



透浪建筑物掩护水域波浪数值模拟研究

贾晓¹, 张峰², 邵燕华³

(1. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201; 2. 国家海洋局第二海洋研究所 工程海洋学重点实验室, 浙江 杭州310012; 3. 浙江省水利水电工程勘察设计院, 浙江 杭州310002)

摘要: 为了研究透浪水工结构掩护水域的波浪条件, 采用MIKE21系列软件的BW模块及SWAN模型对假定工况下的波浪传播进行了模拟。通过2组数值模拟结果与整体波浪物理模型试验结果的对比, 比较了2种数值方法模拟掩护水域波浪条件的可行性及适用性, 然后采用SWAN模型模拟了12级风条件下潜堤掩护水域的风浪场, 取得了较好的效果。

关键词: 波浪; 透浪; 数值模拟; MIKE21-BW; SWAN

中图分类号: O 353.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)11-0153-06

Wave numerical simulation about waters sheltered by permeable hydraulic structures

JIA Xiao¹, ZHANG Feng², SHAO Yan-hua³

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;

2. Key Laboratory of Ocean Engineering, the Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China;

3. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: In order to study the wave condition on sheltered waters behind permeable hydraulic structures, we simulate the wave propagation under given conditions using both the BW (Boussinesq wave) module of the MIKE 21 (DHI) and the SWAN model. Through the comparison between the two sets of numerical simulation results and three dimensional physical model results, we analyze the feasibility of numerical simulation about wave condition on sheltered waters. At last, SWAN model is used to simulate the wind wave field on water areas which is covered by the submerged breakwater on the extreme condition of 12-class Beaufort scale wind, and satisfactory simulation results are achieved.

Key words: wave condition; transmission; numerical simulation; MIKE21-BW; SWAN

近年来, 随着沿海经济的发展, 原有海港的作业能力已不能满足货运量的需求, 新建港口日益朝着大型化、深水化的方向发展。在部分原不适宜建港岸线, 同样因腹地经济发展, 也需要建设码头以减少货物周转运费。

此种工况下传统的防波堤造价昂贵, 同时有可能引起港区淤积、水质污染等负面影响, 故特种形式的防波堤日益增多。目前技术成熟、研究最多、应用也最广泛的主要是桩基结构的透空式防波堤^[1-4], 如长江口炮台湾透空式防波堤^[5]、福

建黄岐中心渔港^[6]、广东海岸新港^[7]、广东博贺中心渔港^[8]、朱家尖月岙渔港^[9]、大陈中嘴避风港^[10]等。同时, 部分高桩码头亦有一定的防浪功能, 目前码头平面设计中一般不予考虑其防浪能力。

在以往的研究中, 采用整体或断面波浪物理模型模拟建筑物周边的波浪场是常用的技术手段^[4, 11-14]。目前已完成的透空式防波堤均进行过物理模型试验。但物理模型, 尤其是港区掩护水域的三维物理模型, 科研费用较大、试验周期较长、模拟的工况数量有限。故先通过断面物理模

收稿日期: 2013-08-25

作者简介: 贾晓(1984—), 男, 助理研究员, 主要从事港口海岸工程的相关研究工作。

型试验或相关经验公式得到透浪系数，在通过平面二维波浪数学模型对该类问题开展系列研究是目前的一个研究趋势^[15-17]。

本文采用了2种模拟透浪结构物掩护水域的数值模拟方法，第1种方法是采用商用MIKE21系列软件的BW（Boussinesq Wave）模块进行模拟，通过在结构物轴线附近添加孔隙层以模拟透浪结构；第2种方法是采用第3代海浪模型—SWAN（Simulating Wave Nearshore）模型进行模拟，通过在透水结构物前沿引入透浪建筑物模拟透浪结构。

本文首先采用两个模型构建了荔枝湾港区的数值模型，将两个模型的数值试验结果与物理模型试验的结果对比，分析采用数值模拟手段模拟透空式水工建筑物掩护水域波浪场的可行性。然

x向动量方程：

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

y向动量方程：

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

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 为紊动的涡黏系数。

该模型中较为完善地考虑了波浪的折射、反射、浅水变形等一系列波浪现象。其中，BW模块基于孔隙层的设置（即非DARCY介质透水性）来模拟反射边界及透射建筑物。

1.2 SWAN模型

SWAN（Simulating Wave Nearshore）为第3代海浪数学模型，由Ris等^[21]总结了能量输入、损耗、传递的成果提出的浅水波浪数值预报模型，是目前较为流行的一种波浪数值模拟工具。SWAN模型采用动谱平衡方程描述风浪生成及其在近岸区的演化过程^[22]。其控制方程及计算源汇项的表达见式（4）。

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (4)$$

后采用SWAN模型模拟了12级风条件下长江口地区某潜堤掩护港区的港内波况。

1 数值模拟方法

1.1 MIKE21-BW模块

MIKE21系列软件是由丹麦水工所（DHI）开发的商用水力学计算软件，其中的BW（Boussinesq Wave）模块基于改进的Boussinesq方程开发，能够精确模拟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^[18-20]。其控制方程及数值计算方法见式（1）~（3）。

连续方程：

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

式中： $N=E/\sigma$ ，为波作用密度变量； $C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta$ 分别为沿 x 向、 y 向、频域和方向域的波速。从物理意义上讲，方程左边第1项代表波能；第2,3项代表波能随地理空间的变化；第4项代表波能随频率的变化；第5项代表波能沿方向的变化；右边项代表源函数（能量的输入输出，包括波浪的成长与消散、白帽破碎效应、波-波非线性作用、底床摩擦以及波浪破碎等）。

在SWAN模型的架构中，可以由2种基本模式来模拟建筑物（透浪建筑物）。第1种模式，输入堤型参数，通过经验公式，计算得到建筑物背浪侧的透射波高，前提是堤身需为潜堤结构；第2种模式，可以直接输入透浪系数，此时需要通过其他技术手段，如断面物理模型试验等，确定透浪系数。

第1种模式透浪系数的计算方法，主要是基于Goda的经验公式，表达式如下：

$$K_t = \begin{cases} 1 & \frac{F}{H_i} < -\beta - \alpha \\ 0.5 \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{F}{H_i} + \beta \right) \right] \right\} & -\beta - \alpha \leq \frac{F}{H_i} \leq -\alpha - \beta \\ 0 & \frac{F}{H_i} > -\alpha - \beta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F=h-d$, 为堤上自由过水深度, 即堤前水深减去堤高; H_i 为来浪向的入射波高; α, β 为与堤型相关的参数。根据合田良实的在波浪水槽的试验结果, 各参数值见表1。

表1 透浪系数公式中的堤型参数

堤型	α	β
直立堤	1.8	0.10
沉箱结构	2.2	0.40
单斜坡堤 (1:1.5)	2.6	0.15

需要指出的是, 上述参数仅适用于正向入射波, 且对于斜坡堤而言, 坡度需缓于1:0.7。

对于不透浪的抛石矮坝, Angremond等^[23]亦给出其他结构的表达形式, 如:

$$K_t = -0.4 \frac{F}{H_i} + 0.64 \left(\frac{B_k}{H_i} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi}) \quad (6)$$

但从表达式的本质上分析, 两种公式均为经验公式, 且实际工程中的结构不一定能够对应上。

为了拓展SWAN模型在透浪建筑物模拟的范围, 较新版本的模型 (40.71后) 可以直接输入通过其他技术方法确定的透浪系数, 例如二维波浪水槽试验及波浪整体试验。本次在模型设置中采用了后述方法。

在透射系数 K_t 确定后, 工程建筑物作为一条虚设的线来处理, 在计算中首先判断计算点是否越过建筑物, 然后决定波能是否传播到该计算点, 或者以何种比例关系传播到下一点。在贴体曲线网格和非结构网格的计算中, 计算做了一定的简化, 即保留了时间的剖分, 而在此两点的计算中忽略频率和角度的剖分。

2 数值模型结果与整体物理模型试验结果对比

2.1 模型设置及透浪系数

本文中数值模拟所采用的地形及计算参数均参考河海大学进行的荔枝湾港区整体波浪物理模型进行概化, 数值模拟的地形图及边界条件见图1,

模型验证点位见图1中P1~P14。

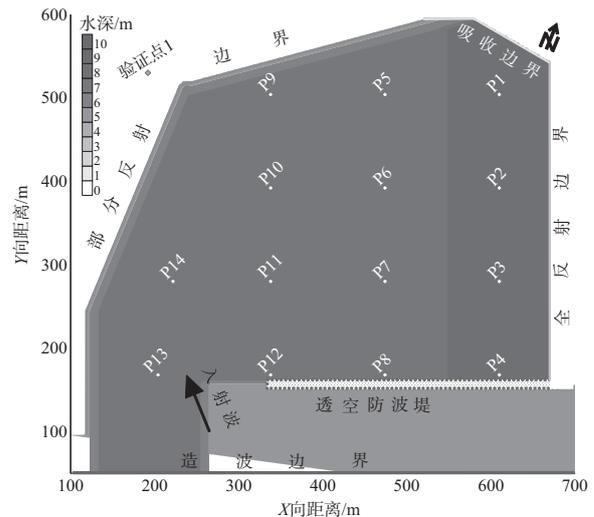


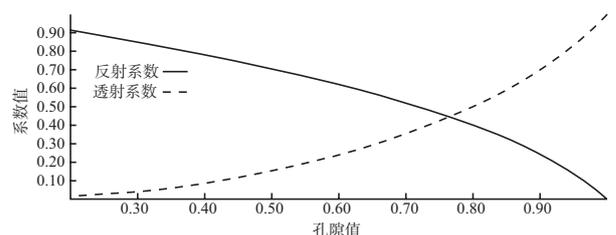
图1 计算地形及边界条件 (含验证点位置)

透空式防波堤的透浪系数, 相关规范有经验公式可以参考^[24], 许多学者也根据波浪水槽试验等方法得到了其他研究成果^[13]。本次数值计算所采用的透射系数均为针对该工程所进行的波浪断面试验和整体模型试验确定的透射系数^[25]。数值试验所采用的入射波要素及透射系数见表2。数值计算中的其他参数可参考相关文献^[15,24]。

表2 入射波要素及透射系数

波向	堤前水深/m	$H_{13\%}$ /m	T_m /s	透射系数
SE	5.7	1.55	4.38	0.27
	3.9	1.10	3.51	0.46

在BW模块的计算中, 在设计高水位及设计低水位采用的孔隙参数见图2。



a) 设计高水位

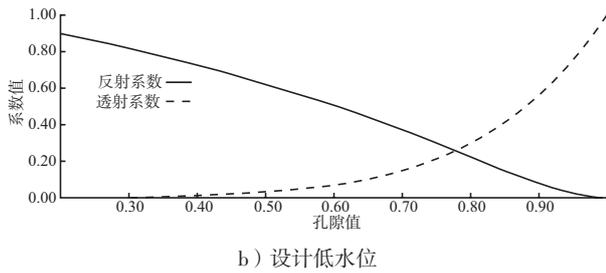


图2 透射建筑物空隙值与透射系数关系

2.2 计算结果比较

定义比波高 $K_t = H_{s点} / H_{s入}$ ，其中： $H_{s点}$ 为点位实测波高， $H_{s入}$ 为模型边界入射波高。两个波浪模型在港区水域的比波高等值线对比情况见图3。

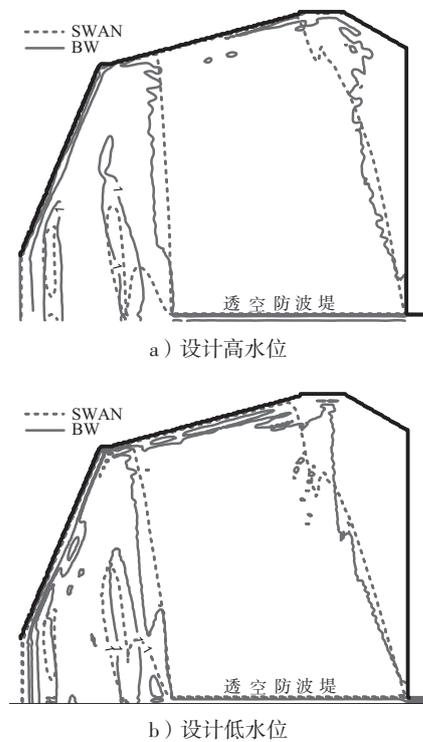
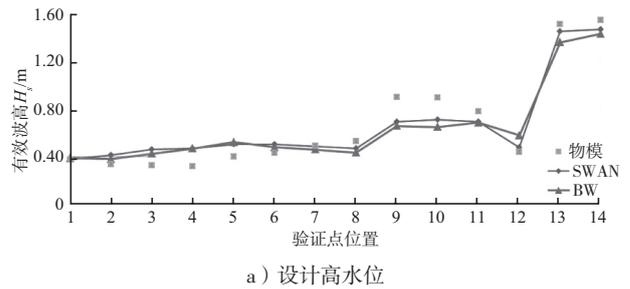


图3 港区水域比波高等值线

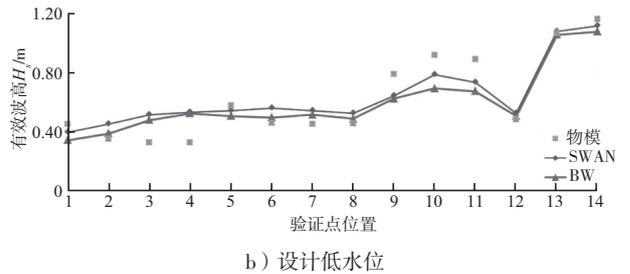
可以看出，两个数学模型在掩护水域的等值线基本吻合，在靠近口门位置两个数学模型的结果差异略大一些，图3中亦可以看出在靠近反射边界处，BW模块的模拟结果对反射波的模拟更精细一些。

在此基础上，将两个波浪模型的计算结果在特定点位的波高与物理模型测量波高进行对比，点位设置见图1，对比情况见图4。

分析可见，在透浪建筑物掩护水域（以P3,P7点为代表），数值模拟结果与物理模型试验结果基本一致；口门处水域（以P11,P14点为代表）数值模拟结果略小于物理模型试验结果。



a) 设计高水位



b) 设计低水位

图4 验证点位数模计算与物模测量波高比较

SWAN模型与BW模块在掩护水域的计算精度基本相当，均可应用于透空防波堤掩护水域的波浪场计算。在使用中发现，基于Boussinesq方程的BW模块对计算稳定性要求较高，而SWAN模型计算稳定且模型设置较为方便。与BW模块相比，SWAN模型还具有以下优点：

1) SWAN模型对各种源汇项函数，尤其是风能输入的模拟较为准确，可以在潜堤掩护水域波浪场计算中考虑风能输入，在港区面积较大时候影响尤其显著；

2) SWAN模型可以局部加密，将潜堤掩护水域波浪场的计算与大范围风浪场的计算同步进行，避免嵌套产生的二次误差；

3) SWAN模型计算稳定，最新版本（40.85后）的模型提供了多核运算功能（MPI运行模式），大大提高了计算速度。

3 工程实例计算

3.1 工程概述

鉴于上述的引入透射系数的SWAN模型在潜堤掩护水域波浪场计算的优势，本文采用SWAN模型模拟了长江口某潜堤掩护港区在12级风作用下港区内部的波况。工程所处位置见图5。

需要指出，码头的离岸方向有一道挡沙堤，堤顶高程在吴淞口基面以上4.9~5.0 m，在上海市防汛潮位下（6.34 m）呈淹没状态，堤身宽度6~10 m，

相对较窄, 波浪可以越过堤顶影响港区水域。港区的平面布置见图6。

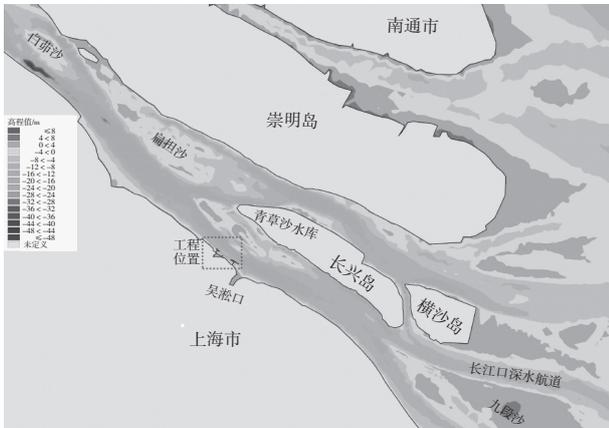


图5 工程地理位置



图6 港区平面布置

3.2 网格设置

上海市防汛标准为200 a一遇极端高潮位叠加12级风(下限风速, 32.7 m/s)。为了分析该港区在极端条件下的波况, 采用上述条件进行了数值计算。工程位置为了增加计算分辨率以得到更准确的模拟结果及可以较好地引入透射建筑物, 对局部网格进行了调整并加密, 见图7。

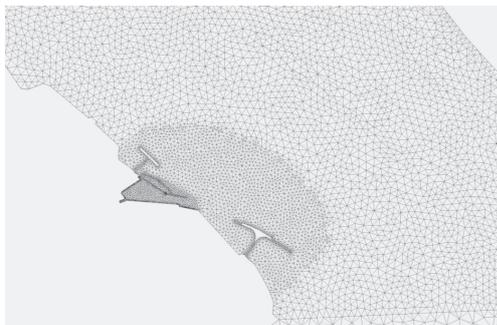


图7 工程细部的网格剖分

3.3 透射系数的测定

受港区外围地形及边界的影响, 挡沙堤东西

两侧的波高并不一致。根据大范围风浪模型初步计算发现, 整个挡沙堤外侧波高差异相对较大, 但是周期与波长基本一致, 挡沙堤外侧波浪的周期5.5 s, 波长约为55 m。故在等周期的条件下, 根据水槽试验结果测定了挡沙堤不同位置的透浪系数。

在东侧, 各向的入射波高普遍在2.2~2.6 m, 此时的透浪系数约为0.55; 在西侧, 受邮轮码头和挡沙堤前抛石潜堤的影响, 各向的波高普遍在1.2~1.5 m, 此时的透浪系数约为0.75。故在数值模型中, 将挡沙堤分为两段, 分别设置不同的透浪系数, 保证结果模拟的科学性。

3.4 数值计算结果

离岸风不会在港内产生较大波高, 本案例中, 只有NNW-ESE向的风向, 可以产生影响港区的波浪。以N向风为例, 在N向32.7 m/s的风速下, 南港水域的波浪场见图8, 同时可以得到港区内部的波浪场见图9。

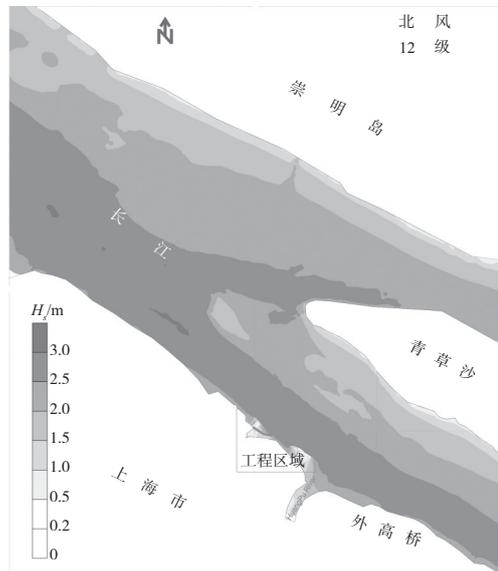


图8 N向风作用下工程周边水域波高



图9 N向风作用下港区附近波高

通过本次计算表明,引入透射系数的SWAN模型可以较好地模拟潜堤掩护水域的波况,并且可以与大范围模型计算同步进行。

4 结语

本文首先分析了目前常见的能够模拟透浪水工建筑物掩护水域波况的数值模型,介绍了其模拟透空建筑物的物理机制及数值方法;然后根据以透空式防波堤掩护的荔枝湾港区为典型工程算例,采用两种数值方法进行了计算,根据数值计算结果比较了两种模型的计算结果差异以及数值模型与整体物理模型的差异,分析了不同数值方法的优缺点;最后,以SWAN模型为例,计算了长江口南港水域潜堤掩护港区的风浪场。

根据本文研究,将透射系数引入二维波浪数学模型,是一种可行的技术手段,无论BW模块还是SWAN模型,均能够较好地模拟透浪水工建筑物掩护水域的波浪场。其中,BW在港口口门处波况的模拟较为精细,而SWAN模型具有计算速度快、可局部加密及嵌套以及可以引入完整的源汇项函数(尤其是风能输入)等优点。

需要指出的是,模拟精度在很大程度上取决于输入的透射系数准确与否。在今后的研究中,希望能够采用完整的系列性的实测波浪数据,对数值模型进行验证与改进。

参考文献:

- [1] 麻志雄. 透空式防波堤消波性能试验研究[J]. 水运工程, 1990(10): 1-6.
- [2] 王瑜. 浅水小波高条件下桩式透空堤消浪效果研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [3] 孙士勇. 挡板(透空)式防波堤消浪效果分析[J]. 水运工程, 1998(10): 12-16.
- [4] 严以新, 郑金海, 曾小川, 等. 多层挡板桩基透空式防波堤消浪特性试验研究[J]. 海洋工程, 1998(1): 68-75.
- [5] 颜为民. 炮台湾船舶基地透空式防波堤设计[J]. 水运工程, 1992(12): 15-19.
- [6] 谢怀东. 黄岐渔港新型透空式防波堤设计研究[J]. 河海大学学报, 1997(4): 44-48.
- [7] 余之林. 海安新港建设透空式防波堤的必要性[J]. 水运工程, 2005(6): 103-106.
- [8] 黄蕙, 顾春元, 戴江山. 广东省博贺中心渔港透空式

防波堤断面波浪模型试验研究[C]// 中国海洋工程学会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2009: 704-707.

- [9] 信书, 徐伟, 赵海涛, 等. 朱家尖月岙渔港透空式防波堤设计[J]. 水运工程, 2012(1): 54-58.
- [10] 黄蕙, 陈玲, 齐鲁尚. 大陈中嘴避风港透空式防波堤设计研究[C]// 中国海洋工程学会. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 308-310.
- [11] 周琼, 余之林. 海安新港透空式防波堤的试验研究[J]. 水运工程, 2005(6): 115-118.
- [12] 张金虹. 透空式防波堤断面波浪模型试验研究[J]. 水运工程, 2006(7): 24-28.
- [13] 余之林, 熊洪, 陈德春. 桩基透空式防波堤透浪系数浅析[J]. 广东土木与建筑, 2007(1): 27-28.
- [14] 秦丰年, 陈德春. 海安新港荔枝湾码头透空式防波堤整体防浪掩护试验研究[C]// 中国海洋工程学会. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 311-315.
- [15] 邵燕华. 桩基挡板透空堤整体防浪掩护效果综合研究—以广东省海安新港荔枝湾一期工程为例[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- [16] 毛丹红. 透空式防波堤整体防浪掩护效果综合研究—以福建省三沙中心渔港为例[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [17] 张娜, 吴海峰, 曲淑媛, 等. 潜堤及透浪式建筑物的波浪数值模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2009(5): 28-31.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] DHI group. MIKE21 Boussinesq Wave Module Scientific Documentation[S]. 2009.
- [21] Booij N, Holthuijsen, L.H., Ris, R.C. The 'SWAN' wave model for shallow water[J]. Coastal Engineering, 1996, 25(1): 668-672.
- [22] Swan Team. SWAN User & Technical Manual(40.85)[R]. Netherlands: Swan Team, 2011.
- [23] Kees d'Angremond, Jentsje W Van Der Meer, Rutger J De Jong. Wave transmission at low-crested structures[J]. Coastal Engineering, 1996, 1(25): 2 418-2 427.
- [24] JTS 154-1-2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [25] 殷福安. 挡板式透空堤透浪特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.

(本文编辑 武亚庆)