



河口船闸集咸坑深度对防咸效果的影响

叶海鹏, 胡江, 许媛媛, 许克勤, 李瑶, 廖江花
(重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 为了分析河口船闸集咸坑不同深度下的盐水运动特性, 基于CFD软件的组分输运模型和LES湍流模型建立集咸坑防咸三维数值模型, 运用有限体积法进行离散; 基于集咸坑防咸水槽试验结果, 验证了盐水运动形态、盐水运动速度及垂向盐度分布, 并构建河口船闸不同深度集咸坑的三维数值模型。结果表明, 集咸坑的防咸效果与深度有关, 集咸坑深度越大, 盐水上溯距离有所增加, 但引航道盐度和盐-淡水交换率随集咸坑深度的增加而降低, 总体来看集咸坑深度与防咸效果成正比; 当集咸坑深度大于12 m时, 盐水上溯距离超过515 m, 引航道盐度低于0.23‰, 盐-淡水交换率低于50%。

关键词: 河口船闸; 集咸坑; 防咸效果; 数值模拟

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0105-08

Influence of salt collecting pit depth of estuarine ship lock on effect of mitigation salt intrusion

YE Haipeng, HU Jiang, XU Yuanyuan, XU Keqin, LI Yao, LIAO Jianghua
(National Inland Waterway Rehabilitation Engineering and Technology Research Center,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to analyze the salt water movement characteristics in different depths of the salt collecting pit of the estuarine ship lock, we build a three-dimensional numerical model of the salt collecting pit for mitigation salt intrusion based on the species transport model and the LES turbulence model of the CFD software, and use the finite volume method discretization. Based on the test results of water tank for mitigation salt intrusion in the salt collecting pit, we verify the salt water movement pattern, salt water movement speed and vertical salinity distribution, and build a three-dimensional numerical model of different depths of salt collecting pit in estuarine ship lock. The results show that the mitigation salt intrusion effect of salt collecting pit is related to the depth. The distance of salt water intrusion increases with the depth of the salt collecting pit, but the salinity of the approach channel and salt-fresh water exchange rate decreases with the depth of the salt collecting pit. In general, the depth of the salt pit is directly proportional to the salty prevention effect. When the depth of the salt pit is greater than 12 m, the distance of saltwater intrusion is more than 515 m, the salinity of the approach channel is less than 0.23‰, and the salt-fresh water exchange rate is less than 50%.

Keywords: estuarine ship lock; salt collecting pit; effect of mitigating salt intrusion; numerical simulation

在某些入海河口, 常修建大型船闸以保证航运畅通, 同时阻止盐水入侵^[1]。平陆运河青年船闸位于钦江感潮河段, 面临盐水入侵问题, 需要采取防咸措施抑制盐水上溯。船闸防咸措施分为3类: 1) 常规船闸的优化操作措施, 如修建多级

船闸、减少开闸次数, 建立智能决策支持系统等; 2) 抑制盐-淡水交换的措施, 如气泡帷幕、淡水帷幕等; 3) 盐淡水分离与提取措施, 如集咸坑法、冲洗法、选择性抽取法。集咸坑法的优势在于工艺简单、操作方便、不需要高度自动化程序

收稿日期: 2023-12-02

作者简介: 叶海鹏 (1998—), 男, 硕士, 从事水利工程、生态航道研究。

控制、经济且耗能少。

20世纪70年代, Jirka通过研究集咸坑选择性回收盐水不完全有效的条件, 在相对密度差较小或者盐水垂直分层不明显的情况下, 建造深而宽的集咸坑以实现完全有效回收盐水的成本很高。因此, Jirka基于 Boussinesq 近似有效理论提出盐水层相对深度、弗劳德数以及回收率三者之间的函数关系, 并明确了完全有效回收、部分有效回收和无效回收的条件^[2]。20世纪80年代, 在荷兰的登海尔德修建了集咸坑控制普瓦德船闸引起的盐水入侵, 从比利时根特—荷兰特尔纽曾运河上的特尔纽曾船闸也为集咸坑防咸船闸, 美国新乔治大船运河船闸、墨西哥湾沿岸水道的卡鲁卡丘马诺等也为集咸坑防咸船闸。根据以往的研究经验以及船闸长期运行监测资料显示, 集咸坑法防咸率可达到80%。鉴于国内外学者对于集咸坑深度与防咸效果的关系尚不明确, 探明集咸坑深度对防咸效果的影响对于河口防咸船闸建设运行管理具有重要意义。

集咸坑深度增加导致集咸坑体积增大, 大量盐水将潜入集咸坑, 可能引起盐水上溯距离增加, 但盐-淡水交换率等其他防咸指标与集咸坑深度的关系尚不清楚。针对集咸坑深度与防咸效果之间关系尚不明确的问题, 本文开展集咸坑防咸水槽试验, 观测集咸坑内的盐水运动形态和运动特性, 基于组分输运模型和大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 湍流模型构建了船闸集咸坑防咸三维数值模型,

并通过水槽试验结果验证该数值模型; 对青年船闸不同深度集咸坑的防咸过程开展数值模拟研究, 分析盐水运动距离、盐水运动速度、引航道盐度、盐-淡水交换率与集咸坑深度的关系, 探讨集咸坑深度对防咸效果的影响。

1 集咸坑防咸水槽试验

1.1 试验设计

试验在重庆交通大学水利水运教育部重点实验室长54 m、宽1 m、高2 m的长方体透明玻璃水槽中进行, 水槽高度可以保证清晰观察到盐水运动情况。利用无机染料对盐水着色模拟盐水入侵过程。试验水槽的左侧为着色盐水, 右侧为无色淡水, 试验水位为1.4 m。水槽中部设置电动闸门分隔盐水与淡水, 该电动闸门由调速电机控制, 能够消除人工启闭造成的偶然误差影响。待闸门两侧水体静止后匀速升起闸门, 盐水沿着水槽底部向右侧入侵。试验中使用摄像机从侧面记录盐水运动全过程, 在水槽中轴线处布置6个测量断面(1#~6#), 每个测量断面均垂直于底板, 并按照距离底板0.2h、0.5h、0.8h(h为水深)布置S80传感器, 见图1。该传感器外径19.05 mm、长度254 mm。利用电缆将该传感器连接至LQ800数据采集仪可实时记录盐度数据。试验初始时, 闸室盐水的浓度为2.23‰, 密度 ρ_s 为1 001.6 kg/m³, 淡水的密度 ρ_f 为998 kg/m³; 通过测量各个断面盐度的实时变化, 得到集咸坑和引航道盐度时空分布。

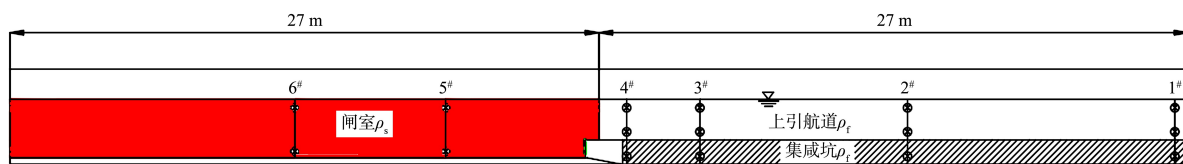


图1 船闸低浓度盐水入侵水槽试验布置

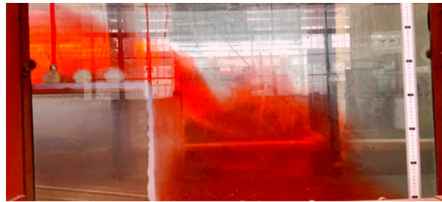
1.2 试验结果分析

1.2.1 盐水运动形态

盐水运动形态见图2。可以看出, 闸门升起后, 闸室内的低浓度盐水开始运动, 运动过程中盐水和淡水的交界面分明, 分层清晰, 低浓度盐水在集咸坑底层呈楔形前进。低浓度盐水的运动

形态演变分为3个阶段: 1) 盐水楔从闸首跌落过程中, 头部膨胀且盐楔头部出现涡旋; 2) 盐水上溯过程中, 盐水头部变薄, 交界面的坡度变平坦, 并且在前端出现膨胀形成楔头, 盐水楔集中在集咸坑底部运动; 3) 盐水运动到集咸坑末尾, 盐水楔头部开始沿集咸坑壁面爬升, 集

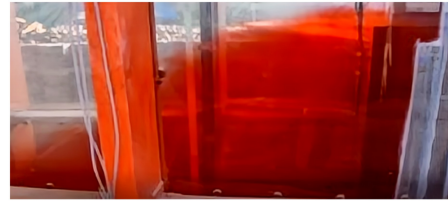
咸坑尾部盐水厚度增加。试验表明, 低浓度盐水运动形态的演变规律与异重流运动形态的演变过程一致, 表明集咸坑内的低浓度盐水仍然为异重流运动。



a) 盐水跌落形态



b) 盐水上溯形态



c) 盐水爬升形态

图2 $S=2.23‰$ 时集咸坑内盐水运动形态

为了进一步分析试验中盐水楔变化的原因, 在二元流情况下, 对集咸坑内盐水异重流运动做出理论推导, 过程见式(1)~(4), 认为盐水异重流交换过程是势能 $E_{势}$ 转化为动能 $E_{动}$ 的过程, 见图3。假定在 T 时段内中交换水流运动距离为 L , 盐水由最初位置①下降至位置④, 势能受到损失, 处于位置②、③、④的水体因与交换水流的头部以相同速度运动而获得动能。

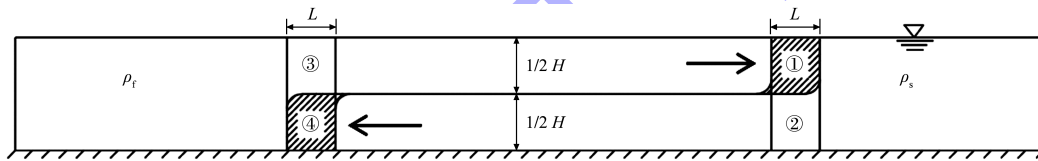


图3 集咸坑内交换水流

$$E_{势} = \frac{1}{4} u_t H^2 \Delta \rho g t \quad (1)$$

$$E_{动} = u_t^3 H \rho t \quad (2)$$

由于:

$$E_{势} = E_{动} \quad (3)$$

则有:

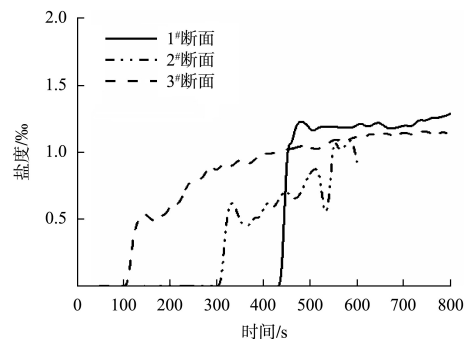
$$u_t = 0.5 \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} g H \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中: ρ_f 为淡水密度, ρ_s 为盐水密度, $\Delta \rho$ 为盐淡水密度差, H 为水深, t 为运动时间, u_t 为盐水运动速度。

1.2.2 盐度时空分布

集咸坑盐度监测结果见图4。盐度时空分布特性定量分析为: 1#断面距离盐水入侵起点闸门最远, 盐水从底部依次入侵3#、2#、1#断面; $t=200$ s时, 1#和2#断面底层水体盐度为 $0‰$, 3#断面底层水体盐度为 $0.52‰$; $t=400$ s时, 1#~3#断面底层水体

盐度分别为 $0‰$ 、 $0.61‰$ 、 $0.98‰$; $t=600$ s时, 1#~3#断面底层水体盐度分别为 $1.21‰$ 、 $0.95‰$ 、 $1.09‰$; $t=800$ s时, 1#~3#断面底层水体盐度分别为 $1.25‰$ 、 $1.09‰$ 、 $1.14‰$ 。在低浓度盐水运动过程中, 1#~3#断面中层和表层水体盐度均为 $0‰$ 。表明低浓度盐水集中在底层运动, 仅运动至集咸坑末尾向上爬升时, 少部分盐水扩散至中层水体, 整个运动过程没有盐水扩散至表层水体, 进一步证明盐水沿着集咸坑底部运动。



a) 底层测点

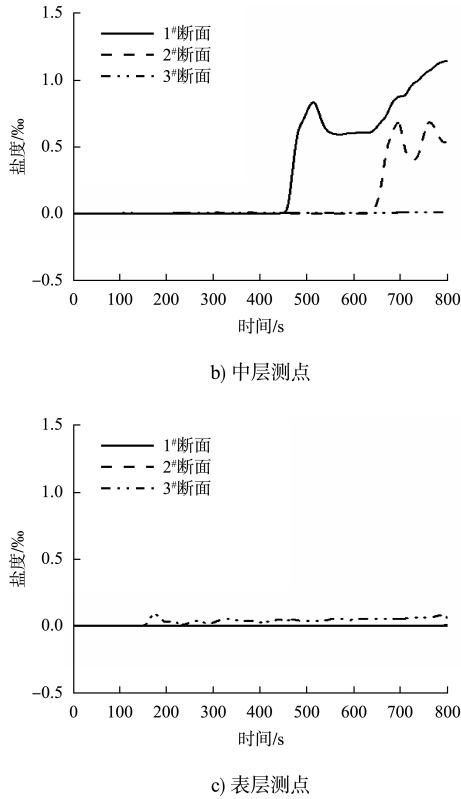


图4 断面盐度分布监测结果

1.2.3 盐水运动速度

根据卢陈等^[3]、Yin等^[4]的研究成果,当盐度范围为2‰~15‰时能够清晰观察到盐水楔运动,本文选取2.5‰低浓度盐水作为判断盐水运动距离的标准盐度。盐水入侵距离随时间变化曲线见图5,曲线斜率表示盐水运动速度,集咸坑防咸物理模型试验中盐水上溯平均速度为0.059 m/s。

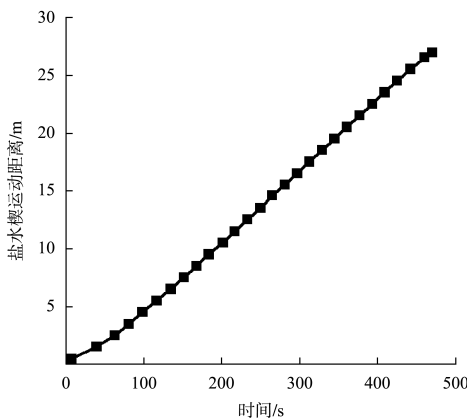


图5 盐水入侵距离与时间的关系曲线

2 三维盐水入侵数值模拟方法与验证

2.1 数值模拟方法

本文通过CFD软件构建集咸坑防咸水槽试验的三维数值模型,其尺寸、水深与试验条件一致,基于正六面体结构化网格划分方式对模型进行网格剖分,网格数量10.217万个;设置模型底部和侧面为无滑移边界,顶部为压力出口;初始条件下,闸室充满密度为1001.9 kg/m³的盐水,集咸坑内充满密度为998 kg/m³的淡水,扩散系数为1.6×10⁻¹¹ m²/s,采用组分输运模型和LES湍流模型进行模拟。

2.1.1 控制方程

连续方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i' u_j') + \mu \nabla^2 u_i \quad (6)$$

能量方程为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = S_T + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T'}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

式中: u_i' 、 u_j' 为*i*、*j*向脉动流速, u_i 、 u_j 为*i*、*j*向平均流速, p 为压力, F_i 为单位体积力, C_p 为比热容, T' 为温度, k 为流体传热系数, S_T 为黏性耗散相, ρ 为混合流体密度, t 为运动时间, μ 为动力黏度^[5]。

2.1.2 组分输运模型

组分输运模型是指在一个特定的系统当中,可能存在质的交换,每一种组分都需要遵守组分质量守恒定律,对一个确定的系统而言,组分质量守恒定律可以表述为系统为某种化学组分质量对时间的变化率,等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和。

根据质量守恒定律,组分*S*的质量守恒方程组为:

$$\frac{\partial(\rho C_S)}{\partial t} + \text{div}(\rho u C_S) = \text{div}[D_S \text{grad}(\rho C_S)] + S_S \quad (8)$$

式中: C_s 为组分的体积浓度, 则 ρC_s 为该组分的质量浓度; \mathbf{u} 为流速矢量; D_s 为该组分的扩散系统; S_s 为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量, 即生产率。式(8)等号左侧两项和右侧两项, 分别为时间的变化率、对流项、扩散项和反应项。各组分质量守恒方程之和为连续方程, 因为 $\sum S_s = 0$ 。因此, 如果有 3 个组分, 那么只有 $z-1$ 个独立的组分质量守恒方程, 将组分方程各项展开, 上式可改写为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho C_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_s u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_s v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_s w)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_s \frac{\partial(\rho C_s)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_s \frac{\partial(\rho C_s)}{\partial y} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[D_s \frac{\partial(\rho C_s)}{\partial z} \right] + S_s \end{aligned} \quad (9)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为 \mathbf{u} 在 x 、 y 、 z 向上的分量。

组分质量守恒方程常称为组分方程, 一种组分的质量守恒方程实际就是一个浓度传输方程。当水流或空气在流动情况下除有分子扩散外还会随流运输, 即传输过程包括对流和扩散两部分, 污染物质的浓度随时间和空间变化。因此, 组分方程在有些情况下称为浓度传输方程, 或浓度方程。

2.1.3 湍流模型

本文选用 LES 湍流模型, 基本方程为:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (10)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (12)$$

式中: u_i 、 u_j 为 i 、 j 向平均流速 (滤波后的场变量), x_i 、 x_j 为位移分量, τ_{ij} 为亚网格尺度应力, μ_t 为亚网格尺度湍流黏性, τ_{kk} 为亚网格尺度应力各向同性部分, \bar{S}_{ij} 为平均速度应变率张量 (滤波后的场变量), δ_{ij} 为克罗内克算子。本模型采用壁面适应的局部涡黏 (wall-adapting local eddy, WALE) 模型作为亚网格尺度模型, 其黏性方程为:

$$L_s = \min(kd, C_w V^{\frac{1}{3}}) \quad (13)$$

$$S_{ij,d} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)^2 \right] - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2 \quad (14)$$

式中: L_s 为亚网格混合长度; k 为卡门系数; d 为到壁面最近的距离; V 为体积; C_w 为常数, 取 0.325; $S_{ij,d}$ 为平均速度应变率张量; \bar{g}_{kk} 为应力项。

2.2 模型验证

2.2.1 盐水运动形态验证

水槽试验和数值模拟盐水楔形态见图 6。盐水上溯过程中, 盐水头部变薄, 交界面的坡度变平坦, 并且在前端出现膨胀形成楔头; 盐水楔到达集咸坑末端后, 向上爬升, 集咸坑末尾盐水厚度增加。验证结果表明, 数值模型中的盐水运动形态与水槽试验现象吻合, 表明该数值模型能够准确模拟盐水楔的运动形态。

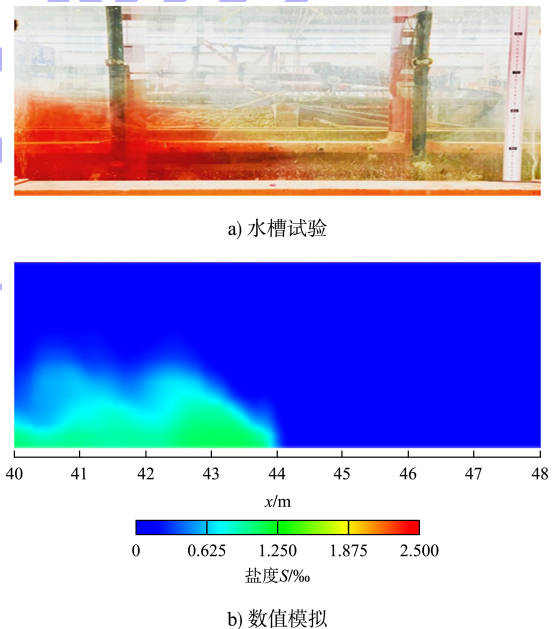


图 6 $t=260$ s 盐水上溯运动形态

2.2.2 盐度时空分布验证

盐度测量断面的实测值和计算值见图 7。各测量断面的盐度分布验证如下: 1#~3# 断面底层盐度计算值与实测值的最大差异分别出现在 470、570、230 s 时, 差异最大值分别为 0.09‰、0.10‰、0.11‰; 1#~3# 断面中层盐度计算值与实测值的最大差异分别出现在 540、710、250 s 时, 差异最大值分别为 0.11‰、0.06‰、0.01‰; 1#~3# 断面表层盐度计算值与实测值的最大差异分别出现在 530、690、780 s 时, 差异最大值分别为 0.03‰、0.05‰、0.08‰。验证结果表明, 1#~3# 断面底

层、中层、表层盐度实测值与计算值吻合较好，盐度垂向分层明显，盐水集中在集咸坑底部运动，当盐水运动到集咸坑末端并向上爬升时，有少量盐水运动至中层水体，集咸坑被盐水充满前，盐水不会运动至表层水体。

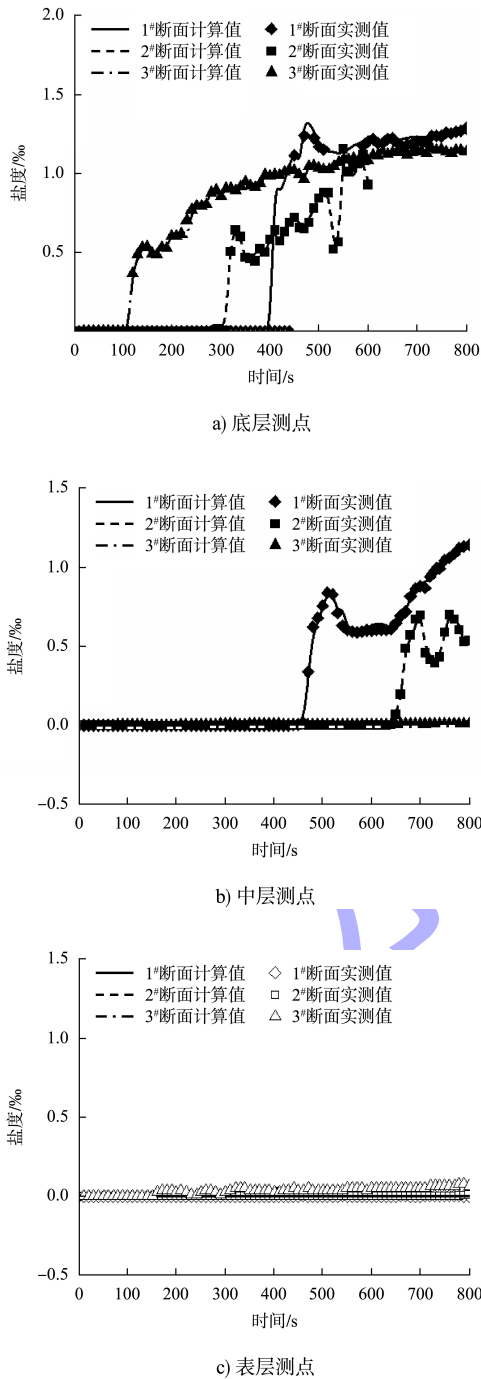


图7 盐度分布验证成果

2.2.3 盐水运动速度验证

盐水入侵速度与时间的关系曲线见图8。计算结果表明，盐水入侵最大速度的计算值和实测值分别为0.065和0.063 m/s，两者相差3.0%；从盐水入侵的平均速度来看，计算值和实测值分别为0.059和0.061 m/s，两者相差3.3%。从最大速度和平均速度对比来看，物理模型与数值模型误差不超过5%，因此认为该数值模型能够准确反映集咸坑内低浓度盐水运动过程。

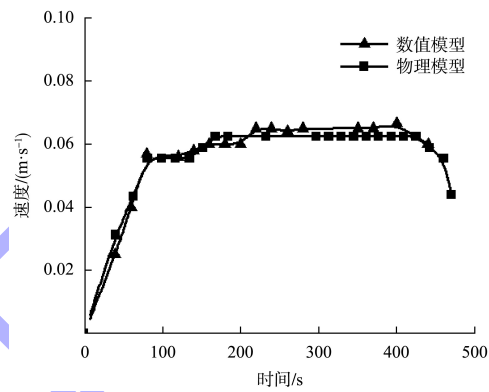


图8 盐水入侵速度验证结果

3 青年船闸集咸坑三维数值模型计算条件

根据平陆运河盐度监测资料^[6]得知，青年船闸的闸室盐度为2.5‰，青年船闸为双线船闸，闸室长300 m、宽34 m、底高程为-9.6 m，闸首长65 m、宽34 m、底高程为0.5 m，上引航道长552 m、宽156 m、底高程为0.5 m，青年船闸计算水位为8.7 m。青年船闸布置不同于传统海船闸，受限于工程位置及当地条件，集咸坑布置空间有限，因此需要探明集咸坑布置适宜深度，将上引航道总长度范围整体向下挖深形成集咸坑，见图9。采用正六面体网格剖分数值模型，设置模型四周及底部为无滑移边界，顶部为真空边界，见图10。初始状态闸室内流体为盐度2.5‰的盐水，集咸坑内流体为淡水，按照集咸坑深度0、4、6、8、10、12 m分为6个计算工况进行数值模拟分析，计算工况及模型参数设定见表1。

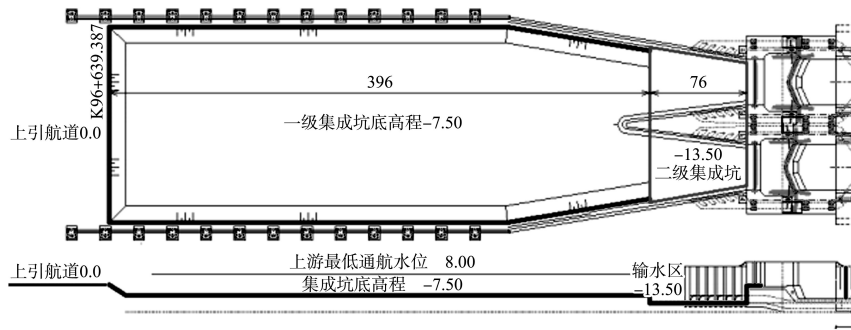


图 9 青年船闸集成坑上引航道整体加深布置 (单位: m)

表 1 青年船闸集成坑深度计算工况

工况	闸室盐度/‰	集成坑深度/m	集成坑体积/万 m ³	集成坑底高程/m	集成坑水深/m	网格数量/万个	扩散系数/(10 ⁻¹¹ m ² ·s ⁻¹)	计算时间/min
1	2.5	0	80	0.5	8.2	72	1.6	60
2	2.5	4	119	-3.5	12.2	163		
3	2.5	6	139	-5.5	14.2	180		
4	2.5	8	159	-7.5	16.2	208		
5	2.5	10	178	-9.5	18.2	220		
6	2.5	12	198	-11.5	20.2	248		

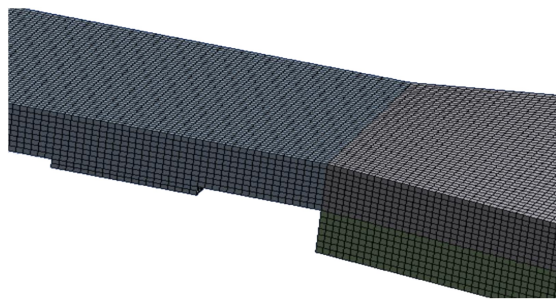


图 10 船闸集成坑网格剖分

4 集成坑深度对盐水运动的影响

4.1 集成坑深度对盐水入侵距离的影响

为比较不同集成坑深度下的盐水运动距离, 探讨集成坑深度对盐水上溯距离的影响, 对运动距离和运动时间无量纲化。以闸室宽度 $x_0 = 34 \text{ m}$, 特征时间 $t_c = x_0 / (g' x_0)^{1/2}$ 为参量, 有效重力加速度的表达式为:

$$g' = g \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \quad (15)$$

式中: g 为重力加速度, ρ_s 为盐水密度, ρ_f 为淡水密

度。对盐水运动距离 x 和运动时间 t 进行无量纲化:

$$x^* = x/H \quad (16)$$

$$t^* = t/t_c \quad (17)$$

式中: H 为集成坑深度。

集成坑深度与盐水入侵距离的关系见图 11。计算结果表明, 开闸初期盐水运动距离与集成坑深度成反比; 集成坑深度每增加 2 m, 集成坑体积增大 20.52%, 盐水上溯距离减小 2.77%。 $t^* = 35$ 为盐水运动距离与集成坑深度的关系变化转折点, $t^* > 35$ 后, 盐水运动距离与集成坑深度成正比, 集成坑深度每增加 2 m, 集成坑体积增加 20.52%, 盐水上溯距离增加 2.07%。开闸初期 ($t^* < 35$), 集成坑深度越大, 盐水跌落时间越长, 而盐水触底后才能继续向前运动, 所以深度越大入侵距离越小; $t^* > 35$ 之后, 盐水跌落过程的重力势能转化为动能推动盐水异重流向前运动, 并且集成坑深度越大, 其获得的动能也越大, 因此运动速度越快, 在相同时间内的运动距离也越长。

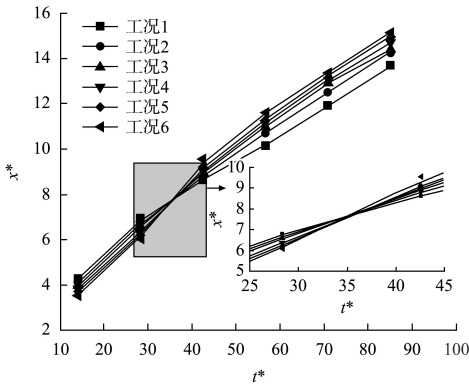


图 11 不同深度下盐水入侵距离时程变化

4.2 集咸坑深度对盐水运动速度的影响

为了定量分析盐水运动速度与集咸坑深度的关系，对盐水运动速度进行无量纲化，即 $u^* = v / (g'H)^{1/2}$ ，其中 v 为数值模型中盐水运动速度实测值，m/s；同时通过 $t^* = t/t_c$ 对运动时间进行无量纲化，得出不同时刻 u^* 与集咸坑深度的关系见图 12。计算结果表明，当 $t^* < 40$ ，盐水运动速度为常数，当 $t^* > 40$ ，盐水运动速度与时间成反比；盐水运动速度与集咸坑深度成正比，在船闸运行过程中，集咸坑深度每增加 2 m，集咸坑体积增大 20%，盐水运动速度增大 10%。

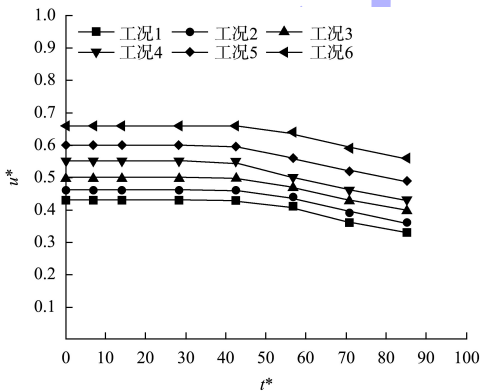


图 12 不同深度下盐水异重流运动速度时程变化

根据 GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》^[7]，当盐度为 0.25‰ 时水质盐浓度超标，对周边取水工程造成不利影响。上引航道盐度随时间变化规律见图 13。可以看出，上引航道盐度与过闸时间成正比，并且开闸初期增长速度较快，过闸完成时达到最大盐度；上引航道盐度与集咸坑深度成反比，集咸坑深度每增加 2 m，其体积增大 20%，

可减少上引航道盐度约 33%。集咸坑深度大于 10 m 时，上引航道周边水质盐度满足 GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》。

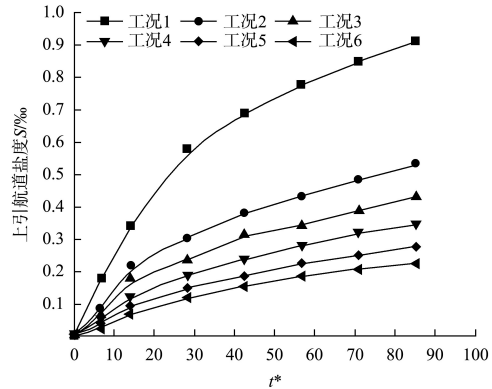


图 13 不同深度下上引航道盐度时程变化

4.3 集咸坑深度对盐淡水交换率的影响

船闸盐-淡水交换率 Z 的计算公式，即闸室内盐度变化与闸室外部两侧盐度差之间的比值，见式 (18)，盐-淡水交换率 Z 的实质为进入河侧的海水占闸室水体的百分数，参数 ΔS 为盐度差，单位为 kg/m^3 ^[8]。

$$Z = \frac{\Delta S_{\text{闸内}}}{\Delta S_{\text{闸外}}} \quad (18)$$

集咸坑深度与盐-淡水交换率的关系见图 14。盐-淡水交换率与开闸时间成正比，并在过闸完成时达到最大值，此时工况 1~6 的盐淡水交换率分别为 78.75%、68.59%、64.51%、58.68%、53.42%、48.71%。结果表明，盐淡水交换率与集咸坑深度成反比，集咸坑深度每增加 2m，其体积增大 20%，盐-淡水交换率可降低 10%。

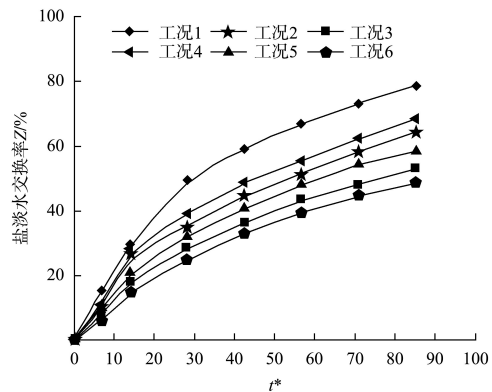


图 14 不同深度下盐淡水交换率时程变化