



波流耦合作用下台风对渔港内波浪影响研究*

姬厚德^{1,2}, 蓝尹余^{1,2}, 周增荣³

(1. 福建海洋研究所, 福建 厦门 361013;

2. 福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室, 福建 厦门 361013; 3. 漳州市海洋环境监测中心, 福建 漳州 363000)

摘要: 台风浪每年给沿海地区带来严重损害和经济损失, 精细化模拟港内波浪分布特征及防波堤对波浪的消减作用对研究海洋防灾减灾具有重要意义。为准确模拟台风对港内波浪影响和防波堤的消浪作用, 选取福建省石狮市东埔渔港海域为研究对象, 以 1601 号“尼伯特”超强台风为例, 利用 Holland 模型计算台风风场, 基于非结构三角网格, 采用大、小区域嵌套的方法耦合 SWAN 模型和 ADCIRC 模型, 分析台风期间渔港内外的波浪分布特征。结果表明: 构建的计算模型与实测数据验证良好, 经验风场模型与实测数据的平均误差在 8% 以内, 有效波高与实测波高的平均误差在 15% 以内; 台风过境期间, 渔港内外波浪差异明显, 受防波堤的遮蔽作用, 渔港内港池具有一定的避风能力, 防波堤平均消减波高比率达 90%, 防波堤对台风浪的消减作用显著。

关键词: 海洋灾害; SWAN 模型; ADCIRC 模型; 台风浪

中图分类号: U65; P731

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0038-09

Impact of typhoons on waves in fishing ports under coupling effects of waves and currents

Ji Houde^{1,2}, Lan Yinyu^{1,2}, Zhou Zengrong³

(1. Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361013, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Coast and Island Management Technology Study, Xiamen 361013, China;

3. Ocean Environment Monitoring Center of Zhangzhou, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: Typhoon-induced waves inflict severe damages and economic losses upon coastal regions on an annual basis. The refined simulation of the distribution characteristics of waves within ports and the wave attenuation effect of breakwaters holds substantial significance for the research on marine disaster prevention and mitigation. To precisely simulate the impact of typhoons on waves in ports and the wave attenuation function of breakwaters, the sea area of Dongpu Fishing Port in Shishi City, Fujian Province is designated as the research domain. With the super typhoon “Nepartak” (No. 1601) as an illustrative case, the Holland model is used to calculate the typhoon wind field. Based on the unstructured triangular grid, the SWAN model and the ADCIRC model are integrated through the nesting approach of large and small areas to dissect the distribution traits of waves both inside and outside the fishing port during the typhoon episode. The results showed that the constructed computational model is favorably validated by the measured data. The average error between the empirical wind field model and the measured data is restricted within 8%, and the average error between the significant wave height and the measured wave height is confined within 15%. During the transit of the typhoon, conspicuous disparities in waves are observable inside and outside the fishing port. Owing to the shielding effect of the breakwater, the inner harbor basin of the fishing port possessed a certain wind sheltering capacity. The average wave height reduction ratio of the breakwater attained 90%, manifesting an evident attenuation effect of the breakwater on typhoon waves.

Keywords: marine disasters; SWAN model; ADCIRC model; typhoon wave

收稿日期: 2024-11-26

***基金项目:** 福建省公益类科研院所专项基金项目 (2024R1007002, 2022R1007004)

作者简介: 姬厚德 (1980—), 男, 硕士, 副研究员, 从事近岸河口水动力学、海洋测绘工作。

台风浪、风暴潮是海洋中威力较大的灾害,每年都会给沿海地区带来严重损害和经济损失^[1-2]。福建沿海区域是我国台风浪、风暴潮重灾区之一^[3],1956—2000年期间福建省沿海风暴潮引起增水50 cm以上的有197次,年平均发生4.4次。2011—2019年期间福建省共发生风暴潮过程27次,造成经济损失116.9亿元,平均每年造成经济损失12.99亿元。因此台风浪、风暴潮的模拟对海洋防灾减灾、海岸工程设计等具有重要的指导意义。渔港是沿海渔业生产和保障渔民生命财产安全的重要基础设施,其重要的功能是遮挡海浪,因此渔港内波浪消减效果对渔港设计至关重要。对台风浪研究通常分为统计分析法和数值模拟法。统计分析法利用多年的观测资料进行概率分析,进而推算出相关要素,是工程设计、灾害分析中较为常用的方法;数值模拟法利用海浪、风暴潮模型模拟台风过程,是灾害预报、防灾应急、工程设计中较为常用的方法,该方法应用越来越广泛^[4]。

台风浪过程是受多种因素影响的复杂过程,影响因素不仅包括风暴强度、移动速度、中心气压、最大风速等风暴自身因素,还受潮位、潮流、波浪等海洋要素的影响,也与海底地形、海岸走向等密不可分^[5-12],因此,整个模拟过程包括台风风场模拟、台风浪模拟、海流与波浪耦合模拟。本文利用SWAN(simulating waves nearshore)模型^[13-14]和ADCIRC(An advanced circulation model for oceanic, coastal and estuarine waters)模型^[15]模拟台风浪和风暴潮过程。

台风浪和风暴潮因其巨大的危害备受关注,国内学者对其开展了大量工作,如尹宝树等^[16]在渤海开展了波浪和潮汐相互作用下的风暴潮研究;杜如冰^[17]模拟“杜鹃”台风的风暴潮增水过程;赵鑫等^[18]研究围填海工程对渤海湾风浪场的影响;赵昊辰等^[19]在中国台湾省附近海域开展风暴潮对海浪影响的数值研究;王仙美等^[20]对江苏省海域风暴潮增减水进行研究;李大鸣等^[21]开展了大亚湾风暴潮波浪传播数学模型研究等。结果表明,台风浪和风暴潮过程密不可分,台风中心低压和

波浪辐射应力是引起风暴潮增水的重要因素^[22-23],因此,为更真实地刻画台风过程,数值模拟中应耦合风、潮位、海流、波浪等因素。

为准确研究台风对港区波浪分布特征的影响和工程设施对波浪的消减作用,本文以“尼伯特”台风为例,利用Holland风场模型建立台风风场,以SWAN模型计算台风浪,并将其结果与ADCIRC模型耦合计算,综合考虑风、潮位、潮流、波浪的耦合作用,分析台风过境时石狮市东埔渔港附近海域和渔港内波浪分布特征,以及防波堤对台风浪的消减作用,为海洋防灾减灾提供数据支撑和工程建设参考。

1 模型简介与研究方法

1.1 台风风场模型

台风风场和气压场的模拟对波浪和增水的模拟非常重要^[24],本文选取Holland模型计算气压场和风场^[25-26],计算式如下:

$$p(r) = p_c + (p_n - p_c) \exp \left[\left(-\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \right] \quad (1)$$

$$V_g(r) = \sqrt{(p_n - p_c) \frac{B}{\rho_a} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \exp \left[\left(-\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \right] + \left(\frac{rf}{2} \right)^2} - \frac{rf}{2} \quad (2)$$

式中: p_n 为台风中心气压; p_c 为台风外围气压; $R_{\max}$ 为最大风速半径; ρ_a 为空气密度; f 为科氏力参数; r 为计算点到台风中心的距离; B 为Holland参数。

由式(1)和(2)可以看出, $R_{\max}$ 和 B 是Holland模型计算中的关键参数。杨万康等^[27]对浙南海域2个参数计算开展深入研究,根据研究结果在附近海区参数最优经验式为:

$$R = 51.6 \exp(-0.022 3 v_{\max} + 0.028 1 \phi) \quad (3)$$

$$B = 1.881 - 0.005 57 R_{\max} - 0.012 95 \phi \quad (4)$$

式中: $v_{\max}$ 为最大风速; ϕ 为纬度。

利用式(1)~(4)模拟台风气压场和风场。

1.2 台风浪和风暴潮模型

利用SWAN模型和ADCIRC模型松弛耦合模

式建立风暴潮计算模型,即将 SWAN 模型波浪辐射应力和 ADCIRC 模型的潮位、流场结果互为模型输入条件迭代计算。

SWAN 模型是由荷兰 Delft 大学研发的波浪模型,包含了绕射、白帽、波浪破碎、波浪耗散、波-波作用等大部分物理过程,被广泛应用于中、小范围的台风浪模拟中。SWAN 模型基于波作用守恒方程,基本方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(C_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(C_y N) + \frac{\partial}{\partial \varepsilon}(C_\varepsilon N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(C_\theta N) = \frac{S}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中: N 为波浪作用密度谱; ε 为相对角频率; θ 为波浪传播方向; S 为源汇项; C_x 、 C_y 、 C_ε 和 C_θ 分别为 x 、 y 、 ε 和 θ 空间上的波浪传播速度。

ADCIRC 模型由北卡罗来纳大学研发,是可进行二维、三维计算的有限元数值计算模型,利用 Galerkin 有限元方法求解广义波动方程与动量方程,综合考虑各种边界条件和外力因素,是潮汐、潮流和风暴潮预报中的主流模型之一。模型采用非结构三角网格,细致地刻画海岸复杂地形,广泛应用于港口、岛屿、构筑物等复杂区域的模拟,在我国各海区风暴潮模拟中应用广泛,并取得了良好的计算结果。

1.3 研究方法

为了精确刻画近岸地形、构筑物等对计算过程的影响,充分细化网格设置,特别在石狮市东埔渔港附近海域最小网格边长设置为 50 m,同时为提高计算效率,采用大、小区域嵌套的方法进行,具体计算流程如下:

1) 利用 Holland 模型制作台风风场和气压场,将其作为 ADCIRC 模型和 SWAN 模型的输入条件。

2) 构建大区域计算模型,利用 ADCIRC 模型分别计算天文潮和天文潮叠加台风影响下的潮位、海流分布,为小区域计算提供边界条件;利用

SWAN 模型计算台风影响下的波浪分布,为小区域计算提供边界条件。

3) 构建小区域计算模型,利用 ADCIRC 模型计算纯天文潮分布情况。

4) 利用 ADCIRC 模型计算在天文潮叠加台风浪、台风场影响时的潮位、潮流分布,并将结果作为小区域 SWAN 模型计算的输入条件进行迭代计算。

2 研究概况与模型设置

2.1 台风概况

超强台风 1601 号“尼伯特”于 2016 年 7 月 3 日 8 时在西北太平洋生成,7 月 5 日 20 时加强为超强台风,最大风速达 72 m/s,中心气压 89.5 kPa。7 月 8 日在中国台湾台东县登陆,登陆最大风力 60 m/s,7 月 9 日 14 时在福建泉州石狮再次登陆,登陆最大风力 23 m/s,7 月 10 日 3 时减弱为热带低压。“尼伯特”给中国东南等地带来狂风暴雨,造成严重灾害。

2.2 研究区域概况

东埔渔港位于福建省泉州市石狮市海域内,处于台湾海峡中部海域,受风暴潮、台风浪等影响明显,为形成有效避风水域已建设东北走向长约 614 m 的防波堤。台湾海峡及其附近海域属强潮海区,海峡西侧的福建沿海平均潮差约 4 m,北部地区可达 5 m 以上,是我国潮差较大海区之一。

大区域计算范围为经度 $116^{\circ}16' \sim 124^{\circ}21'$,纬度 $19^{\circ}54' \sim 27^{\circ}27'$,设置 1.129 0 万个节点,2.050 2 万个计算网格,网格最小边长约 500 m,覆盖整个台湾海峡。小区域计算范围为经度 $119^{\circ}1.65' \sim 118^{\circ}34.35'$,纬度 $24^{\circ}57.65' \sim 24^{\circ}30.73'$,设置 1.533 2 万个节点,2.915 3 万个计算网格,网格最小边长约 50 m。计算区域包含大港湾、泉州湾、深沪湾等中、小型海湾,也包含

锦尚湾、东埔湾等微型海湾, 海岸线总长约 300 km, 岸线曲折、沿海构筑物众多, 水深变化剧烈, 从东侧边界 -50 m 变浅至东埔渔港防波堤附近约 -7 m。东埔渔港附近岸线和构筑物分布见图 1。

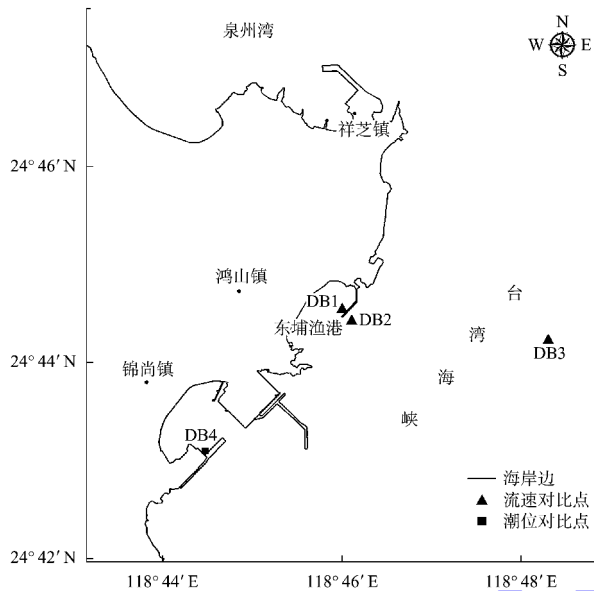


图 1 东埔渔港附近岸线和构筑物分布

Fig. 1 Shoreline and structure distribution near Dongpu Fishing Port

2.3 模型参数设置

为保证计算模型的稳定性, 且覆盖整个风暴潮过程, 所有模块计算时间为 2016 年 7 月 3 日 8 时至 2016 年 7 月 10 日 11 时。

SWAN 模型计算中模拟时间步长为 600 s, 最小截取深度设为 -1 m, 采用全谱公式进行计算。频率离散范围为 0.055 ~ 1.100 Hz, 离散频率数量为 33, 方向离散数量为 36, 大区域边界设置为自由边界, 大区域计算的波浪谱作为小区域计算边界。

ADCIRC 模型时间步长为 30 s, 曼宁场根据水深变化设置, 最小截取深度设为 -1 m, 边界采用潮位驱动, 大区域边界由全球潮汐模型 TPX07.2 计算获取, 大区域输出结果作为小区域计算边界, 初始条件设置为静态, 计算时叠加 Holland 模拟的风场和气压场。

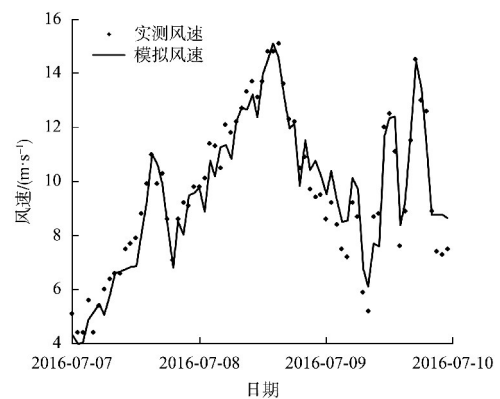
3 模型验证与结果分析

3.1 模型验证

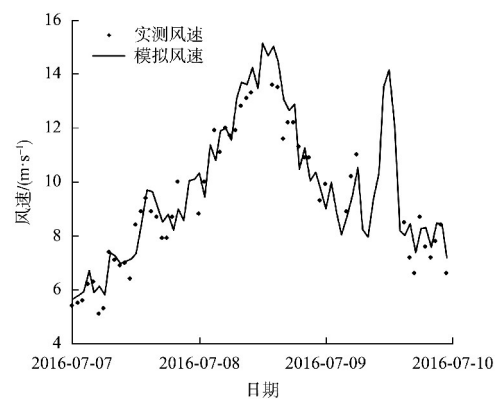
3.1.1 Holland 模型验证

风场的模拟非常重要, 采用 Holland 模型模拟台风风场, 台风基本信息数据从温州台风网获取, 实测资料分别来自国家海洋科学数据中心、中国台湾地区气象局公开发布资料。

由于经验台风模型依赖于台风特征参数的确定, 而当台风对计算海域影响较小时, 模拟结果误差一般偏大, 模型计算结果与 SC1 (120°18'00", 26°42'00")、SC2 (120°30'49", 26°21'03") 和 SC3 (118°24'48", 24°22'48") 3 个站实测资料对比见图 2。当实测点风速大于 8 m/s 时, 计算结果与实测结果符合性较好, 3 个站平均相对误差为 5.8%、6.5%、6.3%; 当风速小于 8 m/s 时, 模拟结果比上述结果明显差一些, 3 个站平均相对误差为 11.7%、7.8%、8.4%。总体上, 3 个站台风期间平均误差分别为 7.5%、7.0%、6.6%, 说明 Holland 模型计算结果与实测值符合性较好, 可满足本次计算要求。



a) SC1 风速对比



b) SC2 风速对比



图2 模型计算风速与实测值对比

Fig. 2 Comparison between model calculated wind speed and measured values

3.1.2 SWAN 模型验证

为了验证 SWAN 模型在台风期间的模拟效果,选取 SC1、SC2 和 SC3 这 3 个站在台风期间的实测资料进行对比。通过有效波高对比可知,当模拟的有效波高大于 1.50 m 时,计算值和实测值符合性较好;当模拟的有效波高小于 1.50 m 时,计算值与实测值的误差明显加大,这与风场经验模型的特点密不可分,见图 3。总体上,3 站的有效波高平均相对误差分别为 10.3%、7.6%、14.8%,说明建立的 SWAN 模型在“尼伯特”台风浪模拟中取得了良好的效果。

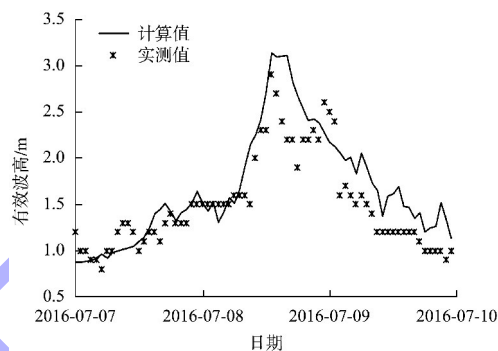
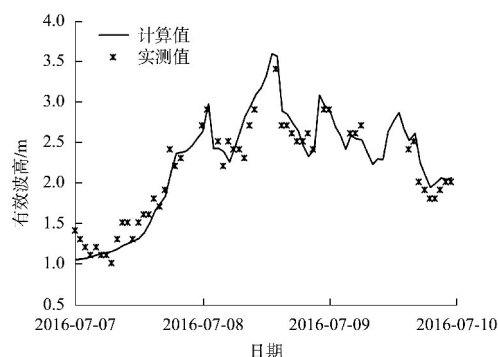
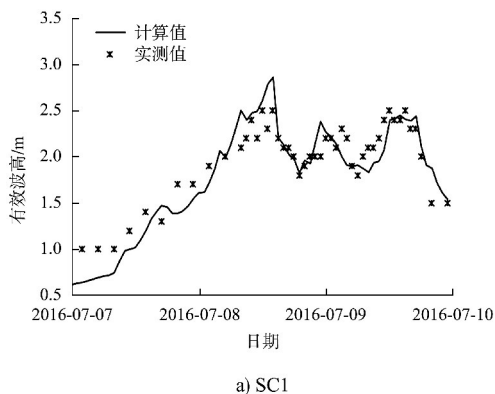


图3 模型计算有效波高和实测值对比

Fig. 3 Comparison between significant wave height calculated by model and measured values

3.1.3 ADCIRC 模型验证

由于未能获取台风期间的潮位、海流实测值,为验证模型的适应性,将建立好的模型计算时间设定在已有观测资料的时间段来验证 ADCIRC 模型。潮位验证时间为 2014 年 11 月 4—7 日,潮流验证时间为 2014 年 11 月 9 日 12 时至 2014 年 11 月 10 日 14 时。

由计算结果可知,潮位计算相位与实测完全一致,潮位值平均相对误差为 14.2%,平均绝对误差 0.18 m;潮流计算流向与实测流向基本一致,流速平均相对误差为 10%,平均绝对误差为 0.008 m/s,从以上数据可以看出,建立的 ADCIRC 模型在附近海域适应性良好,分别见图 4、图 5。

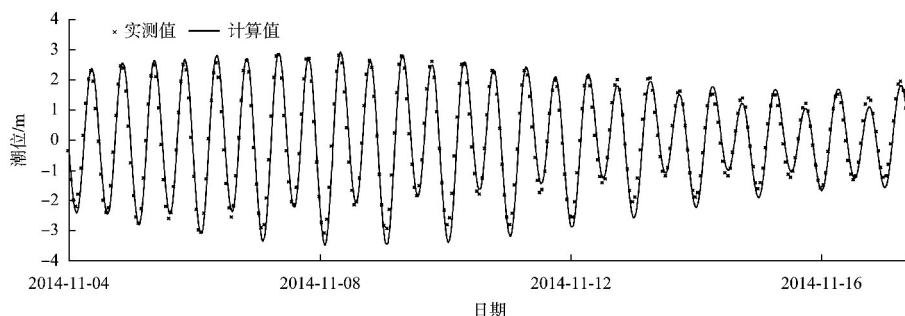


图 4 DB4 潮位计算值和实测值对比

Fig. 4 Comparison between calculated and measured tidal levels at DB4

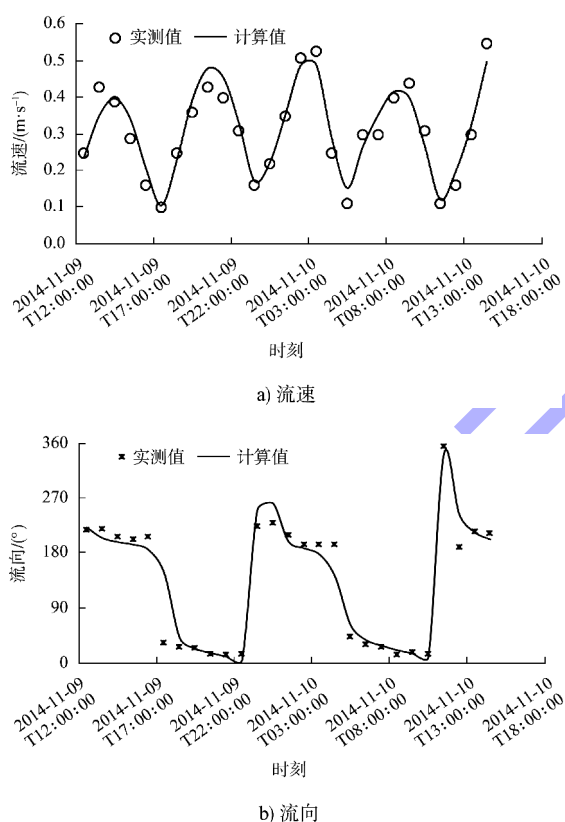


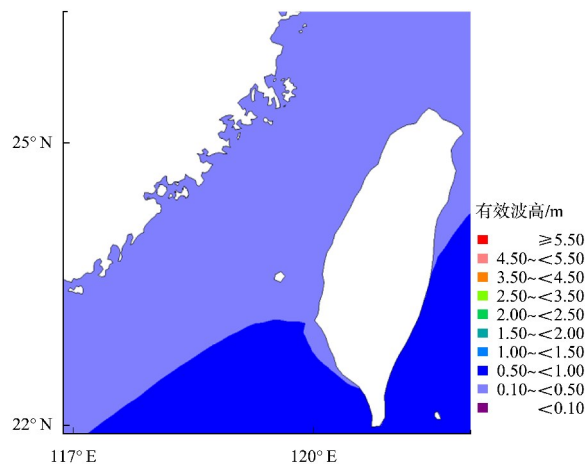
图 5 DB3 潮流计算值和实测值对比

Fig. 5 Comparison between calculated and measured tidal current at DB3

3.2 模拟结果分析

根据计算结果, 在台风中心较远时, 近岸海域不受台风影响, 波高较小, 东埔渔港防波堤外侧海域有效波高约 0.05 m, 几乎处于无浪的状态; 而随着台风中心的逐渐靠近, 台风对近岸海域的影响逐渐显现, 从 2016 年 7 月 7 日“尼伯特”

外围风圈开始对福建省沿海造成影响, 近岸海域波高开始增大, 东埔渔港防波堤外侧海域 7 月 7 日 00:00:00 有效波高增至 0.11 m, 而此时台风中心位于中国台湾岛东南侧, 距离相对较远, 近岸海域波高处于缓慢的增长状态, 至 7 月 8 日 00:00:00, 东埔渔港防波堤外侧海域有效波高增至约 0.70 m, 此后随着台风中心的靠近和台风的加强, 波高迅速增大, 7 月 8 日 12:00:00 增至约 1.80 m, 此后逐步台风中心的进一步逼近, 波高逐步增大, 7 月 9 日有效波高增至约 2.50 m。台风登陆后, 台风中心继续向西北移动, 东埔渔港附近海域波高迅速减小, 7 月 10 日 00:00:00 渔港防波堤外侧波高降至约 1.30 m。典型时刻台湾海峡和东埔渔港附近海域台风浪分布见图 6。



a) 2016-07-07T00:00:00 台湾海峡附近海域

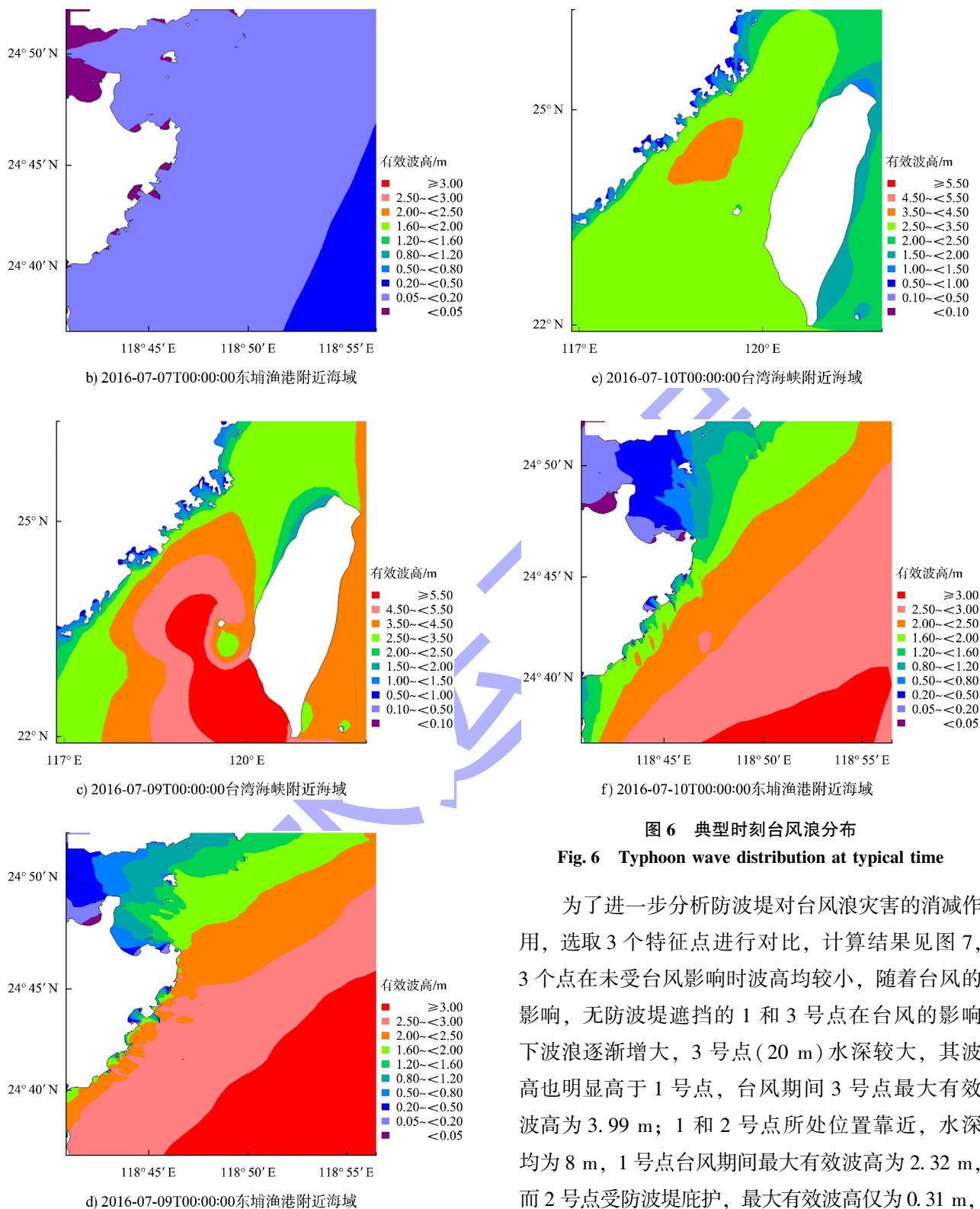


图 6 典型时刻台风浪分布

Fig. 6 Typhoon wave distribution at typical time

为了进一步分析防波堤对台风浪灾害的消减作用,选取3个特征点进行对比,计算结果见图7,3个点在未受台风影响时波高均较小,随着台风的影响,无防波堤遮挡的1和3号点在台风的影响下波浪逐渐增大,3号点(20 m)水深较大,其波高也明显高于1号点,台风期间3号点最大有效波高为3.99 m;1和2号点所处位置靠近,水深均为8 m,1号点台风期间最大有效波高为2.32 m,而2号点受防波堤庇护,最大有效波高仅为0.31 m,

2号点附近海域台风期间有效波高均小于0.50 m,平均消减波高比率达90%。此数据可以说明,渔港防波堤是抵御台风、消减波浪非常有效的手段;研究区域渔港防波堤设计较为合理,波浪消减率较高,抵御台风浪作用显著,大幅提高了防波堤内侧水域的避风条件。

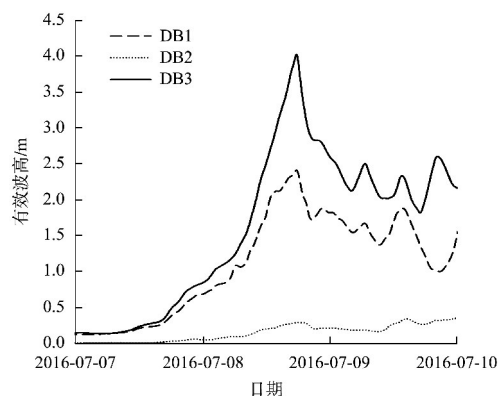


图7 3个对比点台风期间有效波高模拟结果

Fig.7 Simulation results of significant wave height during typhoon at three contrast points

4 结论

1) 采用 Holland 风场模型、SWAN 波浪模型和 ADCIRC 潮流模型,通过大、小区域嵌套等方法模拟“尼伯特”台风过程,以及与实测数据对比,构建的计算方法具有良好的适应性,风场模型平均误差分别为7.5%、7.0%、6.6%,波浪模型有效波高平均相对误差分别为10.3%、7.6%、14.8%,潮流模型流速平均相对误差为10.0%。

2) 研究区域受台风影响显著,波高随台风中心的靠近迅速增大,港外有效波高最大增至约2.5 m;根据同一时刻港内外相同水深点波高对比,发现台风期间平均消减波高比率达90%,防波堤对台风浪的消减作用明显。

参考文献:

- [1] 谢丽,张振克.近20年中国沿海风暴潮强度、时空分布与灾害损失[J].海洋通报,2010,29(6):690-696.
XIE L, ZHANG Z K. Study on the relationship between intensity, spatial-temporal distribution of storm surges and disaster losses along the coast of China in past 20 years[J]. Marine science bulletin, 2010, 29(6): 690-696.
- [2] 石先武,谭骏,国志兴,等.风暴潮灾害风险评估研究综述[J].地球科学进展,2013,28(8):866-874.
SHI X W, TAN J, GUO Z X, et al. A review of risk assessment of storm surge disaster[J]. Advances in earth science, 2013, 28(8): 866-874.
- [3] 郑颖青,吴启树,林笑茹,等.近106 a来登陆福建台风的统计分析[J].台湾海峡,2006,25(4):541-547.
ZHENG Y Q, WU Q S, LIN X R, et al. Statistically analyse on the typhoons landed on Fujian in the last 106 years[J]. Journal of oceanography in Taiwan Strait, 2006, 25(4): 541-547.
- [4] 李燕,薄兆海. SWAN 模式对黄渤海海域浪高的模拟能力试验[J].海洋预报,2005,22(3):75-82.
LI Y, BO Z H. The simulation test of swan model in the wave height in the Huang-Bo Sea areas [J]. Marine forecasts, 2005, 22(3): 75-82.
- [5] 刘秋兴,于福江,王培涛,等.辐射应力对台风风暴潮预报的影响和数值研究[J].海洋学报(中文版),2011,33(5):47-53.
LIU Q X, YU F J, WANG P T. Numerical study on storm surge forecasting considering wave-induced radiation stress [J]. Acta oceanologica sinica (Chinese edition), 2011, 33(5): 47-53.
- [6] 齐庆辉,朱志夏,王志国,等.“达维”台风作用下连云港海域台风浪数值模拟[J].水利水运工程学报,2015(5):60-66.
QI Q H, ZHU Z X, WANG Z G, et al. Numerical simulation of storm surge induced by typhoon Dawei in Lianyungang seas [J]. Hydro-science and engineering, 2015(5): 60-66.
- [7] 杜艳,刘国强,何宜军,等.台风“灿鸿”影响下海浪的数值模拟研究[J].海洋科学,2020,44(10):12-22.
DU Y, LIU G Q, HE Y J, et al. Numerical simulation of typhoon waves under the influence of Typhoon “Chan-Hom” [J]. Marine sciences, 2020, 44(10): 12-22.
- [8] 朱现晖,周良明,王智峰,等.基于台风“威马逊”的台风浪数值模拟研究[J].海洋湖沼通报,2017,39(4):52-60.
ZHU X H, ZHOU L M, WANG Z F, et al. Numerical simulation of typhoon waves based on the typhoon “Rammasun” [J]. Transactions of oceanology and limnology, 2017, 39(4): 52-60.

- [9] 徐婉明, 邓伟铸, 赵明利, 等. 深圳 0814 号台风风暴潮数值模拟及最高潮位特征分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(1): 11-17.
- XU W M, DENG W Z, ZHAO M L, et al. Numerical simulation of the storm surge and characteristics of the highest tide level in Shenzhen caused by typhoon 0814[J]. Marine forecasts, 2020, 37(1): 11-17.
- [10] 齐鹏, 陈新平. 波浪辐射应力对海流模式影响的数值分析[J]. 海洋工程, 2018, 36(1): 55-61.
- QI P, CHEN X P. A preliminary numerical experiment on effect of wave-induced radiation stress on ocean current model[J]. The ocean engineering, 2018, 36(1): 55-61.
- [11] 徐卢笛, 贺治国, 潘佳佳, 等. 风暴潮过程中波浪对地形演变影响的数值研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(3): 23-31.
- XU L D, HE Z G, PAN J J, et al. Numerical study of wave effects on changes in offshore morphology during storm surges [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2019, 38(3): 23-31.
- [12] 周才扬, 殷成团, 章卫胜, 等. 长江口登陆台风增水数值模拟: 以“安比”为例 [J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 70-77.
- ZHOU C Y, YIN C T, ZHANG W S, et al. Numerical simulation on surgedue to landfall of typhoon in the Yangtze Estuary: Ampil(No. 1810) as an example[J]. Hydro-science and engineering, 2021(1): 70-77.
- [13] RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N. A spectral model for waves in the near shore zone [J]. Coastal engineering 1994, 1995: 68-78.
- [14] 冯芒, 沙文钰, 朱首贤. 近岸海浪几种数值计算模型比较[J]. 海洋预报, 2003, 20(1): 52-59.
- FENG M, SHA W Y, ZHU S X. Study on some numerical methods calculating waves in shore[J]. Marine forecasts, 2003, 20(1): 52-59.
- [15] MAYO T, BUTLER T, DAWSON C, et al. Data assimilation within the Advanced Circulation (ADCIRC) modeling framework for the estimation of Manning's friction coefficient [J]. Ocean modelling, 2014, 76: 43-58.
- [16] 尹宝树, 王涛, 侯一筠, 等. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 109-116.
- YIN B S, WANG T, HOU Y J, et al. Numerical study of the influence of waves and tide surge interaction on waves in Bohai Sea[J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2001, 32(1): 109-116.
- [17] 杜冰茹. 台风作用下海岸工程建设前后的增水变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- DU B R. Research of the changes of storm surge before and after construction of the coastalengineering [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [18] 赵鑫, 孙群, 魏皓. 围填海工程对渤海湾风浪场的影响[J]. 海洋科学, 2013, 37(1): 7-16.
- ZHAO X, SUN Q, WEI H. Effects of coastal reclamation on the wave fields in the Bohai Bay[J]. Marine sciences, 2013, 37(1): 7-16.
- [19] 赵昊辰, 尹宝树, 冯兴如, 等. 台湾附近海域超强台风南玛都期间风暴潮对海浪影响的数值研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(3): 127-134.
- ZHAO H C, YIN B S, FENG X R, et al. Numerical study of influence of surge and wave interaction on waves in waters surrounding Taiwan [J]. Marine sciences, 2015, 39(3): 127-134.
- [20] 王仙美, 翟剑峰, 东培华, 等. 基于台风参数模型的江苏海域风暴增减水研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 61-66.
- WANG X M, ZHAI J F, DONG P H, et al. A study of storm surge inJiangsu sea waters based on a typhoon parameter model [J]. Hydro-science and engineering, 2015(2): 61-66.
- [21] 李大鸣, 甄珠, 李彦卿, 等. 大亚湾风暴潮波浪传播数学模型[J]. 海洋通报, 2018, 37(1): 45-54.
- LI D M, ZHEN Z, LI Y Q, et al. Numeric modeling of storm surge wave propagation in Daya Bay [J]. Marine science bulletin, 2018, 37(1): 45-54.
- [22] 章卫胜, 周钧, 王金华, 等. 潮汐河口闸下风暴潮特征模拟[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 1-9.
- ZHANG W S, ZHOU J, WANG J H, et al. Numerical simulation of storm surge characteristics in downstream of tide sluice located at tidal estuary[J]. Hydro-science and engineering, 2018(2): 1-9.