



新型桩基透空式防波堤透射系数 分部计算与数值分析^{*}

吴丹¹, 潘新颖^{1,2}, 王振鲁^{1,2}, 费华平¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对新型桩基透空式防波堤提出一种防波堤波浪透射系数的分部解析计算方法, 对波浪透射系数进行分部表示, 包括挡浪墙和开孔板、水平平台、桩基 3 部分, 将其透射系数相乘作为整体结构的透射系数。同时, 利用 FLOW-3D 软件进行数值模拟, 与分部解析计算结果进行比较, 两者具有较好的一致性。此外, 利用所提出的计算方法拓展研究了单层板开孔率、水平平台长度 2 种结构参数对防波堤透射系数的影响, 结果表明, 该防波堤结构随着水平平台的加长, 其波浪透射系数明显减小; 当单层板的开孔率 ε 大于 20% 时, 其对波浪透射系数的影响不再明显。

关键词: 透空式防波堤; 透射系数; 分部计算方法; FLOW-3D

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0023-07

Sectional calculation and numerical analysis on transmission coefficient of a new type pile-supported permeable breakwater

WU Dan¹, PAN Xinying^{1,2}, WANG Zhenlu^{1,2}, FEI Huaping¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China)

Abstract: In this study, the transmission coefficient of a new type of pile-supported permeable breakwater is analyzed by a sectional method. The transmission coefficient of the whole breakwater can be expressed by multiplying the calculation results of the following three parts, including the upper retaining wall and the porous plates, the horizontal platform, and the piles. At the same time, this study establishes the wave numerical flume using the FLOW-3D software. The analytical results are compared with the numerical results, which have good agreement. In addition, this paper also carries out the expand analysis of the influence of the porosity and the length of the horizontal platform on the transmission coefficient by using the proposed calculation method. The results show that the transmission coefficient is apparently influenced by the increasing length of the horizontal platform, and the effect of porosity ε changes not obviously when $\varepsilon > 20\%$.

Keywords: permeable breakwater; transmission coefficients; sectional method; FLOW-3D

防波堤作为一种重要的港口水工建筑物, 主要被用来削弱外海波浪, 为掩护区域内提供稳定的水动力条件。随着海洋工程不断向深水方向发展, 海洋环境变得更加复杂, 传统重力式防波堤的尺寸、用料会随着水深增加而增大, 造成施工

困难, 同时限制掩护区域内水体交换。深水波浪在传播的过程中, 大部分能量集中在上层水体, 桩基透空式防波堤上部挡浪结构的主要作用是削弱波浪的传递; 同时下部结构透水, 可以保证水域内水体交换; 而且结构简单, 用料少。开孔式

收稿日期: 2023-02-19

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2601100)

作者简介: 吴丹 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型桩基透空式防波堤水动力分析。

结构可以造成波浪破碎，增加波浪能量耗散从而提高消波性能，但波浪和透空式结构之间的作用机理比较复杂，在指导工程应用中存在困难，学者们利用经验公式^[1]、理论分析^[2]、物理模型试验^[3-4]、数值模拟^[5-7]等方法来研究透空式防波堤结构。

本文对新型桩基透空式防波堤(图1)的波浪透射系数提出了一种分部计算方法，同时利用FLOW-3D软件验证计算方法的正确性，并拓展研究单层板开孔率、水平平台长度2种结构参数对防波堤透射系数的影响，旨在为该防波堤结构的设计应用提供参考。

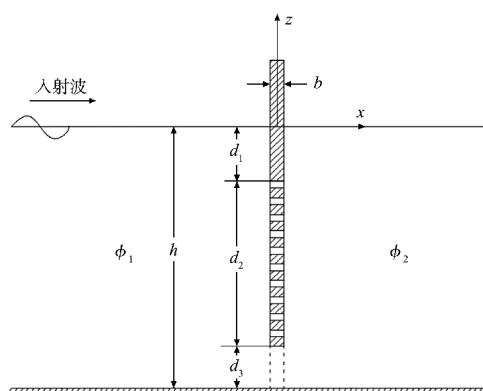


图1 新型桩基透空式防波堤模型

1 波浪透射系数分部计算

1.1 挡浪墙和开孔板部分透射系数计算

考虑到整体透射系数计算方法的经验性，将挡浪墙和开孔板部分简化成竖直开孔板理论模型，见图2。均匀水深 h 中，波幅为 A 、频率为 ω 、波长为 L 的线性波浪向岸行进时，经过挡浪墙和开孔板组合结构，该结构将流域划分为2个区域。



注： d_1 为水下结构的非透水部分长度， d_2 为开孔部分长度， d_3 为开孔板与水底距离， ε 为开孔率。

图2 挡浪墙和开孔板部分理论模型

为简化计算，假设波浪为规则波，波浪势函数可表示为：

$$\phi_p(x, z, t) = \operatorname{Re} \left[-\frac{igH_i}{2\omega \cosh(kh)} \phi_p(x, z) e^{-i\omega t} \right] \quad (p=1, 2) \quad (1)$$

各流域内速度势满足拉普拉斯方程，并满足以下边界条件：

1) 自由表面边界条件，在 $z=0$ 处：

$$\frac{\partial \phi_p}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_p = 0 \quad (2)$$

2) 底部边界条件，在 $z=-h$ 处：

$$\frac{\partial \phi_p}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

3) 散射波向外传播的远场条件，在 $x=0$ 处，开孔板前后势函数速度势、速度连续条件：

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \phi_p}{\partial x} - ik\phi_p \right) = 0 \quad (4)$$

4) 不透空处($-d_1 < z < 0$)：

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

5) 开孔处($-d_1 - d_2 < z < -d_1$)：

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = -iG'(\phi_2 - \phi_1) \quad (6)$$

6) 完全透空处($-h < z < -d_1 - d_2$)：

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \end{cases} \quad (7)$$

式中： Re 表示取实部； g 为重力加速度； i 为虚数单位； H_i 为波高； k 为波数；比例系数 $G' = G/b$ ，渗透率系数 $G = \varepsilon/(f-is)$ ； f 为摩擦系数，取常数 6； $s = 1 + C_m [(1-\varepsilon)/\varepsilon]$ ， C_m 为附加质量系数，本文中取 0^[8]。

通过特征函数展开法，求解以上势函数问题，可以得到挡板前后势函数：

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_1 - \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \mu_n (z + h) e^{\mu_n x} \\ \phi_2 = \phi_1 + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \mu_n (z + h) e^{-\mu_n x} \end{cases} \quad (8)$$

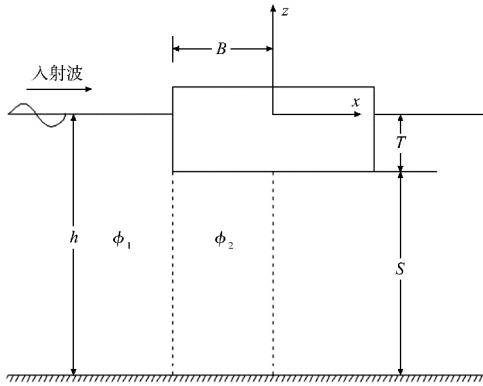
式中： ϕ_1 为入射波势函数， A_n 为待定系数， μ_n 为

色散方程的实数解。对 A_n 进行求解, 可得该部分透射系数 K_{t1} ^[9]:

$$K_{t1} = |1 + A_0| \quad (9)$$

1.2 水平平台部分透射系数计算

由于前方竖直挡浪墙的存在, 水平平台上部不会发生越浪, 故可将该部分简化为出水方箱模型, 模型所处的水动力条件与 1.1 相同, 流域划分见图 3。



注: T 为方箱水下部分长度, B 为宽度的一半, S 为方箱底部到水底的距离。

图 3 水平平台部分理论模型

为简化计算, 将速度势分解为对称势 $\phi^S(x, z)$ 和反对称势 $\phi^A(x, z)$ 两部分^[10]。

$$\phi(x, z) = [\phi^S(x, z) + \phi^A(x, z)]/2 \quad (10)$$

式中: $\phi^S(-x, z) = \phi^S(x, z)$, $\phi^A(-x, z) = -\phi^A(x, z)$, 只需在左半个区域内求解该问题。分解后的速度势满足以下边界条件:

1) 自由表面的边界条件、水底非透水边界条件, 散射波向外传播的远场条件同 1.1;

2) 方箱底部的非透水边界条件:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z = -T, -B \leq x \leq 0) \quad (11)$$

3) 对称势函数 ϕ^S 和反对称势函数 ϕ^A 在 $x=0$ 处分别满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi^S(0, z)}{\partial x} = 0 \\ \phi^A(0, z) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

对于对称问题, 速度势求解如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_1^S(x, z) = -\frac{igA}{\omega} \left[\left(e^{ik_0(x+B)} + A_0^S e^{-ik_0(x+B)} \right) \right. \\ \left. Z_0(k_0 z) + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^S e^{k_m(x+B)} Z_m(k_m z) \right] \\ \phi_2^S(x, z) = -\frac{igA}{\omega} \left[B_0^S Y_0(\lambda_0 z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n^S \frac{\cosh \lambda_n x}{\cosh \lambda_n B} Y_n(\lambda_n z) \right] \end{array} \right. \quad (13)$$

式中: A_m^S 、 B_n^S ($m, n = 0, 1, 2, \dots$) 为待定的系数, $Z_m(k_m z)$ 、 $Y_n(\lambda_n z)$ 表示垂向的特征函数:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_0(kz) = \frac{\cosh [k_0(z+h)]}{\cosh (k_0 h)} \\ Z_m(k_m z) = \frac{\cosh [km(z+h)]}{\cosh (k_m h)} \quad (m=1, 2, 3, \dots) \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_0(\lambda_0 z) = \frac{\sqrt{2}}{2} \\ Y_n(\lambda_n z) = \cos [\lambda_n(z+h)] \quad (n=1, 2, 3, \dots) \end{array} \right. \quad (15)$$

式中: 特征值 k_0 、 k_m 为色散方程的正实根; 特征值 λ_n 满足:

$$\lambda_n = n\pi/S \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (16)$$

将速度势的表达式 (13) 代入速度势和速度的连续条件, 利用特征函数展开法得到待定系数的解。对于反对称问题, 未知系数 A_m^A 、 B_n^A 的求解方法与对称势函数的解相同。该部分的波浪透射系数 K_{t2} 可以通过下式得到:

$$K_{t2} = (A_0^S - A_0^A)/2 \quad (17)$$

1.3 桩基部分透射系数计算

桩基部分波浪透射系数的计算采用 Hartmann^[11]提出的桩基式防波堤透射系数 K_{t3} 计算的经验公式:

$$K_{t3} = \sqrt{1 - (1 - \eta)^2} \quad (18)$$

式中: 桩基的相对间距 $\eta = b/(b+D)$, D 为桩基宽度, b 为桩基间距。

1.4 整体结构透射系数计算

综上, 当静水位位于开孔板上边缘和水平平台上边缘之间时, 本文在前人防波堤理论研究的基础上, 采取将前者的透射波浪作为后者的入射波浪的经验算法, 将上述 3 部分的计算结果相乘作为新型桩基透空式防波堤整体的波浪透射系数 $K_{t\text{总}}$:

$$K_{t\text{总}} = K_{t1} K_{t2} K_{t3}^{n_3} \quad (19)$$

式中: n_3 为桩基部分透射系数的幂次, 由于研究对象存在多排连续桩基, 考虑取该部分透射系数

的 2 或 3 次方表征桩基部分的消波效果。

2 数值模型建立

2.1 数值水槽总体布置

参照物理模型试验中水槽尺寸, 建立了长 50 m、宽 0.3 m、高 1.2 m 的数值水槽, 采用推板造波, 在数值水槽末端设置长 8 m 的消波段, 以减小波浪的反射。防波堤模型放置在距离推板 29.5 m 处, 数值水槽整体布置见图 4。

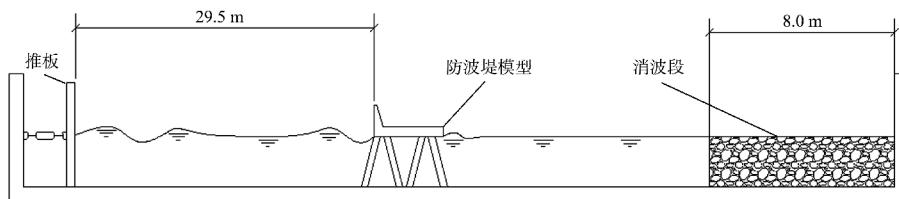


图 4 数值水槽总体布置

2.2 数值模型网格划分

应用矩形网格, 遵从 FLOW-3D 网格设置准则进行数值模型网格划分。为保证计算精度, 在开孔板处以及沿水深方向的波高范围内进行网格加密, 以保证有足够的网格数量, 网格总数约为 155 万。

2.3 边界条件和初始条件的确定

在水槽宽度方向, 设置两侧为 W 边界; 在水槽长度方向, 设置造波端为 W 边界, 消波端为 O 边界; 在水槽高度方向, 设置水槽底部为 W 边界, 设置顶部为 S 边界。数值模拟开始前, 设置 0.95 m 深静水面, 水深方向静水压强为流体初始压强。

2.4 防波堤模型的设置

本文提出的分部计算方法是从 x 和 z 的二维空间上进行分析, 则在 y 方向上的防波堤长度只需取 1 个完整的防波堤单元, 即防波堤宽度取 0.3 m。此外, 防波堤模型长 1.1 m、高 1.5 m; 四排斜方桩直径 0.1 m、倾斜 15°; 开孔板长 0.72 m、宽 0.3 m。

3 数值模拟及分析

3.1 数值水槽造波验证

选取水深 0.95 m、波高 0.1 m、波周期为 1.5 s

和 2.0 s 的 2 组空水槽工况, 提取防波堤处的自由水面变化。2 组工况下数值水槽与物理模型试验水槽的波面对比见图 5。可以看出, 2 组工况的数值模拟和物理模型试验的波面差距较小, 满足目标波高要求。因此可以证明, 数值水槽能够准确、稳定地在防波堤模型位置处达到目标波高。

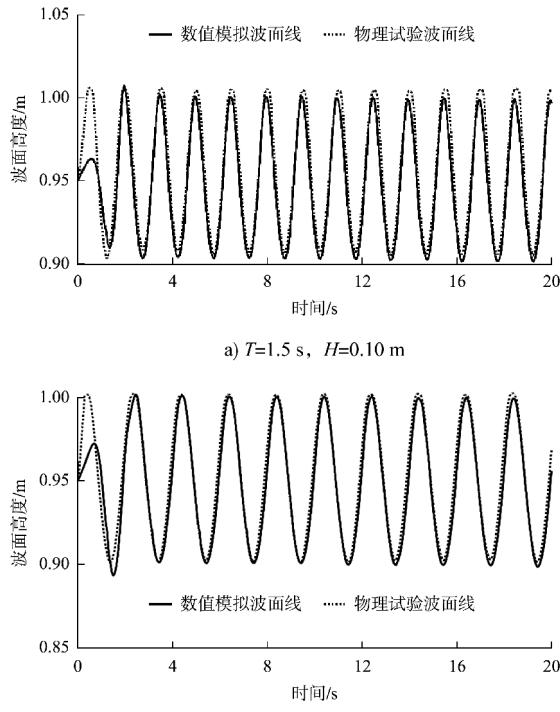


图 5 数值水槽造波验证

3.2 数值模型消波验证

将防波堤模型放入数值水槽并造波, 将数值模拟与物理模型试验的波面过程线以及波浪透射系数结果进行对比。选取水深 0.95 m、布置单层 10%开孔率的开孔板、波浪周期 1.5 s、波高 0.1 m 的工况进行验证, 见图 6。可以看出, 数值模拟的透射波浪与物理模型试验结果相比稍有偏差, 主要表现在物理模型试验中波面线波峰稍缓而波谷稍陡, 但两者波高差距较小, 在允许误差范围内, 可认为验证通过。同时得到数值模拟与物理模型试验的波浪透射系数分别为 0.22 和 0.23, 误差为 4.3%, 可以认为数值模拟效果较好。

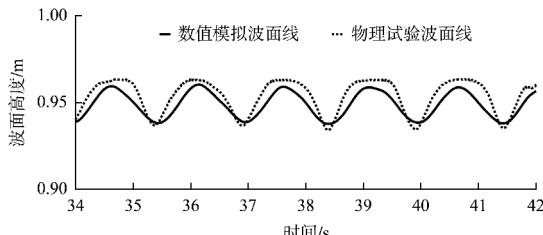


图 6 消波波面线验证

3.3 数值工况设定

1) 通过前人的研究, 发现水平平台长度的改变对防波堤的波浪透射系数有较大的影响。因此在数值模拟中对该因素进行研究, 共对比分析 1.2、1.4 m 两种水平平台长度; 2) 通过物理模型试验结果分析, 发现开孔板的开孔率对新型桩基透空式防波堤的消波性能有较大的影响, 因此在数值模拟中增加了对 15%、25% 两种开孔率的研究; 3) 针对所提出的分部计算方法的应用范围, 在水平平台的上边缘和下边缘范围内选取 0.9 m 水深进行研究, 进一步验证分部计算方法的正确性。防波堤与水深位置关系见图 7, 研究工况设置见表 1。

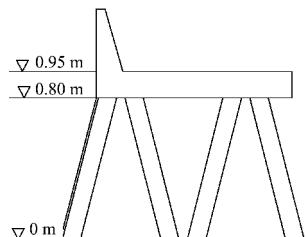


图 7 防波堤与水深位置关系

表 1 研究工况设置

工况分组	开孔率/%	水深/m	水平平台长度/m	波高/m	周期/s
G ₁	10	0.90	1.1		
G ₂	15				1.1
G ₃	25				
G ₄	10	0.95		0.1	1.00、1.25、1.50、1.75
G ₅	20				
G ₆	10				
G ₇	20				1.4

4 计算结果分析

4.1 数值模拟和分部计算结果对比

试验共进行了 28 组数值模拟, 以验证所提出的分部解析计算方法。波浪透射系数的数值模拟和分部计算结果对比如图 8 所示, 回归系数为 0.985, 表明两者具有合理的一致性。对 G₁ ~ G₇ 工况进行分析, 结果表明, 随着 L/h 的增加, 7 组工况波浪透射系数均增加, 因为当波浪周期较小时, 波浪的动能主要集中在静水面, 防波堤不透空的部分 (0.80 ~ 0.95 m) 阻挡了大部分波浪传播能量, 故波浪透射系数较小; 随着波浪周期的增大, 波浪能量向水深方向拓展, 同时开孔板的存在允许波浪能量的传播, 故波浪透射系数增大。

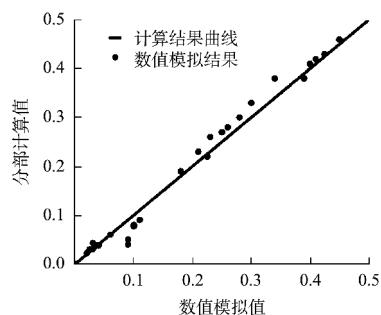
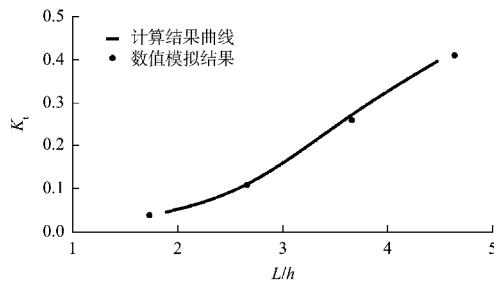


图 8 K_t 数值模拟结果与计算结果对比

4.1 水深影响分析

针对分部计算方法的适用范围, 选取 0.90 m 水深以确保验证的全面性, 防波堤透射系数的数值模拟和分部计算结果对比见图 9。可以看出, 两者之间差距较小, 进一步验证了分部计算方法的正确性。

图 9 工况 G₁ 数值模拟与计算结果对比

4.2 水平台长度影响分析

当改变水平平台长度时, 防波堤透射系数的数值模拟和分部计算结果对比见图 10。同时利用分部计算方法拓展了水平平台长度的研究范围, 研究当水深为 0.95 m、单层 10% 挡浪板时, 不同水平平台长度下防波堤的消波特点, 见图 11。从图中可以看出, 透射系数随着 B/L 的增加而减小, 短周期时不同水平平台的防波堤波浪透射系数差距并不大, 随着波浪周期的增大, 水平台长度的影响也增大, 透射系数明显减小。

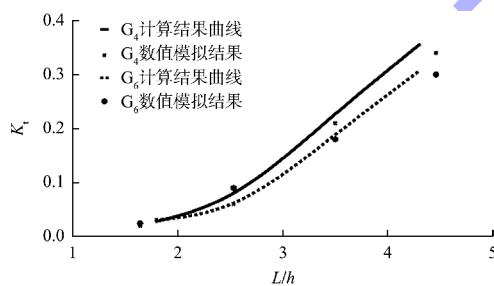
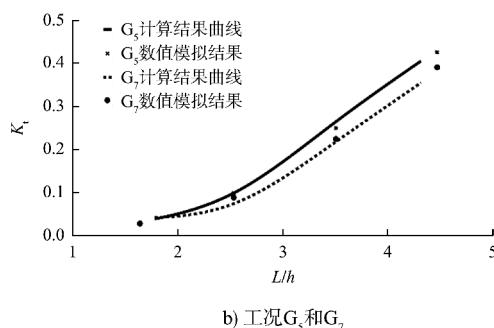
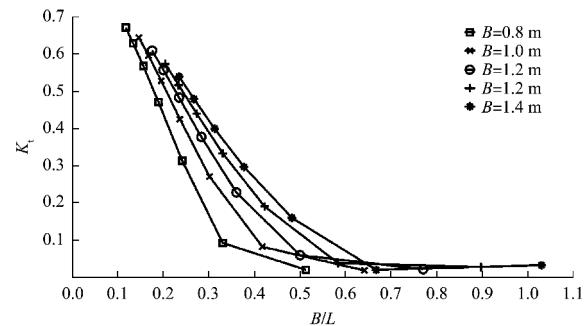
a) 工况 G₄ 和 G₆图 10 工况 G₄~G₇ 数值模拟与计算结果对比

图 11 水平台长度对透射系数的影响

4.3 开孔板开孔率影响分析

当改变开孔板开孔率时, 防波堤透射系数的数值模拟结果和分部计算结果的对比见图 12。同时利用分部计算方法拓展了开孔板开孔率的研究范围, 当水深为 0.95 m、结构开孔板距水底 0.1 m 时, 研究不同单层开孔板开孔率条件下防波堤的消波特点, 见图 13。从图中可以看出, 透射系数随着开孔率的增加而增加, 当 $\varepsilon > 20\%$ 时, 开孔率对透射系数的影响逐渐减小。

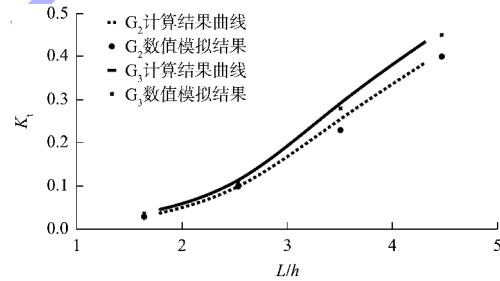
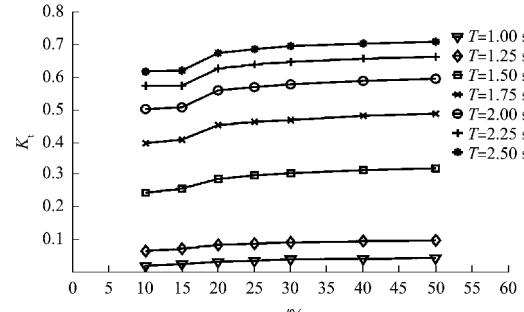
图 12 工况 G₂ 和 G₃ 数值模拟与计算结果对比

图 13 开孔率对透射系数的影响

5 结语

1) 本文提出了新型桩基透空式防波堤透射系数的分部计算方法, 利用将前者的透射波高作为后者入射波高的经验算法, 将各部分透射系数相乘作为整体结构的透射系数。

2) 通过数值模拟软件 FLOW-3D 对所提出的分部计算方法进行验证。结果表明, 分部计算结果和数值模拟结果之间有合理的一致性($R^2=0.958$), 计算方法合理有效。

3) 通过分部计算方法对防波堤的水平平台长度、开孔板开孔率进行分析得出: 当水动力条件以及其他结构参数相同时, 该防波堤布置单层开孔板开孔率越大, 防波堤的波浪透射系数越大, 但随着开孔率的增大, 其影响变小, 当开孔率大于20%, 其透射系数变化小于7%; 该新型桩基透空式防波堤的水平平台长度对于结构的消波性能影响显著, 较长的水平平台有助于减小透射系数。

参考文献:

- [1] ZHANG S X, LI X. Design formulas of transmission coefficients for permeable breakwaters [J]. Water science and engineering, 2014, 7(4): 457-467.
- [2] HAN M M, WANG C M. Potential flow theory-based analytical and numerical modelling of porous and perforated breakwaters: A review [J]. Ocean engineering,
- [3] HEE M T, VENGATESAN V. Performance evaluation of a semicircular breakwater with truncated wave screens [J]. Ocean engineering, 2013, 70: 160-176.
- [4] THANH N V, DAT D M. Experiment study on the performance of a submerged modified pile supported inclined breakwater [C]//International Conference on Asian and Pacific Coasts, Singapore: Springer, 2020: 1007-1011.
- [5] 相昌盛. 三维数值波浪水槽的构建及其应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [6] 张婷, 张庆河, 黄锦林. 波浪与透空式水平板相互作用数值模拟研究[J]. 广东水利水电, 2013(1): 19-24, 36.
- [7] 陈兰坤, 潘新颖. 基于 FLOW-3D 的新型桩基透空堤消浪性能研究[J]. 水运工程, 2022(1): 59-65.
- [8] ISAACSON M, PREMASIRI S, YANG G. Wave interactions with vertical slotted barrier [J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 1998, 124(3): 118-126.
- [9] RAGEH O S, KORAIM A S. Hydraulic performance of vertical walls with horizontal slots used as breakwater [J]. Coastal engineering, 2010, 57(8): 745-756.
- [10] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 3 版. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [11] HARTMANN H. Das stabgitter in instationärer stromungsbewegung [M]. Berlin: Technische Universitaet Berlin, 1968.

(本文编辑 王传瑜)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部