

# 涵洞式直立堤的消波性能研究

吕超凡, 刘冲, 赵西增\*

(浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021; Email:xizengzhao@zju.edu.cn)

**摘要:** 涵洞式直立堤能够加强港域与外海之间的水体交换, 近年来在逐渐出现在工程应用中, 本文结合舟山大衢渔港工程, 开展涵洞式直立堤消波特性的理论研究。应用对称法结合特征函数展开, 使用匹配条件确定速度势的待定系数, 计算得涵洞式直立堤的透射、反射系数。进一步研究发现涵洞式直立堤的透射系数随涵洞相对长度 ( $B/h$ ) 的增加而减小、随着涵洞相对深度 ( $d_s/h$ ) 的增加而减弱以及随着涵洞相对高度 ( $S/h$ ) 的增大而增大, 研究结果对涵洞式直立堤的优化布置有较高的参考意义。

**关键词:** 涵洞式直立堤; 波浪衰减; 波浪透射

## 1 引言

重力式防波堤在阻挡波浪入射的同时也将港域和外海水体隔开, 阻止两个水体的自然循环和交换<sup>[1]</sup>。舟山市衢山岛的大衢渔港便是由于上述原因, 港域内泥沙大量淤积, 每年花费大量的人力物力进行清淤, 尽管如此, 效果仍不理想, 对此, 相关规划把该防波堤改造为涵洞式防波堤, 进而解决上述问题。涵洞式防波堤就是在重力堤的基础上, 在水下一定深度开挖涵洞, 由于波浪能量集中在水下三倍波高附近<sup>[2]</sup>, 故其上部结构能够反射或衰减波浪, 下部由于涵洞存在, 允许水体通过, 这样既可掩护港域, 又可使得港域内具有良好的水质条件, 与其他的水体交换方式相比该结构具有结构强度高、经济、易施工等优点<sup>[3]</sup>。

涵洞式防波堤的研究近年来逐渐增多, Fountoulis 等<sup>[4]</sup>使用 MIKE 开展了防波堤开口位置的空间布置对港域流场影响的研究; Tsoukala 等<sup>[1]</sup>首次在港池中开展了涵洞式斜坡堤与波浪作用的物理模型试验, 分析了涵洞的长度、宽度、淹没深度以及入射波高对波浪透射的影响并得到透射系数经验公式; 黄慧等<sup>[5]</sup>研究了涵洞式直立堤透浪特性并给出了经验公式计算透射系数; Bujak 和 Carević 的团队<sup>[6]</sup>针对工程实例, 结合数学以及物理模型实验, 分析了涵洞的大小、位置、水位等因素对透反射的影响。

目前对涵洞式防波堤研究集中在物理模型试验以及数值模拟两方面, 并没有相关理论

基金项目: 国家自然科学基金(51679212); 浙江省杰出青年基金项目(LR16E090002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018QNA4041)

推导分析衰减波浪的影响因素，但是针对波浪与结构物相互作用的理论求解问题，已有大量的研究成果<sup>[7-10]</sup>。本文基于线性波浪理论，应用对称法<sup>0</sup>，结合特征函数展开，根据相应匹配条件确定速度势展开式中的待定系数从而得到涵洞式防波堤对波浪作用的理论解，并进一步分析其不同结构形式对波浪透射的衰减效果。

## 2 控制方程和边界条件

考虑如图 1 所示的入射波高为  $H_i=2A$  的波浪与涵洞式直立堤作用问题，涵洞式直立堤位于均匀水深  $h$  中，其上部结构入水深度为  $d_1$ ，涵洞轴线距水面深度为  $d_5$ ，涵洞高度为  $S$ ，底部结构上表面距离水面为  $d_2$ ，堤宽度为  $2B$ 。波浪与涵洞式直立堤作用后会形成波高为  $H_r$  的反射波浪以及波高为  $H_t$  的透射波浪。

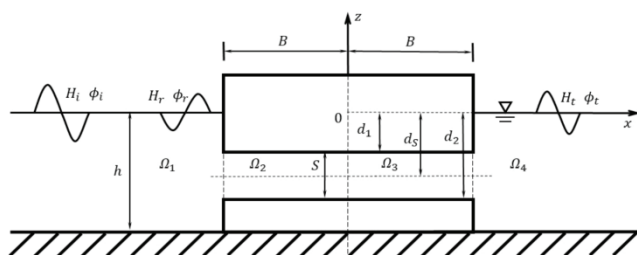


图 1 波浪对透空式直立堤作用示意图

在上述结构下，把整个求解区域分为四个部分： $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 、 $\Omega_3$ 、 $\Omega_4$ ，基于线性波浪理论水体在整个控制域内应满足连续性条件(1)，防波堤外部区域  $\Omega_1$  以及  $\Omega_4$  应满足条件 (2-5)，其中 (2)为自由表面边界条件，(3)为水底边界条件，(4)为物面边界条件，(5)为辐射边界条件，防波堤内部区域  $\Omega_2$  以及  $\Omega_3$  除连续性条件 (1)外还应满足物面边界条件 (6)。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \phi \quad z = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = -h \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad |x| = B, -d_1 \leq z \leq 0 \text{ 或 } -h \leq z \leq -d_2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_r}{\partial x} = -ik\phi_r \quad x \rightarrow -\infty, \quad \frac{\partial \phi_t}{\partial x} = ik\phi_t \quad x \rightarrow +\infty \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = -d_1, |x| \leq B, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = -d_2, |x| \leq B \quad (6)$$

式中:  $g$  为重力加速度,  $\sigma$  为圆频率,  $k$  为入射波波数,  $\phi_r$  表示  $\Omega_1$  区域的反射速度势,  $\phi_t$  表示  $\Omega_4$  区域的透射速度势,  $i$  为虚数单位。

根据上述控制方程采用对称法求解, 在  $|x|=B$  的边界处应用速度与速度势的匹配条件, 建立四组线性方程组即可求出待定系数, 进而计算得到相应的透射、反射系数。

### 3 求解过程

对称法是把速度势分解为对称速度势以及反对称速度势, 将对称速度势与反对称速度势叠加之后, 能够将防波堤右侧的入射速度势抵消掉, 从而简化求解。由前文所述的边界条件可得在  $\Omega_1$  区域内的对称速度势  $\phi_1^s$  以及反对称速度势  $\phi_1^a$  展开式写为式 (7) 和式 (8):

$$\phi_1^s = -\frac{igA}{\sigma} \left[ (e^{ik_0(x+B)} + A_0^s e^{-ik_0(x+B)}) Z_0(k_0 z) + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^s e^{k_m(x+B)} Z_m(k_m z) \right] \quad (7)$$

$$\phi_1^a = -\frac{igA}{\sigma} \left[ (e^{ik_0(x+B)} + A_0^a e^{-ik_0(x+B)}) Z_0(k_0 z) + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^a e^{k_m(x+B)} Z_m(k_m z) \right] \quad (8)$$

式中:  $A_0^s, A_m^s, A_0^a, A_m^a$  为待定系数, 圆频率  $\sigma$  满足如下等式 (9):

$$\sigma^2 = gk_0 \tanh k_0 h, \quad \sigma^2 = -gk_m \tan k_m h \quad m=1, 2, \dots, M \quad (9)$$

$k_0=k$  表示波数, 垂向特征函数  $Z_0(k_0 z)$  以及  $Z_m(k_m z)$  表示为 (10):

$$\begin{cases} Z_0(k_0 z) = \cosh k_0(z+h) / \cosh k_0 h \\ Z_m(k_m z) = \cos k_m(z+h) / \cos k_m h \quad m=1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (10)$$

同理在  $\Omega_2$  区域内的对称速度势  $\phi_2^s$  以及反对称速度势  $\phi_2^a$  展开式写为式 (11) 和式 (12):

$$\phi_2^s = -\frac{igA}{\sigma} \left[ B_0^s Y_0(\lambda_0 z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n^s \frac{\cosh \lambda_n x}{\cosh \lambda_n B} Y_n(\lambda_n z) \right] \quad (11)$$

$$\phi_2^a = -\frac{igA}{\sigma} \left[ B_0^a \frac{x}{B} Y_0(\lambda_0 z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n^a \frac{\sinh \lambda_n x}{\sinh \lambda_n B} Y_n(\lambda_n z) \right] \quad (12)$$

式中:  $B_0^s, B_n^s, B_0^a, B_n^a$  为待定系数, 垂向特征函数  $Y_0(\lambda_0 z)$  以及  $Y_n(\lambda_n z)$  表示为 (13):

$$Y_0(\lambda_0 z) = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad Y_n(\lambda_n z) = \cos \lambda_n(z+d_2) \quad n=1, 2, \dots, N, \quad \lambda_n = n\pi / S \quad n=0, 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

最后利用  $|x|=B$  边界处的速度与速度势的匹配条件可得 4 个线性方程组, 求解该方程组即可完成速度势的求解, 透射系数  $K_t$  和反射系数  $K_r$  定义如下且满足能量守恒式(14):

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}, K_r = \frac{H_r}{H_i}, K_t^2 + K_r^2 = 1 \quad (14)$$

#### 4 涵洞式直立堤衰减波浪因素分析

为保证计算结果的可靠, 需对结果进行收敛性验证以及与前人的研究成果进行对比。

##### 4.1 结果收敛性分析及验证

由于速度势可以展开到无穷多项, 故在求解线性方程组时有必要选取适当的截断项 ( $M$ 、 $N$ ) 在满足计算精度的同时减少计算量, 经过验证最终截断项取为  $M=N=100$ 。

当涵洞式直立堤的  $d_2=h$  时, 简化为固定方箱结构, 对此, 图 2 给出随着相对宽度 ( $B/d_1$ ) 不同, 反射系数  $K_r$  随  $kd_1$  的变化曲线, 与 Mei<sup>[9]</sup> 的结果对比, 吻合较好。

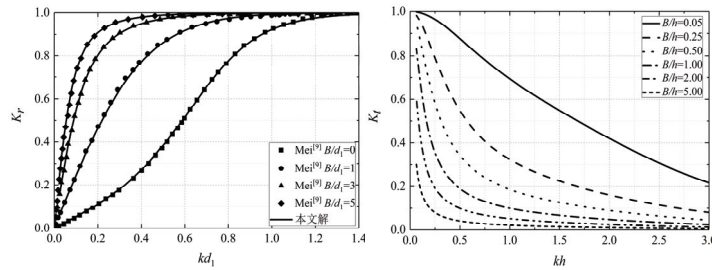


图 2 水平方箱波浪反射系数验证 图 3 涵洞相对长度对透射系数的影响

下面具体分析涵洞相对长度 ( $B/h$ )、涵洞相对深度 ( $d_s/h$ )、涵洞相对高度 ( $S/h$ ) 等因素对消浪的影响, 由于反射系数与透射系数的平方和等于 1, 故本文仅绘制波浪透射图像。

##### 4.2 涵洞相对长度对透射影响

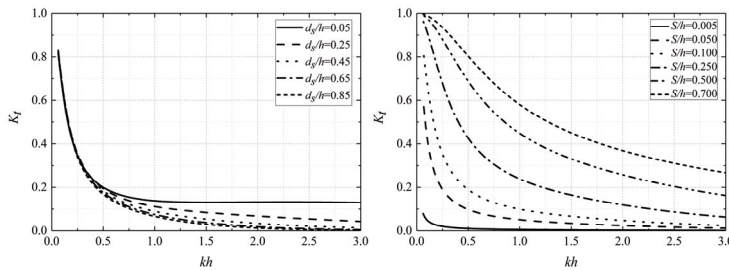


图 4 涵洞相对深度对透射系数的影响 图 5 涵洞相对大小对透射系数的影响

为分析涵洞相对长度 ( $B/h$ ) 对波浪的影响, 设定涵洞的  $S/h=0.1$ 、 $d_s/h=0.35$ 。图 3 表示在  $B/h=0.05, 0.25, 0.5, 1, 2, 5$  的条件下, 波浪透射系数 ( $K_t$ )、随相对水深 ( $kh$ ) 的变化曲线。

可看出, 当  $B/h=1$ ,  $K_t$  在  $kh>0.5$  时小于 0.2, 即周期在 13 秒以内的波浪  $K_t<0.2$ 。海洋中波浪周期主要集中在 4-11 秒。就此而言, 该条件下已可达到较好的消浪效果; 随着  $B/h$  的增大, 虽然能够在进一步减小波浪透射的同时增大满足  $K_t<0.2$  的波浪周期区间, 但实际中长波出现的频率并不高, 且增加涵洞相对长度意味着增加防波堤的宽度, 将成倍的提高工程造价, 故通过增大  $B/h$  来减小  $K_t$  是不经济的。

#### 4.3 涵洞相对深度对透射影响

为分析涵洞相对深度 ( $d_s/h$ ) 对波浪的影响, 设定涵洞的  $B/h=1, S/h=0.1$ 。图 4 是在  $d_s/h=0.05, 0.25, 0.45, 0.65, 0.85$  的条件下,  $K_t$  随  $kh$  的变化曲线。可看出, 在该条件下,  $d_s/h$  在浅水时 ( $kh$  较小) 对  $K_t$  影响不大, 深水时 ( $kh$  较大) 影响较大, 主要是由于  $kh$  较小时, 整个水体垂向能量分布比较均匀; 随  $kh$  的增大, 水体能量逐渐向水面集中, 此时随着  $d_s/h$  的增大, 能透过的波能变少, 导致  $K_t$  减小。几条曲线均表明当  $kh>0.5$  时,  $K_t<0.2$ , 且随着  $kh$  的增大,  $K_t$  越来越小; 虽然当  $kh>1.5$  时可看出  $d_s/h$  对  $K_t$  有明显的影响, 但由于其数值较小, 波浪透射几乎可以忽略, 可认为相对深度对透射影响不大。

#### 4.4 涵洞相对高度对透射影响

为分析涵洞的相对高度 ( $S/h$ ) 对波浪的影响, 设定涵洞的  $B/h=1, d_s/h=0.35$ 。图 5 是在  $S/h=0.005, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.7$  的条件下,  $K_t$  随  $kh$  的变化曲线。在上述条件下, 随着  $S/h$  的增大,  $K_t$  明显增大, 当  $S/h=0.005$  时, 基本没有波浪透射, 当  $S/h=0.1$  时, 波浪透射相较于  $S/h=0.005$  时已有明显增大, 但透射值大小仍较小 (当  $kh>0.5$  时, 波浪透射系数小于 0.2)。若  $S/h$  进一步增大, 会发现  $K_t$  显著增大, 不利于实际工程应用。故涵洞相对大小取为 0.1 是较为合理的。

## 5 结论

使用对称法分解速度势, 结合特征函数展开求解涵洞式直立堤附近的速度势, 进而得透射系数, 所得结果与理论解对比吻合良好。进一步研究表明: 涵洞式直立堤的透射系数随着涵洞相对长度 ( $B/h$ ) 的增大而减小, 涵洞相对高度 ( $S/h$ ) 的增大而增大, 而涵洞相对深度 ( $d_s/h$ ) 对其影响不大; 当涵洞相对长度大于 1 时, 透射系数随着相对长度的增加衰减不大; 涵洞相对高度小于 0.1 时, 可产生明显的消浪效果, 但进一步增加相对高度会显著增大透射系数。故在实际应用中, 为加强港域内外水体交换, 减少泥沙的淤积, 可以适当增大涵洞相对高度以及减小涵洞相对长度, 进而提高水流通过能力; 但随着涵洞相对长度的减小, 波浪透射会显著提高。本文结果表明在涵洞相对长度约为 1、涵洞相对高度约为 0.1 时, 涵洞式直立堤结构较为科学, 该结果对工程应用具有一定参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 Tsoukala V K, Moutzouris C I. Wave transmission in harbors through flushing culverts[J]. Ocean Engineering, 2009, 36(6-7):434-445.
- 2 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 3 Tsoukala V K, Katsardi V, Belibassakis K A. Wave transformation through flushing culverts operating at seawater level in coastal structures[J]. Ocean Engineering, 2014, 89: 211-229.
- 4 Fountoulis G, Memos C. Optimization of openings for water renewal in a harbor basin. Journal of Marine Environmental Engineering , 2005,7 (4):297-306
- 5 黄蕙,马舒文,王定略. 涵洞式直立堤透浪特性研究[J]. 水运工程, 2013(12):25-29.
- 6 Carevic D, Mostecak H, Bujak D, et al. Influence of Water-Level Variations on Wave Transmission through Flushing Culverts Positioned in a Breakwater Body[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2018, 144(5): 04018012.
- 7 王国玉, 刘丹, 任冰. 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.
- 8 Yu X. Diffraction of water waves by porous breakwaters[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1995, 121(6): 275-282.
- 9 Mei C C, Black J L. Scattering of surface waves by rectangular obstacles in waters of finite depth[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 38(3):499-511.

## Wave dissipation property of the culvert type vertical breakwater

LYU Chao-fan, LIU Chong, ZHAO Xi-zeng

(OceanCollege,ZhejiangUniversity,Zhoushan 316021,Zhejiang,China,Email:xizengzhao@zju.edu.cn)

**Abstract:**The culvert type vertical breakwater can enhance the exchange of water between the harbor and the sea. In recent years, it has gradually appeared in the engineering application. In this paper, with the example of DaquZhoushan fishing port engineering, the theoretical research on the wave dissipation property of the culvert type vertical breakwater was carried out. The undetermined coefficient of velocity potential was determined by the expansion of characteristic function. Further study shows that the transmission coefficient of culvert type vertical breakwater decreases with the increase of relative length ( $B/h$ ) of culverts, decreases with the increase of relative depth of culvert ( $d_s/h$ ), and increases with the increase of relative height of culvert ( $S/h$ ).The results are of great reference value to the optimal layout of culvert type vertical breakwater.

**Key words:** Culvert type vertical breakwater; Wave attenuation; Wave transmission;