



威海船厂港域泊稳试验研究与数值模拟*

吴亚楠¹, 董 胜¹, 张华昌²

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 海军工程设计研究院, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对威海船厂搬迁工程进行了港域波高物理模型试验研究。试验表明在 2 a 一遇波浪条件下大多数泊位满足泊稳要求, 个别泊位不满足要求但相差不大。采用 MIKE21-BW 模型, 考虑波浪的反射、绕射、破碎等物理现象建立近岸波浪数学模型, 对港域单向不规则波传播变形过程进行数值模拟, 将数值计算结果与试验结果进行比较。二者在港池外有效波高最大差值为 0.29 m, 港池内最大差值为 0.1 m, 吻合度较高, 表明 BW 模型可用于威海船厂近岸波浪传播变形与泊稳计算。

关键词: BW 模型; 不规则波; 泊稳; 数值模拟

中图分类号: U 673.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0013-06

Experimental test and numerical simulation of berthing in harbor basin of Weihai shipyard

WU Ya-nan¹, DONG Sheng¹, ZHANG Hua-chang²

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Navy Engineering Design and Research Institute, Qingdao 266100, China)

Abstract: The physical experiment is performed to study the berthing condition of Weihai shipyard after it moves to a new site. Experimental results show that the berthing conditions of most berths are satisfactory under the 2-year return wave height. The berthing conditions of the others are neither satisfactory nor too serious for the ship berthing. Based on the MIKE21-BW model, which takes into consideration of wave reflection, wave diffraction and wave breaking, we establish a nearshore wave transformation model. The unidirectional irregular wave propagation and transformation in Weihai shipyard is simulated using this model. The comparison between the numerical and measured results show that the maximum difference of significant wave height is 0.29 m outside the harbor basin, and the maximum difference is 0.1 m inside the basin. The results of calculation and measurement are in good agreement. It indicates that the BW model is suitable for the wave transformation and basin tranquility of Weihai shipyard.

Keywords: BW model; irregular wave; berthing condition; numerical simulation

波浪从外海到浅水以及在近岸的传播过程中, 会发生折射、绕射、反射、浅水变形、波浪破碎等一系列物理变化, 防波建筑物需抵御波浪的直接冲击, 在保证自身稳定的前提下保证港池水域的平稳, 因此波浪要素直接影响着近岸建筑物的设计和规模; 随着波浪的传播, 掩护型港口港内水域受绕射作用影响, 泊稳条件和码头结构形式、高程等都与波浪条件有关。因此, 波浪是影响港

口工程平面规划布置、码头与防浪建筑物设计、港内泊稳条件等的重要因素。

目前近岸波浪数学模型应用较广泛的有: 波能平衡方程模型、缓坡方程模型和 Boussinesq 方程模型。其中, Boussinesq 方程可以模拟波浪的非线性运动和由于水深变化而引起的波群演化等, 但经典的 Boussinesq 方程只适用于浅水情况。Madsen 等^[1]、Nowgu^[2]、张永刚等^[3]和邹志利等^[4]

收稿日期: 2014-05-25

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51279186)

作者简介: 吴亚楠 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口海岸工程及其与海洋环境相互作用。

对其进行了改进,使之适用于较深处的波浪。基于改进型 Boussinesq 方程的 MIKE21-BW 模型包含了众多物理现象,包括折射、浅水变形、绕射、底摩擦损耗、部分反射或透射(多孔介质)、频率谱、方向谱、波-波相互作用、波浪破碎等,从而得到了广泛的工程应用。史宏达等^[5]在平坦地形条件下,应用 MIKE21-BW 模型对矩形港池内波浪共振进行了研究。吉星明等^[6]采用能量平衡方程计算波浪浅水变形,由于没有考虑越浪,数值计算存在一定误差。马小舟等^[7]采用 MIKE21-BW 模型模拟了孤立波在进入一侧为开敞水域的细长港(常水深和变水深)时引发的港内响应现象。刘臣等^[8]采用 MIKE21-BW 模型对琼州海峡海口汽车轮渡码头泊稳条件进行了研究。

本文对威海船厂搬迁工程进行港域波高物理模型试验研究,并应用 MIKE21-BW 模型,考虑波浪折射、绕射、反射及破碎等物理过程,对港内单向不规则波浪传播变形进行数值研究,并与物理模型试验值^[9]进行比较。

1 BW 模型介绍

1.1 基本方程

模型控制方程采用 Beji 和 Nadaoka 改进后的 Boussinesq 方程^[10]:

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_x + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2} \right] + \quad (2)$$

$$\frac{gP \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_1 = 0$$

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \quad (3)$$

$$F_y + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2} \right] + \quad (3)$$

$$\frac{gQ \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_2 = 0$$

其中:

$$\psi_1 = - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xx} + Q_{yy}) - nBg d^3 (\xi_{xxx} + \xi_{xyy}) - \quad (4)$$

$$dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBg d (2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right) -$$

$$\psi_2 = - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yy} + P_{xx}) - nBg d^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) - \quad (5)$$

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

式中: ξ 为波面相对静水面的高度 (m); P 、 Q 为 x 、 y 方向流量密度 ($m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$); B 为 Boussinesq 色散因子,取 1/15; F_x 、 F_y 为 x 、 y 方向的水平应力项; x 、 y 为笛卡尔坐标 (m); t 为时间 (s); h 为水深 (m), $h = \xi + d$; d 为静止水位时的水深 (m); g 为重力加速度; n 为孔隙率; C 为谢才系数; α 为多孔介质中的层流阻力系数; β 为多孔介质中的湍流阻力系数; R_{xx} 、 R_{xy} 为水滚引起的非均匀流动所产生的附加质量。

控制方程在空间方向上离散成矩形交错网格(图 1),求解微分方程采用交替方向隐式(Alternating Direction Implicit, ADI)算法。标量被定义在网格的节点上,矢量被定义在相邻节点连线的中点。

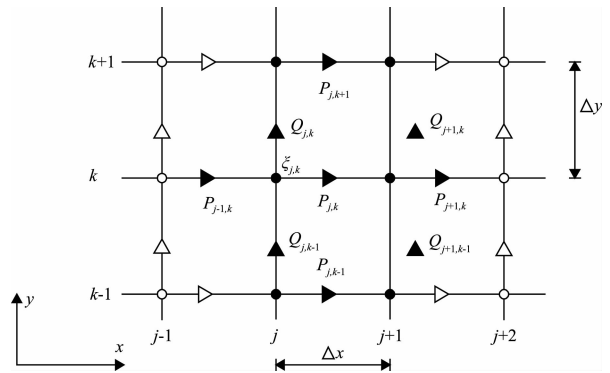


图 1 BW 模型离散格式

1.2 消波边界

波浪数学模型中,部分边界需要进行消波处理,以免出现边界的多次反射影响数值模拟精度。

根据 Larsen 和 Dancy 的研究成果^[11], 对于消波边界区域, 基本方程引入消波参数 γ 、 μ , 方程表达式为:

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \gamma \frac{\partial P}{\partial x} + \gamma \frac{\partial Q}{\partial y} = -\frac{1-\mu^{-2}}{\Delta t} \xi \quad (6)$$

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_x + n^2 \gamma gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2} \right] + \quad (7)$$

$$\frac{gP \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_1 = -\frac{1-\mu^{-2}}{\Delta t} P$$

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y + n^2 \gamma gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2} \right] + \quad (8)$$

$$\frac{gQ \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_2 = -\frac{1-\mu^{-2}}{\Delta t} Q$$

其中:

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp[(2^{-x/\Delta x} - 2^{-x_s/\Delta x}) \ln a] & 0 < x < x_s \\ 1 & x_s < x \end{cases} \quad (9)$$

$$\gamma(x) = 0.5(1 + 1/\mu^2) \quad (10)$$

式中: x_s 为消波层厚度; Δx 为计算网格空间步长, $\Delta x = 2 \text{ m}$; a 的取值与 x_s 和 Δx 的比有关。根据已有的经验, 当 $x_s = 10\Delta x$ 时, a 取 5, 当 $x_s = 100\Delta x$ 时, a 取 10。

1.3 波浪边界

在模型内采用沿某一直线进行流量变动的造波方法。通过内部生波实现, 主要通过入射波浪场中沿着指定的生长线添加流量, 内生波的优点就是可以在波浪生长线后设置消波层, 这样超出模型区域的波浪就可以被吸收掉, 它与消波层之间是独立的。

数值模型入射波浪采用与物理试验相同的单向不规则波。本文采用由英、美、荷、德等国联合进行的“联合北海波浪计划”获得的 JONSWAP 谱, 它包括了深、浅水充分成长风浪和成长过程的风浪, 得到了广泛应用, 其表达式为

$$S(\omega) = \frac{0.78}{\omega^5} \exp\left(-\frac{3.11}{H_s^2 \omega^4}\right) \gamma_p \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_{\max})^2}{2\sigma^2 \omega_{\max}^2}\right] \quad (11)$$

式中: γ_p 称为谱峰升高因子, $\gamma_p = 1.5 \sim 6$, 一般取平均值 $\gamma_p = 3.3$; ω_{\max} 为谱峰频率; H_s 为有效波高 $H_{1/3}$; σ 为峰形系数, 取为 $\begin{cases} \sigma = 0.07, & \text{当 } \omega \leq \omega_{\max} \\ \sigma = 0.09, & \text{当 } \omega > \omega_{\max} \end{cases}$ 。

2 物理模型试验

为了使威海市船厂搬迁工程具有可靠的科学依据, 确保工程建设更加经济合理、安全可靠, 进行了本次整体物理模型试验。通过整体波浪物理模型试验测定拟建港口的港内泊稳度, 测量港内有关建筑物前的波浪要素, 为工程建设提供依据。物理试验模型布置见图 2。



图 2 试验模型布置

试验采用 NNW、WNW 向和 W 向波浪进行, 波浪重现期分 50、25、10、2 a 共 4 种情况, 采用单向不规则波浪进行试验。试验结果表明, WNW 向、W 向波浪均能直接进入港池, 并直射到码头上, 实测波高与泊稳要求相差较大; 码头面为垂直平面, 对波浪的反射较大, 入射波和反射波相互叠加, 致使港内波况恶化, 特别是东、西两侧码头, 两者均为直立结构, 且走向一致, 两者之间的波浪经反射后相互叠加, 对港内泊稳非常不利; WNW 向波浪传入港池后在港池内生成的波浪较 W 向大, 其原因是 WNW 向波浪在港池内的直射区域离直立码头较近, 且直射在东西、南北两个方向的岸壁上, 产生的反射波较大, 经叠加后生成的波浪较大。

本次试验采用 2 a 一遇波浪验证了港内泊稳情况。试验证实, NNW 向波浪作用时, 港内各泊位处均满足泊稳要求; WNW 向波浪作用时, 泊位 D、F、G 和 E 处的泊稳状况不满足要求; W 向 2 a 一遇波浪作用时, 泊位 F、G 不满足泊稳要求。试验中对港池内部码头采取了简单的消浪措施, 并进行了试验。消浪后的港内泊稳情况优于消浪前, 因此对港内建筑物进行设计时, 采取必要的消浪措施, 或采用消能结构, 将大大改善港内的泊稳状况。

3 数值计算

对威海船厂物理模型试验过程应用 MIKE21-BW 模块进行数值计算, 水位分别为设计高水位 2.38 m 和设计低水位 0.18 m。波向有 NNW、WNW、W 共 3 种。另有 3 种波况: 波况 1, WNW 向, 有效波高 $H_s = 1.72$ m, 有效周期 $T_s = 6.7$ s; 波况 2, $H_s = 1.29$ m, $T_s = 6.0$ s; 波况 3, NNW 向, $H_s = 1.8$ m, $T_s = 7.4$ s。

计算区域网格 x 和 y 向空间步长均为 2 m, 计算时间 30 min, 斜坡式防波堤部分反射, 数值地形见图 3。将 BW 模型计算结果与试验结果进行比较, 从图 4 和 5 中可以看出, 波向为 W、NNW 时计算值与试验值吻合较好, 最大差值不超过 0.1 m; 波向为 WNW 时设计高水位下 A 点计算值比试验值大 0.2 m, E、N 两点处计算值比试验值小, 其他测点吻合较好, 设计低水位条件下 M 点计算值比试验值小 0.29 m, 其他测点吻合较好。总体来说, 数值计算结果是相当理想的, 也表明了 BW 模型在计算近岸波浪传播过程中的可靠性。图 6 和图 7 给出了对港内泊稳影响较大的两个波向的波高分布, 可以看出 W、WNW 向波浪均能直接进入港池, 并直射在码头上, 对港内泊稳影响较大, 这与物理模型试验结果是一致的。结合码头的设计高程与港内波浪, 外侧护岸和防波堤堤头有轻微的上水现象, 但上水概率较低, 这与试验结果是一致的。

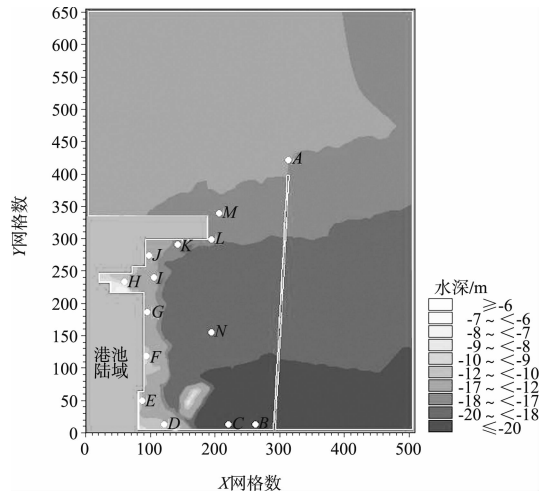


图 3 数值模型计算区域

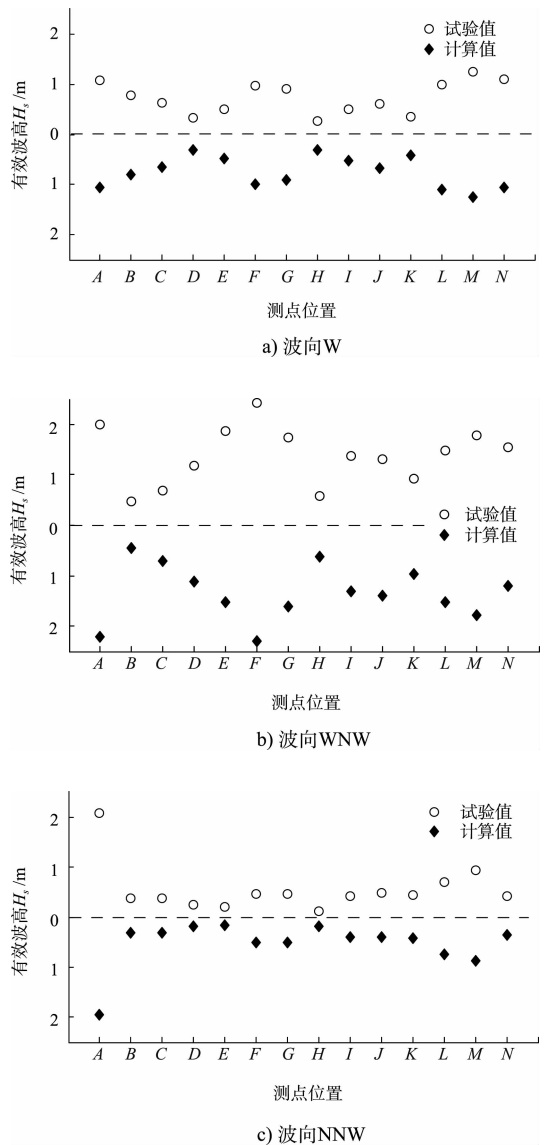


图 4 设计高水位时测点数值计算值与试验值对比

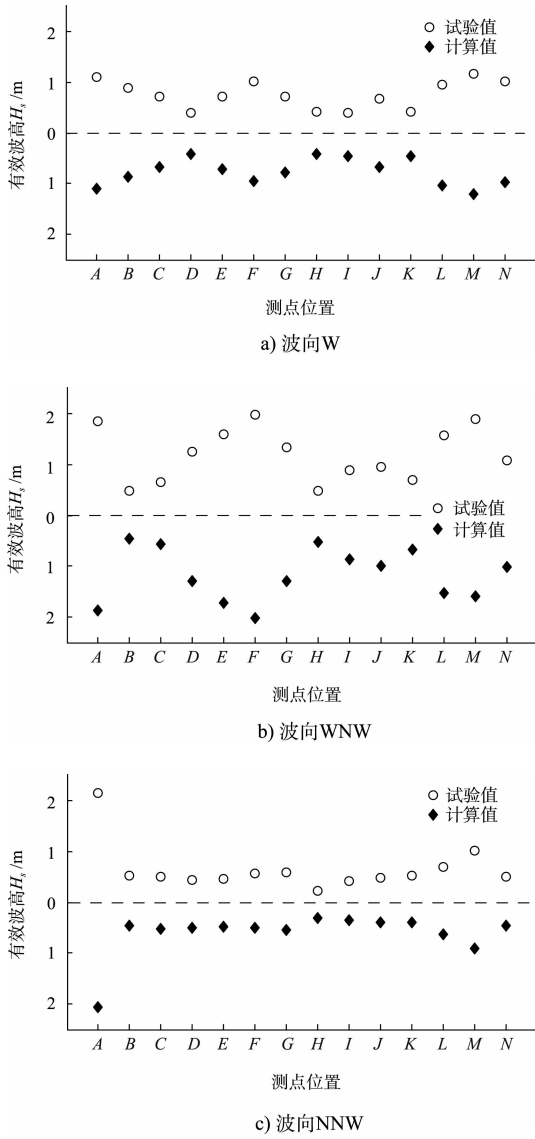


图 5 设计低水位时测点数值计算值与试验值对比

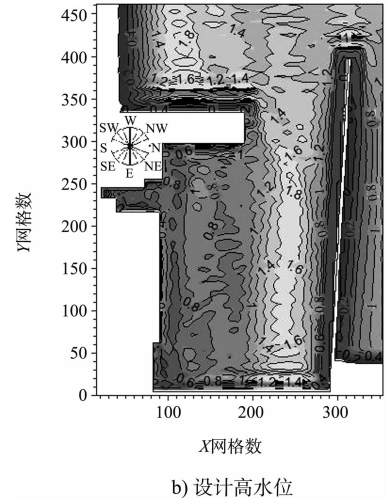
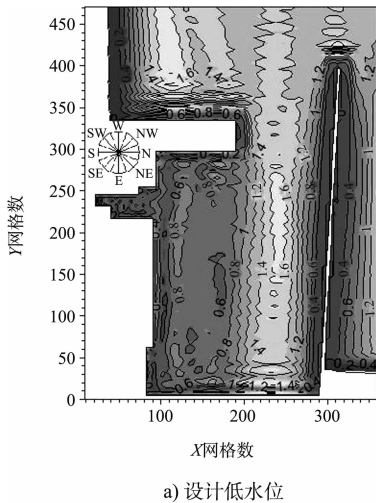


图 6 W 向波浪入射港池内部等比波高分布

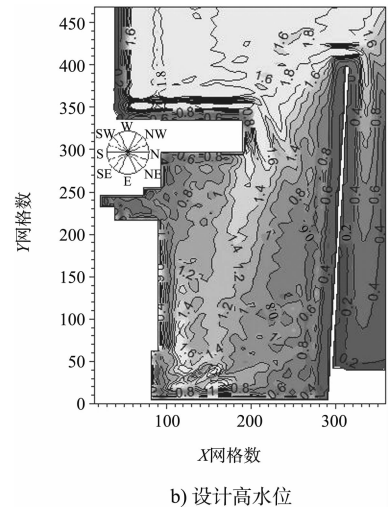
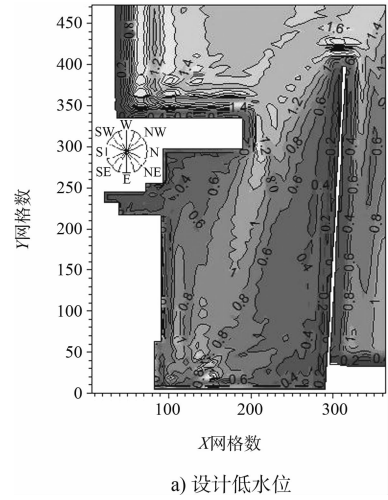


图 7 WNW 向波浪入射港池内部等比波高分布

4 结论

本文采用 MIKE21-BW 模块建立近岸波浪数学模型, 考虑与物理模型试验相同的因素, 对威海船厂港域单向不规则波传播变形进行数值模拟, 得到了与试验值相当吻合的结果, 同时表明 BW 模型在计算近岸波浪传播过程中的可靠性。

1) 试验证实, NNW 向波浪作用时, 港内各泊位处均满足泊稳要求; WNW 向波浪作用时, 泊位 D、F、G 和 E 处的泊稳状况不满足要求; W 向 2 a 一遇波浪作用时, 泊位 F、G 不满足泊稳要求。

2) 经验证, 数值计算的港池泊稳情况与试验情况一致, 各验证点对比结果较好。

3) 试验和数值计算都证实消浪后的港内泊稳情况优于消浪前, 因此对港内建筑物进行设计时, 采取必要的消浪措施或采用消能结构, 将大大改善港内的泊稳状况。

参考文献:

[1] Madsen P A, Murray R, Sørensen O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics [J]. Coastal Engineering, 1991, 15 (4): 371-388.

[2] Nwogu O. Alternative form of Boussinesq equations for

nearshore wave propagation[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1993, 119(6): 618-638.

[3] 张永刚, 李玉成. 一种新形式的 Boussinesq 方程[J]. 科学通报, 1997, 21: 021.

[4] 邹志利. 高阶 Boussinesq 水波方程的改进[J]. 中国科学: E 辑, 1999, 29(1): 87-96.

[5] 史宏达, 徐国栋, 孙龙龙. 矩形港池的港内共振研究[J]. 海岸工程, 2011, 30(2): 14-21.

[6] 吉星明, 冯春明, 董胜. 威海船厂港域波高数值计算[J]. 水运工程, 2012(9): 84-87.

[7] 马小舟, 刘嫫, 王岗, 等. 孤立波作用下细长港响应的数值研究[J]. 计算力学学报, 2013 (1): 101-105.

[8] 刘臣, 李少年, 马殿光. 琼州海峡海口汽车轮渡码头泊稳条件研究[J]. 中国水运, 2014, 14(1): 22-24.

[9] 海洋工程设计研究院综合试验研究中心. 山东省威海船厂整体搬迁扩建工程水工工程整体波浪物理模型试验报告[R]. 青岛: 海军工程设计研究院工程综合试验研究中心, 2006.

[10] Beji S, Nadaoka K. A formal derivation and numerical modelling of the improved Boussinesq equations for varying depth[J]. Ocean Engineering, 1996, 23(8): 691-704.

[11] Larsen J, Dancy H. Open boundaries in shortwave simulations-a new approach [J]. Coastal Engineering, 1983(7): 285-297.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

京杭运河苏南段全线升至Ⅲ级

日前, 京杭运河苏州段Ⅲ级航道整治工程通过交工验收, 这标志着京杭运河苏南段全线可通航千吨级船舶。

京杭运河苏南段约 212 km, 贯穿镇江、常州、无锡、苏州 4 市, 连接苏申内、外港线和长湖申线等省内干线航道。作为国家水运主通道和江苏省干线航道网的重要组成部分, 京杭运河苏南段Ⅲ级航道整治工程的建成通航, 不仅进一步提升了京杭运河的通行能力, 而且对支撑和促进区域经济社会发展具有深远意义, 将进一步提升长三角地区水运能力, 带动区域社会经济又好又快发展。

(摘编自《中国交通新闻网》)