



# 吸力桶与圆沉箱整体预制式 新型离岸深水码头<sup>\*</sup>

左大伟<sup>1</sup>, 肖忠<sup>2</sup>

(1. 天津津港建设有限公司, 天津 300456;

2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了开发能够更好地适应软土地基和恶劣波浪条件的离岸深水码头, 结合吸力桶和圆沉箱的优点, 提出了吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水码头。阐述其结构组成、平面布置和施工工艺, 分析了其承载特性。该结构靠岸侧可布置泊位、靠海侧可兼做防波堤, 抗浪能力强, 具有承载性能好、结构刚度大、耐久性好、费用省和对环境影响小的优点, 应用前景广泛。相比无隔舱的吸力桶, 此新型结构通过设置内圆桶和内隔板, 抗滑和抗倾覆能力大幅提高。贯入损伤对基础安装就位时的承载力有比较明显的降低作用, 建议在设计中考虑。

**关键词:** 码头; 离岸深水; 软土地基; 新型结构; 防波堤

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0056-06

## A new type of entirely prefabricated offshore deep-water wharf composed by suction bucket foundations and circular caissons

ZUO Da-wei<sup>1</sup>, XIAO Zhong<sup>2</sup>

(1.Tianjin Jingang Construction Co., Ltd., Tianjin 300456, China;

2.State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to develop an offshore deep-water wharf that can better adapt to soft foundation and severe wave conditions, a new type of entirely prefabricated offshore deep-water wharf with suction bucket foundations and circular caissons is proposed by combining the advantages of suction bucket foundations and circular caissons. Its structural composition, plane layout and construction technology are expounded, and its bearing characteristics are analyzed. The structure can be arranged with berths on the shore side, and can also be used as a breakwater on the sea side. It has strong wave resistance, good bearing performance, high structural rigidity, good durability, low cost and little impact on the environment, and has wide application prospects. Compared with the suction bucket without compartment, this new structure greatly improves the anti-slip and anti-overturning ability by setting the inner bucket and clapboards. Penetration damage can significantly reduce the bearing capacity of the foundation when it is in place, and it is recommended to consider it in the design.

**Keywords:** wharf; offshore deep-water; soft foundation; new structure; breakwater

收稿日期: 2022-03-06

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51879187, 51890915); 国家重点研发计划项目(2021YFB2600200); 天津大学技术开发项目(2022GKF-0372)

作者简介: 左大伟(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口结构设计和建设管理工作。

通讯作者: 肖忠(1983—), 男, 博士, 英才副教授(特聘研究员), 从事港口和海洋工程构筑物设计理论和方法、土与结构相互作用等方面的研究工作。E-mail: tjuzhongxiao@tju.edu.cn

船舶大型化要求港口向离岸深水发展, 建设现代化的离岸深水港是近年来我国水运工程的重点发展方向。离岸深水港就是把码头建到外海去、通过桥或堤将码头连接到岸上, 可大大增加码头前沿水深, 大型船舶可通过外海深水航道直接到达码头停靠, 不需要对码头前水域和航道进行大规模开挖, 从而节省造价、保护环境。建造离岸深水港面临 3 个主要挑战: 一是很多海底地基表层存在软土层, 对离岸深水码头的承载性能要求高; 二是离岸深水码头一般位于无掩护的开放海域, 码头结构所受的波浪力大, 船舶系泊稳定性较差; 三是离岸深水区的现场施工条件恶劣, 可利用的施工窗口较短。

离岸深水码头的结构形式按承载机理主要分为重力式、桩基式和大直径薄壁沉入式。重力式离岸深水码头主要靠自重维持结构的抗滑和抗倾覆稳定性, 虽然耐久性好, 对码头超载和工艺变化适应能力强, 但是如果用于软土地基, 需对软基进行大规模的开挖换填或加固, 成本高、对环境破坏大, 不宜采用。桩基式离岸深水码头主要通过打入地基中的桩将码头荷载传给地基, 虽然能适用于软基, 但是其耐久性较差、结构整体刚度较小, 当水深较深时, 结构自身变形较大。大直径薄壁沉入式离岸深水码头的基础由沉入软土地基的大直径筒(桶)型基础组成, 筒(桶)壁对其内土体起到束缚作用, 可将码头上部荷载传到更深的地基中, 不开挖软基的情况下就能充分发挥强度更大的深层土的承载能力, 同时这类结构壁面面积大, 壁面上的摩阻力对结构的竖向承载力和抗倾覆稳定性均有较大贡献, 肖忠等<sup>[1]</sup>得出天津港防波堤延伸工程中的箱筒型基础防波堤(属于大直径薄壁沉入式结构)的壁面摩阻力对其竖向承载力和抗倾覆稳定性的贡献分别接近 40% 和 60%, 稳定性好。相比于另外两类结构, 薄壁沉入式离岸深水码头能够更好地适应软基和恶劣波浪条件, 具有广泛的应用前景。

近年来, 我国陆续建设了一些离岸深水码头, 结构形式主要采用重力式或桩基结构; 国外离岸深水港多采用全直桩结构和导管架结构等<sup>[2]</sup>。常规的重力式和桩基离岸深水码头设计方法相对比

较成熟。比较特殊的是当桩基码头在岩基上建造时, 多采用大直径嵌岩桩的形式, 国内外学者已对大直径嵌岩桩的承载特性进行了较多的研究<sup>[3-6]</sup>。对于大直径薄壁沉入式结构的承载特性研究, 除了开展离心机等试验<sup>[7]</sup>, 这类结构的承载特性计算方法主要有基于加载系数法的三维弹塑性静力有限元法<sup>[8-12]</sup>、基于土压力性状分析<sup>[13]</sup>的稳定性简化计算分析方法<sup>[14-15]</sup>、基于极限平衡法的稳定性分析方法、基于循环强度概念的三维弹塑性拟静力有限元法<sup>[16-18]</sup>、三维弹塑性动力有限元法<sup>[19-20]</sup>及可考虑塑性变形和结构三维形状的动力稳定性简化计算方法<sup>[21]</sup>。但关于薄壁沉入式离岸深水码头的研究鲜有报道, 本文结合吸力桶基础和圆沉箱的各自优点, 提出了一种可适用于深水和软基条件的新型离岸深水码头, 具有承载特性好、海上作业时间较短、整体刚度大、耐久性好、费用省和对环境影响小等优点。本文阐述该码头的组成、平面布置和施工工艺, 分析承载特性, 其结构和平面布置形式可为离岸深水码头的建设提供一种新的思路。

## 1 结构分析

### 1.1 结构组成

为了将吸力桶在软土地基上的优良承载特性与重力式沉箱整体刚度大、耐久性好的优点相结合, 提出了吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水码头结构, 见图 1, 每组结构由钢筋混凝土外圆桶、内圆桶、十字形内隔板、基础盖板、码头盖板、挡浪墙、护轮坎和系船柱等码头上部设施组成。

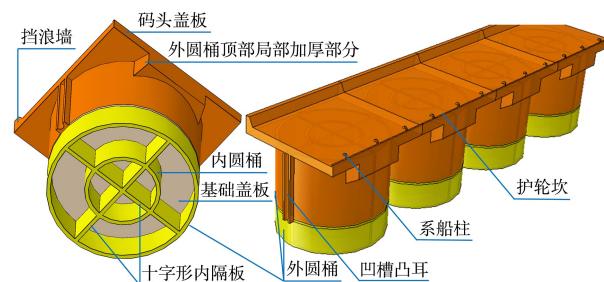


图 1 吸力桶与圆沉箱整体预制式离岸深水码头

这种新型结构的下部吸力桶沉入软土地基中提供承载力; 基础盖板以上部分是圆沉箱, 提供

码头作业和船舶靠泊的平台。为了便于靠船和安装码头防撞设施，对设计低水位到圆筒顶端的一段外桶壁进行适当加厚，并与码头盖板的侧面做成平面，见图 1、2。相邻的上部外圆桶间接缝处的处理措施见图 3，在上部外圆桶两侧设凸耳，相邻凸耳对接后形成空腔，在空腔内浇筑混凝土或填充块石。

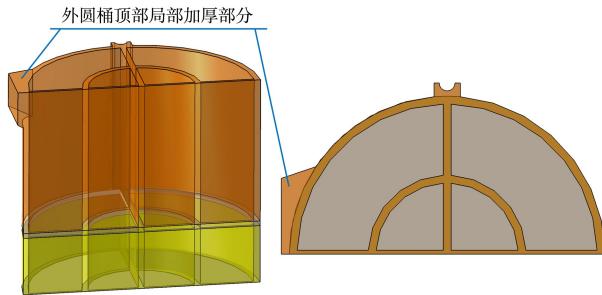


图 2 外圆桶顶部局部加厚部分

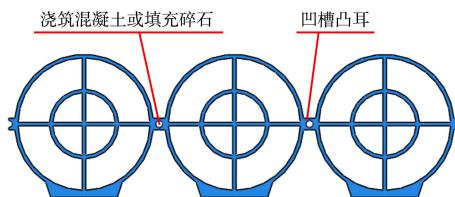


图 3 相邻上部外圆桶间接缝处的处理措施

吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水码头结构总体受力比较均匀，如将上部桶壁适当开孔，则可做成透空式，可减小波浪力、促进港内外的水体交换。

## 1.2 平面布置

如图 4 所示，将码头泊位布置在码头靠岸侧，靠海侧兼做防波堤，可大幅提高泊位内船舶的系泊稳定性。一种结构同时实现防波堤和码头两种功能，可大大节省工程造价。

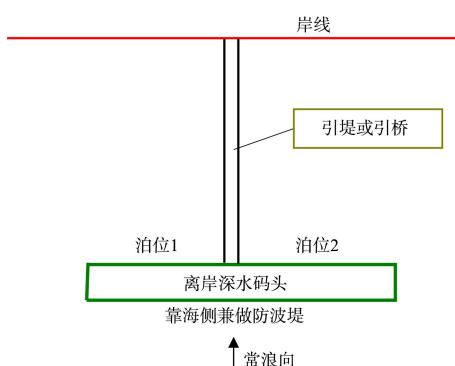


图 4 离岸码头的典型平面布置

## 1.3 施工工艺

1) 制作运输底板，同时作为结构整体预制的台模，借鉴大型沉箱的预制和出运方法<sup>[22]</sup>，在运输底板上采用滑升式模板技术整体预制下部的内外圆桶和十字形内隔墙；2) 现浇基础盖板，采用滑升式模板技术整体预制上部的内外圆桶和十字形内隔墙，通过气囊顶升和出运等施工技术将运输底板和结构由预制场整体出运，参照圆沉箱的拖运方式将结构运到施工地点；3) 利用负压下沉工艺下沉结构，并现场安装码头盖板、挡浪墙、护轮坎和系船柱等码头上部设施。这种结构的十字形内隔板和内圆桶将下部吸力桶分为 8 个隔舱，通过控制各个隔舱顶部盖板上的通气阀的排气排水量，可竖直下沉结构。结构的主体部分在预制场整体预制，整体拖运到施工地点后进行下沉安装，装配化程度高、施工效率高、海上作业时间相对较短。

## 2 承载特性分析

内圆桶和内隔板的设置不仅加强了结构刚度和对上部码头面的支撑力，同时多隔舱调平技术可保障结构安装后码头的垂直度，对码头结构的承载力也有大幅提高。相比于嵌固在正常固结的软土地基上的无隔舱吸力桶，这种设置了内圆桶和内隔板的新型离岸码头虽然可承受的竖向承载力变化不大，但承受力矩和水平荷载的能力大幅提高，水平力和竖向力复合加载时的承载力破坏面大幅外扩。

### 2.1 有限元模型

以外桶外径  $D$  为 24 m、内桶外径  $D'$  为 12 m、入土深度  $d$  为 6 m 的新型结构为例，埋置在不排水剪切强度按  $s_u = s_{um} + kz$  分布的软基上 ( $s_{um}$  为泥面处的土体不排水剪切强度， $k$  为土体不排水剪切强度随深度的变化率， $z$  为地基深度)。作为对照的无隔舱的吸力桶的外径也取 24 m、入土深度也取 6 m。分别建立了设置内圆桶和内隔板的吸力桶、无隔舱的吸力桶与软土地基的有限元模型，见图 5。为了去除网格划分对不同结构形式吸力桶承载特性的影响，设置内圆桶和内隔板的吸力桶与

无隔舱的吸力桶的有限元模型的网格划分相同, 单元总数均为 6.857 4 万个, 因杂交单元比较适合模拟不排水条件下的软土等不可压缩材料<sup>[23]</sup>, 因此模型中土体采用线性 8 节点杂交实体单元 (C3D8H), 吸力式桶形基础的刚度远大于软土地基的刚度, 计算中可将基础视为刚体。对于刚体, 可将作用在基础上的所有外力转化为作用在加载参考点(RP)上的竖向力  $V$ 、水平力  $H$  和力矩  $M$ , 荷载加载参考点可以取刚体上不同的位置, 所得结果之间满足力的平移定理。在基础与土体接触面处和基础底部均划分了 1 层极细的网格薄层(厚度约为 3% $\epsilon D$ )。为提高计算效率, 利用荷载和结构的对称性, 取 1 组吸力桶结构的一半作为分析对象。为减少有限元计算过程中地基模型的边界效应, 土体计算域在垂直码头轴线方向取 240 m、平行码头轴线方向取 12.5 m、土体总厚度取 120 m。不排水条件下基础的极限承载力分析中, 可采用基于 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构模型模拟饱和软黏土的力学特性, 此时土体的极限承载能力取决于土体的不排水剪切强度  $s_u$ 。取土体弹性模量  $E_u = 500 s_u$ 、泊松比  $\nu = 0.49$ 、有效密度  $\rho' = 0.6 \text{ t/m}^3$ , 这几个取值为比较典型的饱和软黏土指标, 并且现有的研究成果表明这几个指标的选取不会影响不排水条件下软基上基础的极限承载力。在 Abaqus 有限元中编写 USDFLD 场变量子程序进行二次开发, 实现对不同深度土体赋值不同的土体的剪切强度  $s_u$  和弹性模量  $E_u$ 。考虑到基础吸力的作用以及基础和土体间的黏结性比较强, 在其接触处设置完全粗糙的接触面。

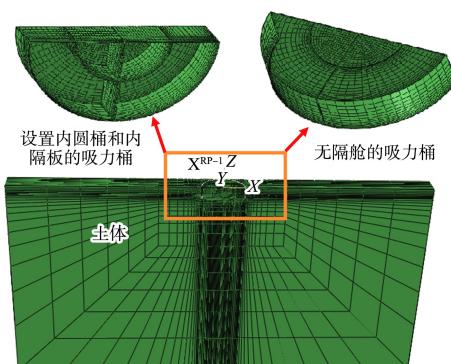


图 5 有限元模型

在加载参考点上加载一外荷载, 直到加载到极限值, 绘出加载力和位移曲线, 以力和位移曲线斜率接近于零时对应的加载力作为此时吸力桶可提供的极限承载力(如竖向极限承载力  $V_{ult}$ 、水平极限承载力  $H_{ult}$ 、力矩极限承载力  $M_{ult}$ )。当  $kD/s_{um} = 0$ 、 $d/D = 1.0$  时, 本文计算的无隔仓的吸力桶的承载力与文献[24]结果的对比见表 1, 结果基本相同, 可见本文建立的模型和方法精度符合要求。

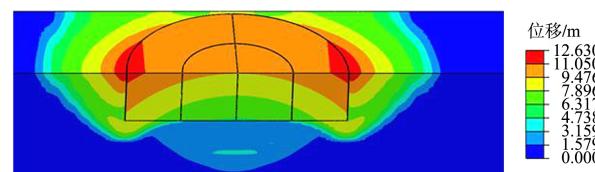
表 1 有限元模型的验证

分类	$V_{ult}/(As_{um})$	$H_{ult}/(As_{um})$	$M_{ult}/(AdS_{um})$
本文	13.19	6.78	3.62
文献[24]	13.19	6.49	3.41
误差/%	0	4.28	4.20

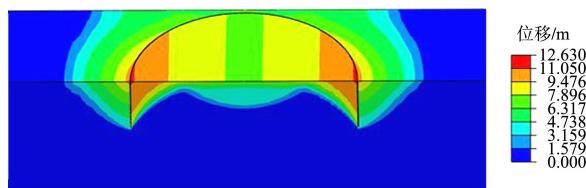
注:  $A = \pi D^2/4$ 。

## 2.2 设置内圆桶和内隔板对吸力桶承载力的影响

软土地基的不排水剪切强度按  $s_u = 1 + 2z(\text{kPa})$  分布, 按 2.1 节介绍的设置内圆桶和内隔板的吸力桶与无隔舱的吸力桶的尺寸建立有限元模型。在设置内圆桶和内隔板的吸力桶、无隔舱的吸力桶与软土地基的有限元模型中, 均施加一个距离泥面 15 m 高度上的水平力, 计算得出在设置内圆桶和内隔板后吸力桶的承载力是相同外径的无隔舱的吸力桶的 2.12 倍, 可见设置内圆桶和内隔板后吸力桶所能承受的水平荷载和此水平荷载相对泥面的力矩均大幅提升。通过分析两种基础和土体的位移分布云图(图 6)可知: 内圆桶和十字形内隔板的设置使桶内土基本全部被带动, 说明设置内圆桶和内隔板后吸力桶内的土体均对整个构筑物的抗滑和抗倾起到了作用, 而不设置内圆桶和十字形内隔板的吸力桶仅能带动桶壁附近的土体, 抗滑和抗倾覆能力明显小于设置内圆桶和内隔板的吸力桶。通过设置内圆桶和内隔板, 本文提出的吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水码头的抗滑和抗倾覆能力大幅提高。



a) 设置内圆桶和内隔板的吸力桶



b) 无隔舱的吸力桶

图 6 极限承载时 2 种构筑物对应的土体位移分布

### 2.3 贯入损伤对基础安装就位时承载力的影响

薄壁沉入式港口和海岸结构物在下沉贯入过程中，桶壁的挤压和下沉带动力作用会使部分软土发生破坏和流动，使其结构被破坏、剪切强度降低，并在短时间内不会恢复，目前设计中一般不考虑这种效应，即在施工后的一段时间内高估了这种结构的承载力。仍以外桶外径  $D$  为 24 m、内桶外径为 12 m、入土深度为 6 m 的吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水码头和外径为 24 m 的无隔舱的吸力桶为例，软基的不排水剪切强度仍按  $s_u = 1 + 2z$  (kPa) 分布，假设吸力桶在下沉贯入后，和桶壁、隔板相邻的  $3\%D$  的薄层范围内的土体完全被损伤，若软土的灵敏度  $S_l$  为 5，则损伤后软土的不排水剪切强度可考虑为原来强度的 0.2 倍。通过有限元计算得出两种构筑物在承受距离泥面 15 m 高度上的水平力时，若考虑吸力桶贯入效应对软土地基损伤，设置内圆桶和内隔板的吸力桶的水平承载力降低了 12.2%，无隔舱的吸力桶降低了 30.3%。此计算过程虽然没有对结构实际贯入过程和土体受损伤范围进行精确计算，只假定了一个很小薄层内的土体受到了损伤，但吸力桶贯入引起的此类构筑物承载力的降低不容忽视，同时贯入损伤对设置内圆桶和内隔板的吸力桶的承载力的影响小于无隔舱的吸力桶。

### 2.4 讨论

吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水码头不需开挖软弱地基，体现了对环境的保护。当吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水码头所处的地基强度相对较高、吸力桶裙板入土深度相对较浅时，可以参照 JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[25]</sup> 进行码头抗倾、抗滑稳定性的计算。建议在水位变动区涂覆涂层尤其是绿色环保涂层以

提高码头结构的耐久性。文献[26]基于贻贝水下黏附的仿生原理研发了一种绿色环保的防腐涂层，其单位厚度涂层的抗氯离子效果远超各类商业涂层，是常用的环氧树脂商业涂层的 20 多倍，该涂层原料价格仅为环氧树脂商业涂层的 1/12，具有很好的工程应用前景。

### 3 结论

1) 本文提出的吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水构筑物可靠岸侧作码头，同时靠海侧兼做防波堤，利用一种结构实现了防波堤和码头两种功能，大大节省了工程造价。

2) 相比无隔舱的吸力桶，本文提出的吸力桶与圆沉箱整体预制式新型离岸深水码头通过设置内圆桶和内隔板大幅提高抗滑和抗倾覆能力。内圆桶和十字形内隔板的设置使桶内土基本全部被带动，吸力桶内的土体均对整个构筑物的抗滑和抗倾覆起到了作用。

3) 薄壁沉入式港口和海岸结构物在下沉贯入过程中，桶壁的挤压和下沉带动力作用会使部分软土发生破坏和流动，使其结构被破坏、剪切强度降低，并在短时间内不会恢复。贯入损伤对基础安装就位时的承载力有比较明显的降低作用，建议在设计中考虑。

### 参考文献：

- [1] 肖忠, 王元战, 及春宁. 基于极限平衡法的箱筒型基础防波堤稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 828-833.
- [2] 孙子宇, 谢世楞, 田俊峰, 等. 离岸深水港建设关键技术[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 1-11.
- [3] 王多垠, 兰超, 何光春, 等. 内河港口大直径嵌岩灌注桩横向承载性能室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1307-1313.
- [4] CEM A, MUSTAFA K. Comparison of rock-socketed pile capacities obtained from load testing and empirical methods[J]. Teknik dergi, 2011, 22(4): 5713-5723.
- [5] 聂如松, 冷伍明, 李簪, 等. 东江大桥嵌岩桩承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1410-1415.
- [6] 劳伟康, 周立运, 王钊. 大直径柔性钢管嵌岩桩水平承

- 载力试验与理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1770-1777.
- [7] 徐光明, 顾行文, 蔡正银, 等. 作用于防波堤上波浪荷载的离心机模拟[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1770-1776.
- [8] 肖忠, 王元战, 及春宁, 等. 简型基础防波堤稳定性有限元数值分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 119-125.
- [9] 肖忠, 王元战. 主、副隔舱式大圆筒人工岛围堰的稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2014, 30(3): 63-69.
- [10] 肖忠, 李斌, 王元战. 大圆筒人工岛围堰结构稳定性和筒底地基应力的有限元分析[J]. 港工技术, 2014, 51(5): 24-28.
- [11] 肖忠, 温洪涌, 张文忠, 等. 大圆筒与旋喷桩组合式围堰结构稳定性有限元分析[J]. 中国港湾建设, 2014(10): 9-13.
- [12] 李武, 陈甦, 程泽坤, 等. 水平荷载作用下桶式基础结构稳定性研究[J]. 中国港湾建设, 2012(5): 14-18.
- [13] 王元战, 肖忠, 李元音, 等. 简型基础防波堤土压力性状的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 622-627.
- [14] 王元战, 肖忠, 迟丽华, 等. 简型基础防波堤稳定性简化计算方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1367-1372.
- [15] 杨立功, 蔡正银. 沉入式桶式基础防波堤抗倾覆稳定性计算[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 61-68.
- [16] 肖忠, 王元战, 及春宁, 等. 波浪作用下加固软基上大圆筒结构稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2648-2654.
- [17] 李元音, 肖忠, 王元战, 等. 软基循环弱化效应时箱简型基础防波堤稳定性分析[J]. 港工技术, 2015, 52(1): 26-29, 54.
- [18] 范庆来, 栾茂田, 杨庆, 等. 考虑循环软化效应的软基上深埋大圆筒结构承载力分析[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(5): 702-706.
- [19] 肖忠, 王元战. 箱筒型基础防波堤动力稳定性的有限元分析[J]. 交通科学与工程, 2014, 30(4): 65-72.
- [20] 范庆来, 栾茂田, 邓建俊, 等. 循环波压力下软基上大圆筒防波堤数值分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 120-123.
- [21] XIAO Z, WANG Y Z, ZHOU Y L. Dynamic method of embedded large cylindrical structures considering plastic strain of soft soil[C]//The 2nd international conference on mechanic automation and control engineering. New York: IEEE, 2011: 2093-2096.
- [22] 张金宝. 2041 吨沉箱半潜驳出运与安装工艺[J]. 交通标准化, 2008(4): 47-50.
- [23] GOURVENEC S. Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loading[J]. Géotechnique, 2008, 58(3): 177-185.
- [24] HUNG L C, KIM S R. Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads[J]. Marine georesources and geotechnology, 2014, 32(1): 76-92.
- [25] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [26] XIAO Z, LIU Y, WANG Y Z, et al. TA/Fe(III) anti-chloride coating to protect concrete[J]. Journal of cleaner production, 2020, 32(1): 76-92.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 42 页)

- [11] 陈国平, 余广明, 章家昌. 不规则波爬高分布及计算[J]. 水利水运科学研究, 1992(2): 111-120.
- [12] 陆瑞兴, 刘琦波, 陈伟国, 等. 陡墙式海堤平台对波浪爬高影响[J]. 海洋工程, 2007, 25(1): 101-104.
- [13] 常江, 柳淑学, 李金宣, 等. 滨海斜坡复式护岸断面波浪爬坡试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(1): 60-66.
- [14] U. S. Army Corps of Engineers. EM 1110-2-1100: Engineering and design coastal engineering manual part VI [S]. Washington D. C.: U. S. Government Printing

Office, 2011.

- [15] PULLEN T, ALLSOP N W H, BRUCE T, et al. EurOtop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual[M]. Oxford: HR Wallingford, 2007.
- [16] 水利水电规划设计总院. 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [17] 刘宁, 蔡伟, 苏永生. 国内外标准斜坡式海堤波浪爬高计算方法对比[J]. 水运工程, 2019(4): 25-30.

(本文编辑 武亚庆)