

斜坡堤栅栏板护面波浪爬高数值模拟

祁国军,袁新明

(扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要:以海堤工程中常用的栅栏板护面为例,采用源函数造波法研究了栅栏板糙率对波浪爬高的影响。结果表明:在线性规则波作用下,波浪爬高衰减系数随着斜坡堤坡面糙率的增大而减小,当糙率为0.40~0.50时,波浪爬高衰减系数在0.6~0.7之间变化;当糙率大于0.50时,波浪爬高衰减系数随着斜坡堤坡度的变缓有增大的趋势。当波陡较小时,在相同糙率条件下,斜坡堤坡度越缓,爬高衰减系数越小;波陡较大时,随着斜坡堤坡度的变缓,波浪爬高衰减系数先增后减。

关键词:数值波浪水槽;栅栏板护面;糙率;波浪爬高衰减系数;防浪墙;斜坡堤

中图分类号:TV139.2⁺4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)05-0016-04

Numerical simulation of wave run-up on fence panels of sloping dikes//QI Guojun, YUAN Xinming (College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Taking fence panels, commonly used in sea dike projects, as an example, the influence of fence panel roughness on wave run-up was analyzed using the source wave-generating method. The results show that the attenuation coefficient of wave run-up (K_p) decreases with the increase of roughness for a linear regular wave. When roughness has values in the range of 0.40~0.50, K_p ranges from 0.6 to 0.7. When roughness is greater than 0.50, K_p increases with the decrease of the sloping dike. With the same roughness, the slower the slope of the dike is, the smaller K_p is for small wave steepness. When wave steepness increases, K_p increases at first and then decreases with the decrease of the sloping dike.

Key words: wave numerical flume; fence panels; roughness; attenuation coefficient of wave run-up; wave wall; sloping dike

防浪墙是水库和堤岸的防护工程,是防止波浪翻越坝顶而在坝顶挡水前沿设置的墙体^[1],主要承受波浪力的作用。波浪力的大小及其分布形式会直接影响到防浪墙的安全与稳定,防浪墙一旦遭到破坏,后果将十分严重,因此在设计防浪墙时如何有效地减小波浪爬高和波浪力是个关键问题,也是决定工程可靠性和经济性的重要因素。在海堤工程中,波浪爬高是影响防浪墙顶高程的最主要因素。为了有效降低墙顶高程,采取一定的消浪措施来减小波浪爬高是必要的。波浪在海堤上的爬高实质是水流的动能转化为势能的过程。波浪爬高时满足伯努利方程,从伯努利方程可以看出增大护面的糙率可以增大波浪沿程水头损失,从而起到消波作用,减小波浪爬高。随着仿物理造波技术的发展,采用数值模拟技术模拟波浪问题已取得较好的成果。周斌珍等^[2]通过实时模拟造波板的运动建立了完全非线性数值波浪水槽。宁德志等^[3]采用源函数造波

法建立了三维完全非线性数值波浪水槽。李宏伟^[4]通过模拟摇摆式造波板建立了不规则波数值波浪水槽。李胜忠^[5]通过模拟造波机的运动建立了线性规则波数值波浪水槽。本文以 Fluent 软件为计算平台,采用 Reynoldss 时均 Navier-Stokes 方程并结合 RNG $k-\varepsilon$ 模型作为波浪求解的基本方程,以源函数造波法对波浪进行湍流数值模拟,并研究不同糙率下的斜坡堤栅栏板护面对波浪爬高的影响,以及波浪爬高与波陡和坡比之间的关系。

1 Reynoldss 时均 Navier-Stokes 方程

波浪流动具有以下特点:自由表面随时间不断变化;水流紊动性强;波浪在传播过程中遇到建筑物时波面易破碎。因此,为了更真实地模拟物理造波水槽的各项功能,本文数值波浪水槽采用 Reynoldss 时均 Navier-Stokes 方程,并结合 RNG $k-\varepsilon$ 模型作为波浪求解的基本方程进行湍流数值模拟,

采用流体体积函数 (volume of fluid, VOF) 的方法对波浪自由表面进行跟踪。其控制方程为^[6]

连续性方程
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

湍流时均方程
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + F_i \tag{2}$$

变量 φ 的时均输运方程
$$\frac{\partial(\rho \varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varphi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j' \varphi'} \right) + F \tag{3}$$

湍动能 k 方程
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \tag{4}$$

湍动能耗散 ε 方程
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^*}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

其中
$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_1 \quad \mu_1 = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \eta = \sqrt{2} E_{ij} \frac{k}{\varepsilon}$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$C_\mu = 0.0845 \quad \alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.42 \quad C_{2\varepsilon} = 1.68$$

$$\eta_0 = 4.377 \quad \beta = 0.012$$

式中: $x_i (i=1, 2)$ 为二维笛卡儿坐标系下的空间坐标; t 为时间; $u_i (i=1, 2)$ 为速度分量; ρ 为流体的密度; μ 为流体动力学黏性系数; $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ 为 Reynolds 应力项; F_i 为附加源项; G_k 是由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; ε 为湍动能耗散率。

2 源函数造波原理

2.1 源项存在时的控制方程

当源项存在时, 对于黏性不可压缩流体其控制方程如下^[7-8]:

连续性方程
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = f(x, y, t) \tag{6}$$

动量方程
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + uf + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial f}{\partial x} \tag{7}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + vf + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial f}{\partial y} \tag{8}$$

其中
$$f(x, y, t) = \begin{cases} f_s(y, t) & x = x_s \\ 0 & x \neq x_s \end{cases}$$

式中: u, v 分别为 x, y 方向的速度分量; p 为流体的压力; $f(x, y, t)$ 为非零的质量源函数; x_s 为造波源的水平位置坐标; $f_s(y, t)$ 为 $x=x_s$ 处的造波强度。

2.2 造波强度表达式

造波强度表达式^[2-4]为
$$f_s(y, t) = \frac{2u(x_s, y, t)}{\Delta x} \tag{9}$$

其中
$$u(x_s, y, t) = \omega A \frac{\cosh(\psi y + \psi d)}{\sinh(\psi d)} \cos(\psi x_s - \omega t)$$

式中: Δx 为造波区域在水平方向的长度; $u(x_s, y, t)$ 为在造波区域处水质点的水平速度; A 为振幅, $A = h/2$, h 为波高; ψ 为波数; ω 为圆频率; d 为水深。

2.3 数值波浪水槽的试验分析

2.3.1 计算模型

计算模型采用文献[9]中的试验模型(图1), 为带弧形防浪墙的海堤断面, 水深 $d=6\text{ m}$, 波浪周期 $T=4.6\text{ s}$, 波长 $L=28.6\text{ m}$, 波高 $h=1.5\text{ m}$, 波速 $c=6.2174\text{ m/s}$, 防浪墙高 $H=2\text{ m}$, 防浪墙墙趾超高 $d_0=1.0\text{ m}$, 斜坡堤的坡度为1:3。

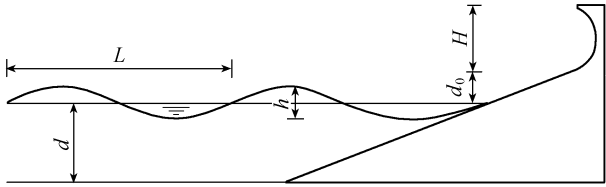


图1 计算模型断面示意图

2.3.2 计算模型网格划分

计算模型的网格划分如图2所示。计算模型由矩形单元和三角形单元构成, 在防浪墙处采用加密的三角形单元模拟波面的剧烈变化, 在其他部位均采用矩形单元, 并在自由表面处将网格画密, 以便更好地追踪自由表面的变化。

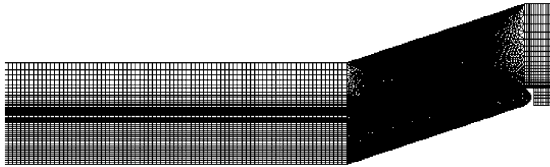


图2 计算模型网格划分

2.3.3 计算模型边界条件及初始条件

在对称边界上, 垂直边界的速度为零, 防波堤均采用无滑移的固壁边界, 其法向和切向的速度均为零, 水槽右端为压力出口边界, 计算初始时刻水槽中的水深为6 m。

2.3.4 作用在弧形防浪墙上的波浪力试验分析

图3是计算稳定后作用在弧形防浪墙上的水平力和垂向力随时间的变化过程,可以看出模拟值和试验值的变化规律基本上一致,由此可知,该数值波浪水槽在实际应用中是可行的。

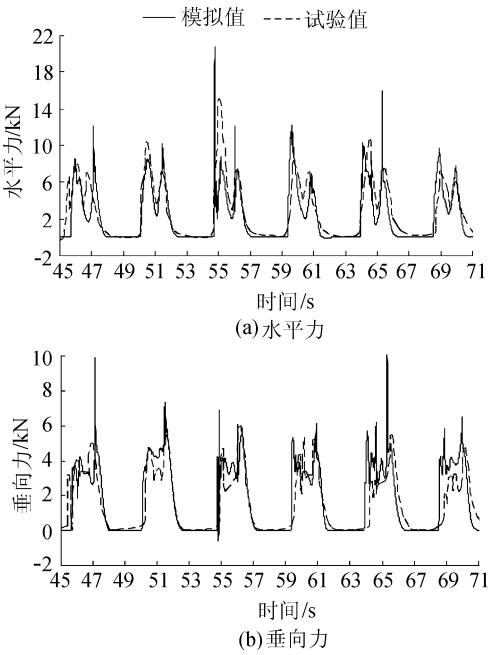


图3 波浪力的模拟值和试验值的对比

3 栅栏板护面波浪爬高数值模拟

3.1 栅栏板护面波浪爬高理论分析

根据JTJ213—98《海港水文规范》,正向规则波在斜坡建筑物上的波浪爬高可按下式计算^[10]:

R = K₀R₁h (10)

其中 R₁ = K₁tanh(0.432M) + (R_{1max} - K₂)R(M)

M = 1/m (L/h)^{1/2} (tanh 2πd/L)^{-1/2}

R_{1max} = K₃/2 tanh(2πd/L) (1 + 4πd/L / sinh 4πd/L)

R(M) = 1.09M^{3.32}exp(-1.25M)

式中:R为波浪爬高,从静水位算起,向上为正;K₀为无栅栏板护面时的波浪爬高衰减系数;R₁为K₀=1和h=1 m时的波浪爬高;h为波高;L为波长;m为斜坡堤坡度;d为静水位时堤前水深;R_{1max}为相应于某一d/L时的爬高最大值;R(M)为爬高函数;K₁,K₂,K₃为系数。

对于栅栏板护面考虑其不同糙率对波浪爬高的影响,有

R_p = K_pR₁ (11)

式中:R_p为在有栅栏板护面的斜坡堤上的波浪爬高;K_p为有栅栏板护面时波浪爬高衰减系数。

3.2 计算工况

数值计算中采用以下计算工况:模型水深d=0.3 m,波浪周期T=1.03 s,栅栏板护面斜坡堤坡度为1:1.5,1:2.0,1:3.0,波陡h/L=0.07,0.09,0.10,糙率K_s=0,0.20,0.30,0.40,0.50,0.55,一共54组工况。

3.3 波浪爬高衰减系数与糙率的关系

通过数值计算可以得出波浪在不同栅栏板糙率下的最大爬高,见表1,再根据式(11)可求出波浪爬高衰减系数,见表2。

表1 不同边坡糙率下波浪最大爬高模拟值

坡度	h/L	R ₁ /m (K _s =0)	R _p /m				
			K _s =0.20	K _s =0.30	K _s =0.40	K _s =0.50	K _s =0.55
1:1.5	0.07	0.102	0.096	0.086	0.083	0.079	0.073
	0.09	0.198	0.154	0.144	0.137	0.131	0.123
	0.10	0.252	0.209	0.196	0.173	0.160	0.157
1:2.0	0.07	0.125	0.102	0.095	0.087	0.081	0.078
	0.09	0.174	0.155	0.142	0.118	0.118	0.122
	0.10	0.196	0.186	0.172	0.142	0.134	0.149
1:3.0	0.07	0.111	0.086	0.080	0.077	0.073	0.076
	0.09	0.157	0.119	0.118	0.113	0.095	0.105
	0.10	0.181	0.148	0.140	0.130	0.124	0.128

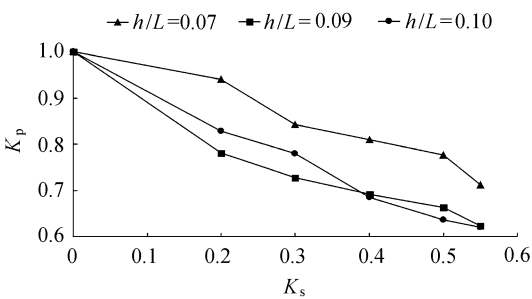
表2 波浪爬高衰减系数模拟值

坡度	h/L	K ₀ (K _s =0)	K _p				
			K _s =0.20	K _s =0.30	K _s =0.40	K _s =0.50	K _s =0.55
1:1.5	0.07	1.000	0.941	0.843	0.814	0.775	0.716
	0.09	1.000	0.778	0.728	0.692	0.663	0.621
	0.10	1.000	0.829	0.778	0.685	0.635	0.623
1:2.0	0.07	1.000	0.816	0.757	0.696	0.648	0.625
	0.09	1.000	0.890	0.816	0.678	0.679	0.702
	0.10	1.000	0.949	0.878	0.724	0.683	0.760
1:3.0	0.07	1.000	0.775	0.720	0.693	0.658	0.685
	0.09	1.000	0.758	0.752	0.720	0.605	0.668
	0.10	1.000	0.818	0.774	0.718	0.685	0.707

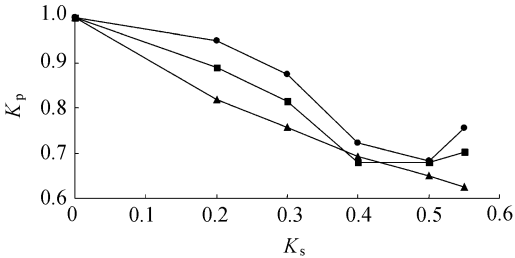
图4是不同斜坡堤坡度下波浪爬高衰减系数与糙率的关系曲线,从图4可以看出,波浪爬高衰减系数随着斜坡堤坡面糙率的增大而减小,当糙率K_s=0.40~0.50时,波浪爬高衰减系数趋于平缓,在0.6~0.7之间变化。当糙率K_s>0.50时,波浪爬高衰减系数随着斜坡堤坡度的变缓有增大趋势,这是因为当斜坡堤坡度较缓时水体填充空隙,空隙水不能消散,从而形成一层水垫层,减小了波浪爬坡时的阻力。

3.4 波浪爬高衰减系数与斜坡堤坡度的关系

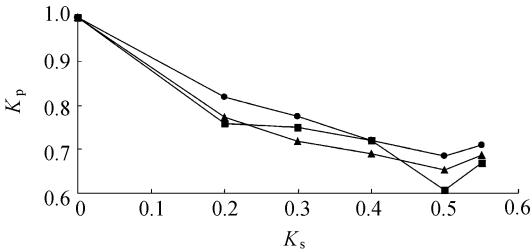
图5是波浪爬高衰减系数与斜坡堤坡度的关系曲线,从图5可以看出,当波陡较小时,在同样糙率下,坡度越缓,爬高衰减系数越小;波陡较大时,随着斜坡堤坡度的变缓,波浪爬高衰减系数先增后减。



(a) 坡度 1:1.5

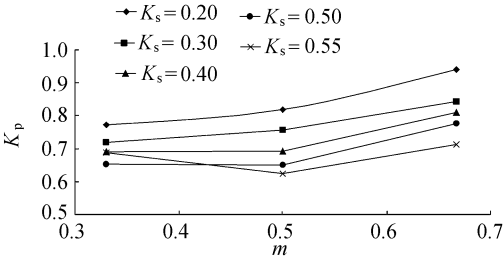


(b) 坡度 1:2.0

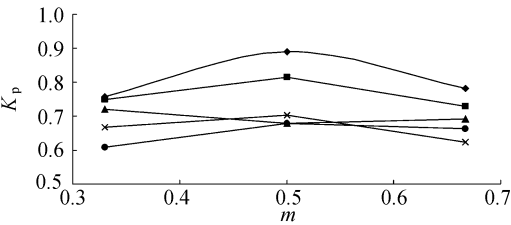


(c) 坡度 1:3.0

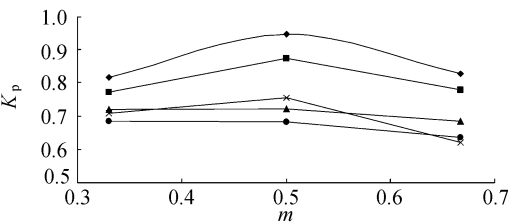
图 4 波浪爬高衰减系数与糙率的关系



(a) $h/L=0.07$



(b) $h/L=0.09$



(c) $h/L=0.10$

图 5 波浪爬高衰减系数与斜坡堤坡度的关系

4 结 论

a. 波浪爬高衰减系数随着斜坡堤坡面糙率的增大而减小,当糙率为 0.40 ~ 0.50 时,波浪爬高衰减系数趋于平缓,在 0.6 ~ 0.7 之间变化;当糙率大于 0.50 时,波浪爬高衰减系数随着斜坡堤坡度的变缓有增大的趋势,这是因为形成的水垫层减小了波浪爬坡时的阻力。

b. 当波陡较小时,在同样糙率条件下,斜坡堤坡度越缓,波浪爬高衰减系数越小;波陡较大时,随着斜坡堤坡度变缓,波浪爬高衰减系数先增后减。

参考文献:

- [1] JTJ298—98 防浪堤设计及施工规范[S].
- [2] 周斌珍,宁德志,滕斌. 造波板运动造波的实时模拟[J]. 水动力学研究与进展,2009,24(4):406-416.
- [3] 宁德志,周斌珍,周斌珍,等. 源函数法在三维完全非线性数值波浪水槽中的应用[J]. 大连海事大学学报,2008,34(2):1-11.
- [4] 李宏伟. 数值水池造波方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [5] 李胜忠. 基于 Fluent 的数值波浪水槽研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [6] 王福军,计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 高学平,曾广东,张亚. 不规则波浪数值水槽的造波和阻尼消波[J]. 海洋学报,2002,24(2):127-132.
- [8] BERNARD L M, SHEN W. Water waves generated by underwater explosion [M]. Valencia, California: World Scientific Publishing Company,1995.
- [9] 焦颖颖. 新型弧形返浪墙水动力数值模拟[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [10] JTJ213—98 海港水文规范[S].

(收稿日期:2011-10-20 编辑:周红梅)

