

· 港 口 ·



基于改善水体交换能力的 环抱式长港池布置优化

李 蕊¹, 姚姗姗², 丁文涛¹, 陈 飞¹

(1. 交通运输部规划研究院, 北京 100028; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 针对单口门环抱式长港池水体交换不畅的问题, 以大连港太平湾港区为例, 提出开辟港池底部与外海水体交换通道的布置方案。利用平面二维水动力及水体交换模型, 研究港池底部通道不同开口宽度和底高程对水体交换能力的影响。结果表明: 港池底部通道开口后, 港池水体交换能力可以提高 30% 以上, 而通道底高程影响较小。研究成果对于环抱式长港池规划方案的制定具有借鉴意义。

关键词: 港口规划; 环抱式港池; 水体交换; 数值模拟

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0038-06

Layout optimization of encircled long basin based on improving water exchangeability

LI Rui¹, YAO Shan-shan², DING Wen-tao¹, CHEN Fei¹

(1. Transport Planning and Research Institute, Beijing 100028, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T, Tianjin 300456, China)

Abstract: Considering the problem of water exchange in the encircled long basin with one entrance, taking Taiping Bay harbor in Dalian as an example, the layout of opening up a water exchange channel between the bottom of the basin and the sea was put forward. Based on a two-dimensional hydrodynamic and water exchange model, the effects of different opening widths and bottom elevations on water exchange were studied. The results show that the water exchangeability of the basin could be improved by more than 30% after the channel opening at the bottom of the basin, but channel bottom elevations have little influence. The research results are of reference significance for the planning of the encircled long basin.

Keywords: port planning; encircled basin; water exchange; numerical simulation

为保证港口功能的实现, 增加码头岸线资源, 减少波浪、水流、泥沙等自然因素对港口开发的影响, 我国沿海部分地区的港口规划常采用长港池(长宽比大于 4:1)、单口门的环抱式布置形式。由于进出港池的潮流通道只有一个口门, 相比自然状态, 港池内流速有所降低, 港池内外水体交换能力减弱, 导致港池底部水体质量差, 对港池水环境和海洋生态环境有一定影响^[1]。随着我国海洋环境保护的重视和绿色生态港口建设的推进,

在港口规划阶段研究环抱式长港池的水体交换能力是十分重要的。

近年来, 国内外开始关注港湾的水体交换能力研究。美国环境保护署曾提出: 港池内水体 4 d 之内交换率超过 100%, 则水体交换优秀; 如 10 d 之内交换 100%, 则水体交换较好; 如 10 d 以上交换 100%, 则为一般。何杰等^[2]、张玮等^[3]分别对台州温岭港区、连云港徐圩港区的环抱式港池水体交换特点进行研究和探讨, 罗锋等^[4]、刘浩等^[5]分别对

温州乐清湾、泉州深沪湾等半封闭海湾的纳潮量及水体交换情况进行研究。

本文以大连港太平湾港区为例, 提出通过开辟环抱式长港池底部与外海的水体交换通道, 增加港池内外水体交换量和港池水体环境容量, 以达到改善港池水体交换能力的目的, 并利用平面二维水动力和水体交换数学模型, 对港池底部通道的平面布置尺度进行研究论证。

1 项目概况

1.1 工程海域水动力环境

大连港太平湾港区位于辽东湾东岸, 属岬湾沙质海岸类型, 基岩岬角众多, 岬角间发育海湾, 辽东湾内潮波由太平洋潮波经渤海海峡老铁山水道传入, 潮汐属不规则半日潮, 且日潮不等现象明显。据2010年5月29日—6月27日实测水文资料, 太平湾海域平均潮差1.88 m、最大潮差3.08 m、最小潮差0.89 m; 潮流类型为规则半日潮流, 基本沿岸线呈SW~NE向往复流运动(图1); 外海及岬角水域流速较高、近岸及湾内水域流速较低, 太平角、长嘴子等岬角附近大潮平均流速为0.3~0.5 m/s, 最大平均流速为0.6~1.0 m/s; 太平湾、将军石湾等大潮平均流速为0.2~0.4 m/s; 泥沙来源少, 水体含沙量低, 泥沙运动不活跃, 海床地貌形态长期保持稳定^[6-7]。

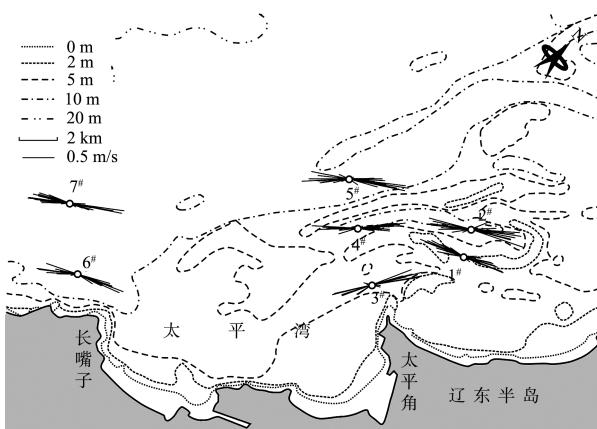


图1 2010年太平湾测流站位及实测大潮流速矢量

1.2 港区规划情况

根据港口总体规划, 太平湾港区采用环抱式

长港池布置, 口门位于-5 m(理论基面)水深处, 港池长5 790 m、宽1 000 m, 长宽比约5.8:1.0, 设计底高程-15.5 m, 港内水域面积约640万m², 规划形成码头岸线约10 km, 可布置4万~15万吨级泊位29个。

2 模型计算方法

2.1 平面二维水动力模型

潮流数学模型理论采用平面二维浅水方程组。在笛卡尔坐标系下, 通过对水平动量方程与连续方程的积分而得到的二维浅水方程如下:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + E_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + E_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: ζ 为相对于平均海平面的潮位; h 为总水深; g 为重力加速度; u 和 v 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向上的分量; f 为科氏力系数; ρ 为水体密度; E_x 和 E_y 分别为 x 、 y 方向的水平紊动黏性系数, 可由 Smagorinsky 方程求解; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为床面剪切力在 x 、 y 方向的分量。

2.2 水体交换模型

水体交换数值模拟采用示踪剂法, 在港池内部设置溶解态无降解守恒物质, 在潮流动力作用下通过数值模拟观察守恒物质浓度的情况。示踪剂物质的运动采用基于欧拉物质运动的对流扩散方程形式:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - FhC + S \quad (4)$$

式中: C 为物质浓度; D_x 和 D_y 分别为 x 、 y 方向的物质扩散系数; F 为物质衰减系数; S 为点源浓度。

物质扩散系数 D_x 、 D_y 通过下式计算求得:

$$\begin{cases} D_x = \frac{E_x}{\sigma_T} \\ D_y = \frac{E_y}{\sigma_T} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $E_x = E_y$ 为水平紊动黏性系数; σ_t 为 Prandtl 数, 取为 1.0。

2.3 模型建立和验证

大范围模型包含整个渤海海域; 局部模型范围北至营口港鲅鱼圈港区以北, 南至长兴岛, 西至约-30 m 等深线。模型计算区域采用无结构三角形网格对计算域进行剖分(图 2), 最小空间步长为 5 m, 能够保证充足的网格分辨率。

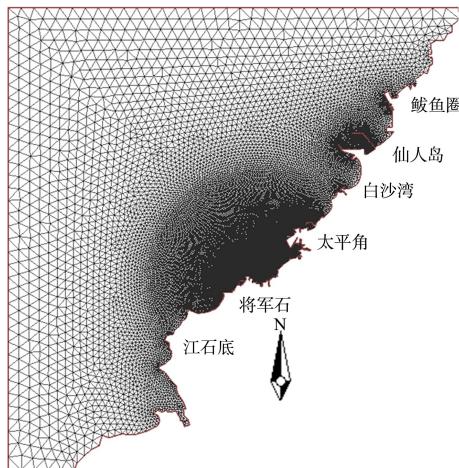


图 2 局部模型网格

模型验证依据 2010 年实测大、中、小潮水文测验数据, 验证表明计算值与实测值吻合良好^[8], 能够反映太平湾大范围海域潮流运动情况。

3 港池底部通道研究

3.1 布置方案

为提高太平湾港区环抱式长港池水体交换能力, 拟通过开辟港池底部通道, 使港池与外海留有两个水体交换通道, 以增加港池内外水体交换量和港池水体环境容量。环抱式长港池底部通道布置方案见图 3。

本研究重点针对环抱式长港池底部通道的开口宽度和底高程, 通过计算不同工况下港池和太平湖的水体交换率以及重点区域的特征流速和横流流速, 从水体交换和潮流角度综合比选评价各方案, 提出合理化建议。方案研究共设计 8 种工况, 具体工况见表 1。

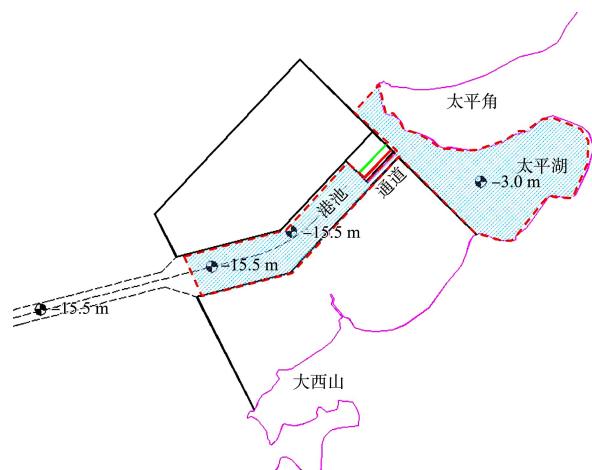


图 3 环抱式长港池底部通道研究方案

表 1 环抱式长港池底部通道计算工况

工况	通道开口	通道宽度/m	通道底高程 (理论基面下)/m
1	不开口	-	-
2		50	-3.0
3		100	-3.0
4		150	-3.0
5	开口	200	-3.0
6		200	-15.5
7		300	-3.0
8		500	-3.0

3.2 水动力模拟分析

从潮流流速角度, 对通道开口宽度 50(工况 2)、100(工况 3)、200(工况 5)、500 m(工况 8)共 4 种工况的港池、港池底部通道及太平湖区域的流速特征值进行分析。由结果可知:

1) 港池底部通道开口宽度 500 m 工况条件下, 港池内平均流速最大值可达 0.25 m/s; 其余工况港池内平均流速不足 0.15 m/s。

2) 港池底部通道开口宽度 50、100、200 m 工况条件下, 随着通道宽度的增加, 港池底部通道内平均流速略有升高, 平均流速最大值均在 1.0 m/s 以上; 通道开口宽度 500 m 工况条件下, 由于过水断面面积急剧增大, 港池内流速略有降低, 平均流速最大值为 0.96 m/s。

3) 港池底部通道开口宽度 200 m 和 500 m 工况条件下, 通道出口附近最大横流可达 1.1 m/s 以

上, 开口宽度 50、100 m 工况条件下, 最大横流分别为 0.62、0.92 m/s。

4) 港池底部通道开口宽度越大, 局部流态改变越大, 对底部通道周边流场的影响就越大。为避免港池底部通道内部及通道出口附近流速过大而造成桥墩附近及通道底部的剧烈冲刷, 通道开口宽度 50、100 m 工况优于 200、500 m 工况。

3.3 水体交换模拟分析

参照国际航运协会(PIANC)规程规定^[9], 对于半日潮而言, 在人工修筑围垦工程后, 围垦区内水体交换率如能满足 4 d 交换 63%, 则认为水体交换情况良好; 如能满足 10 d 交换 63%, 则认为水体交换情况一般; 如需更长时间才能达到 63%, 则认为水体交换情况较差。

水体交换研究将港池和太平湖作为一个整体系统(图 4), 于初始时刻在港池和太平湖内同时投放浓度为 1.0 的守恒性物质, 外海水域物质浓度设置为 0.0, 水交换模拟时段选取实测连续潮作用 1 个月, 经一定时间过程后, 自系统内扩散至外海的物质总量占系统内初始物质总量的百分比即为整体系统的水体交换率。

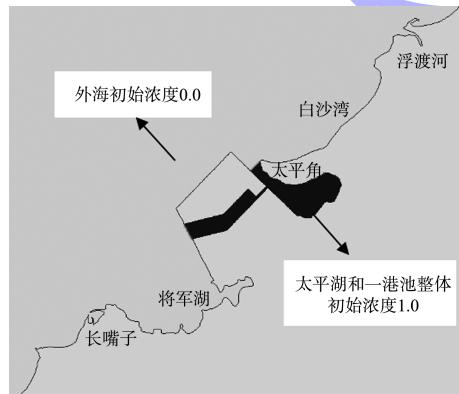


图 4 初始时刻浓度分布

3.3.1 通道底高程影响

在港池底部通道宽度 200 m 条件下, 分析通道不同疏浚深度-3.0 m(工况 5)和-15.5 m(工况 6)对整体系统和港池水体交换能力的影响。两种工况的整体系统水体交换率时间过程见图 5, 由结果可知:

两种工况的整体系统水体交换率分别为 68%、71%, 水体交换情况均较好, 能够满足国际规范要求。

2) 水体交换 30 d, 示踪剂的浓度扩散基本达到稳定状态, 此时通道底高程-3.0、-15.5 m 两种工况的整体系统水体交换率分别约为 85%、88%。

3) 港池底部通道的疏浚深度对水体交换率影响不大。通道开口宽度 200 m 条件下, 底高程-15.5 m 工况的水体交换情况略好于底高程-3.0 m 工况, 但两种工况差异较小。考虑通道浚深的经济成本和可能引起的泥沙回淤, 通道底高程-3.0 m 基本合理, 但工程实施后应考虑通道冲刷影响、注意桥墩及构筑物的防护问题。

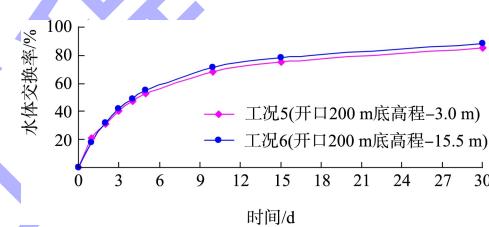


图 5 不同通道底高程整体系统水体交换率时间过程

3.3.2 通道宽度影响

在港池底部通道底高程-3.0 m 条件下, 分析通道不同开口宽度 0、50、100、150、200、300、500 m 对整体系统和港池水体交换能力的影响。各工况的整体系统和港池的水体交换率见表 2、3, 交换 10 d 后水体交换率变化情况见图 6、7, 由结果可知:

1) 港池底部通道不开口条件下, 港池的水体交换情况较差。水体交换 10、30 d 后, 工况 1 的港池水体交换率分别为 27%、37%。因此, 环抱式长港池采用单口门对水体交换是不利的。

2) 港池底部通道开口条件下, 不同的开口宽度引起的整体系统的水体交换率差异较小。水体交换 10 d 后, 各工况的整体系统水体交换率均在 66% 左右; 水体交换 30 d 后, 各工况的整体系统水体交换率均在 85% 左右。通道开口宽度的增加, 使得港池和太平湖之间水体的流通增强, 但整个系统的纳潮容积并未发生明显变化, 因此整体系统的水体交换率无明显差异。

1) 水体交换 10 d 后, 通道底高程-3.0、-15.5 m

3) 港池底部通道的开通对于改善港池水体交换能力效果明显。开口条件下, 相比不开口时, 4 d 后港池水体交换率提高 30% 以上, 10、30 d 后水体交换率提高约 50%。随着港池底部通道开口宽度的增加, 港池水体交换率呈现先增加后趋于稳定的趋势, 4、10 d 后开口宽度 100~200 m 工况的水体交换率的水体交换率较开口宽度 50 m 工况的水体交换率

分别提高了 12%、6%; 开口宽度 100 m 以上的各工况水体交换率差异较小。

4) 从改善港池水环境质量的角度, 港池底部通道开口宽度不宜过小。综合来看, 开口宽度 100~200 m 的工况相比开口宽度 50、300、500 m 的工况较优。

表 2 不同通道宽度整体系统水体交换率

时间/d	交换率/%						
	工况 1(0 m)	工况 2(50 m)	工况 3(100 m)	工况 4(150 m)	工况 5(200 m)	工况 7(300 m)	工况 8(500 m)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	25	20	23	22	21	18	18
2	34	30	32	31	31	27	28
3	37	36	39	38	40	36	37
4	40	43	46	45	47	43	44
5	42	49	52	50	53	49	50
10	49	65	67	67	68	66	66
15	54	74	75	75	75	74	74
30	62	85	86	85	85	85	85

表 3 不同通道宽度港池水体交换率

时间/d	交换率/%						
	工况 1(0 m)	工况 2(50 m)	工况 3(100 m)	工况 4(150 m)	工况 5(200 m)	工况 7(300 m)	工况 8(500 m)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	6	13	16	19	20	21	21
2	10	23	28	31	33	33	35
3	14	33	40	43	46	44	46
4	17	43	50	51	55	53	54
5	20	51	57	56	61	58	60
10	27	71	75	75	77	75	75
15	31	80	82	82	83	82	82
30	37	88	90	90	91	90	90

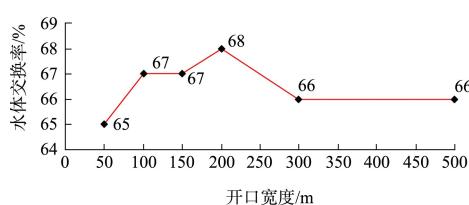


图 6 交换 10 d 整体系统水体交换率变化情况

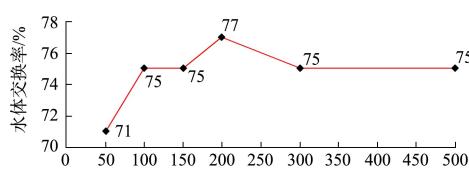


图 7 交换 10 d 港池水体交换率变化情况

4 结论

1) 环抱式长港池水体交换能力与平面布置有直接关系。增加长港池底部与外海的水体交换通道, 港池水体交换率可以提高 30% 以上, 改善水体交换能力的效果明显。研究成果对于环抱式长港池规划方案的制定具有借鉴意义。

2) 水动力模拟结果表明: 长港池底部通道开口宽度越大, 局部流态改变越大, 对底部通道周边流场的影响程度越大。为避免长港池底部通道内部及通道出口附近流速过大、造成桥墩附近及通道底部的剧烈冲刷, 通道开口宽度

不宜过大。

3) 水体交换模拟结果表明: 长港池底部通道疏浚深度对水体交换的影响较小; 通道开口宽度对水体交换的影响较大, 随着港池底部通道开口宽度的增加, 港池水体交换率呈现先增加后趋于稳定的变化趋势。为改善长港池水体交换能力, 考虑到桥梁边坡护底和基础宽度对水体交换的影响, 通道开口宽度不宜过小。

4) 参照国际航运协会(PIANC)关于水体交换评价标准, 综合水动力和水体交换模拟结果, 建议太平湾港区环抱式长港池底部通道静水面宽度(过水断面平均宽度)取100 m左右、底高程取-3.0 m左右。

5) 环抱式长港池底部通道方案的确定, 须统筹兼顾潮流、水体交换、泥沙淤积、景观效应等多方面因素。建议从泥沙淤积角度进一步论证港池底部通道具体设计参数, 同时密切关注桥墩附近和通道底部可能的冲刷现象及冲刷泥沙对港池、航道泥沙淤积的影响。

(上接第16页)

4 结语

1) 白市船闸省水运行时, 除门楣空化外, 泄水阀门底缘、升坎发生空化, 最小相对空化数分别为0.63、0.63; 非省水运行时, 泄水阀门跌坎、底缘、升坎均发生空化, 尤其是阀门在0.1开度时承受水头近60 m, 空化条件恶劣, 跌坎、底缘、升坎的最小相对空化数为0.51、0.53、0.17。

2) 推荐的门楣体型在阀门开启过程中可自然形成较稳定的通气量, 能够充分抑制门楣、底缘空化。

3) 门楣自然通气+跌坎强迫通气的联合通气措施可充分抑制白市船闸输水阀门空化, 根据掺气的运动轨迹, 门楣自然通气抑制门楣和底缘空化, 跌坎强迫通气主要抑制跌坎与升坎空化, 同时对抑制底缘空化有利, 门楣、跌坎处推荐通气流量

参考文献:

- [1] 左天立, 查雅平, 聂向军, 等. 生态型港口规划理念研究[J]. 水运工程, 2017(5): 56-61.
- [2] 何杰, 叶小强, 辛文杰. 环抱式单口门港池水体交换能力研究[J]. 水运工程, 2009(2): 87-91.
- [3] 张玮, 王国超, 刘燃, 等. 环抱式港池水体交换与改善措施研究[J]. 水运工程, 2013(4): 37-41.
- [4] 罗锋, 廖光洪, 杨成浩, 等. 乐清湾水交换特征研究[J]. 海洋学研究, 2011, 29(2): 79-88.
- [5] 刘浩, 潘伟然, 骆智斌. 深沪湾水交换特性的研究[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(2): 157-160.
- [6] 解鸣晓, 李孟国, 麦苗, 等. 大连太平湾港区人工湖工程水体交换数值模拟研究[J]. 水道港口, 2018, 39(01): 17-24.
- [7] 李孟国, 韩志远, 解鸣晓, 等. 辽东湾东岸太平湾深水港建港条件研究[J]. 水道港口, 2016, 37(5): 465-472.
- [8] 姚姗姗, 解鸣晓. 大连太平湾港区一港池潮流及水体交换数学模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2016.
- [9] PIANC RecCom Working Group. Protecting water quality in marinas[R]. Brussels: PIANC RecCom Working Group, 2008.

(本文编辑 武亚庆)

在原型中为0.03 m³/s。

参考文献:

- [1] 胡亚安, 张瑞凯, 郑楚珮. 反弧形输水阀门底缘空化减免措施研究[J]. 水利水运科学研究, 1994(Z1): 71-79.
- [2] 胡亚安, 郑楚珮. 葛洲坝一号船闸输水阀门空化特性原型监测[J]. 水科学进展, 1994(3): 235-241.
- [3] 王新, 胡亚安, 严秀俊, 等. 高水头船闸阀门顶缝空化切片试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 14-19.
- [4] 薛淑, 严秀俊, 向茂铭. 清水江白市枢纽船闸关键技术试验研究: 充、泄水阀门水力学模型试验[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020.
- [5] 南京水利科学研究院. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 武亚庆)