

## · 港 口 ·



# 长周期波影响下 某海港工程码头布置方案比选

卢 昭<sup>1</sup>, 何 波<sup>2</sup>, 肖 鑫<sup>1</sup>, 赵鸿任<sup>1</sup>, 杨静思<sup>1</sup>

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中远海运港口有限公司, 上海 200080)

**摘要:** 针对在长周期波海域码头前期设计阶段如何通过数值模拟改进平面布置、减小影响的问题进行研究。采用WW3海浪模型、MIKE21SW模块以及MIKE21BW模块对长周期波进行较为全面的模拟, 并根据实测资料进行验证。模拟步骤可作为长周期波波浪模拟的一般操作流程。为了更好地揭示长周期波对船舶的响应影响, 将综合波分离为短波要素( $<30$  s)和长波要素( $\geq 30$  s), 并将 $H_s < 0.3$  m作为初步判断标准。得出结论: 码头布置需扩大掩护范围以阻挡长周期波主浪向, 同时尽量缩减口门尺寸以降低长周期波输入能量进而降低港内波高。

**关键词:** 长周期波; 数值模拟; 码头平面布置

中图分类号: U 652; P 731.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0094-05

## Comparison and selection of port general layout schemes of seaport project under influence of long-period waves

LU Zhao<sup>1</sup>, HE Bo<sup>2</sup>, XIAO Xin<sup>1</sup>, ZHAO Hong-ren<sup>1</sup>, YANG Jing-si<sup>1</sup>

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. COSCO SHIPPING Ports Limited, Shanghai 200080, China)

**Abstract:** The problem of how to make the plane layout better and reduce the influence of long-period waves through numerical simulation in the early design stage of the wharf in long-period waves sea area is studied. This paper uses the WW3 ocean wave model, MIKE21SW module, and MIKE21BW module to conduct a more comprehensive simulation of long-period waves which is verified based on the measured data. The simulation steps can be used as a general operation procedures for long-period wave simulation. To better reveal the impact of long-period waves on the ship's response, the integrated waves are separated into short wave elements( $<30$  s) and longwave elements ( $\geq 30$  s), and  $H_s < 0.3$  m is used as the preliminary judgment standard. It is concluded that the port general layout needs to expand the shielding range to block the main wave direction of long-period waves, and at the same time minimize the size of the entrance door to reduce the long-period wave input energy and reduce the wave height in the port.

**Keywords:** long-period wave; numerical simulation; port general layout

长周期波在港口工程一般指周期30 s以上的波浪, 包括次重力波(碎波拍)、副震荡、海啸、潮汐等; 涌浪一般指周期9~25 s或者9~30 s的波浪。长周期波由于能量较大, 对于码头的作业影响较大, 主要是引起船舶运动量增大, 从而使缆

绳荷载加大, 容易造成断缆, 进而影响码头作业。长周期波与短周期波的特性相差很大, 长周期波在斜坡堤甚至平缓的海滩上都有可能发生反射<sup>[1]</sup>。由于长周期波的反射特性, 在港口或海湾等特定地形情况下, 可能产生多次反射, 如果该长周期

波的频率与港池的自振频率接近, 波浪的振幅将会叠加, 形成较大幅度的港内振荡<sup>[2]</sup>。因此, 有必要对口门及码头布置进行研究。

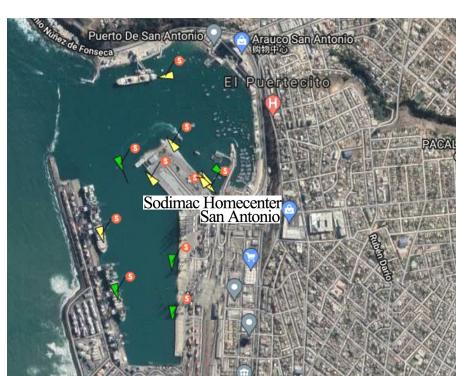
我国近海受长周期波影响相对较小, 国外南美洲西侧岸线, 如秘鲁、智利等受长周期波影响较大。一般利用环抱式防波堤阻挡长周期波主浪向波浪, 同时尽可能减少口门宽度来降低长周期波进入港池的波能, 进而减轻对船舶作业的影响(图 1)。



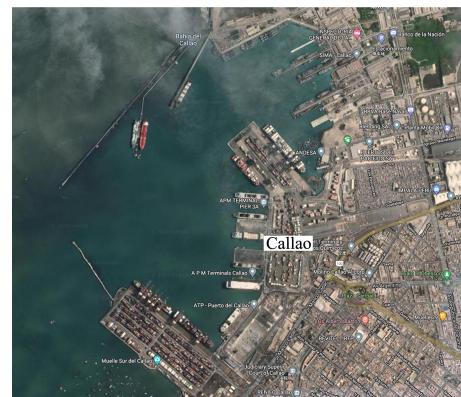
a) 秘鲁 Callao 港



b) 秘鲁 Mataran 港



c) 智利 San Antonio 港



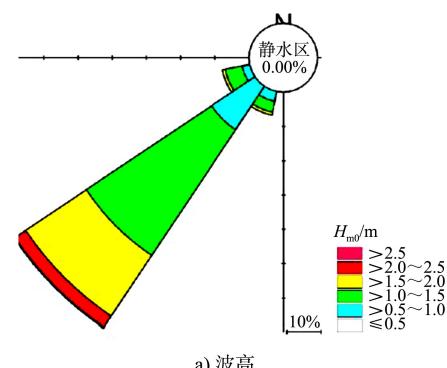
d) 秘鲁 Callao 港

图 1 南美洲西侧岸线受长周期波影响较大的港口布置

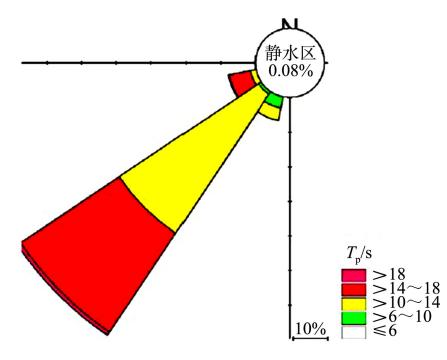
## 1 工程概况

秘鲁某拟建工程计划建设防波堤及港池内 3 个泊位, 其中 1 号泊位为多用途泊位, 长度 345 m; 2、3 号泊位为专业化集装箱泊位, 长度为 860 m; 1 号泊位与 2、3 号泊位岸线垂直布置。

当地长浪向为 NNW, 根据 2008 年 4 月—2009 年 4 月观测结果, 波高  $H_{m0}$  90% 在 1.8 m 以下, 观测到的最大波高值接近 2.8 m; 谱峰周期  $T_p$  90% 分布在 17 s 以下, 观测到的最长谱峰周期为 24 s; 波向分布集中, 主要分布在  $225^\circ \sim 240^\circ$ 。2008—2009 年波玫瑰图见图 2。



a) 波高



b) 谱峰周期

图 2 2008 年 4 月—2009 年 4 月 ADCP 波高及波周期玫瑰图

从布局上讲, 一是在考虑整体费用的情况下尽量挡住主浪向 NNW 向; 二是尽量缩小口门宽度, 降低港池的能量; 三是优化港池的尺寸<sup>[3]</sup>, 尽量减小港池内长周期波的震荡。为此, 设计了 2 个方案, 方案布置见图 3。方案 1 防波堤采用环抱式布置, 其中 AB 段轴线方向为 43°~223°, BC 段轴线方向为 133°~313°, CD 段轴线方向为 1°~181°, 口门宽度为 595 m; 方案 2 与方案 1 的不同是顺延 BC 段, 延长段在主浪向垂线遮挡长度相同, 口门宽度为 862 m。

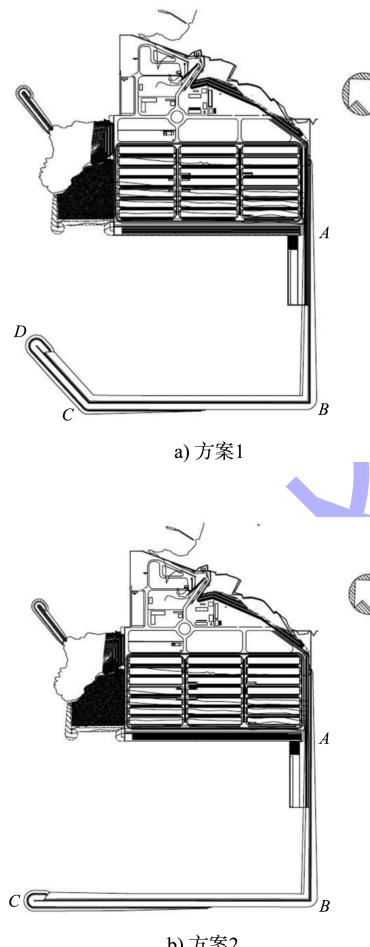


图 3 秘鲁某工程平面布置

## 2 技术路线

1) 数学模型实测验证。应用工程区附近的实测数据, 对数学模型进行验证。以 CFSR 再分析气象数据为驱动, 建立 WW3 海浪模型, 得到实测数据时间段距离工程区 90 km 的数据点的波浪要素时间序列。再建立 SW 模型, 以工程区外 90 km 作

为计算边界, 计算实测位置的波要素, 将实测数据和模拟数据进行比较。2) SW 得到的波浪序列作为 BW 的输入进行港池内波浪的模拟及相应分析研究。3) 根据验证后的模型针对不同的布局进行初步波浪模拟, 根据判定标准 ( $T_p \geq 30$  s,  $H_s < 0.3$  m) 选择平面布局方案。

### 2.1 海浪模型

WW3 采用的基本能谱为以波数和方向为自变量的二维波作用量谱, 波浪能谱平衡方程为守恒形式传播方程。源项包含了风输入项、非线性波相互作用项、白帽耗散项、显式的涌浪耗散项、线性输入项、浅水区的底摩阻项、极浅水域的破碎项和三波相互作用、底部引起的散射等; 输出参数包含了常用的平均波要素和谱变量。将 WW3 模型输出的波浪条件作为 SW 模型的输入条件。

建立 WW3 模型, 模型输入项主要包括地形网络和风场, 输出为波浪频谱和方向谱以及积分出的平均波要素。驱动场采用 CFSR 背景风场。模型范围选定为 50°W~104°W, 3°S~70°S, 地形网格尺寸为 27.75 km×27.75 km。模型输出距离工程区 90 km 的波浪要素。

### 2.2 SW 模型

MIKE21 SW<sup>[4]</sup> 基于波作用守恒方程, 采用波作用密度  $N(\sigma, \theta)$  来描述波浪。模型的自变量为相对波频率  $\sigma$  和波向  $\theta$ 。波作用密度与波能谱密度  $E(\sigma, \theta)$  的关系为:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为相对频率;  $\theta$  为波向。

在笛卡尔坐标系下, MIKE21 SW 的控制方程, 即波作用守恒方程可以表示为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{v}$  为波群速度;  $S$  为能量平衡方程中以谱密度标识的源函数。

在球坐标系下,

$$\hat{N} d\sigma d\theta d\varphi d\lambda = N d\sigma d\theta dx dy \quad (3)$$

$$\hat{N} = NR^2 \cos\varphi = \frac{ER^2 \cos\varphi}{\sigma}$$

式中:  $R$  为地球半径;  $\varphi$  为纬度;  $\lambda$  为经度;  $N$  为波作用密度;  $\hat{N}$  为球坐标系下波作用密度。

波作用守恒方程的形式为:

$$\frac{\partial \hat{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \varphi} C_\varphi \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda} C_\lambda \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta \hat{N} = \frac{\hat{S}}{\sigma} \quad (4)$$

式中:  $\hat{S}$  为总的源函数,  $\hat{S}(\mathbf{x}, \sigma, \sigma, t) = SR^2 \cos \varphi$ ;  $C_\sigma$  为由于水深和水流变化造成的相对频率的变化;  $C_\theta$  为由水深和水流引起的折射;  $C_\varphi$  为波群在纬度方向上的分量;  $C_\lambda$  为波群在经度方向上的分量。

MIKE 21 SW 模型中的源函数项描述了各种物理现象的源函数的叠加:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (5)$$

式中:  $S_{in}$  为风输入的能量;  $S_{nl}$  为波与波之间的非线性作用引起能量损耗;  $S_{ds}$  为由白帽引起能量损耗;  $S_{bot}$  为底摩阻引起能量损耗;  $S_{surf}$  为由于水深变化引起的波浪破碎产生的能量损耗。

SW 模型可以用于模拟在近海及海岸地区风生浪和涌浪的生长、衰退以及变形。工程区附近海岸相对平顺, 模型地形长约 90 km、宽约 310 km, 计算域内采用三角网格剖分, 工程区附近网格进行了加密, 两节点间的距离为 100~400 m。将 WW3 模型输出的波浪条件作为 SW 模型的输入条件。

表 1 2004—2008 年波高、波向联合频率分布

$H_s/m$	联合频率分布/%							总计
	波向 $180^\circ \sim 195^\circ$	波向 $195^\circ \sim 210^\circ$	波向 $210^\circ \sim 225^\circ$	波向 $225^\circ \sim 240^\circ$	波向 $240^\circ \sim 255^\circ$	波向 $255^\circ \sim 270^\circ$		
0~<0.3	-	-	-	-	-	-	-	0
0.3~<0.7	-	-	-	-	-	-	-	0
0.7~<1.1	0.08	1.64	10.34	11.34	1.20	0.15	24.75	
1.1~<1.5	0.03	1.46	14.87	26.57	1.56	0.33	44.82	
1.5~<1.9	-	0.46	5.30	16.82	0.10	-	22.68	
1.9~<2.3	-	-	1.66	4.99	-	-	6.65	
2.3~<2.7	-	-	0.03	0.97	-	-	1.00	
2.7~<3.5	-	-	-	0.10	-	-	0.10	
总计	0.11	3.56	32.20	60.79	2.86	0.48	100.00	

通过表 1 可以看出, 波向主要集中在  $225^\circ \sim 240^\circ$ , 最大波高为 3.5 m, 选取最大波高 ( $H_{m01} = 3.50$  m,  $T_{p1} = 17.0$  s,  $Dir_1 = 227.5^\circ$ ) 作为代表波浪条件输入 BW 模型进行计算。

### 3.2 建立 BW 模型

BW 模块可以模拟波浪折射及浅水变形、绕

### 2.3 实测资料验证

提取 SW 模型 ADCP 实测点模拟的波要素与实测数据比较, 模型计算的结果与实测数据的趋势完全符合, 只在个别位置上略有差异, 比较结果见图 4。通过实测资料验证, 说明所建立的模型较好地反映了实际情况, 可以继续开展相关工况的模拟研究。

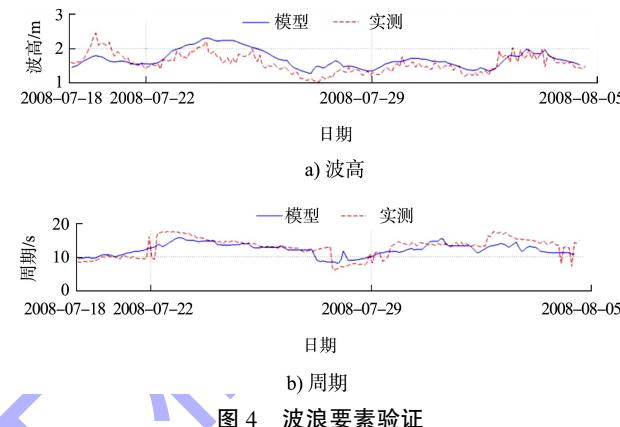


图 4 波浪要素验证

### 3 数值模拟

#### 3.1 BW 模型输入条件的确定

建立 WW3 模型, 本模型计算时间为 2004—2008 年。提取工程区 90 km 处的波浪要素, 再使用 MIKE21SW 波谱模块建立深水波浪模型, 提取  $-25$  m 处 2004—2008 年工程区附近的波浪要素联合频率分布, 联合分布见表 1。

射、底摩阻损耗、反向散射、部分反射或透射等, 采用 BW 模块建立模型, 选取两种布置方案。模型地形为四边形网格, 网格数为  $1200 \times 800$ , 网格大小  $4 \times 4$  m。曼宁系数取 30。自然岸滩反射系数为 0.1, 码头桩基结构反射系数为 0.5, 主防波堤内侧反射系数为 0.4。

### 3.3 判断标准

采用 MIKE 软件自带的程序对混合波浪进行分离, 分为周期  $<30$  s 波浪和  $\geq 30$  s 波浪, 针对性地体现长周期波的影响; 作为初步判断标准, 以周期  $\geq 30$  s 波浪的波高  $<0.3$  m 作为判断掩护合格的指标; 最终掩护标准应根据船舶系泊分析结果验证。

### 3.4 计算结果

每个泊位选取 3 个典型位置提取结果进行分析, 样点布置见图 5。相关点位波浪参数见表 2。

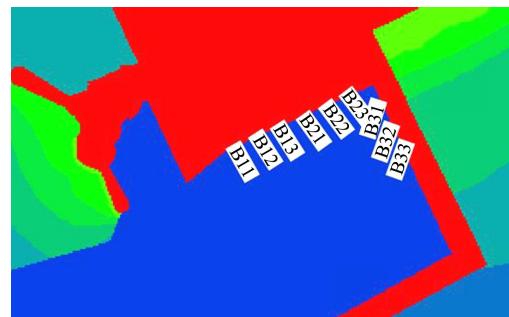


图 5 泊位分析点位置

表 2 相关点位波浪参数

方案	分析点	$H_{m0}/m$	$T_{02}/s$	$H_{m0-Long}/m$	$T_{02-Long}/s$	$H_{m0-Short}/m$	$T_{02-Short}/s$
1	B11	0.49	18.31	0.22	72.77	0.44	16.48
	B12	0.34	19.46	0.21	73.41	0.27	15.42
	B13	0.28	21.70	0.21	71.01	0.19	14.89
	B21	0.27	22.30	0.20	69.35	0.17	14.87
	B22	0.25	22.30	0.19	80.25	0.16	14.82
	B23	0.30	25.84	0.24	94.95	0.19	16.49
	B31	0.32	31.56	0.28	80.23	0.15	15.46
	B32	0.33	25.45	0.26	82.06	0.20	15.82
	B33	0.36	22.24	0.23	80.71	0.27	17.10
2	B11	0.61	17.90	0.24	70.44	0.56	16.46
	B12	0.39	18.41	0.26	72.14	0.30	14.08
	B13	0.34	18.42	0.24	70.46	0.24	13.29
	B21	0.30	18.77	0.21	67.10	0.21	13.27
	B22	0.28	18.99	0.21	78.24	0.19	13.21
	B23	0.33	25.40	0.27	93.05	0.18	14.28
	B31	0.41	25.94	0.33	81.56	0.24	15.64
	B32	0.53	19.99	0.30	84.42	0.44	16.75
	B33	0.47	20.99	0.26	82.49	0.39	17.73

通过表 2 结果可以看出: 无论是长波(周期  $\geq 30$  s)还是短波(周期  $<30$  s), 方案 1 波高掩护效果均更好; 长周期波波高均小于 0.3 m, 掩护效果较好。

## 4 结论

1) 通过与实测数据进行验证, 证明建立的模型可以模拟本海域的波浪情况。

2) 通过两种方案的比选可以看出, 防波堤布置掩护主浪向、在满足通航的情况下尽可能将口门缩窄的布置方案, 泊位处受长周期波影响相对较小。

3) 模型分离出来的长短波序列可作为后续系泊分析的输入条件。

4) 在长周期波影响海域可采用周期  $\geq 30$  s 以上波浪的波高  $<0.3$  m 作为初步判断掩护效果

指标。

5) 在长周期波影响海域, 若采用环抱式布置形式, 需掩护住主浪向, 同时尽可能将口门缩窄, 减少进入港池内的长波能量, 以减少泊位处受长周期波的影响。

## 参考文献:

- [1] 严恺. 海港工程[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [2] BRUUN P. Port engineering[M]. 3rd ed. Texas: Gulf Publishing Co., 1981.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [4] DHI. Mike Support document/Mike 21 Boussinesq Waves/Scientific Document[R/OL]. (2020-03-14) [2021-03-18] <http://doc.mikepoweredbydhi.com/webhelp/2020/Top/index.htm#%3E%3Epan=2>. (本文编辑 武亚庆)