



BW 模型在掩护水域内波浪计算中的应用

冯卫兵¹, 黄莹娜¹, 厉佳卉²

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210011)

摘要: 采用 MIKE21-BW 模型分别对平底地形下单突堤的波浪绕射以及实际地形下某港港内波浪场进行模拟及验证, 将模拟结果与规范中的计算图解及物模试验结果进行对比分析, 吻合良好。同时研究发现, 由于该模型数值格式的限制, 在波浪斜向入射的情况下, 模型的计算结果存在较为明显的误差, 而经过地形逆向旋转处理, 将波浪入射方向调整为正向入射的方法可以较好地改善模型的计算结果。另外, 在某港实际地形下的波浪模拟中, 还探讨了谱峰因子 γ 的变化对该港港内波浪场的影响。

关键词: 波浪; 掩护水域; 数值模拟; BW 模型

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)11-0008-06

Application of wave field simulation in sheltered waters based on BW model

FENG Wei-bing¹, HUANG Ying-na¹, LI Jia-hui²

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Yangtze River Management Office, Nanjing 210011, China)

Abstract: MIKE21 BW model is verified by the wave field simulation of single jetty flat terrain and an actual port terrain, which match well with calculating diagram in the specification or physical model test values. At the same time, studies show that as the limitation of numerical format, when the incident wave is oblique, there are evident errors in the model calculation result, and rotating the terrain to adjust the incident wave from oblique to vertical can improve the calculation results of the model. In addition, in the wave simulation at an actual port terrain, the influence of the higher peak factor γ to the wave field is also discussed.

Keywords: wave; sheltered water area; numerical simulation; BW model

波浪是海洋动力环境中重要的组成部分, 对于大部分海洋及海岸工程都有着极为重要的影响和作用。尤其当波浪传至掩护水域附近时, 水深由深至浅, 加上近岸建筑物的共同作用, 波浪的折射、绕射、反射以及破碎等现象更为明显, 使得波浪能量产生重新分布, 形成新的波浪场, 进一步影响到港区内船舶的泊稳以及码头的装卸作业效率。因此, 在工程施工之前, 对工程完工后掩护水域内的波浪场有一个准确的预测是极为重要的。

近年来, 随着数值计算技术的迅猛发展, 涌

现出了许多波浪数值计算模型, 如基于 Boussinesq 型方程的波浪模型、基于缓坡方程的波浪模型和基于能量平衡方程的波浪模型^[1]。其中 Boussinesq 型方程是在时域内求解质量和动量的守恒方程, 从而给出波浪传播过程中波面的变化、波浪引起的增水以及波浪破碎引起的近岸水流等信息^[2]。经过长期的发展, Boussinesq 方程在计算掩护水域内的波浪场方面已得到了广泛的应用, 目前运用比较成熟的相关软件主要有 MIKE21 的 BW 模块。BW 模块基于 Boussinesq 型方程的时域数值解, 同时考虑波浪的非线性以及弥散性, 能够精确模拟

收稿日期: 2015-04-14

作者简介: 冯卫兵 (1960—), 男, 博士, 教授, 从事海洋、海岸工程研究。

小范围内的波浪传播情况, 现已被广泛应用于海洋、近海工程水动力数值模拟^[3-5]。其控制方程及数值计算方法见式(1)~(3)。

连续方程：
$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

X 向动量方程：
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g}{c^2} \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \cdot \frac{p}{h} - E \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{3} Dh \left(\frac{\partial^3 p}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 q}{\partial x \partial y \partial t} \right) \tag{2}$$

Y 向动量方程：
$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{g}{c^2} \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \cdot \frac{p}{h} - E \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{3} Dh \left(\frac{\partial^3 q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 p}{\partial x \partial y \partial t} \right) \tag{3}$$

式中: ξ 为波面高度; p 、 q 为 x 、 y 向的流量密度; h 为水深; D 为平均水深; c 为谢才阻力系数; M 为曼宁系数; E 为紊动涡黏系数。

1 模型的验证

单突堤平底地形是进行绕射验证的经典地形, 该算例在 JTS 145-2—2013《海港水文规范》中有点圆法做出的绕射系数图。本文采用 BW 模型对该地形下的港内波浪场进行模拟并分析其计算绕射的合理性。

1.1 模型设置

模型地形采用水深为 20 m 的平底地形, 计算范围取为 3 600 m × 1 350 m 的矩形区域, 网格大小为 $\Delta X = \Delta Y = 10$ m, 时间步长 $\Delta T = 0.15$ s, 模拟周期取为 240 001 步。入射波采用多向不规则波, 采用 JONSWAP 谱。单突堤采用斜坡堤。

1.2 模拟结果分析

1.2.1 波浪正向入射

图 1 为波浪正向入射时 BW 模型计算结果的比波高分布, 图中两个半圆分别代表以堤头为圆心, 半径为 3 倍波长及 6 倍波长的半圆。图 2 为 JTS 145-2—2013《海港水文规范》中正向入射时的绕射系数分布。

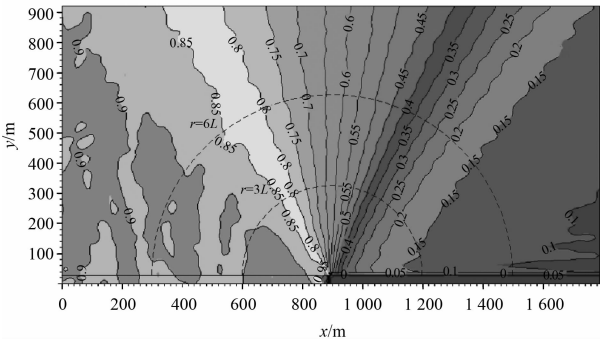


图 1 BW 模型计算单突堤绕射结果 (正向入射)

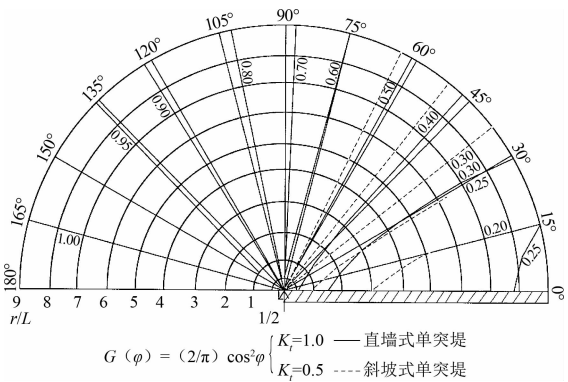


图 2 规范中单突堤绕射系数 (正向入射)

将 BW 模型的计算结果与海港水文规范中的计算图解进行对比, 可以得到 $r = 3L$ 和 $r = 6L$ 两个断面的比较结果 (图 3)。其中横坐标表示半圆上的点与堤头的连线和防波堤的夹角, 纵坐标表示绕射系数, 即比波高。

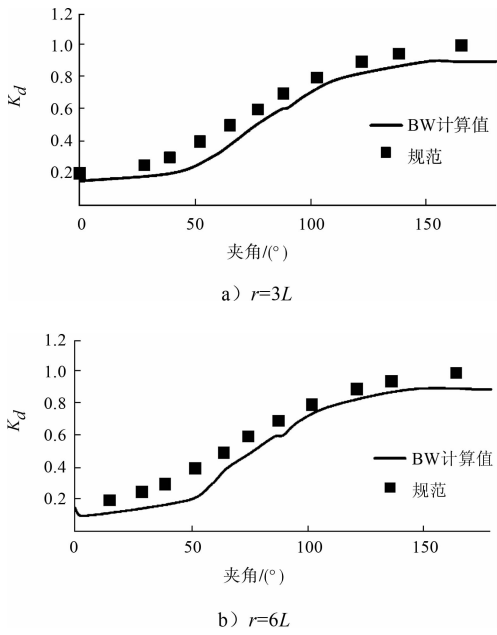


图 3 规范与 BW 计算单突堤绕射系数对比

如图 3 所示,当波浪正向入射时,对于 $r=3L$ 和 $r=6L$ 两个断面, BW 模型计算结果与规范中的计算图解整体趋势相似。当半圆上的点与堤头的连线与防波堤的夹角大于 90° 时,两者计算结果基本吻合;当该夹角小于 90° 时, BW 模型计算结果比规范中的计算结果略小,但基本可以反映实际情况,故可采用 BW 模型来模拟波浪正向入射时单突堤的绕射情况。

1.2.2 波浪斜向入射

对波浪 30° 、 60° 、 120° 、 150° 斜向入射时的情况进行了计算;针对波浪斜向入射对地形的要求,将原始地形进行旋转,保证 BW 模型在运行时采用正向入射。图 4 表示不同角度入射时,将地形进行旋转后再计算、未旋转直接计算与规范中计算图解的对比。

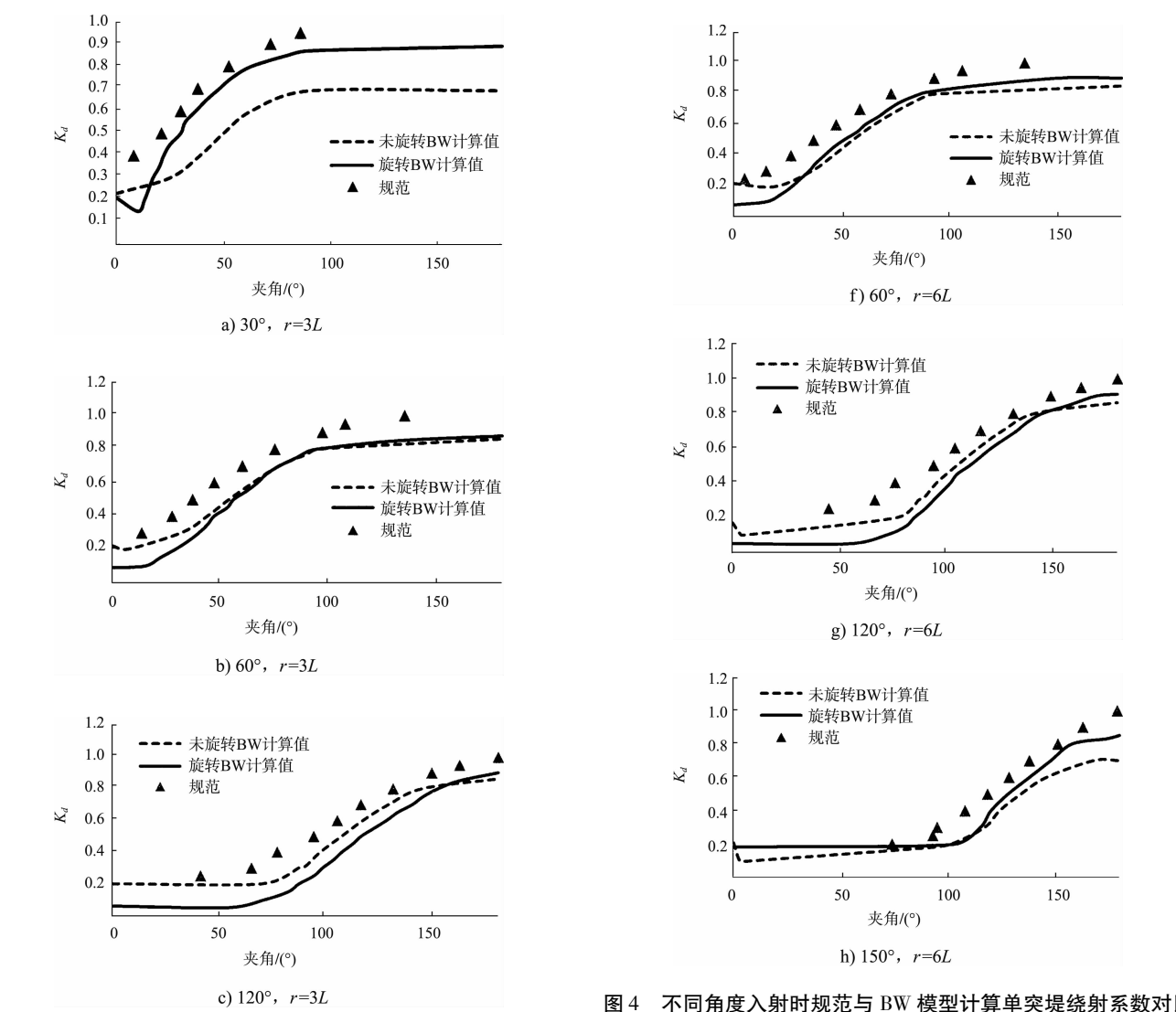


图 4 不同角度入射时规范与 BW 模型计算单突堤绕射系数对比

当波浪 30°入射时, 使用已旋转地形进行 BW 模型计算的结果相比未旋转地形的计算结果相差最大, 且最接近规范值; 当波浪 60°入射时, 旋转地形与否对 BW 模型计算结果几乎没有影响。可见, 当波浪大角度入射时, 若选用 BW 模型计算单突堤绕射, 应先进行地形的旋转; 当波浪小角度入射时, 则可不必旋转地形, 直接按斜向入射计算即可。

当波浪 120°入射时, 经过地形旋转后的 BW 模型计算结果比未旋转的 BW 模型计算结果更接近规范值, 而当波浪 150°入射时, 旋转地形对于计算结果的准确性有一定的提高, 但也并无明显优势。因为经过地形旋转后, BW 模型的波浪生长线与实际要研究区域的距离变大, 这会导致波浪在传播的过程中损失一定的能量, 从而引起比波高的计算值偏小。

2 某港掩护水域内波高分布计算

2.1 工程概况

某港兴建时, 开挖了一个边长 400 m×400 m、底部高程为 -9.5 m (黄海基面) 的正方形挖入式港池, 并在其西南角开挖了底宽约 130 m 左右的口门, 进港航道的轴线方位角为 N207°30', 港内的靠陆侧建有长 100 m 的码头。现需对原港码头进行大修, 该工程包括两部分: 第 1 部分为新建南、北两条防波堤, 总长约 900 m, 第 2 部分为港池西北角的消浪护岸长约 400 m。

河海大学对该工程进行了新建防波堤模型试验研究以检验其掩护效果。本文计算主要考虑波浪重现期为 2 a 一遇, 设计高潮位 1.67 m、平均潮位 0.95 m 两种潮位以及影响港内泊稳条件的主要波向 SSW、SW 和 WSW 共 3 个波向, 共计 6 组不同工况, 各主要波向口外原始波浪要素见表 1。码头前沿 (F)、码头两侧 (E、G)、航道 (A、B、C、D) 以及港池水域 (H、I、J) 等共计 10 个港内相关点的位置见图 5。

表 1 各主要波向口外波浪要素				
重现期/a	波向	$H_{1/10}/\text{m}$	$H_{1/3}/\text{m}$	$\bar{T}_{\text{max}}/\text{s}$
2	SSW	2.60	2.11	6.3
	SW	2.31	1.87	6.1
	WSW	2.27	1.84	6.1

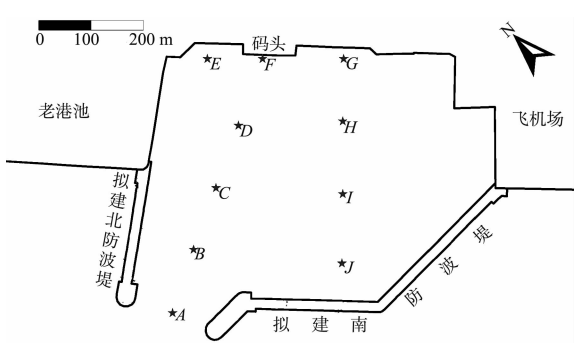


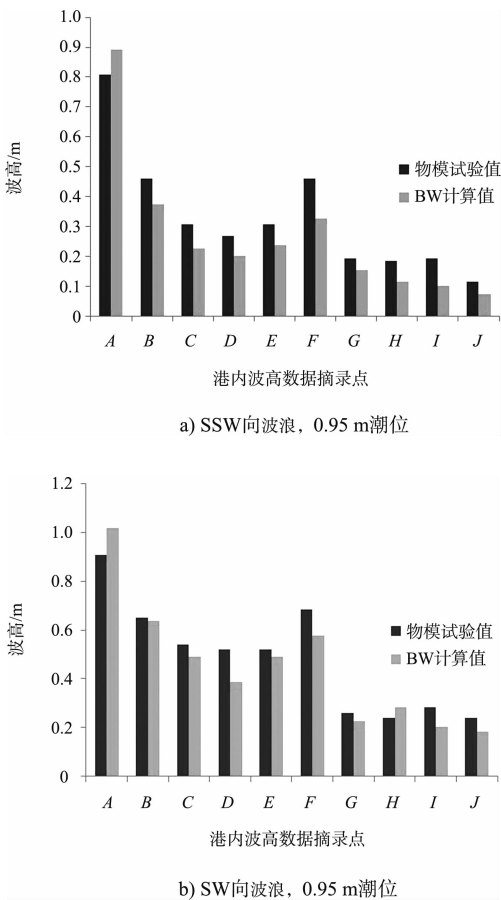
图 5 港内波高数据摘录点位置

2.2 港内波高计算 BW 模型的建立

模型地形采用 1:2 000 港区附近的水下地形图, 网格大小 $\Delta X = \Delta Y = 1\text{ m}$, 时间步长 $\Delta T = 0.01\text{ s}$, 模拟周期取为 60 001 步。入射波浪采用单向不规则波, 采用 JONSWAP 谱。

2.3 港内波高计算结果与物理模型试验结果对比分析

进行各种工况下的港内波高计算, 图 6 表示图 5 中各计算点的比波高对比。



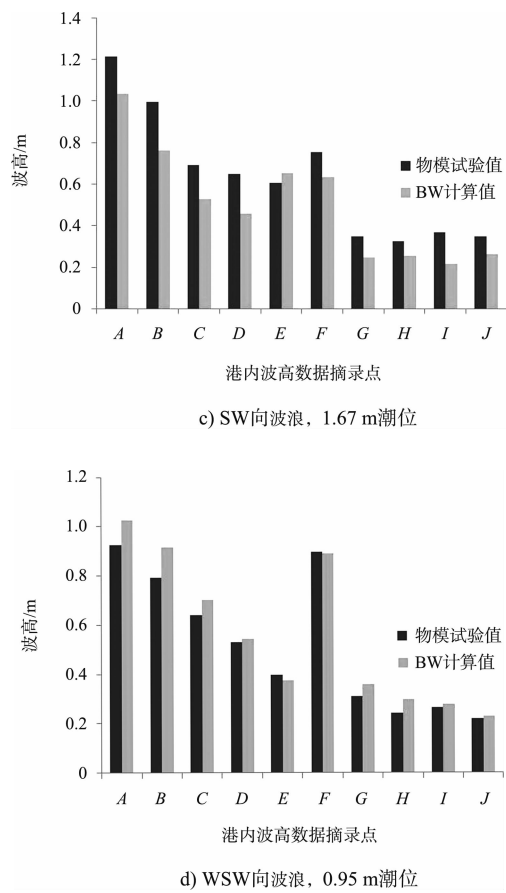


图6 BW模型与物模试验港内比波高对比

如图6所示,对于SSW和SW向的波浪,BW模型计算结果比物模试验结果偏小;而对于WSW向的波浪,BW模型计算结果比物模试验结果略大。这说明BW模型对于不同方向波浪入射的模拟结果不同,对于波浪入射掩护效果较好的情况其计算结果略小且对整体的影响并不大;而对于波浪入射掩护较差的情况其计算结果偏大且对整个工程的模拟更偏安全。

2.4 谱峰因子 γ 对计算结果的影响

英、荷、德、美等国的专家于1968—1969年通过“联合北海波浪计划”(即Joint North Sea Wave Project),对海浪进行大量的观测后经过统计处理所得JONSWAP谱^[6]公式:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right] \cdot \gamma^{\exp \left[-(\omega - \omega_m)^2 / (2\sigma^2 \omega_m^2) \right]}$$

(4)

式中: α 为能量尺度参量; g 为重力加速度; ω_m 为谱峰频率; γ 为谱峰因子,目前其观测值介于

1.5~6,平均值为3.3; σ 为峰形参数(当 $\omega \leq \omega_m$ 时, σ 取为0.07;当 $\omega > \omega_m$ 时, σ 取为0.09)。

本文采用BW模型进行模拟时波谱均采用JONSWAP谱,而其中谱峰因子 γ 值的选取对谱峰值以及谱型的集中度均有影响。本文计算仅考虑平均潮位为0.95 m,波浪入射为SSW、SW、WSW向时谱峰因子 γ 分别取1.5、3.3、4.5、6.0时对港内波高分布的影响。图7表示不同 γ 值对应的各计算点的波高对比。

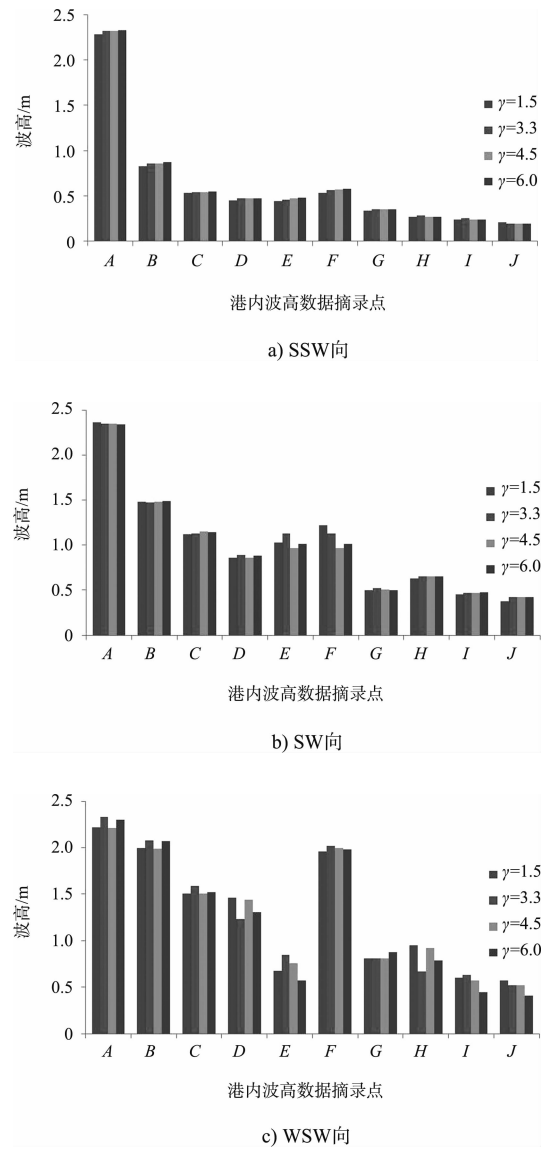


图7 BW模拟港内波高各计算点波高对比

如图7所示,当波浪由SSW向入射时, γ 值对计算结果的影响很小,基本可以忽略;而当波浪由SW向或WSW向入射时, γ 值的选取对计算

结果影响则应予以考虑, 尤其当波浪由 WSW 向入射时, 选取不同的 γ 值得到的计算结果差异较大。这是由于波浪由 WSW 向入射时, 防波堤的掩护较差, 港内波高值偏大, 而 γ 值的选取决定着谱峰值以及谱型的宽窄, 尤其在反射较明显的区段, 反射波与入射波相叠加, γ 值对其波高值的影响则更大。因此, 对于地形变化较复杂的情况, 应选取当地实际的 γ 值进行模拟计算。

3 结论

- 1) 采用 MIKE21-BW 模型, 分别计算了单突堤平底地形以及某港实际地形上的波浪场分布, 并与规范中的计算图解及物理模型试验值进行对比分析, 吻合良好, 验证了 BW 模型计算绕射的合理性。
- 2) 对 BW 模型模拟结果进行研究发现, 当波浪大角度入射, 应将地形进行旋转, 使模型中波浪的入射方向垂直于内波线, 否则将导致模型模拟结果偏小。同时, 在模型设置过程中, 应保证所研究的区域距离内波线的距离不要太远, 尽量减少波能在传播过程中的耗散。
- 3) 在模拟某港实际地形上的港内波浪场分布时, 本文还探讨了不同谱峰因子 γ 值对港内波高

分布的影响, 发现对于实际较复杂的地形, γ 值会对港内波高造成一定影响, 需选取当地实际的 γ 值进行模拟。

参考文献:

[1] 李孟国, 王正林, 蒋德才. 近岸波浪传播变形数学模型的研究与进展[J]. 海洋工程, 2002, 20(4): 43-57.

[2] 杨春平. 近岸波浪传播变形数值计算方法比较[D]. 南京: 河海大学, 2007.

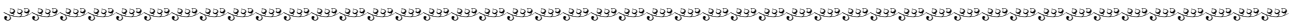
[3] Madsen P A, Murray R, Sørensen O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics [J]. Coastal Engineering, 1991, 15 (4): 371-388.

[4] Madsen P A, Sørensen O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics: Part 2. A slowly-varying bathymetry[J]. Coastal Engineering, 1992, 18(3-4): 183-204.

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

[6] Hasselmann K, Barnett T P, Bouws E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) [J]. Dtsch Hydrogr z, 1973, 8(12): 1-95.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

二航局位列武汉市百强企业第 11 名

近日, 武汉市企业联合会、武汉市工商业联合会、武汉企业家协会联合召开 2015 武汉企业 100 强、武汉民营企业 100 强发布暨第十六届武汉市优秀企业、优秀企业家表彰大会, 二航局获得 3 项荣誉。

二航局在 2015 武汉企业 100 强评选中, 以 361.385 9 亿元 (2014 年度) 的营业收入排序第 11 名, 在去年排名 13 的基础上前进 2 名; 获评第十六届武汉市优秀企业, 在 172 家优秀企业中排第 8 名; 二航局董事长、党委书记蒋成双荣获第十六届武汉市“卓越企业家”称号。

(摘编自《中国交通建设网》)