

浅水软地基海区桶形基础平台的沉贯技术

初新杰^{1,2}

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266003; 2. 胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要 为了在渤海辽东湾海域应用桶形基础采油平台, 针对该海域水文地质状况, 在负压安装机理研究的基础上制定了桶形基础防冲淘、平台沉贯整体倾斜调整的技术方案, 开展室内负压沉贯与静力压贯试验, 设计了负压沉贯抽吸泵组模块, 并成功应用于 JZ9-3W 桶形基础平台的海上安装, 为在表层地基软弱、海底冲淘严重的浅水区安装桶形基础平台提供了一套可重复利用的抽吸泵组模块和负压安装技术。

关键词 桶形基础平台 负压安装 浅水海区 软地基 防冲淘 物理模型试验 渤海辽东湾海域

中图分类号 :TE54 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2011)05-0068-05

Penetration technology for bucket foundation platforms in sea with shallow water and soft ground//CHU Xin-jie^{1, 2}
(1. Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying 257017, China)

Abstract : In order to utilize buck foundation platforms for oil extraction in Liaodong Bay of Bohai Sea, the technical scheme of anti-scour and inclination adjustment for the bucket foundation platforms was formulated based on the mechanism of negative pressure installation according to its hydrogeological conditions. The suction penetration tests and static force penetration tests were carried out in laboratory. The pumping modules for the suction penetration were designed. The suction installation technology was successfully applied in the JZ9-3W bucket foundation platform so as to provide a set of repeatable pumping module and suction installation technology for buck foundation platforms in shallow water area with weak soft ground and serious seabed scour.

Key words : bucket foundation platform; suction installation; shallow water; soft ground; anti-scour; physical model test; Liaodong Bay of Bohai Sea

海上桶形基础平台是 20 世纪 90 年代出现的海上新型采油平台^[1], 利用平台自重将桶体插入海底一定深度, 形成封闭的空间, 利用负压技术将桶体贯入海底预定深度, 使其承受水压力, 并且可以通过向桶内加压使桶体从地基中拔出, 实现平台移位和重复使用^[2-3]。

桶形基础平台用桶形浅基础代替了传统导管架平台的桩基深基础, 利用负压方法进行海上沉贯安装, 降低了钢材用量, 避免了打桩、接桩等繁重的海上作业, 缩短了施工时间, 从而降低了施工费用, 节省了平台投资^[4-5]。

在渤海辽东湾海域应用桶形基础平台, 需要克服水浅、可用负压小、地基表层软弱、海底冲淘等影响, 保证平台能够“下得去”和“稳得住”。在平台沉贯安装过程中, 桶内土体隆起升高, 桶顶高出泥面, 海底地基冲淘严重, 需要采取措施提高平台的站立

稳定性。同时, 在沉贯安装过程中, 桶形基础入泥一定深度后仅依靠浮吊已无法调整平台的倾斜角, 倾斜控制困难, 必须在沉贯的整个过程中设法控制平台的整体倾斜角, 保证桶形基础平台能够平稳、顺利地沉贯至预定深度^[3]。平台整体沉贯倾斜控制和平台基础防冲淘成为制约桶形基础平台在渤海辽东湾海域应用的重要环节。

为了确保桶形浅基础平台能在渤海辽东湾顺利安装, 开展了负压安装技术研究, 制定了预挖坑方案, 设计了负压沉贯施工泵组模块, 并应用于 JZ9-3W 桶形基础平台的海上安装。

1 JZ 9-3W 平台项目概况

1.1 辽东湾北部海域水文地质概况

辽东湾北部海域沿岸有四大河流垂岸分布, 区域海流是辽东湾海流系统的一部分, 主要由潮流、冲

淡水流和风海流组成^[6]。其中潮流占绝对优势,属正规半日潮流性质。全年平均风速为 4.3 m/s,平均风速 5 月份最大(为 5.3 m/s),7 月和 9 月最小(为 3.4 m/s),常风向为 SSW,频率为 22%。波浪以风浪为主,主要出现在春秋两季,春季为 WS 向,秋季为 NNE 向。大、小潮涨潮平均流速分别为 0.815 m/s 和 0.62 m/s,落潮平均流速分别为 0.789 m/s 和 0.677 m/s。

辽东湾北部现代沉积主要受辽河三角洲的发育过程影响,浅部地层的分布和性质随沉积环境的不同有显著变化。近年来的调查资料表明,潮道和浅海表层沉积物为流态-流塑状态的淤泥、淤泥质土。潮滩沉积物为新形成的覆盖于浅海-潮道淤泥质土上的粉土、粉砂、砂质粉土,新近潮滩沉积物的力学强度比盖州滩(经过波浪筛选)的强度低。辽东湾北部海域主要的灾害性地质因素为埋藏潮道、浅层气、潮道潮滩的快速蚀淤变化,表层软弱淤泥质土、构筑物在波浪潮流作用下的冲刷淘蚀,以及循环荷载作用下构筑物振动造成的粉土液化等^[7]。

1.2 拟建 JZ9-3W 平台概况

JZ9-3 西油田位于渤海辽东湾北部海域,东经 121°24'~121°37',北纬 40°38'~40°42'。油田西距辽宁省葫芦岛市约 53 km,东北距辽河平原海岸最短距离约 15 km。拟建 JZ9-3W 平台井位区域水深为 8 m,浅层土设计参数见表 1。

表 1 JZ9-3W 平台浅层土设计参数

层号	土质描述	深度/ m	湿密度/ (kg·m ⁻³)	含水 率/%	平均无扰动 不排水抗剪 强度/kPa
1	很软粉质黏土	0~2.8	700	43	5.5
2	软粉质黏土	2.8~7.7	850	33	20.5
3	中密实粉砂 和砂质粉砂	7.7~10.3	950	24	26.8

JZ9-3W 拟建平台下部结构为桶形基础的导管架,设有桶基 3 个(成等边三角形分布),桶基中心距离为 22.8 m,桶基之间由箱型梁连接。平台上部组块与下部结构之间采用 1 根直径为 1.829 m 的主立柱连接,主立柱周围设置 4 根直径为 0.61 mm 的护管,形成复合柱结构。桶体高 9 m,复合柱下方的大桶直径为 7.0 m,其余 2 个小桶的直径为 6.0 m。在复合柱的水线区设有正倒锥组合体抗冰。下部结构和复合柱构成平台的下部模块。JZ9-3W 平台总高度为 25.72 m,总质量约为 37.8 t。平台 3D 模拟见图 1。

2 沉贯技术思路

2.1 自重正压沉贯

平台陆地建造完成后吊装至驳船,由拖轮将驳船拖至预定井位,用浮吊定位,将平台整体吊起放入

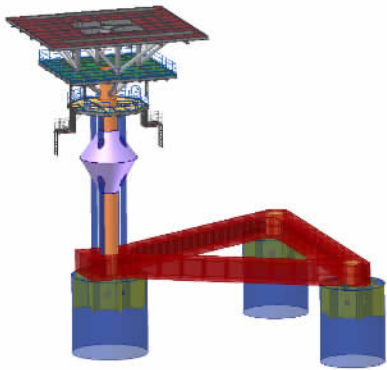


图 1 JZ9-3W 平台 3D 模拟图

水中,开始自重沉贯过程。此时,平台沉贯动力 T 来源于平台在水中受地心的引力 G' ,沉贯阻力 R 为桶端阻力 Q 与桶壁侧摩阻力 F 之和。

当 $T > R$ 时,平台依靠自重沉贯入泥一定深度;当 $T = R$ 时,平台处于等速沉贯状态。随着入泥深度的增加,沉贯阻力逐渐增加,但沉贯动力基本不变, $T < R$ 时平台不能继续沉贯,自重正压沉贯结束。

2.2 负压沉贯

为了使桶形基础沉贯到预定深度,可采取 2 种措施:一是增大沉贯动力,二是减小沉贯阻力。

2.2.1 负压作用下的沉贯动力分析

桶体在重力作用下入泥一定深度时,如果利用抽吸泵从桶体内向桶体外抽水,使桶体内压力降低,导致桶顶盖的上下存在压差,从而产生平台附加沉贯动力:

$$T = G' + P \tag{1}$$

将 $P = \sum (\Delta p_i A_{i\text{盖}})$ 以及 $\Delta p_i = p_{i\text{顶盖上部}} - p_{i\text{顶盖下部}}$ 代入式(1)后得

$$T = G' + \sum [(p_{i\text{顶盖上部}} - p_{i\text{顶盖下部}}) A_{i\text{盖}}] \tag{2}$$

式中: P 为负压产生的附加沉贯动力; $A_{i\text{盖}}$ 为第 i 个桶的桶顶有效面积; Δp_i 为第 i 个桶的内外压差,主要指桶顶盖上下压差; $p_{i\text{顶盖上部}}$ 为第 i 个桶的桶顶盖上部压力,即桶顶处的海水压力; $p_{i\text{顶盖下部}}$ 为第 i 个桶的桶顶盖下部压力,即桶体内压力。

维持 $p_{i\text{顶盖下部}}$ 不变时, Δp_i 和 P 随水深的增加而增加。桶顶与水面的距离不变时,增加抽吸能力,使 $p_{i\text{顶盖下部}}$ 减小, Δp_i 和 P 随 $p_{i\text{顶盖下部}}$ 的减小而增大。因此,利用抽吸泵从桶体内向桶体外抽水可以增大 T 。

2.2.2 负压作用下沉贯阻力分析

平台的沉贯阻力包括土体对桶体的侧摩阻力和端阻力两部分。负压作用下,桶体外的压力大于桶体内的压力,使土壤地基中的孔隙水由桶体外向桶体内渗流。由于桶壁内侧产生向上的渗流,使桶体

裙端处的孔隙水渗流梯度最大,并使桶内土体的有效应力减小^[8]。因此,作用于桶体的单位面积侧摩阻力减小、单位面积裙端阻力显著减小。

沉贯阻力计算公式如下:

$$R = F + Q \tag{3}$$

将 $F = \sum (f_i A_{i侧})$ 以及 $Q = \sum (q_i A_{i端})$ 代入式(3) 后得

$$R = \sum (f_i A_{i侧}) + \sum (q_i A_{i端}) \tag{4}$$

式中: $A_{i侧}, A_{i端}$ 分别为第 i 个桶的侧壁入泥面积和裙端面积; f_i, q_i 分别为第 i 个桶的单位面积侧摩阻力和单位面积裙端阻力。

在桶内负压作用下,孔隙水的渗流造成 f_i 和 q_i 减小, $A_{i端}$ 为不变值,即 $\sum (q_i A_{i端})$ 减小;如果入泥深度相等, $\sum (f_i A_{i侧})$ 减小。因此,利用抽吸泵从桶体内向桶体外抽水可以减小 R 。

2.2.3 负压作用下的沉贯综合分析

桶形浅基础平台在负压沉贯安装过程中桶体的沉贯速度一般不大,忽略加速度的影响,因此沉贯阻力约等于沉贯动力^[9]。即

$$T = R \tag{5}$$

将式(2)(4)代入式(5)得

$$G' + \sum (\Delta p_i A_{i盖}) = \sum (f_i A_{i侧}) + \sum (q_i A_{i端}) \tag{6}$$

表层为软粉质黏土地基浅水区的 G' 随桶基入泥深度变化较小,可假定 G' 为定值。在桶内负压作用下, $A_{i端}$ 和 G' 为定值,随着 Δp_i 的增大,式(6)等号左边的值增大,孔隙水的流动造成 f_i 和 q_i 减小, $A_{i盖}$ 和 $A_{i端}$ 为不变值, $\sum q_i A_{i端}$ 减小,因此式(6)等号右边的项 $\sum (f_i A_{i侧})$ 随着 Δp_i 的增大而增大;又因为 f_i 在减小,所以 $A_{i侧}$ 随着 Δp_i 的增大而增大。以上分析表明,随着 Δp_i 的增大,桶基的入泥深度必然增加。所以,通过选择合适的抽吸泵,提供平台沉贯所需要的桶体内外压差,可以使桶形基础沉贯到预定的深度。

在浅水区由于水深较小,能利用的 $p_{i顶盖上部}$ 最大值约为海底的海水压力;如果在海底预挖坑深度为 h_1 ,则能利用的 $p_{i顶盖上部}$ 最大值约增加 h_1 高度海水产生的水压力。因此,在泵组一定的情况下,预挖坑方案能够增加平台的沉贯动力,从而使平台沉贯深度明显增加。

2.3 平台整体倾斜调整

平台各桶入泥深度不等会造成平台整体倾斜,倾斜角超过允许值时需及时调整。在自重沉贯阶段,依靠浮吊的扶正作用可保证平台整体倾斜控制

在允许范围内,在负压沉贯阶段,通过调整抽吸泵的出水速度,改变各桶的内外压差,可以改变各桶的沉贯速度,从而调节各桶的入泥深度,达到调整平台整体倾斜角的目的。

2.4 平台基础防冲淘

潮流流经平台时原始流态将会改变,这种改变会引起泥沙的剧烈运动,海床随之发生变化,形成冲刷坑,降低平台作业的稳定性的。同时,在平台沉贯安装过程中,桶壁、内部附属结构和内外压差都会引起桶内土体隆起升高,导致桶顶高出海底泥面,加剧局部海底地基的冲淘。因此,必须采取措施使桶形基础的顶部贯入到海底泥面以下一定深度,提高平台站立的稳定性。如果在平台沉贯区域预挖基槽,使平台的桶形基础全部埋入海底泥面以下,由于泥面以上立柱的直径比较小,对于上部立柱冲刷范围在 0.75 倍直径范围左右,该范围处于桶基顶部半径以内,不会影响到桶基的稳定性,可以从根本上避免海底地基冲淘对桶形基础平台的影响。

3 室内物理模型试验

3.1 试验模型

加工制作了 1 个钢质桶形基础单桶模型,桶高为 0.45 m,桶直径为 0.3 m,桶侧壁厚为 0.005 m,桶顶盖厚度为 0.01 m,总质量为 220 kg。

根据辽东湾北部海域浅层典型工程地质条件配置了试验地基。地基参数见表 2。

表 2 试验地基参数

地基分层名称	含水率/%	孔隙比	湿密度/(kg·m ⁻³)	平均无扰动不排水抗剪强度/kPa	地基深度/m
粉质黏土	35.8	0.872	870	20.5	0~0.30
粉砂	25.4	0.708	930	25.2	0.30~1.0

3.2 静力压贯/负压沉贯对比试验

3.2.1 静力压贯试验

在试验地基中进行静力压贯试验,试验水深为 0.5 m。首先,单桶模型在自身所受重力的作用下沉贯入泥,记录桶体裙端的初始入泥量;然后,在桶顶部分级增加压载块,记录桶体裙端的入泥量和压载块的质量,直至压载块的总质量达到 800 kg 为止。

3.2.2 负压沉贯试验

在桶顶板上开 2 个螺纹孔,分别连接负压表和抽吸泵;在单桶模型上部附加质量为 280 kg 的配重块,然后在试验地基中进行负压沉贯试验,试验水深为 0.5 m。首先,在自重和配重作用下桶体裙端沉贯入泥,记录桶体裙端入泥量;然后,保持配重块质量不变,通过抽吸泵从桶体内部向外抽水,记录桶体裙端入泥量和负压值(即桶体内外压差)。最终,桶内

压力达到 -65.65 kPa ,桶体入泥深度为 0.405 m ,此时土体充满桶体内部。

3.2.3 沉贯阻力对比分析

根据静力压贯试验数据绘制单桶静力压贯下的阻力与沉深关系曲线,根据负压沉贯试验数据绘制单桶负压沉贯下的阻力与沉深关系曲线,然后进行沉贯阻力~沉深曲线的比较。单桶模型静压/负压沉贯阻力对比曲线见图2。

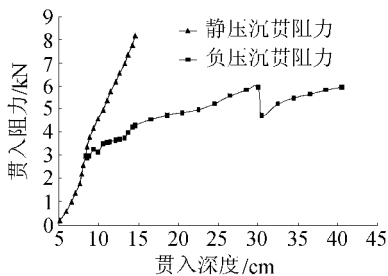


图2 单桶模型静压/负压沉贯阻力对比曲线

静力压贯的沉贯阻力由桶体自重和压载块质量相加得到,负压沉贯的沉贯阻力由桶体自重、压载块质量和桶顶盖上下压差力三者相加得到(其中桶顶盖上下压差力由压差与顶盖面积相乘得到)。

从图2可以看出,负压作用下沉贯阻力大幅度减小,证明负压作用具有显著的减阻效果,利用负压原理可以实现桶形基础的入泥沉贯。

4 负压沉贯技术在JZ9-3W桶基础平台的应用

负压沉贯技术应用于JZ9-3W桶形基础平台的海上安装。

4.1 抽吸泵组模块

加工制作了3套螺杆抽吸泵组模块(配潜海水电机),分别独立安装在3个钢桶的桶顶,泵组模块与平台桶基之间通过橡胶软管连接,可快速安装和拆卸。启动3套抽吸泵,可分别抽吸3个桶基内的水。为提高平台负压下沉施工的成功率,以防万一,抽吸泵组在仅改变电源相位的情况下能够反转倒流,从而向桶内加水,将平台拔起。

4.2 JZ9-3W桶基平台沉贯设计

4.2.1 负压沉贯技术参数

根据负压沉贯理论分析和试验结果设计沉贯控制负压(即桶顶上下压差),预测了沉贯阻力。负压与沉深关系设计曲线见图3,沉贯阻力~沉深关系预测曲线见图4。

图3、图4中,系列1为主桶设计沉贯控制负压和预测的沉贯阻力,系列2为辅桶设计沉贯控制负压和预测的沉贯阻力。根据沉贯动力略大于沉贯阻力的原则确定控制负压参数。控制负压设计计算中,考虑粉质黏土中桶裙端阻力降低30%~40%,

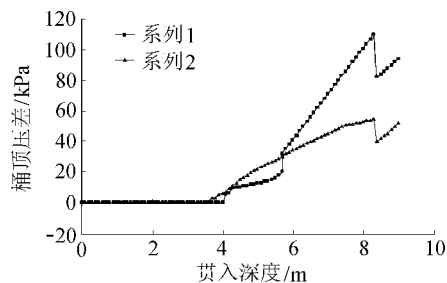


图3 桶内负压与沉深关系设计曲线

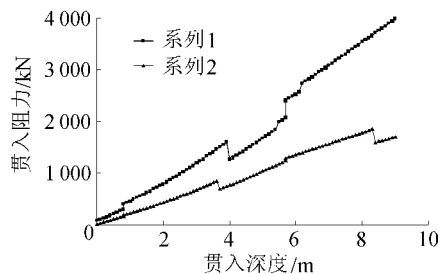


图4 沉贯阻力~沉深关系预测曲线

桶壁侧摩阻力降低20%~30%,粉土中桶裙端阻力降低60%~70%,桶壁侧摩阻力降低30%~40%。

主桶最大设计负压为 110 kPa ,最大沉贯阻力为 3998 kN 。辅桶最大设计负压为 55 kPa ,最大沉贯阻力为 1705 kN 。

4.2.2 倾斜调整

当平台整体倾斜超过 1° 时需调整控制负压,降低沉深较大桶的负压,并同时提高沉深较小桶的负压,使3个钢桶平衡沉贯。

抽吸泵组能够产生的最大桶顶上下压差(负压)大于 160 kPa ,有足够余量实现平台的整体倾斜调整。

4.3 陆地建造与传感器安装

陆地建造与传感器安装步骤如下:①下部模块陆地建造完成后,吊装到驳船上固定;②将抽吸泵组固定于平台桶形基础顶盖上,连接好管线和电缆;③固定倾斜度仪、压力传感器等并进行测试。

每个桶顶盖的下面和上面各安装1个压力传感器,两者测得的结果相减得到各桶的内外压差(即负压)。倾斜度仪安装在导管架的小平台上。

4.4 基槽预开挖与自重沉贯

在桶形基础平台施工处的海底预挖基槽,基槽东西宽 40 m 、南北长 60 m ,槽深 2.5 m 。采用GPS定位系统进行挖坑施工控制,随时跟踪水深测量,控制挖深和坑底平整度。

由拖轮将驳船拖至预定井位,到达安装地点后等待。在基槽开挖作业完成后将下部模块从甲板驳解脱,用浮吊吊起平台结构并进行定位。浮吊将导管架从驳船上吊起后缓慢下放入水,浮吊做垂直牵拉。

桶体密封舱开阀进水,使结构缓慢下沉至泥面,待完全进水后靠其自重初始入泥。箱形梁内进行充水压载,导管架的桶体逐渐入泥 3.6 m 以上,形成了负压下沉的桩土密封条件。

在海底放置 1 个压力传感器,测试海底原始的水压力。将海底水压力值分别与各桶顶部压力传感器测得的压力值相减,然后再根据该差值推算出桶体裙端的入泥深度。

4.5 负压沉贯

通过抽吸泵从桶内向桶外抽水,平台在负压作用下沉贯。记录各桶体顶盖的上部压力、下部压力以及平台的倾斜角度等,通过计算机实时计算并显示各桶体裙端入泥量、负压值(即桶体内外压差)等。

通过调整抽吸泵的排量,改变各桶的下沉速度,保证平台始终在倾斜角度 1° 以内沉贯。平台最终达到设计沉贯深度,桶顶沉至原始海底泥面之下 11.2 m,箱型梁顶部与自然泥面基本平齐,平台整体倾斜小于 0.6° 。

分别计算不同深度处各桶的负压沉贯阻力和静压沉贯阻力(即无负压沉贯阻力),得到有、无负压作用下各桶入泥量与沉贯阻力关系曲线(图 5)。

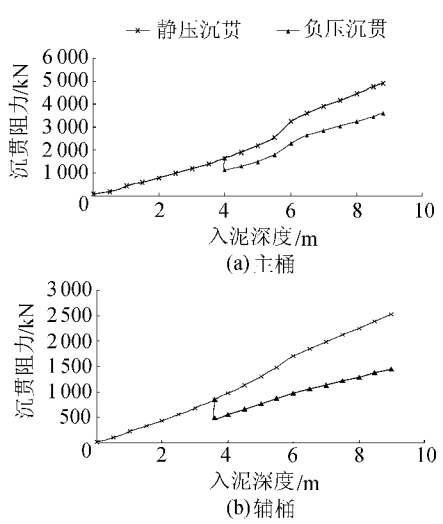


图 5 有、无负压作用下各桶入泥量与沉贯阻力关系曲线

平台沉贯的速度很小,视为等速沉贯,因此沉贯阻力约等于沉贯动力。沉贯动力为平台自重在各桶的重力分量与各桶顶盖上下压差产生的附加动力之和,由此计算得到各桶的负压沉贯阻力。根据平台的桶基结构和地基资料计算静力压贯条件下的沉贯阻力,各桶的沉贯阻力为不同深度处各桶体的裙端阻力与侧摩阻力之和,由此计算得到各桶的静压沉贯阻力。

由图 5 得出:无负压作用时,主桶最大沉贯阻力为 4903 kN,辅桶最大沉贯阻力为 2531 kN。有负压作用时,主桶最大沉贯阻力为 3591 kN,辅桶最大沉贯

阻力为 1456 kN。各桶的负压沉贯阻力明显小于无负压时的沉贯阻力。可见,负压具有显著的减阻效果。

5 结 语

针对辽东湾北部海域的水文地质状况,在负压安装机理研究的基础上制定了桶形基础防冲刷、平台沉贯整体倾斜调整的施工方案,开展了室内负压沉贯与静力压贯试验,设计了负压沉贯抽吸泵组模块,并应用于 JZ9-3W 桶形基础平台的海上安装,为在表层地基软弱、海底冲刷严重的浅水区安装桶形基础平台提供了一套可重复利用的抽吸泵组模块和负压安装技术。

参考文献:

- [1] 黄悦华,任克忍. 我国海洋石油钻井平台现状与技术发展分析[J]. 石油机械,2007,35(9):157-160.
- [2] BYE A, ERBRICH C, TJELTA T I. Geotechnical design of bucket foundations[C]//IAEA D, JAMES H T. Proceedings of Offshore Technology Conference. Austin: Texas University Press, 1995:869-883.
- [3] TJELTA T I, AAS P M, HERMSTAD J. The skirt pile gullfaks C platform installation [C]//BRAKS L M, MATHERK T B. Proceedings of Offshore Technology Conference. Austin: Texas University Press, 1990:453-462.
- [4] 黄新生. 滩海油田建设中桶形基础的开发和应用[J]. 中国海洋平台,1996,11(5):195-201.
- [5] 何生厚. 桶形基础沉贯室内模型试验研究[J]. 海岸工程,1999,18(1):18-24.
- [6] 许振强. 辽东湾北部工程地质环境及其工程适宜性研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2005:38-45.
- [7] 苗丰民,李淑媛,何宝林. 辽东湾北部潮滩及浅海区泥沙运移趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质,1992,12(3):21-35.
- [8] 严驰,魏世好,杨树耕,等. 海上桶基平台桶形基础渗流场的模型试验研究[J]. 海岸工程,2003,22(3):32-37.
- [9] 初新杰,周玉斌,李桂燕. 桶基平台负压沉贯施工机具的研究与应用[J]. 黄渤海海洋,2000,18(4):68-72.

(收稿日期:2011-02-22 编辑:高建群)

