DOI: 10.16198/j. cnki. 1009-640X.2015.01.014

陈静,莫思平,徐群.深中通道工程对珠江口水动力环境的影响[J]. 水利水运工程学报, 2015(1):96-104. (CHEN Jing, MO Si-ping, XU Qun. Impacts of Shenzhen-Zhongshan bridge project on hydrodynamic environment of Pearl River estuary [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1):96-104.)

# 深中通道工程对珠江口水动力环境影响

# 陈 静,莫思平,徐 群

(南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

摘要:深圳至中山跨江通道工程(简称深中通道)连接深圳和中山两市,跨越珠江口内伶仃洋"三滩两槽",大型人工岛及大量桥墩的存在必然对珠江口水域的水流动力环境造成一定的影响。通过伶仃洋潮流物理模型试验,研究深中通道各工程方案对珠江口水动力环境的影响。研究结果表明:A2方案(伶仃航道隧道+矾石航道桥梁)对潮位影响最大、其他次之;人工岛及桥墩附近水域流态变化较明显,以人工岛最大,通风井、锚碇、主塔、索塔等建筑物次之,非通航桥墩附近流态变化不明显,桥轴线5 km 以远水域已基本不受工程影响。总体而言, 各工程方案对伶仃洋滩槽格局影响都不大,结合其他专题研究,一致推荐 A3 方案(伶仃航道桥梁+矾石航道隧道)作为深中通道合理可行方案。

关键 词:伶仃洋河口;深中通道工程;物理模型;水动力环境

中图分类号: TV148; TV131.6 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2015)01-0096-09

随着人类发展空间向海洋不断延伸,跨海大桥建设已经渐趋普遍,世界各临海国家,尤其是欧美日等发 达国家均能看到跨海大桥。我国近年来跨海大桥建设也快速发展,东海大桥的建成标志着我国桥梁建设真 正从江河跨向了海洋<sup>[1]</sup>,之后逐步建设了多座跨海大桥,如青岛胶州湾、杭州湾等跨海大桥,在建的有港珠 澳、泉州湾、南澳等跨海大桥。国内众多学者针对跨海大桥的建设对周边水动力环境的影响开展了大量研 究。唐军建等对泉州湾跨海大桥的影响做了数值模型分析<sup>[2]</sup>;韩海骞等对杭州湾跨海大桥对钱塘江河口水 流的影响进行了阐述<sup>[3]</sup>;庞启秀等进行了跨海大桥桥墩对周围海区水动力环境影响数值模拟<sup>[4]</sup>;徐群等通 过物模就港珠澳大桥对周边水流环境的影响做了深入研究<sup>[5-9]</sup>;季荣耀等<sup>[5]</sup>还讨论了人工岛不同形态、不同 位置等对水流环境的影响。

深中通道工程(深圳至中山跨江通道)是连接珠江口东、西两岸深圳和中山两市的一条跨越珠江口内伶 行洋的通道。项目拟考虑全桥、东隧西桥(矾石水道隧-伶仃水道桥)、西隧东桥(伶仃水道隧-矾石水道桥) 和全隧4种建设方案(图1),其中人工岛长625 m,宽175 m;通风井长240 m,宽130 m;锚碇直径86 m;桥墩 迎水面宽约27 m。不同方案的主要阻水建筑物所处的水流环境不同,人工岛布置也不尽相同,各方案的实 施必将引起伶仃洋水流环境的变化,这种变化对周边港口航道及海洋环境都可能带来不利影响。因此,评估 各不同方案对伶仃洋水流环境的影响差异,对选取较优方案、减少工程负面影响有重要意义。

1 工程区自然条件和大桥工程方案

伶仃洋是珠江口东四口门注入的河口湾,呈喇叭状,走向接近 NNW-SSE 方向,湾口宽约 30 km(澳门至 香港大濠岛之间),纵向长达 72 km,水域面积 2 110 km<sup>2</sup>,伶仃洋水下地形具有西部浅、东部深的横向分布特

收稿日期: 2014-06-08

**作者简介:** 陈 静(1977-),女,河北保定人,工程师,硕士,主要从事港口航道物理模型试验研究。 E-mail: chenjing@nhri.cn

点和湾顶窄深、湾腰宽浅、湾口宽深的纵向分布特点,水下地形呈"三滩两槽"的基本格局。伶仃洋为弱潮河口,具有潮差小、潮量大、潮流强的特点。潮流是塑造和控制滩槽格局的主要动力因素,近百年来伶仃洋湾内水下地形长期维持稳定的"三滩两槽"基本格局<sup>[5]</sup>。

考虑到跨江通道建设应尽可能减轻对珠江口防洪安全的影响,工程设计单位提出了4个平面布置方案: A1(全桥方案)、A2(桥隧结合,伶仃航道隧道+矾石航道桥梁方案)、A3(桥隧结合,伶仃航道桥梁+矾石航道 隧道方案)、A4(长隧方案、伶仃、矾石航道均为隧道)。桥位比选方案及主要建筑物结构示意见图1和表1。



图 1 各方案布置及主要建筑物结构(水位:m,其他:mm) Fig. 1 Layout of each scheme and main structures of the bridge(unit: water level in m, others in mm)

## 表1 4个方案比较

	Tab	. 1 Comparison of four set	hemes	
	A1/全桥方案	A2/西隧东桥	A3/西桥东隧	A4/全隧道
总长/km	54. 32	53. 52	50. 85	49.915
横门水道桥	为(96+144+480+144+96) 21.8 m	m 跨径钢箱梁斜拉桥;索塔	基础为 32 根 D2.8m 桩基础;	索塔承台顺桥向尺寸宽度为
西人工岛 (长 625 m,宽 175 m)	无	在伶仃航道两侧,设置2 座西人工岛,两岛距离为 6 km	在伶仃航道东侧 4.5 km 左右设置1座西人工岛	伶仃航道西侧 4.3 km 处设 置 1 座西人工岛
伶仃水道桥	为(588+1 638+588) m 三 跨吊悬索桥;基础为 50 根 D2.8 m 桩基础;索塔承台 阻水宽度为 33.4 m;锚碇 基础为圆形沉井基础,沉 井直径为 90 m	无	桥型结构同 A1,位置在 A1 桥位上游 2 km 左右	无
矾石水道桥	为主跨(260+700+260)m 索塔基础为50根D2.8m 为33.4m;锚碇基础为圆 72m	三跨吊悬索桥; 桩基础;索塔承台阻水宽度 形沉井基础,沉井直径为	无	无
东人工岛	东人工岛位于防洪治导线	钱以外,东西人工岛(与上面的	的西人工岛是同一个)结构尺	寸,均为长 625 m,宽 170 m

2 模型设计与结果分析

#### 2.1 相似条件

为了使模型内潮汐水流运动与原型相似,模型除满足几何相似条件外,必须服从同一种运动规律,并为 相同的物理方程所描述。潮汐河口二维不恒定流基本方程式为:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{g}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{u(u^2 + v^2)^{1/2}}{C^2H} = 0$$
(2)

$$\frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{g}\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{v}{g}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{v(u^2 + v^2)^{1/2}}{C^2H} = 0$$
(3)

式中:u,v分别为x,y向垂线平均流速;H为水深;Z为水位;C为谢才系数,如用曼宁公式,则 $C = R^{1/6}/n,n$ 为曼宁糙率系数。

由式(1)~(3)可得模型与原型水流运动相似的比尺条件为:重力相似: $\lambda_u = \lambda_H^{1/2}$ ;阻力相似: $\lambda_u = \frac{1}{\lambda_n} \lambda_H^{7/6} / \lambda_L^{1/2}$ ;水流运动时间相似: $\lambda_u = \lambda_L / \lambda_u$ ,其中 $\lambda_L$ 为水平比尺; $\lambda_u$ 为流速比尺; $\lambda_n$ 为糙率比尺; $\lambda_H$ 为垂直比尺; $\lambda_u$ 为水流时间比尺。这里须指出,潮汐河口大多数较宽浅,水流惯性力与阻力的影响占主导地位,柯氏力的影响很小,因而地球自转效应一般可不予模拟。

在模型设计时,为了保证模型与原型水流相似,必须同时满足:①模型水流必须是紊流,要求模型雷诺数 *Re*<sub>m</sub>≥1 500;②为了避免模型内水流运动受表面张力的影响,要求模型水深 *h*<sub>m</sub>≥1.5 cm。

要保证模型内水流处于阻力平方区,最小水深比尺必须满足:

λ

$$\lambda_{\rm H} \le (V_{\rm p} \Delta_{\rm p} / 60 C_0 p \nu_{\rm m})^{1/5} \lambda_{\rm L}^{7/10} \tag{4}$$

$$_{\rm H} \leq 4.22 \left(\frac{V_{\rm p}H_{\rm p}}{\nu_{\rm m}}\right)^{2/11} \lambda_{\rm p}^{8/11} \lambda_{\rm L}^{8/11}$$
(5)

式中: $V_p$ 为 $\Delta_p$ 为原型床面糙率凸起高度; $C_0$ 为无尺度谢才系数;p为压强; $\nu_m$ 为模型液体黏滞系数; $\lambda_p$ 为原型阻力系数。

## 2.2 模型比尺、范围及验证

或

根据模型相似计算及试验场地确定模型的平面比尺为1:1000,垂直比尺为1:120,变率约为8.3,由此 推算出模型的其他比尺为:水平比尺λ<sub>L</sub>=1000,垂直比尺λ<sub>H</sub>=120,流速比尺λ<sub>ν</sub>=10.95,水流时间比尺λ<sub>i</sub>= 91.32(实际取91),糙率比尺λ<sub>a</sub>=0.769。伶仃洋整体潮流物理模型<sup>[6,8]</sup>范围包括整个伶仃洋河口湾,模拟 水域南北长75 km,东西宽约50 km,模型边界上至虎门口、蕉门口和洪奇门~横门汇合口,上游用扭曲水道 配合量水堰概化纳潮河槽并控制径流下泄;下至伶仃洋湾口,用翻板尾门实现潮汐过程控制;模型西侧的洪 湾水道和东侧汲水门通道采用双向泵模拟潮流进出,典型潮位、流速验证结果见图2。通过水文资料的验证 结果来看,模型较好地模拟了伶仃洋河口潮流动力特性,与原型具有较好的相似性。





Fig. 2 Verification of tidal level and velocity curves for the Shenzhen-Zhongshan bridge

#### 2.3 模型量测设备

模型中潮位采用数字编码震动式水位仪测量,误差为±0.1 mm,测点流速由光电旋桨式流速仪测量,表 面流场采用清华大学研制的"流场实施测量系统"进行采集,系统的测量误差在±5%之间。在试验前均需要 对仪器进行率定,在试验中同步跟踪测量。

3 方案试验及结果分析

试验目的在于了解拟建工程各方案修建后伶仃洋水域流场变化情况,比选出相对较优的方案。根据试验目的,本次模型采用 2011 年 6 月经过验证的洪季大潮资料分析不同工程方案对伶仃洋工程附近水位、流速、流态的影响。

#### 3.1 深中通道对潮位影响

试验主要分析了工程方案对工程区各主要潮位 站及 A3 方案工程上下游区域潮位的影响,测点见图 3,各测站和测点潮位变化见表 2 和表 3。从试验结果 来看:距离桥位较远的内伶仃、赤湾及距离桥位 4 km 以远的站位工程前后变化较小,处在桥位上游 1 000 m 范围内的潮位站变化较为明显;处在桥位上游的潮位 站表现为高潮位降低、低潮位抬高,潮差微减;处在桥





位下游的潮位站在工程实施后低潮位降低、高潮位略有抬高、潮差略有增大;距离横门东水道桥较近的横门 东站潮位变化幅度较大,最大值在 0.05 cm 左右,因此说,各工程方案对工程区潮位的影响在有限的范围内, 远区影响不大。

站点 —		म् म	高潮位变化值	/m		低潮位变化值/m						
	工程前	A1 线位	A2 线位	A3 线位	A4 线位	工程前	A1 线位	A2 线位	A3 线位	A4 线位		
伶仃岛	1.02	0	0	0	0	-1.57	0	0	0	0		
赤湾	1.03	0	0	0	0	-1.52	-0.01	-0.01	-0.01	0.00		
大铲	1.03	0	0.01	0.01	0.02	-1.39	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01		
横门东	1.10	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	-1.23	0.04	0.05	0.04	0.03		
宝安机场	1.22	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-1.42	0.01	0.02	0.01	0.01		
舢板洲	1.19	0	-0.02	-0.01	-0.01	-1.54	0	0.01	0.01	0.01		

表 2 工程前后各潮位站高、低潮位变化 Tab. 2 Variations of high and low tide levels before and after completion of the bridge

表 3 A3 工程前后各潮位站高、低潮位变化

Tab. 3 Variations of high and low tide levels of scheme A3 before and after completion of the bridge

取样点		高潮位/m		低潮位/m			取样点		高潮位/m		潮位/m
编号	距离轴线距离/m	工程前	变化值	工程前	变化值	编号	距离轴线距离/m	工程前	变化值	工程前	变化值
1#	北 1 000	0. 94	-0.03	-1.56	0.04	8#	北 1 000	1.16	0.02	-1.70	0
2#	北 1 000	1.12	-0.01	-1.76	0.03	9#	北 1 000	1.14	0.04	-1.70	0.01
3#	北 1 000	1.09	-0.01	-1.79	0.03	10#	北 1 000	1.14	0.01	-1.54	0
4#	北 1 000	1.15	-0.04	-1.68	0.03	11#	北 2 000	1.27	-0.04	-1.61	0.03
5#	北 1 000	0.88	0	-0.94	-0.01	12#	北 4 000	1.19	-0.02	-1.66	-0.01
6#	北 1 000	1.10	0.02	-1.55	0.01	13#	南2000	1.12	0.04	-1.73	-0.03
7#	北 1 000	1.19	0.03	-1.64	0	14#	南4000	1.24	0.01	-1.75	-0.01
						1					

#### 3.2 建桥对流态影响

试验结果<sup>[9]</sup>表明,各挡水建筑物附近流态变化相似,涨落潮流在其背水一侧形成紊动变化的回流区(见 图 4),但影响尺度有所不同,流态变化幅度与建筑物尺度、所处水流环境密切相关,人工岛相对影响最大。 因此,本文以影响较大的人工岛、通风井、锚碇、索塔等的流态变化进行比较。



图 4 人工岛周边流态 Fig. 4 Simulated flow regime of the artificial island

受人工岛阻水影响,涨落潮时,在人工岛的背水侧形成不同规模的回流区。A2方案西人工岛附近涨潮时回流长度约2000m,落潮时的回流长度约2500m,宽度均约1300m;A3方案西人工岛在其背水面形成了较大范围的回流,落急时刻人工岛下游南侧环流的纵向长度约为4000m,涨急时刻人工岛上游侧回流范围略小一些;A4方案人工岛处在龙穴南水道出口东侧水域,回流范围相对较小、强度较弱。

A4 方案的两个通风井背水面流态变化与人工岛类似,但调整范围较小,落潮时流态回流范围长度约为 2 000 m,涨潮时上游侧流态调整范围约 1 500 m。

通航孔两侧的索塔和锚碇对局部流态有调整影响,东侧索塔和锚碇流态变化幅度相对略大,涨落 潮流态调整范围在上下游各1000 m 以内,西侧涨落潮流态变化范围在上下游 500 m 范围内。

从以上的分析结果来看:深中通道工程 A1~A4 线位方案对潮流场的影响主要发生在工程区附近,以人 工岛最大,通风井、通航区主塔、索塔、锚碇等建筑物次之,非通航桥墩附近流态变化不明显,桥轴线 5 km 以 远水域已基本不受工程影响。

#### 3.3 建桥对工程区流速影响

3.3.1 对滩槽流速的影响 图 5 和表 4 分别给出了滩槽取样点布置图及取样点工程前后流速变化情况。

表 4 滩槽工程前后涨落潮平均流速变化

测点位置		距 A2 轴线		落潮平均变化值/(m・s <sup>-1</sup> )					涨潮平均变化值/(m・s <sup>-1</sup> )				
		距离/m	工程前	A1	A2	A3	A4	工程前	A1	A2	A3	A4	
	XT1-1	北 2 000	0.50	-0.03	-0.03	-0.02	0. 03	0.41	0.02	-0.01	-0.03	-0.03	
	XT1-3	北 1 000	0.21	0.04	-0.02	0.02	0.02	0.18	0	0.02	0.04	-0.01	
	XT1-5	0	0.33	-0.03	-0.02	0.05	-0.01	0.39	-0.02	0	-0.06	0	
开动性	XT1-7	南1000	0.31	-0.04	-0.06	-0.03	-0.01	0.20	-0.01	-0.01	0.02	-0.01	
24 次庄	XT2-1	北1000	0.72	-0.02	-0.05	-0.03	-0.06	0. 59	-0.01	0.03	0.04	0.01	
	XT2-3	0	0.72	0	-0.22	0	-0.03	0.44	0.02	-0.14	0.01	0.02	
	XT2-5	南1000	0.38	0.02	-0.08	0.05	0.02	0.39	-0.02	0.03	-0.03	-0.02	
	XT2-7	南 2 000	0.51	-0.01	-0.02	-0.04	-0.08	0.46	-0.01	0.02	0.01	0.02	

Tab. 4 Variations of ebb and flow mean velocities in bottomland and swale before and after completion of the bridge

(续表)

-1.

サカエレナルナル

测点位置		距 A2 轴线		洛勏干均受化徂/(m・s)								
		距离/m	工程前	A1	A2	A3	A4	工程前	A1	A2	A3	A4
	LD7	北1500	0.47	0.02	0.03	0.03	0.01	0.37	0.02	0.03	0.10	0.06
	LD9	0	0.54	0.04	0.09	0.01	0.04	0.46	0	0.06	0.01	0.03
伶仃航道	LD11	南1000	0.61	0.03	0.03	0.01	0.01	0.52	0	0.12	0.03	0.04
	LD13	南2000	0.70	0.08	0.06	0.04	0	0.52	0.05	0.03	0.07	0.02
	LD15	南 3 000	0.75	0.03	0.05	0	0.01	0.64	0.06	0.08	0.03	0.01
	ZT1-7	北1000	0.46	-0.01	-0.02	0.02	-0.03	0.35	0.01	-0.03	0.01	0.03
	ZT1-9	0	0.58	-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	0.42	0.01	0	0.04	0.01
	ZT1-11	南1000	0.54	-0.04	-0.04	0	-0.01	0.44	-0.03	-0.20	-0.01	-0.02
	ZT1-13	南2000	0.67	0.04	-0.11	0.07	-0.01	0.66	-0.02	-0.03	-0.09	0.03
中湖	ZT2-7	北 2 000	0.45	-0.02	-0.05	-0.03	-0.03	0.34	0.02	0.04	0.02	0.03
甲裡	ZT2-9	北 1 000	0.53	-0.03	-0.08	-0.05	-0.04	0.36	0.01	-0.05	0.02	0.03
	ZT2-11	0	0.45	-0.02	-0.01	0.04	-0.02	0.38	-0.01	0.01	0.09	0
	ZT2-13	南1000	0.58	0.02	0.04	0.03	0.02	0.46	-0.03	0.07	-0.05	-0.03
	ZT2-15	南2000	0.42	0.02	0.05	0.04	0.03	0.48	-0.02	-0.04	-0.06	-0.02
	ZT2-17	南 3 000	0.66	0.01	0.03	-0.02	0.01	0.45	0.02	0.05	0.12	0.03
	FS9	北1000	0.44	0.01	0.03	0.06	0.03	0.41	0.02	0.03	0. 08	0.03
カプレメ	FS11	0	0.45	0.02	0.03	0.08	0.03	0.44	0.03	0.04	0.09	0.03
吼白水追	FS13	南1000	0.50	0.03	0.04	0.06	0.02	0.39	0.04	0.03	0.04	0.02
	FS15	南2000	0. 52	0.04	0.04	0.04	0.02	0.44	0.04	0.04	0.03	0.01

由表4可知:① A1,A3线位对西部浅滩影响很小,仅在桥 轴线附近流速点略有变化,变幅在 0.05 m/s 以内,而 A2, A4 线 位,由于在浅滩区域布置有人工岛,因此对西部浅滩流速影响都 相对较大,流速最大变化值可达 0.22 m/s。②各线位对伶仃航 道影响均表现为潮流动力增强, A2 线位在伶仃航道附近布置 人工岛,对伶仃航道流速影响最大(最大增幅为 0.12 m/s),影 响范围在桥轴线上、下游各5km的航段,其他线位影响相对较 小,流速增幅在 0.04 m/s 以内。③A2,A3 线位在中部浅滩上均 布置有人工岛,对中部浅滩局部流速影响范围和影响幅度较大, 影响较大的范围主要在人工岛及通风井附近1500m内的取样 点,流速变化在 0.05~0.20 m/s 以内; 而 A1, A4 方案对中部浅 滩流速影响较小。④工程方案实施后,受人工岛及索塔、锚碇的 影响,砚石水道内流速普遍增大,A3 方案对砚石水道影响幅度 最大, 矾石水道段流速最大增幅为 0.09 m/s, A4 通风井对矾石 水道流速影响最小,不超过 0.04 m/s。⑤东滩流速变化主要在 桥位附近上下游各3 km 范围内,流速变化值在0.04~0.10 m/s 之间,其他段流速变化不大。



图 5 滩槽流速取样点布置 Fig. 5 Layout of velocity sampling point along bottomland and swale

3.3.2 对局部流速的影响 图 6 给出了 A3 方案工程前后人工岛附近流速点布置,每个点的间距为 500 m, 共布置了77个点,表5给出了各流速点流速变化情况。分析表中数据可知,人工岛附近流速变化与流态变 化相似,人工岛迎水面流速减缓,人工岛两侧流速增强。人工岛对过水断面的束窄作用导致周边流速增加和减少的影响是局部的,人工岛周边流速变化敏感区在桥轴线上、下2500m,人工岛东、西两端以外1500m的范围内。

根据试验研究结果<sup>[10]</sup>,其他人工岛周边流速变化趋势与A3方案人工岛相似,但变化幅度会随人工岛所处的位置有所不同,位于两航道之间的人工岛流速变化较位于西部浅滩的人工岛周边流速变化范围及变化幅度要大,主要是因为前者人工岛长轴向与水流方向几乎垂直且流速较大,而后者人工岛长轴向与水流方向夹角较小且该水域水流动力较弱。





#### 表 5 A3 方案西人工岛桥附近工程前后涨落潮平均流速变化

Tab. 5 Variations of ebb and flow mean volecities near the west artificial island of scheme A3 before and after completion of bridge

NE 공 BE 국	and F	落潮平均		涨潮平均		~~~~		落潮平均		涨潮平均	
断囬距离	测点	工程前	变化值	工程前	变化值	断囬距离	测点	工程前	变化值	工程前	变化值
	XD1-2	0.41	0.01	0.36	0.06		XD7-2	0.49	0.04	0.37	0
	XD1-3	0.44	-0.01	0.32	0.04		XD7-3	0.45	-0.17	0.38	-0.05
上游	XD1-4	0.43	0.02	0.35	-0.02	下游	XD7-4	0.41	-0.21	0.41	-0.11
2.5 km	XD1-5	0.45	0.01	0.39	-0.06	0.5 km	XD7-5	0.47	0.05	0.34	0.05
	XD1-6	0.53	-0.04	0.35	0.05		XD7-6	0.39	0.14	0.32	0
	XD1-7	0.50	-0.03	0.39	0.04		XD7-7	0.47	-0.02	0.33	0.05
	XD3-2	0.39	0	0.36	0.05		XD8-2	0.56	0.09	0.43	-0.05
	XD3-3	0.42	0	0.40	0.04		XD8-3	0.44	-0.11	0.39	-0.06
上游	XD3-4	0.42	0.02	0.38	-0.04	下游	XD8-4	0.43	-0.25	0.38	-0.06
1.5 km	XD3-5	0.46	0.02	0.41	-0.05	1.0 km	XD8-5	0.41	0.04	0.34	0.03
	XD3-6	0.50	-0.06	0.37	0.04		XD8-6	0.43	0.08	0.34	0.04
	XD3-7	0.46	0.01	0.37	0.12		XD8-7	0.42	0.12	0.34	0.03
	XD4-2	0.50	-0.03	0.39	0.05		XD9-1	0.61	-0.01	0.49	0.01
	XD4-3	0.43	-0.06	0.36	0.05		XD9-2	0.57	0.06	0.49	-0.04
上游	XD4-4	0.41	-0.04	0.37	0.05	下游	XD9-3	0.55	-0.08	0.41	-0.02
1.0 km	XD4-5	0.46	-0.01	0.37	0.01	1.5 km	XD9-5	0.49	0.03	0.41	-0.01
	XD4-6	0.44	0.01	0.37	0.07		XD9-6	0.54	0.03	0.37	0.05
	XD4-7	0.47	0.04	0.38	0.03		XD9-7	0.51	0.01	0.35	0.04
	XD5-1	0.53	-0.02	0.43	0.06		XD11-1	0.49	0.03	0.37	0.02
	XD5-2	0.40	0.08	0.49	-0.01		XD11-2	0.56	-0.05	0.40	0.01
上游台	XD5-3	0.45	-0.06	0.37	-0.01	工资	XD11-3	0.54	-0.10	0.42	-0.02
上研	XD5-4	0.39	-0.10	0.32	-0.11	下册	XD11-4	0.50	-0.01	0.39	-0.03
0. 5 km	XD5-5	0.46	0.01	0.42	-0.15	2. 3 Km	XD11-5	0.52	-0.02	0.36	0.08
	XD5-6	0.45	0.06	0.36	0.20		XD11-6	0.52	0.01	0.37	0.04
	XD5-7	0.46	0.02	0.37	0.08		XD11-7	0.43	0.08	0.38	0.04

# 4 结 语

(1) 深中通道各线位横跨三滩两槽,各线位对伶仃航道的影响趋势相同,均使得伶仃航道内桥位附近水 流动力有所增强,A2 方案影响幅度较大;矾石水道内水流动力环境与伶仃航道相似,均有所增强,A3 方案影 响幅度较大;各线位对三滩的影响主要受人工岛影响较大,影响范围在人工岛上下游 2 500 m 范围内。

(2) 深中通道工程对潮流场的影响主要发生在工程区附近,受建筑物影响,涨、落潮流在其背水一侧形 成紊动变化的回流区,流速减小;在两侧形成扰流,流速增大。挡水建筑物对周边海区的影响与建筑物的位 置、形态、大小及周边水流环境等密切相关,以人工岛影响尺度最大、通风井、主塔、索塔、锚碇等建筑物次之, 非通航桥墩附近流态变化不明显,桥轴线5 km 以远水域已基本不受工程影响,深中通道工程各线位对伶仃 洋水域影响较小。

(3) 深中通道工程建成后,受阻水建筑物影响,处于桥位1km范围内潮位变化略明显,桥位上游的潮位站表现为高潮位降低、低潮位抬高,潮差微减;桥位下游的潮位站低潮位降低、高潮位略有抬高、潮差略有增大;桥位4km以远的站位工程前后变化很小。A4(全隧)、A1(全桥)、A3(东隧西桥)方案对潮位及水流的影响均相对较小,A2(西隧东桥)方案影响相对较大。结合其他控制性因素<sup>[7,11-12]</sup>,如宝安机场航空安全、防洪控制等因素,着重对A3、A4两个方案进行分析,由于A4线位全隧方案在设计、施工及运营阶段风险过高、工程造价昂贵,因此,推荐A3线位方案为深中通道工程合理可行的方案。

(4)由于模型为变态模型,模型变率为8.3,会对水流结构产生影响,但由于模型宽深比较大(变率小于 10,宽深比大于2)<sup>[12]</sup>,只要满足重力相似和阻力相似,变态模型在水流动力轴线及垂线平均纵向流速与正 态模型比较误差在10%以内,对于阻水建筑物人工岛采用的几何比尺,但边坡的变态对流态变化与正态边 坡在其背水区形成的流态没有明显差异<sup>[6]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 黄融. 关于东海大桥设计方案优化的思考[J], 世界桥梁, 2004(增1):1-5.(HUANG Rong. Considerations of design optimization of Donghai bridge[J]. World Bridges, 2004(Suppl1): 1-5. (in Chinese))
- [2] 唐军建,陈楚汉,温生辉. 泉州湾跨海大桥潮流场数值模拟[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 2011: 978-985.(TANG Jun-jian, CHEN Chu-han, WEN Sheng-hui. The numerical simulation of tidal current field in Quanzhou bay sea-crossing bridge[C]//International Symposium of the 15th China Ocean(Shore) Engineering, 2011: 978-985.(in Chinese))
- [3] 韩海骞,熊绍隆,朱军政,等.杭州湾跨海大桥对钱塘江河口水流的影响[J].东海海洋, 2002, 20(4):57-63.(HAN Haiqian, XIONG Shao-long, ZHU Jun-zheng, et al. The impact on the flow of Qiangtang estuary by the Hangzhou bay major bridge [J]. Donghai Marine Science, 2002, 20(4): 57-63.(in Chinese))
- [4] 庞启秀,庄小将,黄哲浩,等. 跨海大桥桥墩对周围海区水动力环境影响数值模拟[J].水道港口, 2008,29(1): 16-20. (PANG Qi-xiu, ZHUANG Xiao-jiang, HUANG Zhe-hao, et al. Study on numerical simulation of hydrodynamic conditions influenced by pier in sea[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 29(1): 16-20. (in Chinese))
- [5] 季荣耀,徐群,莫思平,等. 港珠澳大桥人工岛对水沙动力环境的影响[J]. 水科学进展, 2012,23(6): 829-836.(JI Rongyao, XU Qun, MO Si-ping, et al. Effects on the hydrodynamics and sediment environment by artificial islands of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Advances in Water Science, 2012,23(6): 829-836. (in Chinese))
- [6] 徐群,莫思平,季荣耀,等. 港珠澳大桥工程对珠江口港口航道影响物理模型研究[R].南京:南京水利科学研究院, 2009. (XU Qun, MO Si-ping, JI Rong-yao, et al. Impacts of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge on flow environment of Lingdingyang estuary[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [7] 应强,辛文杰. 深圳至中山跨江通道工程对港口航道影响海床演变分析[R]. 南京:南京水利科学研究院,2012. (YING Qiang, XIN Wen-jie. Seabed evolution analysis for Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [8] 辛文杰,徐群,季荣耀,等. 港珠澳大桥工程方案潮流泥沙整体物理模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院, 2009.(XIN Wen-jie, XU Qun, JI Rong-yao, et al. Physical experimental study on tidal current and sediment of Hong Kong-

Zhuhai-Macao Bridge [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))

- [9] 吴门伍, 严黎, 周家俞, 等. 港珠澳大桥对伶仃洋滩地演变影响试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(1): 49-56.(WU Men-wu, YAN Li, ZHOU Jia-yu, et al. Experimental study on evolution of Lingdingyang beach after completion of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(1): 49-56. (in Chinese))
- [10] 莫思平,徐群,陈静,等.深圳至中山跨江通道工程对港口航道影响物理模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院, 2012.(MO Si-Ping, XU Qun, CHEN Jing, et al. Impacts of the Shenzhen-Zhongshan bridge on flow environment of ports and waterways in Lingdingyang estuary[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [11] 刘俊勇,林凤标,刘壮添,等. 深圳至中山跨江通道项目工程规划方案防洪影响论证报告[R]. 广州:珠江水利委员会 珠江水利科学研究院, 2012.(LIU Jun-yong, LIN Feng-biao, LIU Zhuang-tian, et al. Impacts of Shenzhen-Zhongshan bridge plans on flood control[R]. Guangzhou: Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, 2012. (in Chinese))
- [12] 姚仕明,张玉琴,李会云,等. 实体模型变率研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(5): 1-4. (YAO Shi-ming, ZHANG Yu-qin, LI Hui-yun, et al. Study on distortion ratio of a physical model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(5): 1-4. (in Chinese))

# Impacts of Shenzhen-Zhongshan bridge project on hydrodynamic environment of Pearl River estuary

CHEN Jing, MO Si-ping, XU Qun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract**: The Shenzhen-Zhongshan sea-crossing bridge connects the cities of Shenzhen and Zhongshan, across the "three shoals and two deep troughs" in the Pearl River estuary. A lot of piers and large-scale artificial islands in the water area will have impacts on the hydrodynamic environment of the Lingdingyang estuary, the inner part of the Pearl River estuary. In this research, the physical model for the bridge is built to analyze the impacts of the project on the hydrodynamic environment of the Lingdingyang estuary. The experimental results show that: the scheme A2 has the greatest impacts on the sea level, the others take the second place; the changes in sea level and flow field are sensible near the artificial island and the main piers; the impacts of the artificial island on the hydrodanamic environment are the greatest, the impacts of the ventilation shafts, anchorage, king tower, towers located on the Lingdingyang sea area take the second place; there will be no great changes near the non-navigable bridge pier; and the the area 5,000 m away from the bridge has a tiny change. Overall, the Shenzhen-Zhongshan project has little impacts on the Lingdingyang estuary. Based on this research and other previous researches, experts have unanimously recommended that the scheme A3 (a bridge across the Lingdingyang waterway combined with the Fanshi submerged tunnel) should be taken as a reasonable and feasible scheme.

Key words: Lingdingyang estuary; Shenzhen-Zhongshan bridge; physical model; hydrodynamics environment