



科伦坡港口城基础设施项目 水交换物理模型试验研究

吴门伍¹, 张 军², 马明生³, 刘国珍¹, 严 黎¹

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控实验室, 广东 广州 510611;
2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 3. 重庆航运建设发展有限公司, 重庆 401121)

摘要: 斯里兰卡科伦坡南港南侧新建科伦坡港口城基础设施项目为填海工程, 区域内设有人工河道、游艇泊位、人造沙滩等。工程实施后工程水域内水体交换是该工程面临的一大问题。通过潮汐物理模型试验, 对工程实施后工程水域水动力特性、过流能力、水交换情况进行研究。研究结果表明: 人工水系各水域存在较大的差异性, 南游艇码头区水动力最弱; 人造运河 3 个弯道的弯顶位置不论南向流北向流均为弱流回流区; 但只要南北口存在微小的水位差, 就能形成一定的置换流量。模型试验结果表明, 水交换能力主要取决于单向流流速大小及其持续时间。在试验条件下, 人造运河水体交换基本可满足 10 d 交换一次的要求; 由于南游艇码头区深度内凹, 水动力最弱, 水体交换不能满足要求。

关键词: 科伦坡; 港口城; 水交换; 物理模型; 试验

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0086-07

Water exchange physical model test on Colombo port city development project

WU Men-wu¹, ZHANG Jun², MA Ming-sheng³, LIU Guo-zhen¹, YAN Li¹

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Key Laboratory of the Pearl River Estuarine Dynamics and Associated Process Regulation, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China;

2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 3. Chongqing Shipping Construction and Development Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: The Government of Sri Lanka has been planning to build Colombo port city development project at the south of Colombo South port, where artificial water system, marine basin and artificial sandy beach have been built. The water exchange in this area is one of the most complex problems after building the project. Through the tidal physical model test, the hydrodynamic characteristics, flow capacity and water exchange of the water in the project studied. The result shows that big difference exists among each waters of the artificial river system. The hydrodynamic of southern marina basin is the weakest; the bend top position of the 3 corners in the Canal is stagnation regions and weak current recirculation regions both for south current and north current. But as long as small water level difference exists at the south and north entrances, a certain number of displacements flow may be formed. The model test result shows that water exchange capability is mainly depend on the unidirectional flow velocity and duration. Under experiment conditions the water exchange in the Canal can basically meet the requirement of fulfilling exchanging once per every 10 days and because the southern marina basin is concaved and has the weakest hydrodynamic, it cannot meet the water exchange requirement.

Keywords: Colombo; port city; water exchange; physical model; experiment

斯里兰卡政府自 20 世纪 70 年代起即计划通过填海造地的方式扩大科伦坡城市的临海核心

区—科伦坡港周边区域。根据斯里兰卡城市发展局 (UDA) 和斯里兰卡港务局 (SLPA) 的发展构

收稿日期: 2014-05-29

作者简介: 吴门伍 (1976—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水力学及河流动力学研究。

想, 新的填海造地的发展计划要与科伦坡南港的建设结合进行。拟规划建设填海造地面积约 2.52 km², 区内功能规划将融合商业、旅游、休闲、文化、居住等功能于一体, 成为科伦坡市核心市区的重要组成部分以及又一个城市地标。

斯里兰卡科伦坡港口城基础设施项目位于科伦坡南港的南侧, 依托南港防波堤向南填海形成陆域, 外侧建设防波堤对内侧陆域进行掩护, 区域内规划有人工河道和游艇泊位等。通过水体交换整体物理模型试验, 主要研究工程水域内水体交换等问题, 验证水体交换率, 若水体交换差, 提出改善水体交换的措施, 为工程设计提供参考。

1 工程概况^[1]

整个港口城由防波堤和陆域组成。陆域及防波堤堤顶高程均为 +4.0 m。港口城总形成陆域面积约为 2.52 km² (一期二期均为 1.26 km²), 包括主体陆域面积及其东南侧“象牙”形状岛面积。整个陆域北侧为现有科伦坡南港的防波堤, 东侧为现有道路, 西侧和南侧被一道环形防波堤包围掩护, 以减少波浪对吹填造地区的影响。西侧防

波堤布置在等高线约 -20 m 处, 南侧防波堤基本垂直于等深线布置。防波堤中心线距陆域外护岸最近距离约为 380 m, 确保在平均海面条件下, 水面宽度不少于 300 m, 以满足景观要求。防波堤后方人造沙滩采用 1:20 的边坡。

项目南侧及西北侧各布置了一处游艇码头区。其中南侧游艇码头区拟建在象牙岛内侧, 整个象牙岛及外防波堤为其提供掩护, 以满足游艇靠泊的要求; 西北侧游艇码头区处在外防波堤北侧口门处, 西北浪可通过口门直接进入游艇码头附近的水体, 为减小波浪对游艇码头的影响, 在游艇码头西侧另布置了防波堤 (内防波堤) 1 道, 顶高程 +4.0 m。

为防止沙滩上沙的流失, 在防波堤北侧、南侧开口处拟布置 2 座拦砂堤, 北侧拦砂堤顶高程为 -8 m, 宽约 392 m, 南侧拦砂堤顶高程为 -5 m, 宽约 324 m。同时, 在垂直于高尔路的方向拟布置一道长约 430 m、顶高程为 -1.0 m 的潜堤, 以减少沿岸输沙和掩护南侧游艇区护岸。主体陆域内规划一道宽约 110 m、底高程为 -3 m 的人造运河 (图 1)。

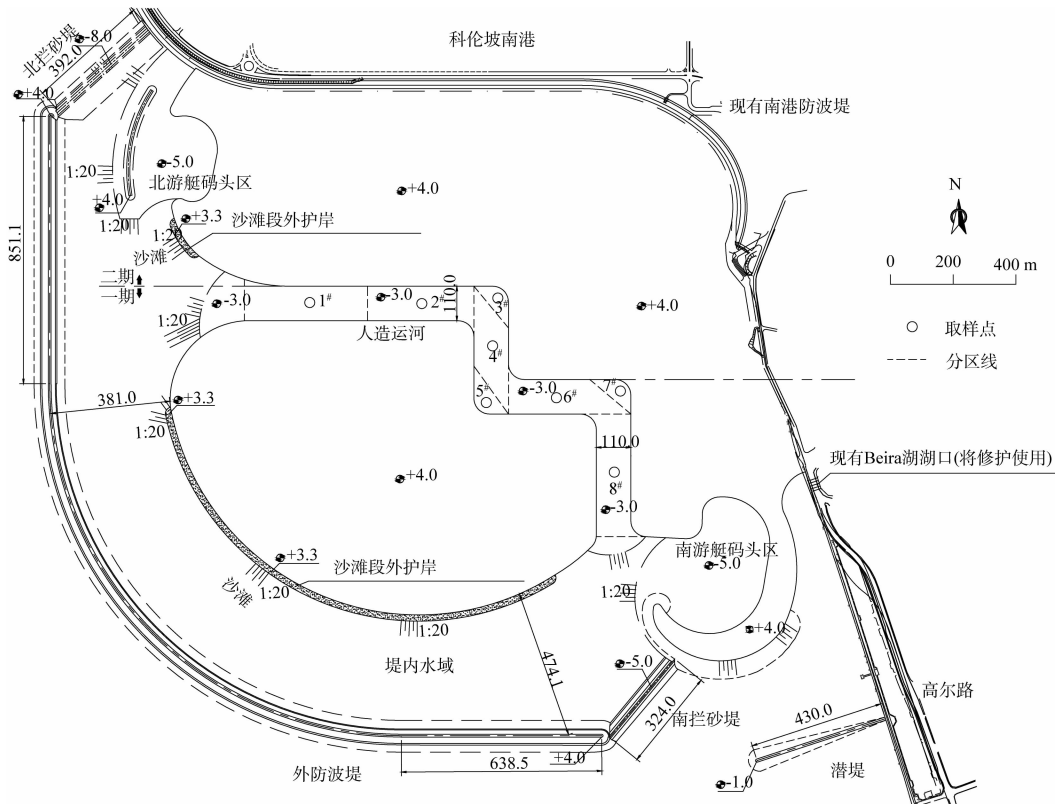


图 1 工程设计及水样分区

2 模型设计及验证

2.1 模型设计

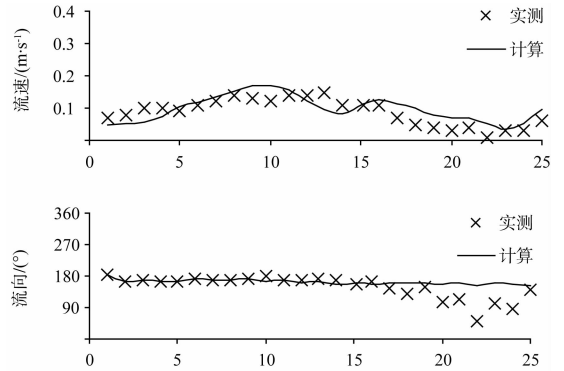
本次研究采用整体潮汐物理模型对内河水系水流动力、污染水体的输移进行模拟试验,研究不同情况下工程区内水流条件及水体交换情况,并通过试验对设计方案提出优化建议,为科伦坡港口城基础设施项目人工水系的水环境改善提供技术依据。

根据国内外类似模型相关研究经验^[2-3],弯道及分汊河道水动力模拟受模型变率影响较大,通常要求模型变率较小。本次试验研究重点为人造运河水域,北拦砂堤-南拦砂堤之间水域为拟建人工水系区域。考虑到模型试验目的及任务要求,模型包含整个人工水系及部分海域,西北出北口-8 m 拦砂堤并外延 220 m,东南出-1 m 潜堤往南外延 220 m,模拟原型南北长约 3.64 km、东西宽约 2.0 km。根据研究问题的特点,确定模型为变态模型,模型水平比尺为 60,垂直比尺为 10,变率为 6^[4]。

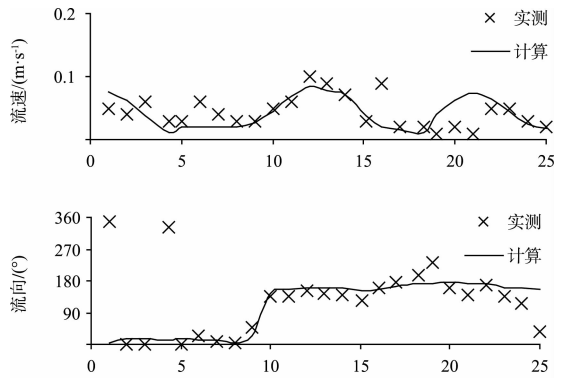
2.2 模型验证

由于实测资料匮乏及受物理模型范围限制,本模型采用数学模型计算结果进行验证。数学模型对东南季风期及西北季风期该区域内 2 个水位、2 个流速测点进行验证。验证结果表明^[5],各水文时期潮位过程模拟结果与实测值符合较好,流速和流向的变化趋势与实测数据吻合也较好,不同

时期流速、流向验证结果如图 2 所示。物理模型验证结果表明:试验观测水位和数模计算水位值最大相差 ±0.002 m,物模测量垂线平均流速略大于数模计算值,表明模型的水流运动与原型相似。图 3 所示为水流由北往南流时物理模型试验与数学模型计算的水流流速对比。



a) 西南季风期C2大潮流速、流向



b) 东北季风期C1小潮流速、流向

图 2 不同时期流速、流向验证结果

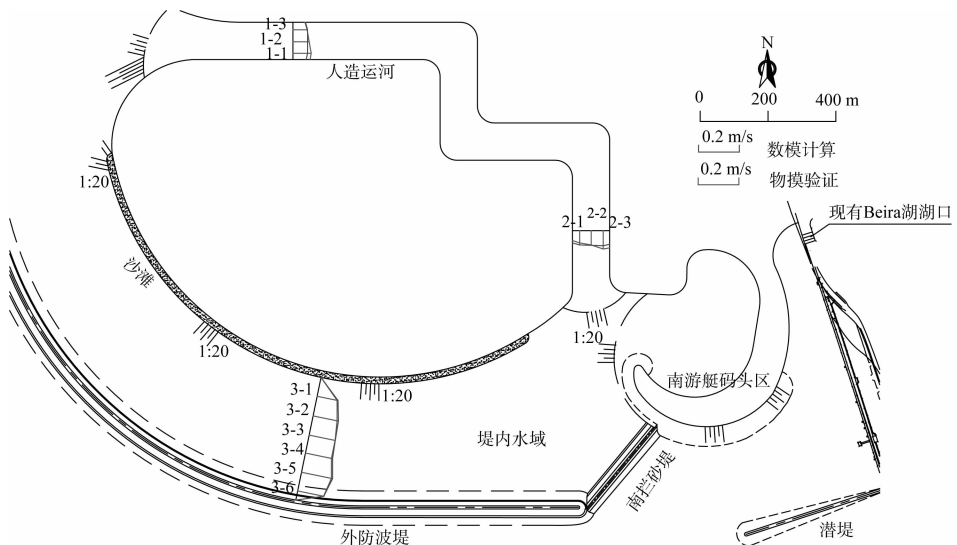


图 3 物理模型试验与数模计算流速对比

可以认为: 模型的设计和制作加糙方式、试验方法正确, 模型测试采用计算机自动控制、采集和处理数据等稳定、可靠, 可用于方案试验。

3 模型试验及结果分析

3.1 水动力特性

为研究工程建设后人造运河内的水动力情况, 分别进行了由北往南及由南往北的恒定流试验, 以对工程实施后工程各区域水动力特性进行宏观把握。

1) 水流由北往南流。

图4显示了由北往南恒定流试验情况下人造运河内水动力情况。由图4可见, 水流由北口进入人工水系后, 在人造运河进口前分成两股, 一股沿人造运河流动, 一股沿堤内水域流动。受地形影响, 人造运河进口处水动力轴线偏向南侧, 在北侧出现漩涡回流区。在人造运河第1个弯道的北侧、第2个弯道的南侧存在滞流区, 人造运河南侧出口的西侧存在缓流区。

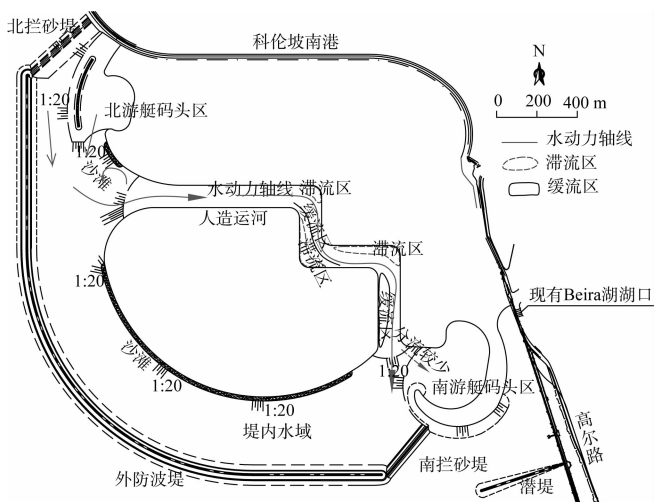


图4 由北向南流宏观流态及水动力分区

①人造运河北进口段。

北侧水流于北口潜坝位置分为2股, 分别经主槽和北游艇码头区向南流动, 在北侧沙滩位置, 2股水流汇合, 同时, 水流进行二次分流, 一股进入人造运河浅河道, 一股进入堤内水域。在汇合过程中, 北游艇码头南侧有沙滩, 对水流形成挑流; 汇流后, 在沙滩南侧, 即人造运河入口水域

形成漩涡。试验结果表明, 回流水域面积大小与水位高低有关, 当水位较低时, 沙滩出露面积大, 凸出岸线较多, 水流绕流经过沙滩再进入人造运河时水流弯角大, 此时, 沙滩对水流的挑流作用明显, 回流区大; 当水位较高时, 沙滩大部分被淹没, 水流较为平顺地流经沙滩, 挑流作用减弱, 回流区减小甚至消失。

②人造运河中间弯道段。

人造运河的3个弯道转角均为 90° , 水流随着河道转弯, 但转弯半径大于河道, 弯角位置出现水流冲击河道边壁的现象; 河道弯角位置有明显的回流区及滞留区, 第2个弯角位置滞留区范围最大。该段河道内, 水流主流区、缓流过渡区、滞留区并存。

③人造运河南出口段。

水流经过第3个弯角后, 河道变得顺直, 水动力轴线开始向河道中间偏转, 主流逐渐扩散开来, 南侧出口位置水面扩宽, 水流减缓。

2) 水流由南往北流。

图5为由南往北恒定流试验情况下人造运河内水动力情况。由图5可见, 由于南口较窄较浅, 过坎流速较大, 水流由南口进入人工水系后, 水流直冲南口对岸沙滩岸线, 再分2股水流, 小股进入人造运河, 大部分进入堤内水域, 南游艇码头区成为弱流区。在人造运河3个弯道的弯顶处均存在滞流区, 人造运河北端出口的南侧存在缓流区。且人造运河中部直角弯顶是运河水动力最弱的区域, 与由北向南流相比, 弱流区范围不完全相同, 但直角弯顶水域均呈现为弱回流特征。水流流出人造运河后, 与堤内来流汇合, 经北口流向海外, 由于人造运河出口为喇叭型放宽水域, 运河出流与堤内水域来流在宽阔水域交汇, 形成局部弱流或弱回流。

①人造运河南进口段。

南侧水流经南拦砂堤进入人工水系, 来流直接冲击南侧沙滩, 并在该位置分流, 其中一股进入人造运河, 向北上溯, 该段河道水流顺势而流, 未有偏转。

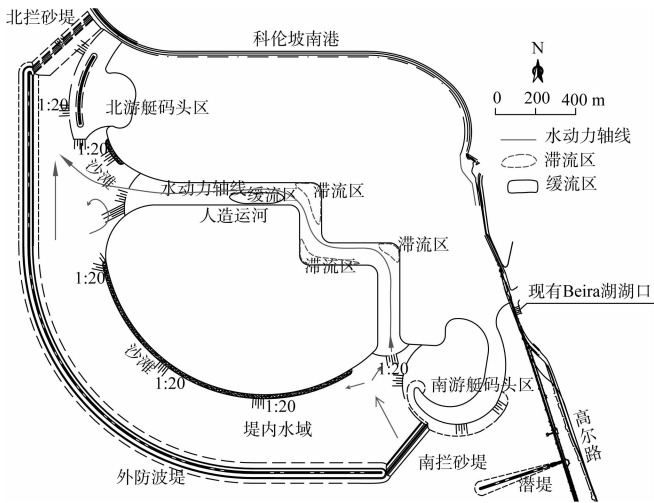


图5 由南向北流宏观流态及水动力分区

②人造运河中间弯道段。

水流由南往北流经人造运河时,水动力轴线变化特点与水流由北往南流相类似,由于水流的偏转,弯角水域同样成为滞留区。水流经过弯道后偏转,主流偏北冲击顺直段北侧堤岸,南岸为缓流区,经过第2个弯角后,主流靠近东侧,在主流的偏转过程中,水流顶冲河岸,弯角位置形成滞留区,其中第2个弯道位置最为严重,其余2个弯道水域次之。

③人造运河北出口段。

水流经过北侧弯道后,河道顺直,主流开始逐渐扩散,顺河道进入北侧水域,在北侧码头下游与堤内水流交汇,两股水流交汇处形成回流区。

3.2 过流能力

为分析工程实施后人工水系的过流能力,采用恒定流方法进行了人工水系过流能力的试验研究。

1) 南北侧水位流量关系。

由试验结果可知,随着南北两侧水位差的增加,流经堤内水域和人造运河的总流量也在增加。水流由北往南流时,在南北侧水位相差0.01 m的情况下,流经堤内水域和人造运河的总流量可达446 m³/s;水流由南往北流时,在南北侧水位相差0.008 6 m的情况下,流经堤内水域和人造运河的总流量可达400 m³/s。

2) 流速分布。

不同流量下,堤内水域及人造运河内的流速

分布较为一致。水流由北口进入后走直,主流沿堤内水域流向南端,人造运河进口段南侧流速明显大于北侧;水流进入中间弯道段时,受弯道影响,弯段中间西侧流速极小,甚至为0;水流进入南端时,同样受弯道的影响,河道东侧流速明显小于河道西侧。

在北口进口流量为300 m³/s时,人造运河表层流速一般为0.08~0.14 m/s,堤内水域表层流速一般为0.08~0.16 m/s;在北口进口流量为400 m³/s时,人造运河表层流速一般为0.11~0.20 m/s,堤内水域表层流速一般为0.11~0.21 m/s。流速-流量关系表现为:流量增加,流速增大;相同流量下,水位的抬升对流速的影响较小。

3) 分流比。

表1所示为不同流量下堤内水域与人造运河的分流比。在0.5 m高程以下堤内水域与人造运河过流面积比约为5.65:1。但在不同流量下,堤内水域过流占总流量的89%左右,其过流能力是人造运河的8倍多。究其原因,主要是堤内水域面积较大,受河道边壁阻力影响较小,水流顺直,人造运河水深较浅,弯道较多,水流所受阻力较大,因此大部分水流沿阻力较小的堤内水域流过。

表1 不同流量下堤内水域与人造运河的分流比

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	分流比/%		堤内水域/ 人造运河流量比
	堤内水域	人造运河	
300	89.48	10.52	8.51
400	89.04	10.96	8.12

4) 水流流经人造运河时间。

由恒定流试验测量的表层水流流速计算可知,人工水系水流流量由200 m³/s增加到540 m³/s时,水流从进入人造运河至流出人造运河的时间由6 h减小到2个多小时。

可见工程实施后水流流经人造运河的时间即人造运河内水体交换取决于2个因素:①工程两端的水位差及该水位差的持续时间,水位差越大,流速越大,水流流经人造运河的时间越短,越有利于人造运河内的水体交换;②水位差的持续时间越长,则单向流持续的时间越长,也越有利于

人造运河内的水体交换。如南北口有 4 mm 的水位差,人造运河内即可获得 0.10 m/s 的流速,约 6 h 即可将人运河河置换一遍(弱流区除外)。

3.3 典型潮型水交换

1) 试验条件。

采用水力学方法根据实测资料拟合了试验边界条件,同时数学模型计算成果也提供了部分边界条件。受模型试验精度控制及便于两种边界条件的对比,本次典型潮型水交换试验,仅对拟合的和数模提供的西南季风期大潮、东北季风期小潮 2 种边界条件进行,由于风的影响已反馈到水流条件中,本次试验不再单独考虑风的影响。

2) 采样点布置。

根据水动力特性试验成果,将人造运河河道分为 8 个不同区域(图 1),分别布置采样点进行取样分析。不同分区水体体积计算水深,考虑最不利影响,选取模拟潮型最高潮位。

3) 试验方法。

试验时以罗丹明为示踪剂,采用荧光分度计测量示踪剂的浓度。罗丹明为微红的保守物质,试验过程中不降解。试验时,观测不同水文组合情况下人造运河内的示踪剂浓度随时间的变化情况,以反映水体交换对区内不同水域水质的影响。

试验时,当走潮至高潮位时将人造运河两端封堵,在人造运河水体中加入罗丹明,此时人造运河蓄水量最大,最不利于水体交换。堤内水域按正常控制条件继续走潮。待染色水体均匀及堤内水域再走潮至高潮位时,打开人造运河隔板,内外连通,罗丹明示踪水体开始输移扩散。每次涨落潮后进行水样采集,采用荧光分度计对采集水样进行测量,监测示踪剂浓度变化,分析水体交换能力。根据采样点示踪剂浓度的变化,得出人造运河水体交换率。

4) 试验结果分析。

西南季风期大潮及东北季风期小潮情况下人造运河水交换率试验结果见表 2。由表可见:

拟合的西南季风期大潮边界:初始时刻,水流由北往南流,由于南北两侧水位差较小、人造

河流速不大,因此人造运河水体交换较差,第 1 d 前 12 h,人造运河内水体交换仅占 5.3%;后 12 h,水流由南往北流,南北两侧水位差较大、人造河流速也有所增加,因此这期间人造运河水体交换较快,交换率达 41.8%。潮流运动 2 d 后,人造运河水体交换率达到 57.8%,3 d 后水体交换率可达到 69.9%。

表 2 人造运河水体交换率

时间/h	西南季风期大潮/%	西南季风期大潮(数模边界)/%	东北季风期小潮/%	东北季风期小潮(数模边界)/%
6	1.7	27.6	49.7	90.2
12	5.3	52.6	65.1	98.5
18	10.2	62.1	72.7	99.1
24	41.8	69.2	80.1	
36	45.9	76.6	88.8	
48	57.8	83.4	91.8	
60	61.3	88.2	93.7	
72	69.9	92.2	95.3	

数模计算的西南季风期大潮边界:初始时刻,水流由北往南流,因单向流持续时间不长,水体在人造运河内作往复运动,但由于南北两侧水位差比较大、人造运河水流流速也相对较大,因此人造运河也存在一定量的水体交换,第 1 d 前 12 h,人造运河水体交换率为 52.6%;24 h 内,达到 69.2%。潮流运动 2 d 后,人造运河水体交换率达到 83.4%,3 d 后水体交换率可达到 92.2%。

拟合的东北季风期小潮边界:水流始终由南往北流,初始时刻,南北两侧水位差较大、人造运河水流流速也较大,因此人造运河水体交换较好,第 1 d 前 12 h,人造运河水体交换就达到 65.1%;后 12 h,南北两侧水位差减小、人造河流速也有所减小,但水流仍然由南往北流,因此这期间人造运河水体交换率也有所增加,达到 80.1%。潮流运动 2 d 后,人造运河水体交换率达到 91.8%,3 d 后水体交换率可达到 95.3%。

数模计算的东北季风期小潮边界:水流始终由南往北流,初始时刻,南北两侧水位差较大、人造运河水流流速也较大,因此人造运河水体交换很好,第 1 d 前 6 h,人造运河水体交换就达到 90.2%;前 12 h,南北两侧水位差进一步增大、

人造运河水流流速也有所增大,人造运河水体交换达 98.5%;前 18 h,南北两侧水位差有所减小,但水流仍然由南往北流,因此这期间人造运河水体交换率也有所增加,达到 99.1%。由于模型的测量误差,试验未再进一步测量。但由试验结果可知,该种工况下,人造运河内水交换效果非常好。

不同边界条件试验结果也表明,单向流流速大小及其持续时间对水交换成果有较大的影响。单向流流速越大,水交换越快;单向流持续时间越长,水交换能力也越好。

人工水系各区域水交换情况具体分析如下:

①人造运河南、北口段。

人造运河南、北口段距离拦砂堤均较近,随着涨落潮流的交换,外海海水可充分补充进该两段水域,该处水体可有效得到交换。

②人造运河弯道段。

在人造运河弯道段,水动力轴线附近的水体能够得到有效交换,但在 3 个弯顶的滞流区,水体交换较差,水交换周期远大于整个人造运河水交换周期。

③北游艇码头区。

北游艇码头区为半开敞式水域,在双向流条件下均有水体通过游艇码头区,主流向顺坝而流,凹入码头区部分水体交换较差,双向流条件下均为回流区,水体为弱交换,更新能力有限。

④南游艇码头区。

南游艇码头区几乎为封闭水域,只有约 210 m 的朝东窄口连接堤内水域。南游艇码头区水体随着潮位的涨落水流进出码头区,但是由于潮差变化有限,水体交换量不大,整个港池水体表现为打转、滞流,交换能力差。南向流条件下,人造运河出流进入南游艇码头区的水量很有限,无论人造运河水质好坏,均对南游艇码头区水质影响极小。

⑤堤内水域。

堤内水域为整个人工水系的水体交换主通道,水面开阔,外防波堤堤身为扭王字块,可透水,在外海洋流、波浪作用下,堤内水域与外界海洋水体可实现有效互动,水动力环境优越,水体交换不存在问题。

4 结论

1) 本模型主要为水交换定床试验,模型水平比尺为 60,垂直比尺为 10。模型验证结果表明,模型设计及验证达到了规范要求,模型试验是成功的。

2) 水动力特性试验结果表明,人工水系各水域存在较大的差异性,南游艇码头区水动力最弱;人造运河 3 个弯道的弯顶位置是水流的滞流区,不论南向流北向流均为弱流回流区;堤内水域环境容量大,水动力条件较好。

3) 过流能力试验研究表明,只要南北口存在微小的水位差,就能形成一定的置换流量。如南北口有 4 mm 的水位差,人造运河内即可获得 0.10 m/s 的流速,约 6 h 即可将人造运河置换一遍(弱流区除外)。

4) 典型潮物模试验结果表明,人造运河水体交换基本可满足 10 d 交换一次的要求;人造运河弯道弯顶局部存在回流区,对水体交换率有一定影响,但也基本满足水体交换的要求;由于南游艇码头区深度内凹,水动力最弱,达不到水体交换的要求。

5) 水交换试验成果表明:水交换能力主要取决于单向流流速大小及其持续时间。以原型测流资料为参考,表明人工水系存在持续时间较长的单向流特点,将有利于人工水系的水体交换。

参考文献:

- [1] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 科伦坡港口城发展项目设计文件[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2013.
- [2] 姚仕明. 实体模型变率研究[J]. 长江科学院院报, 1999(5): 1-4.
- [3] 窦希萍. 物理模型变率影响研究进展[J]. 水科学进展, 2007(11): 907-914.
- [4] 珠江水利委员会珠江水利科学研究院. 斯里兰卡科伦坡港口城基础设施项目潮流水体交换物理模型试验及泥沙回淤分析报告[R]. 广州: 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 2014.
- [5] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 斯里兰卡科伦坡港口城基础设施项目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, 2014.