



日照港石臼港区港内泊稳条件优化研究

丁兆宽¹, 宋荔钦²

(1. 日照港集团有限公司, 山东日照 276826;

2. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 为提高日照港石臼港区扩建码头工程的港内泊稳条件, 根据波浪断面物理模型试验研究分析不同结构码头反射系数的基础上, 采用 MIKE21-BW 模块建立了港区波浪传播数学模型, 针对码头不同结构形式和不同平面布置这两个主要因素, 模拟了 2 a 一遇设计高水位条件下港内的波高分布, 研究了不同方案组合下的港内泊稳条件。结果表明: 采用复合结构断面形式且在条件允许情况下五期码头南移可有效改善港内泊稳条件。

关键词: 开孔沉箱结构; 桩基-重力式复合结构; 嵌岩全直桩结构; 反射系数; 泊稳

中图分类号: U 656.1⁺11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0063-06

Optimization of berthing stability for phase IV & V terminals of Rizhao port

DING Zhao-kuan¹, SONG Li-qin²

(1. Rizhao Port Group Co., Ltd., Rizhao 276826, China;

2. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To improve the mooring condition of Phase IV & V terminals of Rizhao port, we employ MIKE21-BW model to study the wave phenomena, in which four layout schemes and three structural wharves are considered. In the simulation, reflection coefficients of wharf structures are obtained from physical model test of the wave profile. The study shows that using pile-gravity type complex wharf and moving Phase V terminal further south which is allowed can improve the wave height distribution and the berthing condition.

Key words: perforated casisson; pile-gravity type complex wharf; all-vertical-piled wharf; reflection coefficients; berthing stability

日照港位于我国海岸线中部的山东半岛南翼黄海之滨, 现有石臼港区和岚山港区。近年来, 港口吞吐量日益增加, 需对石臼港区进行扩建, 增加四期和五期工程泊位^[1]。建设规划中的港区平面布置方案和工程结构形式是港内波高分布与特性的重要影响因素^[2-3], 也是港内泊稳的重要研究内容。该工程海域基础条件较好, 前期码头工程均采用直立沉箱结构, E 向和 ENE 向波浪反射强烈, 为了有效改善港内泊稳条件, 需对码头结构形式和平面布置方案进行调整研究。本文通过波浪断面物理模型试验, 研究开孔沉箱结构、桩

基-重力式复合结构和嵌岩全直桩结构共 3 种不同码头结构前的波浪反射系数, 在此基础上建立港区波浪数学模型, 模拟不同平面布置、不同结构形式下港内的波高分布, 综合对比各工况港内的波浪条件, 选择优化方案, 改善港内泊稳条件, 为工程决策提供科学依据。

1 波浪反射系数

开孔沉箱结构、桩基-重力式复合结构和嵌岩全直桩结构码头断面见图 1~3。沉箱结构箱体内设置 4 个隔舱, 沉箱迎浪面设有消浪孔, 并在

收稿日期: 2013-07-05

作者简介: 丁兆宽 (1968—) 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事港口工程建设。

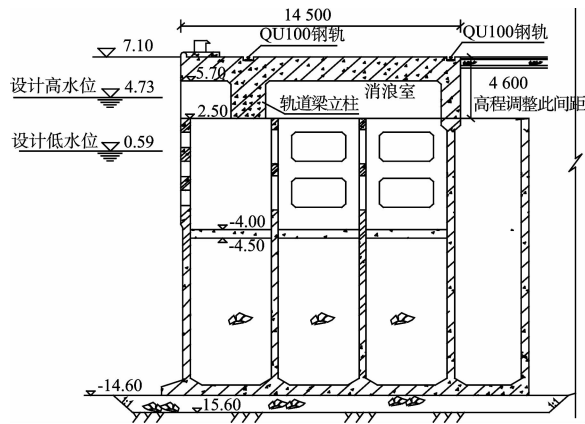


图1 开孔沉箱结构断面

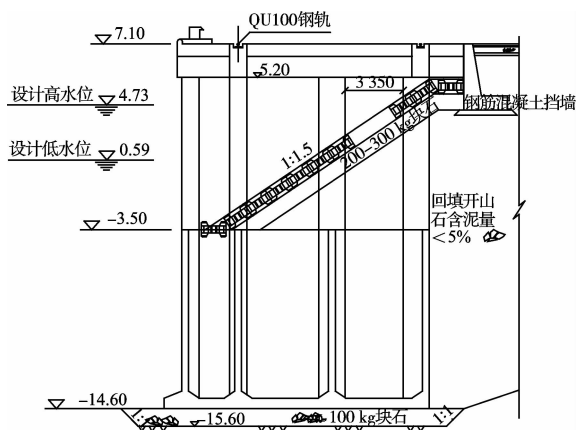


图2 复合结构断面

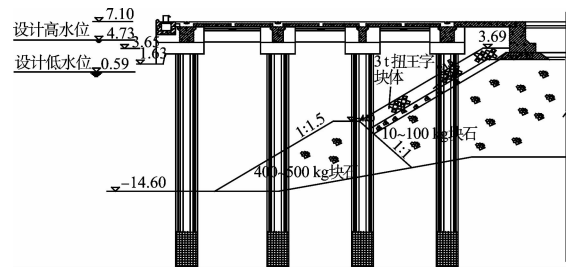


图3 嵌岩全直桩结构断面

沉箱底部设置抛石基床；复合结构的下部采用沉箱结构，上部采用桩基结构，沉箱上布置斜坡；全直桩结构码头下方布置复合斜坡保护。

为研究这3种不同结构码头前反射情况，开展了波浪断面物理模型试验。试验在河海大学风浪水槽中进行，水槽长80m，宽1.0m，高1.8m。水槽沿纵向分隔成各0.5m宽的两部分，一部分用于铺设试验断面，另一部分用于消除波浪二次反射。按正态重力相似准则设计模型，断面模型采用有机玻璃制作。模型长度比尺为 $\lambda = 30$ 。试验选取对工程影响较大的E和ENE两浪向进行试验，试验波浪

采用不规则波，波谱取JONSWAP谱^[4]。

反射系数采用目前常用的两点法^[5]和三点法^[6]计算。根据试验数据分析计算反射系数见表1，设计高水位时，开孔沉箱结构的沉箱开孔位置淹没在水下，和静水位之间的距离均较大，开孔消浪效果相差不大；复合结构码头面下方斜坡部分在设计高水位之上，波浪传播至此受斜坡作用消浪效果较好，反射作用减弱；全直桩结构的消浪效果相比复合结构较弱，复合结构下部采用沉箱结构，波浪行进至复合结构时，水深突然减小，引起更剧烈的波浪破碎，而嵌岩全直桩结构面板下方采用复合斜坡保护，且基本位于设计高水位之下，相比而言水深变化不剧烈，因此反射波能较大，反射系数较大。

表1 3种结构码头反射系数

潮位 S/m	波高 H_s/m	周期 \bar{T}/s	码头反射系数		
			复合 结构	全直桩 结构	开孔 沉箱
设计高水位 4.73	1.90		0.36	0.62	0.75
	1.37	6.30	0.40	0.68	0.72
	0.89				0.77

注：水位以当地理论最低潮面为基准。

2 波浪数学模型

2.1 模型控制方程

2009版MIKE 21之BW模块，可以考虑波浪传播过程中的折射、浅水变形、绕射、底摩阻损耗、反射或透射等影响因素，已经验证并应用于多个科研项目，符合本研究内容的要求。模型控制方程如下：

$$\text{连续方程: } n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

X方向动量方程：

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_x +$$

$$n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right) + \frac{gP \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} +$$

$$n\psi_1 = 0 \quad (2)$$

Y方向动量方程：

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y +$$

$$n^2gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2Q \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right) + \frac{gQ \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + m\psi_2 = 0 \quad (3)$$

$$\text{其中: } n^2gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2Q \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right) + \frac{gQ \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + m\psi_2 = 0 \quad (4)$$

$$\psi_1 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xx} + Q_{yy}) - nBgd^3 (\xi_{xxx} + \xi_{yyy}) - dd_x \left[\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBgd(2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right] - \quad (5)$$

$$dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBgd\xi_{xy} \right) \psi_2 \equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yy} + P_{xx}) - nBgd^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxx}) - dd_y \left[\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBgd(2\xi_{yy} + \xi_{xx}) \right] - \quad (6)$$

$$dd_x \left(\frac{1}{6} P_{yt} + nBgd\xi_{xy} \right)$$

式中: P, Q 为 x, y 方向流速水深积分; F_x, F_y 为 x, y 方向水平应力; d 为静水深; ξ 为波面高度; h 为总水深, $h = d + \xi$; B 为深水修正系数; α, β 为层流和紊流阻力系数; 脚标 (t, x, y) 表示物理量所对应的时间、 x 方向和 y 方向偏导数。

2.2 模型数值解法

数值方法基于 SYSTEM 21 结构, 差分方程空间离散采用矩形交替网格。空间导数的有限差分近似采用中心格式 (对流项除外), 时间积分采用时间中心隐性格式, 即 Boussinesq 方程采用的算法是非迭代交替方向的隐式 (ADI) 算法分步计算。

2.3 模型参数设置

模型采用全封闭边界, 边界大约在 $-15 \sim -16$ m 等深线处, 计算范围大约为 $6 \text{ km} \times 7 \text{ km}$, 波浪通过内部波浪生成来输入; 消波作用通过海绵层的设置来实现。根据研究区域及波浪特性, 在陆地边界前、波浪生长线后和封闭边界前均设置 20 层消波层; 结构物对波浪能量的反射作用通过设置孔隙层的方法来模拟, 斜坡式防波堤的反射系数为 0.4, 其余参照断面试验选取; 入射波采用 JONSWAP 谱, 多向不规则波模拟; 采用正方形网

格, 网格步长为 5 m, 时间步长为 0.12 s。

3 港内波高分布

3.1 平面布置和计算工况组合

日照港石臼港区四、五期工程平面布置有 4 种方案, 分别为原始方案、方案 1、方案 2 和方案 3。原始方案的平面布置见图 4, 四期工程 IV 区分布 2 个泊位, 均为 5 000 DWT; III 区和 II 区分布 3 个泊位, 分别为 7 000, 3 500 和 3 000 DWT; I 区分布 1 个 1 万 DWT 的泊位; 泊位前沿底高程四期 I 区为 -15.1 m, 四期 II 和 III 区为 -14.6 m, 四期 IV 区为 -13.7 m, 五期工程东侧前 3 个泊位为 -16.1 m, 第 4 个泊位为 -15.1 m。

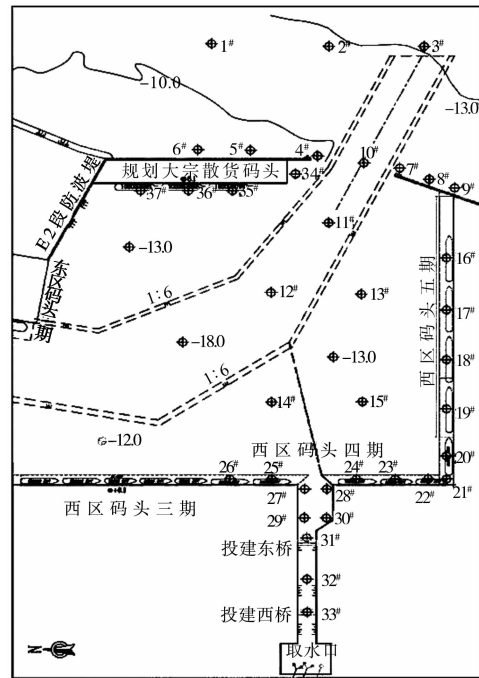


图4 石臼港四、五期工程平面布置 (原方案)

方案 1 相对原方案沿南侧推移了 95.49 m, 四期 III 区和 II 区分布 3 个均为 7 000 DWT 的泊位; 方案 2 相对原方案沿南侧推移了 155.49 m, 四期 III 区和 II 区分布 4 个泊位, 分别为 5 000, 3 500, 2 000 和 2 000 DWT; 方案 3 相对原方案沿南侧推移了 195.49 m, 四期 III 区和 II 区分布 4 个泊位, 分别为 7 000, 3 500, 3 000 和 3 000 DWT。

采用港内波浪传播数学模型分别计算了不同平面方案下 2 a 一遇设计高水位的波浪分布, 各平面布置中考虑了码头 3 种结构形式的影响; 计算

波向主要是对石臼港区四、五期影响较大的 E 向和 ENE 向；计算区域边界波浪条件主要是依据 3# 点附近 13 m 等深线处的波要素，其中 2 a 一遇设计高水位条件下 E 向（ENE 向）有效波高为 2.44 m，平均波周期为 6.3 s。

3.2 港内比波高分布

在不同平面布置方案下，无论是 E 向还是 ENE 向波浪传入港内，3 种码头结构均有较好的消浪效果，港内泊稳条件较直立沉箱结构均有较好改善，复合结构最好，全直桩结构次之，开孔沉箱结构略差，见图 5~10，图中港内比波高是港内波高与 3# 点附近波高比值。

原方案下 ENE 向波浪通过口门后进入港内，波浪分布较为集中，主要作用于四期码头南侧和五期码头。此处码头前沿反射效果显著，尤其是在 17#~23# 泊位前沿，反射波与入射波叠加形成一波高相对较大的分布带，对港区波浪分布影响

较大，且在四期与五期码头形成的交接处受到波浪多次反射的影响，波浪条件复杂多变；在 E 向波浪作用下，港区内波高分布相对较为均匀，对四期码头影响较大。

在方案 1 平面布置下，五期码头南移 90.45 m，ENE 向波浪传播至港内，波浪条件总体上有较大改善，尤其是 17#~22# 泊位前沿波高明显减小，反射程度减弱，港内波高分布相对原方案均匀，但在四期码头南侧 23# 和 24# 泊位前沿波浪有所增加，比波高大约增大 0.2；E 向波浪作用下，五期码头 16#~20# 泊位前沿波浪有所减小，比波高大约减小 0.1，而四期码头前沿波浪相对也有所改善，但改善程度有限。

随着五期码头南移，不论是 E 向还是 ENE 向波浪传播作用，港内波浪条件不断改善，但改善程度日趋减弱。在方案 3 布置下，港内的比波高分布可见图 9，10。

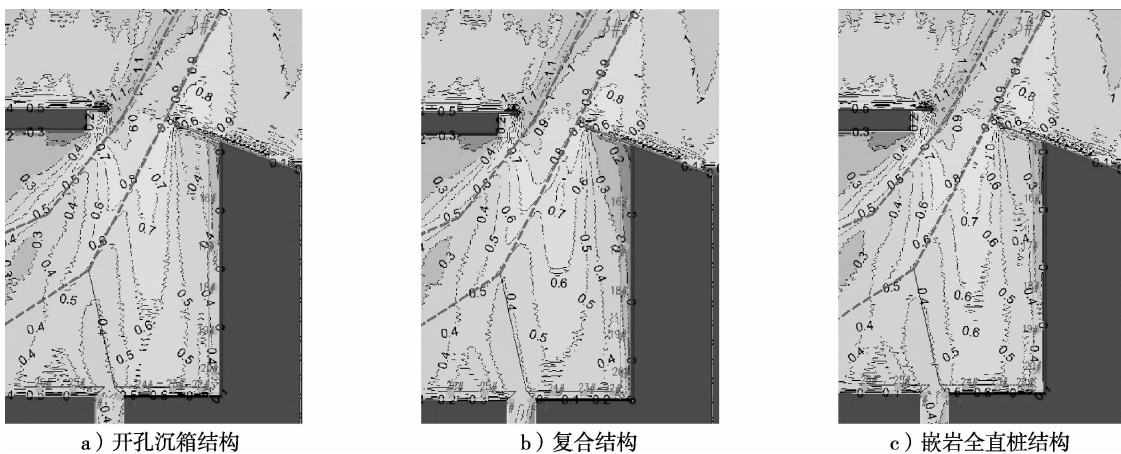


图 5 原方案不同码头结构下 E 向 2 a 一遇设计高水位港内比波高分布

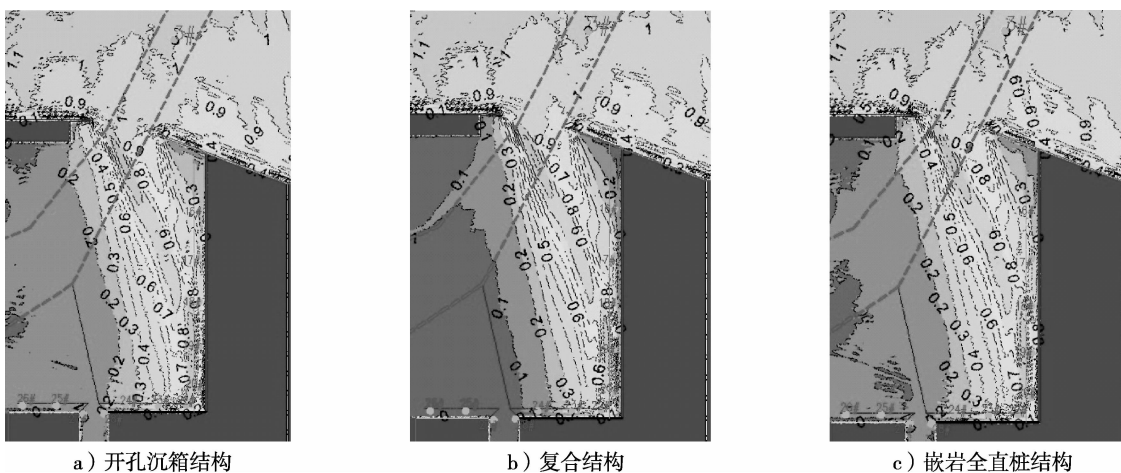


图 6 原方案不同码头结构下 ENE 向 2 a 一遇设计高水位港内比波高分布

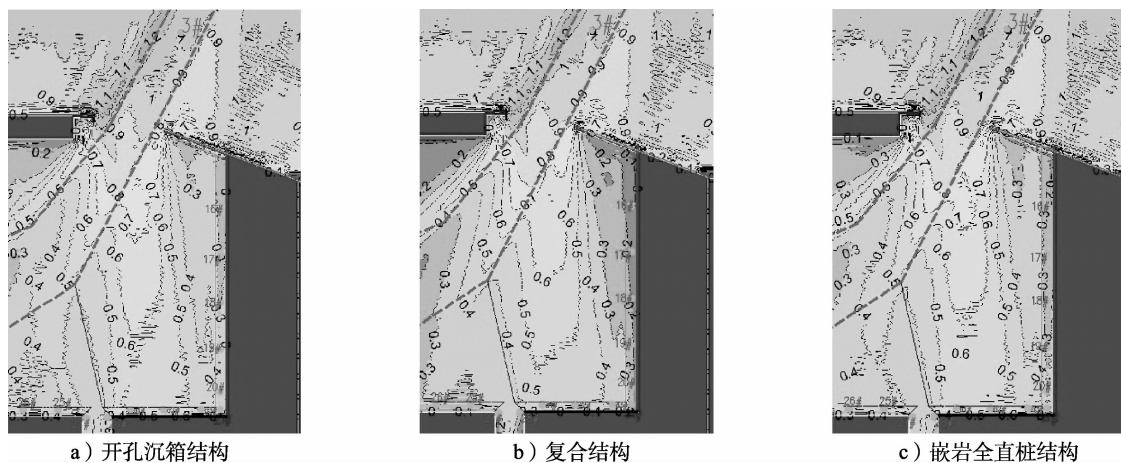


图7 方案1不同码头结构下E向2a一遇设计高水位港内比波高分布

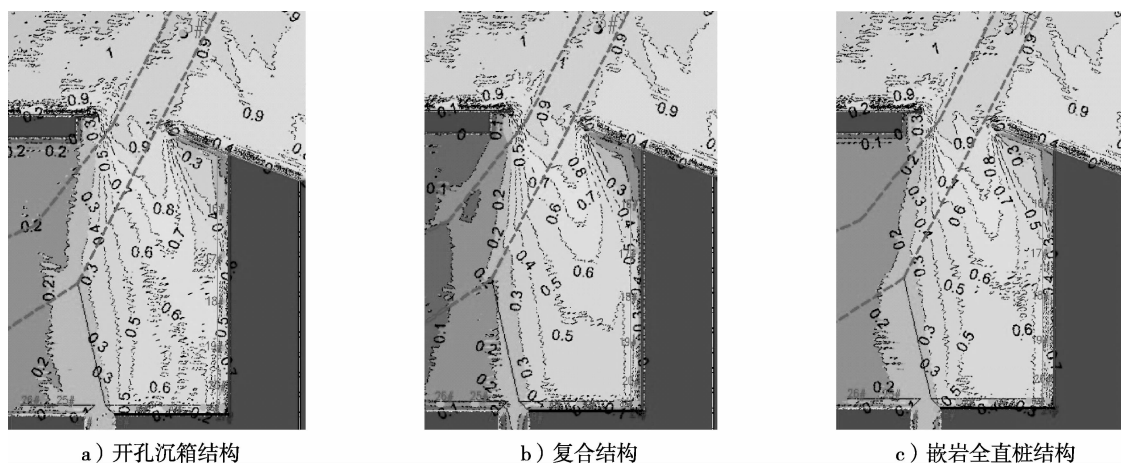


图8 方案1不同码头结构下ENE向2a一遇设计高水位港内比波高分布

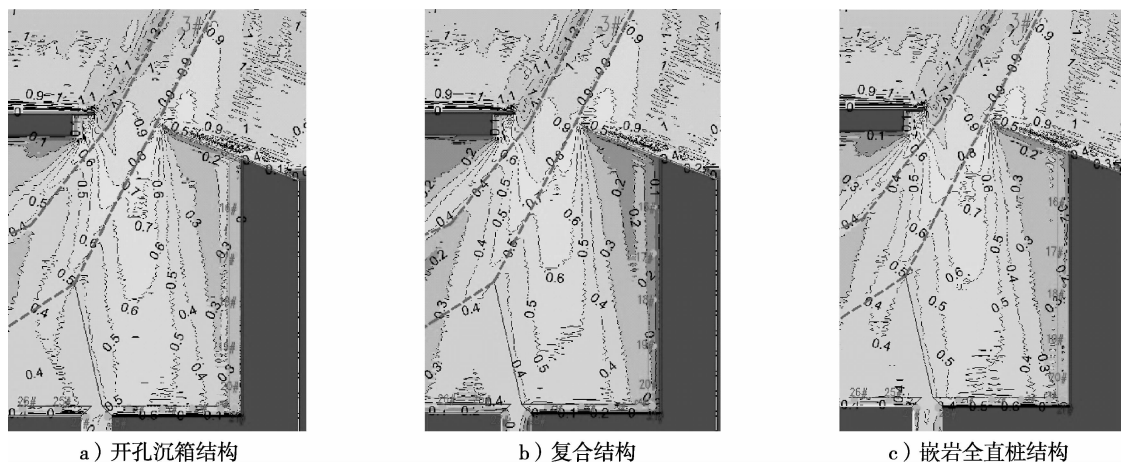


图9 方案3不同码头结构下E向2a一遇设计高水位港内比波高分布



图 10 方案3 不同码头结构下 ENE 向 2 a 一遇设计高水位港内比波高分布

4 结语

本文采用波浪断面试验和波浪数学模型模拟相结合的手段，针对码头结构形式和平面布置规划两个主要因素，开展日照港石臼港区四、五期工程码头泊稳优化研究。通过研究表明，在 2 a 一遇设计高水位条件下，较开孔沉箱结构和全直桩结构，复合结构形式的码头前沿波浪反射效果较弱，港区波浪条件相对其他两种结构较好，且随着五期码头南移，港区波浪不断改善。为优化港内泊稳，建议采用复合结构码头断面，在条件允许的条件下可适当将五期码头南移。港内的泊稳条件还与港口的其他自然条件（如风、流、雾等）、防波堤的建设规模与口门布置形式、码头轴线与风浪流方向的相对关系、码头顶高程、码头装卸工艺、船舶安全作业的要求、防冲设施及系统缆设施等有关^[7-8]。本文只针对码头断面结构和港区平面布置方案两个因素进行探讨，在实际工程应用时还应综合考虑各影响因素的影响。

参考文献：

- [1] 陈国平, 宋荔钦. 日照港石臼港区西区四、五期工程波浪数学模型计算报告[R]. 南京: 河海大学, 2011.
- [2] 林尚飞, 陈国平, 严士常, 等. 不同平面布置方案对港内波浪影响[J]. 水运工程, 2013(3): 61-66.
- [3] 冀亮, 陈国平, 严士常. 日照港四五期工程不同结构码头上水和波浪反射试验研究[J]. 水运工程, 2011(11): 112-116.
- [4] 陈国平, 严士常. 日照石臼港区四期五期工程断面报告[R]. 南京: 河海大学, 2011.
- [5] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003.
- [6] Michael Isaacson. Measurement of regular wave reflection[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1991(6): 553-569.
- [7] 杨希宏. 对海港码头泊稳及作业条件的初步探讨[J]. 港工技术通讯, 1980(6): 1-10.
- [8] 周丰, 姜俊杰. 离岸深水港码头泊稳条件关键技术研究[J]. 水运工程, 2010(11): 117-120.

(本文编辑 武亚庆)

