



直立码头前沿波高模型及数值模拟

杨锦凌¹, 张成刚², 韩炳辰¹, 罗劭扬¹, 刘细明¹, 王绿卿¹

(1. 中国人民解放军91053部队, 山东 青岛 266100; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要:立足港区平面规划布置实际需求,对防波堤掩护下的港域进行波浪物理模型试验。并基于 MIKE21-BW 模型的数值模拟,研究不规则波以一定角度入射直立式码头后泊位的波高情况。数值模拟及物理模型试验均可考虑波浪由外海传向近岸的绕射、反射及折射等过程。通过上述两种手段对比码头前沿提取的波高数据,结果吻合良好,说明 MIKE21-BW 模型能够应用于近岸波浪的传播变形及港区波浪条件研究中,为港区的平面布置提供科学的研究依据。

关键词:直立式码头; MIKE21-BW; 数值模拟; 传播; 变形

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0056-04

Wave height model and numerical simulation of frontier of vertical wharf

YANG Jin-ling¹, ZHANG Cheng-gang², HAN Bing-chen¹, LUO Shao-yang¹, LIU Xi-ming¹, WANG Lyu-qing¹

(1.Troops 91053 of PLA, Qingdao 266100, China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Based on the actual requirements of plane layout of port area, the port area under the cover of the breakwater is subjected to wave physical model tests. And based on the numerical simulation of the MIKE21-BW model, the wave heights of irregular waves incident on the berth behind a vertical wharf at a certain angle are studied. Both numerical simulation and physical model experiment can take into account wave's the diffraction, reflection and refraction from sea to shore. Comparing the wave height data extracted by the terminal front through the above two methods, the results are in good agreement, indicating that the MIKE21-BW can be applied to the study of nearshore wave propagation and wave condition in the port area providing a scientific research basis for the layout of the port area.

Keywords: vertical wharf; MIKE21-BW; numerical simulation; propagation; deformation

在海洋环境中, 波浪、潮汐是影响港口工程建筑物运营安全及船舶系靠泊的主要因素。外海波浪受地形影响传向浅水区, 将产生绕射、反射、折射等物理现象^[1], 波浪要素也会发生改变, 形成新的波浪场, 对港区泊稳产生影响。在港区前期规划布置中, 需要建造防波堤用于掩护港区或减小港域码头前沿波浪。为最大限度发挥防波堤的使用, 提高码头使用率, 可将防波堤内侧兼做靠泊码头。因此, 如何根据外海波浪条件, 合理调整防波堤布置, 评价防波堤兼码头对外海入射

波浪的掩护效果具有重要意义。

随着计算机技术的快速发展, 数值模拟手段越来越多地应用到海岸及近海工程研究中, 近年来国内外学者提出和完善了多种数值计算模型, 广泛应用的有 Boussinesq 方程、波能平衡方程、缓坡方程等。其中邹志利等^[2]对经典的 Boussinesq 方程进行了高阶推导, 建立了复杂地形条件下的波浪传播模型; 董胜^[3]基于改进的 Boussinesq 方程模型研究了人工岛游艇码头的泊稳, 采用的两种方法结果吻合较好; 张娜^[4]针对港区总平面规划

与布置, 应用数值模拟方法, 对工程建成前、后的港域波浪进行模拟, 为方案比选和工程设计提供了合理化建议; 冯卫兵^[5]采用 MIKE21-BW 模型模拟了不同地形下港内波浪分布, 将模拟结果与规范对比, 另外还探讨了谱峰因子 γ 对计算结果的影响。综上, Boussinesq 方程能够精确模拟复杂水深、小区域港内及周边波浪的传播过程, 该方法被广泛应用于港口、近海工程的水动力数值模拟研究。

本文基于 MIKE21-BW 软件^[6], 将波浪以一定角度入射直立式防波堤兼码头, 对该过程分别进行港池物理模型试验和数值模拟研究, 通过对提取的波高进行对比, 验证基于 Boussinesq 方程的数值模拟手段可行性和准确性, 为该工程前期平面规划设计, 降低工程项目建设成本提供科学建议。

1 MIKE-21 BW 数学模型

1.1 基本方程

本文应用 MIKE21 中的 BW 波浪模型, 该模型能够对复杂水深及网格精细处理。模型考虑了波浪浅水变形, 能很好地满足计算需求, 但该模块计算防波堤绕射波高均按不越浪考虑。

该模型的基本方程如下:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \cdot \frac{p}{h}}{c^2} - \\ E \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{3} Dh \left(\frac{\partial^3 p}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 q}{\partial x \partial y \partial t} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{g \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \cdot \frac{q}{h}}{c^2} - \\ E \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{3} Dh \left(\frac{\partial^3 q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 p}{\partial x \partial y \partial t} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x 和 y 为水平坐标; t 为时间; ξ 为高出平均水位的水面高度; p 、 q 为 x 、 y 方向的流量密度; h 为水深; D 为平均水深; C 为谢才系数, $C=Kh^{1/6}$,

K 为曼宁系数; E 为紊动涡黏系数; g 为重力加速度。

1.2 造波边界

该模型能够沿着指定区域添加流量造波, 在造波区域后设置消浪边界, 用于吸收超出模型区域处的波浪以增加计算的稳定性。为了将数值模拟和物理模型试验结果对比, 数值模拟研究同样采用单向不规则波, 其波谱采用国际上通用的 JONSWAP 谱。其表达式为:

$$\beta_J = \frac{0.062\ 38}{0.230+0.033\ 6\gamma-0.185\ (1.9+\gamma)^{-1}} \cdot (1.094-0.019\ 15\ln\gamma) \quad (4)$$

$$S(f) = \beta_J H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} (T_p f)^{-4} \right] \cdot \gamma^{\exp[-(f/f_p-1)^2/(2\sigma^2)]} \quad (5)$$

$$T_p = \frac{T_s}{1-0.132(\gamma+0.2)^{-0.559}} \quad (6)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & (f \leq f_p) \\ 0.09 & (f > f_p) \end{cases} \quad (7)$$

式中: β_J 为能量尺度参数; σ 为峰形参数; $S(f)$ 为谱密度函数 ($m^2 \cdot s$); f 、 f_p 为组成波频率和峰频 (s^{-1}); T_s 、 T_p 为有效波周期和峰频周期 (s), $T_s = 1.15\bar{T}$; H_s 为有效波高 (m); γ 为谱峰因子, 取 $\gamma=3.3$ 。

1.3 消波边界

利用 MIKE21-BW 模型进行波浪的数值计算时, 模型四周全封闭, 在模型边界处进行消波处理, 防止遇建筑物及岸线反射的波浪在模型关注区进行多次叠加而影响计算结果的精确性。同时在反射较大而产生波浪叠加处设置消波边界增强计算的稳定, 防止模型溢出。消波层厚度不小于峰频波长的 1.0~1.5 倍,

1.4 反射边界

反射边界包括自然护岸、防波堤和码头等建筑物。根据计算条件, 防波堤兼码头采用直立实体结构, 反射系数取 1, 自然边界和斜坡式防波堤为斜坡式结构, 部分反射, 其宽度一般不小于峰频波长的 1/4。

2 试验设计

2.1 物理模型试验

物理模型试验设计以防波堤兼码头内侧波况为研究内容，确保码头前沿波高满足规范要求。试验在长 42 m、宽 20 m、深 1.0 m 的水池中进行，水池一边配备有能够产生多方向不规则波的造波机，铰接连接，造波机单板宽 0.5 m。物理模型试验范围为 2.6 km×1.9 km，其中：防波堤兼码头为直立式沉箱结构，上部为混凝土胸墙，下部为沉箱，沉箱下方为 10~100 kg 块石基床，迎浪侧采用 400~500 kg 块石护面(图 1)。试验水位为设计高、低水位，重现期 2 a 一遇，采用一种方向波浪，单向不规则波以一定角度入射港域。波高采集装置为 DS-30 系统，该系统具有实时监测、数据采集及处理等功能，在码头前沿共布置浪高仪 6 排，每排 2 个测点，共放置测点 12 个，其中第 1 排 1、2 号测点距码头端部 25 m，其余纵向测点间距 55 m，测点横向间距 20 m，内侧测点距码头前沿 10 m，测点位置见图 2。通过试验，测定拟建防波堤兼码头内侧水域的波浪状况。物理模型试验波要素见表 1。

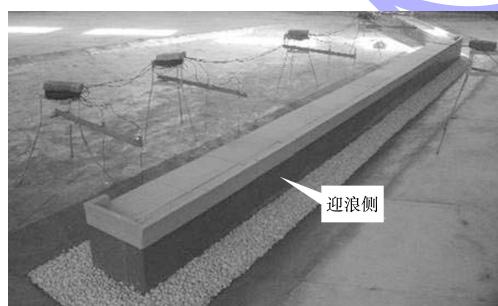


图 1 物理模型试验平面布置

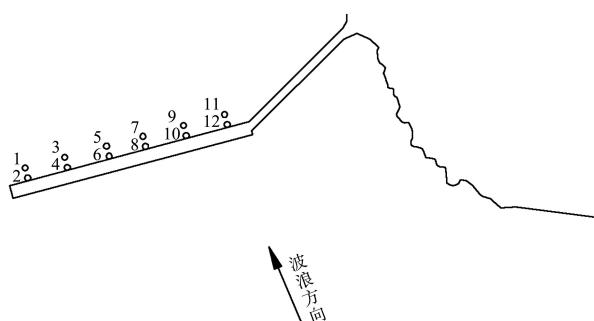


图 2 物模试验测点布置

表 1 物理模型试验波浪要素

重现期/a	水位	H_s/m	T/s	方向/(°)
2	设计高水位	1.63	6.90	111.7
	设计低水位	1.35	6.90	111.7

试验表明，防波堤外侧采用直立结构时对波浪反射严重，波浪在防波堤前叠加增大。波浪经防波堤堤头处绕射进码头前沿区域，码头内侧为直立结构，波高增大。分别在设计高、低水位下试验了港域的波浪情况，结果表明：设计低水位时码头前沿波高小于设计高水位，码头前沿 1~12 个测点波高值均未超出系泊允许波高，满足系泊要求。

2.2 数值模拟研究

2.2.1 模型设置

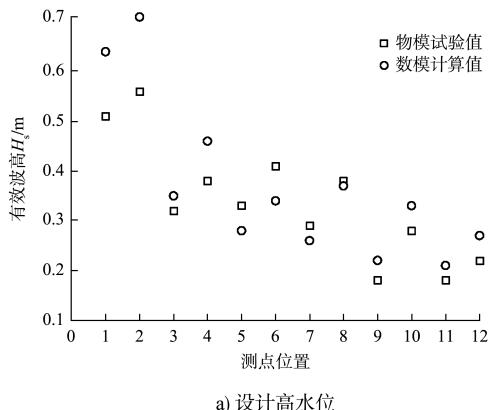
为研究波浪遇直立式防波堤兼码头后防波堤内侧的波浪情况，利用 MIKE21-BW 波浪模型在没有建筑物的原始地形上率定与物理模型试验一致的某点波要素，波要素结果满足规范误差要求，波要素见表 1。数值模拟研究模型范围同为 2.6 km×1.9 km，计算分设计高水位和设计低水位，重现期 2 a，计算区域为正方形网格， x 和 y 向空间网格步长为 2 m，为保证波浪传播至稳定状态，计算时间为 21 min，防波堤兼码头两侧为直立实体结构形式，反射系数接近 1。斜坡结构为部分反射，岸线为部分反射。孔隙层数目及孔隙率根据波浪要素、水深选取，依据经验进行调整并最终确定。

2.2.2 结果分析

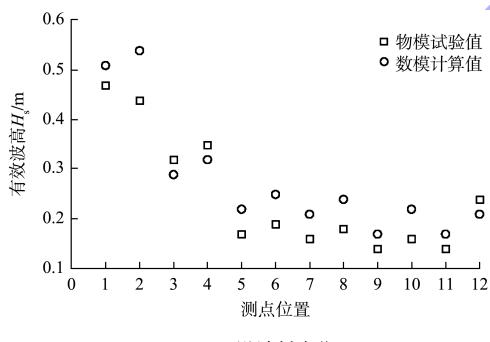
物理模型试验和数值模拟研究均未发生越浪，将 MIKE21-BW 模型计算结果与物理模型试验结果进行比较，图 3a) 为各测点设计高水位时物模试验和数值模拟结果对比，图 3b) 为各测点设计低水位时物模试验和数值模拟结果对比。从图 3 可以看出，各测点物模试验值和数值模拟结果吻合良好。码头前沿各测点波高最大差值不超过 0.14 m，见表 2。物理模型试验和数值模拟研究均未发生越浪现象，不越浪使物理模型试验和数值模拟在同样工况下展开研究，结果可比。数值模拟研究结果表明了应用 MIKE21-BW 模型能够较精确地计算波浪在近海港域的传播变形。

图 4 为设计高水位、设计低水位下的等比波

高分布, 比波高是通过数值模型计算的港内实际波高情况与物模试验已知点波要素的比值。由图4可知: 波浪在传到近岸防波堤堤头时, 波浪发生了明显的绕射, 等比波高呈绕射状由堤头区域向防波堤内侧减小。数值模拟研究得到的结果分析和物理模型试验的结果在空间的分布趋势是一致的, 表明基于该方法下的数值模拟研究是准确和可行的。

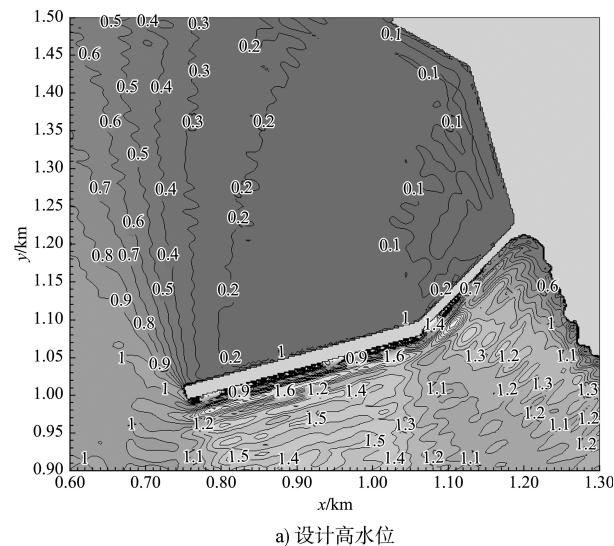


a) 设计高水位

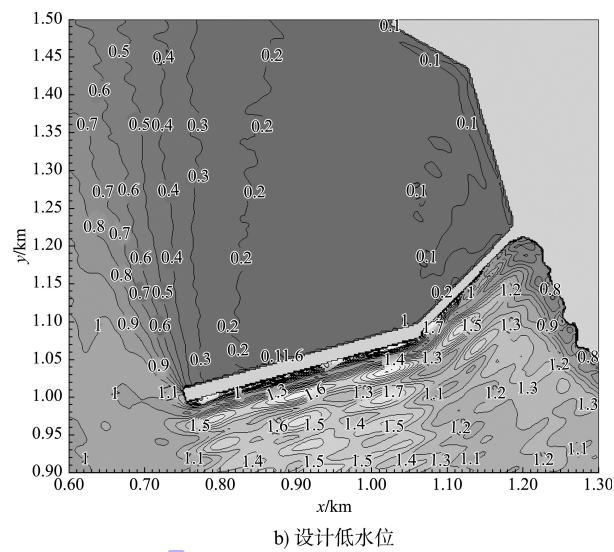


b) 设计低水位

图3 码头前沿各测点波高



a) 设计高水位



b) 设计低水位

图4 防波堤兼码头内侧港域等比波高分布

表2 码头前沿各测点误差

水位	测点	波高/m		误差/%
		物模	数模	
设计高水位	1	0.51	0.64	25.5
	2	0.56	0.71	26.8
	3	0.32	0.35	9.4
	4	0.38	0.46	21.1
	5	0.33	0.28	-15.5
	6	0.41	0.34	-17.1
	7	0.29	0.26	-10.3
	8	0.38	0.37	-2.6
	9	0.18	0.22	22.2
	10	0.28	0.33	17.9
	11	0.18	0.21	16.7
	12	0.22	0.27	22.7
设计低水位	1	0.47	0.51	8.5
	2	0.44	0.54	22.7
	3	0.32	0.29	-9.4
	4	0.35	0.32	-8.6
	5	0.17	0.22	29.4
	6	0.19	0.25	31.6
	7	0.16	0.21	31.3
	8	0.18	0.24	33.3
	9	0.14	0.17	21.4
	10	0.16	0.22	37.5
	11	0.14	0.17	21.4
	12	0.24	0.21	-12.5

3 结论

1) 通过物理模型试验和数值模拟研究验证, 数值计算的码头前沿波高各验证点与物理模型试验结果对比较好, 情况一致。