

天津浮式 LNG 码头工程防波堤长度的防浪效果数值模拟研究*

A Numerical Simulated Study on Wave Protection Effects of Breakwater's Lengths of the Floating LNG Wharf Engineering in Tianjin

张义丰^{1,2}, 李孟国², 施 凌³

ZHANG Yi-feng^{1,2}, LI Meng-guo², SHI Ling³

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

(1. The State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing, Jiangsu, 210098, China; 2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T., Tianjin, 300456, China; 3. Water Transport Planning and Design Co., Ltd, China Communications Construction Company Limited, Beijing, 100007, China)

摘要:【目的】为了解规划建设在北防波堤对工程水域的波浪掩护情况。【方法】采用基于 Boussinesq 方程的波浪数学模型对不同长度防波堤的防浪效果进行模拟研究, 分别对重现期 50 年和 10 年一遇波浪进行计算。【结果】防波堤建设后, 影响港内波浪的主要为 E 向和 ESE 向。在设计高水位、50 年一遇波浪作用下, 北防波堤建设长度为 2972m 时, $H_{1\%}$ 波高最大值约为 4.17m; 10 年一遇波浪作用下, 北防波堤建设长度为 2165m 时, $H_{1\%}$ 最大值约为 4.19m。【结论】两个重现期波浪作用下, 防波堤分别需建设 2972m 和 2565m 以满足港内波浪掩护要求。

关键词: 防波堤 波浪 数学模型 Boussinesq 方程

中图分类号: U656.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2014)03-0152-04

Abstract:【Objective】To investigate the wave protection of the planning north breakwater, 【Methods】A numerical wave model basing on the Boussinesq equation is applied to simulate wave protection effects of different lengths of the breakwaters. Design high water level (DHW) and wave return periods(WRP) of 50a and 10a are used in the simulations. 【Results】It shows that under the computational condition of design high water level and wave return periods of 50a, the maximum $H_{1\%}$ is 4.17m when the breakwater is 2972m. The maximum $H_{1\%}$ is 4.19m when the breakwater is 2165m with the return period of 10a. 【Conclusion】Under the two different wave return periods, breakwater needs to be at least 2792m and 2565m to satisfy the requirement of wave protection in the harbor area.

Key words: breakwater, wave, numerical model, Boussinesq equation

收稿日期: 2014-05-31

修回日期: 2014-07-01

作者简介: 张义丰(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事物理海洋、近岸水动力学研究。

* 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(2013491611), 国家自然科学基金项目(41306034)资助。

【研究意义】由于港口建设发展迅速, 港区规模

也越来越大,使得港区建设不可避免地遇到分期实施过程中防波堤不同建设进度对港区掩护效果的问题,如潍坊港区、太平湾港区和天津港南疆港区等,通过波浪数值模拟研究,掌握不同长度防波堤的掩护效果,合理安排港区规划防波堤与港池内码头施工,具有重要的理论和实际意义。【前人研究进展】规划港区防波堤的建设对港内波浪的掩护作用至关重要,良好的波浪条件能提高码头泊位的结构物的安全及作业效率^[1,2]。天津浮式 LNG 项目位于天津港南疆港区东南部,是国家首次试点的引进了浮式 LNG 技术的清洁能源重点项目,天津港大沽沙航道以北,建设内容包括 FSRU 和 LNG 泊位各一座、工作船码头一座、海上火炬系统。目前,大沽口港区东防波堤已经形成,北防波堤还未建设,规划北防波堤总长度共为 2972m,分为两段,分别为 1365m 和 1607m(见图 1)。南疆陆域已基本形成。【本研究切入点】了解规划建设的北防波堤对工程水域的波浪掩护情况。【拟解决的关键问题】通过波浪数学模型,研究工程区域内波高分布情况,分析防波堤长度对浮式 LNG 码头工程的影响。

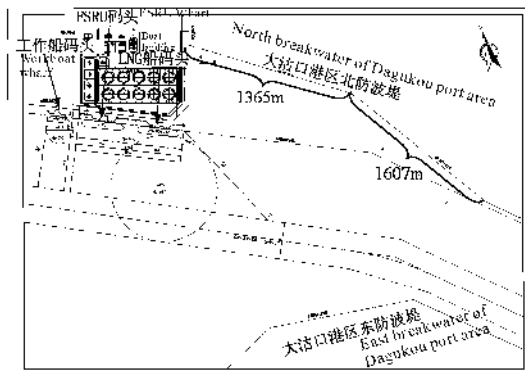


图 1 工程方案布置

Fig. 1 Layout of the engineering projects

1 波浪条件

本海区常浪向为 ENE 和 E, 频率分别为 9.68% 和 9.53%; 强浪向 ENE, 该向 $H_{4\%} \geq 1.5$ m 的波高频率为 1.35%。在波浪模型计算中采用 -7m 水深处各重现期波浪要素(见表 1)。

根据结构设计要求,港区波浪要素条件分别按重现期 10 年一遇及重现期 50 年一遇情况下 $H_{4\%}$ 波高小于 4.20m 进行控制,对北防波堤建设长度分别进行计算分析。

表 1 -7m 水深处波浪要素 ($H_{4\%}$ T_m)Table 1 $H_{4\%}$ and T_m at the water depth of -7m

波浪要素 Wave element	100		50		10		2	
	$H_{4\%}$ (m)	T_m (s)	$H_{4\%}$ (m)	T_m (s)	$H_{4\%}$ (m)	T_m (s)	$H_{4\%}$ (m)	T_m (s)
NE(ENE)	5.6	8.5	5.1	8.1	4.0	7.1	2.9	5.6
E(ESE)	5.1	7.9	4.8	7.6	4.1	6.6	3.0	5.4
SE(SSE)	4.1	6.1	3.8	5.8	3.0	5.2	1.8	4.3

2 波浪数学模型

现有的波浪理论方程^[3]主要包括非线性缓坡方程、Boussinesq 方程和 Navier - Stokes 方程等, Boussinesq 方程可用来解决波浪传播中的折射、绕射、反射和非线性作用等问题而被广泛应用在港内波浪模拟研究中,1872 年 Boussinesq^[4]通过假定水平速度在垂直方向上均匀分布,垂向速度呈线性分布,得到 Boussinesq 方程,本次数学模型基于 Mad-sen^[5]提出的改进的 Boussinesq 方程。

连续方程:

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

x 方向动量方程:

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P \cdot Q}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_x n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{h} \right] + gP \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{h^2 C^2} + n \Psi_1 = 0. \quad (2)$$

y 方向动量方程:

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P \cdot Q}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{h} \right] + gQ \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{h^2 C^2} + n \Psi_2 = 0. \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - \\ &nBgd^3 (S_{xxx} + S_{xyy}) - dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + \right. \\ &2nBgdS_{xx} + nBgdS_{yy}) - dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBgdS_{xy} \right), \\ \phi_2 &= - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - \\ &nBgd^3 (S_{yyy} + S_{xxy}) - dd_x \left(\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + \right. \end{aligned}$$

$$2nBg d S_{yy} + nBg d S_{xx}) - dd_x (\frac{1}{6} P_{yt} + nBg d S_{xy})。$$

其中： $P、Q$ 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； $\alpha、\beta$ 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。

3 试验结果及分析

3.1 重现期 50 年一遇波浪作用下结果

根据规划布置,在工程东侧水域布置特征点,分别为在 3 个系缆墩布置 3 个特征点,定义为 D-1~D-3 点; LNG 工作平台及靠船墩布置 3 个特征点,定义为 M-1~M-3 点,FSRU 工作平台及靠船墩布置 3 个特征点,定义为 M-4~M-6 点(见图 2)。

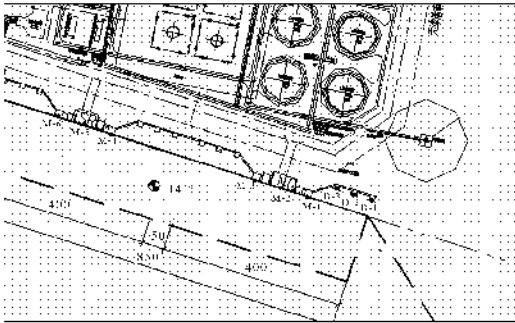


图 2 计算特征点布置

Fig. 2 Sample sites of the calculations

设计高水位、重现期 50 年一遇波浪作用下,各特征点 $H_{1\%}$ 波高值见表 2,比波高分布如图 3 所示。

E 向和 ESE 向波浪作用下,受防波堤、航道及港池挖深水域的影响,波能主要沿航道的迎浪侧进入港内,受航道的折射作用,航道的迎浪侧波能聚集,在东侧系缆墩位置出现波能集中的现象。SE 向波浪作用下,波向与外航道轴线夹角相对较小,波浪主要从航道及航道南侧进入港内,在工程区域波高

Table 2 $H_{1\%}$ at the sample sites (WRP-50a, DHW)

波向 Wave direction	2165m		2365m		2565m		2765m		2972m	
	E	ESE	E	ESE	E	ESE	E	ESE	E	ESE
D-1	5.01	5.49	4.91	5.11	4.31	4.81	4.15	4.36	4.00	4.17
D-2	4.21	5.06	3.58	4.61	2.60	4.10	2.09	3.37	1.80	3.04
D-3	3.42	4.51	2.49	3.74	1.92	3.20	1.28	2.38	0.92	1.98
M-1	3.08	3.95	2.08	2.85	1.48	1.90	1.17	1.41	0.87	1.11
M-2	3.08	3.55	2.02	2.38	1.35	1.66	1.05	1.29	0.80	1.05
M-3	3.08	3.32	1.90	2.14	1.29	1.60	1.05	1.23	0.80	1.11

相对小。

北防波堤建设长度为 2165m 时,D-1~D-3 号 3 个系缆墩的 $H_{1\%}$ 波高值均大于 4.20m;北防波堤建设长度为 2365m 时,D-1 和 D-2 号 2 个系缆墩的 $H_{1\%}$ 波高值大于 4.20m;北防波堤建设长度为 2765m 时,D-1 号系缆墩的 $H_{1\%}$ 波高值大于 4.20m;北防波堤建设长度为 2972m 时(规划长度), $H_{1\%}$ 波高值小于 4.20m,最大值约为 4.17m,出现在 D-1 号系缆墩位置附近。

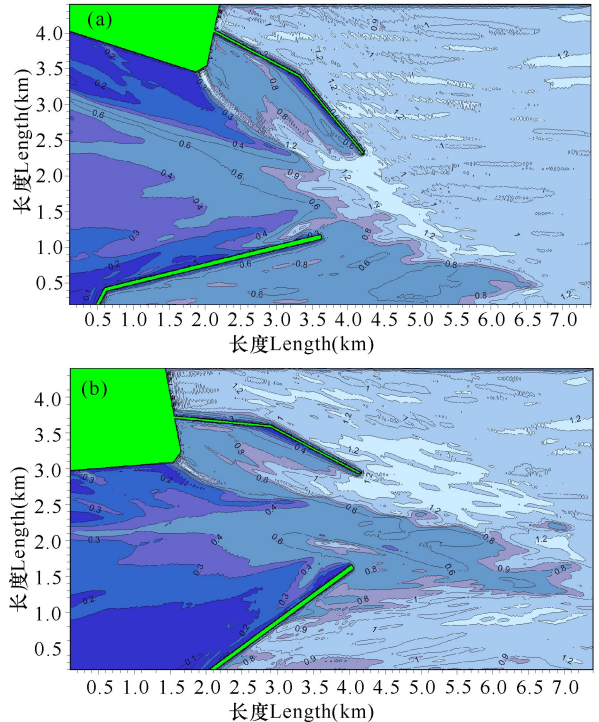


图 3 设计高水位、E(a)和 ESE(b)向波、50 年一遇比波高分布(北防波堤长度 2972m)

Fig. 3 Wave height contour (DHW, WRP-50a, wave direction is E(a) and ESE(b), the length of north breakwater is 2972m)

在设计高水位、50 年一遇波浪作用下,防波堤建设长度达到 2972m 时,可满足工程区域各特征点 $H_{1\%}$ 波高值小于 4.20m。

3.2 重现期 10 年一遇波浪作用下结果

设计高水位、重现期 10 年一遇波浪作用下,各特征点 $H_{1\%}$ 波高值见表 3,各向比波高分布如图 4 所示。

表 3 各特征点 $H_{1\%}$ 波高值(10 年一遇、设计高水位)

Table 3 $H_{1\%}$ at the sample sites (WRP-10a, DHW)

波向 Wave direction	2165m		2365m		2565m		2972m	
	E	ESE	E	ESE	E	ESE	E	ESE
D-1	4.32	4.70	4.14	4.40	3.97	4.19	3.43	3.88
D-2	3.48	4.23	3.16	3.75	2.22	3.34	1.54	2.55
D-3	2.93	3.84	2.17	3.39	1.78	2.83	0.88	1.78
M-1	2.67	3.46	1.92	2.62	1.30	1.81	0.84	1.10
M-2	2.62	3.22	1.92	2.37	1.25	1.66	0.79	0.99
M-3	2.62	3.02	1.87	2.22	1.20	1.56	0.79	0.99

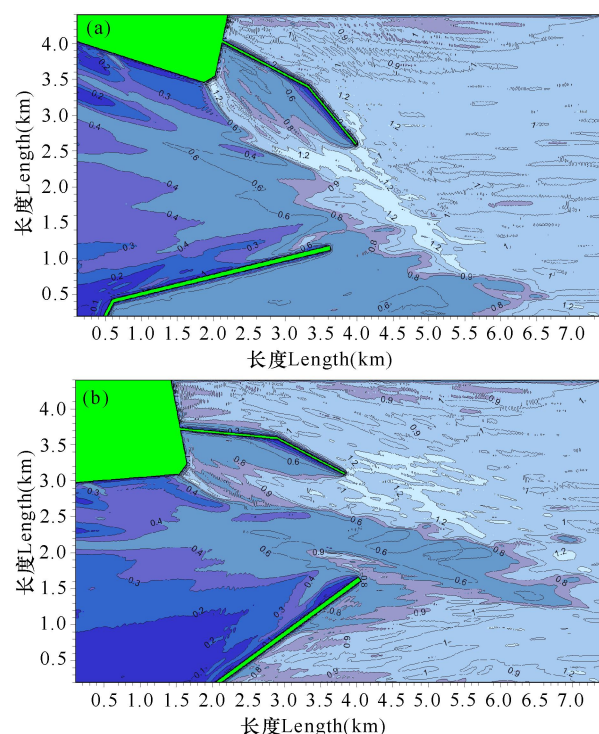


图 4 设计高水位、E(a)和 ESE(b)向、10 年一遇比波高分布(北防波堤长度 2565m)

Fig. 4 wave height contour (DHW, WRP-10a, wave direction is E(a) and ESE(b), the length of north breakwater is 2565m)

北防波堤建设长度为 2165m 时, D-1 和 D-2 号

2 个系缆墩的 $H_{1\%}$ 波高值均大于 4.20m; 北防波堤建设长度为 2365m 时, D-1 号系缆墩的 $H_{1\%}$ 波高值大于 4.20m; 北防波堤建设长度为 2565m 时, $H_{1\%}$ 波高值小于 4.20m, 最大值约为 4.19m, 出现在 D-1 号系缆墩位置附近; 防波堤建设长度为 2972m 时(规划长度), 最大 $H_{1\%}$ 波高值约为 3.88m。

在设计高水位、10 年一遇波浪作用下, 防波堤建设长度达到约 2565m 时, 可满足工程区域各特征点 $H_{1\%}$ 波高值小于 4.20m。

4 结论

(1) 影响港内波浪的主要为 E 向和 ESE 向。在设计高水位 50 年一遇波浪作用下, 北防波堤建设长度达到 2972m(规划长度)时, 各特征点最大 $H_{1\%}$ 波高值约为 4.17m, 可满足工程区域各特征点 $H_{1\%}$ 波高值小于 4.20m。

(2) 在设计高水位 10 年一遇波浪作用下, 北防波堤建设长度达到约 2565m 时, 可满足工程区域各特征点 $H_{1\%}$ 波高值小于 4.20m; 北防波堤建设长度达到 2972m(规划长度)时, 各特征点最大 $H_{1\%}$ 波高值约为 3.88m。

参考文献:

- [1] 董承赞, 王克勤. 天津临港工业港区防波堤及口门布置研究[J]. 港工技术, 2010, 47(6): 14-17.
Dong C Z, Wang K Q. Study of layout for breakwater & entrance of Tianjin Lingang industrial harbor area [J]. Port Engineering Technology, 2010, 47(6): 14-17.
- [2] 祝世华. 海港防波堤口门宽度的探讨[J]. 中国港湾建设, 2003, 126(5): 15-17.
Zhu S H. Discussion on breadth of entrance between breakwaters for a sea port [J]. China Harbour Engineering, 2003, 126(5): 15-17.
- [3] Debnath L. Some nonlinear evolution equations in water waves [J]. Journal of Mathematical Analysis and Application, 2000, 251: 488-503.
- [4] Boussinesq J. Theory of wave and swells propagated in long horizontal rectangular canal and imparting to the liquid contained in this canal [J]. Journal de Mathematiques Pures et Appliquees, 1872, 17(2): 55-108.
- [5] Madsen P A, Sorensen O R. A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2, A slowly-varying bathymetry [J]. Coastal Engineering, 1992, 18: 183-204.

(责任编辑: 陆 雁)