

SWAN 模型与 BW 模型 在舟山泗礁换流站设计波浪计算中的联合应用*

邵 杰¹, 胡列翔², 杨雷霞³, 穆锦斌¹

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007;
3. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 选取浙江北部嵊泗海域作为研究对象, 以大、小网格嵌套的 SWAN 模型在龙口前沿的波要素计算结果作为 BW 模型的边界条件, 在两个模型的联合应用下模拟了舟山泗礁换流站掩护区外和掩护区内的波浪场分布。结果表明, 外海 E、ESE、SE 向来波传至马关围堤前沿海域时波向已偏转成 SSE 向, 其中 ESE 向来波下龙口前沿的波高最大, 进入掩护区后绕射波的衰减较为明显, 将绕射波与局地风浪叠加, 得到了泗礁换流站 100 a 一遇、50 a 一遇的设计波要素, 其有效波高分别为 1.08、0.98 m。SWAN 模型与 BW 模型的联合应用, 使得掩护区内外大跨度地形下的波浪折射、绕射、反射等现象均得到了高精度的模拟, 在舟山泗礁换流站设计波浪计算中具有良好的适应性。

关键词: SWAN 模型; BW 模型; 换流站; 波浪计算; 联合应用

中图分类号: TV 139.2⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0013-07

Combined application of SWAN model and BW model in calculation of design wave factors of Zhoushan Sijiao converter station

SHAO Jie¹, HU Lie-xiang², YANG Lei-xia³, MU Jin-bin¹

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China;
2. STATE GRID Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China;
3. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Taking the Shengsi sea in north of Zhejiang as the research area, the distributions of the wave field inside and outside the protected areas of Zhoushan Sijiao converter station are simulated by the combined application of SWAN model with nested grids and BW model, while the results of the wave factors in front of the cofferdam gap by SWAN model are taken as the boundary conditions of BW model. The results show that the wave directions turn to SSE when the E, ESE, SE direction waves propagate from the outside sea areas to the front of the Maguan dike, and the maximum wave height of the front of the cofferdam gap is from the ESE direction. The diffraction waves attenuate obviously when the waves enter the protected areas, and the design wave factors with 100-year return period and 50-year return period are obtained by the superposition of the diffraction waves and the local wind waves, i.e. the significant wave heights of 1.08 m and 0.98 m. The phenomena of wave refraction, diffraction, and reflection within the large range of the bathymetry inside and outside the protected areas is simulated with high precision, so the combined application of SWAN model and BW model in Zhoushan Sijiao converter station achieves good efficiency on the design wave calculation, thus it will provide reference for design wave calculations of similar projects.

Keywords: SWAN model; BW model; converter station; wave calculation; combined application

波浪是海岸地区最主要的动力因素之一, 准确计算设计波浪是设计海岸工程建筑物的前提条件。近年来, 波浪数值计算大多采用以下 3 类模型^[1-2]: 第 1 类是基于缓坡方程的计算模型, 此类

收稿日期: 2015-03-09

*基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY13E090001); 浙江省创新人才培养项目 (2012F20049); 浙江省科技计划项目 (2015F50064); 浙江省博士后科研择优资助项目 (BSH1502052)

作者简介: 邵杰 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 从事海岸及海洋工程研究。

波浪模型在波浪破碎、波流相互作用等现象的模拟精度欠佳，模式有待于进一步的改进。第 2 类是基于能量平衡方程的计算模型，以荷兰 Delft 科技大学研发的 SWAN 模型在国内外应用最为广泛，目前 SWAN 模型已在我国的开敞海域有诸多应用，陈希等^[3-4]利用 SWAN 模型模拟了东海、湛江港的台风浪场分布；黄世昌等^[5]利用 SWAN 模型研究了浙江沿海超强台风作用下的台风浪波高；赵海涛等^[6]利用 SWAN 模型分析了航道对波浪传播的影响；宋伟伟等^[7]利用 SWAN 模型进行台风浪数值后报，并与广东沿海外海重现期波要素进行了对比分析；叶钦等^[8]利用 SWAN 模型开展了浙江近海波浪能资源的初步研究。第 3 类是基于 Boussinesq 型方程的计算模型，目前最常用的是 MIKE21 软件的 BW 模型，此类波浪模型可直接描述海浪波动过程中的水质点运动，适用于复杂地形下小尺度的波浪计算，模拟精度较高，能充分反映港内波浪折射、绕射、反射等现象，张娜等^[9]利用 BW 模型对日照港总平面设计方案的可行性进行了试验论证；刘欣明等^[10]利用 BW 模型研究了烟台港某工程港内波高分布和波浪传播状况；徐俊锋等^[11]利用 BW 模型计算分析了港口、码头等小面积波浪场中的多方向不规则波的相互作用现象；杨会利等^[12]利用 BW 模型研究了掩护型小面积港内的波浪分布规律。

虽然 SWAN 模型、BW 模型分别在大尺度、小尺度的模拟精度较高，但 SWAN 模型在复杂地形下小尺度波浪传播计算的精度仍不及 BW 模型，而 BW 模型一旦计算区域稍大，就会因为网格数过多而难以进行计算。SWAN 模型与 BW 模型一直以来都被国内学者单独使用，两者几乎很少被联合应用于实际工程的波浪计算，目前国内仅肖辉^[13]采用 SWAN 模型结合 MIKE21 软件的 NSW 模型、BW 模型推求了大连长兴岛北港区的设计波要素。

海岸换流站是海岸地区最重要的电力设施之一，往往建设在外围有堤防掩护的半封闭区域内，以舟山泗礁换流站为例，其外围有马关围堤作为掩护，围区内地形平坦，床面大多在 $-3 \sim -1$ m；围堤外侧紧邻马迹山港进港航道，等深线变化剧烈，其中 -20 m 等深线与围堤相距不到 2 km；围区内外唯一的水体交换通道为马关围堤的龙口段，其宽度仅 220 m（图 1）。波浪由开敞海区传至掩护区内换流站前沿的过程中，地形跨度较大，在波浪的折射、绕射、反射、破碎、浅水变形等综合因素的影响下，受计算方程本身条件的限制，单一波浪模型的计算尺度和计算精度已不能兼顾。本文尝试采用大、小网格嵌套的 SWAN 模型与 MIKE21 软件的 BW 模型相结合的方式开展大跨度地形下的波浪传播计算，以期准确获取该换流站的设计波浪。

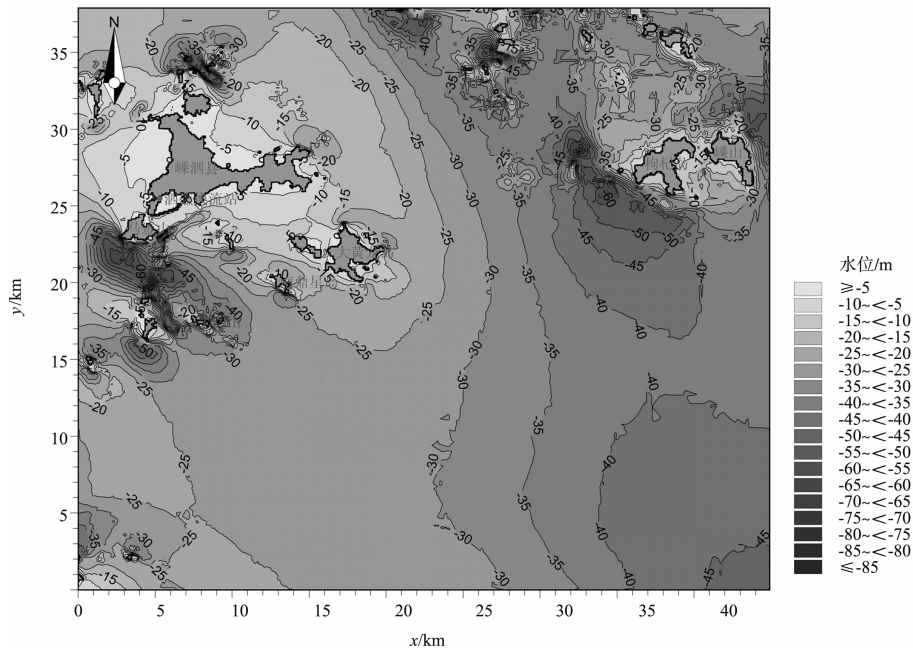


图 1 工程海域附近的水下地形

1 模型构建

1.1 SWAN 模型及计算参数

1.1.1 基本方程

SWAN (Simulating Wave Nearshore)^[14-15] 模型是第 3 代波谱模型,能够描述在浅水区特定的风、流和水下地形条件下的波浪场的演化。其控制方程如下:

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

式中: S 项为源汇项, $S = S_w + S_n + S_d + S_f$, S_w 、 S_n 、 S_d 、 S_f 分别代表由风产生的能量输入、波与波之间相互作用、破波耗散、床底损失。式中左端第 1 项为波作用量随时间的变化项,第 2、3 项为波作用量的空间对流项,第 4 项为由于水深变化和水流作用造成的波作用量在频域上的变化,第 5 项为折射项。波作用量方程的离散基于笛卡尔坐标下的隐式差分,对于波的传播和源项采用固定的时间步长。本次选用 4091 版的 SWAN 模型,其绕射作用较之前的版本已明显加强。

1.1.2 模型参数的选取

模型的岸线和水下地形由钱塘江河口杭州湾 2010 年实测的水下地形图、马迹山中转码头前沿 2011 年实测 1:1 000 地形图、马关围涂工程 2011 年实测 1:2 000 地形图及工程海域多年不断更新出版的多张海图拼接而成。

计算网格采用大、小区二重嵌套(图 2),均为矩形网格。大区网格的空间步长 $\Delta x = \Delta y = 100$ m,计算范围东至嵊山、南至衢山岛、西至钱塘江河口、北至花鸟岛,南北长约 76 km,东西宽约 82 km。小区网格的空间步长 $\Delta x = \Delta y = 20$ m,计算范围覆盖嵊泗岛南侧及马迹山东侧海域,南北长约 11 km,东西宽约 12 km。各方向小区的边界条件一律由大区的计算结果提供。

初始条件的谱密度函数取 JONSWAP 频谱,谱方向包含 $0^\circ \sim 360^\circ$,数值离散间隔取 9° ,离散频率为 $0.04 \sim 1.0$ Hz,设定频率空间的离散个数为 40。根据海区的底质情况,底摩阻系数 C_b 取 0.01。

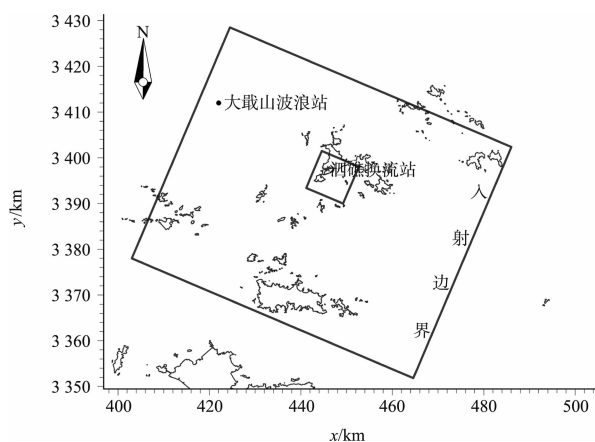


图 2 SWAN 模型计算范围

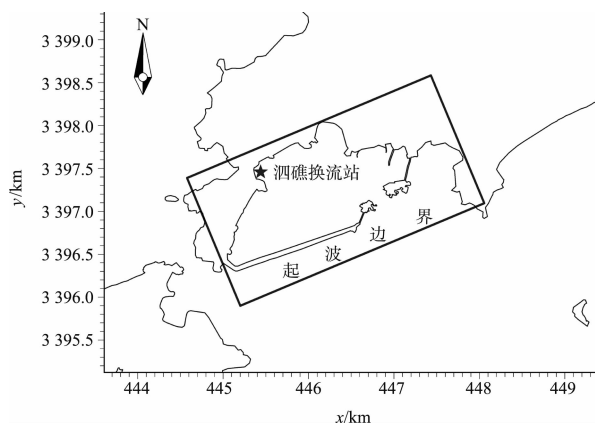


图 3 BW 模型计算范围

1.1.3 模型的计算条件

位于泗礁换流站东侧约 36 km 处的嵊山海洋站,其各重现期的波要素能代表北纬 $29^\circ 31' \sim 31^\circ$ 等深线为 30 m 处的浙北海区设计波要素^[16],收集该站 1962—2011 年连续 50 a E ~ ESE、SE ~ SSE 方向组年 $H_{1/10}$ 最大序列,采用 P-Ⅲ 分布按最小二乘法拟合经验频率点,获取各重现期波浪要素作为外海起波边界。同时收集嵊泗县气象台 1971—2011 年共 41 a 各方向组年极值风速,将其转换为海面以上 10 m 处的风速系列,采用 P-Ⅲ 分布按最小二乘法拟合求得各重现期设计风速以代表海域计算风速。计算水位采用 100 a 一遇高潮位,为 3.40 m^[17-18] (1985 国家高程基面)。SWAN 模型的计算条件见表 1。

表 1 各方向组的各重现期边界波要素及计算风速

方向	重现期/a	$H_{1/10}/\text{m}$	$\bar{T}/\text{s}$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
E ~ ESE	100	12.54	17.2	33.4
E ~ ESE	50	10.73	15.5	31.2
SE ~ SSE	100	8.37	17.4	26.2
SE ~ SSE	50	7.45	15.8	25.2

1.2 BW 模型及计算参数

1.2.1 基本方程

本次选用 2009 版的 MIKE21 软件，其 BW 模型采用交替方向隐格式 (ADI) 求解，基本方程^[19]如下：

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

$$\begin{aligned} &n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + F_x + \\ &n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right) + \frac{gP}{h^2 C^2} \sqrt{P^2 + Q^2} + \\ &n\psi_1 = 0 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y + \\ &n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right) + \frac{gQ}{h^2 C^2} \sqrt{P^2 + Q^2} + \\ &n\psi_2 = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

式中： x 、 y 为笛卡尔坐标(m)； t 为时间(s)； ξ 为水位(m)； d 为静止水位时的水深(m)； h 为水深(m)， $h=d+\xi$ ； P 为 x 方向流量密度($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)； Q 为 y 方向流量密度($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)； B 为 Boussinesq 色散因子； F_x 为 x 方向的水平应力； F_y 为 y 方向的水平应力； g 为重力加速度 (m/s^2)； n 为孔隙率； C 为谢才阻力系数； α 为多孔介质中的层流阻力系数； β 为多孔介质中的湍流阻力系数。

1.2.2 模型参数的选取

模型的计算范围包含马关围涂围区内及其口门外海域 (图 3)，网格的空间步长 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$ ，时间步长 $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ 。模型采用内部生波的方式，在边界处设置一生波线，可生成单向不规则波，波谱采用 JONSWAP 谱，谱峰因子 $\gamma = 3.3$ 。消波作用通过设置海绵层来实现，在陆地边界前、波

浪生长线后及封闭边界前均设置 20 层消波层。建筑物对波浪的反射作用通过设置空隙层的方法来模拟。

1.2.3 模型的计算条件

起波边界位于南侧，以 SWAN 模型龙口前沿的设计波要素作为 BW 模型的起波边界条件。计算水位同 SWAN 模型，仍采用 100 a 一遇高潮位，为 3.40 m。

2 计算结果与分析

2.1 SWAN 模型的验证

大戢山站位于北纬 $30^\circ 49'$ 、东经 $122^\circ 10'$ ，采用岸用光学测波仪进行波浪观测，测波浮筒在测波点的 NE 向，离岸约 500 m，该站是浙北海域最具代表性的波浪观测站之一。搜集大戢山站 1978—2001 年连续 24 a 的实测年极值波高，采用 P-Ⅲ分布按最小二乘法拟合经验频率点，获取该站 E ~ ESE、SE ~ SSE 方向组 100 a 一遇和 50 a 一遇的波高 $H_{4\%}$ ，将其转换为 H_s 。

根据 SWAN 模型大范围的波浪场计算结果，嵎山边界 E ~ ESE、SE ~ SSE 方向组来波经嵎泗本岛南、北水道传至大戢山站过程中，因海域开阔折射现象并不显著，大戢山站的波向与嵎山站对应的入射波向差异甚小。将大戢山站两方向组的 H_s 模型计算值与适线转换值进行比较，相对误差均控制在 10% 以内，两者的吻合程度较高 (表 2)，表明构建的 SWAN 模型计算范围和参数选取合理，模拟大范围的波浪传播具有较高的精度。

表 2 大戢山站各方向组不同重现期波高的验证比较

方向	波浪 重现期/a	P-Ⅲ适线 $H_{4\%}/\text{m}$	适线转换 值 H_s/m	模型计算 值 H_s/m	相对 误差/%
E ~ ESE	100	4.74	3.97	4.03	1.5
E ~ ESE	50	4.32	3.60	3.68	2.2
SE ~ SSE	100	4.56	3.81	3.94	3.4
SE ~ SSE	50	4.23	3.51	3.73	6.3

2.2 SWAN 模型的计算结果分析

工程海域通过嵎泗岛一大黄龙岛、大黄龙岛

一南鼎星岛、南鼎星岛一半边山各水道与外海相通, E、ESE、SE、SSE 共 4 个方向大范围波浪传播的计算结果表明, 进入嵊泗岛一大黄龙岛水道的波浪将发生折射而转向嵊泗岛北部海岸, 不能传至工程海域, 工程海域的波浪主要由南鼎星岛一半边山水道传入, 外海 E、ESE、SE 向来波在传入该水道之后均发生不同程度的折射, 波向顺时针偏转, E 向来波偏转最为明显, ESE 向来波次之, 传至马关围堤前沿海域时波向均已偏转成 SSE 向(图 4)。

根据泗礁换流站外侧马关围涂海堤的平面布置情况, 在龙口前沿设置计算点, 提取 SWAN 模型小区网格下嵌套计算的结果, 龙口前沿计算点处

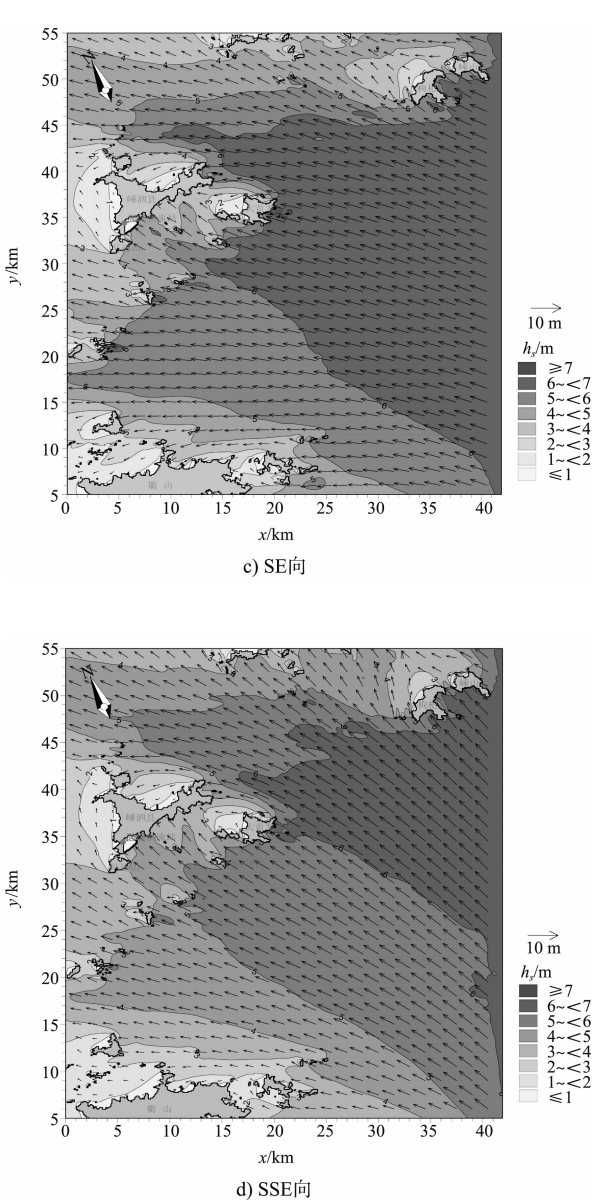
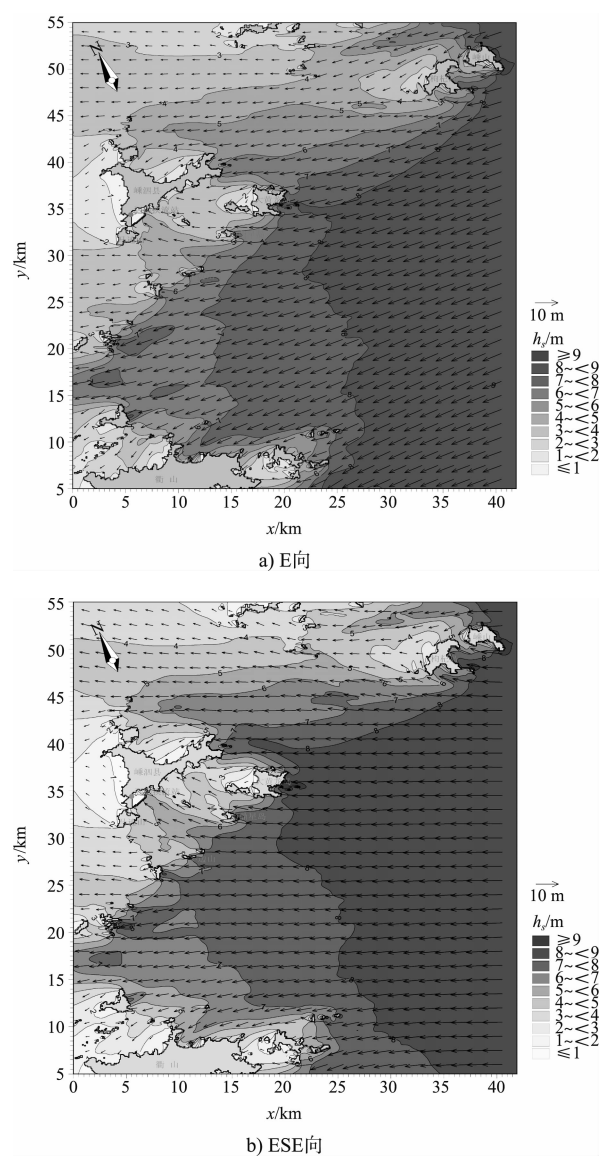


图 4 100 a 一遇高潮位组合 50 a 一遇波浪下掩护区外各向大范围波高分布

的各组波向介于 $153^{\circ} \sim 160^{\circ}$, 仅相差 7° , 入射波向近乎与龙口垂直。E、ESE、SE、SSE 向在 100 a 一遇高潮位分别组合 100 a 一遇、50 a 一遇波浪下龙口前沿的设计波要素见表 3。

由于各组波向差别很小, 从波高角度出发可确定 ESE 向为龙口的最不利来波方向(图 5), 其 100 a 一遇、50 a 一遇的 H_s 分别为 5.69、4.95 m, 可作为下一步围区内波浪绕射计算的边界条件。

表 3 各方向龙口前沿的设计波要素

方向	波浪重现期/a	d/m	$H_{1\%}$ /m	$H_{4\%}$ /m	H_s /m	$\bar{T}$ /s	$\bar{L}$ /m	波向/(°)
E	100	9.8	5.81	5.13	4.39	16.8	160.8	155
E	50	9.8	5.09	4.46	3.77	15.1	143.7	153
ESE	100	9.8	6.37*	6.37*	5.69	16.8	160.8	158
ESE	50	9.8	6.37*	5.74	4.95	15.1	143.7	157
SE	100	9.8	6.37*	5.75	4.97	17.1	163.8	158
SE	50	9.8	6.05	5.36	4.60	15.4	146.7	158
SSE	100	9.8	6.17	5.48	4.71	17.1	163.8	160
SSE	50	9.8	5.82	5.15	4.40	15.4	146.7	160

注：*表示破碎波高。

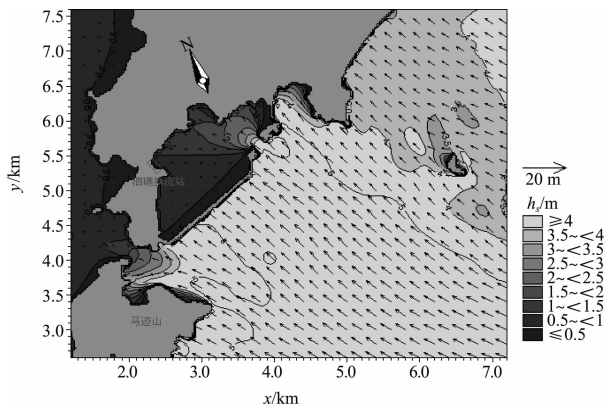


图 5 100 a 一遇高潮位组合 50 a 一遇波浪下
掩护区外小范围波高分布 (ESE 向)

2.3 BW 模型的计算结果分析

外海入射波向几乎与龙口走向垂直, 龙口的宽度为 220 m, 波浪传播至龙口时波能衰减剧烈, 波高迅速减小。波浪进入龙口后发生绕射, 波能在掩护区内扩散, 绕射波在传播过程中波幅进一步减小。受掩护区内水深和地形的影响, 波向发生一定程度的折射, 波面变得越来越不规则。当波浪遇到近岸建筑物时则会出现反射现象, 使得局部点位的波幅有所增大。在 100 a 一遇高潮位分别组合 100 a 一遇、50 a 一遇波浪条件下, 换流站前沿绕射波 H_s 分别为 0.7、0.6 m (表 4)。100 a 一遇高潮位组合 50 a 一遇波浪下围区内绕射波高分布情况见图 6。

表 4 泗礁换流站前沿绕射波要素计算值

波浪重现期/a	d/m	H_s /m	$\bar{H}$ /m	$\bar{T}$ /s	$\bar{L}$ /m	波向/(°)
100	5.1	0.7	0.45	16.8	117.3	105
50	5.1	0.6	0.38	15.1	105.1	105

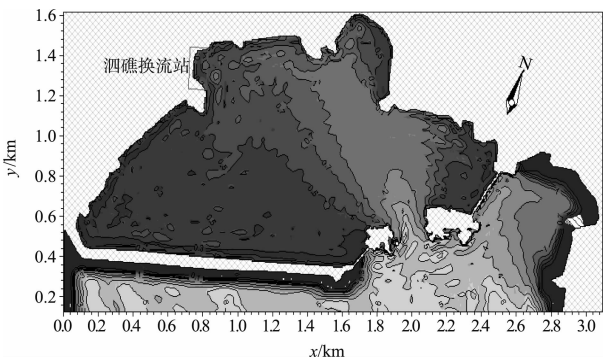


图 6 100 a 一遇高潮位组合 50 a 一遇波浪下
围区内绕射波高分布

考虑到围区内风区长度超过 1 km, 需同时考虑绕射波与局部风浪的合成。根据 SL 435—2008 《海堤工程设计规范》^[20], 局部风浪可采用莆田公式计算, 计算结果见表 5。

$$\frac{g\bar{H}}{v^2} = 0.13 \text{th} \left[\left(0.7 \frac{gd}{v^2} \right)^{0.7} \right] \text{th} \left\{ \frac{0.0018 (gF/v^2)^{0.45}}{0.13 \text{th} [0.7 (gd/v^2)^{0.7}]} \right\} \quad (5)$$

式中: $\bar{H}$ 为平均波高 (m); F 为风区长度 (m); v 为风速 (m/s); d 为风区内平均水深 (m); g 为重力加速度 (m/s^2)。

表 5 泗礁换流站前沿局部风浪要素推算值

波浪重现期/a	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	风区长度/m	风区内平均水深/m	$\bar{H}$ /m
100	33.4	1 100	5.9	0.54
50	31.2	1 100	5.9	0.50

采用下式将绕射波和局部风浪叠加:

$$H = \sqrt{H_{\text{绕射}}^2 + H_{\text{风浪}}^2} \quad (6)$$

最终得到泗礁换流站 100 a 一遇、50 a 一遇的设计波要素, 其有效波高分别为 1.08、0.98 m, 列于表 6。

表 6 泗礁换流站设计波要素计算值

波浪重现期/a	d/m	$H_{1\%}$ /m	$H_{4\%}$ /m	H_s /m	$\bar{H}$ /m	$\bar{T}$ /s	$\bar{L}$ /m	波向/(°)
100	5.1	1.54	1.32	1.08	0.70	16.8	117.3	105
50	5.1	1.40	1.19	0.98	0.63	15.1	105.1	105

3 结语

1) 建立大、小网格嵌套的 SWAN 模型, 对大戢山站 E ~ ESE、SE ~ SSE 方向组的重现期波高进行验证, 开展了泗礁换流站掩护区外 E、ESE、SE、SSE 向的大范围波浪传播计算, 根据 SWAN 模型的计算结果确定了 ESE 向为龙口前沿的最不利来波方向, 其 100 a 一遇、50 a 一遇的 H_s 分别为 5.69、4.95 m。

2) 以 ESE 向龙口前沿的设计波要素作为起波边界条件, 采用 BW 模型计算得到了泗礁换流站前沿的绕射波要素, 并将其与莆田公式推算的局部风浪叠加, 最终得到了泗礁换流站 100 a 一遇、50 a 一遇的设计波要素, 其有效波高分别为 1.08、0.98 m。

3) SWAN 模型与 BW 模型的联合应用, 使得波浪自深水区传至掩护区内换流站前沿过程中在大跨度地形下的波浪绕射、折射、反射等现象均得到了高精度的模拟, 较好地反映了泗礁换流站掩护区外和掩护区内的波浪场分布, 印证了 SWAN 模型与 BW 模型的联合应用在舟山泗礁换流站设计波浪计算中切实可行并具有一定的适应性。

4) 由于海浪因素的不确定性, 下一步可在嵊泗海域开展波浪观测, 利用实测资料对近岸波浪模拟的结果进行后评估, 使得数值计算的结果能更好地应用于实际工程。

参考文献:

[1] 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.

[2] 刘海成, 刘海源, 杨会利. 近岸波浪变形数值模型的比较研究[J]. 水道港口, 2009, 30(3): 153-158.

[3] 陈希, 沙文钰, 周芦燕, 等. 近岸海浪模式在中国东海台风浪模拟中的应用——数值模拟及物理过程研究[J]. 海洋通报, 2003, 22(2): 9-16.

[4] 陈希, 沙文钰, 闵锦忠, 等. 湛江港邻近海域台风浪的模拟研究[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 779-786.

[5] 黄世昌, 赵鑫, 娄海峰, 等. 浙江沿海超强台风作用下的台风浪波高[J]. 海洋通报, 2012, 31(4): 370-375.

[6] 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 应用 SWAN 模型分析航道对波浪传播的影响[J]. 海洋学研究, 2008, 26(3): 44-52.

[7] 宋伟伟, 陈国平, 严士常, 等. 基于台风浪后报模型的外海重现期波浪要素分析[J]. 水运工程, 2013(1): 51-54.

[8] 叶钦, 杨忠良, 施伟勇. 浙江近海波浪能资源的初步研究[J]. 海洋学研究, 2012, 30(4): 13-19.

[9] 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.

[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.

[11] 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, 2011, 9(4): 292-297.

[12] 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.

[13] 肖辉. 大连长兴岛北港区波浪条件数值模拟研究[J]. 水道港口, 2013, 34(6): 482-487.

[14] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C4): 7 649-7 666.

[15] Ris R C, Holthuijsen L H , Booij N. A third-generation wave model for coastal regions 2. Verification [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C4): 7 667-7 681.

[16] 浙江省水利厅. 浙江省海塘工程技术规定[R]. 杭州: 浙江省水利厅, 1999.

[17] 谢亚力, 李宏, 邵杰. 舟山泗礁换流站工程设计水文要素专题报告[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2013.

[18] 邵杰. 舟山洋山换流站工程设计水文要素专题报告[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2013.

[19] DHI group. MIKE21 Boussinesq Wave Module Scientific Documentation[S]. 2009.

[20] SL 435—2008 海堤工程设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)