

提高已建防波堤防护标准的技术改造方案

蒋美娇^{1,2}, 李冠星^{1,2}

(1. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510290;
2. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心, 广东 广州 519080)

摘要: 针对已建防波堤防护标准不能满足港区功能变化后港内作业标准的问题, 分析得出港内波浪主要由防波堤堤顶越浪形成的次生波和来自口门的入射波及其衍射引起。基于验证后的水文波浪资料, 对原防波堤进行结构稳定性验算和胸墙顶高程复核, 采取提高胸墙顶高程、优化防波堤平面布置等技术改造措施, 改善港内泊位条件, 实现港区功能提升。胸墙顶高程根据水位与波浪爬高计算, 并结合防护标准、改造条件及可实施性等综合确定; 优化防波堤平面布置则根据口门处的水文波浪与水深条件, 对口门方向及防波堤长度进行调整。经多次对比论证, 并结合模型试验研究成果, 提出的技术改造方案针对性较强, 对类似工程具有一定的借鉴意义。

关键词: 防波堤; 标准; 口门; 技术改造

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0099-07

Technical transformation schemes for improving protection standards of existing breakwater

JIANG Meijiao^{1,2}, LI Guanxing^{1,2}

(1. CCCC FHEC Harbor Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Coasts, Islands and Reefs, Guangzhou 519080, China)

Abstract: In view of the problem that the protection standards of the existing breakwater can not meet the operational standards in the port after the changes in the functions of the port area, it is analyzed that the wave in harbor is mainly caused by the secondary wave overtopping of the breakwater, the incident wave from the entrance and its diffraction. Based on the verified hydrologic wave data, the structural stability of the original breakwater is checked, and the elevation of the top of the breast wall is checked, and the technical reconstruction measures such as increasing the elevation of the top of the breast wall and optimizing the layout of the breakwater are adopted to improve the berth conditions in the port and realize the improvement of the port functions. The top elevation of the breast wall is calculated according to the water level and wave climbing height, and determined synthetically according to the protection standard, reconstruction conditions and feasibility, while the optimal layout of the breakwater is adjusting the direction of the entrance and the length of the breakwater according to the hydrologic wave and water depth conditions at the entrance. After many times of comparison and demonstration, combined with the results of model test, this paper puts forward a more targeted technical transformation scheme, which has a certain reference significance for similar projects.

Keywords: breakwater; standard; entrance; technical transformation

1 工程概况

国内某客货运码头防波堤采用斜坡式抛石堤结构, 分为东堤和北堤, 与海岛天然海岸共同形成环抱式掩护水域, 原设计标准为基本不越浪(允

许少量越浪), 东堤胸墙顶高程为 7.5 m, 北堤堤顶高程为 5.0 m(当地理论最低潮面), 港内水域条件满足 1 000 DWT 杂货船和 1 000 GT 客船作业标准^[1], 项目于 2019 年建设完成。

收稿日期: 2024-05-02

作者简介: 蒋美娇 (1987—), 女, 高级工程师, 从事水运工程咨询、设计工作。

因港口功能发生变化,暂停原客货运功能,增加游艇码头功能,原防波堤防护效果无法满足游艇码头

港内泊稳要求^[2],需通过技术改造提高防护标准^[3-6]。港区平面布置见图 1,防波堤典型断面见图 2。



图 1 港区平面布置
Fig. 1 Plane layout of port area

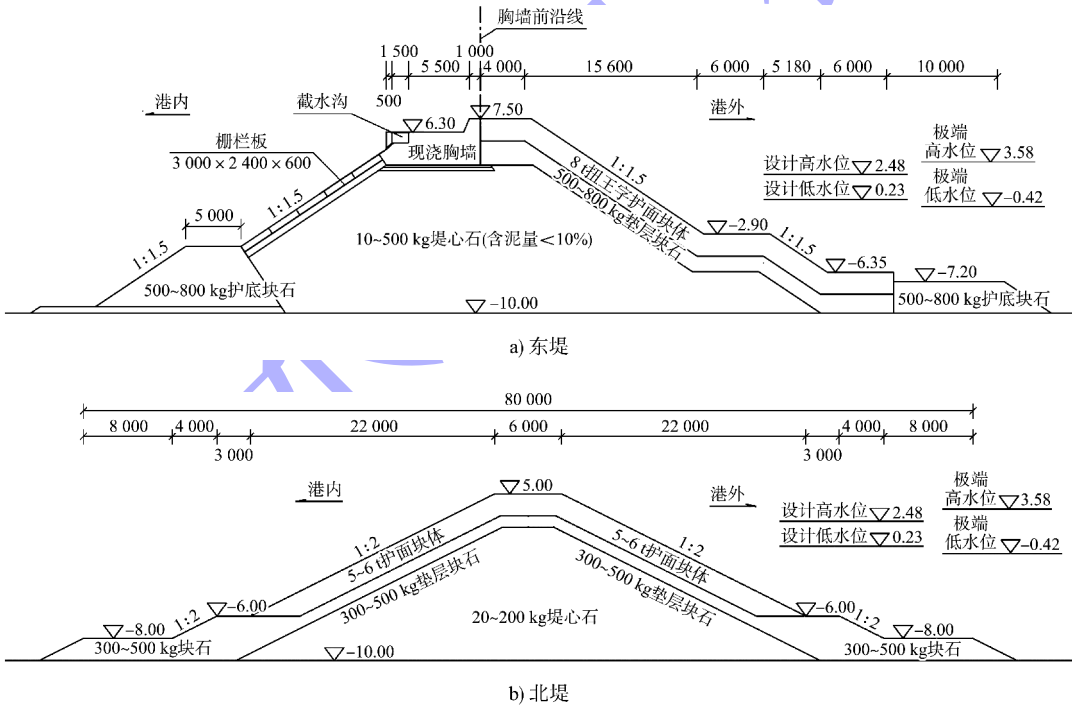


图 2 防波堤典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 2 Representative cross-sections of breakwater (elevation: m; dimension: mm)

2 改造目标与思路

- 1) 满足游艇码头港内泊稳允许波高条件,保证游艇码头功能水域范围内 50 a 一遇设计累积频率为 1% 的波高 $H_{1\%}$ 不大于 0.5 m。
- 2) 原防波堤及掩护水域具有公共性质,港内水域较宽阔,目前游艇码头只占用一小部分水域,考虑

- 到后续新增其他功能,暂不调整防波堤口门宽度。
- 3) 修正原设计波浪参数并复核算原防波堤结构的安全稳定性。
- 4) 尽可能利用原有防波堤结构,基本不改变原防波堤的轴线走向,避免大拆大建,尽可能采用方便实施、经济节省的技术改造方案。

3 波浪要素

工程海区常浪向为 SE (ESE—SSE), 大浪主要方位为 E 向, ESE 向次之, 极值波浪多为台风风浪引起, 出现最多方位为 ESE 向, 其次为 SE—S 向。防波堤主要掩护方位 E—ESE, 原设计时曾开展波浪数学模型研究^[7], 波浪水文资料较完整详实。研究引入工程所在海区近几年的气象水文尤其是特殊气象条件下的风浪资料, 通过整体物理模型试验^[8], 与原有数模研究成果相互对比印证, 对原设计采用的波浪和水文资料进行验证和修正, 重新确定不同工况下防波堤设计波浪要素 (表 1), 为技术改造方案设计提供数据支撑。

表 1 50 a 一遇设计波浪要素对比
Tab. 1 Comparison of designed wave elements for a once in 50-year event

阶段	设计水位	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{4\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	周期 T/s
原设计	极端高水位	5.94	4.95	4.78	3.95	11.0
	设计高水位	5.83	4.87	4.70	3.88	10.9
校验后	极端高水位	6.49	5.38	5.16	4.35	11.0
	设计高水位	6.36	5.37	5.02	4.27	10.9

4 原防波堤结构与高程复核

4.1 原防波堤结构稳定性

根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[9], 用校验后的波浪参数对原防波堤的护面块体稳定质量和厚度、护底块石稳定质量等进行复核验算, 均满足相关技术要求。通过模型试验验证得出, 其结构安全稳定。

4.2 原胸墙顶高程

原防波堤按照基本不越浪标准 (设计高水位+设计波高+富余值) 进行设计, 但未按照波浪爬高进行验算, 实际存在一定越浪, 模型试验越浪量见表 2。

由模型试验结果可知, 在极端高水位+50 a 一遇波高作用下, 防波堤最大越浪量可达 $0.1158\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$, 越浪引起的港内次生波与口门入射波浪叠加, 使得港内波高相对较大, 游艇码头区域内 $H_{1\%}$ 波高分布见图 3, 不满足游艇码头港内泊稳允许波高条件 (50 a 一遇 $H_{1\%}<0.5\text{ m}$), 需对防波堤进行技术改造, 以进一步改善其掩护效果。

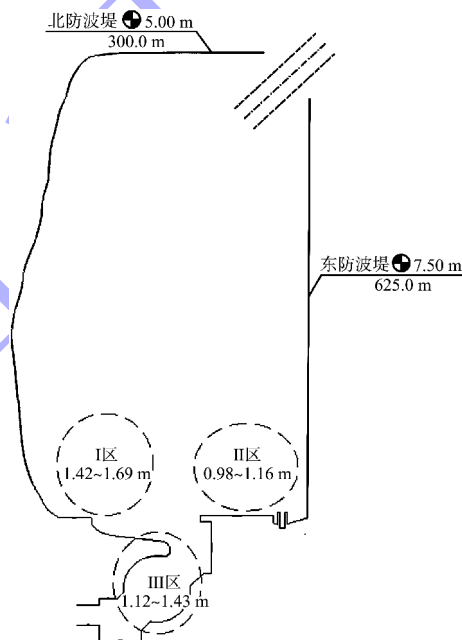


图 3 游艇码头区 $H_{1\%}$ 波高分布

Fig. 3 Distribution of wave height $H_{1\%}$ in yacht marina area

表 2 防波堤越浪量试验结果
Tab. 2 Test results of breakwater overtopping

地点	高程/m	工况	越浪量/ $(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$						
			E	ESE	SE	N	NE	NNE	ENE
东堤	7.50	极端高水位+50 a 一遇波浪	0.115 8	0.022 0	0.002 5	—	—	—	—
北堤	5.00	极端高水位+50 a 一遇波浪	—	—	—	—	—	—	—

注: “—” 表示无越浪。

游艇码头对港内泊稳条件要求较高, 宜按照波浪爬高复核胸墙顶高程。根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》(2022 版)^[10] 10.2.3 条, 斜坡式建筑物上的波浪爬高可按以下公式计算:

$$R_{1\%} = K_{\Delta} K_U K_{\beta} R_U H_{1\%} \quad (1)$$

$$R_{F\%} = K_F R_{1\%} \quad (2)$$

$$K_{\beta} = \sqrt{\cos\beta} \quad (3)$$

$m>1.25$ 且 $\xi_{1\%}>1.4$ 时,

$$R_0 = 2.66 - 0.5 \frac{1}{\sqrt{\xi_{1\%}}} \quad (4)$$

$$\xi_{1\%} = \frac{1}{m} \sqrt{L/H_{1\%}} \quad (5)$$

$$L = [g/(2\pi)] \bar{T}^2 \text{th}(2\pi d/L) \quad (6)$$

式中: $R_{1\%}$ 为累积频率为 1% 的波浪爬高, m; K_{Δ} 为位于静水面以下 $0.5H_s$ 到静水面以上 $1.5H_s$ 之间的护面结构的糙渗系数, 查表取值; R_0 为 $K_U=1.0$ 、 $K_{\Delta}=1.0$ 且 $K_{\beta}=1.0$ 时, 单一坡度斜坡式建筑物上的波浪相对爬高, m; $H_{1\%}=1.51H_s$; H_s 为建筑物破角前半倍波长处的有效波高, m; $R_{F\%}$ 为累积频率 $F\%$ 的波高, m; K_F 为换算系数, 按表取值; β 为波向线与建筑物纵轴线法线的夹角, ($^{\circ}$), 取 0° ; m 为斜坡坡度系数; $\xi_{1\%}$ 为破波系数; L 为以平均周期 $\bar{T}$ 计算的建筑物前的平均波长, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; $\bar{T}$ 为波浪平均周期, s; d 为建筑物坡脚前半倍波长处的水深, m。

根据以上公式计算的波浪爬高结果如表 3 所示, 不同水位及波高情况下, 波浪爬高值为 6.01~8.65 m, 按照堤顶高程为设计高水位与 $H_{13\%}$ 对应波浪爬高之和计算, 东堤顶高程宜取值 8.49 m 以上, 具体需结合越浪情况综合考虑。原东堤胸墙顶高程 7.50 m 偏低, 不满足要求, 需要提高。

表 3 波浪爬高计算结果
Tab. 3 Calculation results of wave run-up height

类别	设计水位/m	波浪爬高/m		
		$H_{1\%}$	$H_{5\%}$	$H_{13\%}$
极端高水位	3.58	8.65	7.26	6.14
设计高水位	2.48	8.47	7.11	6.01

5 改造方案

初步分析表明, 港内波浪主要由来自口门的入射波及其衍射或防波堤越浪形成的次生波引起, 要改善港内水域泊稳条件, 需从优化调整防波堤口门布置和堤顶高程入手, 即通过调整口门大小或开口方向, 进一步减少口门入射波浪对港内水域的影响, 通过提高防波堤堤顶高程, 减少越浪产生的次生波对港内水域的影响。为此, 提出以下 2 个初步改造方案。

5.1 方案 1

北防波堤保持不变, 东防波堤向北延长, 同时以弧线形式偏转, 轴向延至与北防波堤堤头平齐, 即口门方位由东北向改为北向, 口门宽度不变, 堤顶高程由 7.50 m 提高至 8.50 m, 见图 4。

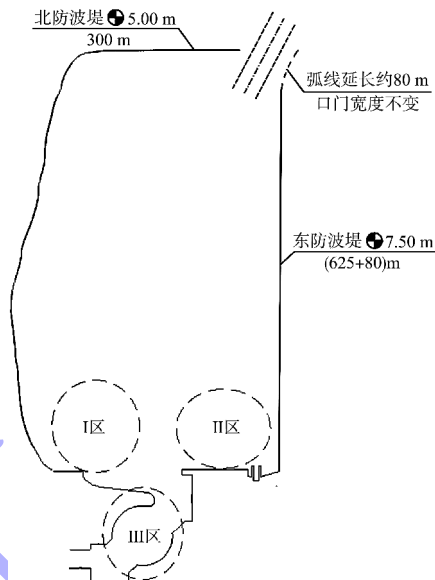


图 4 方案 1 平面布置

Fig. 4 Plane layout of scheme one

5.2 方案 2

将东防波堤向北延长至与北防波堤平齐 (约 70 m), 即口门方位由东向改为北向, 堤顶高程由 7.50 m 提高至 8.50 m, 口门宽度保持不变, 北防波堤适当缩短约 30 m, 堤顶高程不变, 见图 5。

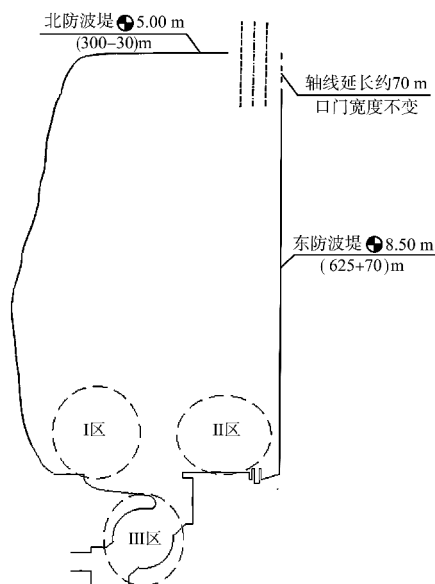


图 5 方案 2 平面布置

Fig. 5 Plane layout of scheme two

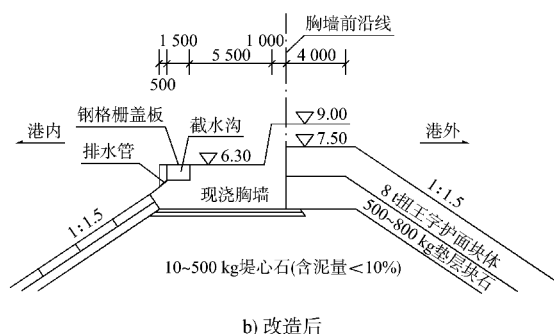


图7 胸墙改造前后断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 7 Cross-sections before and after breast wall renovation (elevation: m; dimension: mm)

根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》4.3.6, 沿墙底抗滑稳定性的承载能力极限状态可按式(7)验算:

$$\gamma_0 \gamma_p P \leq (\gamma_G G - \gamma_u P_u) f + \gamma_E E_b \quad (7)$$

沿墙底抗倾稳定性的承载能力极限状态可按式(8)验算:

$$\gamma_0 (\gamma_p M_p + \gamma_u M_u) \leq \frac{1}{\gamma_d} (\gamma_G M_G + \gamma_E M_E) \quad (8)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; γ_p 为水平波浪力的分项系数; γ_u 为浮托力的分项系数; γ_G 为自重力分项系数; γ_d 为结构系数; γ_E 为土压力分项系数; f 为沿计算面的摩擦系数设计值; P 为计算面以上的水平波浪力标准值, kN; G 为胸墙自重力标准值, kN; P_u 为波浪浮托力标准值, kN; E_b 为土压力标准值, kN; M_p 为胸墙水平波浪力标准值对胸墙后趾的倾覆力矩, kN·m; M_u 为胸墙波浪浮托力标准值对胸墙后趾的倾覆力矩, kN·m; M_G 为胸墙自重力标准值对胸墙后趾的稳定力矩, kN·m; M_E 为胸墙土压力标准值对胸墙后趾的稳定力矩, kN·m。

根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》(2022 版) 10.2.11, 作用于斜坡式建筑物顶部胸墙上的波浪力, 在无因次参数 $\xi \leq \xi_b$ 时, 可按下列规定确定:

1) 波峰作用时胸墙上的平均压强 $\bar{p}$:

$$\bar{p} = 0.24 \gamma H K_p \quad (9)$$

2) 无因次参数 ξ :

$$\xi = \left(\frac{d_1}{d} \right) \left(\frac{d}{H} \right)^{2\pi H/L} \quad (10)$$

3) 无因次参数 ξ_b :

$$\xi_b = 3.29 \left(\frac{H}{L} + 0.043 \right) \quad (11)$$

4) 胸墙上的波压力分布高度:

$$d_1 + z = H \operatorname{th} \left(\frac{2\pi d}{L} \right) K_z \quad (12)$$

5) 单位长度胸墙上的总波浪力 P :

$$P = \bar{p} (d_1 + z) \quad (13)$$

6) 胸墙底面上的波浪浮托力 P_u :

$$P_u = \mu \frac{B \bar{p}}{2} \quad (14)$$

式中: γ 为水的重力密度, kN/m³; H 为建筑物所在处进行波波高; K_p 为平均压强系数; d_1 为胸墙前水深, m, 当静水面在墙底面以下时为负值; d 为建筑物前水深, m; L 为波长, m; z 为胸墙上波浪压强分布图顶部距静水面的高度, m; K_z 为波浪压强作用高度系数; μ 为波浪浮托力的折减系数; B 为胸墙底宽, m; $\xi = \xi_b$ 时, $\bar{p}$ 达到最大值。

胸墙波压力如图 8 所示, 技术改造后挡浪墙抗倾、抗滑验算结果见表 6。经复核算, 胸墙抗倾、抗滑稳定性满足规范要求。东堤胸墙顶高程由 7.50 m 加高至 9.00 m 后, 根据模型试验实测值, 在极端高水位+50 a 一遇波浪作用下, 东堤最大越浪量(E 向)由 0.115 8 m³/(m·s) 降至 0.027 3 m³/(m·s), 加高胸墙对波浪遮挡效果显著。

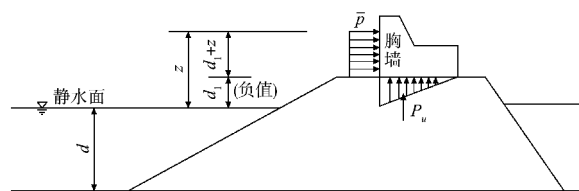


图8 胸墙波压力

Fig. 8 Wave pressure of breast wall

表6 改造后挡浪墙抗倾、抗滑验算结果

Tab. 6 Calculation results of anti-overturning and anti-sliding of wave-resistant wall after renovation

抗滑稳定性		抗倾稳定性	
$\gamma_0 \gamma_p P$	$(\gamma_G G - \gamma_u P_u) f + \gamma_E E_b$	$\gamma_0 (\gamma_p M_p + \gamma_u M_u)$	$\frac{1}{\gamma_d} (\gamma_G M_G + \gamma_E M_E)$
264.25	247.42	1 490.29	2 448.54

7 结语

1) 提高已建防波堤防护标准而进行的技术改造应重新复核水文波浪资料,并按照新数据对原防波堤结构的稳定性和胸墙顶高程进行复核算。胸墙顶高程根据水位与波浪爬高计算,并结合防护标准、改造条件及可实施性等综合确定。

2) 口门宽度及开口方向是影响防波堤掩护效果的主要因素之一。优化防波堤平面布置应根据防波堤现状条件和港内新的作业标准要求,并充分考虑经济性、可实施性等选择科学而适宜工程环境特点的改造方案,必要时应通过模型试验论证其功能性、稳定性、科学性。

3) 防波堤设计与建设应考虑未来改造的可行性,预留必要的改造条件。对于提高胸墙顶高程的改造,简单加高的改造方式是否可行取决于改造后的胸墙是否满足稳定性要求,因此,建议新建项目在对总体造价影响不大的情况下,适当增加胸墙质量,既能增强结构的抗倾、抗滑稳定性,又能更好地适应后续技术改造需求。

参考文献:

- [1] 蒋美娇,冯海波.珠海桂山岛十三湾防波堤修复加固方案[J].水运工程,2019(6):63-69.
JANG M J, FENG H B. Rehabilitation and reinforcement scheme of breakwater in the thirteenth bay of Guishan Island, Zhuhai [J]. Port & waterway engineering, 2019(6): 63-69.
- [2] 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社,2014.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Design code of general layout for sea ports: JTS 165-2013 [S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [3] 符家英,叶跃飞,曾滢.某一级渔港防波堤及口门布置方案[J].水运工程,2021(10):125-130.
FU J Y, YE Y F, ZENG Y. Layout plan of breakwater and entrance of a first-grade fishing port[J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 125-130.
- [4] 王裕盛,王劼曼,亢扬,等.小郭巨渔港工程防波堤平面布置方案[J].水运工程,2018(3):86-92.
WANG Y S, WANG J M, HANG Y, et al. Plane arrangement scheme of breakwater for Xiaoguoju Fishing Port project[J]. Port & waterway engineering, 2018(3): 86-92.
- [5] 陈建勇.游艇码头波浪防护标准及防波堤设计[J].中国港湾建设,2015,35(3):41-44.
CHEN J Y. Wave protection standard and breakwater design on marina[J]. China harbour engineering, 2015, 35(3): 41-44.
- [6] 赵磊.天津港大沽口港区口门防波堤平面布置研究[J].中国水运(下半月),2014,14(7):293-295.
ZHAO L. Layout plan of breakwater at entrance of Dagukou port area in Tianjin Port [J]. China water transport(second half of month), 2014, 14(7): 293-295.
- [7] 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院.陆岛交通客货运码头防波堤工程波浪数学模型研究[R].广州:国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院,2014.
South China Sea Institute of Marine Engineering Exploration and Environmental Research, State Oceanic Administration. Research on wave mathematical model of breakwater engineering for land island transportation passenger and freight terminal [R]. Guangzhou: South China Sea Institute of Marine Engineering Exploration and Environmental Research, State Oceanic Administration, 2014.
- [8] 南京水利科学研究院.陆岛交通客货运码头防波堤工程整体物理模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2016.
Nanjing Hydraulic Research Institute. Research report on the overall physical model test of the breakwater project for land island transportation passenger and freight terminal [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2016.
- [9] 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.
Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [10] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S].2022版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015[S]. 2022 ed. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.

(本文编辑 王传瑜)