

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.02.014

日照港码头结构消浪的数值模拟

李瑞杰¹,江森汇¹,郑俊¹,罗锋²

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2. 江苏省海洋环境监测预报中心,江苏 南京 210036)

摘要:针对日照港在建设和运行中出现港内、码头泊稳条件较差的状况,通过数值模拟方法研究码头结构形式和消浪设施对港池内波浪传播变形的影响.在波浪数值计算过程中,考虑西四期工程反射系数发生变化,导致波浪的折射、绕射、反射和波能损耗等物理现象,利用缓坡方程模型,并结合有限元方法,推算分析极端高水位和设计高水位 2 种工程水位、3 个波向(E,ESE,SE)、2 年一遇组合情况下的港池内波浪要素.模拟结果显示:西四期工程反射系数变化对港内的波浪情况影响较大.若采用有消浪结构的重力式码头,较采用传统的重力式码头港内泊稳条件可以大为改善,最终确定西四期码头的反射系数在 0.6~0.8 范围内较合理.

关键词:码头结构;消浪;数值模拟;反射系数;波浪要素;日照港

中图分类号:U656 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2011)02-0190-05

在重力式码头的生产运营过程中,采用直立式实体岸壁,易引起较大的波浪反射和水面共振等问题.为减少波浪的反射,近几十年来各国竞相研究新型重力式码头消浪结构,力求在不增加码头造价的情况下加大结构的透空度,以改善港池内的泊稳条件.

自 20 世纪 60 年代 Jarlan^[1]提出开孔沉箱结构作为重力式码头消浪的新型结构以来,国内外学者对开孔沉箱结构的波浪反射、越顶及沉箱所受的波浪力等进行了研究,并应用于世界各地的港口、码头.随着船舶的大型化及码头建设规模的不断扩大,受掩护条件的限制,为改善港口作业条件,开孔沉箱结构受到越来越多的关注,其研究主要集中在理论分析^[2-4]、物理模型实验^[5-7]、数值模拟^[8-10]和实际应用^[11]等方面.

本文通过数值模拟方法研究码头结构形式和消浪设施对港池内波浪传播变形的影响,确定各种组合情况下港池内波高分布状况及其泊稳条件,为防止港池内水域出现谐振现象,保证船舶在港池内平稳停泊和安全作业提供理论依据.

1 数学模型理论基础

1.1 控制方程

李瑞杰等^[12]对椭圆形缓坡方程进行了拓展,得到联合波浪折射、绕射、反射,考虑陡变地形、能量耗散以及非线性效应的缓坡方程:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \varphi) + (k^2 CC_g + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma) \varphi - \zeta \varphi = 0 \tag{1}$$

其中 $\zeta = \sigma^2 - \sigma_0^2$ $C = \sigma/k$ $C_g = \partial \sigma / \partial k = nC$

$$n = \frac{1}{2} [1 + 2kd / \sinh(2kd)] \quad \gamma = \chi (1 - \tau^2 d^2 / 4a^2) / d \quad \sigma_0^2 = gk \tanh(kd)$$

式中: φ ——复波面函数; ∇ ——水平梯度算子; σ ——角频率; g ——重力加速度; C ——相速度; C_g ——群速度; k ——波数; n ——浅水因子; d ——水深; i ——复数单位; γ ——破碎参数; χ ——常数,取 0.15; τ ——经验值,取 0.4; a ——波振幅; w ——摩阻因子,由式(2)确定:

$$w = \frac{4n\sigma_f a k}{3\pi [2kd + \sinh(2kd)] \sinh(kd)} \tag{2}$$

收稿日期:2010-07-10

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金(200802940014) 河海大学自然科学基金(2008430511)

作者简介:李瑞杰(1963—),男,山东省青岛人,教授,博士,主要从事物理海洋学研究. E-mail:ljli@hhu.edu.cn

式中, f_r 为摩阻系数,取 0.01.

非线性弥散关系采用李瑞杰等^[13]提出的形式:

$$\sigma^2 = gk(1 + P\epsilon^2)\tanh(kd + Q\epsilon)$$

(3)

其中

$$P = \tanh(kd) \quad Q = \left[\frac{kd}{\sinh(kd)} \right]^2 \quad \epsilon = ka$$

(4)

1.2 边界条件

闭边界可划分为完全吸收边界、部分吸收边界和全反射边界. 表达式如下:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \varphi$$

(5)

式中 K_r 为反射系数,取值范围为 $[0,1]$,全反射取 1,全吸收取 0.

入射边界条件采用抛物形近似边界条件:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = -p\varphi - q \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + f$$

(6)

其中

$$f = \partial \varphi_0 / \partial r + p\varphi_0 + q \partial^2 \varphi_0 / \partial \theta^2 \quad p = \frac{k^2 r^2 + k_0^2 r^2 + ik_0 r + 0.25}{2ik_0 r^2} \quad q = \frac{1}{2ik_0 r^2} \quad \varphi_0 = \varphi_I + \varphi_R$$

式中: φ_I ——入射波势; φ_R ——反射波势; k_0 ——开边界 Γ 上平均水深对应的波数; r, θ ——极坐标.

1.3 求解方法

在数值模拟过程中,采用改进的共轭梯度法^[14-15]求解波浪椭圆形缓坡方程,过程如下:(a)将控制方程(1)表示成式(7)的形式;(b)采用 Galerkin 有限元方法建立积分方程(式(8));(c)假设式(8)中的系数 E, F 每个网格单元内是线性变化的,得到线性方程(9);(d)对式(9)进行迭代求解即为所求解.

$$\nabla \cdot (E \nabla \varphi) + F \varphi = 0$$

(7)

$$- \left(\iint_C + \int_{\Gamma} \right) N_i \left(E \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) ds + \iint_{\Omega} E \nabla \varphi \nabla N_i d\Omega + \iint_{\Omega} F \nabla \varphi \nabla N_i d\Omega = 0$$

(8)

$$A^* A \varphi = A^* B$$

(9)

其中

$$E = CC_g \quad F = k^2 CC_g + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma - \zeta \quad B = A f$$

式中: N_i ——线性插值函数; C, Γ ——岸边界及开边界; A ——由式(9)转化而来的系数矩阵; A^* —— A 的共轭转置矩阵; $A^* A$ ——Hermit 正定系数矩阵.

2 研究区域概况

日照港位于我国海岸线中部的山东半岛南翼黄海之滨,港区湾阔水深,陆域宽广,气候温和,常年不冻. 港区陆域范围为 10.34 km²,水域范围 300 km²,营运码头总长超过 4 000 m,见图 1(图中采用北京 54 坐标系). 日照港位于我国海上南北运输主通道的中部,交通便利,可直通我国沿海乃至全国各港,目前已与世界 50 多个国家和地区通航. 陆路拥有“一纵三横”的公路运输网络和纵横交错的集疏运铁路交通干线网络,与华东、中原、西北广大地区相连.

在建设和运行中发现石臼港区(119°33'E, 35°13'N)西作业区和北作业区的码头泊稳条件较差,究其原因主要:(a)港区外防波堤尚未建成;(b)港池为一相对封闭的水域,且现有码头均为实体直立岸壁结构,反射波浪经过码头的多次反射叠加,形成驻波,波浪能量在港池内汇聚,导致波高成倍增大,使码头泊稳条件恶化;(c)传入港池内的入射波与反射波叠加,产生波浪谐振现象,形成较强且极不规则的波浪,威胁船舶在港池内平稳停泊和安全作业,减少了作业天数.

随着外防波堤的建成,石臼港区大部分泊位和港池的泊稳问题应可以得到解决,但正对防波堤口门的西四期工程(B 区域)及西五期(A 区域)的规划集装箱泊位,在 E, ESE, SE 向(港区 3 个最强的波向)波浪入射时,基

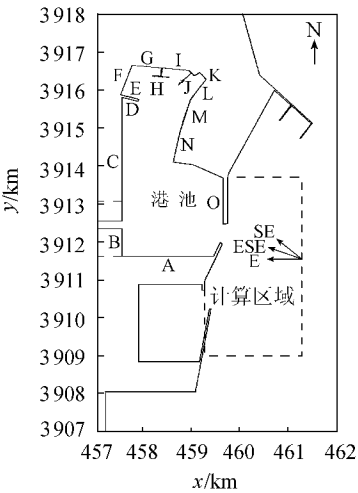


图 1 石臼港区平面布置

Fig. 1 Plane layout of Shijiu Port area

本得不到防波堤的掩护.因此,有必要进行码头结构形式对波浪影响程度的预测,以使码头设计更加科学合理.

3 波浪数值计算及结果分析

3.1 计算海域设置和外海波浪要素

在分析日照港附近海域资料的基础上,确定计算区域包括图 1 中虚线部分和港池部分,其中 A~O 表示各个分段区域,如 B 即为西四期工程.西四期工程 K_r 的变化情况(西四期工程 K_r 为 0.6~0.9,其余为 0.9),是在对国内外重力式码头消浪结构发展现状分析基础上得到.平面采用北京 54 坐标系统,高程以日照港理论最低潮面为基准面.网格采用三角形网格,网格步长控制在一个波长内有 12 个网格节点,以满足波浪计算条件.模型中采用规则波进行计算.

在波浪变形数学模型中考虑西四期工程 K_r 发生变化,导致波浪的折射、绕射、反射和波能损耗等物理现象,并推算分析 2 种工程水位(极端高水位 5.82 m、设计高水位 4.73 m)、3 个波向(E,ESE,SE)2 年一遇组合情况下的港池内波浪要素.日照港(-13 m 等深线)设计波浪要素见表 1.

3.2 西四期工程 K_r 变化对港池内波浪的影响

日照港石臼港区深水航道宽 290 m,水深为 18 m,走向基本与 ESE 向平行,沿 WNW 方向延伸至港池内.波浪进入航道后因航道内外水深差异,波浪向浅水方向传播,与航道边坡上直接传播的波浪叠加,航道两侧产生波能聚集区.航道对波浪的折射作用随波浪入射角的变化而不同,港池内波能的传入情况亦随波浪入射角的变化而变化^[16].

现分方向分析港内的波浪传播情况(受篇幅限制,只给出极端高水位情况下、 K_r 为 0.6 和 0.9 时的波高分布图,设计高水位情况与极端高水位类似,数值略为减小).

a. E 向极端高水位.西四期工程 K_r 为 0.6 和 0.9 时的港内波高分布见图 2(a)和(b).西四期工程正对口门,得不到防波堤的掩护.波浪通过口门进入港池内,部分波能传播至西四期码头,产生反射波,与入射波相叠加,形成一波高相对较大的分布带,尤其是在西四期工程 K_r 较大时,显得尤为明显,波高能达到 4.0 m 左右.随着西四期工程 K_r 的减小,反射波浪也相应减小,波高分布带也有减小的趋势; K_r 的变化对西五期码头前沿的波浪影响不大,基本维持在 0~1.5 m,当 K_r 达到 0.9 时,波高达到 2.0 m 左右.另一部分波能经航道到达西三期码头,波高比前一部分略小,受西三期和其他部分直立岸壁反射的影响,波浪在港池内不断反射,对港池深处影响较大.当 $K_r=0.6$ 时,波高基本在 1.0 m 以下;当 $K_r=0.9$ 时,波高在 1.5 m 左右的区域占 40% 左右.

表 1 日照港(-13 m 等深线)设计波浪要素

Table 1 Design wave elements of Rizhao Port (contour line of -13 m)			
入射方向	工程水位	波高 $H_{4\%}/\text{m}$	周期 T/s
E	极端高水位	3.15	6.3
	设计高水位	3.02	
ESE	极端高水位	3.15	6.2
	设计高水位	3.02	
SE	极端高水位	2.31	5.8
	设计高水位	2.29	

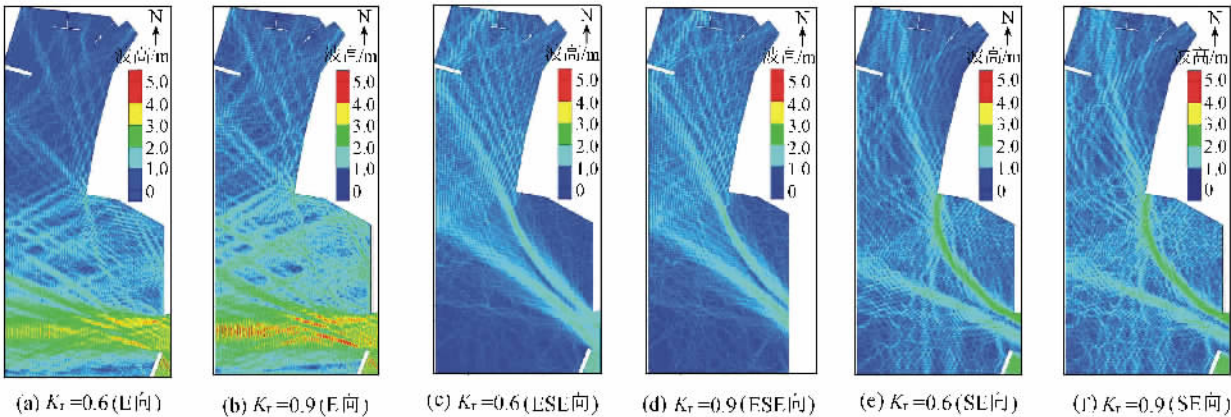


图 2 不同反射系数(K_r)时港内波高

Fig. 2 Wave heights in port area under different reflection coefficients (K_r)

b. ESE 向极端高水位.西四期工程 K_r 为 0.6 和 0.9 时的港内波高分布见图 2(c)和(d).波浪进入口门后,航道北侧的波浪继续向北传播,波高在 2.0~2.5 m 的波浪直接传播至东港区交角处.随着西四期工程 K_r 不断增大,波浪也呈增大的趋势,且影响范围越来越大.航道南侧波浪在进入口门后,直接传播到西三期码头前沿,反射到东港区的南侧,港内反射产生的反射波与入射波叠加是导致港内泊稳条件变差的原因.

c. SE 向极端高水位.西四期工程 K_r 为 0.6 和 0.9 时的港内波高分布见图 2(e)和(f).航道北侧的波浪进入港池后也继续向北传播,传播至东港区前沿,与东港区稍有偏移,港池深处得不到东港区的掩护,波浪逐渐向港池深处传播.随着 K_r 的不断增大,西北面交角处的波能逐渐聚集,波高增大.航道南侧的波浪在进入港池后即分为两部分,南面部分传播不远距离后即消散了,而北面部分可一直传播至西二期码头,经反射传播至散粮码头南侧交角处,使得此处波能较集中.

表 2 为极端高水位情况下码头前沿各小区域波高 $H_{4\%}$ 最大值(西四期工程 K_r 分别为 0.9 和 0.6)及变化量.由表中数据可知,E 向入射时,波高较大的区域集中在 A,B,C,N,O 区域,符合波高分布情况;ESE 向和 SE 向入射时,码头前沿的最大波高基本在 1.5 m 左右,最大波高出现在西四期码头前沿为 6.64 m 处.西四期工程 K_r 为 0.6 时的最大波高相比于 0.9 时的最大波高,E 向减小 30%,ESE 向减小 10%,SE 向减小 5%,E 向改善效果明显.

表 2 极端高水位情况下码头前沿波高 $H_{4\%}$ 最大值及变化量

Table 2 Maximum values and variations of wave height $H_{4\%}$ in front of dock under extremely high water level									
区域	E 向			ESE 向			SE 向		
	$K_r=0.9$ 时 最大波高/m	$K_r=0.6$ 时 最大波高/m	变化量/%	$K_r=0.9$ 时 最大波高/m	$K_r=0.6$ 时 最大波高/m	变化量/%	$K_r=0.9$ 时 最大波高/m	$K_r=0.6$ 时 最大波高/m	变化量/%
A	3.26	2.48	-23.9	1.75	1.51	-13.7	1.09	1.05	-4.0
B	6.64	4.85	-27.0	1.64	1.31	-20.0	0.88	0.67	-24.0
C	3.94	3.19	-19.0	2.83	2.62	-7.4	2.47	2.50	1.2
D	1.14	0.79	-31.0	2.44	2.43	-0.2	1.80	1.72	-4.6
E	1.11	0.74	-32.6	1.34	1.22	-8.5	2.01	2.00	-0.5
F	1.73	1.06	-38.8	1.31	1.24	-5.5	1.89	1.90	0.9
G	1.93	1.43	-25.6	1.86	1.80	-2.9	2.42	2.33	-3.6
H	1.39	0.93	-32.8	1.51	1.43	-5.1	1.65	1.64	-0.8
I	1.11	0.86	-21.9	1.10	0.98	-10.8	1.28	1.26	-0.9
J	0.79	0.51	-36.2	0.64	0.54	-14.3	1.08	1.06	-1.8
K	1.61	1.39	-13.7	1.35	1.14	-15.6	1.29	1.28	-0.4
L	1.52	1.05	-31.2	0.80	0.73	-8.4	1.43	1.39	-3.0
M	1.49	1.14	-23.4	1.05	0.98	-6.5	1.78	1.83	2.3
N	2.77	1.99	-28.1	2.05	1.96	-4.4	1.76	1.81	3.0
O	4.16	2.91	-30.0	1.81	1.74	-3.9	1.23	0.99	-19.2

注 变化量为 $K_r=0.6$ 时最大波高与 $K_r=0.9$ 时最大波高之差,与 $K_r=0.9$ 时最大波高之比.

4 结 语

本文通过对数值模拟结果分析,得到对于西四期码头最不利的波浪入射方向为 E 向、ESE 次之、SE 向最安全的结论,若采用有消浪结构的重力式码头,较采用传统重力式码头港内泊稳条件可以大为改善.西四期工程 K_r 的变化,对港池内的波浪反射情况影响较大,西四期码头采用消浪结构,码头前沿泊稳条件有明显改善. K_r 为 0.6 时的波浪相比 K_r 为 0.9 时的波浪,波高减小约 30% (E 向),10% (ESE 向),5% (SE 向).最终确定西四期工程 K_r 在 0.6~0.8 范围内较合理, K_r 越小,港内泊稳条件改善越明显.

参考文献：

[1] JARLAN G E. A Perforated vertical wall breakwater[J]. Dock Harbor Auth,1961,486(7) 394-398.

[2] WILLIAMS A N, MANSOUR A M, LEE H S. Simplified analytical solutions for wave interaction with absorbing-type caisson breakwater [J]. Ocean Engineering,2000,27 :1231-1248.

[3] CHWANG A T, DONG ZHENNAN. Wave trapping due to porous plate[C]//Proceedings of the 15th Symposium on Naval Hydrodynamics. Hamburg :ASCE,1984 32-34.

- [4] FUGAZZA M, NATALE L. Hydraulic design of perforated breakwaters[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1992, 118(1): 1-14.
- [5] TANIMOTO K, YOSHIMOTO Y. Theoretical and experiment study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall[J]. Report of the Port and Harbor Research Institute, 1982, 21(3): 43-77.
- [6] SUH K D, CHOI J C, KIM B H, et al. Reflection of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters[J]. Coastal Engineering, 2001, 44: 141-151.
- [7] 姜云鹏, 陈汉宝, 戈龙仔. 开孔沉箱在日照港四期码头工程中的消浪效果研究[J]. 水道港口, 2010, 31(1): 20-24. (JIANG Yun-peng, CHEN Han-bao, GE Long-zai. Wave dissipation result of perforated caisson for Phase IV terminal of Rizhao Port[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(1): 20-24. (in Chinese))
- [8] YANG G. Numerical model of wave effects on permeable vertical barriers above the seabed[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1996.
- [9] LEE M M, CHWANG A T. Scattering and radiation of water waves by permeable barriers[J]. Physics of Fluids, 2000, 12(1): 54-65.
- [10] 吴浩, 孙大鹏, 夏志盛. 波浪与大开孔消浪结构作用非线性数值模拟[J]. 海洋工程, 2010, 28(3): 117-122. (WU Hao, SUN Da-peng, XIA Zhi-sheng. Nonlinear numerical simulation of interaction between waves and perforated caisson breakwaters[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(3): 117-122. (in Chinese))
- [11] TANIMOTO K, TAKAHASHI S. Design and construction of caisson breakwater-the Japanese experience[J]. Coastal Engineering, 1994, 22(1-2): 54-77.
- [12] 李瑞杰, 张扬. 波浪的非线性频散关系[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 448-453. (LI Rui-jie, ZHANG Yang. Nonlinear dispersion relations of wave[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 448-453. (in Chinese))
- [13] LI Rui-jie, TAO Jian-fu. Analysis of wave nonlinear dispersion relations[J]. China Ocean Engineering, 2005, 19(1): 167-174.
- [14] PANCHANG V G, B R PEARCE, GE W, et al. Solution to the mild-slope wave problem by iteration[J]. Applied Ocean Research, 1991, 13(4): 187-199.
- [15] LI B. A generalized conjugate gradient model for the mild slope equation[J]. Coastal Engineering, 1994, 23(3-4): 215-225.
- [16] 郑俊, 李瑞杰, 江森汇, 等. 缓坡方程的有限元解法及其应用[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 275-280. (ZHENG Jun, LI Rui-jie, JIANG Sen-hui, et al. Finite element solution for mild-slope equation and its application[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 275-280. (in Chinese))

Numerical simulation of wave dissipation on dock structure of Rizhao Port

LI Rui-jie¹, JIANG Sen-hui¹, ZHENG Jun¹, LUO Feng²

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Marine Environmental Monitoring and Forecasting Center, Nanjing 210036, China)

Abstract: With regard to the poor mooring conditions of docks during the construction and operation of Rizhao Port, the effects of structural types of the docks and wave dissipation facilities on wave propagation and deformation were studied by means of the numerical simulations. In calculation of waves, the variation of reflection coefficient of the west dock No.4 was considered, causing physical phenomena of wave diffraction, refraction, reflection and wave dissipation, etc. The wave elements in the dock basin were calculated by use of the mild-slope models and finite element methods under various working conditions, including 2 kinds of water levels (extremely high water level and design high water level), 3 wave directions (E, ESE and SE) and return period of 2 years. The simulated results show that the variation of reflection coefficient in west dock No.4 has obvious influences on wave distribution in the port area. The mooring conditions are greatly improved by adopting the gravity wharf with dissipation facilities, and the reflection coefficients of 0.6 to 0.8 are rational.

Key words: dock structure; wave dissipation; numerical simulation; reflection coefficient; wave element; Rizhao Port