

透空式梳式防波堤的数值模拟和波浪透射系数的研究

房卓¹, 张宁川¹, 臧志鹏²

(1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,大连 116023;
2.中国科学院力学研究所 水动力学与海洋工程重点实验室,北京 100190)

摘要 基于 FLUENT 求解器,采用源函数造波方法建立了三维数值波浪水槽,应用不同的造波源函数生成线性波浪、二阶 Stokes 波浪和不规则波浪。建立了规则波浪和不规则波浪与梳式防波堤相互作用的数值模型,验证了水平波浪力折减系数和堤前反射率的数值结果,并对梳式防波堤有效减小波浪力的机理进行数值解释。对透空式梳式防波堤的透浪特性进行研究,结果表明堤后的透射波浪随翼板与前墙的距离 b/L 的增加呈抛物曲线形式变化,随翼板开口高度 c/d 的增加而线性增加,并基于数值结果给出透空式梳式防波堤波浪透射系数的经验计算公式,便于工程设计的需要。

关键词 三维数值波浪水槽;源造波法;梳式防波堤;波浪力折减系数;波浪透射系数

中图分类号:U 656.2

文献标识码:A

文章编号:1005-8443(2011)02-0086-08

近几十年来,数值波浪水槽的发展及应用取得了巨大进步。王永学采用线性造波机理论,应用 VOF 方法给出了可吸收数值造波边界条件,即造波板的运动除产生行进波外,同时产生一个抵消反射波的局部振荡^[1]。李凌等通过在动量方程中添加附加源项,发展了黏性流数值造波和消波的方法,并模拟了波浪与 2 个垂直刚性薄板的相互作用^[2]。高学平等利用源造波法模拟不规则波浪,并结合阻尼层消波技术模拟消除波浪遇结构物后形成的二次反射,研究了半圆形和台阶形防波堤的堤前波浪力的分布规律和消波效果^[3]。周勤俊等利用动量源方法造波,对海堤上的越浪进行了数值模拟^[4]。数值方法已经成为研究波浪与防波堤的相互作用的一种重要手段^[5-6]。

梳式防波堤是近年来出现的新型防波堤,在传统直立防波堤基础上,用翼板结构代替了部分沉箱。梳式防波堤因其梳齿形外观而得名,翼板的位置和长度可以根据不同的工程需要进行设计,其结构见图 1。当梳式结构的翼板不直接连接到海床时,部分波浪会通过下方的空洞传入港内,此时的结构称为透空式梳式防波堤。与传统防波堤相比,梳式防波堤造价相对低廉,且具备有效减小波浪反射、减小波浪力、有效吸收波能等特点。大连港大窑湾北部岛堤工程中,成功地采用了一种下部透空的梳式防波堤结构。在以往的研究中,牛恩宗等分析了梳式防波堤的工作机理及掩护效果^[7]。董国海、李玉成等通过物理模型试验,对梳式防波堤水力特性进行了系统研究,给出了结构所受波浪力与相关影响参数间的经验公式和波浪反射系数的经验公式^[8-9]。张涛等根据物理模型试验中实测的波浪力,对翼板进行了结构

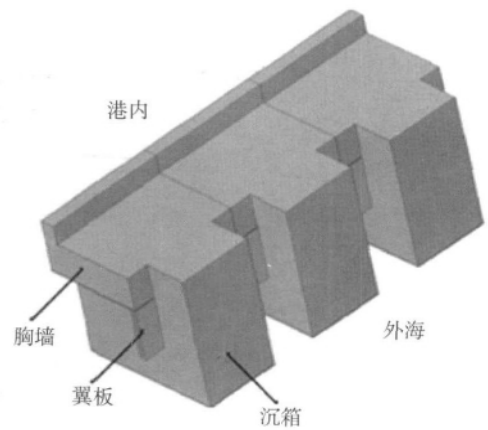


图 1 梳式防波堤结构示意图

Fig.1 Configuration of comb-type breakwater

收稿日期 2010-11-12; 修回日期 2011-01-10

基金项目 国家自然科学基金(50921001)

作者简介 房卓(1982-),女,辽宁省盘锦人,博士研究生,主要从事随机波浪与新型水工结构物的研究。

Biography FANG Zhuo(1982-),female,doctor student.

内力分析^[10]。朱大同研究了梳式防波堤的消浪特性,给出了一个近似计算波浪反射系数的计算方法^[11]。刘子琪等对梳式防波堤上部采用曲线型防浪墙的防浪效果进行了试验研究,结果表明曲线防浪墙阻止越浪效果显著^[12]。房卓等通过物理模型试验,对一种非透空梳式防波堤结构的水力学特性进行了研究,对该防波堤的受力机理和工程危险水位进行了分析,并在此基础上提出了改进结构^[13]。

梳式防波堤的研究目前处于实验室模型试验阶段,结构组次和波况条件相对有限,缺少对透空式梳式防波堤的透浪特性的相关研究。因此非常有必要建立数值模型,对梳式防波堤的水动力学特性进行更系统深入的研究,为工程设计提供参考。故本文将通过数值方法对此问题进行探讨,并对透空式梳式防波堤结构的透浪特性进行研究。

1 控制方程及源造波理论

本文将基于质量源造波方法建立数值波浪水槽^[14]。数值波浪水槽的控制方程为3-D Navier-Stokes方程,其张量表达式如下

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中 $i, j = 1, 2, 3$; u_i 为第 i 方向上的速度分量; ρ 为流体密度; p 为流体压力; g_i 为第 i 方向上的重力加速度分量; τ_{ij} 为粘性应力张量。对于牛顿流体, $\tau_{ij} = 2\mu\sigma_{ij}$, 其中 μ 为水分子粘性系数; σ_{ij} 为平均应变张量, 定义为 $\sigma_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$ 。

在源造波方法中,将连续方程(1)在源域内进行修改,修改后的迪卡尔形式为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = s(x, y, z, t) \quad (3)$$

式(3)中源项可由下式得到

$$s(x, y, z, t) = 2u(x, t) / dx \quad (4)$$

式中 $s(x, y, z)$ 为源域内的非零源函数; $u(x, t)$ 为波浪水质点的水平速度; dx 为水槽长度方向(x 方向)的网格长度。

在水槽的两端分别设置阻尼层用于吸收波能,消除波浪反射。在阻尼层中,动量方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \mu u \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - \mu v \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \mu w \quad (7)$$

μ 为阻尼系数,其取值为

$$\mu(x) = \sqrt{1 - \left(\frac{x - x_0}{s} \right)^2} \quad (8)$$

式中 x_0 为阻尼层的起始点; s 为阻尼层的长度,计算中 s 取两倍的人射波长。

计算域水平长度为 60 m(x 方向),高度为 2 m(y 方向),宽度为 1.18 m(z 方向)。网格在自由水面附近加密,水槽上部与大气相通,水槽底面采用光滑壁面条件,其他各个壁面都采用对称边界条件。 x 方向 0 点设在水槽端部,造波源设在水槽的中部 $x=30$ m 处,使波浪向两侧传播。水槽两侧设有阻尼层,长 5 m,宽 1.18 m,高度为静水面高度。在水槽中设有 7 个波浪探针,用于实时监测波浪高度。

VOF 方法被用来追踪自由表面。计算域内的体积单元由空气和液体 2 种介质组成。气液两相界面通过求解体积函数 F 的连续方程得到。压力场和速度场相互耦合,利用压力隐式的分裂算子格式(PISO)求解。在计算体积函数 F 时,采用了修正的高分辨率界面捕捉方法(Modified HRIC)进行求解,以保证气液两相界面

的精确度。动量方程的离散采用了二阶迎风格式。整个数值水槽计算域采用 385 990 个正六面体单元进行计算,并将网格在自由表面附近处进行局部加密。

2 数值波浪水槽的建立及验证

理论上,只要造波源函数定义正确,任何形式的波形都可以利用源造波法生成。首先,对常水深下的微幅线性波浪进行模拟。采用基于线性波浪理论的源函数生成微幅波,造波源函数形式如下

$$s(z,t) = \frac{4H\omega \sinh(kd) \cosh k(z+d)}{(\sinh(2kd) + 2kd) dx} \cos(kx - \omega t) \quad (9)$$

式中 H 为目标波浪的波高 k 为波数 d 为水深 ω 为波浪圆频率。本节中取 $d=0.7$ m $H=0.11$ m $\omega=4.62$ 。

数值模拟结果见图 2 和图 3。图 2-a 和 2-b 为 $t/T=6$ 和 $t/T=10$ 时波面形状的数值解与理论解的比较;图 3-a 和 3-b 中列出了在 $x=35$ m 和 $x=50$ m 处测得的波面时间历程曲线,结果表明波列沿水槽长度方向传播良好;图 3-c 和图 3-d 为阻尼层中的 $x=57$ m 和 $x=59.5$ m 波面情况。在阻尼层中,波浪能量被逐渐吸收,波高逐渐减小。经计算,波浪通过阻尼层传播到水槽末段时,只剩下约 0.1% 的波浪能量,说明阻尼层的消波效果较好。

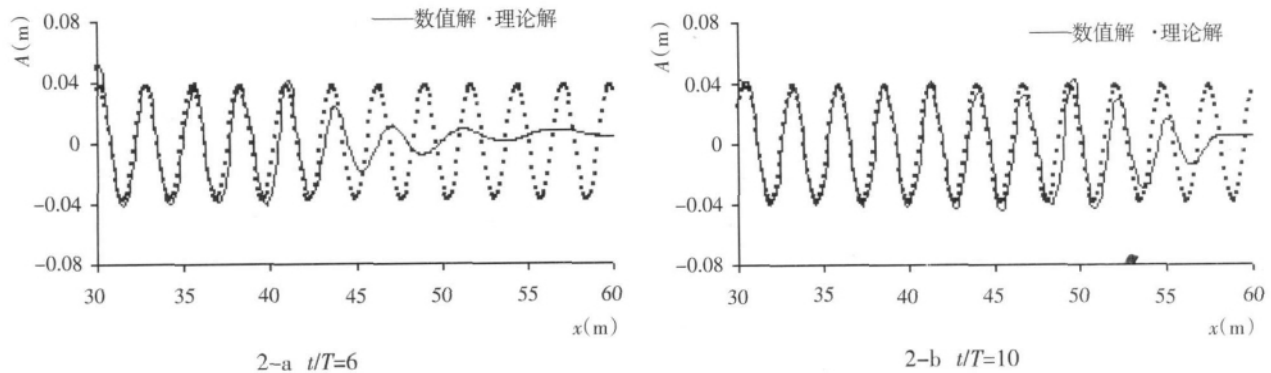


图2 沿水槽长度方向波面的比较

Fig.2 Comparison between numerical and theoretical results of linear wave trains along wave tank

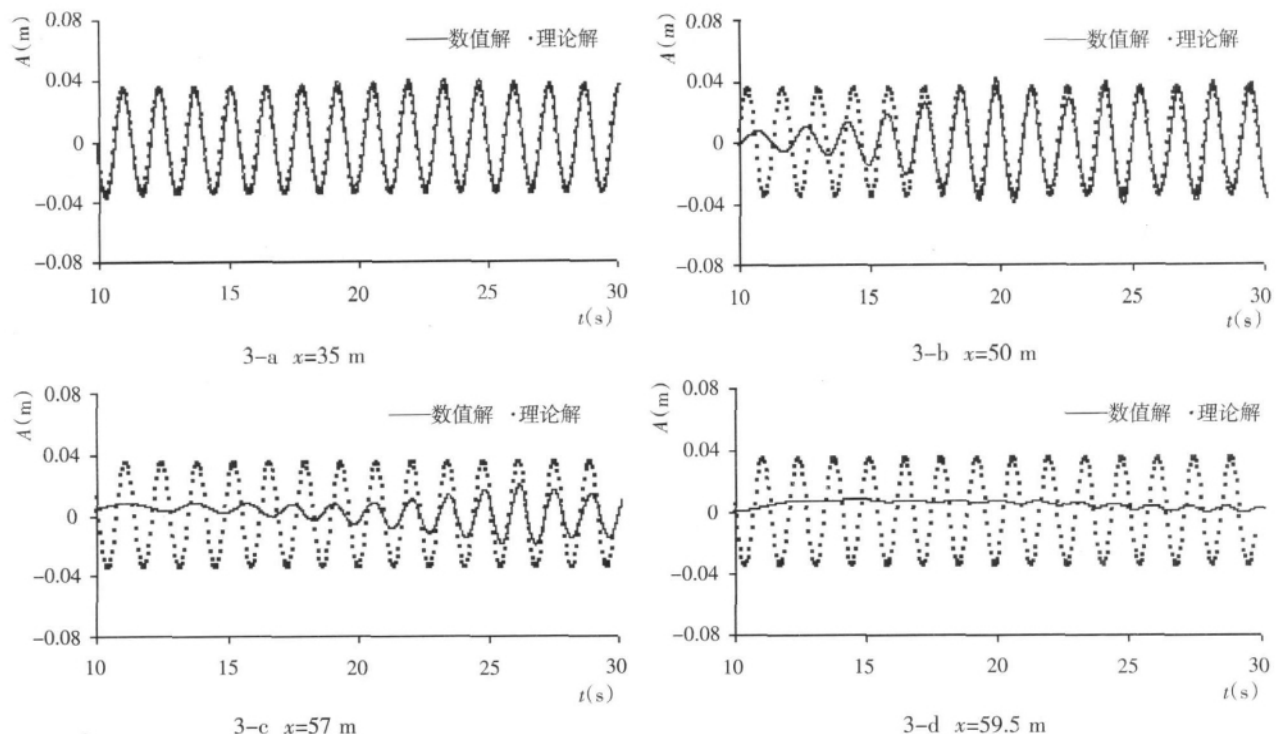


图3 不同监测点处波面变化历程

Fig.3 Comparison between numerical and theoretical results of linear wave trains at fixed points

接下来对常水深下的二阶 Stokes 波进行数值模拟。二阶 Stokes 波可以分解为由两列波高、频率和初始相位均不同的线性波浪叠加而成,其源函数可以表示为

$$s(z, t) = \frac{H\omega}{dx} \left[\frac{\cosh k(z+d)}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{8} Hk \frac{\cosh 2k(z+d)}{\sinh^4(kd)} \cos(2kx - 2\omega t) \right] \quad (10)$$

生成的目标波浪波高为 $H=0.08$ m $\rho\omega=5.46$ $\rho d=0.52$ m。图 4 比较了固定点 $x=35$ m 和 $x=50$ m 处的波高历程的数值结果和理论结果,可以看到两者符合较好。

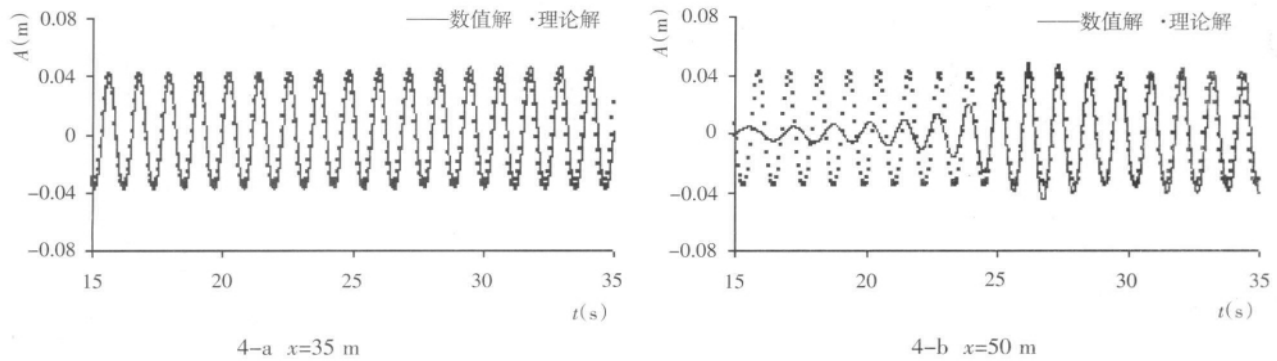


图 4 二阶 Stokes 波的数值解与理论解的比较

Fig.4 Comparison between numerical and theoretical results of second-order Stokes wave trains

不规则波浪可以看成由一系列频率不同、波高各异的线性波浪叠加而成,本文采用 JONSWAP 谱产生随机波浪^[15],其相应的源函数可以表示为

$$s(z, t) = 2 \sum_{i=1}^m \sqrt{2s_{\eta\eta}(\tilde{\omega}_i) \Delta\omega_i w_i} \frac{\cosh K_i(z+d) \cos(\tilde{\omega}_i t + \varepsilon_i)}{\sinh(K_i d)} dx \quad (11)$$

式中 $s_{\eta\eta}(\tilde{\omega}_i)$ 为第 i 波浪模态的谱值 $\tilde{\omega}_i = \frac{1}{2}(\omega_i + \omega_{i+1})$ $\Delta\omega_i = \omega_{i+1} - \omega_i$ $\tilde{\omega}_i$ 为第 i 波浪模态的圆频率; ε_i 为第 i 波浪模态的随机初始相位。

本文计算了一组由 200 个波浪模态组成的随机波浪,周期范围为 0.5~2.2 s,特征周期为 1.39 s,水槽静水深 0.52 m,特征波高为 $H_{1/3}=0.035$ m。图 5 为在水槽 $x=50$ m 处测得的波面时间历程,图 6 为该测点处生成的波浪谱和靶谱的比较,两者结果符合得很好。

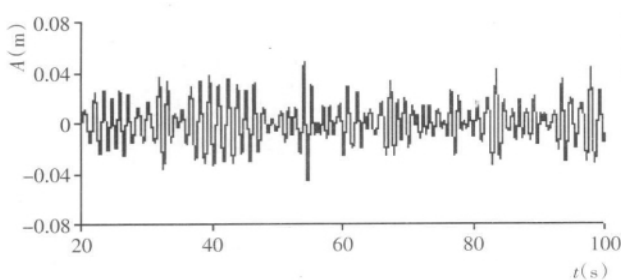


图 5 不规则波波形时间历程曲线

Fig.5 Time history of random wave elevation

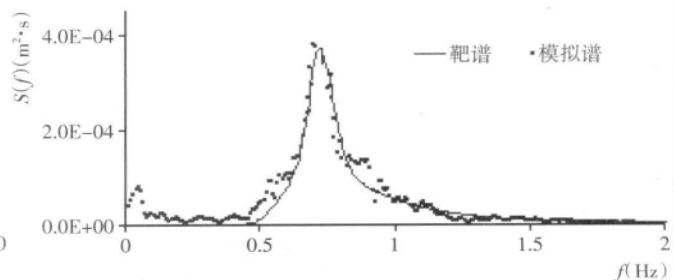


图 6 模拟波浪谱与靶谱比较

Fig.6 Comparison between target spectra and simulated wave spectra

从以上各种波形的比较结果可以看到,本文数值波浪水槽可以精确模拟出线性波浪、Stokes 二阶波浪及不规则波浪,阻尼层的消波效果也很好。因此将利用本模型继续开展研究,模拟波浪和梳式防波堤的相互作用。

3 波浪与梳式防波堤相互作用的模拟

图 7 为梳式防波堤的一个结构单元,每个单元包括矩形沉箱、两侧翼板和胸墙 3 部分结构。2 个翼板分别位于矩形沉箱主体的两侧,胸墙位于沉箱的顶部。结构的主要尺寸参数有 A a b 和 c 。当参数 c 不为 0 时,水流和波浪则可以通过翼板下方的开口进入港内。

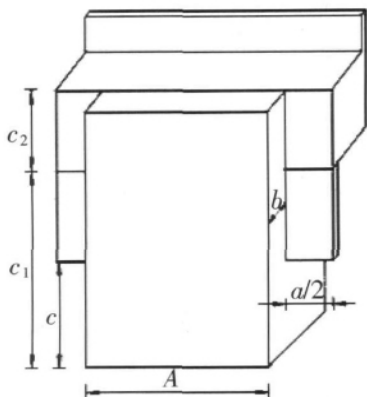


图 7 梳式防波堤结构单元示意

Fig.7 Sketch of one unit comb-type breakwater

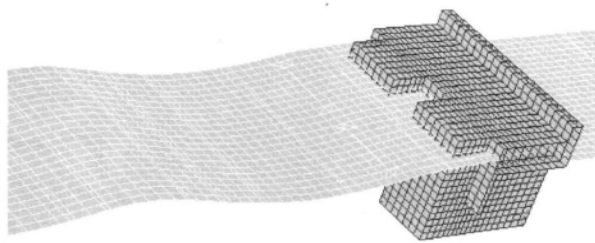


图 8 波浪作用于梳式防波堤时的波面情况

Fig.8 Profile of wave and comb-type breakwater interaction

李玉成等在大连理工大学海岸和近海工程实验室,对梳式防波堤进行了物理模型试验研究^[9]。从三百多组试验数据当中,归纳出了防波堤水平波浪力折减系数的经验公式 K_F 和堤前反射系数经验公式 K_R 。 K_F 为梳式结构与实体直墙结构相比的单宽水平波浪力折减系数,即当波峰传至防波堤时,梳式防波堤上与相同尺寸直墙防波堤上最大单宽水平波浪力的比值。本文定义 K_{F-R} 和 K_{F-IR} 分别为规则波和不规则波作用在梳式防波堤上时的最大单宽水平波浪力的折减系数; K_R 定义为梳式防波堤的堤前反射系数。试验结果表明 K_F 与尺寸参数 gT^2/A 、 a/A 、 b/L 、 c/d 和 H/d 具有明显的线性关系;不规则波的平均周期与规则波的周期相同且不规则波的 $H_{1\%}$ 与规则波波高相同时, K_{F-IR} 小于 K_{F-R} ,且 K_{F-IR} 与 K_{F-R} 比值的统计平均值为 0.72,即不规则波作用时有更大的波浪力折减。 K_R 主要与翼板位置 b 与波长 L 之比 b/L 有关。其经验公式关系表达式分别见式(12)、(13)和(14)。

$$K_{F-R} = 0.898 + 0.011 \sqrt{\frac{gT^2}{A}} - 0.098 \frac{a}{A} - 0.061 \frac{b}{L} - 0.261 \frac{c}{d} - 0.031 \frac{H}{d} \quad (12)$$

$$K_{F-IR} = K_{F-R} \times 0.72 \quad (13)$$

$$K_R = 32.42(b/L)^2 - 11.32(b/L) + 1.37 \quad (14)$$

式中 g 、 A 、 d 、 T 、 a 、 b 、 c 、 L 和 H 分别为重力加速度、沉箱长度、水深、波浪周期、翼板长度、翼板与前墙的距离、翼板下缘高度和波高。在本研究中,数值模型比尺为 1:27,各参数的取值为 $A=0.37$ m、 $a=0.22$ m、 $b=0.22$ m、 $c=0.22$ m、 $c_1=0.48$ m 和 $c_2=0.17$ m。

本节将分别对规则波浪和不规则波浪与梳式防波堤的相互作用进行数值模拟。应用二阶 Stokes 波理论生成规则波浪,波浪条件与上文中用于验证水槽时的情况相同;应用 JONSWAP 谱生成不规则波浪,不规则波的平均周期与规则波的周期相同,且不规则波的 $H_{1\%}$ 与规则波波高相同,除了防波堤结构表面为壁面条件外,水槽模型的边界条件与上文相同,结构置于 $x=50$ m 处,源域与防波堤前墙之间距离为 20 m。整个模型采用了 387 498 个结构化的六面体单元进行计算。

通过数值计算可得规则波浪作用下梳式防波堤上的最大总水平波浪力 F_{C-R} ,不规则波浪作用下梳式防波堤上的最大总水平波浪力 F_{C-IR} 和直墙上的最大水平波浪力 F_V 。并进一步求得规则波浪作用下梳式防波堤的水平波浪力折减系数 K_{F-R} 和不规则波浪作用下梳式防波堤的水平波浪力折减系数 K_{F-IR} 。应用 Goda 两点法^[16] 计算反射率,通过 $x=46.1$ m 和 $x=46.5$ m 处采集的波面时间序列值,进行入、反射波分离,求得结构的反射系数 K_R 。表 1 中列出了数值计算与经验公式的结果比较,可见二者符合较好。进一步验证了该数值模型的有效性。

以往的物理模型试验研究表明,梳式防波堤上总水平波浪力的减小主要归结为 2 个原因^[9],其一,由于

表 1 F_{C-R} 、 F_{C-IR} 、 K_{F-R} 、 K_{F-IR} 和 K_R 的结果比较

Tab.1 Numerical and empirical results of F_{C-R} 、 F_{C-IR} 、 K_{F-R} 、 K_{F-IR} and K_R

变量	F_{C-R} (kN/m)	F_{C-IR} (kN/m)	F_V (kN/m)	K_{F-R}	K_{F-IR}	K_R
数值结果	0.188	0.152	-	0.774	0.628	0.53
经验/理论结果	0.190	0.137	0.242	0.784	0.566	0.50

翼板与沉箱前沿相距距离 b ,波浪击堤自翼板和自沉箱前沿的反射不同步而有一个相位差 ,此相位差一方面减少反射率 ,同时使翼板所受波浪力峰值与沉箱主体前沿所受波浪力峰值有相位差 ,从而减少所受波浪力最大值 ;其二 ,当 c 不等于 0 时 ,翼板下方的空洞形成透浪 ,部分波能会透过结构传播到港内 ,透过的波浪在沉箱主体后墙及翼板后侧也产生波浪力 ,作用在沉箱主体前墙和翼板前侧的波浪力和前述波浪力也会产生相位差 ,导致作用在防波堤上的总波浪力减小。这一现象可以通过对沉箱主体上与翼板上单位宽度波浪总力的数值计算结果得到验证 ,图 9 证明了 2 组波浪力之间存在一个相位差 α ,通过计算可以得到此相位差约为入射波浪周期的 11%。

将波峰作用时的沉箱上的压强垂直分布 P_{C-1} 、翼板上的压强垂直分布 P_{C-2} 以及直墙上的压强垂直分布 P_V 沿墙高度进行比较(图 10)。可见在相同高度处的 P_{C-1} 和 P_{C-2} 均小于 P_V 。积分后得到的沉箱上的单位宽度波浪力 $F_{C-1}=0.187$ kN/m ,与沉箱对应高度的直墙上单位宽度波浪力 $F_{V-1}=0.243$ kN/m ,翼板上的单位宽度波浪力 $F_{C-2}=0.102$ kN/m ,与翼板对应高度的直墙上单位宽度波浪力 $F_{V-2}=0.124$ kN/m ; F_{C-1} 比 F_{V-1} 小约 23% , F_{C-2} 比 F_{V-2} 小约 18%。结果表明 ,与传统的直墙结构相比 ,梳式结构有效减小了防波堤所受水平波浪总力。

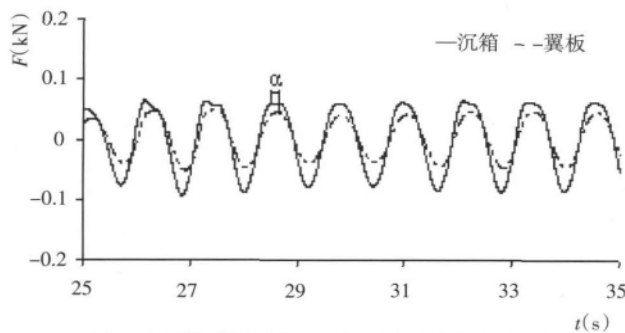


图 9 矩形沉箱与翼板上水平波浪力的相位差

Fig.9 Time histories of horizontal wave forces on rectangular caisson and side plates

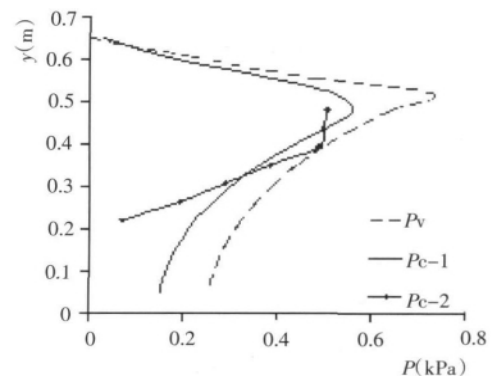


图 10 P_{C-1} 、 P_{C-2} 和 P_V 结果比较

Fig.10 Comparison of P_{C-1} 、 P_{C-2} and P_V

4 透空式梳式防波堤波浪透射系数的研究

透空式梳式防波堤是翼板部分透空的一种梳式防波堤形式 ,根据实际工程需要 ,通过调节翼板的高度 ,起到减小波浪力、减小堤前反射和控制透射波高的综合效果。董国海、李玉成等^[8-9]的研究表明反射系数主要与参数 b/L 有关 ,这是由于梳式防波堤的反射系数主要取决于入射波和反射波的相位关系 ;同时 ,以往仅对参数 $c=6$ m (原型尺寸)的透空式的梳式结构进行了相关研究。故本文对透空式梳式防波堤透射系数的基本规律研究主要考虑参数 c/d 和 b/L 对透浪系数的影响。文中基于第三节建立起来的波浪与梳式防波堤的作用模型 ,一共进行了 40 组数值计算 ,考虑了不同的参数 c/d 和 b/L 对透浪系数的影响 ,并根据数值结果拟合出一组经验公式 ,用于计算波浪透空式梳式防波堤的透浪系数。计算所用水深 d 为 0.52 m ,波高 h 为 0.08 m ,波浪周期 T 为 1.15~1.5 s。翼板至胸墙正面距离 b 的取值范围为 0.22~0.71 m ,相应的 b/L 为 0.11~0.37 ;翼板下方透空的尺寸 c 范围为 0.05~0.35 m ,则相应的 c/d 为 0.1~0.7。参数的选取基本上覆盖了工程实际中结构参数的选取范围。

根据数值计算结果 ,本文通过最小二乘法拟合出了一组关于透浪系数的经验公式 ,考虑了主要的影响因素 ,可以直观方便地计算出梳式防波堤后的透浪系数。该公式的相关系数 R 为 0.992 ,拟合经验公式如下

$$K_T = -1.766 \times (b/L)^2 + 0.839 \times (b/L) + 0.316 \times (c/d) - 0.027 \quad (15)$$

当 b/L 一定时 ,透射系数 K_T 的数值结果随 c/d 的变化见图 11。可见 K_T 随 c/d 的增加呈明显的线性增加 ,即随着翼板下部透空部分长度 c 的增加 ,防波堤后的透浪量也逐渐增加。当 c/d 一定时 ,透射系数 K_T 随 b/L 的变化见图 12 ,其变化规律呈抛物线形式 ,当 b/L 小于 0.25 时 , K_T 随着 b/L 的增加而增加 ,当 b/L 在 0.25 附近时透射系数 K_T 得到最大值 ,该值接近 0.3 ,其后 K_T 随着 b/L 的增加而减小。由式(15)得到的经验公式结果也同时在图 11 和图 12 中显示 ,可见拟合的经验公式可以很好地反映波浪透射系数的变化 ,可为工程设计提供参考。

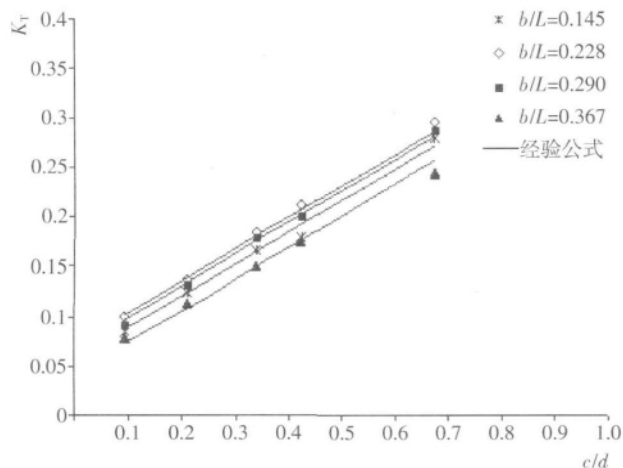


图11 透射系数 K_T 随 c/d 的变化
Fig.11 Relationship between K_T and c/d

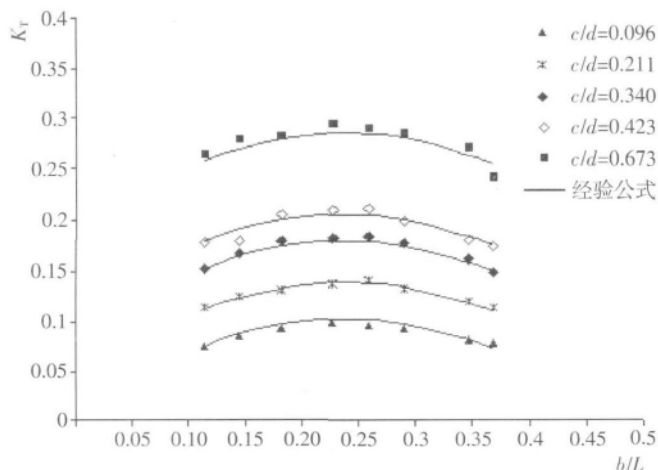


图12 透射系数 K_T 随 b/L 的变化
Fig.12 Relationship between K_T and b/L

5 结论

本文基于 FLUENT 软件利用源造波法建立了三维数值波浪水槽,模拟了一系列的波浪形式,并与理论结果进行了比较。利用数值波浪水槽,分别模拟了规则波浪和不规则波浪与梳式防波堤的相互作用。计算得到以下结论:(1) 基于 FLUENT 软件建立 3-D 数值波浪水槽,并利用源造波法生成了高质量的线性波浪、二阶 Stokes 波和不规则波;(2) 分别对规则波浪和不规则波浪与梳式防波堤的相互作用进行了数值模拟,对梳式防波堤上波浪力的折减系数和堤前反射系数与物理试验结果进行了对比验证,并对波浪力衰减的机理进行了数值验证;(3) 通过数值计算,对透空式梳式防波堤的水动力特性进行研究,重点研究了影响透浪系数的因素。透浪系数 K_T 随透空尺寸 c/d 的增加而线性增加,随尺寸 b/L 的变化呈抛物曲线变化,当 b/L 小于 0.25 时, K_T 随着 b/L 的增加而增加,在 b/L 等于 0.25 附近取得最大值,然后 K_T 随着 b/L 的增加而减小。从数值结果中拟合得到一组经验公式,用来计算透空式梳式防波堤的透浪系数。

参考文献:

- [1] 王永学.无反射造波数值波浪水槽[J].水动力学研究与进展,1994,19(2):205-214.
WANG Y X.Numerical Wave Channel with Absorbing Wave-maker[J].Journal of Hydrodynamics,1994,19(2):205-214.
- [2] 李凌,林兆伟,尤云祥,等.基于动量源方法的黏性数值波浪水槽[J].水动力学研究与进展,2007,22(1):77-82.
LI L,LIN Z W,YOU Y X,et al.The numerical wave flume of the viscous fluid based on the momentum source method[J].Journal of Hydrodynamics,2007,22(1):77-82.
- [3] 高学平,李昌良,张尚华.复杂结构形式的海堤波浪力及波浪形态的数值模拟[J].海洋学报,2006,28(1):139-145.
GAO X P,LI C L,ZHANG S H.Numerical simulation of wave pressures and wave motions on complicated composite seawalls[J].Acta Oceanologica Sinica,2006,28(1):139-145.
- [4] 周勤俊,王本龙,兰雅梅,等.海堤越浪的数值模拟[J].力学季刊,2005,26(4):629-633.
ZHOU Q J,WANG B L,LAN Y M,et al.Numerical Simulation of Wave Overtopping over Seawalls[J].Chinese Quarterly of Mechanics,2005,26(4):629-633.
- [5] 刘钊,陈志春.大型港口潜堤越浪后港内波况研究[J].水道港口,2010,31(6):561-565.
LIU Z,CHEN Z C.Study on Wave Condition of Large Scale Port with Submerged Breakwater[J].Journal of Waterway and Harbor,2010,31(6):561-565.
- [6] 戈龙仔,迟杰,张慈珩.防波堤堤后次生波的试验研究[J].水道港口,2010,31(3):204-209.
GE L Z,CHI J,ZHANG C H.Experimental Research on Secondary Wave Height over Breakwater[J].Journal of Waterway and Harbor,2010,31(3):204-209.
- [7] 牛恩宗,邓磊,马德堂.梳式防波堤的试验研究与实施[J].中国港湾建设,2001(6):5-8.
NIU E Z,DENG L,MA D T.Experimental Studies and Construction of Comb-type Breakwater[J].China Harbour Engineering,2001(6):5-8.

- [8] Dong G H ,Li Y C ,Sun Z C ,et al.Interaction Between Waves and A Comb-Type Breakwater[J].China Ocean Engineering ,2003 ,17 (4) :517-526.
- [9] 李玉成 ,孙昭晨 ,徐双全 ,等.梳式沉箱防波堤的水力学特性[J].水动力学研究与进展 ,2002 ,17(4) :472-482.
LI Y C ,SUN Z C ,XU S Q ,et al.The hydraulic performance of comb-type vertical breakwater[J].Journal of Hydrodynamics ,2002 ,17 (4) :472-482.
- [10] 张涛 ,王清湘 ,赵国藩.梳式沉箱翼缘板设计理论的研究[J].海洋工程 ,2002 ,20(1) :52-56.
ZHANG T ,WANG Q X ,ZHAO G F.Research of design theory for flange plate of comb-type caisson[J].The Ocean Engineering ,2002 ,20(1) :52-56.
- [11] 朱大同.梳式堤波浪反射系数近似计算[C]//左其华 ,窦希萍.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.
- [12] 刘子琪 ,曲淑媛 ,王振呈.大连大窑湾一期防波堤工程曲线型防浪墙防浪效果的试验研究[J].中国港湾建设 ,2005(1) :16-20.
LIU Z Q ,QU S Y ,WANG Z C.Experiment and Research on Wave Protection Effect of Curving Wave Walls on Phase I of Dayaowan Breakwater in Dalian[J].China Harbour Engineering ,2005(1) :16-20.
- [13] 房卓 ,张宁川 ,曹燕枝 ,等.波浪与非透空梳式防波堤作用的试验研究[J].水运工程 ,2010(8) :1-6.
FANG Z ,ZHANG N C ,CAO Y Z ,et al.Experimental study on interactions between waves and non-open comb-type breakwater [J].Port & Waterway Engineering ,2010(8) :1-6.
- [14] Lin P Z ,Liu P L F.Internal Wave-Maker for Navier-Stokes Equations Models[J].Journal of Waterway ,Port ,Coastal and Ocean Engineering ,1999 ,125(4) :207-215.
- [15] 俞聿修.随机波浪及其工程应用[M].大连 :大连理工大学出版社 ,2000.
- [16] 李玉成 ,滕斌.波浪对海上建筑物的作用 2版[M].北京 :海洋出版社 ,2002.

Numerical simulations of open comb-type breakwater and research on its wave transmission coefficient

FANG Zhuo¹ ,ZHANG Ning-chuan¹ ,ZANG Zhi-peng²

(1.State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering ,Dalian University of Technology ,Dalian 116023 , China 2.Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering ,Institute of Mechanics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100190 ,China)

Abstract In this paper ,the source wave-generation method was applied to develop a 3-D numerical wave tank based on the FLUENT solver. Various wave trains ,such as linear monochromatic waves ,second order Stokes waves and irregular waves were generated by using different source functions. Interactions between waves and comb-type breakwater were simulated using the present numerical wave tank. The numerical results of wave force reduction coefficient and wave reflection coefficient were validated by the experimental results. The mechanism of wave force reduction by the comb-type breakwater was also confirmed by the numerical results. Furthermore ,the wave transmission behind the non-open comb-type breakwater was also investigated. It can be concluded by the numerical results that there is a parabolic trend between the wave transmission coefficient K_t and the distance between the side plates and the front wall of the caisson b/L . K_t increases with the increase of the height of the gap below the side plates c/d . An empirical formula was obtained based on the numerical results to simplify the calculation of the wave transmission coefficient.

Key words 3-D numerical wave tank ;source wave-generation method ;comb-type breakwater ;wave force reduction coefficient ;wave transmission coefficient