

网络优先数字出版时间: 2015-05-25

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20150525.1658.010.html>

## 有限风区内波浪数值模拟研究\*

# Numerical Study on Wind Wave in Limited Wind Zone

张义丰<sup>1,2</sup>, 施 凌<sup>3</sup>, 牙韩争<sup>4</sup>, 李谊纯<sup>4\*\*</sup>

ZHANG Yi-feng<sup>1,2</sup>, SHI Ling<sup>3</sup>, YA Han-zheng<sup>4</sup>, LI Yi-chun<sup>4</sup>

(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; 4. 广西科学院 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007)

(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; 4. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

**摘要:**【目的】研究港内波高分布特征及有限风区内风作用对波高的影响。【方法】以某码头工程为例, 结合 MIKE 21 BW 波浪模块及小区风成浪计算公式对港内波高进行计算, 并对计算结果进行分析。【结果】计算组合中, W 向、WSW 向风作用下, 港池西侧斜边岸线及西侧岸线前沿水域受岸线遮蔽的影响, 波高相对较低, 而湾底及东侧岸线前沿受外海入射波影响较大, 波高相对较大。风作用对港内波高有一定的影响, W 向风作用下, 风浪对湾底岸线及东侧岸线前沿各观测点波高的贡献分别为 9%~15% 及 12%~15%, WSW 向风作用下分别为 13%~35% 及 16%~41%。【结论】风作用对有限风区内波高的影响不容忽视。

**关键词:** 有限风区 波浪 数值模拟

**中图分类号:** U656.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2015)02-0077-06

**Abstract:**【Objective】In order to study the effect of wind forcing on the wave height distribution in limited wind zone.【Methods】We took a port project as an example. The wave height distribution was calculated using the MIKE 21 BW module and small wave wind wave calculation formula.【Results】The result shows that when the wind direction is W or WSW, the wave height at the west side of the port is relatively low because the shoreline blocks the wind. The wave heights at the bottom and east side of the port are relatively large. The wind has some influence on the wave height of the port. The W wind wave is about 9%~15% and 12%~15% of the total height at the rear and east side. The WSW wind wave is about 13%~35% and 16%~41% of the total height at the rear and east side.【Conclusion】The effect wind forcing on the wave height of port is significant in limited wind zone.

**Key words:** limited wind zone, wave, numerical simulation

收稿日期: 2015-03-20

修回日期: 2015-04-12

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“深水波浪非线性及不稳定性演变机理研究”(41306034)和广西自然科学基金重大专项项目(2011GXNFE018002)资助。

\*\* 通讯作者: 李谊纯(1977-), 男, 博士, 工程师, 主要从事河口海岸学研究, E-mail: ychli@vip.sina.com。

## 0 引言

**【研究意义】**波浪是造成泥沙运动和岸滩演变的主要动力之一,也是影响港口、码头船舶正常停靠、作业的主要因素。港口水工建筑物规划与设计,波浪条件一直是研究重点<sup>[1]</sup>。有限风区指风区长度小于100 km的区域,也是近岸局部风浪生成的主要区域。**【前人研究进展】**近几十年来,国内外学者对近岸波浪进行大量研究,取得丰富的成果<sup>[2~8]</sup>,产生了众多的波浪数学模型。应用较为广泛的有基于能量平衡的SWAN模型<sup>[2]</sup>、基于势波理论的缓坡方程<sup>[3]</sup>以及 Boussinesq 方程等<sup>[4,5]</sup>。陈新等<sup>[6]</sup>采用 MIKE21 BW 波浪模块,对直立式圆柱形人工岛周围的波高分析进行计算,计算结果与物理试验结果基本吻合。丁兆宽等<sup>[7]</sup>利用 MIKE21 BW 模块建立波浪数学模型,对日照港石臼港区港内波高及泊稳条件进行研究,并在此基础上对港内平面布置进行优化。**【本研究切入点】**在以往的波高研究中,风作用的影响常被忽视,尤其是港口、码头小尺度的研究中。而实际上,当风区长度超过1 km时,风浪对整体波高的影响已不容忽视。我国《海港水文规范》也规定,当风区长度超过1 km时,港内波浪计算应同时考虑绕射波与局部风浪的合成。**【拟解决的关键问题】**以某码头扩建工程为例,结合 MIKE 21 BW 波浪模块及小区风成浪计算公式对港内波高分布进行计算,并对港内波高分布特征及风力作用对有限风区内波高的影响进行分析,为港口、码头有限风区内波浪数值模拟提供参考。

## 1 工程概况

工程所在港湾为天然开放式港湾,面临开敞海域为 SW~W~N 向,外海来浪无岛屿等天然地形掩护。工程将港区依陆地岸线布置,泊位沿港池西侧、湾底及东侧布置,航道由西南偏西通向港池(图1)。

### 1.1 工程水位

以当地理论最低潮面起算,工程区域极端高水

位 4.35 m,设计高水位 3.44 m,设计低水位 0.22 m,极端低水位 -1.37 m。

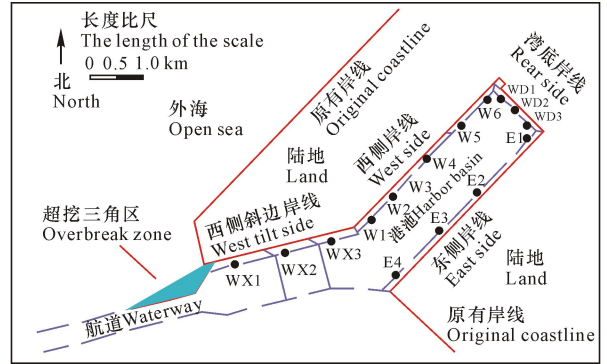


图1 工程整体布置

Fig.1 Layout of the port project

### 1.2 波浪要素

历史水文观测结果表明,工程海域常浪向为 S 向,年出现频率为 12.4%。次常浪向为 NNE 向,年出现频率为 11.1%。强浪向为 S~SW 向,次强浪向为 NE~NNW 向。工程海域 -20 m 等深线上不同重现期设计波浪要素如表 1 所示。

### 1.3 风要素

风场观测结果表明,工程海域常风向为 NNE 向,年出现频率为 14.5%。次常风向为 SSE 向和 S 向,年出现频率分别均为 14.4%。强风向为 SSW 向和 NNE 向,年最大风速为 SSW 向。2009 年 7 月~2010 年 6 月间海域风玫瑰图如图 2 所示。通过对周边海域长期风场观测资料对比分析,得到工程海域风条件资料如表 2 所示。

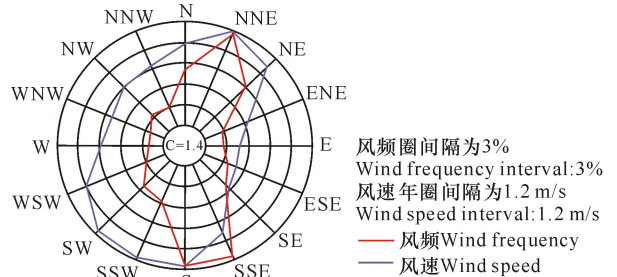


图2 工程海域风玫瑰图

Fig.2 Wind rose in the project zone

Table 1 Wave parameters in the project zone

重现期(年) Recurrence interval(a)	SW		WSW		W		WNW		NW		NNW		N	
	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)
2	1.54	5.0	1.74	5.2	1.49	4.9	1.77	5.2	1.63	5.0	1.87	5.3	2.29	5.8
10	1.90	5.3	2.31	5.8	1.90	5.4	2.29	5.8	2.00	5.5	2.54	6.0	3.15	6.6

表 2 工程海域风场资料

Table 2 Wind parameters in the project zone

重现期(年) Recurrence interval(a)	风速 Wind speed(m/s)								
	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE
2	15.4	15.4	13.9	16.4	18.2	19.6	21.0	21.4	21.0
10	20.3	20.6	19.5	20.9	21.7	23.3	26.1	26.4	26.0

## 2 研究方法

### 2.1 波浪数学模型

MIKE 21 是丹麦水资源及水环境研究所 (DHI) 开发的专业二维自由水面流动模拟系统工程软件, 其中的 MIKE 21 BW 模块是 MIKE 21 模型中高级波浪模块。MIKE 21 BW 模块以 Boussinesq 方程为基础, 通过求解沿垂线积分的 Boussinesq 方程获得沿水深平均的流速、水位、波高等物理量, 可模拟近海波浪反射、折射、衍射、破碎和长波生成等多种作用组合的影响。该模块采用非结构化三角形网格对计算区域进行划分, 计算边界与实际边界具有高度的一致性, 其采用有限体积法对方程组进行离散求解, 稳定性好、精确度高, 已成为世界各国目前应用最为广泛的波浪数学模型之一<sup>[9,10]</sup>。

#### 2.1.1 入射边界

MIKE 21 BW 模块入射边界采用内部造波的方法, 即模型采用全封闭边界, 对超出模型区域的波浪采用吸收层进行消波。入射边界波要素根据大范围波浪数学模型计算结果, 采用 JONSWAP 谱给出, 其定义式如式(1)所示:

$$\eta(n\Delta t) = A \cdot f^{-5} \exp(-B \cdot f^{-4}) \cdot \gamma^a. \quad (1)$$

谱形参数  $a$ 、 $\sigma$  定义如式(2)和(3)所示:

$$a = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{f-f_p}{\sigma f_p}\right)^2\right], \quad (2)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a & \text{for } f \leq f_p, \\ \sigma_b & \text{for } f > f_p. \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $f_p$  为谱峰频率;  $\gamma$  为谱形参数, 标准 Jonswap 谱中取值 3.3; 标准 Jonswap 谱中  $\sigma_a$ 、 $\sigma_b$  分别为 0.07 和 0.09。

波能的方向分布假定与频率无关, 其方向谱如式(4)所示:

$$D(f, \theta) = D(\theta_i) =$$

$$\begin{cases} \beta \cos^n(\theta_m - \theta_i) & \text{for } |\theta_m - \theta_i| \leq \theta_d, \\ 0 & \text{for } |\theta_m - \theta_i| > \theta_d. \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\beta$  为标准化参数;  $\theta_m$  为最大波向角;  $\theta_d$  为最大偏转角度, 该角度必须小于或等于  $90^\circ$ ;  $n$  为方

向分布参数, 取值范围在 1~100 之间, 本次计算  $n$  取 10。

#### 2.1.2 反射系数

MIKE 21 BW 模块可以通过设置孔隙层的方法来模拟结构物对波浪能量的部分反射、吸收和传输。由于建筑物形式的多样性, 建筑物反射的特性差别大, 不同的反射率特性通过设立不同个数、不同组合的空隙率层得到。计算中防波堤外侧为斜坡堤形式, 反射系数取 0.4, 码头及防波堤内侧作为直立式考虑, 反射系数取 1。

#### 2.1.3 消波层

消波层的设置, 消波层的宽度一般为波长的 1~2 倍, 消波系数计算式如式(5)所示:

$$C_{\text{sponge}} = a^{(r^{i-1})}, i=1, N_{\text{sponge}}. \quad (5)$$

其中  $\alpha$  和  $r$  为给定的常数,  $N_{\text{sponge}}$  为消波线的数量。对于 20 个网格厚度的消波层, 通常取  $\alpha = 7$ ,  $r = 0.7$ 。

在陆地边界前、波浪生长线后和封闭边界前均设置 20 层消波层, 同时为方便计算, 在防波堤外侧局部不影响港内波况区域设置人为边界进行消波处理。

### 2.2 小风区风成浪计算

采用小风区风成浪计算公式对风浪进行计算, 风浪的计算需对风速进行高度、陆海订正, 同时考虑建筑物、岛屿和陆域对风区长度的影响。小风区风浪有效波高及有效周期分别采用式(6)及式(7)进行计算<sup>[11,12]</sup>:

$$\frac{gH}{U^2} = 5.5 \times 10^{-3} \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.35} \tanh\left[30 \frac{\left(\frac{gd}{U^2}\right)^{0.8}}{\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.35}}\right]; \quad (6)$$

$$\frac{gT}{U} = 0.55 \times \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.23} \tanh\left[30 \frac{\left(\frac{gd}{U^2}\right)^{0.8}}{\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.35}}\right]. \quad (7)$$

等效风距计算式如式(8)所示:

$$F = \frac{\sum_{i=0}^N F_i \cos^2 \alpha_i}{\sum_{i=0}^N \cos \alpha_i}, i=0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (8)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $H$  为有效波高;  $F$  为有效风区长度;  $T$  为有效周期;  $d$  为水深;  $U$  为风速;  $\alpha_i$  为风区划分中风向与分划线的夹角。有效风区长度按上式计算, 有限风区范围为港池内西侧岸线以

里的水域,约为  $5.0 \text{ km} \times 1.0 \text{ km}$ 。

### 2.3 绕射浪与风浪的合成

根据《海港水文规范》的规定,当港域风区长度超过  $1 \text{ km}$  时,应同时考虑绕射浪与局部风浪的合成。绕射浪和局部风浪的合成波高可按式(9)计算:

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} \quad (9)$$

式中:  $H_1$  为计算点绕射波高,  $H_2$  为局部风浪的波高。

### 2.4 计算条件

计算区域根据工程方案布置和模型计算的要求,选取如图 1 所示的范围进行计算。计算网格采用尺寸为  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  的矩形网格,计算观测点布置见图 1。研究主要针对掩护相对较差的 W 向及 WSW 向入射波进行计算。小区风成浪的计算中,风向采用与入射波相同的风向。计算水位采用重现期为 2 年的设计高及设计低水位。本工程受风浪影响的区域为湾底岸线及东侧岸线前沿水域,因此,小风区风成浪的计算主要考虑这两部分水域。

## 3 结果分析

根据前面所述方法对不同方向外海入射波港内波高及风作用下风浪波高进行计算,并采用式(9)计算外海入射波与风浪的合成波高。

### 3.1 W 向

如表 3 所示,外海波浪进入港区后,通过绕射、表 3 W 向波作用下各观测点波高计算结果( $H_{13\%}$ 波高, m)

Table 3 Simulated wave height of the sample sites (West incident wave,  $H_{13\%}$ , m)

水位 Water level	西侧斜边岸线 West tilt side			西侧岸线 West side						湾底岸线 Rear side			东侧岸线 East side			
	WX1	WX2	WX3	W1	W2	W3	W4	W5	W6	WD1	WD2	WD3	E1	E2	E3	E4
设计高 Designed high	0.85	0.61	0.53	0.65	0.78	0.71	0.68	0.54	0.37	0.73	0.76	0.77	0.75	0.71	0.81	0.73
设计低 Designed low	0.74	0.53	0.46	0.57	0.68	0.62	0.59	0.47	0.33	0.64	0.67	0.67	0.66	0.62	0.71	0.64

表 4 W 向风作用下各观测点风浪计算结果( $H_{13\%}$ 波高, m)

Table 4 Simulated wind wave height of the sample sites ( West wind,  $H_{13\%}$ , m)

水位 Water level	西侧斜边岸线 West tilt side			西侧岸线 West side						湾底岸线 Rear side			东侧岸线 East side			
	WX1	WX2	WX3	W1	W2	W3	W4	W5	W6	WD1	WD2	WD3	E1	E2	E3	E4
设计高 Designed high	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.34	0.38	0.45	0.45	0.44	0.38	0.39
设计低 Designed low	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.34	0.38	0.45	0.45	0.44	0.38	0.39

折射、反射等方式在港内传播,受航道水深变化及岸线的影响,波高明显下降。西侧斜边岸线前沿波高较高,其原因在于西侧斜边岸线靠近外海,易受海外入射波的影响,设计高及设计低水位时各观测点波高分别为  $0.53 \sim 0.85 \text{ m}$  和  $0.46 \sim 0.74 \text{ m}$ 。受西侧斜边岸线遮蔽的影响,波浪传至西侧岸线后波高进一步降低,设计高及设计低水位时波高最低的 W6 点波高仅为  $0.37 \text{ m}$  和  $0.33 \text{ m}$ 。湾底岸线位于港池底部,受其它岸线反射影响,岸线前沿波能聚集显著,波高下降并不明显。东侧岸线直面入射波来波方向,受入射波直射影响,部分观测点波高较高,设计高水位时波高约为  $0.71 \sim 0.81 \text{ m}$ ,设计低水位时约为  $0.62 \sim 0.71 \text{ m}$ 。

另外由表 4 可知,由于相同方向风作用下各测点风区长度一致,因此各计算水位下相同风速时生成的风浪波高一致。西侧斜边岸线及西侧岸线前沿由于受岸线的遮蔽,无法获得足够的风区长度,因而无风浪的生成。湾底岸线及东侧岸线前面向西边为开阔水域, W 向风作用下风浪生成明显,湾底岸线前沿不同设计水位时各观测点波高约为  $0.34 \sim 0.45 \text{ m}$ ,而东侧岸线前沿各观测点波高则为  $0.38 \sim 0.45 \text{ m}$ 。两侧岸线前沿风浪最高点均出现于风区长度较大的 WD3 点(湾底岸线)和 E1 点(东侧岸线),可见风区长度大的区域更容易生成相对较大的风浪。

由表 5 可知, W 向外海入射波及风作用下, 设计高及设计低水位时港内波高约在 0.37~0.89 m 和 0.33~0.81 m 间。湾底岸线及东侧岸线受风浪影响, 波高较大。西侧岸线受地形遮蔽作用明显, 波高较小。最大波高出现于受海外波浪及风浪影响较为显著的 WD3 及 E3 点。风作用对港内波高的影响较大, 受风浪影响较大的湾底岸线及东侧岸线前沿波高明显高于其它岸线前沿波高。分析结果表明, W 向风作用下风浪对湾底岸线及东侧岸线前沿各观测点波高的贡献分别可达约 9%~15% 及 12%~15%。

### 3.2 WSW 向

相比 W 向波, WSW 向外海入射波进入港内后波高下降更为明显, 其原因在于入射波与航道的夹角变小, 经航道折射传出港外的波能增加, 进入港内的波能减小, 波高降低。各岸线前沿观测点波高分布与 W 向波入射时大抵一致, 呈“东高西低”的特点。西侧岸线遮蔽效果最好, 波高较低, 设计高及设计低水位时各观测点波高分别约为 0.28~0.45 m

表 5 各观测点 W 向外海入射波与风浪合成波高 ( $H_{13\%}$  波高, m)

Table 5 Simulated wave height of the sample sites ( West wind and west incident wave,  $H_{13\%}$ , m)

水位 Water level	西侧斜边岸线 West tilt side			西侧岸线 West side						湾底岸线 Rear side			东侧岸线 East side			
	WX1	WX2	WX3	W1	W2	W3	W4	W5	W6	WD1	WD2	WD3	E1	E2	E3	E4
设计高 Designed high	0.85	0.61	0.53	0.65	0.78	0.71	0.68	0.54	0.37	0.81	0.85	0.89	0.87	0.84	0.89	0.83
设计低 Designed low	0.74	0.53	0.46	0.57	0.68	0.62	0.59	0.47	0.33	0.72	0.77	0.81	0.80	0.76	0.81	0.75

表 6 WSW 向波作用下各观测点波高计算结果 ( $H_{13\%}$  波高, m)

Table 6 Simulated wave height of the sample sites ( WSW incident wave,  $H_{13\%}$ , m)

水位 Water level	西侧斜边岸线 West tilt side			西侧岸线 West side						湾底岸线 Rear side			东侧岸线 East side			
	WX1	WX2	WX3	W1	W2	W3	W4	W5	W6	WD1	WD2	WD3	E1	E2	E3	E4
设计高 Designed high	0.42	0.41	0.39	0.38	0.44	0.45	0.33	0.31	0.28	0.52	0.46	0.43	0.36	0.51	0.60	0.33
设计低 Designed low	0.37	0.36	0.34	0.33	0.38	0.39	0.29	0.27	0.25	0.45	0.41	0.37	0.32	0.44	0.52	0.29

表 7 WSW 向风作用下各观测点风浪计算结果 ( $H_{13\%}$  波高, m)

Table 7 Simulated wind wave height of the sample sites ( WSW wind,  $H_{13\%}$ , m)

水位 Water level	西侧斜边岸线 West tilt side			西侧岸线 West side						湾底岸线 Rear side			东侧岸线 East side			
	WX1	WX2	WX3	W1	W2	W3	W4	W5	W6	WD1	WD2	WD3	E1	E2	E3	E4
设计高 Designed high	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.44	0.45	0.50	0.45	0.41	0.34	0.33
设计低 Designed low	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.44	0.45	0.50	0.45	0.41	0.34	0.33

和 0.25~0.39 m。东侧岸线波高最大, 设计高及设计低水位时各观测点波高分别约为 0.33~0.60 m 和 0.29~0.52 m(表 6)。

风向由 W 向风转为 WSW 向风时, 湾底岸线与主风向的夹角变大, 有效风区长度增加, 计算风速同时也增大, 因此 WSW 向风作用下, 湾底岸线前沿风浪波高较大, 不同水位下波高约为 0.44~0.50 m, 最大风浪出现于风区长度较长的 WD3 点处。东侧岸线前沿由于有效风区减小, 波高相对较低, 约为 0.33~0.45 m(表 7)。

由表 8 可知, WSW 向外海射入波及风作用下, 港内波高分布与 W 向入射波时大致一致, 但由于外海入射波波高下降比较明显, 合成波高相比 W 向时有小幅度的下降, 设计高、设计低水位时港内波高分别约为 0.28~0.69 m 和 0.25~0.63 m。表 8 及表 6 分析结果表明, WSW 向风作用下, 风浪对湾底岸线及东侧岸线前沿各观测点波高的贡献分别为 13%~35% 及 16%~41%, 可见风作用对港内波高的影响不容忽视。

表8 各观测点 WSW 向海外射入波与风浪合成波高 ( $H_{13\%}$  波高, m)Table 8 Simulated wave height of the sample sites ( WSW wind and WSW incident wave,  $H_{13\%}$ , m)

水位 Water level	西侧斜边岸线 West tilt side			西侧岸线 West side						湾底岸线 Rear side			东侧岸线 East side			
	WX1	WX2	WX3	W1	W2	W3	W4	W5	W6	WD1	WD2	WD3	E1	E2	E3	E4
设计高 Designed high	0.42	0.41	0.39	0.38	0.44	0.45	0.33	0.31	0.28	0.68	0.64	0.66	0.58	0.65	0.69	0.47
设计低 Designed low	0.37	0.36	0.34	0.33	0.38	0.39	0.29	0.27	0.25	0.63	0.61	0.62	0.55	0.60	0.62	0.44

## 4 结论

以某码头工程为例,利用 MIKE 21 BW 波浪模块及小区风成浪计算公式对港内波高进行计算,并对港内波高分布特征及风对波高的影响进行分析,结果表明,外海波浪传入港内后,受岸线、航道等因素的影响,港内波高有不同程度的减小。港池西侧斜边岸线及西侧岸线前沿水域受岸线遮蔽效果较好,波高相对较小,湾底及东侧岸线正对入射波传播方向,受外海波浪影响较大,波高相对较大。在 W 向风作用下,风浪对湾底岸线及东侧岸线前沿各观测点波高的贡献分别约达 9%~15% 及 12%~15%,WSW 向风作用时分别约为 13%~35% 及 16%~41%。由此可见,风作用对有限风区内波高的影响不容忽视。

### 参考文献:

- [1] 张义丰,牙韩争,李蓓,等.不同结构形式码头港内波高分布及越浪量试验研究[J].广西科学,2014,21(5):550-554.  
Zhang Y F, Ya H Z, Li B, et al. Experimental study on wave height in harbors and wave overtopping by different wharf structures[J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(5):550-554.
- [2] Ris R C, Booij N, Holthuijsen H. A third-generation wave model for coastal regions[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(4):7667-7684.
- [3] Radder A C. On the parabolic equation method for water-wave propagation[J]. J Fluid Mechanics, 1979, 95:159-176.
- [4] 杨会利,郑宝友,陈汉宝,等.掩护型小面积港域不同尺度对港内波浪条件的影响[J].水运工程,2009(8):68-72.  
Yang H L, Zheng B Y, Chen H B, et al. Influence of different dimensions of sheltered small-area harbor on wave conditions[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(8):68-72.
- [5] 张娜,郭科,王旭辉. MIKE21-BW 模型在日照港总平面设计方案可行性研究中的应用[J].中国港湾建设,2007,1:32-34.

- Zhang N, Guo K, Wang X H. Application of MIKE 21-BW model to feasibility study of general plan layout of Rizhao Port[J]. China Harbour Engineering, 2007, 1:32-34.
- [6] 陈新,刘明.应用 MIKE21 对人工岛周围波高分布的数值模拟[J].中国水运,2012(3):60-63.  
Chen X, Liu M. A numerical study of wave height distribution around artificial island using MIKE21[J]. China Water Transport, 2012(3):60-63.
- [7] 丁兆宽,宋荔钦.日照港石臼港区港内泊稳条件优化研究[J].水运工程,2014(4):63-68.  
Ding Z K, Song L Q. Optimization of berthing stability for phase IV & V terminals of Rizhao port[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(4):63-68.
- [8] 王中起.某拟建造修船厂工程波浪分析[J].水运工程,2011(5):45-49,62.  
Wang Z Q. Wave deformation near a dockyard[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(5):45-49,62.
- [9] 徐俊锋,方春明,黄烈敏,等.应用 MIKE21 BW 模型分析航道对波浪传播的影响[J].中国水利水电科学研究院学报,2014,9(4):292-297.  
Xu J F, Fang C M, Huang L M, et al. Analysis of the impact of navigation upon wave propagation by using MIKE 21 BW module[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 9(4):292-297.
- [10] 刘欣明,刘海成,迟杰.复杂水域波浪物理模型与数学模型对比研究[J].水道港口,2010,31(3):170-174.  
Liu X M, Liu H C, Chi J. Comparison study between numerical model and experiment test on wave in complex wave situation waters[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(3):170-174.
- [11] 白静,王朝辉,刘海源,等.大型港区港内波浪条件分析研究[J].水道港口,2010,31(5):429-432.  
Bai J, Wang C H, Liu H Y, et al. Analysis and study of wave condition in large port area[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(5):429-432.
- [12] 邱大洪.工程水文学[M].北京:人民交通出版社,1999.  
Qiu D H. Engineering hydrology[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.