



# 新型桩基-重力式复合码头结构的可靠度分析

王维杰<sup>1</sup>, 黄炳林<sup>2</sup>

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290;  
2. 广州南沙联合集装箱码头有限公司, 广东 广州 511462)

**摘要:** 针对外海深水条件下码头结构面临的浪大流急的恶劣环境挑战, 结合常规桩基与重力式码头结构的优点, 采用重力式沉箱与桩基相结合的新型复合结构, 可有效节约施工工期, 减少工程费用。通过与试算工程传统结构的比较, 确定和优化了复合结构断面设计和参数。借鉴重力式结构计算模式, 考虑复合结构的材料性能、几何参数和设计荷载等随机变量, 用JC法计算新型复合结构的抗滑、抗倾可靠指标, 结果表明该复合结构是合理的。

**关键词:** 桩基; 重力式; 码头结构; 可靠度; JC法

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0202-06

## Reliability analysis of novel pile-gravity composite wharf structure

WANG Weijie<sup>1</sup>, HUANG Binglin<sup>2</sup>

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. Guangzhou Nansha United Container Terminal Co., Ltd., Guangzhou 511462, China)

**Abstract:** In response to the challenging environmental conditions of large waves and strong currents faced by dock structures under deep-sea conditions, combining the advantages of conventional mature pile foundation and gravity-type dock structures, the use of a new composite structure combining a gravity-type caisson and pile foundation can effectively save construction time and reduce project costs. The cross section design and parameters of the composite structure are determined and optimized by comparing with the traditional structure of the trial project. With reference to the calculation model of gravity-type structures, considering random variables such as material properties, geometric parameters, and design loads of the composite structure, the reliability index of new composite structure against sliding and tilting is calculated using the JC method, and the results show that the composite structure is reasonable.

**Keywords:** pile; gravity type; wharf structure; reliability degree; JC method

码头作为港口的主体建设工程, 其经济性、可靠性与安全性一直备受关注。我国港口建设经过几十年的发展, 适宜开发建设港口码头的海岸线已被充分利用, 同时为适应和满足运输船舶大型化的要求, 码头建设向环境条件更加恶劣的外海深水发展<sup>[1]</sup>。

国内外关于外海深水码头的建设已有一些研究和工程实践。国内主要是结合防波堤建设形成掩护遮蔽条件, 码头以传统的重力式结构和高桩

承台式结构为主; 国外码头结构形式多样, 除传统结构外, 还有导管架结构、复合结构等新型结构形式<sup>[2]</sup>。国内主要针对传统高桩码头的上部结构形式进行改进以适应深水大跨度要求<sup>[3]</sup>, 嵌岩导管架结构应用于外海开敞式码头<sup>[4]</sup>, 以及针对特定案例的新型复合结构进行环境承载<sup>[5]</sup>、结构设计分析与计算研究<sup>[6]</sup>。

本文提出新型桩基-重力式沉箱复合码头结构, 开展可靠度分析, 有助于对传统码头结构的

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 王维杰 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道与海岸工程设计。

改进和优化, 提高其抗冲击性能, 以期复合结构应用于实际工程的设计和施工提供参考。

## 1 复合结构设计原理和特点

### 1.1 传统结构特点和应用

传统码头结构形式大致可分为 4 类: 重力式、

高桩式、板桩式和混合式。其中重力式和高桩式是国内沿海港口码头常用的结构形式, 其在外海深水条件下的结构特点见表 1。在实际工程应用中, 根据具体的工程要求和经济效益, 选择合适的结构类型, 能够确保码头工程的安全可靠性和经济可行性。

表 1 外海深水条件下传统码头结构特点及应用比较

结构形式	受力性能	施工难易	使用维护
重力式	依靠自身重力维持稳定性, 对荷载变化适应性较强, 坚固耐久; 但外海深水条件下结构断面大	基床平整精度难以控制, 并且大型沉箱拖运及定点安装难度较大, 施工困难	结构无需特殊防腐, 耐久性好, 维护工作量小
高桩式	靠自身结构承载, 结构可靠度高, 透空式结构自重小, 波浪反射小; 但对超载适应性差, 浅岩条件下需二次沉桩	沉桩施工受天气影响大, 需进行二次沉桩及平台搭卸, 水上工作量较大, 施工困难	结构需特殊防腐, 易损难修, 需重视施工质量, 维护工作量大

### 1.2 复合结构引入和优势

船舶大型化和装卸设备专业化的发展使得码头对船舶泊稳条件要求降低, 创造了不建设防波堤的条件, 即可在外海深水中建设开敞式码头<sup>[7]</sup>。然而, 外海深水条件下, 码头结构设计面临着风浪较大、施工条件恶劣的问题。传统高桩式结构特别是重力式结构的受力性能和施工条件均越来越难以适应<sup>[8]</sup>。重力式结构的问题主要表现为随着码头水深的增加, 依靠自身质量稳定的断面越来越大, 断面的加大增大了波浪力的作用, 且导致工程造价呈非线性增加。高桩式结构的问题主要表现为随着水深

的增加, 码头桩基自由长度长, 全直桩结构抗倾刚度小, 水平位移较大。斜桩结构在外海恶劣环境下沉桩相对困难, 尤其是嵌岩桩基的施工。

为解决这些问题, 新型桩基-重力式复合结构结合重力式结构与高桩承台式 2 种传统结构的优点, 进行创新设计。该复合结构由下部变异沉箱、中部钢管桩或者钢筋混凝土、钢管混凝土桩基及上部现浇钢筋混凝土承台组成。

在外海深水风浪较大、施工条件恶劣的条件下, 桩基-重力式复合结构在受力性能、施工和经济性方面均具有一定的优势, 见表 2。

表 2 新型桩基-重力式复合结构优势

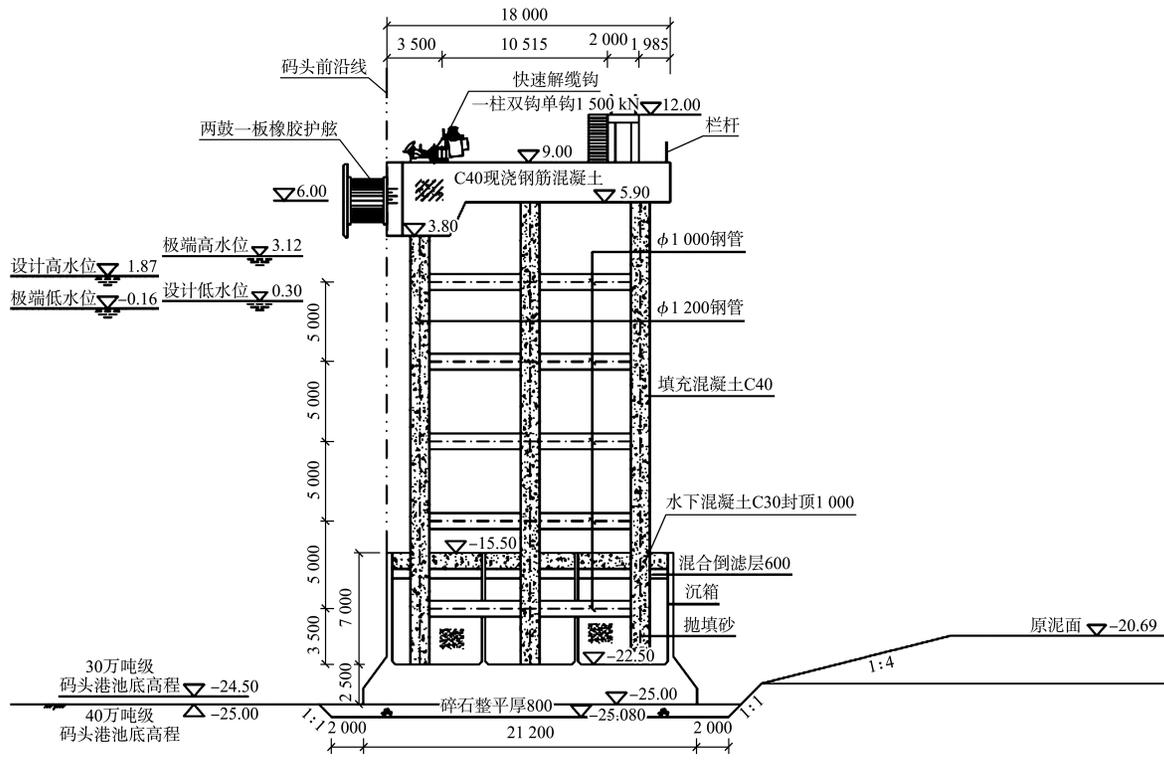
比较对象	受力性能	施工难易	工程造价
较重力式	结构透空, 有效减小波浪作用	轻型结构, 对大型船机设备要求稍低	低
较高桩式	结构整体性好, 变位较小	受天气影响小, 无需进行二次沉桩及平台搭卸, 水上工作量较小	低

### 1.3 结构断面设计和参数的确定

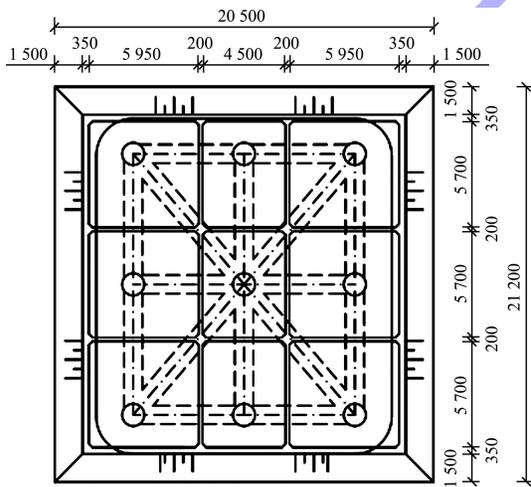
在新型桩基-重力式复合码头结构的设计过程中, 确定和优化合适的结构设计断面和参数对于确保码头结构的可靠性和稳定性至关重要。以广东外海某 30 万吨级油码头靠船墩方案设计为例, 其设计使用年限 50 a、结构安全等级 1 级、结构

顶高程 9.0 m、底高程 -25.0 m、50 a 一遇极端高水位 3.12 m、50 a 一遇波高  $H_{13\%}$  8.5 m、波周期  $T_{11.1}$  s。

复合结构下部设 1 个异形沉箱, 中部设高强度钢管柱体及水平撑, 上部采用现浇钢筋混凝土墩台结构, 主要结构尺寸见图 1。



a) 结构剖面



b) 靠船墩平面

图1 新型桩基-重力式复合结构 (尺寸: mm; 高程: m)

通过与传统的重力式结构和高桩式结构方案比选,优化了复合结构设计断面参数,较传统结构表现出良好的稳定性。

## 2 复合结构可靠度分析

可靠度是指结构在规定时间内和规定条件

下,完成预定功能的概率。规定条件即正常设计,正常施工、正常使用,而不考虑人为因素的影响<sup>[9]</sup>。

JTS 167—2018《码头结构设计规范》指出,重力式码头有条件时,其抗滑、抗倾稳定性可按可靠度指标进行验算,也提出可用JC法计算<sup>[10]</sup>。这种方法是国际结构安全度联合委员会(Joint Commission on Structural Safety, JCSS)推荐使用的方法<sup>[11]</sup>。因此,本文将复合结构的抗滑、抗倾稳定性指标作为其可靠度指标进行分析,采用JC法计算复合结构可靠度指标。

### 2.1 复合结构极限状态方程

复合结构的抗滑、抗倾稳定的极限状态方程为:

$$Z=R-S=0 \quad (1)$$

式中:  $Z$  为极限状态函数,  $R$  为结构抗力,  $S$  为荷载效应。

#### 2.1.1 抗滑极限状态方程

复合结构沿底面的抗滑稳定性极限状态方程根据不同荷载组合工况可表示为:

波浪力作用时:

$$Z=R-S=(V_K-P_U)f-P=0 \quad (2)$$

式中:  $V_K$  为复合结构自重力,  $P_U$  为波峰作用时的波浪浮托力,  $f$  为沿复合结构底面的摩擦系数,  $P$  为波峰作用时的波浪水平力。

船舶撞击力作用时:

$$Z=R-S=V_K f-P_Z=0 \quad (3)$$

式中:  $P_Z$  为船舶撞击力。

### 2.1.2 抗倾极限状态方程

不同工况下复合结构对底面后踵的抗倾稳定性极限状态方程为:

波浪力作用时:

$$Z=R-S=M_{V_K}-M_P-M_{P_U}=0 \quad (4)$$

式中:  $M_{V_K}$  为复合结构自重对后踵的稳定力矩,  $M_P$  为波峰作用时波浪水平力对后踵的倾覆力矩,  $M_{P_U}$  为波峰作用时波浪浮托力对后踵的倾覆力矩。

船舶撞击力作用时:

$$Z=R-S=M_{V_K}-M_{P_Z}=0 \quad (5)$$

式中:  $M_{P_Z}$  为船舶撞击力对后踵的倾覆力矩。

## 2.2 荷载作用模型和基本随机变量的确定

### 2.2.1 最不利工况

码头结构在施工和使用过程中受到多种不同的负荷, 可通过对各种工况的概率分布函数确定结构在不同负荷下的可靠度, 并确定最不利的工况。还应进一步分析极限状态方程的荷载作用模型, 即确定最不利的工况组合。

根据复合结构抗滑、抗倾极限状态方程, 对试算工程的两大荷载效应(波浪力和船舶撞击力)标准值进行计算。结果表明, 对于滑动效应和倾覆效应, 在外海深水条件下, 极端高水位下波浪力作用均为最不利工况。因此, 荷载作用模型仅采用式(2)、(4)进行复合结构的可靠度分析。

### 2.2.2 结构抗力随机变量

在极限状态方程中,  $V_K$  和  $M_{V_K}$  可视为定值。考虑到实际工程中隐藏变量包括的材料密度、结构尺寸有一定的变异性, 参考 JTS 167—2018《码头结构设计规范》附录 R, 引入变异系数确定

$V_K$  和  $M_{V_K}$  的概率分布及参数计算值。复合结构较传统重力式结构的自重力小, 受波浪力小, 基床顶面应力计算结果表明, 基床面最大压强不超过 350 kPa, 平均压强不超过 300 kPa, 按现行规范取  $f$  值是安全的。本文在复合结构的可靠度计算中, 参考 JTS 167—2018《码头结构设计规范》附录 R, 确定  $f$  概率分布及统计参数值, 见表 3。

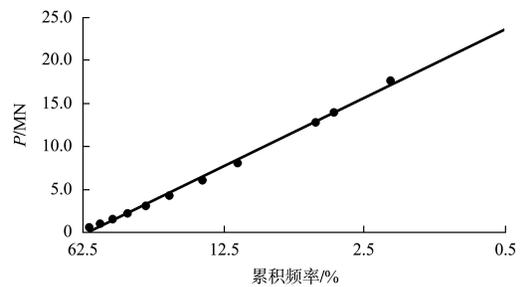
表 3 结构抗力相关的随机变量计算参数

参数	均值 $\mu_{xi}$	变异系数 $C_{v,xi}$	分布规律
$V_K$	57 745	0.050	正态分布
$M_{V_K}$	680 303	0.050	正态分布
$f$	0.6	0.044	正态分布

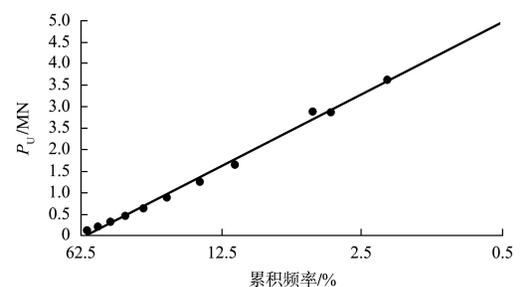
### 2.2.3 荷载效应随机变量

海浪作用在结构物上的波浪力是变化的。研究表明, 波浪力的长期分布符合对数正态和极值 I 型分布, 采用对数正态分布曲线拟合波浪力的长期分布为最佳<sup>[12]</sup>。

对于复合结构所受的波浪力和力矩, 采用 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》<sup>[13]</sup> 规范公式, 仅计算 12 个不同累积频率的波浪力数据组作为统计参数, 采用对数分布曲线进行分布拟合, 确定荷载效应随机变量均值和变异系数, 见图 2 和表 4。



a) 波浪水平力



b) 波浪浮托力

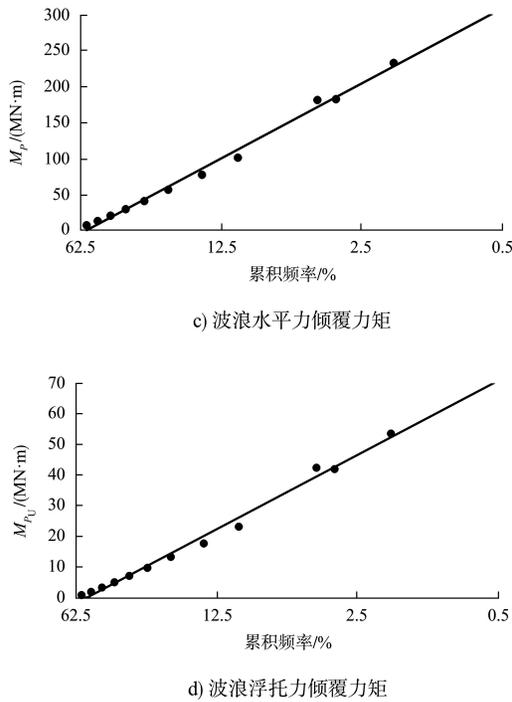


图2 波浪力和力矩的长期分布拟合

表4 荷载效应相关的随机变量计算参数

参数	$\mu_{xi}$	$C_{v,xi}$	分布规律
$P$	4 623	0.212 4	对数正态分布
$P_U$	971	0.216 3	对数正态分布
$M_p$	61 541	0.212 3	对数正态分布
$M_{p_U}$	14 008	0.179 7	对数正态分布

### 2.3 可靠度分析

可靠度分析是以概率理论为基础的极限状态设计法，将  $R$  和  $S$  均作为随机变量，其概率密度函数服从正态分布。JC 法是将其中非正态随机变量当量正态化后，用结构在设计验算点处的切平面代替极限状态曲面，再利用改进的一次二阶矩法求解可靠度指标。计算流程见图 3。试算工程的可靠度指标的计算结果见表 5。从计算结果看，复合结构的抗滑和抗倾稳定性的可靠指标满足现行规范提出的结构安全等级为一级的港口工程结构要求，即抗滑稳定不小于 4.0，抗倾稳定不小于 4.5 的要求。

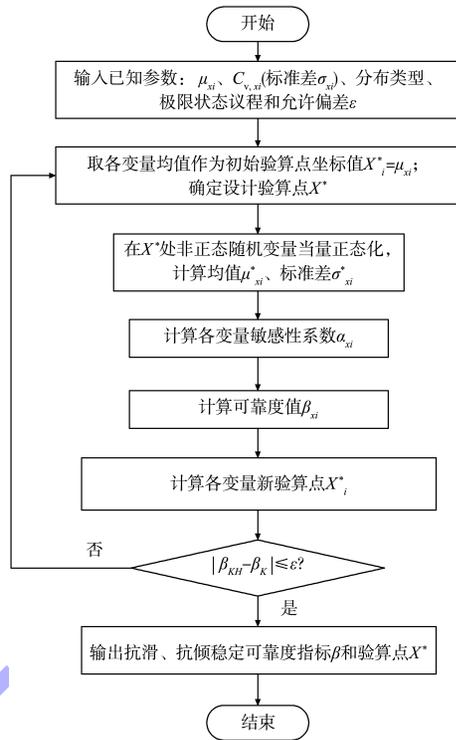


图3 JC法可靠度指标计算流程

表5 可靠度计算结果

工况	$\beta$	失效概率 $P_f$	规范要求
抗滑稳定	4.103	0.05	$\geq 4.0$
抗倾稳定	4.856	0.05	$\geq 4.5$

### 3 结论

1) 通过与传统码头结构形式的比较，提出的新型桩基-重力式复合码头结构在不降低结构可靠性的条件下，具有易施工和经济效益高的优点。

2) JC 法为工程结构可靠度设计法的一种有效方法，用 JC 法计算的抗滑、抗倾稳定可靠度指标满足现行规范要求，验证该复合结构具有合理性和外海深水条件建设的可行性。

3) 现行规范尚未给出针对复合结构的波浪力计算方法，本文采用规范公式计算了不同累积频率的波浪力数据组作为荷载效应随机变量的统计参数，给出对数正态分布概型。具体实施应通过断面物理模型试验验证和获得变量参数，并通过不同分布曲线拟合和拟合优度检验确定最优概型。

4) 对于复合结构的基床承载力、结构强度和变形等系统可靠性尚需作进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 孙子宇, 谢世楞, 田俊峰, 等. 离岸深水港建设关键技术研究[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 1-11.
- [2] 王维杰. 桩基-重力式复合结构在深水码头中应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [3] 鲁子爱, 瞿秋. 深水大跨码头结构研究[J]. 水运工程, 2011(1): 104-108.
- [4] 程泽坤, 程培军. 外海开敞水域码头结构新形式[J]. 水运工程, 2011(1): 124-130.
- [5] 卢生军, 陈国平, 严士常, 等. 不规则波作用下桩基-重力式复合结构码头面板的动力特性研究[J]. 水运工程, 2011(11): 32-37.
- [6] 赵石峰, 陈廷国, 吕权武, 等. 桩基-重力式复合结构的分析与计算[J]. 港口技术, 2008(6): 32-35.
- [7] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册(中册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [8] 赵石峰. 大型开敞式深水码头建设关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [9] 严恺. 海港工程[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [10] 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.
- [11] 张磊, 傅宇, 郭红霞. 斜坡式防波堤的可靠性分析[J]. 水运工程, 2017(1): 58-62.
- [12] 谢世楞, 孙毓华, 刘颖, 等. 关于波浪力的概率分布型式问题[J]. 水运工程, 1989(10): 1-6, 14.
- [13] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 201 页)

#### 5 结语

1) 实践证明, 受损防波堤采用双层扭王字块护面加固是一种安全稳妥、实施方便、经济合理的方案, 加固后的防波堤整体性好, 防护能力显著提高。建议在分析其受损原因的基础上, 结合工程实际情况, 对结构进行优化, 并借助波浪物理模型试验进行论证, 以制定更为符合工程实际需要和满足规范要求的加固方案。

2) 加固层块体质量为基层块体质量 2 倍时, 加固层块体勾联嵌固效果好, 上下层间分层不明显。

3) 双层扭王字块叠合安装是一种全新的护面块体结构, 其单位面积的安装量、安装允许偏差、上下层咬合标准及质量验收标准等还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 陈志乐, 杨静思. 国内外港口斜坡堤受损修复典型案例分析[J]. 水运工程, 2023(9): 44-49.
- [2] 华南理工大学. 中委广东石化原油及产品码头工程波浪整体数学模型研究报告[R]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [3] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 中委广东石化原油及产品码头工程波浪整体物理模型试验研究报告[R]. 天津: 中交天津港湾工程研究院有限公司, 2009.
- [4] 华南理工大学. 中委合资广东石化 2 000 万吨/年重油加工工程产品码头工程波浪整体数学模型研究报告[R]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [5] 李江文, 祝健康. 恶劣海况下防波堤超大型双层扭王字块护面研究[J]. 水运工程, 2022(11): 74-79.
- [6] 刘帅. 双层扭王字块在天津港某防波堤工程中的应用[J]. 水运工程, 2023(S2): 104-108.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [8] 南京水利科学研究院. 中委合资广东石化 2 000 万吨/年重油加工工程产品码头工程防波堤波浪断面物理模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.
- [9] 中交第一航务工程局有限公司, 福建省交通基本建设工程质量监督检测站. 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [10] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津港航工程局有限公司. 防波堤与护岸施工规范: JTS 208—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

(本文编辑 王传瑜)