



东澳岛海域防波堤工程波浪 分布特性数学模型研究

陈星¹, 徐雪松², 朱峰³

(1. 广东省交通运输规划研究中心, 广东 广州 510101; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;
3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 为定量论证规划防波堤建设方案对珠海港万山区东澳岛客货运码头工程的掩护效果, 基于SWAN波浪数学模型和中国南海历史台风浪资料的统计分析结果, 对近岸波浪的传播变形进行计算。采用 Boussinesq 方程数学模型分析正常大浪条件下和极端大浪条件下不同防波堤规划方案所产生的港内特征点处波浪要素。结果表明: 1) 万山列岛对 SE 向外海波浪具有掩护效应。因此 E 向外海波浪是影响整个港域波浪条件的控制工况。2) 在 2 a 一遇波浪作用下, 防波堤方案 1 可使北岸各点 $H_{4\%}$ 减小约 40%, 南岸各点 $H_{4\%}$ 减小约 50%, N_6 点可作业天数由无掩护条件下的 29.9 d 减小至 2.6 d; 防波堤方案 2 由于加强湾口北侧的掩护, 因此北岸波高降低超过 50%, 南岸波高降低达 65%, N_6 点可作业天数进一步降低至 0.7 d。3) 在 50 a 一遇波浪作用下, 防波堤方案 1 可使北岸各点 $H_{13\%}$ 减小 30%, 南岸各点 $H_{13\%}$ 减小 40%; 防波堤方案 2 可使北岸各点 $H_{13\%}$ 减小 40%, 南岸各点 $H_{13\%}$ 减小 60%。因此规划方案 2 对港域的掩护效果优于方案 1。

关键词: 东澳岛海域; 防波堤工程; 波浪数学模型; 设计波浪要素

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0010-07

Mathematical modeling of wave distribution characteristics of breakwater project in Dong'ao Island sea area

CHEN Xing¹, XU Xuesong², ZHU Feng³

(1. Guangdong Provincial Transportation Planning & Research Center, Guangzhou 510101, China;
2. Changjiang Survey Planning Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
3. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: To quantitatively demonstrate the shielding effect of the planned breakwater construction scheme on the Dong'ao Island passenger and freight terminal project in Wanshan Port Area of Zhuhai Port, the propagation deformation of nearshore waves is calculated based on the SWAN wave mathematical model and the statistical analysis results of historical typhoon wave data in the South China Sea. The Boussinesq equation mathematical model is used to analyze the wave parameters at the characteristic points in the port produced by different breakwater planning schemes under normal strong wave conditions and extreme strong wave conditions. The results show that: 1) the Wanshan islands have a shielding effect on the SE direction sea waves. Therefore, the E-direction offshore waves are the control condition affecting the wave distribution in the whole port area. 2) Under the action of waves with a return period of 2 years, breakwater scheme 1 can reduce $H_{4\%}$ at each point on the north bank by about 40%, and by about 50% on the south bank, the number of working days at point N_6 can be reduced from 29.9 days without breakwater to 2.6 days. Breakwater scheme 2 strengthens the cover on the north side of the bay mouth,

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 陈星 (1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程设计、咨询工作。

resulting in a reduction of over 50% in wave height on the north bank and about 65% in wave height on the south bank. The working days at point N_6 are further reduced to 0.7 days. 3) Under the action of 50 year return period wave, the breakwater scheme 1 can reduce $H_{13\%}$ at each point on the north bank by 30% and by 40% on the south bank. Breakwater scheme 2 can reduce $H_{13\%}$ at each point on the north bank by 40% and by 60% on the south bank. Therefore, breakwater scheme 2 has a better covering effect on the port area than scheme 1.

Keywords: Dong'ao Island sea area; breakwater project; wave mathematical model; design wave parameter

1 工程概况

珠江口是一个南北走向、平面呈喇叭形的河口湾,从湾顶虎门口—湾口的桂山岛长约 70 km,湾顶鸡抱沙—交椅湾宽约 11 km,湾中唐家湾—蛇口湾宽约 28 km,湾口横琴岛—香港宽约 60 km。珠江口地形西北高、东南低,湾内浅滩和深槽相间,自西向东有西部浅滩、伶仃水道、矾石浅滩、矾石水道、东部浅滩,形成三滩二槽结构。珠江口水深自外海向湾内逐渐减小;湾内有大铲、小铲、内伶仃岛和棋澳岛;湾口有大屿山、蛛洲列岛等岛屿;湾外自西向东展布有万山列岛、三门列岛、佳蓬列岛和担杆列岛的遮挡^[1],见图 1。

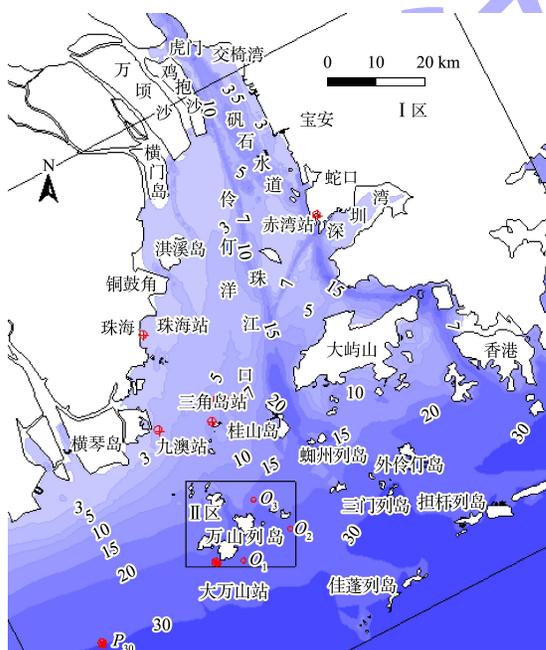
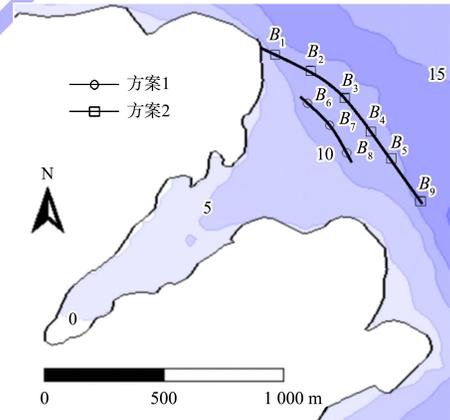


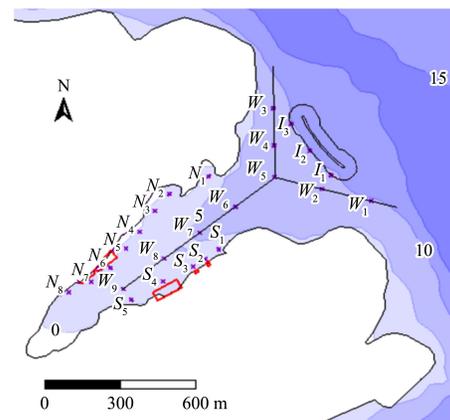
图 1 珠江口及其附近水域水下地形

本研究依托珠海港万山港区东澳岛客货运码头工程,地处珠江东澳岛东侧海湾,工程区北面珠江口,东北与蛛洲列岛隔海相望,东侧面向三门列岛,东南向依托万山列岛形成掩护。

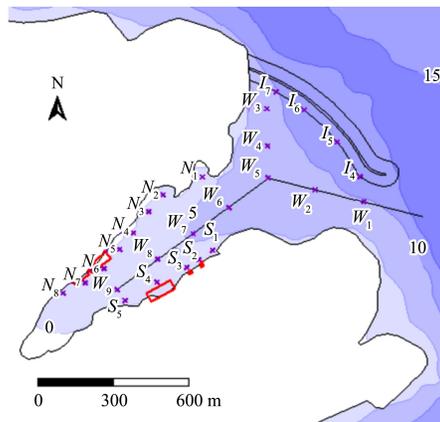
珠海港万山港区东澳岛客货运码头防波堤工程平面设计 2 个方案,其中方案 1 防波堤长度为 280 m,方案 2 采用单突堤单口门的形式,堤长为 730 m,见图 2。本文针对不同掩护防波堤条件下的东澳岛客运码头的波浪条件开展数学模型计算工作,利用 SWAN 数值模型和 Boussinesq 方程数学模型^[2],根据历史风浪资料确定外海深水波条件,模拟波浪传播变形并计算港域波况。定量评价不同防波堤方案的港域波浪条件,为后续规划设计提供科学依据。



a) 计算点位分布



b) 防波堤方案1



c) 防波堤方案2

图2 工程平面防波堤规划方案及计算点位布置

2 外海波浪数学模型

2.1 SWAN 波浪数值模拟模型

第三代浅水波浪谱模型 SWAN 能准确合理地模拟复杂的潮流、地形、风场环境下的波浪场。不仅可以合理预报计算域中波高变化规律，还可以合理地预报计算域内波陡、波浪行进方向、近底水质点的运动速度、波能传播方向及能量耗散率等海岸工程所需的重要参数^[3]。

SWAN 不是以能谱密度而是以动谱密度表示随机波^[4]，因为在流场中动谱密度守恒，而能谱密度不守恒，动谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 为能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 与相对频率 σ 之比。 $N(\sigma, \theta)$ 随时间、空间而变化。

在笛卡尔坐标系下，动谱能量平衡方程可表示为^[5]：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式中：方程左边第1项 N 为随时间的变化率；第2和第3项表示动谱密度在地理坐标空间 x 、 y 方向上的传播；第4项表示由于流场和水深所引起的动谱密度在相对频率 σ 空间的变化；第5项表示动谱密度在谱分布方向 θ 空间(谱方向分布范围)的传播；方程右边的 S 代表以谱密度表示的源汇项，包括风能输入、波与波之间非线性相互作用和由于底摩擦、白浪、破碎等引起的能量损耗；

C_x 、 C_y 、 C_σ 和 C_θ 分别代表在 x 、 y 、 σ 和 θ 空间的波浪传播速度。

2.2 外海输入波浪条件推算

基于第三代海浪数值模拟模型 SWAN，采用两重嵌套的方案，计算范围包括大、小两个不同空间范围的计算区域(图1)，其中，I区为珠江口水域大范围计算模型，空间范围为 $120 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ ，网格步长为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 。II区为万山列岛附近水域计算模型，空间范围为 $19.5 \text{ km} \times 15.0 \text{ km}$ ，网格步长为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 。I区大模型的外海入射波边界与 30 m 水深平行，并以 30 m 水深的极值波浪条件分析结果作为模型边界的控制条件，对外海不同重现期(包括 E—ENE、SE—ESE 以及 SSE 向)的波浪由较深水域向近岸的传播过程进行数值计算，研究波浪向岸传播过程中的强度变化，提取嵌套区域 II 区的波谱边界条件。

通过大范围计算模型 I 分析得到的万山列岛附近 $O_1 \sim O_3$ 点(图1)50 a 一遇 $H_{4\%}$ 、 $H_{13\%}$ 和局地波向计算结果，见表1。

表1 万山列岛附近特征点极端高水位 50 a 一遇波浪计算结果

方向	点位	$H_{4\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	Dir/(°)
E—ENE	O_1	9.70	8.00	90
	O_2	9.60	7.90	90
	O_3	7.70	6.40	88
SE—ESE	O_1	11.80	9.90	122
	O_2	10.70	8.90	110
	O_3	8.60	7.20	119
SSE	O_1	11.10	9.30	153
	O_2	9.70	8.10	148
	O_3	8.20	6.80	147

基于表1中大范围计算模型 I 的分析结果，将 O_1 、 O_2 、 O_3 点位上的波浪特征当作输入条件加载于嵌套模型区域 II 中，作为入射波的波谱边界条件，采用波浪数值计算模型，计算万山列岛附近水域对不同方向、不同重现期的波浪在不同水位下的波浪要素分布。计算并提取各工况下拟建防波堤位置外侧和进港航道水域各特征点不同方向 $H_{13\%}$ 波高的统计结果，见表2。

表 2 湾口特征点极端高水位 50 a 一遇波浪计算结果

点位	50 a 一遇波浪 $H_{13\%}$ 波高/m				
	SSE	SE—ESE	E—ENE	NE—NNE	N
B_1	3.42	5.27	5.58	4.15	3.50
B_2	3.58	5.49	5.74	4.24	3.61
B_3	3.62	5.58	5.82	4.26	3.63
B_4	3.63	5.60	5.84	4.27	3.65
B_5	3.74	5.72	5.91	4.32	3.71
B_6	3.42	5.34	5.70	4.21	3.52
B_7	3.39	5.29	5.68	4.22	3.52
B_8	3.35	5.24	5.66	4.22	3.54
B_9	3.69	5.51	5.73	4.31	3.69

计算结果显示: 万山列岛(主要指白沥岛)所处地理位置对 SSE 和 SE—ESE 向外海波浪往东澳岛的传播具有一定的掩护效应, 工程规划防波堤前沿受到 E 向外海波浪的作用最为强烈。在工程规划拟建设防波堤位置处, 50 a 一遇的最大有效波高为 5.91 m, 最大波浪出现在 B_5 点, 各点最大统计波浪均由 E—ENE 向外海浪所致。E—ENE 向外海浪在东澳岛附近的波高分布矢量云图见图 3。

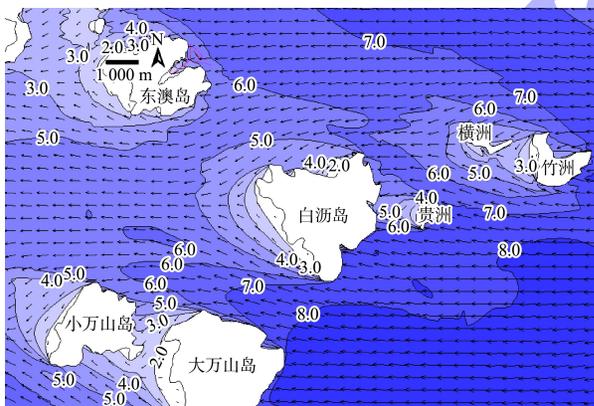


图 3 极端高水位 E—ENE 向 50 a 一遇 $H_{13\%}$ 波高等值线和流场矢量

3 港域近岸波浪数学模型设置

大量研究成果表明, 当外海波浪传递至水深较浅的近岸时, 波浪之间的相互作用和非线性效应显著增强, 基于能量方程的描述往往不够精确^[6]。经多年开发、验证和比较分析, 表明 Boussinesq 模型不仅可以较好地描述近岸水域波浪传播过程中发生的折射、绕射、反射和非线性波-波相互作用, 而且可以推广至研究破碎区和上爬区的波浪

现象^[7]。Boussinesq 方程在笛卡尔坐标系下的控制方程可表达为^[8]:

1) 连续方程:

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

2) x 方向的动量方程:

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

3) y 方向的动量方程:

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right) + \frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_y = 0 \quad (4)$$

式中: ξ 为波动自由面; P 和 Q 分别为 x 方向和 y 方向上的体积通量; $h = d + \xi$ 为总水深, d 为静水深; C 为谢才系数; n 为孔隙层的孔隙率; α 和 β 分别为反映孔隙层内层流和紊流的阻力系数; R_{xx} 、 R_{xy} 和 R_{yy} 分别为波浪破碎时水滚所引起的剩余动量流; ψ_x 和 ψ_y 为 Boussinesq 方程的频散项。

根据 Boussinesq 方程的计算性能及规划方案周边水域地形变化的特点, 选取模型计算的空间范围为 $2\,450\text{ m} \times 2\,450\text{ m}$, 空间计算所依赖的网格步长为 $3.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$, 时间步长受到 CFL(收敛条件判断数)条件的限制^[9], 取为 0.07 s ; 计算的波浪时长取为 28 min 。模型通过源造波法在指定造波线上生成多向不规则波, 模型的四周设为带 20 个网格宽度的海绵层吸波边界。对于斜坡式结构物, 反射系数控制约 0.5, 对于岸壁陡峭、表面较为光滑的自然基岩, 反射系数设置为 0.6。

4 计算结果分析

4.1 正常工况下波浪要素对比

通过联合折射、绕射和反射港域波浪数学模型计算, 首先评估 2 a 一遇波浪影响下的港域波浪条件。计算波向包括: SSE、SE—ESE、E、ENE 和 NE 向。计算时考虑已建和拟建港域结构物, 以及自然岩壁对波浪的反射影响。各方向波浪的计

算结果对比表明：E向波浪对港池内的影响最为强烈，因此图4列举了E向波浪作用下未建防波堤和两种防波堤建设方案分别对应的 $H_{13\%}$ 波高等值线分布。

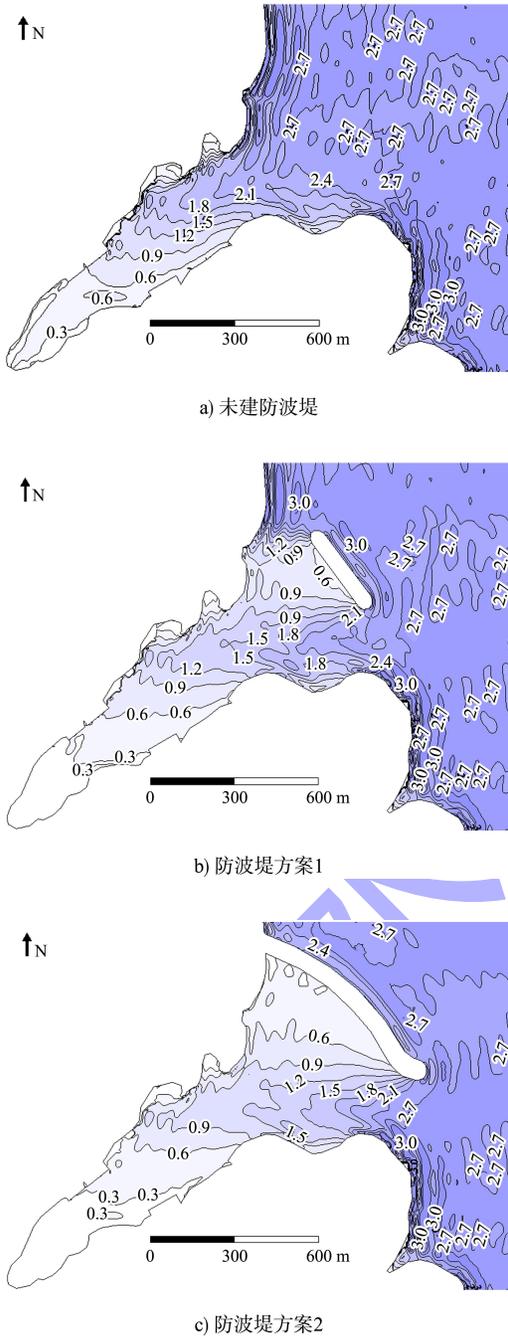


图4 设计高水位E向2a一遇 $H_{13\%}$ 波高等值线

由图4可知：波浪强度在空间变化上总体呈现自口门向港内逐渐减小的趋势，由于E向波浪直接作用于湾口北岸，因此北岸波浪的强度总体强于南岸。

$H_{4\%}$ 作为评价测点位置处波浪条件的常用指标，通常被直接用于定量评价泊位可作业条件的重要依据。为便于比较，表3给出未建防波堤和两种防波堤建设方案下，北侧小艇停靠区(N_1 和 N_2 点)、在建1000GT客运码头 N_6 点、已建东澳客运码头 N_7 点、南侧民用加油码头 S_2 点、军用码头 S_3 点以及拟建500吨级杂货码头 S_4 点设计高水位下2a一遇波浪作用下的 $H_{4\%}$ 波高结果。通过表3数值对比可知：在湾口建设防波堤可较为显著地缓解港域波浪条件，防波堤方案1可使北岸各点 $H_{4\%}$ 减小约40%，南岸各点 $H_{4\%}$ 减小约50%；防波堤方案2加强了湾口北侧的掩护，使得港池内的波高进一步降低，相比无防波堤方案，北岸波高降低超过50%，南岸波高降低达65%。

表3 设计高水位2a一遇波浪特征点 $H_{4\%}$ 波高计算结果

点位	无防波堤		防波堤方案1		防波堤方案2	
	波高/m	方向	波高/m	方向	波高/m	方向
N_1	1.27	E	0.80	E	0.73	E
N_2	0.75	ENE	0.52	E	0.41	E
N_6	1.43	ENE	0.84	E	0.62	E
N_7	0.99	ENE	0.58	ENE	0.40	E
S_2	1.27	NE	0.70	E	0.52	E
S_3	1.20	NE	0.58	E	0.42	E
S_4	1.08	NE	0.50	ENE	0.34	E

为保证船舶作业的平稳性，码头泊位前沿的允许作业波高通常设置为0.60m。因此，基于近岸波浪数学模型的港域波浪分布计算结果，进一步估算各类工况条件下，港内南北岸各码头泊位前沿水域受不同方向波浪作用时， $H_{4\%}$ 超过0.60m以上的不可作业天数，见表4。

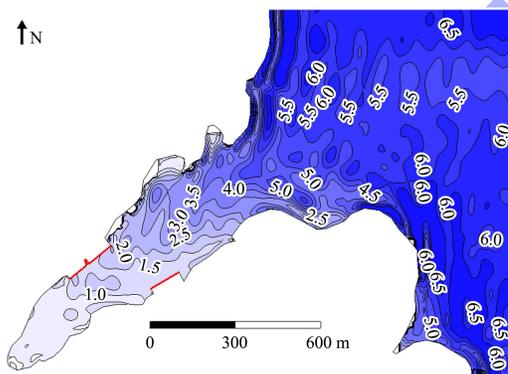
表4 设计高水位2a一遇波浪特征点不可作业天数计算结果

点位	无防波堤	防波堤方案1	防波堤方案2
N_1	18.1	2.0	1.6
N_2	1.3	0.0	0.0
N_6	29.9	2.6	0.7
N_7	2.7	0.0	0.0
S_2	22.3	1.1	0.0
S_3	19.3	0.3	0.0
S_4	15.8	0.0	0.0

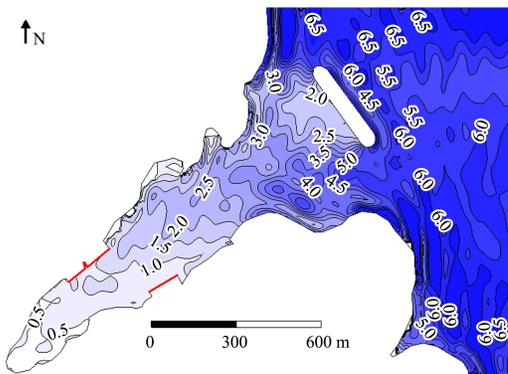
由表 4 可知: 防波堤方案 1 实施后, 在建客运码头(N_6 点)前沿 $H_{4\%}$ 波浪波高大于 0.60 m 以上的天数由无掩护条件下的 29.9 d 减小至 2.6 d。防波堤方案 2 实施后, N_6 点 0.60 m 以上波浪的出现天数进一步降低至 0.7 d。因此防波堤的建设可以大大增加港内各泊位的可作业天数, 为进港作业船舶提供有利环境。

3.2 极端工况下波浪要素对比

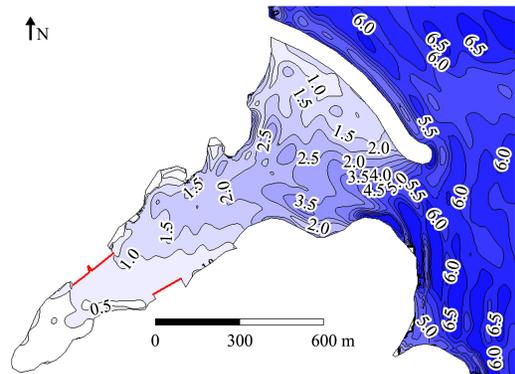
为进一步评估不同防波堤建设方案对东澳岛港区内波浪条件的改善效果, 采用 Boussinesq 方程数值模型, 开展极端高水位 50 a 一遇波浪条件下对无防波堤和防波堤方案 1、2 情况下的波浪传播与分布特性对比。计算波向同样考虑 SSE、SE—ESE、E、ENE 和 NE 5 个方向, 图 5 为最不利工况下(E 向波浪作用), 3 种平面布置条件 50 a 一遇 $H_{13\%}$ 波高分布结果。



a) 未建防波堤



b) 防波堤方案1



c) 防波堤方案2

图 5 极端高水位 E 向 50 a 一遇 $H_{13\%}$ 波高等值线

由图 5 可知: 受极端高水位 50 a 一遇波浪的作用, 各种掩护方案下港池内的波浪分布比 2 a 一遇的波浪作用结果显著增强。为验证大浪是否对工程建筑物造成破坏, 表 5 给出在极端高水位 50 a 一遇外海条件下无防波堤以及两种防波堤建设方案所对应的港区内航道 $W_5 \sim W_9$ 点、港区北侧 $N_1 \sim N_8$ 点、以及南侧 $S_1 \sim S_5$ 点 $H_{13\%}$ 波高的计算结果。

表 5 极端高水位 50 a 一遇波浪特征点 $H_{13\%}$ 波高计算结果

点位	无防波堤		方案 1		方案 2	
	波高/m	位置	波高/m	位置	波高/m	位置
航道	4.52	W_5	3.62	W_5	2.65	W_5
防波堤内侧	-	-	3.61	I_1	2.91	I_4
港域北侧	3.45	N_3	2.38	N_3	1.91	N_3
港域南侧	2.75	S_1	1.49	S_1	1.06	S_1

港区内航道所有测点 $W_5 \sim W_9$ 中 W_5 点波浪最强, 无防波堤工况下 50 a 一遇的最大 $H_{13\%}$ 为 4.52 m, 2 个防波堤建设方案可以分别使该点波高降低约 20% 和 40%。

港区北侧所有测点 $N_1 \sim N_8$ 中 N_3 点波浪最强, 无防波堤工况下 50 a 一遇的最大 $H_{13\%}$ 为 3.45 m, 2 个防波堤建设方案可分别使得该点波高降低 30% 和 45%; 港区北侧在建 1 000 GT 客运码头泊位前沿 N_6 点的最大 $H_{13\%}$ 为 2.66 m, 2 个防波堤建设方案可以分别使得该点波高降低 40% 和 60%; 同样, 2 种防波堤方案可分别使小艇停靠区 N_1 和 N_2 点附近的最大 $H_{13\%}$ 降低 30% 和 40%。

港区南侧所有测点 $S_1 \sim S_5$ 中 S_1 点波浪最强, 无防波堤工况下 50 a 一遇的最大 $H_{13\%}$ 为 2.75 m, 2 个防波堤建设方案可分别使该点波高降低 45% 和 60%; 2 个防波堤方案可使港区南侧拟建 500 吨级杂货码头泊位前沿 S_4 点、民用加油码头 S_2 点和军用油库 S_3 点的最大 $H_{13\%}$ 分别降低 40% 和 60%。

4 结论

1) 万山列岛对 SE 向外海波浪向东澳岛的传播具有一定的掩护效应。在防波堤前沿水域, E 向外海波浪的作用为最强烈, 在极端高水位 50 a 一遇波浪作用下, 东澳岛港池口门处的最大 $H_{13\%}$ 为 5.91 m。空间分布上向西逐渐减弱。

2) 规划防波堤对港域波浪具有良好的掩护效果, 在使用期设计高水位 2 a 一遇 E 向波浪作用下, 防波堤方案 1 可使北岸各点 $H_{4\%}$ 减小约 40%, 南岸各点 $H_{4\%}$ 减小约 50%, 在建客运码头 N_6 点前沿 $H_{4\%}$ 波浪波高大于 0.60 m 以上的天数由无掩护条件下的 29.9 d 减小至 2.6 d; 防波堤方案 2 由于加强湾口北侧的掩护, 因此北岸波高降低超过 50%, 南岸波高降低达 65%, N_6 点 0.60 m 以上波浪的出现天数进一步降低至 0.7 d。

3) 在 50 a 一遇 E 向波浪作用下, 防波堤方案 1 可使内航道最大 $H_{13\%}$ 降低 20%, 北侧泊位前最大 $H_{13\%}$ 整体降低 30%, 南侧泊位前最大 $H_{13\%}$ 整体降低 40%; 防波堤方案 2 可使内航道最大 $H_{13\%}$

降低 40%, 北侧泊位前最大 $H_{13\%}$ 整体降低 40%, 南侧泊位前最大 $H_{13\%}$ 整体降低 60%。因此规划方案 2 对港域波浪的掩护效果优于方案 1。

参考文献:

[1] 邱桔斐, 马越, 徐新华. 长江口外海域波浪场数值模拟[J]. 水运工程, 2011(10): 11-14.

[2] 林毅辉, 郑艺妃, 潘伟然, 等. 西沙湾工程波浪推算及波浪场数值模拟[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(1): 80-86.

[3] 周良明, 吴伦宇, 郭佩芳, 等. 应用 WAVEWATCH-III 模式对南海的波浪场进行数值计算、统计分析和研究[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(5): 1-8.

[4] 郑茜, 张陈浩. 近岸带珊瑚礁台波浪破碎变形流场结构的试验和数值模拟[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(2): 36-40.

[5] 龙文, 陶建华. 航道与港池对港区波浪场的影响及珠海港台风浪破坏护岸的分析[J]. 中国港湾建设, 2000(4): 39-41, 46.

[6] 王鑫, 李大鸣, 李雪临, 等. 大万山波浪能试验场泊位间水动力影响分析[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(4): 69-73.

[7] 陈阳, 孙精石. Boussinesq 方程波浪数学模型计算马来西亚科美纳河河口的波浪场[J]. 水运工程, 2000(5): 6-8.

[8] 沈良朵, 邹志利. 波浪场中物质输移离散系数的理论分析[J]. 力学学报, 2011, 43(6): 1091-1102.

[9] 肖文军, 丁平兴, 胡克林. 潮汐和流影响下长江口波浪场数值计算[J]. 海洋工程, 2008, 26(4): 45-52.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 9 页)

参考文献:

[1] 黄华, 邓冰, 陈昱松, 等. 数值波浪水槽构建与二阶 Stokes 波仿真[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(1): 227-231.

[2] 季新然, 柳淑学, PAULSEN B T, 等. 基于势流理论和 OpenFOAM 的耦合模型对多向不规则波浪的模拟[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 88-99.

[3] 李广大. 三维高阶边界元方法数值造波[D]. 北京: 清华大学, 2000.

[4] 张亮, 李云波. 流体力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006.

[5] 李文华, 苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 水泵技术, 2006(4): 39-40, 31.

[6] 高智, 周光垌. 高雷诺数流动理论、算法和应用的若干

研究进展[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 417-436.

[7] 李孝伟, 樊俊飞. 一种自由界面追踪的模板化 VOF 方法[J]. 应用数学和力学, 2008, 29(7): 799-805.

[8] 丁力. 动网格技术及其在气动弹性数值模拟中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

[9] 王为术, 徐维晖, 翟肇江, 等. PISO 算法的实现及与 SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC 算法收敛性的比较[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(4): 33-36.

[10] 黄丰. 多孔介质模型的三维重构研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.

[11] CIRIA, GUR, CETMEF. The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering[S]. 2nd ed. London: CIRIA, 2007.

(本文编辑 王璁)