

海上风电伞式吸力锚基础承载性能研究

刘红军^{1,2}, 王荃迪², 潘晨晨², 常季青³

(1. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 3. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266032)

摘要: 针对在海上风机基础应用过程中遇到的问题, 提出了新型伞式吸力锚基础(USAF), 结合其实际条件下的受力特点, 采用大型通用有限元软件 ABAQUS 对其在垂向荷载 V 和弯矩荷载 M 以及 V - M 联合作用下的受力变形特点进行分析。分析中将位移作为失效破坏标准, 采用位移加载法和固定位移比加载法分别进行单调加载和联合加载。结果表明锚枝、筒裙的增加可以一定程度的提高 USAF 的承载性能, 其中锚枝的增加对承载性能提高的并不明显, 筒裙对承载性能的提高较为明显; 弯矩荷载作用下 USAF 具有刚性短桩的性质并且会发生旋转; 在 V - M 联合加载作用下得到了 USAF 的破坏包络线以及包络线随 USAF 主筒长径比的变化规律。通过数值模拟得到了以上结论可以为 USAF 的推广和应用提供一定的参考。

关键词: 伞式吸力锚基础; 弯矩荷载; 垂向荷载; 破坏包络线; ABAQUS

中图分类号: TU470

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160426

1 研究背景

风能是目前发展最快的绿色能源, 风力发电的主要形式有陆上风力发电和海上风力发电两种, 而海上风力发电是最具发展潜力的一种风力发电形式。然而制约海上风力发电的一个重要因素是基础成本, 海上风电机基础的成本约占海上风电场总成本的 20%~30%不等, 因此探讨合理的基础形式对于海上风电场的发展是至关重要的^[1]。目前服役的基础形式主要有重力式基础、单桩基础和筒形基础等, 其中单桩基础的应用范围最广, 但单桩基础具有结构刚度小^[2]、在外力作用下易产生变形等弱点, 在进行海底安装时会对周围土体产生扰动, 基础周边土体出现较快的冲刷, 并且基础无法被重复利用, 很容易造成资源的浪费。

吸力锚(又称吸力沉箱、吸力桩、负压锚或筒形基础)作为一种新型海上结构设施, 已经被广泛应用于船只的定位与系泊、存储设施、海洋平台和导管架等领域^[3]。从外形来看是一个倒扣的筒状结构。吸力锚较桩基础耗钢量少, 建造成本低, 且具有施工速度较快, 可重复使用, 易于海上安装运输等特点^[4]。吸力锚安装过程首先是在自身重力和载荷作用下沉入水底, 然后从筒内向外抽水形成内部的负压完成吸力锚的沉贯实现在海底的安装固定。当需重复安装使用时, 只需反向充水, 吸力锚基础即可拔出土层, 实现了其他类型基础所不能达到的多次利用的目的。

吸力锚基础在处于风浪等多个力共同作用下, 性状较为复杂, 故先后有很多学者对吸力锚的承载性能等进行了研究。张金来等^[5]通过数值模拟对比分析了不同长径比下桶形基础的承载特性; 范庆来等^[6]研究了吸力式基础在水平荷载 H 与弯矩荷载 M 的联合作用下的稳定性与破坏机理; 闫澍旺等^[7]利用数值模拟对筒形基础的承载性能进行了研究, 并对现行简化计算方法的误差进行了估计与分析; 刘润等^[8]利用 ABAQUS 对宽浅式筒形基础在 V - H 、 V - M 、 H - M 和 V - H - M 加载模式下的承载性能

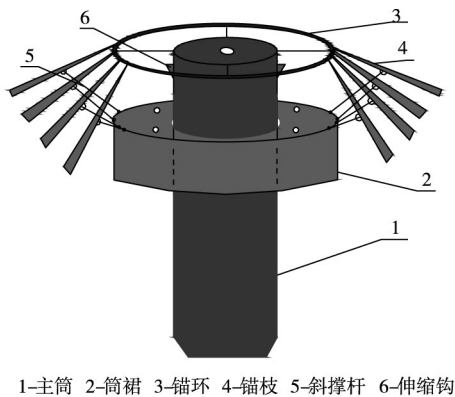
收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(4152247); 山东省科技攻关资助项目(2014GX104007)

作者简介: 刘红军(1966-), 男, 江苏靖江人, 教授, 博导, 主要从事海洋工程地质、岩土工程的研究。E-mail: hongjun@ouc.edu.cn

进行了研究, 对各加载模式下的地基承载力包络线进行了分析, 并得到 V-H 和 V-M 二维加载模式下的包络线表达式。汪嘉钰等^[9]通过数值模拟分析研究了桩筒复合基础 H-M 加载模式下的地基承载力包络线, 并通过室内模型试验验证了数值模拟结果的可靠性。

作者所在课题组设计提出了一种伞式吸力锚基础(Umbrella Suction Anchor Foundation)^[10](如图 1), 简称 USAF, 能够较好地保护周围的土体, 水平向的承载能力大, 且其承载性能和造价相对于其他类型的基础优势明显, 所以具有很好的应用前景。本文针对简化后的伞式吸力锚基础, 不考虑其沉贯过程, 采用大型有限元模拟软件 ABAQUS 对其沉贯完成稳定后的承载性能进行研究。



1-主筒 2-筒裙 3-锚环 4-锚枝 5-斜撑杆 6-伸缩钩

图 1 伞式吸力锚基础

2 有限元计算模型

2.1 模型尺寸与土质参数 采用 ABAQUS 建立的三维有限元模型如图 2 所示, 吸力锚模型的各部件的尺寸为主筒高度 $H=8\text{ m}$, 外径 $D=4\text{ m}$, 侧壁厚 $t=0.02\text{ m}$, 筒顶厚 $s=0.05\text{ m}$; 筒裙高度 $h=3.5\text{ m}$, 外径 $d=8.0\text{ m}$, 侧壁厚 $t=0.02\text{ m}$, 筒顶厚 $s=0.05\text{ m}$; 锚枝长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=1.5\text{ m}\times0.5\text{ m}\times0.05\text{ m}$, 数量 10 个; 锚体各部分均使用钢材模拟。

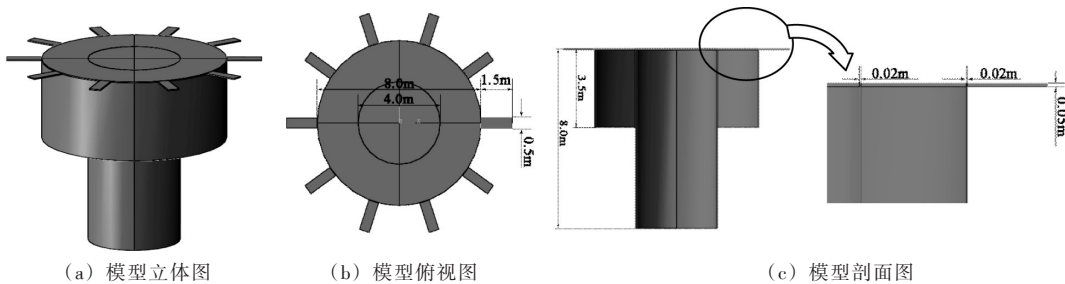


图 2 伞式吸力锚模型及其尺寸

土体采用圆柱体进行模拟, 通过试算确定土体直径为 80 m , 高度 20 m , 采用单一均质土层进行研究, 根据黄河三角洲附近的土质条件确定土体类别为粉质黏土, 土体和基础的材料参数如表 1 所示。

表 1 模型的材料参数

部件	模型类别	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	摩擦角 $\varphi/(\circ)$	内聚力 c/kPa	剪胀角 $\psi/(\circ)$
锚体	线弹性	7800	200000	0.25	—	—	—
土体	M-C	1800	3.5	0.3	20	15	0.1

2.2 模型设置 为模拟海床实际情况, 文中模型均采用浮重度进行计算, 在计算的过程中先假设各部件重度相同进行初始地应力的平衡, 然后在体力平衡分析中施加桩土的重度差进行体力平衡以达到与实际情况相同的状态。主筒、筒裙和锚枝之间采用绑定约束; 主筒内外表面与土体、筒裙内外表面与土体、锚枝下表面与土体表面以及主筒和筒裙顶部内表面与土体之间的接触面均遵循库伦摩擦理论, 摩擦系数 $\mu=0.4$, 接触类型为主-从面接触。土体底部采用全约束, 侧面约束径向位移, 竖直方向可以自由移动, 顶部为自由面, 无任何约束; 各部件均采用三维 8 节点减缩积分六面体单元 (C3D8R) 进行模拟; 网格划分后的模型如图 3 所示。

本文采用位移加载法进行加载, 将主筒顶部表面的中心节点作为参考点, 将该表面上所有节点

均耦合到参考点上作为位移荷载的施加点。根据实际情况海上风机的受力特点，上部结构受到的主要荷载形式如图4(a)所示，而最终传递到伞式吸力锚基础上的荷载可以等效为如图4(b)图所示的垂向荷载 V 和弯矩荷载 M ，因此本文中着重研究在垂向荷载和弯矩荷载单独作用和联合作用下伞式吸力锚基础的承载性能。

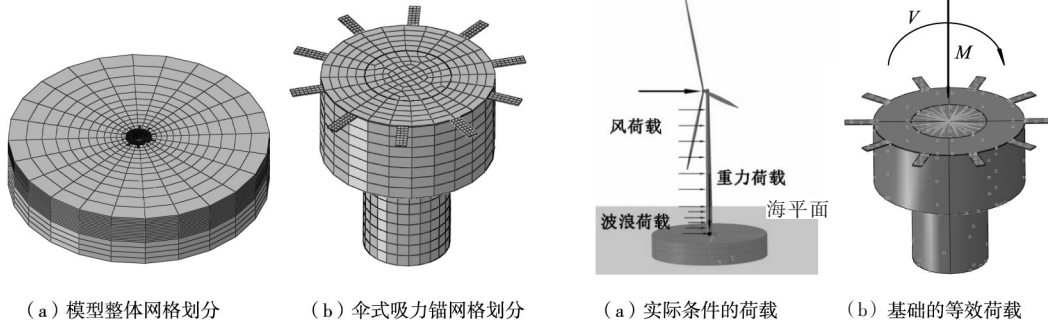


图3 有限元模型的网格划分

图4 风机和基础的受力形式

2.3 模型验证 根据 Vesic^[11]整理的海洋基础地基垂向承载力经验公式，并考虑到筒壁与土之间的黏聚力 $\pi D H S_u$ 得到单筒基础竖向承载力公式：

$$V_{ult} = (4H/D + \xi_s \xi_d N_c) A S_u \quad (1)$$

式中： $\xi_s=1.2$ ； $\xi_d=1+0.4\arctan(H/D)$ ； $N_c=2+\pi$ ； A 为筒形基础的底面积； S_u 为完全不排水抗剪强度。

根据公式求得单筒基础的垂向承载力为 2.12 MN，而根据数值模拟得到 $V_{\text{单筒}}=1.95$ MN，误差为 8.02 %。表明有限元数值分析计算模型可以用于吸力锚的承载性能分析。

3 单调加载条件下的承载性能

由于海上风电基础对变形的控制比较严格，本文采用位移作为锚体失效破坏的标准，Vesic^[12]等通过研究，认为较浅层的基础失效时沉降量约为 3 % ~ 7 % 的基础直径，本文选取竖向位移限取 5 % D 即 $v=0.2$ m。Hesar^[13]建议筒形基础的水平位移破坏标准可以参照刚性短桩的破坏标准，即水平位移为基础宽度的 3 % ~ 6 %，换算得转角极限位移为 $U_r=0.01\text{rad}$ 。则竖向位移为 0.2 m、转角位移为 0.01 rad 时对应的荷载为伞式吸力锚的垂向极限承载力和弯矩极限承载力。

3.1 垂向荷载作用下的承载性能 在筒顶参考点施加 $v=0.3\text{m}$ 的垂向位移得到该点荷载-位移曲线如图 5 所示，其中曲线的变化趋势相似，未出现明显拐点，无法通过荷载控制法判断锚体的失效，而通过位移控制法很容易确定。图示说明了锚枝及筒裙的存在能一定程度的提高基础的垂向承载力。从图中读出 $v=0.2$ m 时对应的极限垂向荷载 $V_{\text{USAF}}=4.93$ MN， $V_{\text{裙式}}=4.62$ MN， $V_{\text{单筒}}=1.95$ MN，USAF 相对于裙式基础垂向承载力提高了 6.7 %，说明了锚枝的存在会一定程度的提高垂向承载力，但效果不明显；但相对于单筒基础垂向承载力提高较大，提高了 1.5 倍。

图 6 给出了垂向力作用于伞式吸力锚基础时极限状态下土体和锚体的竖向位移云图，从位移云图中可以看出土体受锚体的水平向影响范围约为 $3D$ ，并且由上到下土体受锚体的影响范围逐渐减小，由于土体具有压缩性，所以土体由上向下的位移是逐渐减小的，而锚体的刚度较大，基本呈整体沉降的趋势。

3.2 弯矩荷载作用下的承载性能 在桩顶参考点施加 $U_r=0.02$ rad 的转角位移得到该点弯矩荷载-转角位移曲线如图 7 所示，曲线并未出现明显的拐点，无法通过荷载控

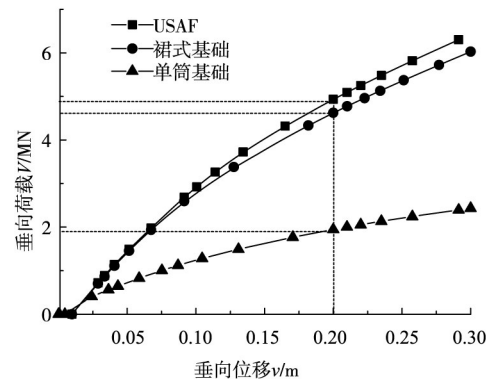


图5 垂向荷载作用下锚体的荷载-位移曲线

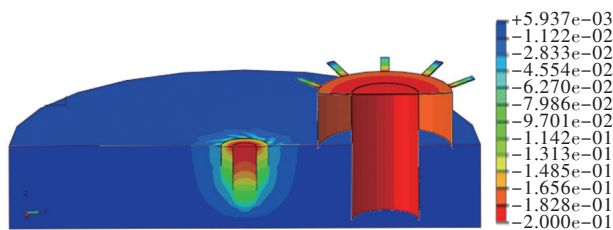


图6 土体和锚体的竖向位移云图

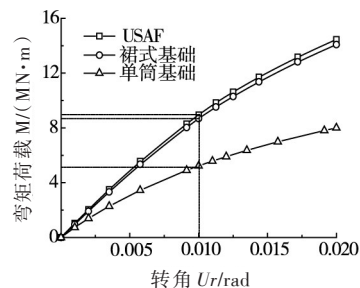


图7 弯矩荷载作用下锚体的荷载-转角位移曲线

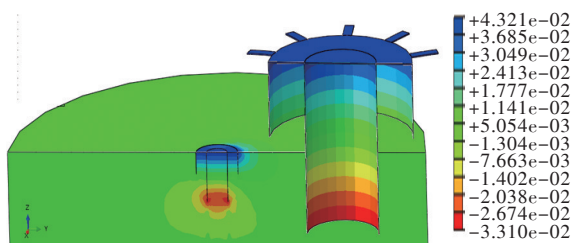


图8 土体和锚体的水平位移云图

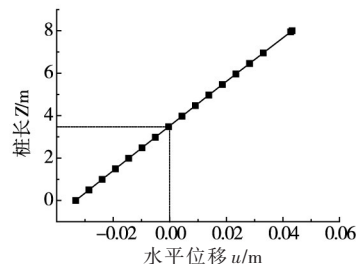


图9 水平位移沿主筒长度的变化曲线

制法判断锚体失效，从图中可以看出伞式吸力锚基础在弯矩荷载作用下承载性能的优越性。当 $Ur=0.01$ rad 时对应的极限弯矩荷载 $M_{\text{USAF}}=8.96\text{MN}\cdot\text{m}$ ， $M_{\text{裙式}}=8.69\text{MN}\cdot\text{m}$ ， $M_{\text{单筒}}=5.23\text{MN}\cdot\text{m}$ 。USAF 相对于裙式基础极限弯矩荷载提高了 3.1%，相对于单筒基础提高了 71.3%。

图8给出了弯矩作用于伞式吸力锚基础时极限状态下土体和锚体的水平位移云图，从位移云图中可以看出土体以及锚体顶部和端部的水平位移方向是相反的，中间出现了水平位移为0的旋转点，为了得到该点的位置，图9给出了沿主筒长度范围内的水平位移变化曲线图，由图可以看出曲线呈直线关系，这说明主筒未发生挠曲，具有刚性短桩的性质，水平位移为0的位置即旋转点位于主筒的中心偏下的位置，位于桩端以上约0.44L处。

4 复合加载条件下的承载性能

4.1 复合加载模式 对基础进行复合加载首先要选择一定的加载模式才能得到正确的结果，复合加载用的最多的方法有swipe加载法和固定位移比的方法，swipe加载方法最早由Tan^[14]提出并应用于离心机模型试验中；固定位移比加载方法^[15]是进行复合加载时取两个方向的位移增量之比 $dv/d\theta$ 为常数进行位移控制加载，可以得到一对荷载组合，通过改变固定位移比进行加载，可得到不同比值条件下的一系列荷载组合点。固定位移法相对于swipe加载法较为精确，故本文中采用固定位移比的方法进行组合加载。

4.2 V-M 组合加载 在进行V-M组合加载时首先确定在主筒参考点施加的垂向位移和转角位移比 v/θ 分别为0(只受弯矩荷载)、10、15、20、40和 ∞ (只受垂向荷载)，当加载到在某个方向或两个方向的位移达到极限值时即认为吸力锚是失效破坏的。

首先在分别按照上述比例进行加载试验，得到不同比例条件下V-M的荷载变化归一化后曲线如图10中实线所示，每条实线的终点代表有一个(或两个)方向达到破坏时的V-M组合荷载，将各条曲线的端点拟合得到V-M组合加载条件下的破坏包络线如图中虚线所示，由图中破坏包络线可以看出，当仅有垂向荷载单独作用时承载力最大，随着弯矩荷载的施加，垂向承载力是逐渐减小的，这一阶段锚体的破坏是受垂向位移控制的；当弯矩荷载达到一定值时，转角位移和垂向位移同时达到极限值，这时锚体在两个方向达到破坏；随着弯矩荷载继续增大，锚体的失效改为由转角位移控制，最终的情况为仅有弯矩荷载作用时得到的弯矩承载力。另外从破坏包络线的变化趋势可以看出

弯矩荷载对垂向承载力的影响程度要比垂向荷载对弯矩承载力影响程度小，但是二者之间是相互减弱的关系。

得到了典型锚基础在 V-M 联合作用下的破坏包络线及其荷载-位移关系，本文继续探讨了 V-M 破坏包络线随 USAF 基础的主筒长径比 η 的变化规律，在数值模拟的过程中，保持主筒的直径 $D=4\text{m}$ 不变，分别设置主筒的高度 $H=4、6、8$ 和 10m ，即保持主筒长径比 $\eta=1.0、1.5、2.0$ 和 2.5 来探讨 V-M 破坏包络线随 η 的变化关系，计算得到的结果如图 11 所示，根据图中显示的规律，可以看出在一定范围内随着 η 值的增加，破坏包络线是向外扩展的，而且从中可以明显的看出， η 的变化对 USAF 的弯矩承载力和垂向承载力的影响程度是不同的，以 $\eta=1$ 和 $\eta=2$ 时的结果来进行对比说明，在 $\eta=2$ 时此时的弯矩承载力为 $\eta=1$ 时的 2 倍，而垂向承载力并未发生明显的变化。以 $\eta=1$ 时的承载力为基本承载力，将不同长径比的承载力进行归一化得到承载力对长径比的响应系数，图 12 给出了响应系数随长径比 η 的变化趋势，可以看出 η 对弯矩承载性能的影响要明显大于对垂向承载性能的影响。

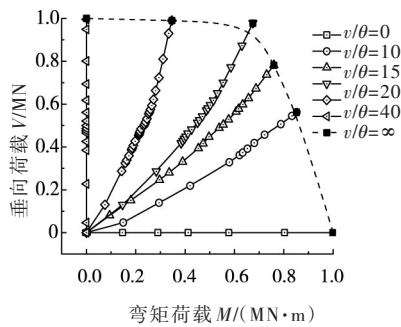


图 10 不同位移比时锚体的 V-M 曲线变化

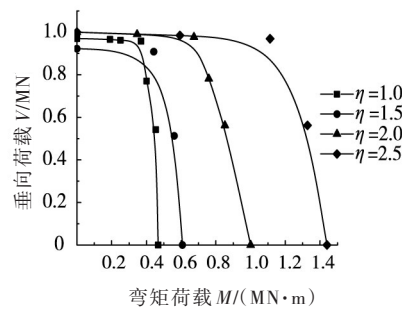


图 11 V-M 破坏包络线随 η 的变化关系

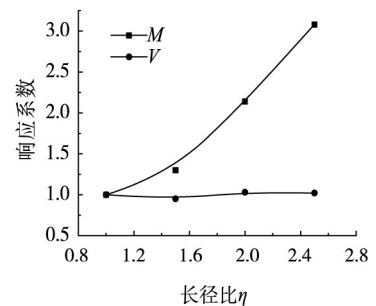


图 12 响应系数随长径比的变化趋势

5 结论

本文针对新型伞式吸力锚基础 (USAF) 在实际状态下的受力特点进行模拟加载，得到了以下结论：(1) USAF 在 $v=0.2\text{m}$ 时的垂向承载力为 4.93MN ，在 $Ur=0.01\text{rad}$ 时的弯矩承载力为 $8.96\text{MN}\cdot\text{m}$ ；(2) USAF 中锚枝和筒裙的增加会一定程度地提高基础的承载性能，其中锚枝的存在使极限垂向荷载提高了 6.7% ，极限弯矩荷载提高了 3.1% ；筒裙的存在使极限垂向荷载提高了 1.5 倍，极限弯矩荷载提高了 71.3% ；(3) 弯矩荷载作用下 USAF 具有刚性短桩的性质，绕主筒中心稍偏下的位置发生旋转；(4) USAF 基础在 V-M 联合作用时的承载力要低于弯矩承载力和垂向承载力，二者之间是相互减弱的关系，且弯矩荷载对垂向承载力的影响程度要比垂向荷载对弯矩承载力的影响程度小；(5) V-M 联合作用下的破坏包络线在一定范围内随主筒长径比 η 的增加向外扩展， η 对弯矩承载性能的影响程度要大于对垂向承载性能的影响程度。

参 考 文 献：

- [1] 尚景宏, 罗锐, 张亮. 海上风电基础结构选型与施工工艺[J]. 应用科技, 2009, 36(9): 6-10.
- [2] 丁红岩, 孙琪晶, 张浦阳, 等. 导管支架基础和单桩相结合的新型复合风电基础[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(11): 1379-1384.
- [3] Byrne B, Houlby G, Martin C, et al. Suction Caisson Foundations for Offshore Wind Turbines[J]. Wind Engineering Volume, 2002, 3(26): 145-155.
- [4] 刘红军, 李洪江. 黄河三角洲海上风机新型吸力锚基础型式分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2014, 44(7): 71-76.
- [5] 张金来, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 桶形基础极限承载力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7):

- 1169-1172.
- [6] 范庆来, 李璞晟, 倪宏革, 等. 复合加载条件下沉箱基础稳定性的三维效应[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 686-690.
 - [7] 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.
 - [8] 刘润, 王磊, 丁红岩, 等. 复合加载模式下不排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): 146-154.
 - [9] 汪嘉钰, 刘润, 李宝仁, 等. 桩筒复合风电基础H-M荷载空间的承载力包络线研究[J]. 水利学报, 2015, 45(S1): 354-359.
 - [10] 刘红军, 李洪江, 王虎. 一种海底吸力锚: 发明专利, CN201310091856.X[P]. 2013.
 - [11] Vesic A S. Bearing capacity of shallow foundations[C]//Foundation Engineering Handbook, 1975.
 - [12] Vesic A S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1990, 11(1): 45-73.
 - [13] Hesar M. Geotechnical Design of the Barracuda and Caratinga Suction Anchors[A]. OTC 15137, 2003.
 - [14] Tan F S C. Centrifuge and theoretical modeling of conical footings on sand[D]. Cambridge: Cambridge University, 1990.
 - [15] Bransby M F, Randolph M F. Shallow foundations subject to combined loadings[C]//Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1997: 1947-1952.

The research on bearing capacity of umbrella suction anchor foundation for offshore wind power

LIU Hongjun^{1, 2}, WANG Quandi², PAN Chenchen², CHANG Jiqing³

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Qingdao 266100, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. Qingdao Geotechnical Investigation and Surveying Research Institute, Qingdao 266032, China)

Abstract: As the disadvantages in using of foundation for offshore wind power were met, a new type Umbrella Suction Anchor Foundation (USAF) was presented. Considering its features under loads, the bearing capacity of USAF under vertical load, bending moment load and combined loads were studied using finite element software ABAQUS in this paper. The displacement was conducted as failure criterion, and the displacement loading method and fixed displacement ratio procedure were respectively used for monotonic loading and combined loading. The results show that to a certain extent anchor branches and skirt of USAF can increase its bearing capacity, and it has a more obviously improve with skirt. Besides, USAF has the properties of rigid short pile and it can rotate around one point of pile. As a result, the failure envelope of USAF and which law varied with draw ratio of pile was obtained. A serious conclusions conducted from numeric calculation can provide a reference for the generalization and apply of USAF.

Key words: Umbrella Suction Anchor Foundation; bending moment load; vertical load; failure envelope; ABAQUS

(责任编辑: 李 琳)