

潮汐河口挖入式港池水体交换研究

何 杰^{1,2}, 辛文杰^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210024;
2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要 :以珠江口南沙港区挖入式港池为例,通过数学模型模拟了港池的水体交换状况,模拟结果表明港池尾部水体交换率最低。利用港池内外存在潮位差的关系,通过人工水渠的方式有效提高了港池尾部水体的交换速率,有效解决了挖入式港池水体交换缓慢的问题。

关键词 :潮汐河口;挖入式港池;水体交换;人工水渠

中图分类号 :U656 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2011)04-0090-05

Water exchange for excavated-in harbor basins in tidal estuaries//HE Jie^{1,2}, XIN Wen-jie^{1,2}(1. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract :The excavated-in harbor basin of Nansha Harbor area in Pearl River estuary was taken as an example. A mathematical model was employed to simulate the water exchange in the harbor basin. The simulated results indicate that the rate of water exchange is very low at the tail part of the harbor basin. Based on the differences of tidal ranges inside and outside the harbor basin, and artificial canal is adopted to significantly improve the rate of water exchange at the tail part of the harbor basin and to effectively solve the slow water exchange in the excavated-in harbor basin.

Key words :tidal estuary; excavated-in harbor basin; water exchange; artificial canal

国内外现代港口发展初期阶段以顺岸式码头为主,随着港口规模的不断扩大,在岸线资源短缺的情况下,挖入式港池布置可有效缓解这一矛盾。但挖入式港池在增加码头岸线、改善泊位安全条件和减少泥沙回淤的同时却给港池水环境埋下了隐患。挖入式港池只能通过港池口门与外海水体进行交换,造成的短期影响为港池内水体流动缓慢、海水更新速率下降,长远影响为港池水体自净能力减弱、水污染问题日益突出。同时,潮汐河口的水流运动具有往复性,落潮期间流出港池的水体在涨潮过程中会有部分重新进入港池,造成港池水体交换率下降。在涨、落潮过程中,港池口门附近水域的水体极易得到交换,而港池尾部的水体却长时间得不到交换。因此,对于处在潮汐河口地区挖入式港池的水体交换问题研究十分必要。

海洋水体交换的研究自 20 世纪 80 年代开始,研究对象多以半封闭的海湾为主,研究手段也多以数学模型为主。随着海港工程的规模化,大型的挖入式港池或环抱式港池等犹如人造的半封闭海湾。

例如连云港西大堤的建成使原来的海峡通道型港口变为半封闭的人工海湾型港口,风浪条件得到改善的同时,海湾的水体交换率下降,湾内水体污染日趋加剧^[1]。当前半封闭港池的水环境问题已经引起国内港口设计和建设部门的充分重视,在港口规划和初步设计阶段也考虑到了这种半封闭港池引起的工程水环境问题。辛文杰等^[2]采用 NaCl 溶液掺少量罗丹明 B 的混合液作为示踪剂,通过物理模型模拟了大铲湾工程前后湾内的水体交换率变化。孙英兰等^[3]采用数学模型对山东半岛南部沿海丁字湾的 COD 浓度扩散分布进行了模拟研究。田嘉宁^[4]在建立 COD 扩散方程时考虑了生物化学反应和溶解有机物反应的作用,通过流入和产出 2 个方面较全面地反映了某半封闭港池水体中 COD 的现存量变化。以上研究对于半封闭港池的水体交换状况进行了较为详细的分析,但对于港池水体交换状况改善措施的研究稍显不足。笔者将以珠江口的广州港南沙港区中部挖入式港池为例,重点阐述如何通过水利工程措施提高挖入式港池水体交换速率,达到改

1 广州港南沙港区简介

广州港南沙港区位于伶仃洋西岸的龙穴岛上，北邻凫洲水道，西南隔龙穴南水道与万顷沙相望，东部岸线面临伶仃洋深水航道。南沙港区重点分布在龙穴岛作业区，规划范围涵盖了整个龙穴岛围垦区，龙穴岛围垦区目前堤内围垦面积为 48.0 km²，规划港区面积可达 65.0 km²，具有丰富的可利用港口岸线资源和临港陆域资源^[5]。从 2000—2003 年，多家科研单位对南沙港区建港条件进行了大量的科学研究和试验工作，整个龙穴岛东侧岸线都具有开辟为港口深水岸线的水沙条件^[6-7]。为了进一步降低港区建成后的维护成本，寻求更好的岸线利用方案，需要探索挖入式港池建设的可行性。相关科研成果表明^[8]，南沙港区挖入式港池的泥沙回淤优于东部顺岸港池，这为南沙港区挖入式和顺岸式结合的布局框架提供了科学依据。

根据南沙港区的远期规划，中部挖入式港池分 3 个阶段建成，形成的港池依次为外港池、中港池和内港池，属狭长形港池（图 1）。挖入式港池完全形成后，港池口门宽度为 1.0 km，纵深为 6.3 km，水域面积可达 5.0 km²。港池内流弱沙少，泥沙回淤较少，这对船舶停靠码头、进出港以及港池维护都是十分有利的。然而，由于港池内水体流动缓慢，通过港池口门与外海的水体交换率将会下降，内港池水体更是长时间滞留，难以与外海水体交换。为改善港池的水体交换状况，根据港池的平面布局方式和周围水域的关系，提出了修建人工水渠的方案。人工水渠位于港池和龙穴南水道之间，分别布置在内港池北端 B1-B2 和中港池北端 C1-C2，水渠设计宽度为 50 m、水深为 5.0 m。水渠内水体自然流动的充分条件是水渠两端存在水位差（水面比降），即港池和

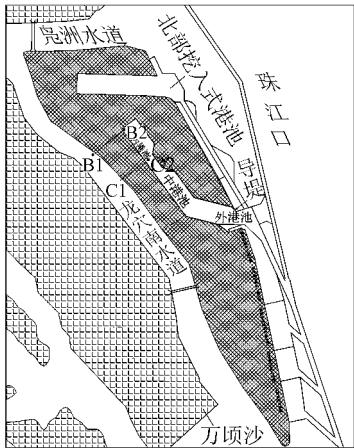


图 1 港池平面布局示意

龙穴南水道之间存在潮位差。为了减少港池泥沙回淤，港池口门北侧布置了 1 座长 200 m、宽 50 m 的导堤。以下将从港池水体交换角度出发，重点研究导堤和水渠 2 种工程措施的治理效果。

2 研究手段和方法

在对挖入式港池水体交换问题进行研究时采用平面二维水质数学模型。考虑到水流紊动因素和污染物扩散的影响，水质数学模型的控制方程采用守恒型向量形式：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \mathbf{E} = \mathbf{S} + \nabla \mathbf{E}_d \tag{1}$$

其中

$$\mathbf{U} = (d, du, dv, d\varphi)^T$$

$$d = h + \eta$$

$$\mathbf{E} = (\mathbf{F}, \mathbf{G})$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} du \\ du^2 + \frac{gh^2}{2} \\ duv \\ du\varphi \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} dv \\ duv \\ dv^2 + \frac{gh^2}{2} \\ dv\varphi \end{pmatrix}$$

式中： u, v 分别为 x, y 方向的流速； φ 为污染物的质量浓度； S 为源项； d 为全水深； h 为水平面以下水深； η 为水面波动水深； R 为单位时间、单位体积的源和汇项； k_1 为污染物的衰减系数，在对保守性物质扩散模拟中可认为 $k_1 = 0$ 。

水流运动方程的紊动扩散项和污染物扩散项表示为

$$\mathbf{E}_d = (\mathbf{F}_d, \mathbf{G}_d) \tag{2}$$

$$\text{其中 } \mathbf{F}_d = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\varepsilon_x d \partial u}{\partial x} \\ \frac{\varepsilon_x d \partial v}{\partial x} \\ \frac{k_x d \partial \varphi}{\partial x} \end{pmatrix} \quad \mathbf{G}_d = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\varepsilon_y d \partial u}{\partial y} \\ \frac{\varepsilon_y d \partial v}{\partial y} \\ \frac{k_y d \partial \varphi}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_f = \begin{pmatrix} 0 \\ g d (S_{0x} + S_{fx}) + f v \\ g d (S_{0y} + S_{fy}) - f u \\ -k_1 d \varphi + R d \end{pmatrix}$$

水流水质控制方程的各项参数选取见文献 [9]。

数学模型计算范围覆盖整个珠江口水域，计算域统一采用三角形网格进行剖分，水流水质控制方程采用有限体积法离散求解。数学模型曾对 2007 年 8 月实测的大、中、小潮过程进行了潮位、潮流过程验证，验证结果符合模拟规程要求^[10]。在对港池水体交换模拟时采用在港池水域一次性布置面

源示踪剂(初始浓度为 1.0)的方式,通过示踪剂浓度变化来反映港池水体交换速率的大小。为保证计算的稳定性,在模型计算的第 3 个小时释放面源示踪剂。根据当地海域的潮汐过程特点,数学模型的水动力条件采用 15 个组合全潮控制,用以模拟半个月时间的潮流动力变化。

3 口门导堤工程

图 2 显示了有导堤和无导堤情形下港区水域的涨潮平面流态,南北向的沿岸流侧向进入港池,港池口门段(外港池)在涨、落潮过程中均形成一定范围的回流。有导堤情形下,水流受导堤的束缚,回流区范围向港池内侧延伸,几乎覆盖整个外港池水域,无导堤方案下的回流范围相对要小一些。中港池水流都比较弱,涨潮过程水流流向港池末端,落潮过程则向港池口门流动。内港池的水流运动非常微弱,港池末端的水流流向略显杂乱无章。

口门有导堤和无导堤的港池示踪剂扩散状态表明(图 3 和图 4),涨潮过程中,由于导堤形成的回流深入港池的范围更深一些,示踪剂浓度较低的水域在外港池所占的范围相对要大一些,落潮期间,依然是有导堤方案下的示踪剂浓度要低一些。港池水域的示踪剂在随后的扩散过程中,前 2 d 两者的示踪剂分布状况略有差别,这个差别主要体现在外港池水域的示踪剂分布状况。15 d 后,两者的示踪剂分布状态比较接近,外港池和中港池的示踪剂浓度均

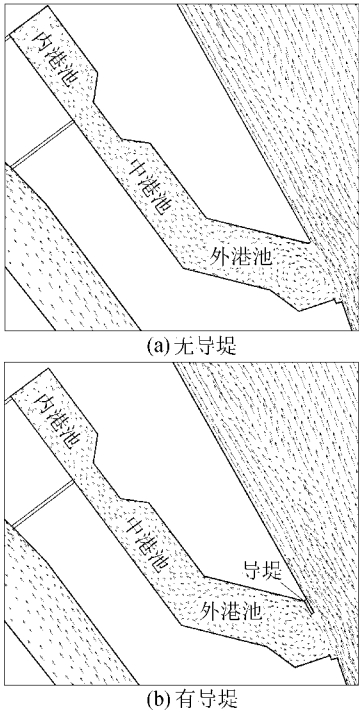


图 2 港池水域涨潮平面流态

小于 0.10,内港池的示踪剂浓度仍普遍较大,这主要是由于内港池的水体能通过港池口门进行交换的水量非常少,提高内港池的水体交换量是改善内港池水质状况直接而有效的方式。

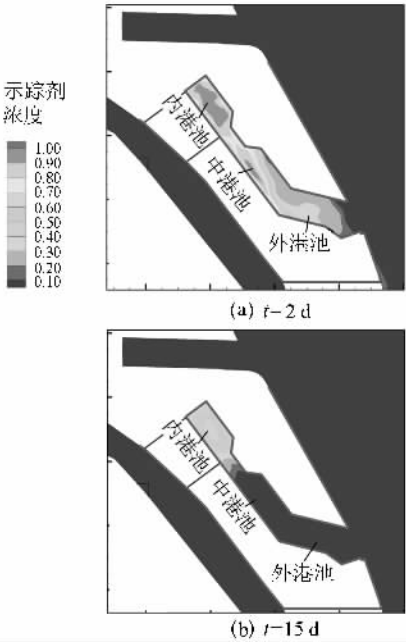


图 3 无导堤方案示踪剂扩散状态

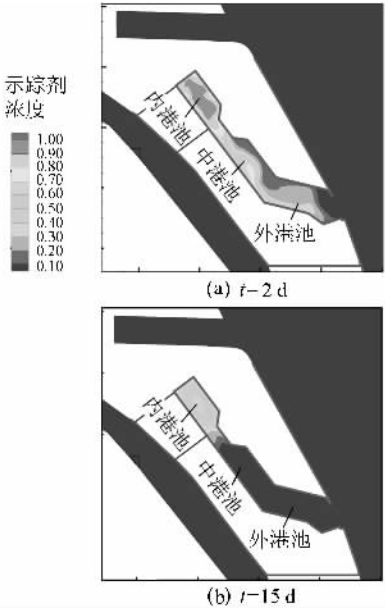


图 4 导堤方案示踪剂扩散状态

4 人工水渠工程

口门的导堤工程在短期内对改善外港池和部分中港池的水体交换状况效果比较明显,但对内港池水体交换状况的改善效果微乎其微,内港池水体交换困难成为解决挖入式港池水体交换问题的瓶颈。根据内港池特殊的地理位置,通过人工水渠方式连接港池和龙穴南水道,提高内港池的水体交换量。内港池和龙穴南水道潮位过程的对比表明,两者在

涨、落潮过程中都存在潮位差,水渠打通后,潮流通过水渠可在龙穴南水道和内港池间相互流动^[11]。进入港池的清水可以起到稀释污水的作用,港池水体流出港池则可以起到排污作用,这对改善港池水质状况具有双重效果。人工水渠开通后涨、落潮平面流态如图5所示,涨潮过程中水流经人工水渠从内港池流出到龙穴南水道,落潮期间水流则由龙穴南水道进入内港池,水渠内最大流速达到1.50 m/s,最大流量可达400 m³/s。由于中港池至内港池起始右侧边界突然扩大,致涨潮期于内港池形成一顺时针回流,落潮期因B1-B2和C1-C2水渠出口边界突然扩大,且前者甚于后者,从而在内港池与中港池分别出现顺时针回流,前者范围大于后者。两水渠不仅有效提高了内港池和中港池的水体交换量,而且增加了港池水域的水流活动性,对改善港池水域的水质状况十分有利。

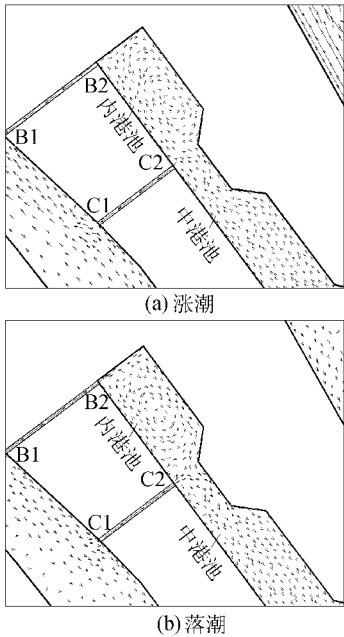


图5 人工水渠方案涨、落潮平面流态

从人工水渠方案的港池示踪剂随时间扩散状态(图6)来看,落潮过程中有清水自龙穴南水道进入内港池,清水的稀释作用使处在港池人工水渠口附近水域的示踪剂浓度降低,涨潮过程中,港池内水流程向水渠,示踪剂浓度较高的水体涌向水渠进口处,造成水渠进口附近水域的示踪剂浓度增加。2 d后,内港池和中港池的示踪剂浓度大部分低于0.10,这比水渠打通前提前了许多天。港池示踪剂平均浓度变化表明,外港池示踪剂浓度在1 d之内由1.00减小到0.42,中港池和内港池示踪剂浓度则分别减小0.31和0.23;所有港池的示踪剂浓度在第3天已完全低于0.10。外、中、内3段港池示踪剂浓度减小速

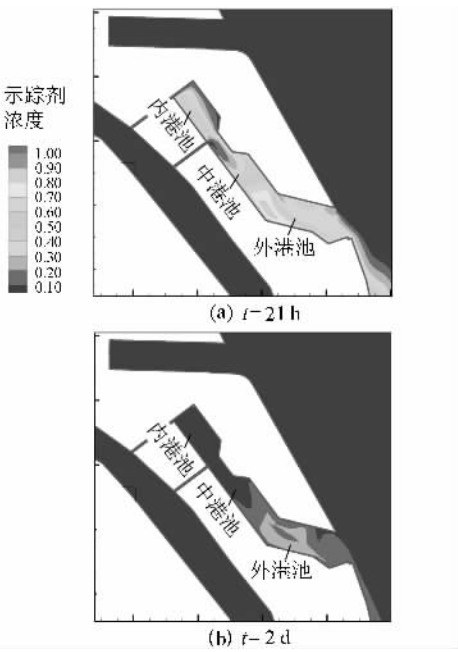


图6 水渠方案港池示踪剂浓度场分布

率都非常快,这表明人工水渠工程有效增加了港池尤其是内港池的水体交换速率,提高了挖入式港池的水体交换能力。

5 结 语

广州港南沙港区中部挖入式港池水域纵深较大,内港池水域水体交换缓慢,成为治理港池水体交换问题的瓶颈。根据内港池特殊的地理位置,选择了人工水渠方式提高港池的水体交换量。人工水渠两端存在天然的潮位差(水面比降),为水流在人工水渠内产生自然流动提供了充分条件。数学模型模拟结果表明,人工水渠内水流在涨潮和落潮过程中产生的双向流动可对港池水体的污染物起到稀释和排污的双重作用,内港池水体交换量显著增加,整个港池的水体交换率比人工水渠开通前提高很多。在人工水渠注水和排水的同时,增强了港池水域水流的活动性,为改善港池的水环境提供了保障。潮汐河口挖入式港池的水体交换问题应与港池的工程泥沙、工程安全等问题具有同等重要的地位,应在港池设计初期阶段引起足够的重视并开展相关的科学研究。

参考文献:

[1] 陶非,张鹰.连云港海洲湾海域水质分析[J].水利渔业,2006 26(6):77-78.
[2] 辛文杰,韩玉芳.大铲湾集装箱码头区开发方案:内港池潮流模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2004.
[3] 孙英兰,张越美.丁字湾物质输运及水交换能力研究[J].中国海洋大学学报,2003 33(1):1-6.

[4] 田嘉宁.半封闭性港口化学需氧量数值模拟[J].西安理工大学学报 ,1995 ,11(4) 292-296.

[5] 何波 ,张兆华.广州港南沙港区总体规划方案[J].水运工程 ,2004 ,36(3) 76-78.

[6] 辛文杰 ,罗小峰.广州港南沙港区总体布局方案平面二维潮流泥沙数值模拟[R].南京 :南京水利科学研究院 ,2001.

[7] 杨树森.广州港南沙港区起步和总体布局方案港池与航道泥沙淤积计算和分析[R].天津 :天津水运工程研究所 ,2001.

[8] 辛文杰 ,何杰.广州港南沙港区南沙作业区控制性详细规划潮流泥沙数学模型研究[R].南京 :南京水利科学研究院 ,2007.

[9] 何杰 ,辛文杰.含有紊动黏性项浅水方程的数值求解[J].水利水运工程学报 ,2010 ,42(3) 95-100.

[10] 何杰.半封闭港池水交换的数值模拟及其应用[D].南京 :南京水利科学研究院 ,2009.

[11] 何杰 ,辛文杰.挖入式港池水体交换能力研究[J].水利学报 ,2007 ,38(增刊) 330-333.

(收稿日期 2010-11-29 编辑 :方宇彤)

(上转第 48 页)

之间的相互转换关系 ,使其能与雾化近区模型进行边界耦合。最后 ,结合实际工程的雾化原型观测数据对数学模型进行验证 ,计算结果较为合理。

参考文献 :

[1] 柳海涛 ,孙双科.挑流水舌空中形态与含水浓度的数值解法[C]//唐洪武.2007 水力学与水利信息学进展.南京 :河海大学出版社 ,2007 511-516.

[2] LIU Shi-he , SUN Xiao-fei , LUO Jing. Unified model for splash droplets and suspended mist of atomized flow[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B ,2008 ,20(1) :125-130.

[3] 孙笑菲 ,刘士和.雾化水流溅抛水滴运动深化研究[J].水动力学研究与进展 :A 辑 ,2008 ,23(1) 61-66.

[4] 张华.挑流水舌的水滴随机喷溅数学模型[J].水利学报 ,2003 ,34(8) :21-25.

[5] 柳海涛 ,刘之平 ,孙双科.水舌入水喷溅的随机数学模

型[J]. 水利水电科技进展 ,2009 ,29(6) :1-4.

[6] 柳海涛 ,孙双科 ,刘之平 ,等.泄洪雾化预测的人工神经网络方法探讨[J].水利学报 ,2005 ,36(10) :1241-1245.

[7] 刘士和.高速水流[M].北京 :科学出版社 ,2005 :165-166.

[8] 柳海涛.挑流消能泄洪雾化理论与计算模型研究[D].北京 :中国水利水电科学研究院 ,2009.

[9] ATLAS D , ULBRICH C W. Path and area integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band [J]. Journal of Applied Meteorology ,1977 ,16 :1322-1331.

[10] 龚康贤 ,王连仲.雨滴谱参数估计优化方案及其微物理资料检验[J].电波科学学报 ,2001 ,16(4) :493-497.

[11] 刘黎平.雨区衰减及谱变化影响雷达测雨精度的数值模拟[J].南京气象学院院报 ,1994 ,17(2) 255-258.

[12] 刘之平 ,刘继广 ,郭军.二滩水电站高双曲拱坝泄洪雾化原型观测报告[R].北京 :中国水利水电科学研究院 ,2000.

(收稿日期 2010-11-24 编辑 :高建群)

(上接第 51 页)

$R_0 > R_{0.01}$ 为显著相关 ,可认为 m' 与 H/δ 之间的线性关系密切。因此 ,可用式(7)计算平底溢洪闸综合流量系数。但应注意式(7)的适用条件为 $0.1 < H/\delta < 0.4$,即符合宽顶堰条件。对小型工程或中型工程的可行性研究阶段 ,平底溢洪闸 m' 也可近似按 $0.33 \sim 0.37$ 取值。

4 结 语

在溢洪道工程设计中 ,平底溢洪闸是常见的工程布置形式 ,因此 ,本文提出的其综合流量系数确定方法具有实用参考价值。但由于本文的试验数据均为溢洪闸在自由泄流(非淹没)情况下取得的 ,因此 ,综合流量系数计算公式(式(7))不适用于溢洪闸淹没出流情况。

参考文献 :

[1] SL253—2000 溢洪道设计规范[S].

[2] 单长河 ,齐清兰.无坎宽顶堰流量系数的计算及讨论[J].研究与设计 ,2008(5) 31-32.

[3] 吴持恭.水力学[M].2 版.北京 :高等教育出版社 ,2001 :392-399.

[4] 杨健 ,万继伟 ,吴桐 ,等.大变幅相对淹没度下冲沙闸的水力特性试验[J].水利水电科技进展 ,2009 ,29(2) :22-25.

[5] 夏毓常 ,张黎明.水工水力学原型观测与模型试验[M].北京 :中国电力出版社 ,1999 22-25.

[6] 郭福厚.水工建筑物堰流流量系数拟合[J].农业与技术 ,2006 ,26(1) 94-96.

[7] 高玉芹.平底闸扩孔后堰流流量系数变化初探[J].治淮 ,2007(5) :18-19.

[8] 肖筱南.新编概率论与数理统计[M].北京 :北京大学出版社 ,2002 379.

(收稿日期 2010-10-26 编辑 :方宇彤)