海土质条件,天津大学海上风电课题组研发了单桩复合筒型基础结构^[3]。该基础型式可同时发挥桩基础有效控制竖向变形与筒型基础有效控制水平变形的优势^[4]。由于传统的地基承载力理论不能完全考虑海上风机基础的承载特点,因此,现有海上风电基础的设计较为保守,建设费用昂贵^[5]。Houlsby^[6]、Zhang^[7]等分别对筒型基础、管桩基础进行了原位试验与离心机模型试验,一致认为,基础在弯矩荷载作用下或者包含弯矩荷载分量在内的复合加载条件下往往更容易遭到失稳破坏。鉴于此,开展新型海上单桩复合筒型基础的地基稳定性研究尤为重要。

地基承载力破坏包络线(面)研究是揭示复合加载模式下地基承载力极限状态的有效方法,所谓地基破坏包络线(面)是指在水平荷载、竖向荷载和弯矩荷载共同作用下,地基达到整体破坏或极限平衡状态时,各个荷载分量的组合在三维荷载空间(竖向荷载 V 、水平荷载 H 、弯矩荷载 M)中形成的一个外凸曲面。当荷载组合位于破坏包络线(面)以内时,则地基处于稳定状态,反之地基失稳。将该方法应用于地基承载力研究多见于针对筒型基础和单桩基础。Taiebat等^[8]采用数值分析方法研究了无埋深圆形基础复合加载模式下,在均质饱和软黏土地基中的承载特性,获得了圆形基础在 V - H - M 三维空间中的地基承载力包络面,提出了包络面的数学表达式,其研究成果与Bransby等^[9]的研究成果在二维 V - H 、 V - M 空间中相近,但在三维 V - H - M 空间中差别较大。赵少飞等^[10]基于FLAC软件研究了位于非均质地基上的无埋深条形基础和圆形基础在复合加载模式下的地基承载力和破坏模式,比较了研究成果与经典的Skempton与Peck公式,表明Skempton与Peck公式有可能高估了非均质地基的承载力。Govoni等^[11]对位于中等密实砂上的圆形基础进行了地基承载力离心机试验,根据试验数据得到了复合加载模式下圆形基础的地基承载力包络线。Gourvenec等^[12]通过有限元计算得到了位于均质和非均质地基上不同埋深的带裙板条形基础在不同荷载共同作用下的地基承载力包络线,并且提出了能够合理估算地基承载力大小的表达式。Zhang等^[13]通过三维数值分析方法,研究了均质和非均质不排水饱和软黏土地基上不同埋深的圆形基础在复

合加载模式下地基承载力及破坏模式,得到了地基承载力包络线和判断地基稳定性的数学表达式。对于单桩基础,王俊岭等^[14]利用有限元数值分析软件对复合加载模式下海上风机桩基础破坏机制进行了详细地研究,确定了 V 、 H 和 M 共同作用下桩基础的破坏模式及在荷载空间(V 、 H 、 M)中的破坏包络面,并根据破坏包络面与实际桩基受力状态之间的相对关系,评价实际荷载状态下海上风机桩基础的稳定性。刘冰雪等^[15-16]应用有限元数值分析软件,研究了海上风机3桩及4桩基础结构在单调荷载及复合荷载作用下的承载力特性并得到 V - H 荷载空间内的破坏包络线,探讨了荷载作用方向、单桩桩径及桩间距对海上风机多桩基础极限承载力的影响。刘润等^[17]对海上风电宽浅式筒型基础进行了承载特性研究,运用数值模拟方法获得了不排水饱和软黏土中宽浅式筒型基础地基承载力的包络线。由此可见,运用数值分析方法建立不同形式基础的地基承载力包络面是评价地基稳定性的重要途径。

本文针对天津大学海上风电课题组研发的新型基础型式——单桩复合筒型基础,运用承载力包络线的数值分析方法,得到了单桩复合筒型基础在 V - H 、 V - M 、 H - M 和 V - H - M 荷载空间内的破坏包络线(面),并开展了该种新型基础形式的室内模型试验研究,验证了数值分析方法的可靠性。

2 分析方法与模型

2.1 数值分析方法

采用Swipe试验加载法和固定位移比加载法获得地基承载力包络线(面)。

Swipe试验方法是由Tan^[18]提出的,这种加载方法可以在荷载空间中直接搜寻地基承载力包络线的大致形状。固定位移比法可以搜寻任意荷载空间里地基的加载路径,通过多条加载路径来确定相应荷载空间里地基承载力包络线。Swipe加载模式和固定位移比法加载模式的程序示意图如图1、2所示,图中 u_k 为水平位移, u_j 为竖向位移。

Swipe试验法加荷模式简单,可以一次搜寻到地基承载力包络线的大致形状,对于具有对称性的包络线,采用该方法获得的计算结果较为精确。固定位移比法计算过程繁杂,需多次计算获得加荷路径后最终确定包络线,但该方法对各种加荷模式具有普遍的实用性,对对称性没有要求。因此,在研究对称性较好的 V - H 和 V - M 加荷空间时采用了Swipe试验法,而其他的荷载组合均采用了固定位移比法。

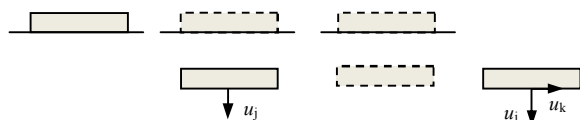


图1 Swipe 位移加载模式
Fig.1 Loading mode of Swipe

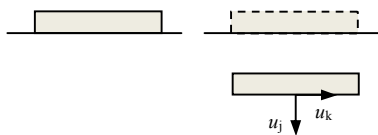


图2 固定位移比加载模式
Fig.2 Loading modes at constant displacement ratio

2.2 数值分析模型

采用通用有限元软件 ABAQUS^[19]建立单桩复合筒型基础的数值分析模型,模拟均质不排水饱和软黏土地基上受到复合荷载作用的单桩复合筒型基础。基础结构采用线弹性本构模型,钢材材质,密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,变形模量为 210 GPa ,屈服应力为 448 MPa 。土体采用基于 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构模型,泊松比取 $\nu = 0.49$ 。Tresca 准则是 Coulomb-Mohr 准则在 $\varphi = 0$ 时的特殊情况,适用于 $\varphi = 0$ 的饱和软黏土。研究表明^[20],地基土弹性模量的大小对其极限承载力的数值影响较小,为了提高计算的收敛性和速度,地基土弹性模量近似地与其不排水抗剪强度成比例,取 $E = 500s_u$,其中 s_u 为地基土不排水抗剪强度,取 $s_u = 20\text{ kPa}$ 。

参照实际情况及以往的研究经验^[21-24],建立单桩复合筒型基础有限元模型,如图3所示。基桩总长为 l_p ,筒顶面以下即基桩入土深度 l ,外直径为 d ,壁厚 $t_p = 40\text{ mm}$,基桩直径及壁厚沿桩长不变。基础筒模型埋深即筒裙长度为 L ,顶盖厚 $t_{bs} = 50\text{ mm}$,基础筒总长为 L_b ,外直径为 D ,半径为 R ,壁厚 $t_b = 100\text{ mm}$,基础筒直径及壁厚沿筒长不变。

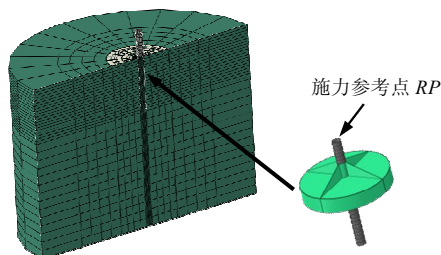


图3 有限元计算模型
Fig.3 Finite element model used in analyses

单向位移加载模式下对应单桩复合筒型基础顶

中心 RP 处的竖向荷载 V 、水平荷载 H 和弯矩荷载 M ,如图4所示。基础发生水平位移 h 、竖向位移 v 和转角位移 θ ,所施加和计算得到的荷载、位移均按照 Butterfield^[25]等所建议的评判标准规定。文中用到的荷载和位移符号如表1、2所示。

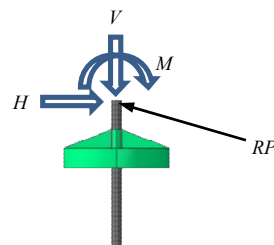


图4 施加在基础上的荷载
Fig.4 Loads of footing on the foundation

表1 荷载标记方法

Table 1 Load nomenclature methods

荷载	无量纲值	极限荷载	归一化极限荷载
H	$N_H = H/(As_u)$	H_{ult}	H/H_{ult}
V	$N_V = V/(As_u)$	V_{ult}	V/V_{ult}
M	$N_M = M/(ADs_u)$	M_{ult}	M/M_{ult}

注: A 为基础筒顶面面积。

表2 位移标记方法

Table 2 Displacement nomenclature methods

位移	无量纲值	归一化值
h	h/D	h/D
v	v/D	v/D
θ	$2R\theta/D$	$2R\theta/D$

3 单向加载的极限承载力研究

因为基桩直径 d 与基础筒直径 D 为单桩复合筒型基础结构的主要参考因素,为了考虑二者对地基水平承载力、竖向承载力和抗倾覆能力的影响, D/d 分别取 2、3、4、6 进行研究,并以单向加载模式下的地基极限承载力为归一化基准,对计算结果进行了无量纲处理。

3.1 水平向极限承载力

在不同筒桩直径比模型顶端施加水平向位移,得到不同直径比与地基水平极限承载力的关系曲线及等效应变分布如图5、6所示。

由图5可知,随着筒桩直径比 D/d 的增大,单桩复合筒型基础地基水平极限承载力逐渐减小。对于 $2 \leq D/d \leq 6$ 的单桩复合筒型基础,可得到水平向极限承载力拟合公式为

$$\frac{H_{ult}}{As_u} = -0.04 \left(\frac{D}{d} \right)^3 + 0.6 \left(\frac{D}{d} \right)^2 - 3.3 \left(\frac{D}{d} \right) + 11.0 \quad (1)$$

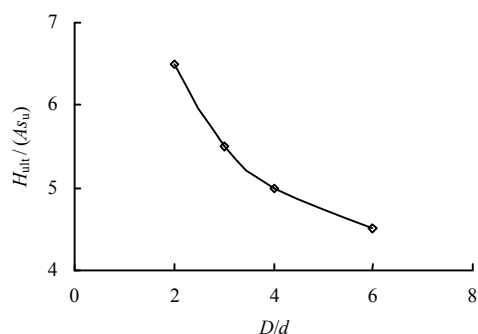


图5 水平极限承载力与筒桩直径比的关系
Fig.5 Relationship between the ultimate horizontal bearing capacity and diameter ratio (D/d)

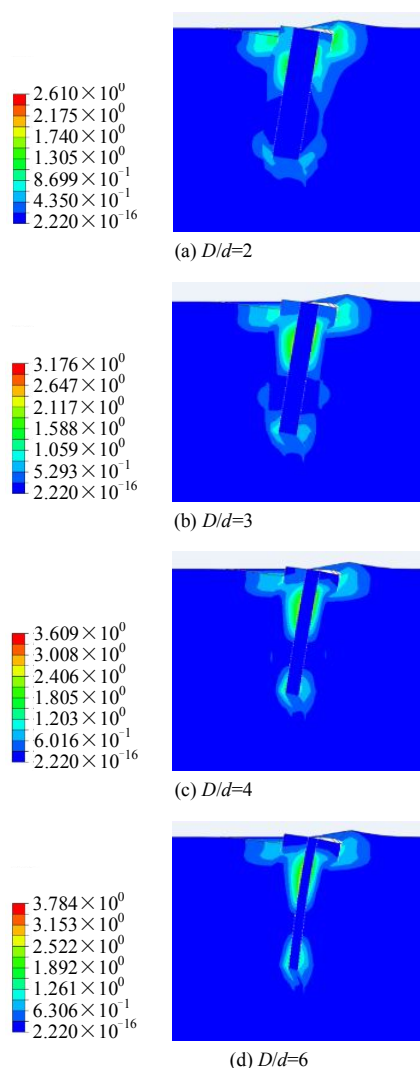


图6 水平加载极限状态地基等效塑性应变分布
Fig.6 Equivalent plastic strain distribution of foundation under ultimate horizontal bearing state

由图6可知,单桩复合筒型基础基桩在桩底形成较明显的圆形破坏区域,桩身底部与地基土接触区域产生较大的剪切破坏,且随着 D/d 的增大,圆形破坏区域明显减小,说明基础筒直径一定时,增加基桩直径,基桩所承担的水平力增大,基础结构可以有效地提高基础协同抵抗水平力的效果。

3.2 竖向极限承载力

图7、8分别为单桩复合筒型基础不同直径比对地基竖向极限承载力的影响关系曲线及等效应变分布图。

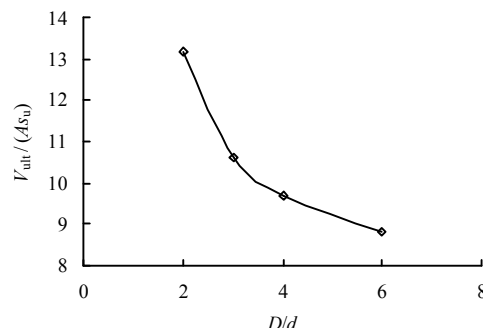


图7 竖向极限承载力与筒桩直径比的关系
Fig.7 Relationship between the ultimate vertical bearing capacity and diameter ratio (D/d)

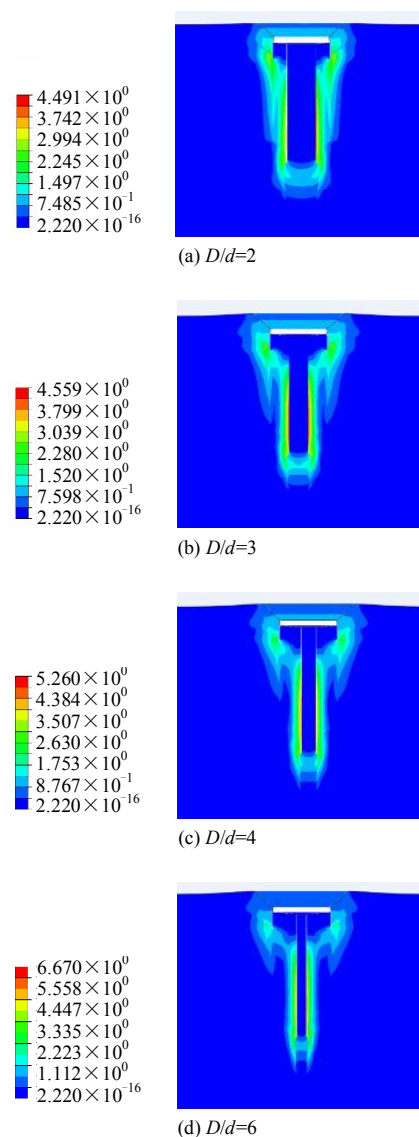


图8 竖向加载极限状态地基等效塑性应变分布
Fig.8 Equivalent plastic strain distribution of foundation under ultimate vertical bearing state

由图 7 数值计算结果可以得出, 单桩复合筒型基础地基水平极限承载力随着筒桩直径比 D/d 的增大而逐渐减小。对于 $2 \leq D/d \leq 6$ 的单桩复合筒型基础, 提出了由以下方程表示竖向极限承载力与基础直径比的拟合关系公式为

$$\frac{V_{ult}}{AS_u} = -0.2 \left(\frac{D}{d} \right)^3 + 2.3 \left(\frac{D}{d} \right)^2 - 10.8 \left(\frac{D}{d} \right) + 27.0 \quad (2)$$

由图 8 可知, 单桩复合筒型基础在竖向荷载作用下, 基础底部形成连贯的塑性破坏区, 基础的下沉使得基础与地基接触区产生剪切破坏, 从而造成基础两侧及其与地基接触区的塑性应变随着 D/d 的增大而逐渐减小, 表明增加基桩直径可以明显提高基础抵抗竖向荷载的整体效果。

3.3 极限抗倾覆能力

单桩复合筒型基础不同直径比对地基抗弯极限承载力的影响关系曲线及等效应变分布如图 9、10 所示。由图 9、10 可知, 单桩复合筒型基础在弯矩荷载作用下产生的地基破坏模式与水平荷载作用下地基的破坏模式相似, 即基础底部形成以基础内部某点为旋转中心的圆形旋转破坏面, 基础前侧土体被挤压隆起形成破坏楔体, 而基础后侧与土体产生分离形成贯通破坏。由此可知, 弯矩荷载与水平荷载对于基础地基破坏的作用效果是相似的。

通过地基抗弯极限承载力无量纲值 $M_{ult} / (ADS_u)$ 与筒桩直径比 D/d 之间的关系, 拟合得到抗弯极限承载力与基础直径比的拟合关系公式为

$$\frac{M_{ult}}{ADS_u} = -0.09 \left(\frac{D}{d} \right)^2 - 1.6 \left(\frac{D}{d} \right) + 19.9 \quad (3)$$

4 复合加载模式下地基承载力包络线

分别采用 Swipe 加载方法和固定位移比加载方法得到了单桩复合筒型性基础在 $V-H$ 、 $V-M$ 、 $H-M$ 二维加载模式和 $V-H-M$ 三维加载模式中地基承载力包络线(面)。

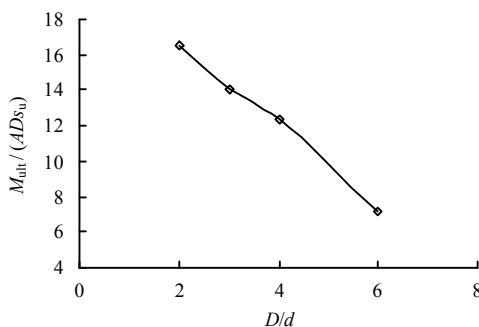


图 9 抗弯极限承载力与筒桩直径比的关系

Fig.9 Relationship between the ultimate moment bearing capacity and diameter ratios

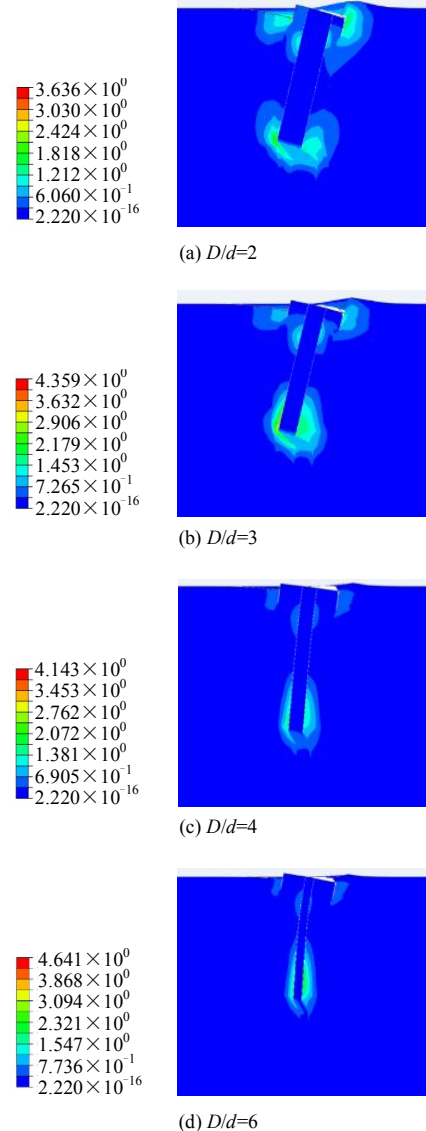


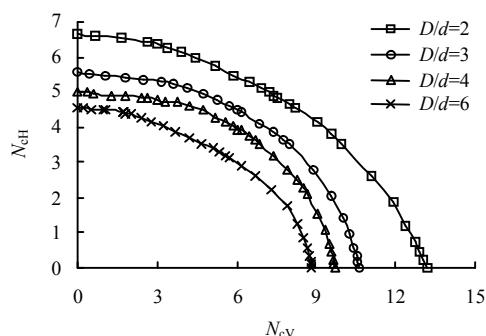
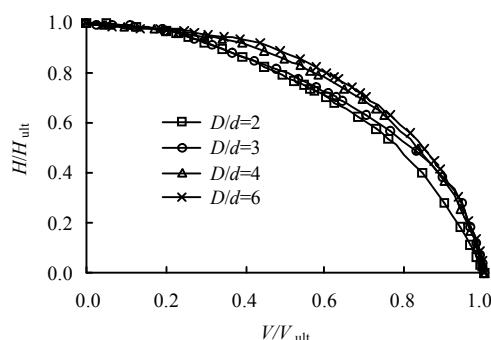
图 10 抗弯极限状态地基等效塑性应变分布

Fig.10 Equivalent plastic strain distribution of foundation under ultimate bending load state

4.1 V-H 荷载空间下地基破坏模式分析

采用 Swipe 试验法进行数值计算, 得出 $V-H$ 二维加载模式中不同直径比分别为 2、3、4、6 的单桩复合筒型基础的地基承载力包络线与归一化所得到的复合加载破坏包络线, 如图 11、12 所示。

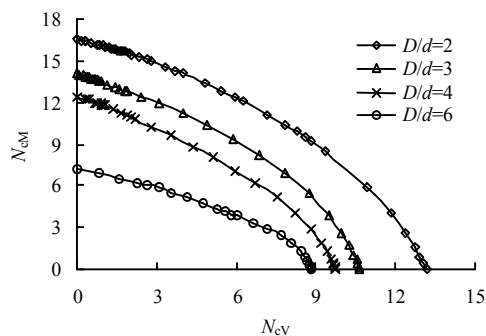
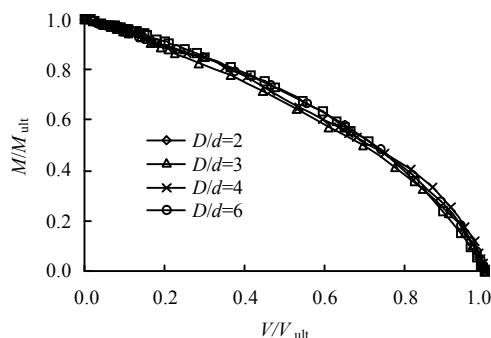
由图 11 可知, 单桩复合筒型基础在竖向、水平荷载共同作用下的承载能力随着 D/d 的增加而减小, 这与单调加载作用下的情况基本一致, 即当基础筒直径一定时, 增加基桩直径能够有效地提高基础协同作用的承载能力; 图 12 对地基竖向和水平向承载力进行了归一化分析, 从而使得单桩复合筒型基础在 $V-H$ 荷载空间中的包络线更具普遍意义。由图 11、12 可以看出, 归一化破坏包络线与地基承载力包络线变化趋势基本相似, 且各归一化包络线相差不大。

图 11 V - H 平面内的地基承载力包络线Fig.11 Failure envelopes in V - H loading space图 12 V - H 平面内的归一化破坏包络线Fig.12 Normalized failure envelopes in V - H loading space

4.2 V - M 荷载空间下地基破坏模式分析

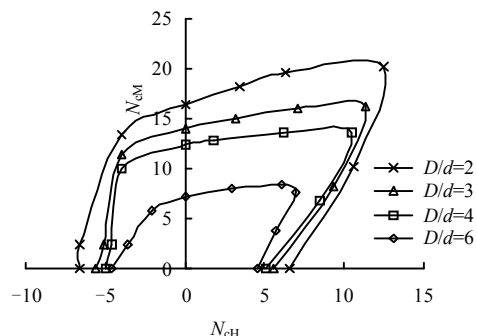
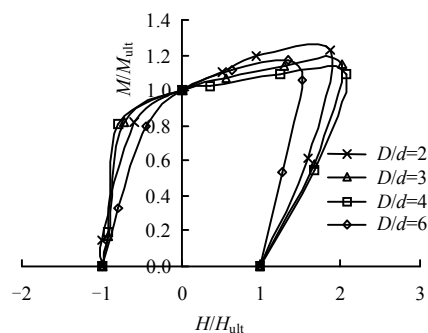
图 13 给出了 V - M 二维加载模式中不同直径比 D/d 分别为 2、3、4、6 的单桩复合筒型基础的地基承载力包络线,图 14 为对应的复合加载归一化所得到的破坏包络线。

由图 13 可知,在不同直径比 D/d 作用下,单桩复合筒型基础的复合加载破坏包络线变化趋势基本相似,在弯矩荷载及水平荷载共同作用下的包络线能随着 D/d 的增大而缩小,同样承载能力亦随之减小。图 14 分别对地基弯矩荷载和水平向承载力进行了归一化分析,可以看出,各归一化破坏包络线变化趋势基本相似。

图 13 V - M 平面内的地基承载力包络线Fig.13 Failure envelopes in V - M loading space图 14 V - M 平面内的归一化破坏包络线Fig.14 Normalized failure envelopes in V - M loading space

4.3 H - M 荷载空间下地基破坏模式分析

采用固定位移比法搜寻 H - M 二维加载模式,不同直径比 D/d 分别为 2、3、4、6 的单桩复合筒型基础的地基承载力包络线与归一化所得到的复合加载破坏包络线,如图 15、16 所示。

图 15 H - M 平面内的地基承载力包络线Fig.15 Failure envelopes in H - M loading space图 16 H - M 平面内的归一化破坏包络线Fig.16 Normalized failure envelopes in H - M loading space

由图 15、16 可知,在水平荷载和弯矩荷载的共同作用下, H - M 空间的地基承载力包络线呈现明显的非对称性,并且随着 D/d 的减小,承载力包络线的非对称性越明显。承载力包络线随着水平荷载的增大而逐渐向外扩张;当弯矩荷载达到抗弯极限承载力后,包络线出现陡降段,最终降至水平向承载力极限值。经归一化的地基破坏包络线与地基承载

力包络线变化趋势基本相似。

4.4 $V-H-M$ 荷载空间下地基破坏模式分析

对于不同直径比 D/d 分别为 2、3、4、6 的单桩复合筒型基础的 $V-H-M$ 荷载空间内的包络面特性进行研究, 首先在基础顶端直接施加不同比例大小的弯矩荷载极限承载力, 以此作为位移控制加载的初始状态, 保持弯矩荷载大小不变, 进行 $V-H$ 加载面上的 Swipe 加载法加载。

针对不同的弯矩荷载作用, 图 17、18 给出 $V-H-M$ 荷载空间内复合加载模下单桩复合筒型基础 ($D/d=2$) 的极限平衡状态时地基位移矢量图。

由图 17、18 可知, 当弯矩荷载分量 $M=0$ 时, 地基的破坏模式即 $V-H$ 二维加载模式中竖向与水平荷载均达到极限承载力时土体的破坏模式。随着弯矩荷载分量 M 的增大, 竖向、水平和转动自由度三者的耦合作用越发明显, 单桩复合筒型基础在基础筒及基桩底形成明显的圆形破坏区域, 圆形破坏区域随着弯矩荷载分量 M 的增大迅速扩大, 这一现象与竺存宏^[26]、范庆来^[27]、刘润^[17, 28]等关于筒型基础筒体转动中心处于基础底面以下假设的试验结果和数值分析结论相符, 即当筒体长径比控制在一定范围内时, 转动中心应位于地表与基底之间的某点上; 在基础主动区一侧的土体逐渐出现了裂缝, 被动区一侧的土体渐渐生成隆起, 形成了楔形塑性破坏区, 随着弯矩荷载分量 M 的增大, 出现的裂缝和隆起现象表现得更加明显。

经过对数值模拟过程分析, 得到数值加载试验

结果如图 19 所示。

由图 19 可知, 不同弯矩荷载作用下, 在 $V-H$ 荷载空间内地基破坏包络面形状基本相似; 随着弯矩荷载分量的增大, 在 $V-H$ 荷载空间内地基破坏包络面的形状大小逐渐缩小。

图 20 进一步给出了 $D/d=2$ 单桩复合筒型基础在 $V-H-M$ 荷载空间内的三维地基承载力破坏包络面。

由图可知, 随着弯矩荷载的增加, $V-H$ 平面内的破坏包络面逐渐缩小, 最终退缩为一点, 由此形成一个封闭的部分椭球体。根据实际荷载组合作用在单桩复合筒型基础的承载力能力与有限元数值计算所推导的空间破坏包络曲面之间的相对关系, 可以判断: 当实际荷载组合位于包络面内部, 则基础在 $V-H-M$ 荷载空间内是稳定的; 当荷载组合位于包络面上时, 说明地基处于承载力极限状态; 而若基础承受的荷载组合位于该包络面外部, 则基础在三维复合加载条件下将可能发生失稳破坏。

5 $H-M$ 二维荷载空间的模型试验

5.1 试验目的

模型试验是验证数值分析方法正确性的重要手段。针对文中所做的数值模拟分析, 在饱和黏土中进行模型试验。考虑到对于海上风电基础主要荷载为水平力 H 和弯矩荷载 M , 故试验针对单桩复合筒型基础在 $H-M$ 荷载空间中的承载力进行研究。通过液压缸施加水平力, 获得弯矩荷载和水平力的不同

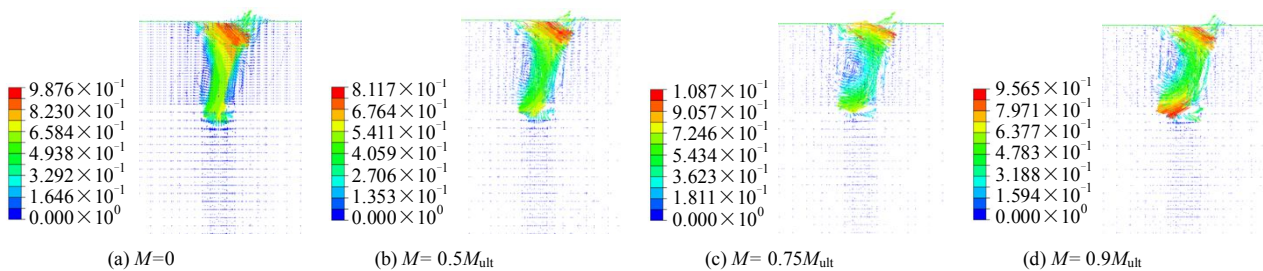


图 17 地基位移矢量云图 ($D/d=2$) (单位:m)

Fig.17 Displacement vectograms of the foundation ($D/d=2$) (unit: m)

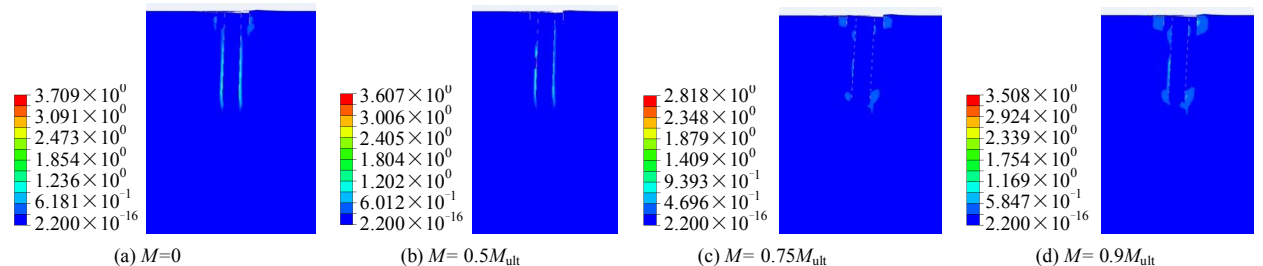


图 18 复合加载极限状态地基等效塑性应变分布 ($D/d=2$)

Fig.18 Equivalent plastic strain distribution ($D/d=2$)

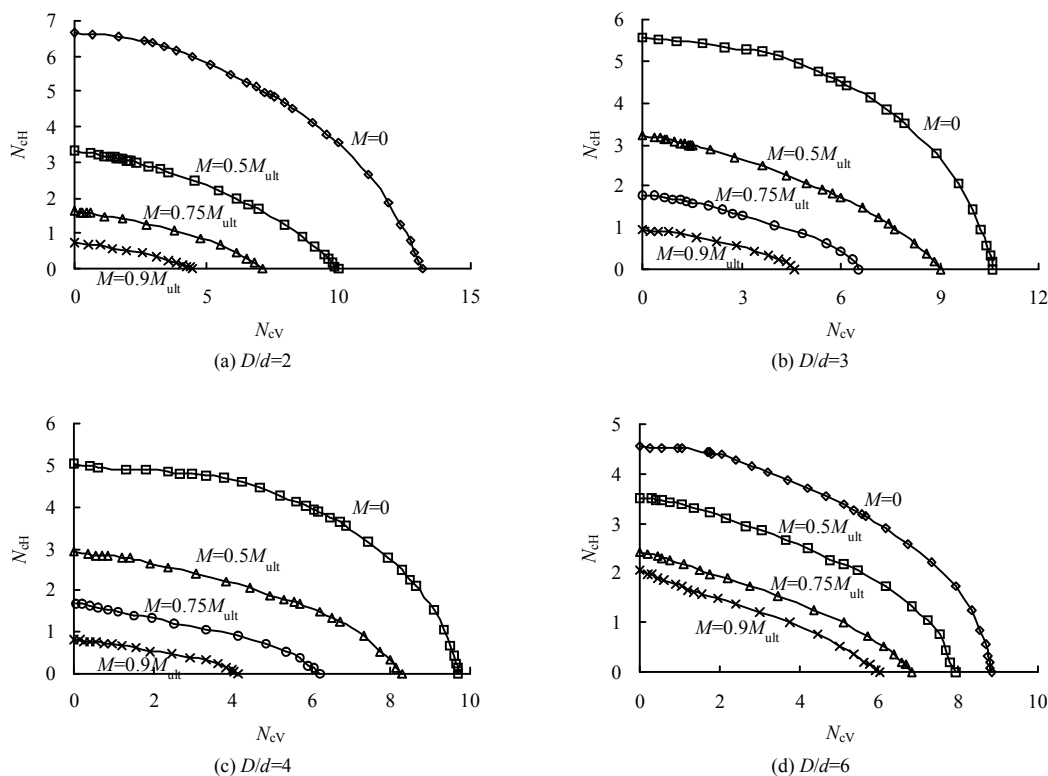
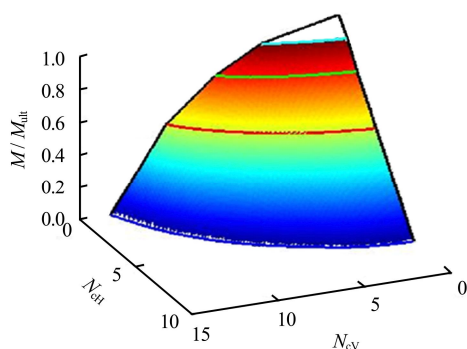
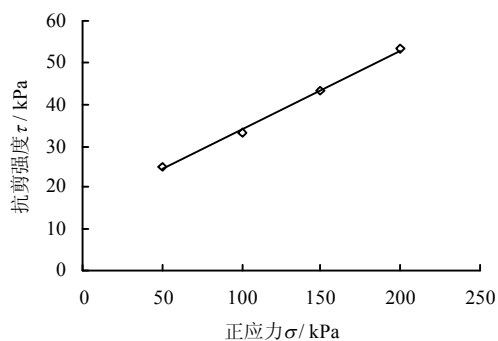
图 19 $V-H-M$ 三维地基承载力包络面Fig.19 3D failure envelope of foundation in $V-H-M$ loading space图 20 $V-H-M$ 三维地基承载力包络面 ($D/d=2$)Fig.20 3D failure envelope of foundation in $V-H-M$ loading space ($D/d=2$)

图 21 固结快剪试验结果

Fig.21 Results of consolidated quick shear test

组合,测定水平力的大小与作用点。对试验数据进行整理可得到基础模型在 $H-M$ 荷载空间的地基承载力包络线,用以验证数值分析结果的正确性。

5.2 试验材料及设备

试验在天津大学水利馆 2[#]试验池开展,池内为取自响水近海的粉质黏土,填土厚度为 1.5 m,平面尺寸为 4 m×4 m,试验之前对土体进行了饱和并静止至地表沉降稳定,进行了一系列土工试验,测得其饱和重度为 20.3 kN/m³,含水率为 28.3%,压缩模量为 4 MPa,快剪强度曲线如图 21 所示,得到强度指标 $c = 15.1$ kPa, $\varphi = 11^\circ$ 。

试验用单桩复合筒型基础模型采用不锈钢材料加工而成,基桩直径为 5 cm,桩长为 40 cm,考虑加载位置较高在端部焊接 50 cm 长钢管,基础筒直径为 20 cm,筒裙长度为 5 cm,如图 22 所示。



(a) 复合模式

(b) 桩筒分离

图 22 基础模型

Fig.22 Models of the foundation

本试验横向加载采用液压加载装置,由三相异步电动机和单向作用液压缸组成,液压缸工作行程为 250 mm,额定吨位为 20 t,加载时可控制水平行进速度为 18 mm/min,所施加荷载的大小通过 LTR-1 压力传感器测得,量程为 3 t。试验数据采集装置采用 DH-3817F 型动静态应变测试系统,该系统与压力传感器通过 DH3817F 信号输入线相连,并连接至电脑,实现试验数据的同步采集并绘制荷载-时间变化的曲线。试验装置如图 23 所示。



图 23 试验装置
Fig.23 Experiment setup

5.3 试验过程与结果

试验前先将基础筒静压入土体至于土面齐平,然后在预留的孔洞处将基桩静压入土体 30 cm,完成后静置至基础顶面沉降稳定,施加水平向荷载开始试验(见图 23)。试验过程中观察到,随着荷载的施加,位于基础主动侧的土体与基础筒之间脱开,被动侧土体逐渐产生隆起,随着荷载的增加,脱离与隆起进一步发展,当试验加载完成后,填土表面出现明显的破坏现象,试验现象及有限元模拟结果如图 24 所示。

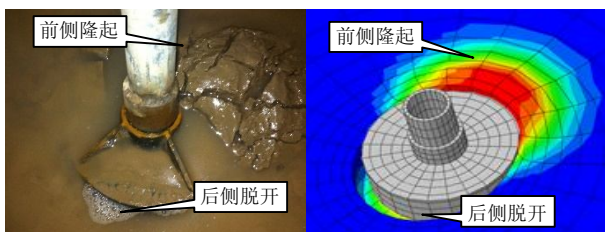


图 24 地基破坏状态
Fig.24 Foundation failure state

由此可见,基础筒与基桩共同承担水平力和弯矩荷载的作用,基础发生了整体的倾覆而破坏。

试验过程中分别在距筒面为 10、25、40、50 cm

处施加水平荷载,获得作用于基础筒顶面的不同水平向作用力和弯矩荷载的组合,将对应的极限荷载组合值整理绘入 $M-H$ 坐标系中,得到试验模拟的承载力包络线(Enl. Test),如图 25 所示。

采用前述有限元方法对室内模型试验进行了模拟,通过施加不同比例的 H 、 M 荷载搜索 $H-M$ 荷载空间的包络线,计算过程线 FEM 1~7 与计算得到的承载力包络线(Enl. FEM)同时绘于图 25 中。图中给出了 $H-M$ 破坏包络线的同向加荷部分。

由图可知,随着加荷位置与筒顶距离的增加,基础达到承载力极限的水平向荷载与弯矩荷载荷载组合值减小。模型试验得到的 $H-M$ 荷载空间内承载力包络线与数值模拟所得的承载力包络线基本一致,验证了数值模拟结果的可靠性。

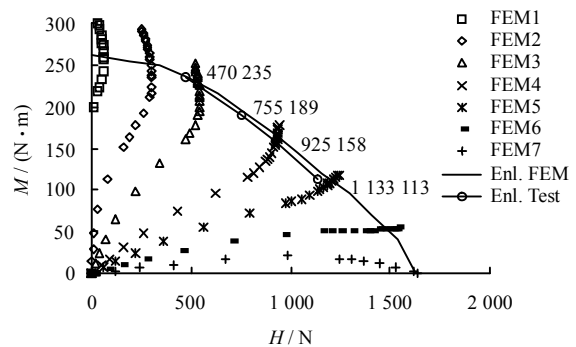


图 25 $H-M$ 平面内的地基承载力包络线
Fig.25 Failure envelopes in $H-M$ loading space

6 结 论

(1) $V-H$ 和 $V-M$ 二维加载模式下单桩复合筒型基础的地基承载力包络线呈对称性,归一化后的地基破坏包络线与地基承载力包络线变化趋势相似; $H-M$ 加载模式下地基承载力包络线呈现明显的非对称性。

(2) $V-H-M$ 三维加载模式下单桩复合筒型基础地基承载力包络面的形状受弯矩荷载 M 的影响显著,随着弯矩荷载的增大, $V-H$ 平面内的破坏包络面逐渐缩小,形成一个封闭的部分椭球体。实际工程中可根据荷载组合与破坏包络面的相对位置,判断单桩复合筒型基础是否达到承载力的极限状态。

(3) $H-M$ 二维荷载空间室内小比尺模型试验揭示了单桩复合筒型基础桩-筒共同承担上部荷载的作用机制及地基破坏模式,验证了数值分析结果的可靠性,可作为单桩复合筒型基础工程应用的参考。

参考文献

- [1] World Wind Energy Association (WWEA). World wind energy report 2008[EB/OL]. <http://www.WWindEA.Org>. 2009.2.
- [2] 刘琦. 我国海上风电发展的若干问题初探[J]. 上海电力, 2007, (2): 144—148.
- LIU Qi. Some problems on offshore wind power development in China[J]. **Shanghai Electric Power**, 2007, (2): 144—148.
- [3] 天津大学. 一种海上风电机组地基组合基础: 中国, 201110324026.8[P]. 2012-05-09.
- Tianjin University. A composite foundation for offshore wind turbine: China, 2011103240268[P]. 2012-05-09.
- [4] 杨旭, 陈飞, 练继建, 等. 考虑挤土效应的筒型基础沉放阻力数值分析及试验验证[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3585—3591, 3601.
- YANG Xu, CHEN Fei, LIAN Ji-jian, et al. Numerical analysis and test verification of penetration resistance for bucket foundation installation considering effect of soil squeezing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(12): 3585—3591, 3601.
- [5] FELD T, RASMUSSEN J L, SORENSEN P H. Structural and economic optimization of offshore wind turbine support structure and foundation[R]. [S. l.]: Geotechnical Engineering Group, 1999.
- [6] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine foundations[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(4): 287—296.
- [7] ZHANG L M, KONG L G. Centrifuge modeling of torsional response of piles in sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(5): 500—515.
- [8] TAIEBAT H A, CARTER J P. Numerical studies of the bearing capacity of shallow foundations on cohesive soil subjected to combined loading[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(4): 409—418.
- [9] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Combined loading of skirted foundations[J]. **Geotechnique**, 1988, 48(5): 637—655.
- [10] 赵少飞, 栾茂田, 范庆来, 等. 非均质地基承载力及破坏模式的 FLAC 数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1909—1914.
- ZHAO Shao-fei, LUAN Mao-tian, FAN Qing-lai, et al. FLAC-based numerical analyses of bearing capacity and failure mechanism of strip and circular footings on nonhomogeneous foundations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1909—1914.
- [11] GOVONI L, GOURVENEC S, GOTTARDI G. Centrifuge modelling of circular shallow foundations on sand[J]. **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, 2010, 10(2): 35—46.
- [12] GOURVENEC S, BARNETT S. Undrained failure envelope for skirted foundations under general loading[J]. **Geotechnique**, 2011, 61(3): 262—270.
- [13] ZHANG YOUHU, BIENEN BRITTA, MARK J CASSIDY, et al. Undrained bearing capacity of deeply buried flat circular footings under general loading[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2012, 138(3): 385—397.
- [14] 王俊岭, 闫澍旺, 霍知亮, 等. 复合加载模式下单桩基础破坏机制研究[J]. 勘察科学技术, 2013, (1): 1—4.
- WANG Jun-ling, YAN Shu-wang, HUO Zhi-liang. Study of failure patterns of monopile foundation for offshore wind turbines under combined loading[J]. **Investigation Science and Technology**, 2013, (1): 1—4.
- [15] 刘冰雪. 海上风机桩基础承载特性的三维有限元分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- LIU Bing-xue. A. Study on bearing capacity behavior of pipe foundation for offshore wind turbine using 3-D FEM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [16] 刘冰雪, 唐小薇. 海上风机单桩基础承载特性的三维有限元分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(26): 95—96.
- LIU Bing-xue, TANG Xiao-wei. Analysis on combining pile of composite foundation[J]. **Shanxi Architecture**, 2009, 35(26): 95—96.
- [17] 刘润, 王磊, 丁红岩, 等. 复合加载模式下水饱和软黏土中宽浅式筒型基础地基承载力包络线研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1—8.
- LIU Run, WANG Lei, DING Hong-yan, et al. Failure envelopes of large-diameter shallow buried bucket foundation in undrained saturated soft clay under combined loading conditions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(1): 1—8.
- [18] TAN F S. Centrifuge and theoretical modelling of conical footings on sand[D]. Cambridge: Cambridge University, 1990.
- [19] Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc. ABAQUS Scripting User's manual (Version 6.3)[M]. Pawtucket: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., 2002.
- [20] 王磊. 黏性土中大直径筒型基础地基极限承载力研究[D].

- 天津: 天津大学, 2013.
- WANG Lei. Study on ultimate bearing capacity of large diameter bucket foundation in soft clay[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [21] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [22] 李华奎. 水平荷载作用下软土地基上桶形基础承载力分析[J]. 土工基础, 2011, 25(2): 65—68.
- LI Hua-luan. Analysis of bearing capacity of bucket foundation in soft soil ground under horizontal load[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2011, 25(2): 65—68.
- [23] 刘润, 闫澍旺. 大直径超长桩打桩过程中桩周土体的疲劳与强度恢复[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 452—456.
- LIU Run, YAN Shu-wang. Research on soil fatigue and restoration during deep penetration large diameter pile driving[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 452—456.
- [24] 闫澍旺, 周宏杰, 刘润. 海工结构物桩基础竖向稳定性的可靠度分析[J]. 海洋工程, 2004, 22(1): 19—24.
- YAN Shu-wang, ZHOU Hong-jie, LIU Run. Reliability analysis of vertical stability of pile foundations of ocean structures[J]. **The Ocean Engineering**, 2004, 22(1): 19—24.
- [25] BUTTERFIELD R, HOULSBY G T, GOTTARDI G. Standardized sign conventions and notation for generally loaded foundations[J]. **Geotechnique**, 1997, 47(5): 1051—1054.
- [26] 竺存宏. 使用极限状态大圆筒土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 313—318.
- ZHU Cun-hong. Computation of earth pressure on large diameter cylinder under service ultimate state[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(3): 313—318.
- [27] FAN Qing-lai, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Three dimensional nonlinear finite element analyses for Horizontal bearing capacity of deeply-embedded large-diameter cylindrical structure on soft ground[C]// Proceedings of the 4th Interactional Conference on Soil Engineering. London: Taylor & Francis Group, 2006: 521—530.
- [28] 刘润, 陈广思. 海上风电大直径宽浅式筒型基础抗弯特性分析[J]. 天津大学学报, 2013, 46(5): 393—400.
- LIU Run, CHEN Guang-si. The analysis of resisting moment behavior of large diameter and shallow buried bucket foundation for offshore wind turbine[J]. **Journal of Tianjin University**, 2013, 46(5): 393—400.
- [19] MEYERHOF G G. Some recent research on the bearing capacity of foundations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1963, 1(1): 16—26.
- [20] 中交天津港湾工程研究院有限公司. JTS147-1-2010 港口工程地基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- Tianjin Port Engineering Institute Co. Ltd. Engineering Company Ltd. JTS147-1-2010 Code for foundation of port engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [21] KRAFT L, HELFRICH S C. Bearing capacity of shallow footings, sand over clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1982, 20: 182—185.
- [22] HOULSBY G T, MILLIGAN G W E, JEWELL R A, et al. A new approach to the design of unpaved roads——Part 1[J]. **Ground Engineering**, 1989, 22(3): 25—29.
- [23] 中国建筑科学研究院. JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- China Academy of Building Research. JGJ 79-2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [24] WOODWARD P K, GRIFFITHS D V. Observations on the computation of the bearing capacity factor N_γ by finite elements[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(1): 137—141.
- [25] LADD C C. Stress-strain modulus of clay in undrained shear[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1964, 90(5): 103—132.
- [26] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. **Geotechnique**, 1986, 36(1): 65—78.
- [27] 袁凡凡, 栾茂田, 闫澍旺, 等. 港口工程中非均质层状地基承载力计算方法[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 1124—1128.
- YUAN Fan-fan, LUAN Mao-tian, YAN Shu-wang, et al. Methods for estimating bearing capacity of layered foundations in harbor engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 1124—1128.

上接第 1485 页