

涵洞式直立堤涵管内振荡流特性研究

殷铭简, 赵西增*

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

摘要: 涵洞式防波堤可借助波浪及潮流实现港池内外水体交换, 因而近年来逐渐应用于我国港口工程建设之中。本研究基于由 OpenFOAM 二次开发的 CFD 求解器, 用流体体积法 (volume of fluid, VOF) 捕捉自由液面, 标记港池内外水体并统计涵口平均流速时程变化, 研究规则波作用于直立堤时的涵管内水流特性。结果表明, 波浪在直立堤前发生反射, 并在两个涵口处交替形成涡旋, 将涵口附近水体卷吸到涵管内并引起周期性振荡流; 随着涵洞长度缩短与深度减小, 涵口处涡旋现象加剧、水体交换范围扩大。

关键词: 涵洞式直立堤; 振荡流; 规则波; 水体交换; 数值计算

1 引言

港池水质与冲淤情况是港口工程设计的重要指标。在重力式防波堤环绕的半封闭港区内, 由于港池内外水体的自然循环受到阻碍, 常出现污染物滞留与航道淤积等问题。为加强掩蔽水域与外海之间的联系、改善港区生态环境, 可在重力式防波堤上开设涵洞, 通过波浪与水流的驱动作用促进水质更新, 即涵洞式防波堤。因其结构简单有效, 尤其适用于海床土层较浅而不宜修建桩基透空堤的海域, 故而在港口工程建设中逐渐得到应用^[1]。

已有国内外学者针对涵洞式防波堤的水动力特性与水体交换效率开展了一定研究。在大尺度 (港区整体) 层面, Loncar 等^[2]基于浅水方程, 结合实地观测数据, 模拟了港内水体更新范围, 并对涵洞水平布置进行了优化。Belibassakis^[3]基于势流理论, 模拟了波浪衍射的影响范围。而在小尺度 (涵口局部) 层面, Tsoukala^[1,4]、Carevic^[5]等试验测定了规则波作用下的斜坡堤内外波高, 并拟合了透射系数 K_t 的经验式。结果表明, 当涵洞开设于水面附近时, K_t 随着入射波周期延长、波陡增大、入射角趋于垂直、涵洞长度减小、截面变宽而增大, 同时透、反射波的谐振现象加剧。黄慧等^[6]针对水下涵洞直立堤开展了类似的水槽试验, 且得到了与水面涵洞斜坡堤^{[1][4][7]}相一致的透射系数变化趋势。Bujak^[7]试验研究了不规则波引起的涵管内部水流特性, 结果表明, 当涵洞位于水面、波浪未接触顶壁时, 涵管内流速极值较大, 且方向以流入港池为主; 而当涵洞完全浸没于水下时, 涵管内呈往

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)

复振荡流动，且涵口流速极值与净流量均极小。

总体而言，当前对涵洞透浪性的讨论已较为详尽，但在水质更新效率方面，已有的试验研究均未对港池内外水体进行区分标记、不能直观表征波浪作用下的交换范围；而大尺度数值模拟则忽略了涵洞附近的流场细节，因此无法解释波浪透射与水体交换机理。为此，本研究用 CFD 方法模拟规则波作用下的涵洞式直立堤透浪过程，标记港池内外水体，研究了不同涵洞位置及涵管长度下的涵管水流特性及水体交换范围，并结合局部流场阐释透射机理。

2 数值模型及工况设置

采用不可压缩的气-液两相流二维模型，用有限体积法离散求解 N-S 方程，并通过 VOF 方法捕捉自由液面。为避免造成额外的数值误差，引入一独立的、不参与自由液面计算的标量场 α 如式(4)，用以标记港池内水体。初始时港内水体 α 为 0、计算域其余网格 α 为 1，则港池内 α 值即为外部水体的输运量。控制方程组如下：

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u} + \bar{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (4)$$

各式中对流项均为混合格式、扩散项均为中心差分格式。对于式(3)，采用 FCT 通量修正方法提高计算精度并确保体积分数的有界性。首先进行 PISO 迭代修正求得速度及压力场，之后代入求解液相体积分数 ϕ 及标量场 α ，最后显式更新非稳态项。

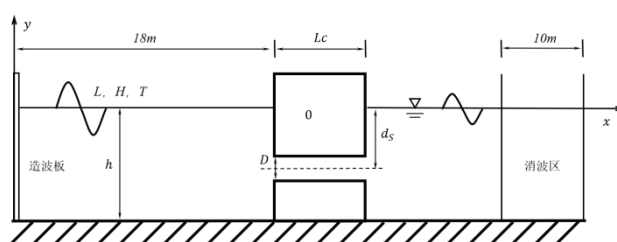


图1 数值模型示意图

以舟山市衢山岛某防波堤为原型，忽略海底地形变化，建立 1:5 缩尺数值模型如图 1 所示，共划分结构化贴体网格约 41 万个，竖向波高范围内包含约 30 个网格。静水深 $h=0.6\text{m}$ ；涵洞直径 $D=0.1\text{m}$ ； d_s 为涵洞轴线到静水面距离； L_c 为涵管长度（即直立堤宽度）。在计算域左端通过推板生成线性波，波浪参数及对应涵洞参数如表 1 所示，且不考虑越浪情况；

计算域右端起 10m 范围内为阻尼消波区。

表 1 模拟工况

序号	涵洞深度 d_s/m	涵管长度 L_c/m	波长 L/m	波周期 T/s	波高 H/m
1	0.10	0.3		2.0518	
2	0.15	0.3		2.0518	
3	0.15	0.6	4.5	2.0518	0.04
4	0.25	0.3		2.0518	
5	0.45	0.3		2.0518	

3 结果与讨论

3.1 涵管内流动机理分析

图 4 为波浪运动呈现稳定的周期性之后,几个典型相位下的水面位置及流场矢量图(以工况 2 为例)。由图 4 可见,自入射波峰到达堤前起的半个周期内(图 4a),水流持续流入港池。当入射波谷到达堤前时(图 4b),由于线性波水质点近似闭合椭圆的轨迹,在防波堤的限制及诱导作用下,涵洞口产生涡旋并引起涵管内的次生涡,使涵管内水流方向改变。随后,水流持续流出港池,直到入射波峰到达堤前、再次在涵口附近引起涡旋并使其重新流向港池内(图 4c 和图 4d)。总体而言,涵管内发生周期与入射波一致的往复振荡流动。

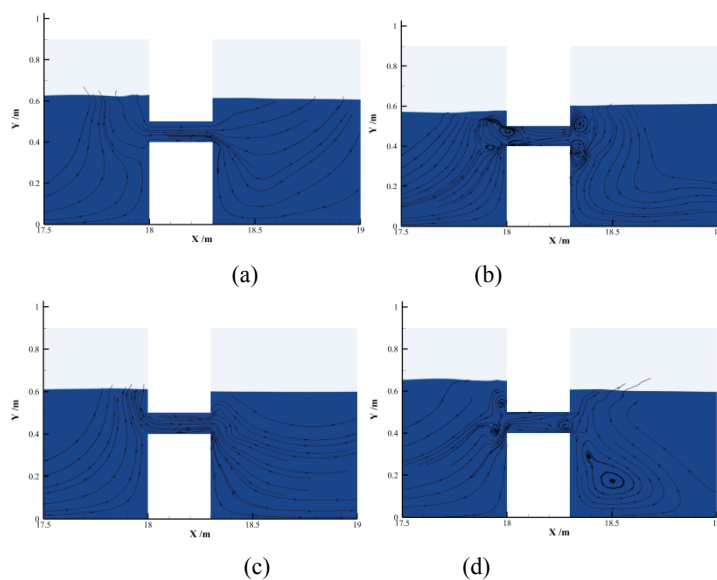
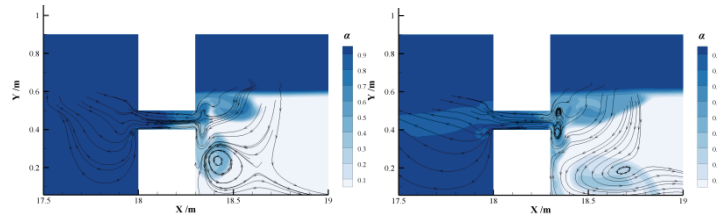


图 4 典型相位下的自由液面位置及流线图

图 5a 与图 5b 分别为入射波谷初次传播至堤前时起, 15 个周期后与 40 个周期后的新、

老水体分布情况及流线图。可见，当水流方向发生改变时，随着旋涡的发生与脱落，部分外来水体滞留在港池内，同时涵口附近原有水体被卷吸并携带到港池外部。随着波浪作用时间的累积，水体交换范围逐渐扩大。因此，虽然在单纯波浪作用下，水下涵管内振荡流动的净流量极小^[8]，但仍能达到一定程度的水体交换效果。



(a) 15 个周期后的 α 值分布

(b) 40 个周期后的 α 值分布

图 5 港池内外来水体的体积分数及流线

3.2 涵洞参数对水体交换范围的影响

图 6 为不同涵洞深度下的涵管内平均流速 ($d_s=0.10\text{m}$ 、 0.15m 、 0.25m 、 0.45m ，即工况 1、2、4、5)，图 7 为 40 个周期后的外来水体分布范围。由图可见，由于波浪能主要集中于水面 3 倍波高处，当涵洞完全浸没水下时，涵洞深度对涵管内流速极值影响不大。此外，由于涵洞至水面及水底的空间决定了涵口涡旋的形态，因此不同深度下，外来水体的分布范围存在一定差异。当涵洞位置较浅时，上方的外来水体可在惯性作用下，扩散到较远的距离（类似于周期性入射的射流），而下方的水体更新则主要通过涡脱落实现。当涵洞位置较深时，外来水体的分布趋势与之相反。

图 8 为不同涵管长度下的涵管内平均流速 ($L_c=0.3\text{m}$ 、 0.6m ，即工况 2、3)，图 9 为 40 个周期后的水体分布范围。由图可见，当涵管长度增大时，管内流速极值减小、外来水体的分布范围也随之减小。这是由于在较长的涵管内，流动方向改变的过程中，次生涡引起的能量耗散更严重，使振荡水流受到削弱。

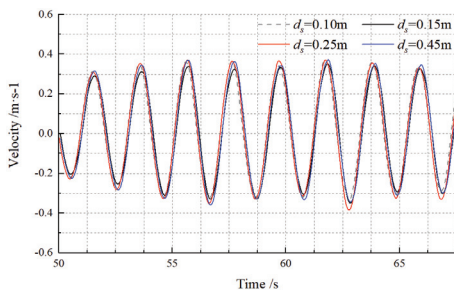


图 6 涵洞深度对涵管内水流的影响

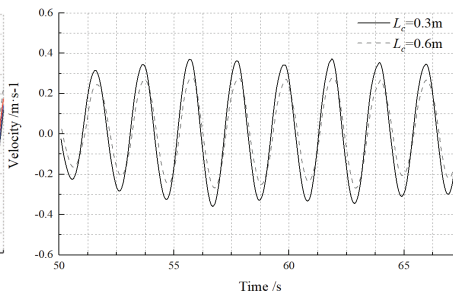
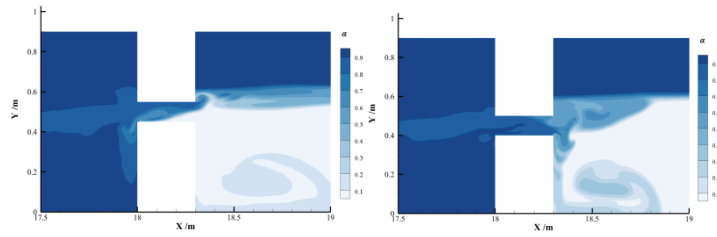
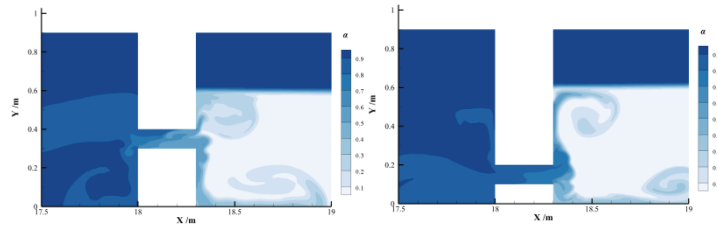


图 8 涵管长度对涵管内水流的影响

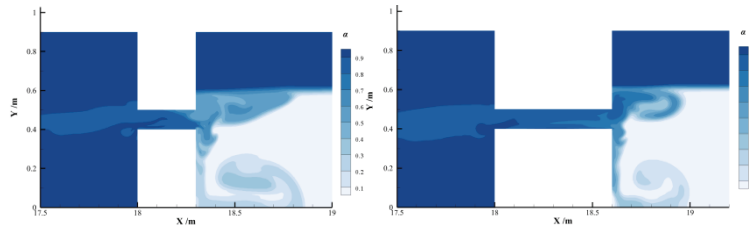


(a) $d_s=0.10\text{m}$ 时 40 个周期后的 α 值分布 (b) $d_s=0.15\text{m}$ 时 40 个周期后的 α 值分布



(c) $d_s=0.25\text{m}$ 时 40 个周期后的 α 值分布 (d) $d_s=0.45\text{m}$ 时 40 个周期后的 α 值分布

图 7 涵洞深度对水体交换效果的影响



(a) $L_c=0.3\text{m}$ 时 40 个周期后的 α 值分布

(b) $L_c=0.6\text{m}$ 时 40 个周期后的 α 值分布

图 9 涵管长度对水体交换效果的影响

4 结论

用基于 OpenFOAM 二次开发的 CFD 求解器建立涵洞式直立堤数值模型，模拟了规则波作用下的涵管内水流振荡过程及港池内外水体交换情况。结果表明，当入射波峰或波谷到达堤前时，涵口发生涡旋并引起涵管内的次生涡，使涵管内的水流方向改变。此时在涡旋的卷吸作用下，港内原有水体被携带到港外，而外来水体则在涡脱落时滞留在港内，且随波浪作用时间延长，外来水体分布范围不断累积扩大，从而达到一定的水体交换效果。对于水下涵洞，当其淹没深度减小、涵管长度缩短时，水体交换范围扩大。

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 Lončar, Goran , et al. Contribution of Wind and Waves in Exchange of Seawater through Flushing Culverts in Marinas[J]. Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku, 2018.
- 3 Belibassakis K A , Tsoukala V K , Katsardi V . Three-dimensional wave diffraction in the vicinity of openings in coastal structures[J]. Applied Ocean Research, 2014, 45:40-54.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Bujak D, Carević D, Mostečak H. Velocities inside flushing culverts induced by waves[C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering. Thomas Telford Ltd, 2017, 170(3+ 4): 112-121.

Study on the characteristics of oscillating flow in the culvert pipe on a vertical breakwater

YIN Ming-jian, ZHAO Xi-zeng

(Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China, Email: xizengzhao@zju.edu.cn)

Abstract : Culverts on breakwaters promote water exchange in harbor basins under the actions of waves and flows, which has been gradually put into engineering applications in China. Based on a CFD solver developed from OpenFOAM using volume of fluid (VOF) method, studies are conducted on characteristics of flows in a vertical breakwater with culverts induced by regular waves. Internal and external water are marked respectively, and history of mean flow rate is measured. It's shown that, waves reflect in front of the vertical breakwater and generate vortexes over the portals of the culvert, entraining water parcels and inducing oscillatory flow inside the culvert pipe. As the length and depth of the culvert decreases, the vortexes near the portals get intensified, and the range of exchanged water extends.

Key words : Vertical breakwater with culverts; Oscillating flow; Regular wave; Water exchange; Numerical simulation.