

多层水平板衰减波浪的影响因素分析

王国玉, 刘 丹, 任 冰, 王永学

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要 基于线性波浪理论, 进行多层水平板对波浪的反射和透射作用研究。通过分解速度势为对称势和反对称势, 结合特征函数展开法, 在考虑水平板厚度的条件下由匹配条件确定速度势展开式中的待定系数, 进而得到结构对波浪的反射系数和透射系数。所得结果与现有相关的理论解、数值解以及试验结果吻合较好。对相对水深、相对宽度、相对厚度以及水平板层数等对结构衰减波浪的影响进行了深入探讨和分析, 给出了反射系数和透射系数随上述参数的变化规律。

关键词 水平板 波浪衰减 反射系数 透射系数 相对宽度

中图分类号 O353.2

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2011)01-0033-04

Influencing factors of dissipating waves by multiple horizontal plates//WANG Guo-yu, LIU Dan, REN Bing, WANG Yong-xue
(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract : Based on the linear wave theory, the reflection and transmission of waves by multiple horizontal plates were investigated. By splitting the velocity potential into the symmetric and antisymmetric parts and based on the expansion method for characteristic functions, the matching conditions were employed to determine underdetermined coefficients in the expansion formula for velocity potential by considering the thickness of the horizontal plates. Thus, the reflection and transmission coefficients of the structures for waves were obtained. The present solutions agreed with the existing theoretical, numerical and experimental results. The effects of parameters such as the relative water depth, relative plate width, relative plate thickness and number of plates on wave dissipations were discussed, and the variation rules of the reflection and transmission coefficients with the above-mentioned parameters were also presented.

Key words : horizontal plate ; wave dissipation ; reflection coefficient ; transmission coefficient ; relative width

波浪对水平板作用的理论分析工作开展得最早的是由 Stoker^[1] 针对 1 块水平板对波浪的反射和透射作用所进行的研究。Siew 等^[2] 建立了 1 块淹没在水下的水平板对一定入射波长波浪的反射和透射作用的理论解。在这些研究工作的基础上, Patarapanich^[3] 对一定潜深的水平板对波浪的零反射问题进行了理论分析。Liu 等^[4] 开展了考虑厚度的潜式水平板对波浪作用的理论分析工作。Wang 等^[5] 得出了波浪对多层潜式薄板作用的理论解。Usha 等^[6] 就波浪对 2 层水平板作用的问题开展了类似的研究工作。在波浪对水平板的数值求解方面, Liu 等^[7] 通过边界积分方法求解了波浪对单层潜式水平板的作用问题, 而 Patarapanich 等^[8] 通过有限元方法求解了波浪经过水平板的传播问题。Yu 等^[9] 通过边界元法对单层开孔水平板的水动力特性开展了研究工作。在波浪对水平板作用的物理模型试验方面, Patarapanich 等^[8] 通过试验得到了单层潜式水平板对波浪的反射系数和透射系数, 而 Neelamani 等^[10] 和 Wang

等^[11] 分别对 2 层和多层水平板的消波性能开展了试验研究。

上述研究工作大多是考虑波浪对单层潜式水平板的作用问题, 这类情况大部分波浪能量会通过水平板与海底之间的空隙进行传递。为了能够提升多层水平板对波浪的掩护作用, 相关人员开始倾向于波浪对多层水平板的作用研究, 如 Wang 等^[5] 开展了波浪对多层潜式水平板的作用问题研究, Usha 等^[6] 就波浪对 2 层水平板的作用问题进行了理论分析。然而, 在他们的研究工作中皆认为水平板的厚度是微小的, 可以忽略不计, 而且对速度势展开式中待定系数的求解过程是在整个流域内通过连续条件匹配求解的, 工作量相对较大。

大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室研究人员通过波浪水槽内规则波试验, 开展了多层水平板消波性能的研究工作, 结果表明多层水平板结构具有较好的消波效果^[11]。笔者基于线性波浪理论对

基金项目 国家自然科学基金(50809015)

作者简介 王国玉(1977—), 男, 辽宁大连人, 讲师, 博士, 从事波浪对结构的作用研究。E-mail : wanggyu@dlut.edu.cn

多层水平板衰减波浪的效果进行了理论分析,通过分解速度势为对称势和反对称势的方法,由特征函数展开法确定速度势展开式中的待定系数,进而求得多层水平板对波浪的反射系数和透射系数。

1 控制方程与边界条件

考虑图 1 所示的均匀水深 h 中入射波幅为 A 的波浪对安放在水体中的多层水平板的作用问题。假定各层水平板在波浪作用下不发生变形,第 j 层板的厚度为 d_j ,潜深为 h_j 。水平板的宽度 $W = 2B$ 。

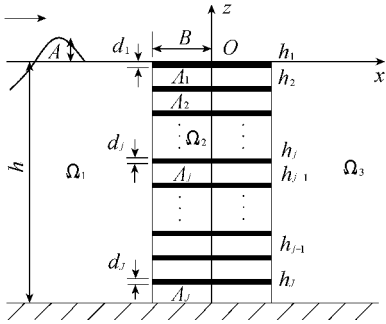


图 1 波浪对多层水平板作用示意图

基于线性波浪理论,水体在流域内满足控制方程(1)以及边界条件(式(2)~(6))。

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

自由表面边界条件 在 $|x| \geq B, z = 0$ 上

$$\frac{\partial \phi(x, z)}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \phi(x, z) \tag{2}$$

水底边界条件 在 $z = -h$ 上

$$\frac{\partial \phi(x, z)}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

物面边界条件:① 在 $|x| \leq B, z = -h_{j+1}, -(h_j + d_j)$ 以及 $j = 1, 2, \dots, J$ 上

$$\frac{\partial \phi(x, z)}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

② 在 $|x| = B, -(h_j + d_j) < z < -h_j, j = 1, 2, \dots, J$ 上

$$\frac{\partial \phi(x, z)}{\partial x} = 0 \tag{5}$$

散射波向外传播的远场条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_r}{\partial x} = -ik\phi_r & x = -\infty \\ \frac{\partial \phi_t}{\partial x} = ik\phi_t & x = +\infty \end{cases} \tag{6}$$

式中: ϕ 为流域内的速度势; ω 为圆频率; k 为入射波的波数; ϕ_r 为左端的反射势; ϕ_t 为右端的透射势; i 为虚数单位。

对上述问题的求解通常可在各流域内对速度势做特征展开,并在 $x = \pm B$ 的 2 个边界上对速度势和速度匹配,建立 4 组联立线性方程组,以确定待定系数。这种处理方法和推导过程比较复杂,建立的

方程组比较大,尤其是当水平板的层数增多时处理的难度随之增加。Mei 等^[12]提出了一种将上述问题分解成对称和反对称问题的处理方法,可将这种问题适当简化。

2 求解过程

2.1 对称解

在 Ω_1 流域内速度势的展开式可以表达为

$$\begin{aligned} \phi_{S1} = & -\frac{igA}{\omega} \left\{ [e^{ik(x+B)} + A_{S0}e^{-ik(x+B)}] Z_0(kz) + \right. \\ & \left. \sum_{m=1}^{\infty} A_{Sm}e^{k_m(x+B)} Z_m(k_m z) \right\} \end{aligned} \tag{7}$$

式中: k 和 k_m 为式(8)的正实根。

$$\begin{cases} \omega^2 = gk \tanh kh \\ \omega^2 = -gk_m \tanh k_m h \end{cases} \quad m = 1, 2, \dots \tag{8}$$

垂向特征函数 $Z_0(kz)$ 和 $Z_m(k_m z)$ 为

$$\begin{cases} Z_0(kz) = \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ Z_m(k_m z) = \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \end{cases} \tag{9}$$

在 Ω_2 流域内,以水平板的上下表面为边界将流域划分为 J 个子域 $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_J$,子域的高度为 Δh_j ,在子域 $\Lambda_j (-B < x < 0, -h_{j+1} < z < -(h_j + d_j))$ 内,速度势的展开式可表达为

$$\begin{aligned} \phi_{S2j} = & -\frac{igA}{\omega} \left[a_{S0j} Y_{0j}(\lambda_{0j} z) + \right. \\ & \left. \sum_{n=1}^{\infty} a_{Snj} \frac{\cosh \lambda_{nj} x}{\cosh \lambda_{nj} B} Y_{nj}(\lambda_{nj} z) \right] \end{aligned} \tag{10}$$

其中 $\lambda_{nj} = n\pi/\Delta h_j (n = 0, 1, \dots; j = 1, 2, \dots, J)$,垂向特征函数为

$$\begin{cases} Y_{0j}(\lambda_{0j} z) = \frac{\sqrt{2}}{2} \\ Y_{nj}(\lambda_{nj} z) = \cos \lambda_{nj}(z + h_j) \end{cases} \tag{11}$$

待定系数 A_{Sm} 和 a_{Snj} 可以通过 $x = -B$ 处速度势和速度的连续条件,利用特征函数 Y_{nj} 及 Z_m 的正交性通过求解线性方程组而确定。

2.2 反对称解

在 Ω_1 流域内,反对称解 ϕ_{A1} 展开式的表达式形如 ϕ_{S1} ,即

$$\begin{aligned} \phi_{A1} = & -\frac{igA}{\omega} \left[(e^{ik(x+B)} + A_{A0}e^{-ik(x+B)}) Z_0(kz) + \right. \\ & \left. \sum_{m=1}^{\infty} A_{Am}e^{k_m(x+B)} Z_m(k_m z) \right] \end{aligned} \tag{12}$$

在 Ω_2 流域内的 Λ_j 子域内,速度势的展开式可

以表达为

$$\phi_{A2j} = -\frac{igA}{\omega} \left[a_{A0j} \frac{x}{B} Y_{0j}(\lambda_{0j}z) + \sum_{n=1}^{\infty} a_{Anj} \frac{\sinh \lambda_{nj} x}{\sinh \lambda_{nj} B} Y_{nj}(\lambda_{nj}z) \right] \quad (13)$$

同样地,待定系数 A_{Am} 及 a_{Anj} 可以通过在 $x = -B$ 处速度势和速度的连续条件,利用特征函数 Y_{nj} 及 Z_m 的正交性求解线性方程组而确定。

3 结果分析

通过分析可得到多层水平板对波浪的反射系数和透射系数,将计算结果与现有的理论解、数值解以及试验数据进行比较,并对结构衰减波浪的影响因素进行分析。

3.1 结果对比

图2给出了本文所得到的水面处单层表面水平薄板(不计板厚)对波浪的反射系数 C_r 和透射系数 C_t 的理论结果与 Patarapanich^[3] 应用有限元法所得数值解的比较,可以看出两者吻合较好。

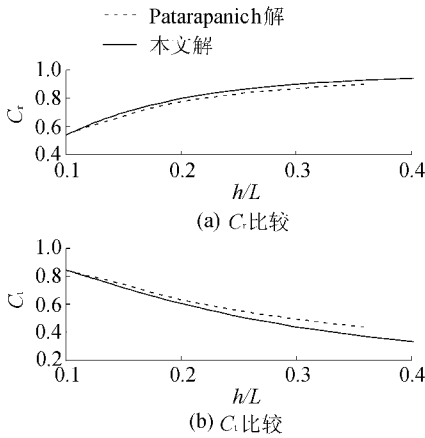


图2 单层水平薄板对波浪的反射系数和透射系数比较

图3给出了本文方法所计算的双层薄板结构(不计板厚)的反射系数和透射与 Usha 等^[6]的计算结果和 Neelamani 等^[10]的实验数据的对比。可以看出,本文结果与 Usha 等的结果较吻合,与 Neelamani 等的实验数据也相差较小。但 Usha 等理论结果的反射系数比本文的偏小一些,这是由于本文的理论分析中2个板的厚度(0.01 m)及实验条件一致,而 Usha 等是将每个板考虑成薄板结构,不计板的厚度。

3.2 多层水平板衰减波浪的影响因素分析

以等厚度(板厚为 d)、等间距分布的5块水平板为例,分析相对水深、相对宽度、相对厚度等因素对结构衰减波浪的影响(水平板数量对结构衰减波浪也有所贡献)。

3.2.1 相对水深

图4给出了反射系数和透射系数随相对水深 h/L 的变化规律。从图4中可以看出反射系数随着相对水深的增大而增大,透射系数则呈现出相反的趋势。这是因为在波长较小时波浪能量更集中于水体表面,大部分波浪会被水平板反射回去。可见,多层水平板对短周期的入射波浪比较有效。另外,水平板厚度的增加可以降低波浪的透过率。

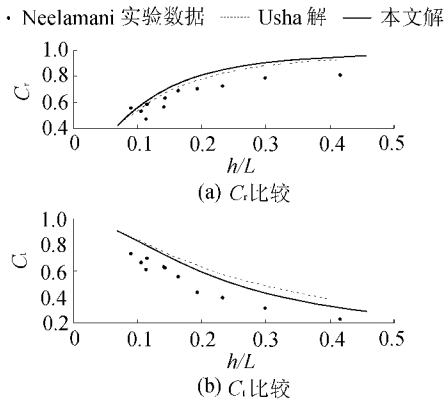


图3 双层水平薄板对波浪的反射系数和透射系数比较

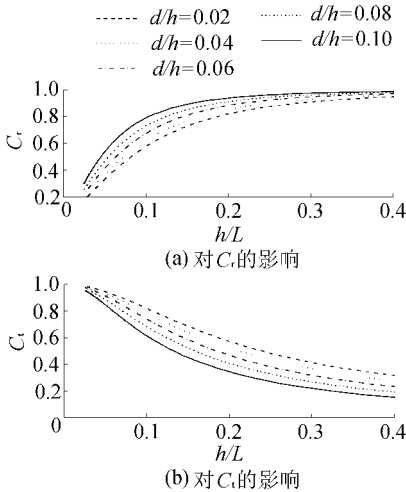


图4 相对水深对反射系数和透射系数的影响

3.2.2 相对宽度

图5给出了反射系数和透射系数随水平板相对宽度的变化趋势。相对宽度对结构衰减波浪的影响规律与相对水深对结构衰减波浪的影响规律基本一致。在 $d/h = 0.08$ 、相对宽度 $W/L = 0.3$ 附近,多层水平板可以使透射系数减低至0.5以下,表明这种结构具有较强的衰减波浪的能力。

3.2.3 相对厚度

为了更直观地描述相对厚度对结构衰减波浪的影响,图6给出了反射系数和透射系数随着相对厚度的变化规律。可以看到,水平板厚度的增加可以增大对波浪的反射作用而降低透射系数,并且这种变化关系趋于线性。当水平板的厚度增加时,相邻

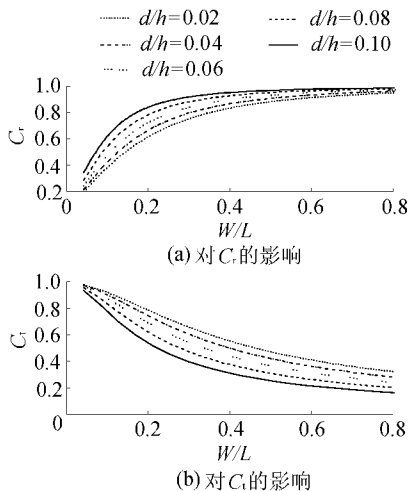


图5 相对板宽对反射系数和透射系数的影响

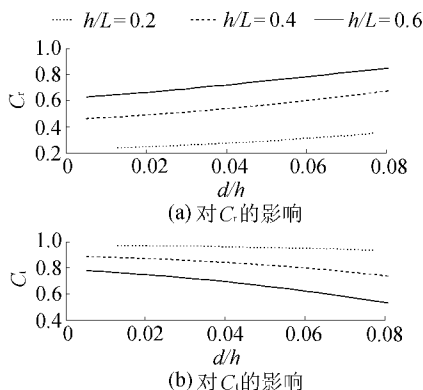


图6 相对厚度对反射系数和透射系数的影响

板的间距减小,对波浪的反射作用增强,波浪透过结构进行传播较为困难。

3.2.4 水平板数量

图7给出了水平板数量 $J = 1 \sim 5$ 时结构对波浪的反射系数和透射系数随着相对厚度变化的规律。当相对板厚小于 0.02 时,不同板数防波堤的透射系数和反射系数几乎一样。当相对板厚大于 0.02 时,多层水平板对波浪的衰减作用随着水平板数量和相对厚度的增加而增强。

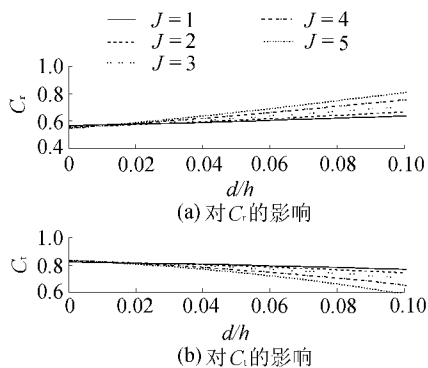


图7 水平板数量 J 对反射系数和透射系数的影响

4 结 语

通过分解速度势为对称势和反对称势,并结合特征函数展开法对多层水平板对波浪的反射和透射作用的影响因素进行理论分析,所得到的反射系数和透射系数与现有的相关理论解、数值解和试验数据进行比较,结果较吻合。理论分析结果表明,多层水平板对波浪的反射和透射作用主要受到水平板相对水深、相对宽度、相对厚度和板数的影响。因此,在一定条件下增加水平板的厚度和数量能够有效地提升多层水平板对波浪的衰减作用。

参考文献：

- [1] STOKER J J. Water waves :the mathematical theory with applications[M]. New York :John Wiley & Sons,1957 :434.
- [2] SIEW P F, HURLEY D G. Long surface waves incident on a submerged horizontal plate[J]. Journal of Fluid Mech,1977, 83 :141-151.
- [3] PATARAPANICH M. Maximum and zero reflection from submerged plate [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,1984,110(2) :171-181.
- [4] LIU P L, ISKANDARANI M. Scattering of short-wave groups by submerged horizontal plate[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,1991,117(3) :235-246.
- [5] WANG K H, SHEN Q. Wave motion over a group of submerged horizontal plates [J]. International Journal of Engineering Science,1999,37(6) :703-715.
- [6] USHA R, GAYATHRI T. Wave motion over a twin-plate breakwater[J]. Ocean Engineering,2005,32 (8/9) :1054 - 1072.
- [7] LIU P L, ABBASPOUR M. Wave Scattering by a Rigid Thin Barrier[J]. Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division,1982,108(4) :479-491.
- [8] PATARAPANICH M, CHEONG H F. Reflection and transmission characteristics of regular and random waves from a submerged horizontal plate[J]. Coastal Engineering,1989, 13(2) :161-182.
- [9] YU Xi-Ping, CHWANG A T. Water waves above submerged porous plate[J]. Journal of Engineering Mechanics,1994,120 (6) :1270-1282.
- [10] NEELAMANI S, GAYATHRI T. Wave interaction with twin plate wave barrier[J]. Ocean Engineering,2006,33 (3/4) : 495-516.
- [11] WANG Yong-xue, WANG Guo-yu, LI Guang-wei. Experimental study on the performance of the multiple-layer breakwater[J]. Ocean Engineering, 2006, 33 (13) :1829- 1839.
- [12] MEI C C, Black J L. Scattering of surface waves by rectangular obstacles in waters of finite depth[J]. Journal of Fluid Mech,1969,38 :499-511.

(收稿日期 2010-04-20 编辑 高建群)