

复合桶形基础负压沉贯渗流特性研究

徐成根¹, 江海涛¹, 徐孟涛^{2*}, 孙德成¹, 吴新云³

(1. 中广核如东海上风力发电有限公司, 江苏 南通 226400; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 吸力桶基础由于其适用范围广泛、安装简单、可重复利用等优点, 成为了海上风机基础的重要形式之一。本文结合江苏如东某海上风电复合桶形基础(多舱室吸力桶)的工程应用背景, 在有限元软件 COMSOL Multiphysics 中采用线弹性土体模型建立复合桶形基础的负压沉贯模型。通过研究基础安装过程中土体渗流特征, 发现复合桶内部土体受吸力影响较大, 外部土体受影响较小, 水头损失大部分发生于桶内, 表现为桶内渗流梯度显著大于外部, 因此渗流作用的存在使得复合桶壁沉贯阻力小于静压沉贯。复合桶和环形隔板侧壁孔隙水压力在靠近桶顶部时沿深度近似为线性变化, 靠近端部则表现为明显的非线性, 且端部处孔隙水压力不连续。通过与同主尺寸的单桶基础进行对比, 发现环形隔板及肋隔板的存在阻碍了桶内负压向外部的传递, 使得负压对于桶外部孔隙水压力的影响削弱, 并抑制负压向更深海床处发展。

关键词: 复合桶形基础; 负压作用; 吸力安装; 渗流场; 孔隙水压力; 海上风电

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0126-07

Numerical study of seepage characteristics of composite suction caisson under suction installation

XU Cheng-gen¹, JIANG Hai-tao¹, XU Meng-tao^{2*}, SUN De-cheng¹, WU Xin-yun³

(1. CGN Rudong Offshore Wind Power Co., Ltd., Nantong 226400, Jiangsu, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

3. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, Zhejiang, China)

Abstract: The suction caisson foundation has become one of the important forms of offshore wind turbine foundation due to its wide range of application, simple installation and reusability. In this paper, combined with the engineering application of the offshore wind turbine supported by composite caisson foundation (multi-cabin suction caisson) in Rudong, Jiangsu, the finite element software COMSOL Multiphysics was used to establish a suction installation numerical model based on the linear elastic soil model. By studying the characteristics of soil seepage during foundation installation, it is found that the soil inside the composite caisson is greatly affected by suction than that outside the caisson. Most of the water head loss occurs inside the caisson, showing that the seepage gradient inside the caisson is significantly greater than that outside the caisson. Therefore, the skirt wall friction is less than jack installation. The pore water pressure around the skirt wall and the annular partition changes approximately linearly along the depth near the caisson lid. However, it shows obvious nonlinearity near the tip, where the pore water pressure is discontinuous. By comparing with the single caisson foundation of the same main size, it is found that the existence of the annular partition and the rib partition hinders the transmission of negative pressure inside the caisson to the outside. This weakens the effect of negative pressure on the pore water pressure outside the caisson, and inhibits the development of negative pressure to a deeper seabed.

Key words: composited suction caisson; negative pressure; suction installation; seepage field; pore water pressure; offshore wind turbine

收稿日期: 2022-11-23

作者简介: 徐成根(1968—), 男, 江苏建湖人, 高级工程师, 从事海上风电项目建设管理工作。E-mail: cgen_xu@163.com。

*通信作者: 徐孟涛(2000—), 男, 河南许昌人, 助理研究员, 从事海上风电基础工程方面的研究工作。E-mail: xmt736@zju.edu.cn。

0 引言

大力发展海上风能,对于改善我国能源结构、节约土地及实现经济和社会的可持续发展具有重要意义。目前采用的海上风机基础形式一般有重力式基础、单桩基础、三角架式基础、导管架式基础、高桩承台式基础、浮式基础以及桶型基础等^[1-2]。桶型基础是一种顶部密封、底部敞开的钢制柱状空壳结构,在安装时通过潜水泵持续抽水在桶内形成负压环境以完成沉贯^[3],适用于复杂的海床环境,无需打桩、安装快捷便利、可回收重复利用、造价低。因此,桶型基础已逐渐代替传统的基础形式,成为深水环境下海上风机基础的重要选择。

在施工过程中,桶型基础首先在自重作用下沉贯至海床一定深度,在桶内形成一个密闭空间,通过不断抽出桶内的水及空气,在桶内形成负压环境,再根据施工海床土质条件,不断调整基础内外的压力差大小,使桶基础在固定位置完成下沉安装^[4]。在沉入海床过程中,桶型基础主要受到裙端阻力以及桶侧壁摩阻力,其中侧壁摩阻力起到主导作用^[5-6]。通过在桶内制造负压环境,可以在桶壁外侧形成自上而下的渗流环境,增加桶壁外侧土体的有效应力,从而增大了外侧桶壁摩阻力;在桶体内部形成自下而上的渗流环境,减小桶壁内侧土体的有效应力,从而减小了内侧桶壁摩阻力^[7]。但是面对复杂的海床环境,在下沉时需要不断调整桶基础内部的负压大小以及纠正下沉方向。施加的负压过大,会导致桶内土体水力梯度超过其临界水力梯度,造成桶内土体失稳,使得桶内土体隆起形成土塞阻碍进一步下沉,或者是破坏桶内密封环境造成下沉失败^[8];施加的负压过小,则无法克服沉贯阻力,导致桶体无法下沉安装至预定深度。

目前关于吸力桶的研究,大都集中于单桶基础。目前,出现一种新型的吸力桶基础,其内部由隔板将桶基础分隔为多个独立舱室的复合桶基础,每个舱室都可以进行抽水以完成负压沉贯^[9]。在安装过程中基础发生倾斜时,可以通过改变各舱室的吸力值实现纠偏的目的。同时由于内部隔板的存在,加大了结构与土的接触面积,进一步增强了整个基础的承载能力。

图 1 所示的海上风电复合桶基础建设于江苏如东某海上风电场,设计水深约 15 m。该复合桶基础采用全钢型设计,其内部被分割为 7 个独立舱室。该风电场安装海域浅部土层多为粉砂夹粉土,有效

重度为 9 kN/m³,相对密度在 25%左右,土体内摩擦角为 30°,海床渗透系数大约为 5×10⁻⁶ m/s。

对于这种新型的基础形式,内部隔板的存在在一定程度上影响了土体的渗流路径^[10],使得土体的有效应力变化特征不同于无隔板的单桶基础,从而导致桶基础下沉时的沉贯阻力发生改变,但是具体的发展规律尚不明确^[11]。结合图 1 所示的海上风电复合桶基础的工程应用背景,本文利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 模拟复合桶的负压沉贯过程,研究桶周围渗流场的变化情况,为基础安装时沉贯阻力的计算提供参考。



图 1 海上风电复合桶基础

Fig. 1 Offshore wind turbine supported by composited suction caisson

1 复合桶沉贯有限元分析模型

由于对复合桶基础在负压沉贯时渗流场变化情况进行可视化实验较为困难,因此通过对复合桶侧壁、裙端、内部隔板周围的孔隙水压力展开分析,明确负压对渗流及沉贯阻力产生的影响。现场安装吸力桶时,为一连续过程,渗流场随着沉贯深度的增加而不断变化。为简化模拟,假设沉贯处于一系列离散的稳定状态,通过构建吸力桶沉贯至不同深度时的有限元模型来实现这一过程。

数值模拟采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 进行三维建模,其半模型如图 2(a),模型由两部分组成:一部分为均质海床,另一部分为复合桶基础。本文关注海床土体的渗流响应,因此采用完全弹性的土体模型,同时海床土与吸力桶侧壁接触面光滑,即不考虑桶侧壁摩擦阻力^[12-13]。复合桶基础被 1 个环形隔板、6 个肋隔板分隔为 7 个独立的舱室,均可独立进行加压。

复合桶-海床模型的二维平面如图 2(b),*OAFE* 和 *GHJI* 为复合桶内部土体,*ABCDMN* 为复合桶外部土体。假设复合桶结构为不透水材料,孔隙水不可压缩,且海床土体处于饱和状态,多孔流体符合

达西定律。拉普拉斯方程写作 $\nabla^2 p = 0$ ，其中 p 为孔隙水压力，则在柱坐标系 (r, z, Φ) 下，拉普拉斯方程可被表示为：

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

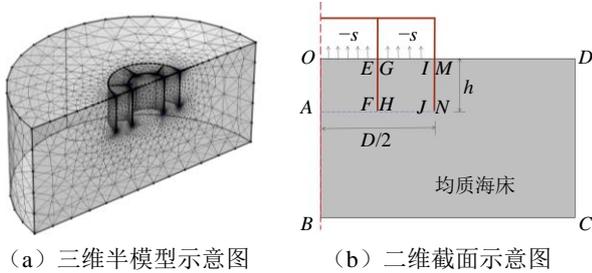


图2 复合桶基础数值模型示意图

Fig. 2 Schematics of the numerical model of the composite suction caisson

假设在每一个特定的沉贯深度下，复合桶外土体所受等效压力为 0（即边界 MD 的海水环境压力为 0），复合桶内土体受到大小为 s 的吸力（即在边界 OE 和 GI 上施加吸力 s ），此时渗流处于瞬时的稳定的状态。由于海床模型大小与复合桶尺寸及沉贯深度比起来足够大，故忽略边界影响，假设海床侧壁及底部流体状态为无流动。

复合桶模型参数如表 1，对均质海床土层建模时，主要考虑到土体摩擦角、海水重度、土体有效重度、渗透系数、海水黏度系数 5 项参数。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of the numerical model

| 参数 | 数值 | 描述 |
|--------------|-----------------------------|------------|
| t_s | 0.03 m | 复合桶壁、隔板厚度 |
| D_a | 10 m | 复合桶直径 |
| D_b | 5 m | 环形隔板直径 |
| D_{o1} | 10.03 m | 复合桶外直径 |
| D_{i1} | 9.97 m | 复合桶内直径 |
| D_{o2} | 5.03 m | 环形隔板外直径 |
| D_{i2} | 4.97 m | 环形隔板内直径 |
| h_r | 0.1~0.7 | 沉贯深度/复合桶直径 |
| h | $h_r \times D_a$ | 沉贯深度 |
| h_w | 15 m | 海水深度 |
| r_{Domain} | 20 m | 海床模型半径 |
| z_{Domain} | 20 m | 海床模型深度 |
| φ | 30° | 摩擦角 |
| γ_w | 9.806 kN/m ³ | 海水重度 |
| γ' | 9 kN/m ³ | 有效重度 |
| k | 5×10 ⁻⁶ m/s | 渗透系数 |
| μ | 1.005×10 ⁻³ Pa·s | 海水黏度系数 |

考虑到不同沉贯深度时的临界吸力不同，模型沉贯深度为 h 时施加的吸力为 $s=0.5\gamma'h$ 。

当基础在具有一定渗透性的均质海床沉贯时，负压环境能使复合桶周围产生渗流场，导致其沉贯阻力不同于静压沉贯。通过研究桶壁及隔板周围渗流场，可以明确复合桶沉贯阻力变化特征。

2 复合桶沉贯过程渗流分析

2.1 海床整体渗流响应

当在复合桶所有舱室施加相同的吸力 s 时，取 $h_r=0.2, 0.4, 0.6$ ，即沉贯深度分别为 2 m, 4 m, 6 m，吸力桶周围的归一化孔隙水压力 p/s 分布如图 3。

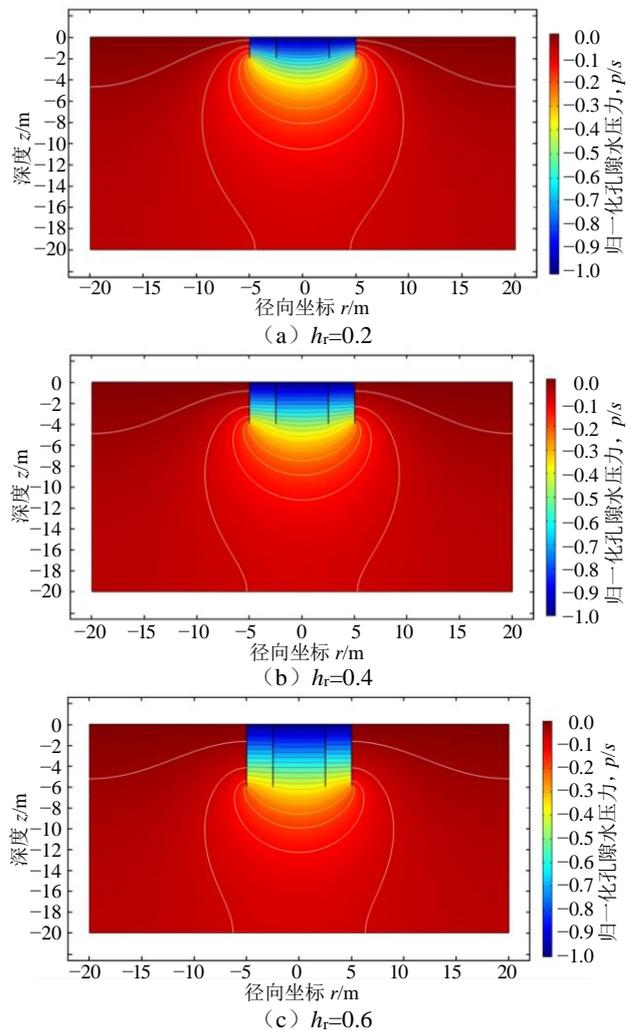


图3 复合桶基础归一化孔隙水压力

Fig. 3 Normalized pore water pressure of the composite suction caisson

复合桶周围产生了过剩的孔隙水压力，且桶内部的土体是受孔隙水压力影响的主要区域，呈梯度式变化。复合桶内部的隔板虽然有阻挡渗流的作用，但是待模型达到稳定状态时，隔板两侧的孔隙水压力基本相等。在裙端处的等值线并不连续，说

明孔隙水压力在复合桶的裙端处发生了改变。桶内的孔隙水压力变化梯度整体大于桶外,导致桶内土体有效应力减小值大于桶外土体有效应力增大值。裙端处孔隙水压力的存在有效地削弱了裙端土体的有效应力,使得复合桶裙端的沉贯阻力较于静压沉贯时有所减少。

2.2 复合桶周围渗流特征

为了更清晰地表达孔隙水压力沿桶壁、隔板以及裙端处的变化情况,并忽略模型尺寸等的影响,对整体坐标以及沉贯深度进行无量纲处理:
 $x'=x/D_a$ 、 $y'=y/D_a$ 、 $z'=z/h$ 、 $h'=h/D_a$ 。

在 $h_r=0.5$ (即沉贯深度 $h=5$ m) 的情况下,复合桶外桶侧壁以及环形隔板周围的归一化孔隙水压力 p/s 如图 4。沿复合桶外壁 ($p_{o,wall/s}$)、内壁 ($p_{i,wall/s}$) 和环形隔板两侧 ($p_{o,skirt/s}$, $p_{i,skirt/s}$) 的归一化孔隙水压力变化情况为: $p_{o,wall/s}$ 从 0 变为 -0.444, $p_{i,wall/s}$ 从 -1 变为 -0.436, $p_{o,skirt/s}$ 从 -1 变为 -0.269, $p_{i,skirt/s}$ 从 -1 变为 -0.239。

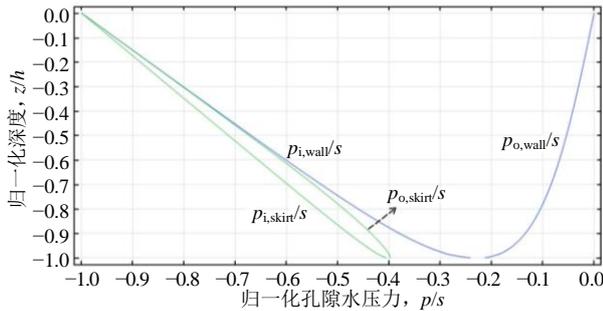


图 4 桶壁及隔板周围归一化孔隙水压力

Fig. 4 Normalized pore water pressure of skirt wall and clapboard

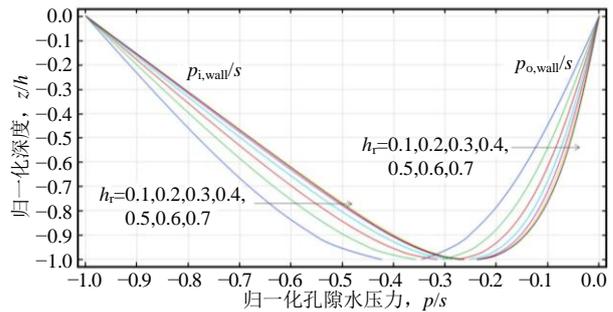
$p_{o,wall/s}$, $p_{i,wall/s}$ 在靠近复合桶顶部时,几乎呈线性变化,但是在靠近裙端时,明显为非线性改变,并且裙端两侧的归一化孔隙水压力并不相等。环形隔板两侧归一化孔隙水压力整体为内侧 ($p_{i,skirt/s}$) 大于外侧 ($p_{o,skirt/s}$),但在同一深度处,二者差别并不大,在环形隔板端部,两侧的归一化孔隙水压力同样不相等。在靠近复合桶顶部位置处,环形隔板两侧的归一化孔隙水压力与复合桶内壁相比十分接近,这是由于在吸力桶贯入时所有舱室施加的吸力都相等的原因。

随着复合桶的贯入,桶周围的渗流场发生改变,作归一化沉贯深度 $h_r=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 时复合桶内外壁以及环形隔板两侧孔隙水压力变化情况如图 5 所示。

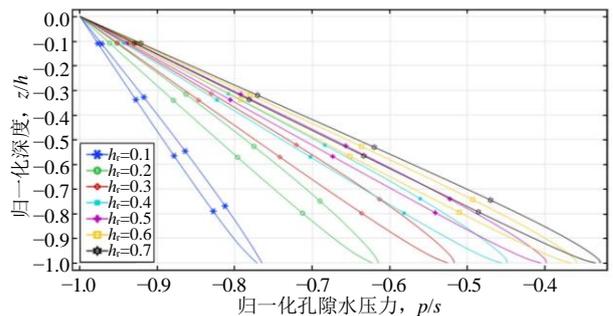
在图 5 (a) 中,不同的沉贯深度下,桶壁内侧的渗流梯度始终大于桶壁外侧,这说明复合桶在整个沉贯过程中始终保持同一深度处桶内侧土体有

效应力减小量大于桶外侧土体有效应力增加量。而桶壁摩擦力可由 $\sigma'_v K \tan \delta$ (其中 σ'_v 为土体某一深度处的有效应力, K 为侧向土压力系数, δ 为土体与复合桶壁摩擦角) 得到。因此在同一深度处,由于渗流作用的存在,复合桶壁沉贯阻力将小于静压沉贯时的阻力,且裙端处内侧孔隙水压力大于外侧,所以发生了由外侧向内侧的渗流,导致复合桶端部土体有效应力并不相等,表现为外侧大于内侧。

在图 5 (b) 中,同一沉贯深度处, $p_{o,skirt/s}$ 与 $p_{i,skirt/s}$ 始终相近,说明环形隔板的存在在一定程度上改变了渗流场在桶内的传递特征,但是影响并不显著。由于 $p_{o,skirt/s}$ 与 $p_{i,skirt/s}$ 在沉贯过程中始终保持为负值,所以渗流场的存在将使得环形隔板周围土体的有效应力减少,导致环形隔板侧壁的沉贯阻力下降。对于环形隔板端部,归一化孔隙水压力存在不连续的现象,导致端部土体的有效应力并不相同,但与静压沉贯相比都为减小的状态。因此,渗流场的存在对于复合桶基础的侧摩阻力及端部阻力都有一定的减弱作用。



(a) 复合桶壁内、外侧



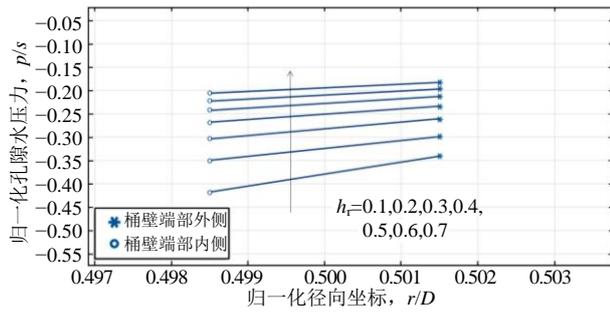
(b) 环形隔板两侧

图 5 沿深度的归一化孔隙水压力

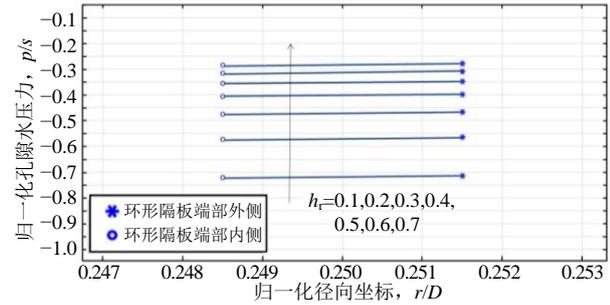
Fig. 5 Normalized pore water pressure along depth

为了清晰表达复合桶端部孔隙水压力在渗流过程中的变化情况,作桶壁和环形隔板端部两侧的孔隙水压力随沉贯深度变化示意图,如图 6。桶壁端部两侧的孔隙水压力整体为内部孔隙水压力大于外部,但随着沉贯深度的增加,差值在逐渐减小;对于环形隔板,端部两侧孔隙水压力值始终十分接近,说明环形隔板端部两侧土体的有效应力变化处

于统一状态。



(a) 复合桶壁内、外侧



(b) 环形隔板两侧

图6 桶壁端部归一化孔隙水压力

Fig. 6 Normalized pore water pressure at the bottom of skirt wall

取 $h_r=0.5$ 时, 复合桶舱室剖面的孔隙水压力 p/s 示意图如图7所示。复合桶所有舱室的孔隙水压力基本沿深度呈梯度变化, 但在复合桶端部, 压力梯度线明显不平行。K、L分别为GI、HJ的中点, 可以发现在同一深度处KL线上的孔隙水压力 p_{KL} 近似等于 $(p_{GH}+p_{IJ})/2$ 。

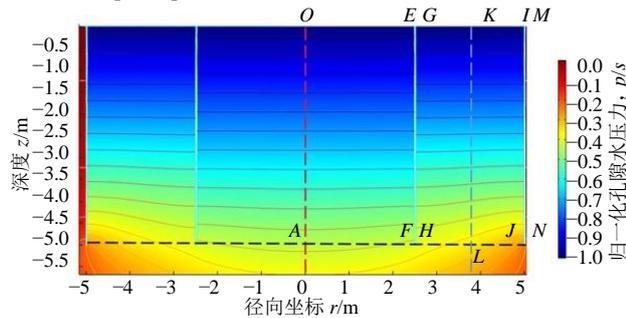


图7 复合桶舱室剖面归一化孔隙水压力

Fig. 7 Normalized pore water pressure inside composite suction caisson

另取肋隔板端部归一化孔隙水压力 p/s , 如图8。肋隔板端部孔隙水压力在靠近环形隔板位置时, 近似呈线性变化, 靠近桶壁处表现为明显的非线性改变, 这与在同一深度处复合桶侧壁渗流梯度大于桶内有关。随着沉贯深度的增加, 肋隔板端部孔隙水压力两端的差值在逐渐减小, 这与桶基础端部渗流梯度随着沉贯深度增加而减小有关。因此, 肋隔板的存在有助于维持复合桶基础沉贯过程的稳定。

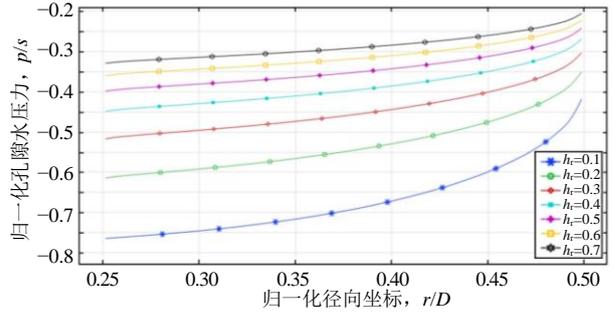


图8 肋隔板端部归一化孔隙水压力

Fig. 8 Normalized pore water pressure at the bottom of clapboard

3 复合桶与单桶在均质土层中沉贯的渗流特性对比

为进一步明确环形隔板及肋隔板在复合桶负压沉贯过程中的作用, 对同主尺寸 (桶壁厚度 $t'_s=0.3$ m, 桶径 $D'=10$ m) 的单桶基础进行负压沉贯建模, 沉贯模型的二维界面如图9所示。

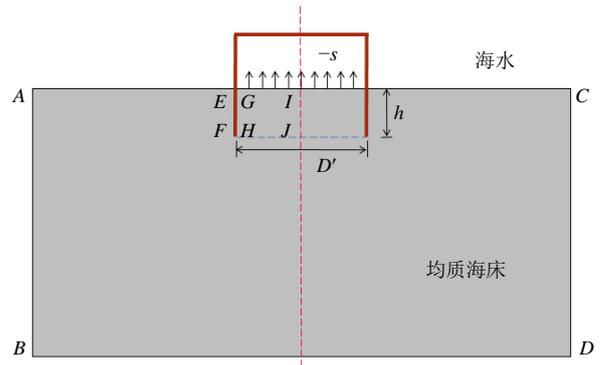


图9 单桶基础数值模型二维截面示意图

Fig. 9 Schematic of the numerical model of the monopod suction caisson

3.1 单桶基础与复合桶基础的模型整体渗流场对比分析

取 $h_r=0.2, 0.4, 0.6$, 即沉贯深度分别为2 m, 4 m, 6 m, 单桶基础周围的归一化孔隙水压力 p/s 分布如图10。

在单桶基础中, 复合桶内部孔隙水压力依旧呈梯度式变化且桶内孔隙水压力普遍大于桶外部, 这点与复合桶基础相同。在缺少环形隔板和肋隔板阻挡作用的情况下, 越靠近桶顶部, 同一深度处桶基础内部孔隙水压力基本相同。此外, 单桶基础中负压的影响范围延伸, 表现为桶下较远深度处存在有明显的孔隙水压力。

选取 $h_r=0.7$ 时, 作单桶基础与复合桶基础中心线处的孔隙水压力沿着海床深度变化的示意图, 如图11。

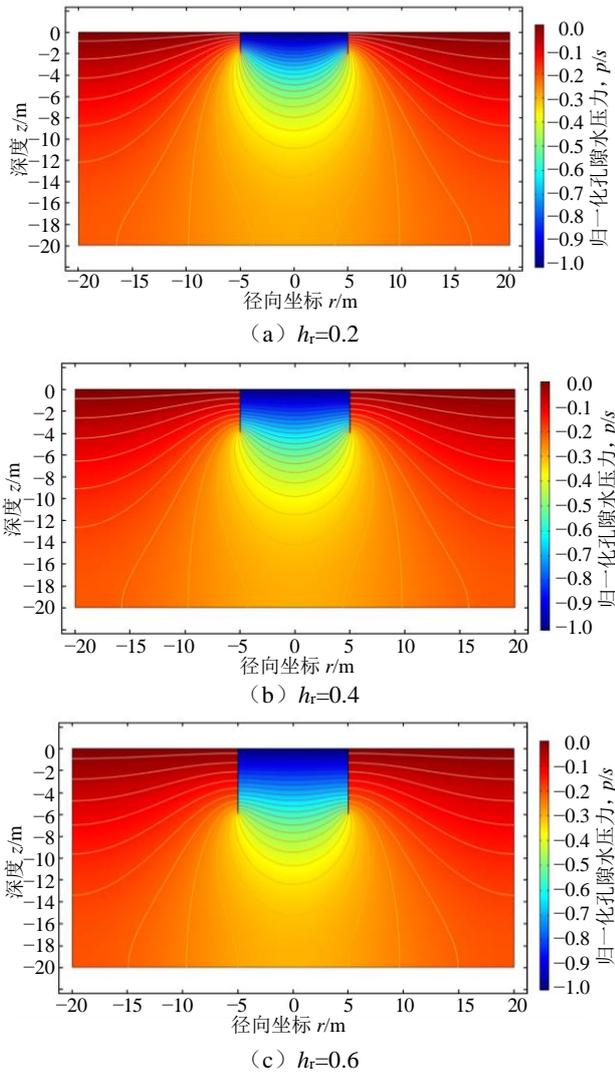


图 10 单桶基础归一化孔隙水压力

Fig. 10 Normalized pore water pressure of the monopod suction caisson

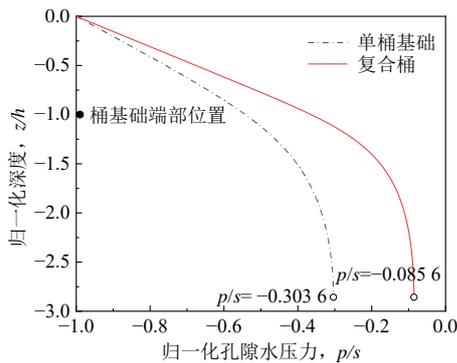


图 11 单桶基础与复合桶基础中心线归一化孔隙水压力

Fig. 11 Normalized pore water pressure of monopod and composite suction caisson centerline

可以发现桶盖下负压沿深度逐渐消散, 对于单桶基础, 在泥面下 $3h$ 深度处, 负压消散量为 69.6%, 而对于复合桶基础为 91.4%。因此环形隔板的存在使得桶盖下负压的消散主要集中于桶内部, 阻碍了负压向更深海床处发展。

3.2 单桶基础与复合桶周围渗流特征对比分析

取 $h_r=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$, 单桶基础内外壁孔隙水压力随深度变化情况如图 12。单桶基础与复合桶内外壁的孔隙水压力沿深度的变化特征相似, 但是变化梯度有明显不同。对于单桶基础而言, 桶内壁孔隙水压力沿深度的变化梯度与桶外壁相近; 而复合桶基础的桶内壁变化梯度明显大于桶外部。说明环形隔板及肋隔板的存在, 阻碍了桶内负压向桶外部的传递, 使得负压对于桶外部土体的孔隙水压力影响削弱。

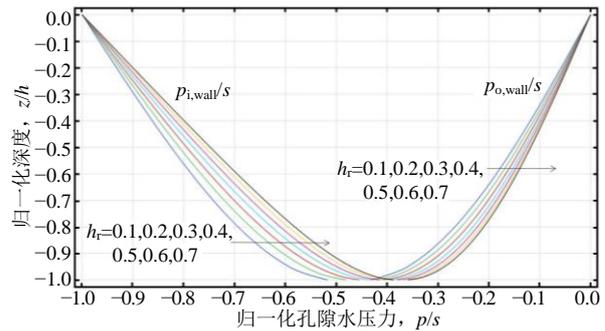


图 12 单桶基础内外壁归一化孔隙水压力

Fig. 12 Normalized pore water pressure of the skirt wall of monopod suction caisson

4 结 论

通过在 COMSOL Multiphysics 建立均质海床中复合桶沉贯模型, 分析在负压安装过程中复合桶内部及其周围渗流场变化情况, 得出以下结论。

(1) 在某一沉贯深度处, 待渗流稳定后, 复合桶和环形隔板侧壁孔隙水压力在靠近桶顶部时沿深度近似为线性变化, 靠近端部则表现为明显的非线性, 且端部处孔隙水压力不连续。通过与同主尺寸的单桶基础进行对比, 发现环形隔板及肋隔板的存在阻碍了桶内负压向外部的传递, 使得负压对于桶外部孔隙水压力影响削弱, 并抑制负压向更深海床处发展。

(2) 复合桶内部土体受吸力影响较大, 外部土体受影响较小, 水头损失大部分发生于桶内, 表现为桶内渗流梯度显著大于外部土体。并且在整个沉贯过程中始终保持同一深度处桶内侧土体有效应力减小量大于桶外侧土体有效应力增加量。因此渗流作用的存在使得复合桶壁沉贯阻力小于静压沉贯。

(3) 桶基础端部由于孔隙水压力的存在, 使得土体的有效应力减小, 对于复合桶基础的端部阻力有减弱作用。桶壁端部两侧的孔隙水压力整体为内部孔隙水压力大于外部, 但随着沉贯深度的增

加, 差值在逐渐减小。对于环形隔板, 端部两侧孔隙水压力值始终十分接近, 说明环形隔板端部两侧土体的有效应力变化处于统一状态。对于肋隔板, 其端部孔隙水压力两端的差值随着沉贯深度的增加而逐渐减小, 表明桶基础端部的渗流梯度在沉贯过程中逐渐下降。

参考文献

- [1] 黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 130-134.
HUANG Wei-ping, LIU Jian-jun, ZHAO Zhan-hua. The state of the art of study on offshore wind turbine structures and its development[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2): 130-134.
- [2] 丁红岩, 朱岩. 海上风电大尺度筒型基础分舱优化设计[J]. 船海工程, 2016, 45(3): 140-145.
DING Hong-yan, ZHU Yan. Optimal subdivision design of large-scaled bucket foundation of the offshore wind power plant[J]. Ship & Ocean Engineering, 2016, 45(3): 140-145.
- [3] BYRNE B, HOULSBY G, MARTIN C, et al. Suction caisson foundations for offshore wind turbines[J]. Wind Engineering, 2002, 26(3): 145-155.
- [4] WU Y Q, WANG Z T, YANG Q, et al. Theoretical studies on penetration resistance of suction caissons in clay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(5/6): 558-567.
- [5] HOULSBY G T, BYRNE B W. Design procedures for installation of suction caissons in sand[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering, 2005, 158(ge3): 135-144.
- [6] HOULSBY G T, BYRNE B W. Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering, 2005, 158(ge2): 75-82.
- [7] GUO Z, JENG D S, GUO W, et al. Simplified approximation for seepage effect on penetration resistance of suction caissons in sand[J]. Ships and Offshore Structures, 2017, 12(7/8): 980-990.
- [8] ZHANG P Y, HU R Q, DING H Y, et al. Comparative analysis of seepage field characteristics in bucket foundation with and without compartments[J]. Ocean Engineering, 2017, 143(Oct.1): 34-49.
- [9] ZHANG P Y, WEI W, JIA N, et al. Effect of seepage on the penetration resistance of bucket foundations with bulkheads for offshore wind turbines in sand[J]. Ocean Engineering, 2018, 156(May 15): 82-92.
- [10] ZHANG P Y, GUO Y H, LIU Y G, et al. Experimental study on installation of hybrid bucket foundations for offshore wind turbines in silty clay[J]. Ocean Engineering, 2016, 114(Mar.1): 87-100.
- [11] XIAO Z, GE B, WANG Y. Capacities and failure modes of suction bucket foundation with internal bulkheads[J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 16(4): 627-634.
- [12] ANDERSEN K H, JOSTAD H P, DYVIK R. Penetration resistance of offshore skirted foundations and anchors in dense sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(1): 106-116.
- [13] SHEN K M, WANG L Z, GUO Z, et al. Numerical investigations on pore-pressure response of suction anchors under cyclic tensile loadings[J]. Engineering Geology, 2017, 227: 108-120.