



大连大窑湾港湾振荡数值模拟研究

邓 蔷, 张宁川

(大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 采用 Boussinesq 数值波浪模型, 模拟得到大窑湾不同水域的固有频率。模拟了不规则波入射时全湾水面响应状况, 结果表明: 谱峰周期较小的不规则波入射大窑湾港内, 经过一定长的时间, 波能会在局部地区发生高频到低频的传递, 从而诱发局部低频波动。外海波浪入射不会导致全湾水域整体振荡, 但湾底及南岸小港池易发生局部水体振荡。采用减小边界反射系数的措施, 可有效降低局部水域的波动幅度。

关键词: 大窑湾; Boussinesq 波浪模型; 固有频率; 港湾振荡; 不规则波

中图分类号: O 353.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0025-07

Numerical simulation on harbor resonance in Dayaowan harbor of Dalian

DENG Qiang, ZHANG Ning-chuan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The natural frequencies of different areas in Dayaowan harbor are obtained by the Boussinesq numerical wave model. Simulating the surface responses of the whole water to incident irregular waves, we get the results that a small spectrum peak period of irregular wave can induce local low frequency fluctuations after a certain time by wave energy transfers from high frequency to the lower in the local areas of Dayaowan harbor. The incident of the waves can only stimulate the local water resonances such as in the bottom of the harbor and in the small harbor in the south bank, but not in the whole harbor. It is effective to reduce fluctuations in local waters with the measure for decreasing the reflection coefficient of the borders.

Keywords: Dayaowan; Boussinesq wave model; natural frequency; harbor resonance; irregular wave

大窑湾港区是大连港集装箱泊位核心港区, 水域规划方案见图 1。整个大窑湾水域呈窄长型, 特别是湾底水域更窄, 港内水域仅有南北航道口与外海联通, 已建泊位多为沉箱式(反射)边界。当波浪自外海经口门传入大窑湾时, 由于受水下地形和湾内岸线形态等影响, 会发生折射和(多次)反射, 入射波浪能量耗散困难。上述因素均为港湾水波振荡的诱发因素。大窑湾港区是否会发生水波振荡、发生的条件及强度如何等问题, 是全湾规划方案制定过程中重点关注的问题。本文针对此问题, 采用数值模拟的方法进行研究。

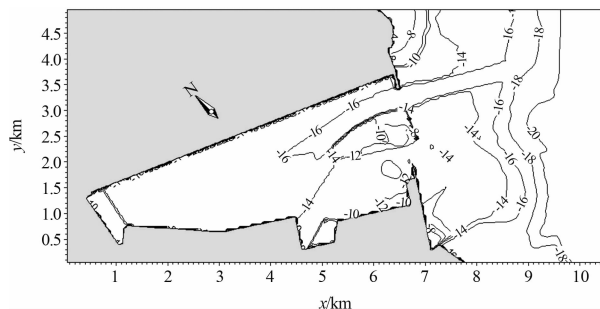


图 1 大窑湾港区水域布置及水深分布(单位: m)

港湾振荡的研究由来已久, 早在 19 世纪 30 年代, Merian^[1]就建立了著名的梅立恩公式来计算平面几何形状规则和水深变化简单的海湾固有周期。

收稿日期: 2014-04-20

作者简介: 邓蔷(1989—), 女, 硕士研究生, 从事水动力学及港口平面布置优化研究。

然而，对于几何形状和水深均复杂多变的实际港湾，很难精确得到振荡问题的解析解，目前，多采用不同的数值方法来计算港池的响应特性。文献[2-6]数值研究了固定水深，文献[7-8]数值研究了非固定水深的港湾振荡问题，文献[9]模拟了在N型波浪作用下港内水体的响应问题，均获得了有意义的结果。总体而言，实际港湾振荡问题可归结为任意地形、边界条件下的自由水面波动问题。近年来，改进的 Boussinesq 方程由于其包含了新的 Boussinesq 校正项并改进了弥散关系而被广泛应用于近岸波浪动力学研究，该模型可考虑波-波间相互作用，对不规则波传播过程中高低频能量传递有较为清晰的描述，故本文采用 Boussinesq 方程数值波浪模型对于大窑湾港区水波振荡问题进行探讨。

1 数值模型

1.1 控制方程

改进的 Boussinesq 方程描述如下：

$$nS_t + P_x + Q_y = 0 \tag{1}$$

$$nP_t + (P^2/h)_x + (PQ/h)_y + (R_{xx})_x + (R_{yy})_y + F_x n^2 ghS_x + n^2 P(\alpha + \beta \sqrt{P^2 + Q^2}/h) + gP \sqrt{P^2 + Q^2}/(h^2 C^2) + m\psi_1 = 0 \tag{2}$$

$$nQ_t + (Q^2/h)_y + (PQ/h)_x + (R_{yy})_y + (R_{xx})_x + F_y n^2 ghS_y + n^2 Q(\alpha + \beta \sqrt{P^2 + Q^2}/h) + gP \sqrt{P^2 + Q^2}/(h^2 C^2) + m\psi_2 = 0 \tag{3}$$

式中： ψ_1 和 ψ_2 为 Boussinesq 色散项； n 为孔隙率； S 为波面高度； P 、 Q 分别为 x 及 y 方向的流密度； R_{xx} 、 R_{yy} 和 R_{xy} 分别为非均匀速度所引起的剩余动量； F_x 、 F_y 分别为 x 及 y 方向的水平力； h 为总水深 ($h = d + S$)， d 为静水深； C 为谢才系数； α 、 β 分别为孔隙介质中的层流及紊流阻力系数； g 为重力加速度； B 为深水色散关系修正系数，可取 $B = 1/15$ 。

1.2 数值求解方法

对方程(1) ~ (3)采用文献[10]引入的基于 SYSTEM21 结构的数值方法求解，该算法是非迭代的交替方向隐式法，空间上采用矩形交替网格

离散，时间上采用隐式格式积分。其中水面高程等由网格节点来定义，而流量分量则用相应方向的网格线的中点来定义，对流项以外的空间导数有限差分近似值采用中心格式。将 Boussinesq 项及修正项中的参数尽量纳入方程，不能纳入方程的参数采用文献[11-12]提出的估算方法得到。

1.3 边界条件和网格划分

大窑湾港内水域长约 6 300 m，规划后湾口宽约 2 000 m，湾底宽约 1 000 m，北航道宽度为 320 m，口门部分拓宽至 400 m，航道水深为 -17 m；南航道宽度为 240 m，航道水深为 -15 m；岛堤长度为 640 m。模拟计算时，口门处疏式防波堤按反射系数 $R = 0.8$ 考虑，接岸斜坡堤和天然岸边界的反射系数取 $R = 0.5$ ，港内固壁边界均设定为全反射边界。造波边界设置在 -20 m 等深线处，采用域内造波，两侧开边界均布置 50 个网格宽度的海绵层以吸收反射和辐射的波浪。网格尺寸 $\Delta x = \Delta y = 10$ m，时间步长 $\Delta t = 0.5$ s，模拟时间共 8 192 s，时间步数取为 $2^{14} = 16\ 384$ 步。

2 港湾水波振荡的模拟结果及分析

2.1 白噪声输入后大窑湾港池水域的波动响应特征

白噪声可作为估算港湾的固有振荡周期的一种有效可靠的方法^[13]。其表达式为：

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n a \cos(\omega_i t + \varphi_i) \tag{4}$$

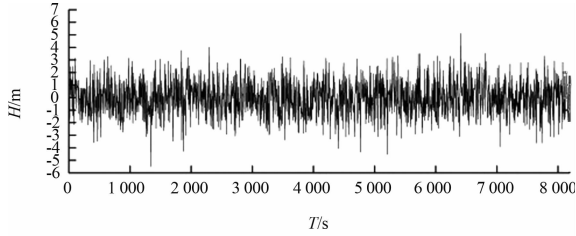
式中： $\eta(t)$ 为白噪声波动过程中波面高程； a 为振幅； t 为时间； φ_i 为第 i 个组成波的初相位，此处为在 $(0, 2\pi)$ 范围内的均布随机数。

为考察不同频率波浪入射时大窑湾港池水域的波动响应特征，在此以白噪声作为港外波浪边界输入。模拟时间长度 8 192 s，计算得到不同位置处的响应波面。对其进行频谱分析和小波分析，可得到不同位置的响应波幅谱和小波谱，前者展示了不同水域波浪响应频率特征，后者则给出了不同位置能量的时频变化情况。

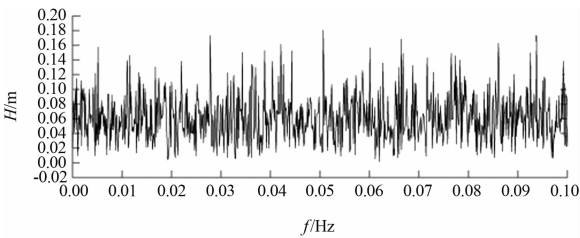
计算参数选择为：白噪声频率带宽为 $f = 0.002 \sim 0.1$ Hz；组成波个数 $n = 100$ ，各个组成波

等振幅 $a = 0.2 \text{ m}$; 圆频率间距 $\Delta\omega = (0.2\pi \sim 0.004\pi)/n$;

白噪声的整个波面过程及波幅谱曲线见图 2。



a) 白噪声波面过程



b) 白噪声频谱图

图 2 模拟输出的白噪声波面过程和波幅谱

在计算的港池水域内不同位置设置 35 个代表点 (图 3)。

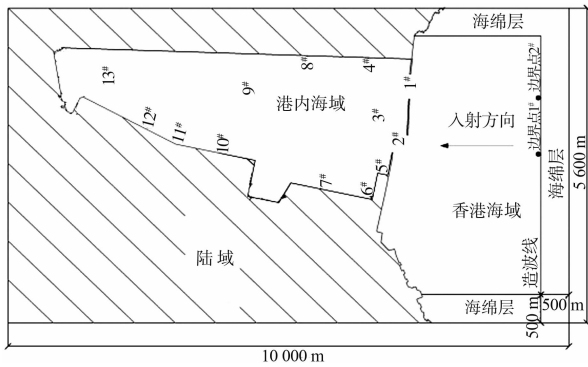
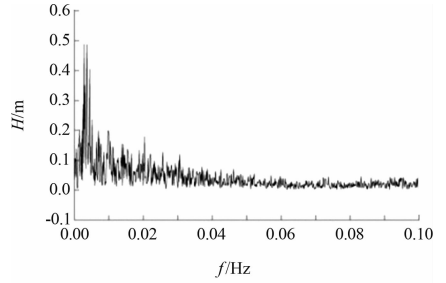
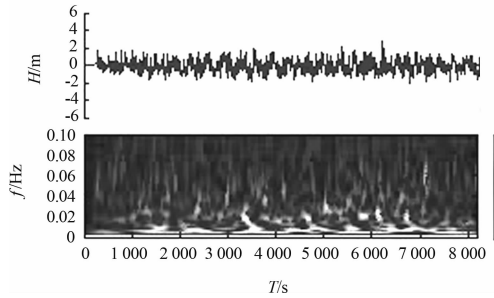


图 3 模型边界设置及测点分布

图 4 给出了白噪声入射时大窑湾内水域不同位置代表点处波面过程 (响应波面) 及其相应的小波谱和波幅谱。



a) 南岸一期小港池处3-3#

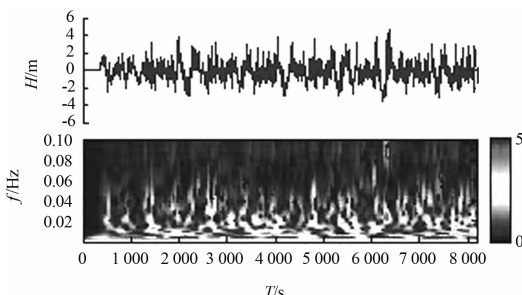


b) 北岸30#泊位附近水域8#点

图 4 大窑湾港内代表点的波面过程及其对应的小波谱 (上) 和波幅谱 (下)

由图 4 可见, 白噪声波浪传播进入港池后, 波浪能量出现能量向低频传递的现象, 波幅谱和小波谱均反映出低频能量明显大于高频能量。该现象表明白噪声可在大窑湾水域诱发长周期波。南岸一期小港池水域的波幅谱在 0.002 ~ 0.01 Hz 频率区间呈现显著峰值, 北岸长岸线附近水域波浪能量集中现象不显著, 表明湾内不同水域低频能量比例并不相同。

综上所述可以认为, 白噪声波浪进入港池后, 港内经过一定时间的波浪能量积累, 长波能量逐渐增大。换言之, 以白噪声形式入射的波浪能量在港内出现了不同频域内的能量传递过程, 且大部分由高频传递到低频, 这正是港池发生振荡的原始诱因。需要注意到, 不同水域低频能量比例并



不相同,意味着相同入射波浪引起不同水域的水面振荡将有所差别。

2.2 港湾自振频率的估计

当入射波频率或其诱发的长波频率恰与港湾水域系统固有的振动频率相一致或接近时,就会产生水波振荡现象,即“共振”。因此,港湾自振频率的估计是分析港湾振荡的重要依据。理论上,某一点的水面波动放大因子可定义为该点的最大波幅 A_{max} 与入射波波幅 A_0 的比值^[14] (足够长的时段内)。上节通过白噪声入射,获得了大窑湾不同水域的响应波幅谱。在此,通过不同单色波入射获得对应频率的水面波动放大因子,再将两者比较估计得到大窑湾不同水域的自振频率。

造波边界采用波高 $H = 1\text{ m}$ 的规则波(单色波)入射,模拟了 $0.002 \sim 0.1\text{ Hz}$ 频域范围内、55个不同频率的规则波入射时的港内波况,由此得到不同位置代表点、不同频率对应的放大因子,将其平滑连接成线,即为该代表点所处水域的理论放大因子曲线。

图5分别给出了湾底南侧拐角水域、湾底北侧水域、南岸一期小港池水域及港湾中心水域的白噪声响应波幅谱(实线)和理论放大因子曲线(虚线)的比较示例。

图5可见,各代表点的白噪声响应波幅谱与该位置处的理论放大因子曲线变化趋势一致性良好。各处理论放大因子曲线上的峰值对应的频率和响应波幅谱的峰值对应的响应频率吻合良好(表1),故可认定该频率为当地水域固有频率。其中,最大峰值对应第1振荡模态,次峰值、3次峰值对应第2、3振荡模态。

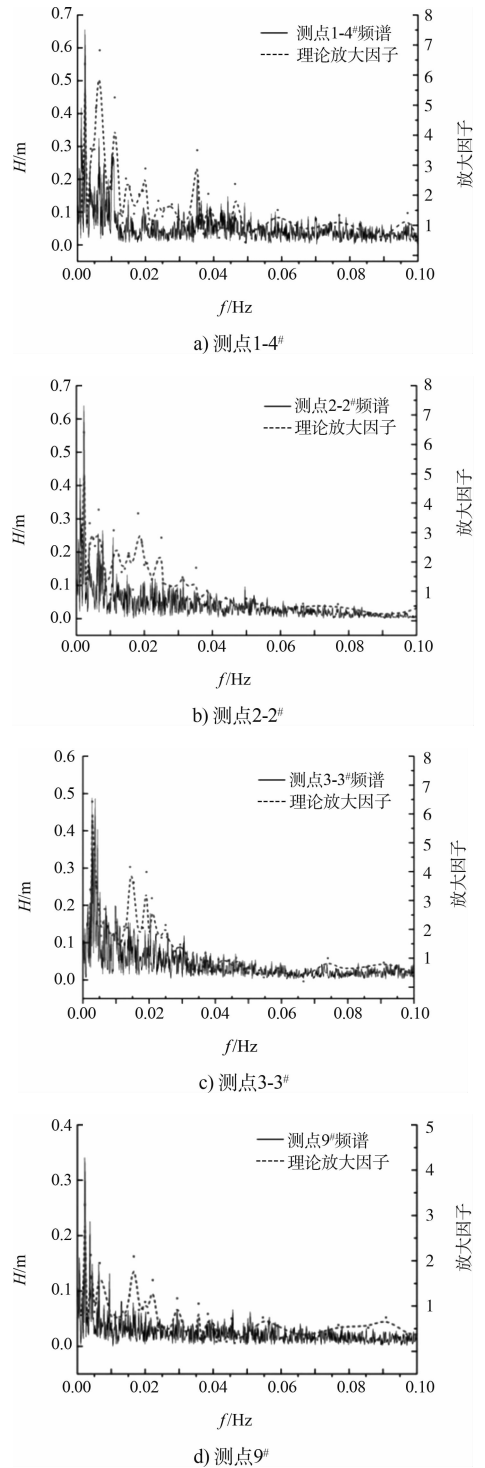


图5 大窑湾港内各代表点波幅谱曲线与该点理论放大因子

表1 不同水域响应频率和振荡模态对应频率

位置	模态	Hz						
		$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=11$	$N=12$	$N=13$
湾底南侧	响应频率	0.002 2	0.006 4	0.010 5		0.076 8	0.097 5	
	固有频率	0.002 2	0.006 6	0.011 0		0.077 0	0.097 2	
湾底北侧	响应频率	0.002 2	0.003 7	0.006 5		0.051 8		
	固有频率	0.002 2	0.003 9	0.006 5		0.052 0		
南岸小港池	响应频率	0.002 8	0.007 2	0.009 9		0.046 2	0.074 0	0.091 5
	固有频率	0.002 8	0.006 8	0.009 9		0.046 7	0.073 8	0.091 0

2.3 不规则波入射的港湾波动及分析

入射边界模拟不规则波, 波谱采用 J 谱。计算参数选择为: 有效波高 $H_s = 1 \text{ m}$, 谱峰周期 T_p 分别为 8 s 和 12 s (谱峰频率 f_p 为 0.125 Hz 和 0.083 3 Hz) 的不规则波, 模拟时间为 8 192 s。

图 6 和 7 分别给出了入射波谱峰周期为 8 s 和 12 s 的不规则波作用下, 大窑湾湾内水域不同位置的响应波幅谱与入射谱的比较。

图 6 和 7 显示, 由于防波堤的掩护, 湾内水域波浪波幅谱显著小于湾外的入射谱。当谱峰周期分别为 $T_p = 8 \text{ s}$ 和 12 s 的不规则波入射时, 湾底水域波浪能量均有不同程度的由高频向低频转移

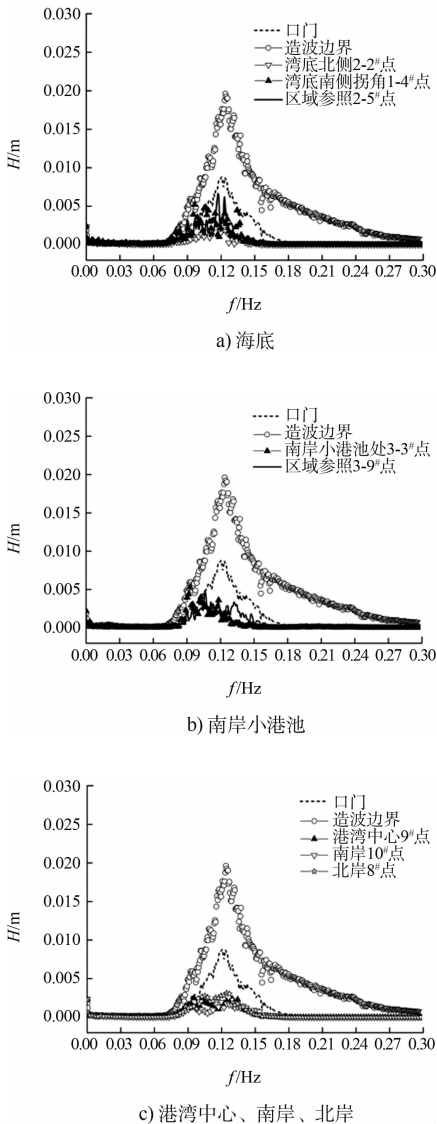


图 6 谱峰周期 $T_p = 8 \text{ s}$ 入射波作用下大窑湾港区不同位置代表点的波幅谱比较

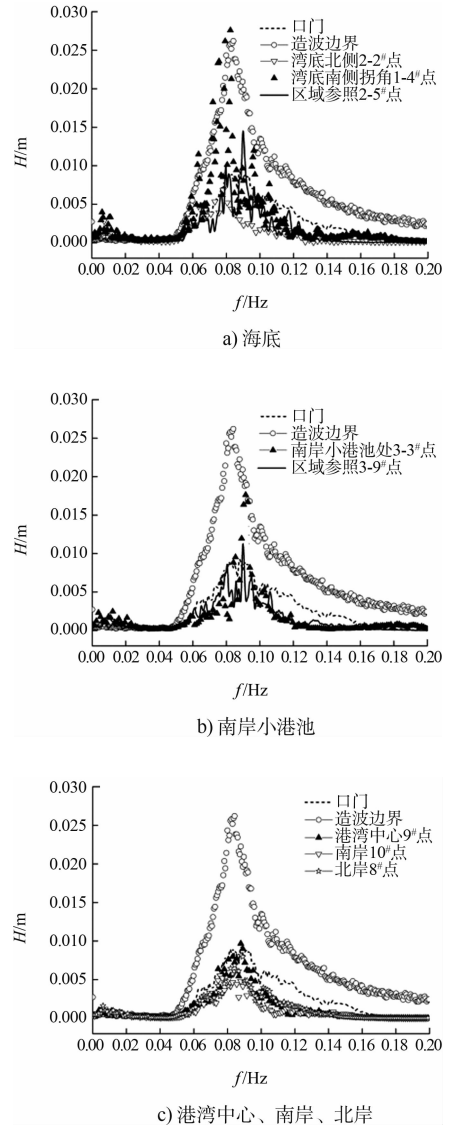


图 7 谱峰周期 $T_p = 12 \text{ s}$ 入射波作用下大窑湾港区不同位置代表点的波幅谱比较

现象发生。随着入射谱峰周期的增大, 湾底水域的波浪能量由高频向低频转移的比例也随之增大。就整个大窑湾水域而言, 不同水域的波浪能量由高频向低频转移的程度有显著不同: 发生该现象的最显著区在湾底, 南岸一期小港池水域次之, 其它水域不明显。

由图 7 可知, 在谱峰周期 $T_p = 12 \text{ s}$ 的不规则波作用下, 湾底南侧和南岸小港池水域波浪能量均集中分布在各自水域的固有频率 (表 1 中湾底南侧水域第 11 振荡模态固有频率 $f_{011} = 0.077 \text{ Hz}$ 和南岸小港池水域第 13 振荡模态固有频率 $f_{013} = 0.091 \text{ Hz}$) 附近, 并且显著增大。因此, 该入射

波作用下上述水域存在发生水波振荡的趋势或已经发生振荡。

图8给出了不规则波入射(谱峰周期 $T_p = 12$ s、有效波高 $H_s = 1$ m)时,大窑湾全湾水域及湾底和南岸小港池水域的有效波高分布状况。

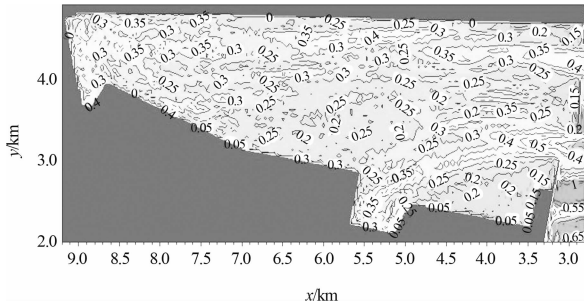


图8 大窑湾全域有效波高分布(单位:m)

由图8可见,湾底水域局部地区有效波高偏大,即波能由高频向低频转移的比例较大。

图9给出了对应谱峰周期 $T_p = 12$ s的湾底水域的代表点的波面响应及小波谱。

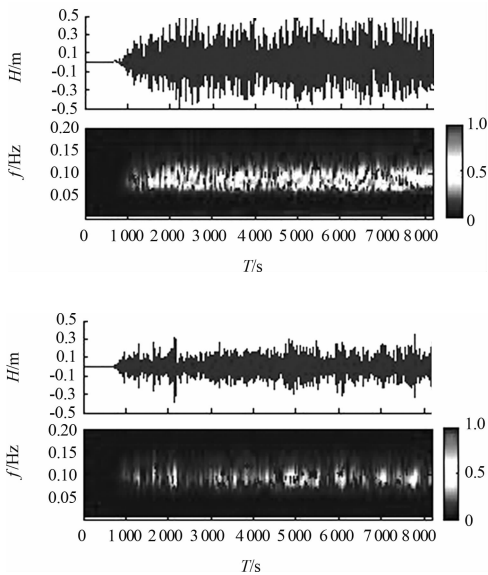


图9 湾底水域及参照点2-5#的波面过程及其对应的小波谱

由图9中的波面过程可见,湾底水域的水面波动远远大于与该水域相邻很近的参照点2-5#的水面波动;由图9的小波谱可见,湾底水域、尤其是湾底南侧拐角处低频能量急剧增大,集中分布在 $f = 0.07 \sim 0.08$ Hz范围(与表1所示的与该水域的第11个振荡模态 $f_{07} = 0.077$ Hz相对应)。这一结果与图7显示的结果是一致的,表明谱峰

周期 $T_p = 12$ s的不规则入射时,该水域诱发的低频长波能量导致水面波动加大,即湾底水域发生了局部水域的港湾振荡。

3 减小港内振荡的措施及效果

谱峰周期 $T_p = 12$ s(谱峰频率 $f_p = 0.083$ Hz)、有效波高 $H_s = 1$ m的不规则波入射大窑湾时,湾底水域和南岸一期小港池水域发生港湾振荡现象。采用设置消能边界的方法,模拟探讨减小波面振荡的效果。

消能边界设置为:将南岸一期小港池水域的西侧边界、湾底及南侧拐角处的小部分边界增设孔隙层,使之边界反射系数降至0.7。

图10给出了改变局部边界反射系数后港内有效波高分布状况计算结果。

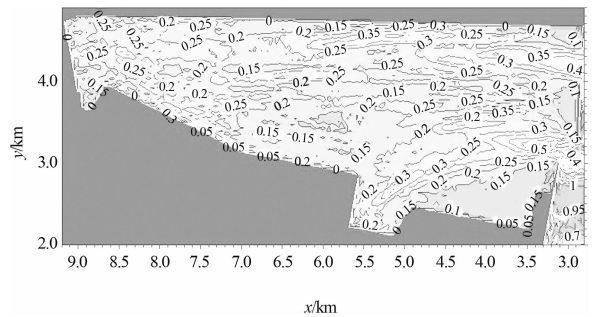
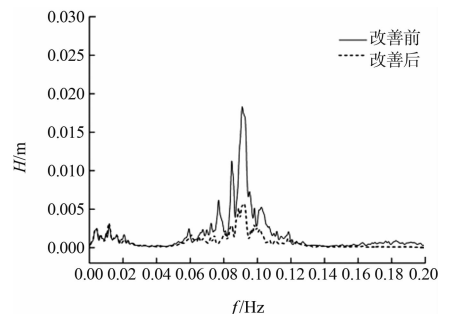


图10 减小部分边界反射系数后大窑湾全域有效波高分布(单位:m)

对比图8和图10可知,全湾水域有效波高均明显减少,其中南岸一期小港池处和湾底水域的有效波高显著减小,即通过减小波浪局部边界反射,可有效地降低相关水域的波面振幅。

图11依次给出了改善方案前、后代表点处的频谱比较。



a) 南岸一期小港池代表点3-3#

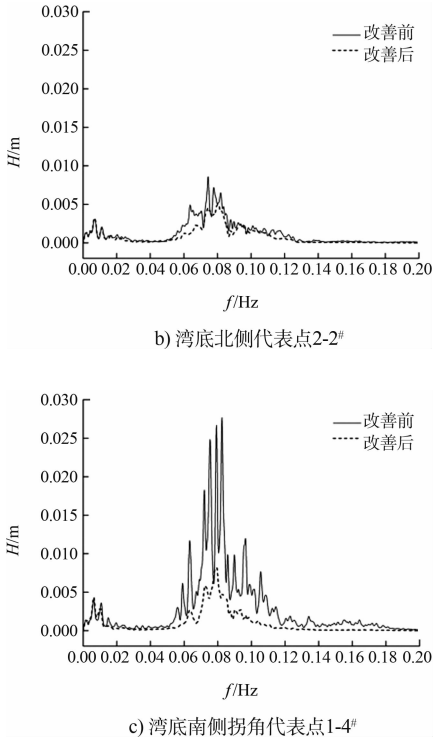


图 11 改变边界反射系数前、后港内代表点处
波幅谱计算结果的比较

参照图 8 与图 10, 并综合图 11 可知, 南岸一期小港池处和湾底水域的有效波高均明显减小, 即通过减小局部边界波浪反射, 可有效地降低相关水域的波面振幅。

4 结论

1) 谱峰周期较小的不规则波入射大窑湾港池, 经过一定长的时间, 波浪能量会在某频段之间发生传递, 多数为高频到低频, 局部地区(南岸一期小港池处水域和湾底水域)发生明显能量输移, 从而诱发低频波动。

2) 大窑湾全湾水域的低级振荡模态频率极低, 全水域发生整体振荡的可能性不大。但湾底、南岸小港池等局部水域的中、高级振荡模态频率可接近或易达到该水域外界波浪入射诱发的低频波动频率, 故上述局部水域存在发生水波振荡的可能性。

3) 在易发生水面振荡的局部边界采用减小边界反射系数的措施, 可有效减低当地水域的水面波动幅度。

参考文献:

- [1] Merian J R. Über die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefassen[M]. Basel: Abhandlung von Dr. J. Rud. Merian, 1828: 53.
- [2] Lee J J. Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary shape[R]. California: California Institute of Technology, 1969.
- [3] Lee J J. Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry[J]. Journal of fluid mechanics, 1971, 45(2): 375-394.
- [4] Hwang L S, Tuck E O. On the oscillations of harbours of arbitrary shape [J]. Journal of fluid mechanics, 1970, 42(3): 447-464.
- [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] 马小舟, 刘斌, 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, 30(1): 101-105.
- [7] Aida I. Long-period waves in the vicinity of Onagawa Bay (II)[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1974, 30(1): 34-41.
- [8] 王钟, 龙宝森. 半封闭海湾固有振动周期的数值计算[J]. 海岸工程, 1998, 17(4): 1-4.
- [9] 孙忠顺, 马小舟, 王岗. N 型波浪激发港口振荡的数值研究[J]. 中国水运, 2013, 13(7): 63-66.
- [10] Abbott M B, Damsgaard A, Rodenhuis G S. System 21, Jupiter, a design system for two-dimensional nearly-horizontal flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 1973, 11(1): 1-28.
- [11] Abbott M B, Petersen H M, Skovgaard O. On the numerical modelling of short waves in shallow water[J]. Journal of Hydraulic Research, 1978, 16(3): 173-204.
- [12] 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.
- [13] Thomas G, Mogens H, Jens K. Wave disturbance modelling in the port of Sines, Portugal-with special emphasis on long period oscillations[C]. Singapore: DHI Water & Environment, Marine Technology Division: Proceedings of the International Conference on Port and Maritime R&D and Technology, 2001: 29-31.
- [14] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.