

文章编号:1005-9865(2017)01-0105-07

不同因素对人工岛波浪绕射影响研究

于定勇¹, 李 龙²

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 三亚海航基础投资有限公司, 海南 三亚 572000)

摘 要:为研究人工岛尺度变化和波浪方向分布对人工岛绕射波浪的影响,基于 MIKE21-BW 模型应用数值方法模拟人工岛波浪绕射过程。数值结果与 Briggs 等的物理试验结果的对比表明两者吻合较好,验证了模型的适用性。在规则波条件时,圆形人工岛绕射波浪的数值结果与线性波浪绕射理论解基本一致;采用该模型分别模拟了 6 种尺度的圆形人工岛、单向不规则波和 9 种方向分布 $\theta_{\max}$ 、4 种谱峰周期条件时绕射波浪分布情况。分析结果表明,圆形人工岛绕射系数随着尺度的增加,掩护区绕射系数随之减小; $\theta_{\max}$ 在 $10^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,随着 $\theta_{\max}$ 的增大,绕射系数随之增大, $\theta_{\max}$ 在 $45^\circ \sim 75^\circ$ 内绕射系数变化较小;随着谱峰周期的增加,绕射系数随之增大。研究成果既为相关规范的完善提供了基础,也为相关工程设计提供了参考。

关键词: MIKE21-BW; 人工岛; 绕射系数; 尺度; 波浪要素

中图法分类号: TV139.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2017.01.012

Study on wave diffraction of artificial island with different elements

YU Dingyong¹, LI Long²

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100. China; 2. Sanya HNA Infrastructure Investment Co. Ltd., Sanya 572000, China)

Abstract: In order to study the effects of scales and wave directional spectrum on wave diffraction of artificial island, based on MIKE21-BW model, this paper numerically calculates the influence of different scales and wave directional spectrum on wave diffraction coefficients of artificial island. In simulating, conditions of the incident wave are supposed the same as Briggs' physical experiment. The values of diffraction coefficients obtained by simulation agree well with experimental data. The comparison results can verify the applicability of BW model for this study. The values obtained by simulation with 5 cases of scales of the artificial cylinder island differ quite little from the theoretical results. This paper simulates 6 cases of different structure scales, i.e. $\pi D/L = \pi, 2\pi, 3\pi, 4\pi, 5\pi, 6\pi$, respectively, and numerically studies wave diffraction under unidirectional wave, nine maximum wave distributional angles and seven spectral peak periods of different directional waves. The following results are obtained from the simulation: Diffraction coefficients become smaller with the increase of scales of the artificial cylinder island in the protected area. Within the range of $10^\circ \sim 45^\circ$ of maximum distributional angles, diffraction coefficients become bigger with increasing the maximum distributional angles. Within the range of $45^\circ \sim 75^\circ$, diffraction coefficients have a small variation. Diffraction coefficients become bigger with the increase of seven spectral peak periods. The research results obtained in this paper not only provide the basis for the related standard, but also could be used for reference of engineering application.

Keywords: MIKE21-BW; artificial island; diffraction coefficient; scales; wave elements

围填海工程是我国海洋开发活动的重要用海方式,其中离岸人工岛工程成为利用海洋空间资源的一种有效、经济且环保的方式^[1-2]。如,位于厦门湾的“双鱼岛”^[3];大连金州湾国际机场人工岛项目^[4];龙口市人工岛群^[5]等。

收稿日期:2016-06-02

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2013EEZ002)

作者简介:于定勇(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事港口、海岸工程及其与海洋环境的相互作用研究。E-mail: dyu01@126.com

波浪是人工岛受到的主要水动力之一,因人工岛周围海域受波浪的折射、反射和绕射等作用,人工岛设计波高的确定尤为重要。波浪绕射问题的研究对确定岛体码头的泊稳条件、岛体护岸结构设计、挡浪墙高度及岛周围海底泥沙的局部冲淤都有着重要的意义。对于波浪近岸传播过程已有多种模型,如基于缓坡方程^[6]、能量平衡方程^[7]和 Boussinesq 方程^[8]的数值模型等。

诸多学者对人工岛周围波浪分布及变化特征做了研究。谢世楞^[9-10]根据研究结果指出人工岛周围的波高分布与其护岸结构型式有较大关系,给出了岛体正面绕射系数可达到 1.8~2.2,在岛体背面绕射系数约为 0.6~0.8。并给出了在规则波和不规则波作用下岛体尺度与波长比值 $B/L = 0.5$ 的人工岛的断面绕射系数的分布规律。蔡艳君等^[11]提出了一种人工岛的不规则波绕射系数求解方法。陈新^[12]采用数值模拟方法初步研究了圆柱形及多边形人工岛周围波高分布特点。李洋^[13]通过 MIKE21-BW 模型,研究了不规则波作用下人工岛群中外围人工岛掩护效果,给出了不同布置方案人工岛群周围的波高分布。最近颁布的《港口与航道水文规范》(JTS145-2015)^[14]给出了岛式防波堤绕射波高的计算方法,但规范方法未考虑人工岛形状及尺度变化对绕射波高的影响。

本文采用 MIKE21-BW 模型,数值研究了尺度不同和波浪方向分布不同对人工岛绕射波浪分布的影响。

1 数值模型

MIKE21-BW 模型是基于 Boussinesq 型方程所建立的波浪数学模型,改进的 B 方程因包含深水项且结合了改进的色散关系,方程适用于最大水深 $h_{\max}$ 与深水波长 L_0 的比值小于 0.5 的情况。

1.1 控制方程

模型控制方程采用 Beji 和 Nadaoka^[15]改进后的方程,连续性方程:

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

x 方向动量方程:

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

y 方向动量方程:

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

式中:下标 x 、 y 和 t 分别表示对空间和时间的偏微分, P 为 x 方向的流密度, Q 为 y 方向的流密度, F_x 为 x 方向的水平力, F_y 为 y 方向的水平力, d 为静水水深, ξ 为波面相对于静水面的高度, $h = d + \xi$ 为总水深, n 为空隙率, C 为谢才系数, α 为层流阻尼系数, β 为紊流阻尼系数, Ψ_1 、 Ψ_2 为 Boussinesq 项。

Sorensen 等^[16]给出了完善的计算方法求解控制方程的数值方法,空间离散格式采用图 1 所示矩形网格,求解微分方程时采用交替方向隐式(alternating direction implicit,简称 ADI)算法进行求解。水面高程等标量定义在网格节点上,而流量分量等矢量定义于相应方向的网格线的中点上。

1.2 波浪入射条件

在模型中入射波浪采用内波生成线生成。不规则波频谱采用 JONSWAP 谱^[17],方向分布函数采用与频率相关的表达式^[18]。频谱表达式为:

$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} (T_p f)^{-4} \right] \cdot \gamma^{\exp [-(f/f_p - 1)^2 / 2\sigma^2]} \quad (4)$$

式中: $\beta_j = \frac{0.062 \ 38}{0.230 + 0.033 \ 6\gamma - 0.185 (1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.019 \ 15\ln\gamma]$, $T_p = \frac{T_{H_{1/3}}}{1 - 0.132 (\gamma + 0.2)^{-0.559}}$ 。

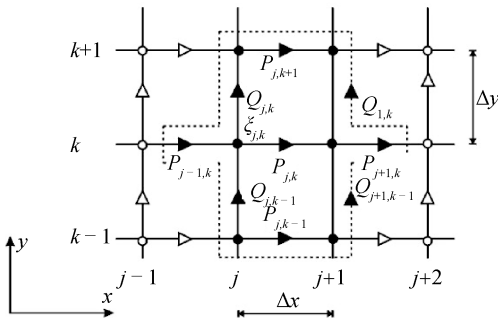


图 1 BW 模型离散格式

Fig. 1 Discretization scheme of BW model

其中, $H_{1/3}$ 为有效波高; T_p 为谱峰周期; γ 为峰高因子,取 3.3; 峰形参数 $\sigma = \sigma_a$ (当 $\omega \leq \omega_m$ 时), $\sigma = \sigma_b$ (当 $\omega > \omega_m$ 时), σ_a, σ_b 分别取 0.07、0.09。

方向分布函数为与频率相关的表达式:

$$G(f,\theta) = A(f) \cos^{2s} \left[\frac{1}{2}(\theta - \theta_{\max}) \right]$$

(5)

式中: $\theta_{\max}$ 为主波方向, θ 为组成波的方向, s 表示方向分布参数。

2 数值模型验证

为验证本文采用计算模型的可靠性,将本文模拟结果与 Briggs 等^[19]的单突堤绕射波浪的整体物理试验结果进行对比。计算区域见图 2,模拟组次见表 1,对比结果见图 3。

试验中单突堤的厚度取 0.15 m,水深为 0.4 m,波浪的入射边界与单突堤平行,且二者距离为 5 m,入射边界相邻两侧边界设为全反射边界。取与堤轴线夹角 30°、60°和 90°的断面,断面长度为 3L (L 表示波长),等间距布置波高测量仪,入射波分别取规则波、多向不规则波,波浪沿负 y 轴方向传播。

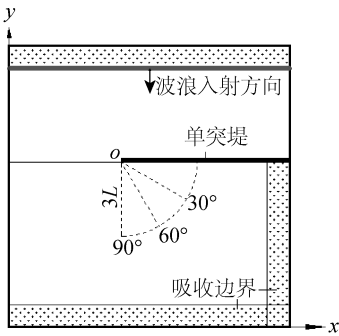


图 2 单突堤的波浪绕射计算区域
Fig. 2 Calculation domain for wave diffraction around a semi-infinite breakwater

表 1 数值模拟计算组次
Tab. 1 Calculated groups of numerical simulation

组次	波况	计算区域 $x \times y$	网格步长	时间步长	参数
M1	规则波	1 250 m×1 250 m	10 m	0.7 s	$H=3.875\text{ m}, T=9.2\text{ s}, L_0=112.5\text{ m}$
M2	多向不规则波				$H_{1/3}=3.875\text{ m}, T_p=9.2\text{ s}, L_s=112.5\text{ m}, \theta_{\max}=30^\circ$

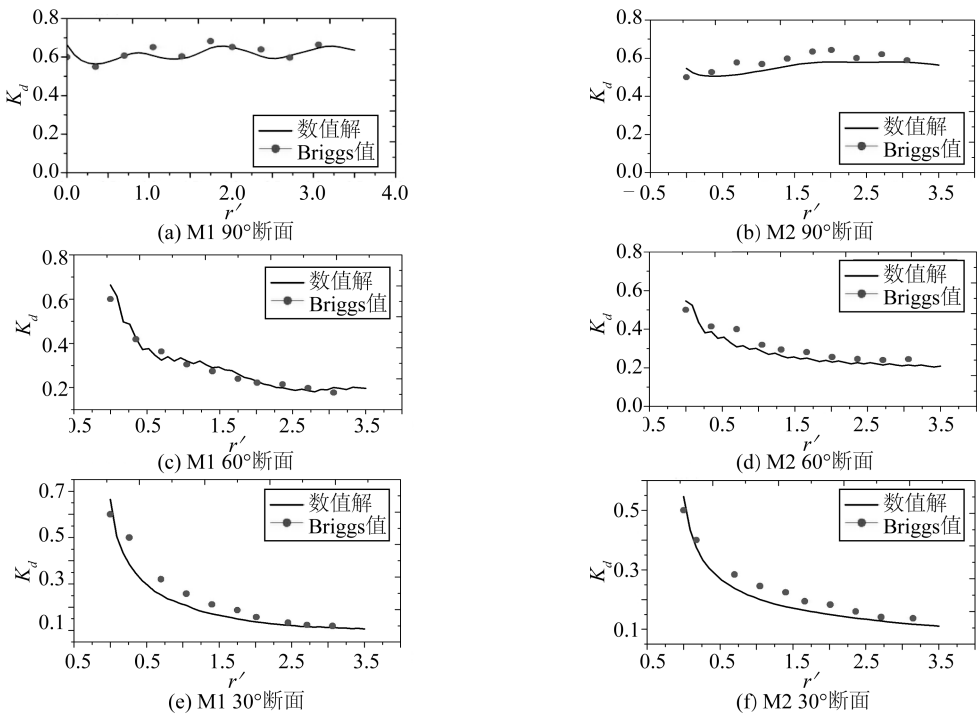


图 3 数值结果与 Briggs 等试验数据的对比
Fig. 3 Comparison between numerical results and Briggs' experimental data

由图 3 可知 30°和 60°断面上绕射系数的数值结果与试验数据基本一致,90°断面上数值结果和试验数据相差相对较大,最大相差约 8.3%,原因是由于物理试验造波技术的影响和造波板二次反射所致,且试验和数值模拟过程中多向不规则波的方向分布有差别。总的来说,对比结果吻合较好,表明了 BW 模型在研究波浪绕射问题是可行的。

3 考虑不同因素对人工岛绕射波浪分布的影响

3.1 圆形人工岛绕射波浪数值结果与理论解的对比

1) 绕射波浪理论解计算方法
采用直立圆柱的线性波浪绕射计算方法进行理论解计算^[20]。绕射系数 K_d 表达式:

$$K_d = \frac{\bar{H}}{H} = \sum_{m=0}^{\infty} \delta_m i^{m+1} [J_m(kr) - \frac{J_m(ka)}{H_m^{(1)}(ka)} H_m^{(1)}(kr)] \cos m\theta$$

(7)

2) 数值结果与理论解对比
基于 BW 模型建立了圆形人工岛计算模型,模型采用矩形封闭的计算区域,计算区域设为 600 m×800 m,空间步长为 1 m,时间步长为 0.1 s。入射波为规则波,波周期 $T=6$ s,波高 $H=1.5$ m,波长 $L=48$ m。圆形人工岛的护岸结构型式采用直墙式。分别采用数值模型及理论解计算了 5 组相对直径 $\pi D/L=4、6、8、10、20$ 的圆形人工岛的绕射系数,数值结果与理论解及误差见表 2,其中 θ 为选取的特征点与入射波方向的夹角, D 为圆柱形的直径。

表 2 圆形人工岛绕射系数数值结果与理论解对比
Tab. 2 Comparison between numerical calculation and theoretical results

θ		$\pi D/L$				
		4	6	8	10	20
0°	数值结果	1.964	1.954	1.982	1.994	1.997
	理论解	1.947	1.972	1.981	1.985	1.996
	误差/(%)	0.87	0.91	0.05	0.45	0.05
30°	数值结果	1.764	1.773	1.781	1.852	1.898
	理论解	1.878	1.925	1.952	1.959	1.986
	误差/(%)	6.07	7.90	8.76	5.46	4.43
60°	数值结果	1.696	1.796	1.766	1.875	1.803
	理论解	1.726	1.745	1.790	1.818	1.882
	误差/(%)	1.74	2.92	1.34	3.14	4.20
90°	数值结果	0.975	1.253	1.150	1.044	1.392
	理论解	1.321	1.336	1.346	1.354	1.374
	误差/(%)	26.19	6.21	14.56	22.90	1.31

表 2 表明,在 $\theta=0^\circ$ 时圆形人工岛岛壁附近绕射系数趋近于 2.0,即在来浪向圆形人工岛的正面的绕射波高趋近于 $2H_d$ 。在其它位置的绕射系数小于 2.0,即绕射波高小于 $2H_d$ 。在相对直径 $\pi D/L=4\sim 20$ 范围内,绕射系数的数值结果与理论解吻合较好。

3.2 考虑不同尺度圆形人工岛绕射波浪的数值研究

1) 数值模型建立
选取圆形人工岛掩护区 14 个特征点为研究对象,其中 1~7 号点为岛壁附近的特征点,8~14 号为距岛壁一倍有效波长的特征点,特征点与水平夹角分别为 0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°,数值计算区域示意图及选取的特征点示意图,如图 4 所示。

2) 数值结果

选取了尺度 $\pi D/L=\pi, 2\pi, 3\pi, 4\pi, 5\pi, 6\pi$ 的人工岛为研究对象,表 3 给出了 6 种尺度人工岛特征点数值结果的绕射系数。

由表 3 知,特征点 4#、11#的绕射系数最小,绕射系数大致分布在 0.5~0.7,其绕射系数随尺度的增加,绕射系数随之变小,减小幅度分别为 25.7%,35.6%。特征点 3#、5#、10#、12#绕射系数随尺度的增加,绕射系数同样减小,但减小的幅度相对特征点 4#、11#较小。特征点 1#、7#的绕射系数最大,绕射系数大致在 1.30~1.50 之间。

由 1#~7#特征点的绕射系数的变化知,1#~4#特征点的绕射系数逐渐减小,4#~7#特征点绕射系数逐渐增大,且绕射系数相对人工岛对称分布。在圆形人工岛尺度为 $\pi D/L=\pi$ 时,在岛壁处 1#~4#特征点绕射系数变化幅度约 47.76%,在距岛壁距离一倍特征波长的 8#~11#特征点的变化幅度约 32.4%;在 $\pi D/L=5\pi$ 时,在岛壁附近 1#~4#特征点绕射系数变化幅度减小约 64.9%,8#~11#特征点的绕射系数变化幅度减小约 55.9%。即随距岛壁增大,绕射系数变化幅度减小。

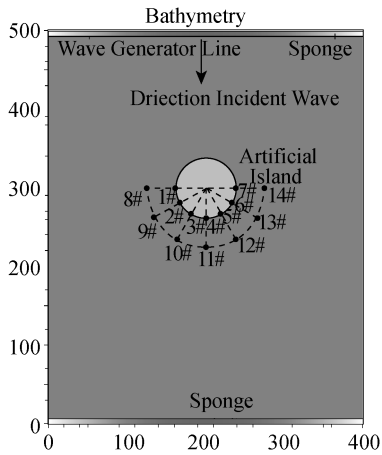


图 4 圆形人工岛研究区域及选取特征点示意

Fig. 4 Research area and the locations of the calculating points of the artificial cylindric island

表 3 不同尺度时特征点绕射系数

Tab. 3 Diffraction coefficients of character points under different scales

$\pi D/L$	特征点													
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#
π	1.34	1.10	0.83	0.70	0.80	1.14	1.51	1.08	0.99	0.82	0.73	0.87	0.97	1.05
2π	1.33	1.17	0.80	0.60	0.79	0.99	1.36	1.09	0.99	0.85	0.57	0.75	0.96	1.01
3π	1.50	1.22	0.79	0.58	0.76	1.05	1.42	1.10	0.96	0.81	0.53	0.75	0.94	1.07
4π	1.33	1.08	0.77	0.56	0.78	1.13	1.52	1.09	0.86	0.66	0.51	0.71	1.03	1.13
5π	1.51	1.08	0.76	0.53	0.74	1.39	1.54	1.11	0.94	0.65	0.49	0.65	0.92	1.09
6π	1.42	1.11	0.74	0.52	0.73	1.08	1.41	1.32	0.96	0.66	0.47	0.64	0.91	1.13

3.3 不同波况人工岛绕射波浪分布

1) 数值模型建立

采用 BW 模型建立了封闭的矩形计算区域,区域面积 800 m×1 000 m。上下边界设置海绵层吸收边界,海绵层厚度取 100 m。在上边界海绵层结束处设置内波生成线,波浪自上而下传播,入射波为不规则波,波浪频谱采用 JONSWAP 谱,方向函数选用与频率相关的表达式,有效波高 $H_s=1.5$ m,谱峰周期 $T_p=6.0$ s,有效波长 $L_s=48$ m。水深取 10 m,岛堤高程取+10 m。模型空间步长取 2 m,时间步长取 0.1 s。在计算区域内布置矩形人工岛,岛壁设为全反射边界,反射系数为 1.0。图 5 给出了数值研究区域及 12 个特征点的位置。

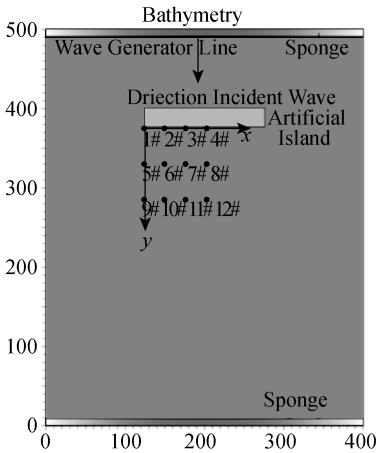


图 5 研究区域及特征点示意

Fig. 5 Research area and the locations of calculating points

2) 单向不规则波和多向不规则波人工岛波浪绕射分布

在研究结构物的波浪绕射过程中,考虑不规则波的频谱不能完全描述波浪绕射特性,其中波浪的方向分布特性对波浪绕射也有着重要的意义^[17],故本节研究单向、多向不规则波对人工岛绕射波浪的影响。

入射波分别取单向不规则波、多向不规则波,不规则波方向分布 $\theta_{\max}$ 取 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 45° 、 50° 、 55° 、 60° 及 75° ,研究9种入射条件时绕射波浪分布状况, $\theta_{\max}$ 是波浪的组成波能量分布在 $(-\theta_{\max},\theta_{\max})$ 范围内。表4给出了9种波况时掩护区特征点绕射系数。

由表4可知,特征点在单向波浪作用条件时绕射系数小于多向波入射条件时结果,绕射波浪与最大偏差角度 $\theta_{\max}$ 紧密相关。 $\theta_{\max}$ 在 $10^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围内,随着 $\theta_{\max}$ 从小变大,12个特征点的波浪绕射系数增大,同时表明波浪绕射更强烈,相同绕射系数的绕射角度(绕射角度指岛堤后某点与 x 轴负方向的夹角)也就越大,同时随 $\theta_{\max}$ 的增大,绕射系数分布更加均匀。 $\theta_{\max}$ 在 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时绕射系数的变化较小。

表 4 不同波况时特征点绕射系数数值结果

Tab. 4 Diffraction coefficients of character points under different wave items													
波况	$\theta_{\max}$	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#
单向不规则波	—	0.57	0.18	0.16	0.6	0.52	0.25	0.19	0.16	0.52	0.29	0.20	0.18
	10°	0.59	0.21	0.18	0.17	0.56	0.26	0.20	0.17	0.58	0.31	0.23	0.20
	20°	0.62	0.23	0.20	0.19	0.59	0.28	0.21	0.20	0.65	0.37	0.24	0.23
	30°	0.65	0.24	0.20	0.20	0.65	0.31	0.23	0.21	0.67	0.46	0.29	0.26
多向不规则波	40°	0.63	0.24	0.20	0.20	0.64	0.33	0.24	0.22	0.66	0.48	0.33	0.29
	45°	0.65	0.25	0.21	0.20	0.65	0.36	0.26	0.23	0.65	0.49	0.36	0.31
	50°	0.64	0.25	0.22	0.20	0.67	0.36	0.25	0.22	0.66	0.51	0.36	0.30
	60°	0.64	0.25	0.22	0.21	0.67	0.36	0.24	0.22	0.66	0.51	0.37	0.30
	75°	0.63	0.25	0.22	0.21	0.67	0.36	0.24	0.21	0.66	0.51	0.37	0.30

3) 不同波浪谱峰周期人工岛绕射波浪分布

为研究多向不规则波入射波波周期的变化对绕射系数的影响,分别取不规则波谱峰周期为4 s、6 s、8 s、10 s,数值研究其掩护区域的绕射波浪的分布规律。表5给出了不同谱峰周期时12个特征点绕射系数。

表 5 不同谱周期时若干特征点绕射系数

Tab. 5 Diffraction coefficients of character points under different spectral peak periods												
谱峰周期	特征点											
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#
4 s	0.62	0.20	0.16	0.16	0.62	0.32	0.21	0.17	0.58	0.44	0.30	0.26
6 s	0.65	0.25	0.21	0.20	0.65	0.37	0.26	0.23	0.66	0.48	0.37	0.32
8 s	0.68	0.32	0.26	0.26	0.63	0.40	0.31	0.29	0.65	0.49	0.40	0.38
10 s	0.72	0.35	0.32	0.33	0.68	0.43	0.32	0.33	0.65	0.50	0.43	0.40
增幅/(%)	16.13	75.0	100	106.3	9.68	34.38	52.38	94.12	12.07	13.64	43.33	53.85

由表5可知,绕射波浪的分布与波浪周期有关。随着入射波周期的增大,绕射现象更加明显。大多数特征点的绕射系数随着谱峰周期的增大而增大,除个别特征点外,如5#和9#。绕射系数变化较大的特征点有2#、3#、4#、8#、12#,变化幅度分别为75.0%、100.0%、106.25%、94.12%、53.85%。绕射系数增量较小的特征点有1#、5#、9#、10#,变化幅度分别为16.13%、9.68%、12.07%、13.64%。总的来说,随着谱峰周期的增加,掩护区的绕射系数随之增大。

4 结 语

采用 MIKE21-BW 模块,在验证模型适用性的基础上,数值研究了不同尺度和不同入射波浪对人工岛绕射波浪分布的影响。

1) 圆形人工岛的绕射系数的数值结果与线性绕射系数理论解吻合较好。

2) 圆形人工岛尺度的变化和波浪方向分布不同对人工岛绕射波浪有明显的影响,现行规范方法未考虑人工岛尺度变化对绕射波高的影响是有误差的。

3) 随着圆形人工岛尺度的增加,绕射系数逐渐变小;随着距岛壁距离的增大,波浪绕射系数变化幅度减小。

4) 入射波浪对岛堤后波浪绕射有一定影响。单向不规则波作用时绕射波高明显小于多向不规则波作用时的结果,多向不规则波在掩护区的绕射波浪分布较均匀;多向不规则波方向分布在 $\theta_{\max} = 10^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,随 $\theta_{\max}$ 的增大绕射系数随之增大;随着谱峰周期的增大绕射系数随之增大。

参考文献:

- [1] 国家海洋局.关于改进围填海造地工程平面设计的若干意见[S]. 国海管字[2008]37号.(State Oceanic Administration People's Republic of China. Some opinions about improving engineering plane design of reclamation[S]. 2008;37. (in Chinese))
- [2] 国家海洋局.关于加强海上人工岛建设用海管理的意见[S]. 国海管字[2007]91号.(State Oceanic Administration People's Republic of China. Opinions about strengthening management of construction of artificial island[S]. 2007;91. (in Chinese))
- [3] 金晖,柯学. 双鱼岛工程设计关键技术研究[J]. 水运工程, 2013(10):1-6. (JIN H, KE X. Key design technology of Shuangyu artificial island[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(10):1-6. (in Chinese))
- [4] 王诺, 颜华锟, 左书华,等. 大连海上机场人工岛建设对区域水动力及海床冲淤影响分析[J]. 水运工程, 2012(4):27-33.(WANG N, YAN H K, ZUO S H, et al. Impact of exploitation of Dalian offshore airport artificial island on regional hydro-dynamic condition and erosion-deposition variation of Jinzhou Bay[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(4):27-33. (in Chinese))
- [5] 刘彦鹏, 王彤, 张杨. 龙口开建全国最大人工岛群[N]. 烟台日报, 2010-01-01.(LIU Y P, WANG T, ZHANG Y. Longkou begins to construct the maximum groups of artificial islands in our country[N]. Yantai Daily, 2010-01-01. (in Chinese))
- [6] BERKHOFF J C W. Computation of combined refraction diffraction [C]//Proceedings of the 13th Conference Coastal Engineering, 1972; 471-490.
- [7] RUSU L, SOARES C G. Evaluation of a high-resolution wave forecasting system for the approaches to ports[J]. Ocean Engineering, 2013, 58;221-238.
- [8] ORSZAGHOVA J, BORTHWICK A G L, TAYLOR P H. From the paddle to the beach-A Boussinesq shallow water numerical wave tank based on Madsen and Sorensen's equations [J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231: 328-344.
- [9] 谢世楞. 关于人工岛设计中的几个问题[J]. 港口工程, 1988, 5: 7-11.(XIE S L. Some questions about design of artificial island[J]. Port Engineering, 1988, 5;7-11. (in Chinese))
- [10] 谢世楞. 人工岛设计的进展[J]. 海岸工程, 1995, 14(1): 1-7. (XIE S L. Progress of the design of artificial island[J]. Coastal Engineering, 1995, 14(1): 1-7. (in Chinese))
- [11] 蔡艳君, 谢世楞. 人工岛周围的不规则波绕射计算[J]. 港工技术, 1989, 4: 1-9. (CAI Y J, XIE S L. Diffraction calculation of random wave around artificial island[J]. Port Engineering Technology, 1989, 4: 1-9. (in Chinese))
- [12] 陈新. 人工岛周围波高分布的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.(CHEN X. Numerical simulation study of the wave weight around a artificial island[J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [13] 李洋. 不规则波作用下人工岛群中外围人工岛掩护效果的研究[J]. 中国水运, 2015, 15(12): 280-284. (LI Y. Study on sheltering effect of peripheral island among artificial island groups under irregular wave[J]. China Water Transport, 2015, 15(12): 280-284. (in Chinese))

- [12] BERRISFORD P, DEE D, POLI P, et al. The ERA-Interim archive Version 2.0, ERA Report Series 1, ECMWF, Shinfield Park[R]. Reading, UK, 2011: 13177.
- [13] WARD M N, HOSKINS B. Near surface wind over the global ocean 1949-1988[J]. J Climate, 1996, 9: 1877-1895.
- [14] GULEV S K, HASSE L. Changes of wind waves in the north Atlantic over the last 30 years[J]. Int J Climatol, 1999, 19:1091-1117.
- [15] GOWER J F R. Temperature, wind and wave climatologies, and trends from marine meteorological buoys in the Northeast Pacific [J]. J Climate, 2002, 15: 3709-3718.
- [16] GUILLAUME D, XAVIER B, RUI T. Wave climate variability in the Northeast Atlantic Ocean over the last sixdecades[J]. Ocean Modelling, 2010, 31(3-4): 120-131.
- [17] 郑崇伟, 林刚, 邵龙潭. 1988-2010 年中国海大浪频率及其长期变化趋势[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2013, 52(3): 395-399. (ZHENG Chongwei, LIN Gang, SHAO Longtan. Frequency of rough sea and its long-term trend analysis in China Sea from 1988 to 2010 [J]. Journal of Xiamen University, Natural Science, 2013, 52(3): 395-399. (in Chinese))
- [18] 郑崇伟, 夏淋淋, 罗霞, 等. 南海-北印度洋的大浪频率特征分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2016, 17(3): 284-288. (ZHENG Chongwei, XIA Linlin, LUO Xia, et al. Characteristics of the rough sea occurrence in the South China Sea and north Indian Ocean [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, Natural Science Edition, 2016, 17(3): 284-288. (in Chinese))
- [19] 马亚维, 丛爱丽, 田妍妍, 等. 近 45 年北太平洋海表风速特征统计分析[J]. 科技资讯, 2013, 31:105-111. (MA Yawei, CONG Aili, TIAN Yanyan, et al. Statistics analysis of seasonal characteristics of sea surface wind field in the north Pacific Ocean during the Last 45 Years [J]. Science & Technology Information, 2013, 31:105-111.(in Chinese))
- ~~~~~
- (上接第 111 页)
- [14] JTS 145-2015, 港口与航道水文规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 39-51. (JTS 145-2015, Code of hydrology for sea harbor[S]. Beijing: China Communications Press, 2015: 39-51. (in Chinese))
- [15] BEJI S, NADAOKA K. A formal derivation and numerical modeling of the improved Boussinesq equations for varying depth [J]. Ocean Engineering, 1996, 23(8): 591-704.
- [16] SORENSEN O R, HEMMING A, SORENSEN L S. Boussinesq-type modeling using an unstructured finite element technique [J]. Coastal Engineering, 2004(50): 181-198.
- [17] 俞聿修. 随机波浪及其构成应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2000: 149-154. (YU Y X. Random wave and its applications to engineering[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2000: 149-154. (in Chinese))
- [18] DHI.MIKE21 toolbox user guide [M]. Denmark: DHI, 2009: 148-159.
- [19] BRIGGS M J, THOMPSON E F, VINCENT C L. Wave diffraction around breakwater [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 1995, 121(1): 23-35.
- [20] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2002. (LI Y C, TENG B. Wave action on maritime structures[M]. Beijing: China Ocean Press, 2002. (in Chinese))