

直立式透空防波堤周围非线性波浪传播的数值模拟

Numerical Simulation of Nonlinear Wave Transformation Around Vertical Wave-permeable Breakwater

李 熙/LI Xi, 张素香/ZHANG Su-xiang

河海大学交通与海洋工程学院, 南京 210098

School of Ocean Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China

[摘要] 基于改进的 Boussinesq 方程的数学模型, 对非线性波浪在透空式防波堤周围的波浪变形进行了数值模拟。实例实验证明, 该模型可对非线性波浪在透空式防波堤周围的波浪变化作出准确的预测, 对透空式防波堤工程有一定的参考价值。

[关键词] 透空式防波堤, Boussinesq 方程, 波浪传播

[中图分类号] P753, P731.22

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)10-0035-03

Abstract : Based on modified Boussinesq type equations the problem of wave partial reflection and transmission by wave-permeable structure are solved. Compared with laboratory data in wave basin and engineering practice in field, the model gave accurate predictions of reflected and transmitted effects around the wave-permeable breakwater. The simulation results show that the wave model can be used as an accurate method of engineering reference.

Key Words : wave permeable breakwaters, Boussinesq equations, wave transformation

CLC Numbers : P753, P731.22

Document Code : A

Article ID : 1000-7857(2005)10-0035-03

1 引言

透空式防波堤的设计和应用在 20 世纪 70 年代兴起^[1], 现因重力式防波堤会引起环境的改变以及透空式防波堤结构上所具有的优势, 而使其再次成为海洋工程防波堤结构设计选择的主要模式之一。在非线性波浪作用下的透空堤计算, 是解决工程实际问题 and 提供设计参数的重要步骤^[2], 有关透空堤数值计算方法因其对能量衰减项的表达不同而不同, 透水率的计算方法^[3]是基于

试算的一种解法, 另外一些数值计算方法^[4-9]对该问题进行了不同描述。本文提供了考虑部分反射和透射的非线性波浪浅水变形的一种数值计算模式, 用于对透空式防波堤周围的非线性波浪变形进行计算, 并为工程实际提供了参考。首先针对一维的简化模型得出理论分析结果, 并通过水槽实验进行率定, 然后应用二维的数值计算给出非线性波浪在透空式防波堤周围的传播变形和波高分布, 并通过和波浪港池的物模实验对比进一步验证了模型

收稿日期: 2005-05-23

作者简介: 李 熙, 男, 江苏省南京市西康路 1 号河海大学交通与海洋学院, 讲师, 主要研究方向为海洋工程; E-mail: xili@hhu.edu.cn

- [2] 陈联寿, 孟智勇. 我国热气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 2001, 25 (3): 420~432
- [3] 薛根元, 俞善贤, 何凤翮, 等. 0414 号台风云娜的基本特征与强降水成因分析[J]. 科技导报, 2004, 9: 42~46
- [4] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. 气象学报, 2004, 62(5): 541~549
- [5] Parrish J R, Burpee R W, Marks J F D, et al. Rainfall patterns observed by digitized radar during landfall of Hurricane Frederic (1979) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, 110(12): 1 933~1 944
- [6] 朱宏石(岩). 台风与中纬度系统相互作用形成槽前大暴雨的数值模拟 [J]. 大气科学, 2000, 24(5): 669~675
- [7] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 602~615
- [8] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216 台风降水及其影响降水机制的数值模拟实验[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 57~67
- [9] 李英, 陈联寿, 王继志. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度

- 环流特征[J]. 气象学报, 2002, 60(2): 167~179
- [10] 余晖, 端义宏. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征[J]. 气象学报, 2002, 60(6): 680~687
- [11] 李江南, 龚志鹏, 王安宇, 等. 近十年来台风暴雨研究的若干进展与讨论[J]. 热带地理, 2004, 24(2): 113~117
- [12] 赵宇, 吴增茂. 9711 号台风演变及暴雨过程的位涡诊断分析[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(2): 13~20
- [13] Lilly DK. The structure and propotation of rotation convective storm. Part2: Helicity and storm[J]. *J AtmosSci*, 1986, 43(2): 126~140
- [14] 陈华, 谈哲敏. 热带气旋的螺旋度特性[J]. 热带气象学报, 1999, 15 (1): 83~85
- [15] 侯瑞钦, 程麟生, 冯伍虎. “98.7”特大暴雨的低涡螺旋度和动能诊断 [J]. 高原气象, 2003, 22(2): 202~208

(责任编辑 胡春华)

的有效性。

2 改进后的 Boussinesq 方程

我们在 Boussinesq 方程中引进透空堤引起的耗散项^[9-11],改进后的方程如下。

连续性方程:

$$\eta_t + P_x + Q_y = 0 \quad (1)$$

x 方向动量方程:

$$P_t + \left(\frac{P^2}{d}\right)_x + \left(\frac{PQ}{d}\right)_y + gd\eta_x + \psi_1 + \Phi_1 + S_x = 0 \quad (2a)$$

y 方向动量方程:

$$Q_t + \left(\frac{Q^2}{d}\right)_y + \left(\frac{PQ}{d}\right)_x + gd\eta_y + \psi_2 + \Phi_2 + S_y = 0 \quad (2b)$$

x, y, z 是直角坐标系的 3 个方向, $x-y$ 为平面坐标, z 为垂直坐标; d 为总水深 $d=h+\eta$, h 为静水深, η 为波面扰动; P 为 x 方向的断面流量 $P=ud$; Q 为 y 方向的断面流量 $Q=vd$; u 和 v 是沿水深平均流速。其中高阶非线性散射项 ψ_1, ψ_2 等于:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= -(B + \frac{1}{3})D^2(P_{xxt} + Q_{yyt}) - BgD^3(\eta_{xxx} + \eta_{xyy}) - \\ &DD_x(\frac{1}{3}P_{xt} + \frac{1}{6}Q_{yt} + 2DgB\eta_{xx} + BgD\eta_{yy}) - DD_y(\frac{1}{6}Q_{xt} + BgD\eta_{xy}) \\ \psi_2 &= -(B + \frac{1}{3})D^2(Q_{yxt} + P_{xyt}) - BgD^3(\eta_{yyy} + \eta_{xxy}) - \\ &DD_y(\frac{1}{3}P_{yt} + \frac{1}{6}Q_{xt} + 2DgB\eta_{yy} + BgD\eta_{xx}) - DD_x(\frac{1}{6}Q_{yt} + BgD\eta_{xy}) \end{aligned} \quad (3)$$

Φ_1, Φ_2 是底部摩擦衰减项, 可写成:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -\frac{f}{2d}P\sqrt{P^2 + Q^2} \\ \Phi_2 &= -\frac{f}{2d}Q\sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned} \quad (4)$$

摩擦系数 $f_a f_b$ 由波-流共存体系引入并设为与入射波条件、地形有关的常量^[12]。

S_x, S_y 是透空式防波堤引起的非线性项耗散项:

$$\begin{aligned} S_x &= sP \\ S_y &= sQ \end{aligned} \quad (5)$$

在实际应用计算中, s 为与来波波况、实际工程中防波堤设计形式有关的系数, 通过一维理论模型和实验率定, 在以下的计算中变化是 3~5。

3 耗散系数的确定

3.1 一维理论模型的控制方程

透空式防波堤内的一维控制方程又分为两种。

连续性方程: $n\zeta_t + hU_x = 0 \quad (6)$

动量方程: $U_t + ng\zeta_x + sU = 0 \quad (7)$

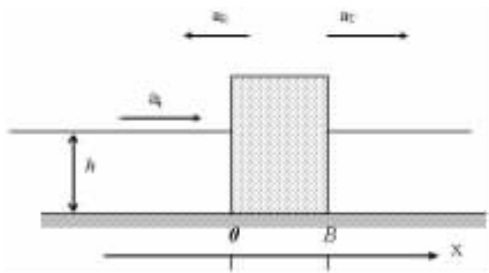


图 1 透空式防波堤一维简化模型

在一维方程中, D 为静水水深, ζ 为自由表面高程, U 为 x 方向的流速, s 为非线性的耗散项。假定在时间上 η 和 U 与 ω 同步,

引入 $U = nv(x)e^{i\omega t}$ 和 $\zeta = (x)e^{i\omega t}$, v 为透空式防波堤内的时均流速, η 为堤内的波高, 从方程 1 和方程 2 得到:

$$\eta_{xx} = \frac{\omega i}{h} \frac{s + \omega i}{g} \eta = r^2 \eta \quad (8)$$

引进以下矢量: $r = \alpha + i\beta$, 此处, α 定义为耗散系数, $\beta = 2\pi/L_s$ 。

$$\alpha^2 = \beta^2 - k_0^2 \quad (9)$$

堤前 ($x < 0$) 最大波高是 $a_R = (1 + A_R)a_i$, 最大透射波高 ($x > B$) $a_T = A_T a_i$, A_R 定义为反射系数, A_T 定义为透射系数 (参见图 1)。衰减项 s 为:

$$s = 2\alpha\beta gh/\omega \quad (10)$$

A_R 和 A_T 为

$$\begin{cases} A_R = \frac{1-\phi}{1+\phi} \\ A_T = (1+A_R)e^{-\alpha B} \end{cases} \quad (11)$$

s 的确定取决于 β (即 L_s) 的确定, ϕ 是通过实验率定的系数, 取决于波况 (k_0 和 ω) 和断面型式 (透水性 n)。

3.2 非线性耗散系数的率定

非线性耗散项 s 可以通过水槽实验率定。为此, 我们在水槽中对不同的入射波波况下的反射波高和透射波高进行了测量, 实验的断面型式如图 2, 实验结果和计算结果的比较参见表 1、图 3。来波的波高变化为波高 a_i , 水深 (h) 和周期 (T) 保持不变。参照公式 (10) 对 s 进行率定, 结果用于二维数值计算。

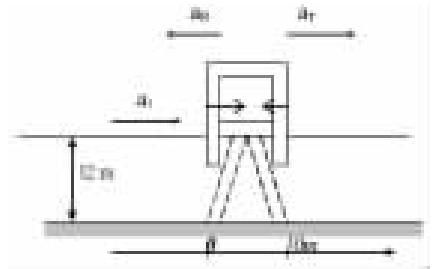


图 2 实验的断面型式

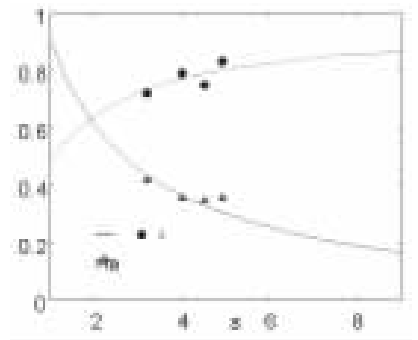


图 3 A_R, A_T 与 s 的比较

表 1 水槽实验中的实测值和计算值的比较

波高 $a_i(m)$	实测值 a		计算值		系数 s
	A_R	A_T	A_R	A_T	
$\bar{H}=1.27$	0.72	0.42	0.73	0.43	3.2
$H_{1/10}=1.98$	0.79	0.36	0.77	0.36	4.0
$H_{2/10}=2.35$	0.75	0.35	0.79	0.32	4.5
$H_{1/5}=2.78$	0.83	0.36	0.81	0.31	4.9

4 透空式防波堤周围非线性波浪变形的数值计算

根据上面所建立的数学模式, 我们进行了透空式防波堤的波浪绕射、透射的非线性变形的数值计算。根据设计, 防波堤由 110 m 的斜坡堤和 310 m 的透空堤两部分组成 (参见图 4a)。物理

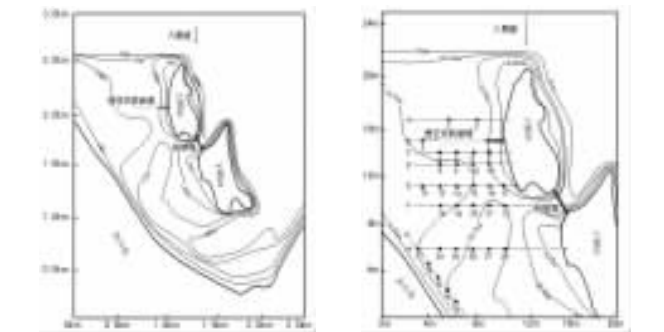


图 4a 数学模型计算区域图 图 4b 物理模型采样点分布

模型在 20 m×25 m 的三维波浪池中进行, 针对不同的入射波情况设置了 32 个采样点(如图 4b)。入射波(-20 m 等深线处)根据当地资料分析计算确定(参见表 2), 原始波浪方向为北北西(NNW)向,是控制性波浪。

表 2 数值模型计算波浪边界条件
(-20 m 等深线处,重现期 50 年)

潮位	2.68 m	1.49 m	-1.62 m	-2.43 m
波况				
$\bar{H}$ (m)	1.27	1.26	0.93	0.91
$H_{1\%}$ (m)	2.78	2.73	2.00	1.91
$H_{13\%}$ (m)	1.98	1.96	1.43	1.40
T_s (s)	5.69	5.59	5.26	5.16

通过以上波浪模型的计算,得到不同潮位和有效波高组合的波浪要素变化分布。由于联合绕射和透射的作用,透空堤后港域内波高在 50 年一遇校核高水位条件下波高最大,港域内的瞬时波面分布参见图 5a,三维波高分布参见图 5b,对于有效入射波高 1.98m,由于透空式防波堤在透射同时产生部分反射,透空堤前最大波高达到 2.47 m。实测值和计算值的对比见图 6(a~h)。

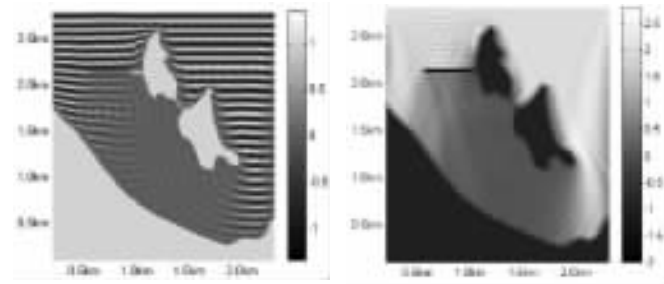


图 5a 瞬时波面变化分布 图 5b 有效波高变化分布
(Tide=2.68 m, H13%=1.98 m) (Tide=2.68 m, H13%=1.98 m)

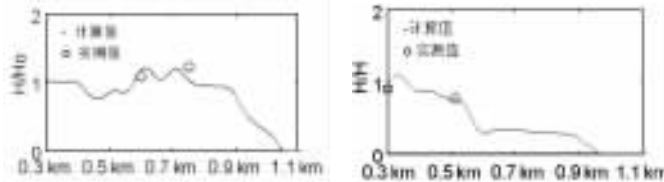


图 6a 断面 A 相对波高分布 图 6b 断面 B 相对波高分布

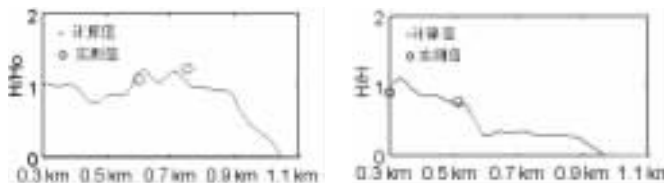


图 6c 断面 C 相对波高分布 图 6d 断面 D 相对波高分布

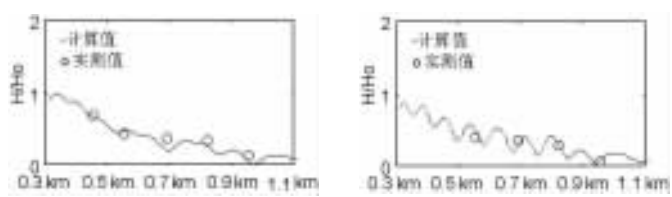


图 6e 断面 E 相对波高分布 图 6f 断面 F 相对波高分布

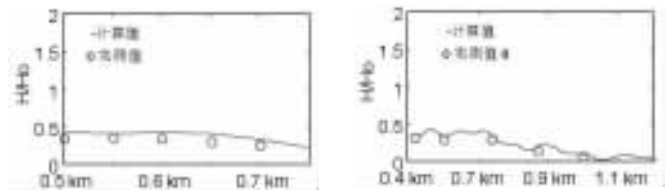


图 6g 断面 G 相对波高分布 图 6h 断面 H 相对波高分布

5 结论

根据以上计算分析,基于改进的 Boussinesq 方程的数学模型可以对非线性波浪在透空式防波堤周围的变化作出准确的预测,所作的实例分析也进一步证明,该模型对于工程实际有一定的参考价值。

(致谢:本工作得到华东师范大学河口与海岸重点实验室开放基金项目“非线性波的数值模拟”(200207)、河海大学创新基金及交通与海洋学院科研基金(301028)的支持,特此感谢。)

参考文献 ((References))

[1] Larsen J, Dancy H. Open boundaries in short wave simulation—a new approach[J]. *Coastal Engineering*, 1983, 7: 285~297

[2] 李熙, 王义刚. 透空式防波堤周围非线性波浪传播的数值模拟[J]. *海洋工程*, 2004, 22(3): 99~101

[3] Madsen P A. Wave reflection from a vertical wave absorber[J]. *Coastal Engineering*, 1983, 7: 381~396

[4] Body G L, Ehrenmark U T. Reflection of gravity waves by a steep beach with a porous bed [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 359: 265~280

[5] Hall K R, Smith G M, et al. Comparison of oscillatory and stationary flow through porous media [J]. *Coastal Engineering*, 1995, 24: 217~232

[6] Van der Meer J W, Petit H A H, et al. Numerical simulation of wave motion on and in coastal structures [C]. *Proceedings 23rd International Conference on Coastal Engineering*, Venice, Italy: 1992, 2: 1 772~1 784

[7] 柳淑学, 俞聿修. 入、反射波浪场中方向谱和反射系数的确定 [J]. *水动力学研究与进展*, 1998, 13(3): 302~310

[8] 张宁川, 俞聿修. 随机波浪作用于三桩桩列上的横向力的水动力特征及群桩效应 [J]. *水动力学研究与进展*, 1996, 11(4): 385~393

[9] Li Xi, Wang Yigang, et al. Numerical simulation of topography change in reclaimed land along coast of South China Sea [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2002, 14(1): 87~92

[10] Madsen P A, Sorensen O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry [J]. *Coastal Engineering*, 1992, 18: 183~204

[11] 严以新, 李熙, 等. 日照港十万吨级煤码头基础冲刷研究报告 [R]. 河海大学, 2002

[12] Madsen O S, White S M. Energy dissipation on a rough slope [J]. *Journal of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division*, 1976, 102(1): 31~48

(责任编辑 王 芷)