

T 型透空式防波堤消波性能的理论分析

王国玉,黄璐,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,对 T 型透空式防波堤的消波性能进行了理论分析。在考虑水平板和竖直板厚度的条件下,通过特征函数展开法,给出流域内速度势的一般表达式,由速度势和速度的连续条件确定表达式中的待定系数,从而得到 T 型透空式防波堤对波浪的反射系数和透射系数随波数的变化关系,并对影响 T 型透空式防波堤消波性能的因素如水平板的潜深和竖直板高度等进行了计算和分析。计算结果与现有相关理论结果吻合良好;水平板的潜深和竖直板的高度对淹没和出水 T 型透空式防波堤的消波性能有较大影响。

关键词:透空式防波堤;消波性能;T 型结构;反射系数;透射系数

中图分类号: O353.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)02-0001-05

Theoretical analysis of the performance of wave dissipation of T-type open breakwater//WANG Guoyu, HUANG Lu, REN Bing, WANG Yongxue (*State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: We perform a theoretical analysis of the performance of wave dissipation of T-type open breakwater based on the linear wave theory. We use the method of eigenfunction expansions to obtain a general expression of the basin velocity potential by considering the thickness of horizontal and vertical plates. The undetermined coefficient is determined from the velocity potential and the continuous conditions of velocity considering the changing relationship between reflection coefficient and transmission coefficient of T-type open breakwater on wave. We calculate and analyze the factors that influence the performance of wave dissipation of T-type open breakwater such as the depth of horizontal plate and the height of vertical plate. Overall, our findings are in well agreement with those of existing theory. The depth of horizontal plate and the height of vertical plate have great influence on the performance of wave dissipation of submerged and emerged T-type open breakwater.

Key words: open breakwater; wave dissipation performance; T-type structure; reflection coefficient; transmission coefficient

波浪理论的研究和试验表明,波动主要集中在水体的上层,在表层 2~3 倍波高的水层厚度内集中了 90%~98% 的波能,由支墩和没入水中一定深度的挡浪结构组成的透空式防波堤就是根据这个特点设计的。由于透空式防波堤具有结构新颖、利于水体循环交换、对地质条件要求低、造价低廉等优点,关于透空式防波堤消波性能的研究工作已成为相关科技人员感兴趣的热点课题之一,其中,由水平板或竖直板组成的板式透空结构逐步引起人们的关注。

早在 1947 年 Ursell^[1] 首先研究了无限水深时挡浪板的透射系数,给出了深水直立薄板的精确解。Neelamani 等^[2-3] 于 2002 年提出 T 型透空式防波堤和“⊥”型透空式防波堤,并通过物理模型试验,研究了两种防波堤在不同情况下波浪的反射、透射以

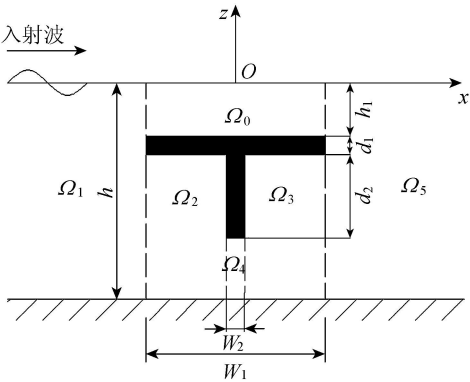
及能量衰减系数。Wang 等^[4] 通过数值模拟研究了多层水平板的水动力特性,发现影响波浪反射和透射的因素有板长、顶层水平板的淹没深度以及相对水深。Liu 等^[5] 开展了考虑厚度的潜式水平板对波浪作用的理论分析工作。Mei 等^[6] 提出了将速度势分为对称和反对称的方法,研究了水面方箱以及水底方箱对波浪的消浪效果。王国玉等^[7] 从破坏波浪水质点垂向运动轨迹出发,提出了一种由多层水平板组成的透空式防波堤新结构,通过物理模型试验,深入探讨了防波堤结构几何参数(相对宽度、相对间距)以及波陡等因素对防波堤消浪效果的影响,并对不同因素影响下的透射系数以及反射系数变化特征进行了比较分析。

目前,国内外学者在板式透空式防波堤的水动力

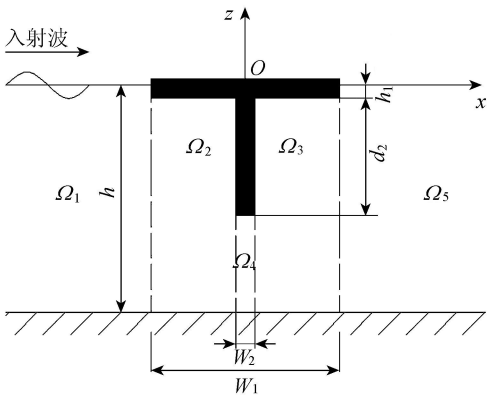
特性方面取得了一定的研究成果,然而在防波堤的结构形式上,现有的研究工作大多数是仅以水平板或竖直板为研究对象展开的,对于水平板和竖直板相结合的结构研究还比较少。另外在防波堤水动力特性的研究方法上,大部分研究工作以物理模型试验为手段,缺少相应的理论分析。鉴于上述两点,本文在总结前人研究成果的基础上,通过线性波浪理论,对 T 型透空式防波堤的消波性能进行理论分析,并对影响 T 型透空式防波堤消波效果的因素进行初步探讨。

1 控制方程与边界条件

考虑如图 1 所示的均匀水深 h 中,向右行进的波幅为 A 、频率为 ω 、波长为 L 的线性波浪对 T 型透空式防波堤的作用问题。T 型透空式防波堤的潜深为 h_1 ,水平板的宽度为 W_1 ,水平板厚度为 d_1 ,垂直板厚度为 W_2 ,垂直板高度为 d_2 。以水面向右为 x 轴正向,经过水平板中心的铅直线上为 z 轴正向,建立二维笛卡儿坐标系,并将流域按图 1 所示分为若干子域($\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_5$)。



(a) 淹没情形



(b) 出水情形

图 1 线性波浪对 T 型透空式防波堤作用示意图

基于线性波浪理论,在各流域内,流体中的速度势 ϕ 满足控制方程(1)及下述边界条件:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \tag{1}$$

自由表面边界条件,在 $z=0$ 上:

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

水底边界条件,在 $z=-h$ 上:

$$\phi_z(x,z) = 0 \tag{3}$$

物体表面边界条件:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{4}$$

以及散射波向外传播的远场条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_r}{\partial x} = -ik\phi_r & (x = -\infty) \\ \frac{\partial \phi_t}{\partial x} = ik\phi_t & (x = +\infty) \end{cases} \tag{5}$$

式中: g 为重力加速度; $\mathbf{n}$ 为物体表面单位法矢量; i 为虚数单位; k 为波数; ϕ_r 和 ϕ_t 分别为反射速度势和透射速度势。

对以上问题的求解,可先将流域沿着物体表面划分为若干子域,然后在各流域内对速度势展开,并在 $x=\pm B_1, x=\pm B_2$ (B_1 和 B_2 分别为水平板和竖直板的半宽,即 $B_1=W_1/2, B_2=W_2/2$) 4 个边界上应用速度势和速度连续条件建立线性方程组,从而确定待定系数。

1.1 淹没情形

如图 1(a) 所示,当 T 型透空式防波堤完全淹没时,在 Ω_1 域内,速度势的展开式可表示为

$$\phi_1(x,z) = -\frac{igA}{\omega} \left[\left(e^{ik_{10}(x+B_1)} + A_{10}e^{-ik_{10}(x+B_1)} \right) \cdot Z_{10}(k_{10}z) + \sum_{n_1=1}^{\infty} A_{1n_1}e^{k_{1n_1}(x+B_1)} Z_{1n_1}(k_{1n_1}z) \right] \tag{6}$$

式中: k_{10} 和 k_{1n_1} 分别为色散方程 $\omega^2 = gk \tanh k$ 和 $\omega^2 = -gk \tanh k$ 的正实根。垂向特征函数

$$\begin{cases} Z_{10}(k_{10}z) = \frac{\cosh(k_{10}(z+h))}{\cosh(k_{10}h)} & (n_1 = 0) \\ Z_{1n_1}(k_{1n_1}z) = \frac{\cos(k_{1n_1}(z+h))}{\cos(k_{1n_1}h)} & (n_1 = 1, 2, \dots) \end{cases} \tag{7}$$

满足在区间 $[-h, 0]$ 上的正交关系。

在 Ω_0 域内,速度势展开式为

$$\phi_0(x,z) = -\frac{igA}{\omega} \left[A_{00}Z_{00}(k_{00}z) + \sum_{n_0=1}^{\infty} A_{0n_0}Z_{0n_0}(k_{0n_0}z) \cosh(k_{0n_0}x) + B_{00}Z_{00}(k_{00}z)x + \sum_{n_0=1}^{\infty} B_{0n_0}Z_{0n_0}(k_{0n_0}z) \sinh(k_{0n_0}x) \right] \tag{8}$$

式中: k_{00} 和 k_{0n_0} 分别为色散方程 $\omega^2 = gk \tanh k$ 和 $\omega^2 = -gk \tanh k$ 的正实根,但在 Ω_0 域中水深取 h_1 。垂向特征函数表达式与 Ω_1 域相同,并且垂向特征函数

满足在区间 $[-h_1, 0]$ 上的正交关系。

在 Ω_2 域内,速度势可表示为

$$\phi_2(x,z) = -\frac{igA}{\omega} \left[A_{20}Z_{20}(k_{20}z) + \sum_{n_2=1}^{\infty} A_{2n_2}Z_{2n_2}(k_{2n_2}z) \cosh(k_{2n_2}x) + B_{20}Z_{20}(k_{20}z)x + \sum_{n_2=1}^{\infty} B_{2n_2}Z_{2n_2}(k_{2n_2}z) \sinh(k_{2n_2}x) \right] \quad (9)$$

其中 $k_{2n_2} = \frac{n_2\pi}{h-h_1-d_1}$ ($n_2 = 0, 1, 2, \dots$)

垂向特征函数

$$\begin{cases} Z_{20}(k_{20}z) = \frac{\sqrt{2}}{2} & (n_2 = 0) \\ Z_{2n_2}(k_{2n_2}z) = \cos(k_{2n_2}(z+h)) & (n_2 = 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (10)$$

满足在区间 $[-(h_1+d_1), 0]$ 上的正交关系。

在 Ω_3 域内,速度势展开式以及垂向特征函数表达式均与 Ω_2 域相同。

在 Ω_4 域内,速度势展开式以及垂向特征函数表达式均与 Ω_2 域类似,其中 $k_{4n_4} = \frac{n_4\pi}{h-h_1-d_1-d_2}$ ($n_4 = 0, 1, 2, \dots$),且垂向特征函数

$$\begin{cases} Z_{40}(k_{40}z) = \frac{\sqrt{2}}{2} & (n_4 = 0) \\ Z_{4n_4}(k_{4n_4}z) = \cosh k_{4n_4}(z+h) & (n_4 = 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (11)$$

满足在区间 $[-(h_1+d_1+d_2), 0]$ 上的正交关系。

在 Ω_5 域内,速度势展开式为

$$\phi_5(x,z) = -\frac{igA}{\omega} \left[A_{50}e^{ik_{50}(x-B_1)}Z_{50}(k_{50}z) + \sum_{n_5=1}^{\infty} A_{5n_5}e^{-k_{5n_5}(x-B_1)}Z_{5n_5}(k_{5n_5}z) \right] \quad (12)$$

式中: k_{50} 和 k_{5n_5} 为色散方程 $\omega^2 = gk \tanh kh$ 和 $\omega^2 = -gk \tanh kh$ 的正实根。垂向特征函数表达式与 Ω_1 域相同,并且满足在区间 $[-h, 0]$ 上的正交关系。

在式(1)~(12)中, $A_{1n_1}, A_{0n_0}, B_{0n_0}, A_{2n_2}, B_{2n_2}, A_{3n_3}, B_{3n_3}, A_{4n_4}, B_{4n_4}$ 和 A_{5n_5} 均为待定系数,可通过在公共边界上的匹配条件,建立线性方程组来确定。

1.2 出水情形

当 T 型透空式防波堤出水时,水平板处于自由水面位置,相比较淹没情形而言, Ω_0 域(水平板上方的流域)消失,其他各流域内速度势的表达式与淹没情形一致,求解过程类似。

2 计算结果分析

2.1 淹没水平板

对于波浪与淹没 T 型透空式防波堤作用的问题,在不考虑板厚度的条件下,可简化为波浪对淹没水平薄板的作用问题。Wang 等^[4]基于势流理论求

解了波浪对淹没水平薄板(不考虑水平板厚度)的作用问题,图 2 给出了本文反射系数 C_r 计算结果和文献[4]所得结果的比较,两者吻合良好。

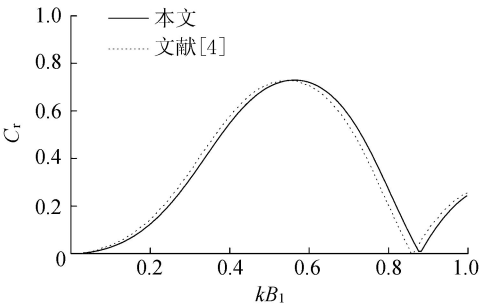


图 2 单层淹没水平薄板对波浪的反射系数

类似地,Liu 等^[5]基于势流理论得到了考虑板厚度时水平板对波浪的反射系数 C_r 和透射系数 C_t ,图 3 给出了本文计算结果和文献[5]所得结果的对比,两者几乎完全吻合。

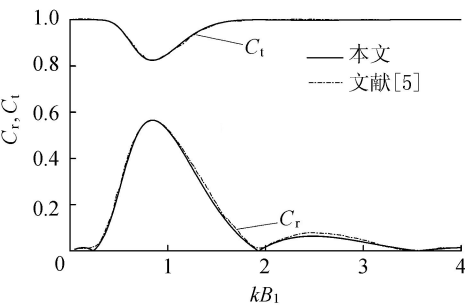


图 3 单层淹没水平板对波浪的反射系数和透射系数

2.2 水面方箱

对于波浪与出水 T 型透空式防波堤的作用问题,在不考虑水平板厚度的条件下,可简化为波浪对水面方箱的作用问题。Mei 等^[6,8]基于特征函数展开法得到了水面方箱对波浪的反射系数和透射系数。图 4 给出了本文反射系数 C_r 计算结果和文献[6]所得结果的对比,两者完全吻合。

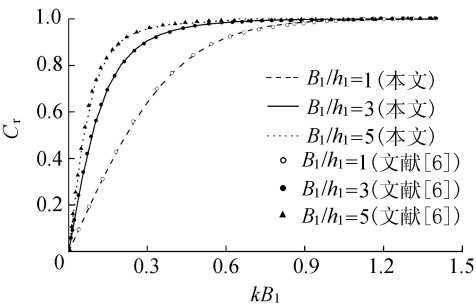


图 4 水面方箱对波浪的反射系数

3 消波性能影响因素分析

3.1 淹没 T 型透空式防波堤

图 5 给出了淹没 T 型透空式防波堤在 $B_1/h = 0.5, B_2/B_1 = 0.2, d_1/d_2 = 0.2$ 时,不同淹没深度条件下,对线性入射波浪的反射系数和透射系数的计算

结果。一般地,波浪经过淹没障碍物传播时反射系数和透射系数有周期性变化的特点^[6,9-10],对于淹没T型透空式防波堤,其对波浪的反射系数和透射系数也表现出这一规律。另外,最大反射系数随着相对淹没水深 h_1/h 的增加而减小,最大透射系数呈相反的趋势。

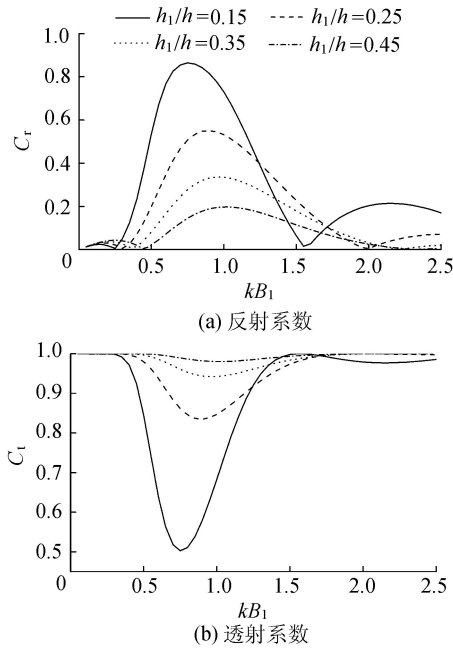


图5 淹没深度对淹没T型透空式防波堤反射系数和透射系数的影响

图6给出了淹没T型透空式防波堤在 $B_1/h = 0.5$ 、 $B_2/B_1 = 0.2$ 、 $h_1/h = 0.1$ 、 $d_1/h_1 = 0.5$ 时,不同相对竖直板高度 d_2/h 条件下,对线性入射波浪的反射系数和透射系数的计算结果。类似地,在不同相对竖直板高度的条件下,反射系数也表现为随着相对波数 kB_1 的增加而呈现周期性的变化,但随着相对竖直板高度的变化,反射系数差别不大。如图1(a)所示,在水平板下部的 Ω_2 、 Ω_3 和 Ω_4 流域内,水体的流动由于受到水平板的限制而形成压力流,只满足物体表面边界条件而不再满足自由水面条件^[11]。在水深方向上,竖直板高度的增加,可近似理解为相当于增加了水平板的厚度,然而,对于淹没的水平板结构,厚度的增加并不能增强结构对波浪的反射作用^[12-13],而实际应用中,淹没薄板结构既合理又经济。对于淹没T型透空式防波堤,在相对波数较小的区域($kB_1 < 1.2$),随着竖直板高度的增加,反射系数有所降低;而在相对波数较大的区域($kB_1 > 1.2$),随着竖直板高度的增加,反射系数略有增加。

3.2 出水T型透空式防波堤

图7给出了出水T型透空式防波堤在 $B_1/h = 0.5$ 、 $B_2/B_1 = 0.2$ 、 $d_2/h_1 = 0.25$ 时,不同相对吃水深度 h_1/h 条件下,对线性入射波浪的反射系数和透射

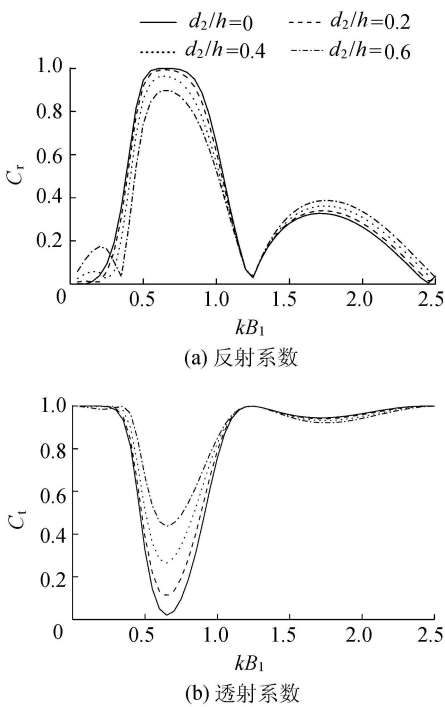


图6 竖直板高度对淹没T型透空式防波堤反射系数和透射系数的影响

系数的计算结果。随着水平板吃水深度的增加,在水深方向上,T型透空式防波堤的挡浪面积增大,对表面波浪的反射作用增强,计算结果表现为反射系数逐渐增大,透射系数随之减小。

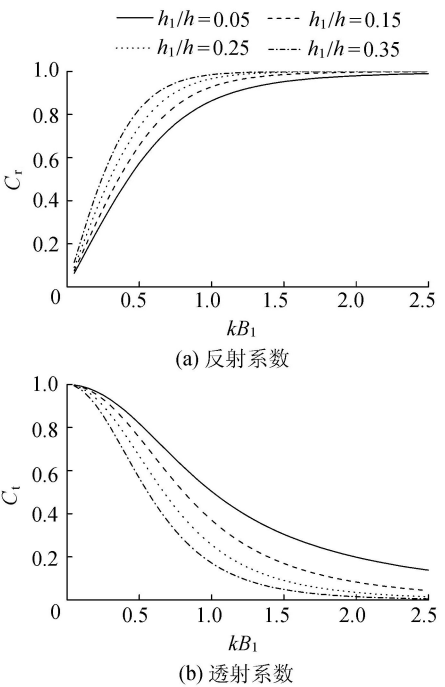


图7 吃水深度对出水T型透空式防波堤反射系数和透射系数的影响

图8给出了出水T型透空式防波堤在 $B_1/h = 0.5$ 、 $B_2/B_1 = 0.2$ 、 $h_1/h = 0.05$ 时,不同相对竖直板高度 d_2/h 条件下,对线性入射波浪的反射系数和透射系数结果。与增加水平板的吃水深度类似,对于出

水 T 型透空式防波堤,随着竖直板高度的增加,同样可以增大 T 型透空式防波堤在水深方向上的挡浪面积,因而 T 型透空式防波堤对波浪的反射作用增强,相应地,透射系数有所减小。与增加水平板吃水深度相比,在竖直方向上增加竖直板高度更加经济合理。

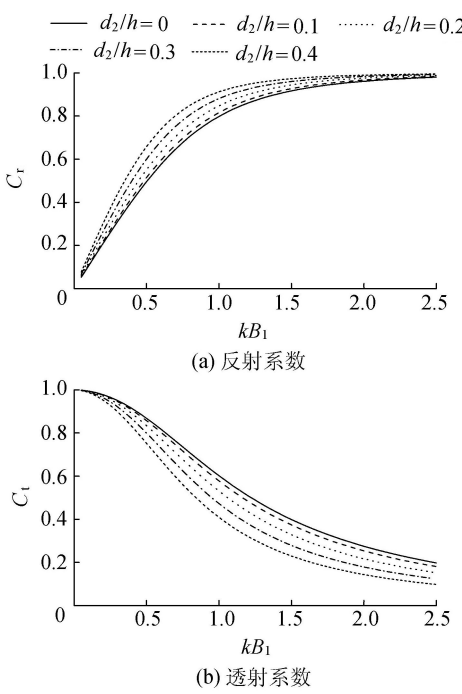


图 8 竖直板高度对出水 T 型透空式防波堤反射系数和透射系数的影响

4 结 语

本文基于线性波浪理论,通过特征函数展开法,由匹配条件确定流域内速度势表达式中的待定系数,从而对 T 型透空式防波堤的消波性能进行理论分析。计算所得反射系数和透射系数的结果与现有相关的理论解进行了对比,吻合情况良好。通过理论计算得到了反射系数和透射系数随波数的变化关系,并探讨了相对淹没深度、相对竖直板高度和相对吃水深度等因素对 T 型透空式防波堤消波性能的影响。研究表明,对于淹没 T 型透空式防波堤,淹没深度对 T 型透空式防波堤的消波性能影响显著,而竖直板高度对提高淹没 T 型透空式防波堤的消波性能没有改善。对于出水 T 型透空式防波堤,增大水平板的吃水深度或竖直板高度均能够提高 T 型透空式防波堤的消波性能。

参考文献:

[1] URSELL F. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water [J]. Proc of the Cambridge Philosophical Society, 1947, 43 (3) : 374-382.

[2] NEELAMANI S, RAJENDRAN R. Wave interaction with T-type breakwaters [J]. Ocean Engineering, 2002, 29 (2) : 151-175.

[3] NEELAMANI S, RAJENDRAN R. Wave interaction with ' $\perp$ '-type breakwaters [J]. Ocean Engineering, 2002, 29 (5) : 561-589.

[4] 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.

[5] 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.

[6] MEI C C, BLACK J L. Scattering of surface waves by rectangular obstacles in waves of finite depth [J]. Journal of Fluid Mech, 1969, 38 (3) : 499-511.

[7] 王国玉, 刘丹, 任冰, 等. 多层水平板衰减波浪的影响因素分析 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (1) : 33-36. (WANG Guoyu, LIU Dan, REN Bing, et al. Influencing factors of dissipating waves by multiple horizontal plates [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (1) : 33-36. (in Chinese))

[8] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002.

[9] NEWMAN J N. Propagation of water waves past two-dimensional obstacle [J]. Journal of Fluid Mech, 1965, 23: 23-29.

[10] YU X P, CHWANG A T. Water waves above submerged porous plate [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120 (6) : 1270-1282.

[11] 余锡平. 近岸水波的解析理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[12] ZHENG Y H, LIU P H, SHEN Y M. On the radiation and diffraction of linear water waves by an infinitely long rectangular structure submerged in oblique seas [J]. Ocean Engineering, 2000, 34 (3/4) : 436-450.

[13] LIU Y, LI Y C, TENG B. Wave motion over two submerged layers of horizontal thick plates [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, 21 (4) : 453-462.

(收稿日期: 2013 - 04 - 07 编辑: 熊水斌)

