

整体物理模型试验在人工岛排水设计中的应用

唐 玮，杨粤茗，董焱赫

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：近年来桥隧等综合交通系统工程中，人工岛的排水设计成为安全、洪涝防治的关键因素。以深中通道整体排水物理模型试验及排水设计为例，对整体物理模型试验进行优化，模拟随机越浪与实际降雨叠加的工况，应用于重力流、压力流工况下人工岛的排水设计。同时与港珠澳大桥工程进行对比，总结人工岛物理模型试验及相应排水设计要点、趋势及发展方向。结果表明，排水模型试验应采用整体和局部试验结合的方式，通过随机越浪叠加实际降雨模拟分析，显著提高模拟的准确性。

关键词：人工岛；排水物模试验；随机越浪；重力流；深中通道

中图分类号：U 652.7

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)10-0078-07

Application of physical model test in artificial island drainage design

TANG Wei, YANG Yue-ming, DONG Yan-he

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Refer to integrated transportation system projects, such as bridges and tunnels, the drainage design of artificial islands has become a key factor for safety and flood prevention. We take the integral drainage physical model test and drainage design of the Shenzhen-Zhongshan channel project as an example, optimize the integrated physical model, simulate the superposition condition of the random overtopping and actual rainfall superposition, and apply it to the drainage design of artificial island under the gravity flow and pressure flow. At the same time, comparing with the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge project, we summarize the essentials, trends, and development directions of artificial islands physical model test and corresponding drainage design. The results show that the drainage physical model test should be combined with the integral and local tests, simulating conditions of the random overtopping and actual rainfall, which can significantly improve the accuracy of the test.

Keywords: artificial island; drainage physical model test; random overtopping; gravity flow; the Shenzhen-Zhongshan channel

人工岛是桥隧综合交通系统重要的组成部分，由于台风期越浪可能危及人工岛和隧道运营安全，因此越浪对岛面排水系统的设计尤为重要^[1]，同时也是人工岛洪涝防止的关键点^[2-3]。

越浪具有较大的随机性，缺少确切的理论计

算公式^[4-5]。国内外研究表明，整体物理模型试验多用于确定人工岛工程的越浪量和岛壁高程^[6-7]，很少用于排水系统的模拟。王诺等^[8]、王彦林等^[9]分别在大连海上机场人工岛、港珠澳大桥人工岛设计中，采用物理模型试验进行挡浪墙高程

的确定。深中通道西人工岛工程利用整体物理模型试验分析岛形对越浪的影响^[10]。近年来, 物理模型试验也开始尝试应用于排水系统模拟, 港珠澳大桥工程同步模拟了排水沟的布置, 并进行了单独的排水节点试验^[11]。

深中通道位于广东省珠江中游核心区域, 东起深圳机场南侧, 终于中山的马鞍岛横门, 主体结构包括沉管隧道、东西人工岛、航道桥等, 是世界级跨海交通集群工程。其中, 东人工岛位于深圳侧岸滩、宝安机场南侧, 岛上设主线隧道、4条匝道隧道、救援码头及相关附属配套设施。

本文结合深中通道东人工岛设计, 首次在整体模型内进行大规模的随机越浪与实际暴雨的叠加模拟, 分析重力流、压力流不同工况的排水情况, 实现排水系统较为完整、准确的模拟。同时, 通过分析及验证不同工况排水沟、出水口、越浪泵房等排水效果, 总结并优化岛内的排水设计。

1 材料与方法

1.1 试验条件

1.1.1 模拟工况

1) 双 100 工况: 重现期 100 a 的极端高水位(3.84 m), 叠加重现期 100 a 波浪。

2) 双 300 工况: 重现期 300 a 的极端高水位(4.11 m), 叠加重现期 300 a 波浪。

1.1.2 设计越浪量

根据《深圳至中山跨江通道项目东人工岛波浪三维整体物理模型及排水设施排水能力模型试验研究报告》^[12], 选取稳定性及挡浪墙顶高程优化试验中设计工况顶高程条件下的单宽平均越浪量数据。

1.1.3 设计降雨

根据《深圳市暴雨强度公式及查算图表》^[13], 选取重现期 100 a 的暴雨强度公式为:

$$q=2097.854/(t+8.298)^{0.47} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度($\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{万 m}^{-2}$); t 为降雨历时(min)。

1.2 试验方法

1.2.1 排水物理模型建立

1) 制作模型。根据各区域越浪量情况, 初步确定岛内雨水主管、环岛沟等排水设施布置。在东人工岛三维整体物理模型(几何比尺为 40)上布置各排水设施; 其中, 排水沟及排水口采用塑料板按比例制作, 越浪泵房采用“轴流泵+电子流量计+阀门”替代。模型效果见图 1。



a) 排水沟及排出口模型



b) 越浪泵房及雨水模拟

图 1 模型效果

2) 工况模拟。采用大规模随机越浪叠加实际降雨工况; 其中, 波浪通过可移动式摇板造波机模拟, 岛内径流雨水通过“溢流水箱+阀门”模拟。

3) 验证排水设施能力。在排水沟沿线布置水位变化传感器(编号 P1~Pn), 用于观测水位变化并判断排水设施能力。

1.2.2 研究方法及流程

模型建立后, 通过不同方向、不同重现期的越浪叠加雨水试验, 优化排水设施布置。针对排水集中区域, 观察排水沟过水能力、越浪泵房启停情况后, 明确是否进行排水能力二次优化验证模型试验, 研究流程见图 2。

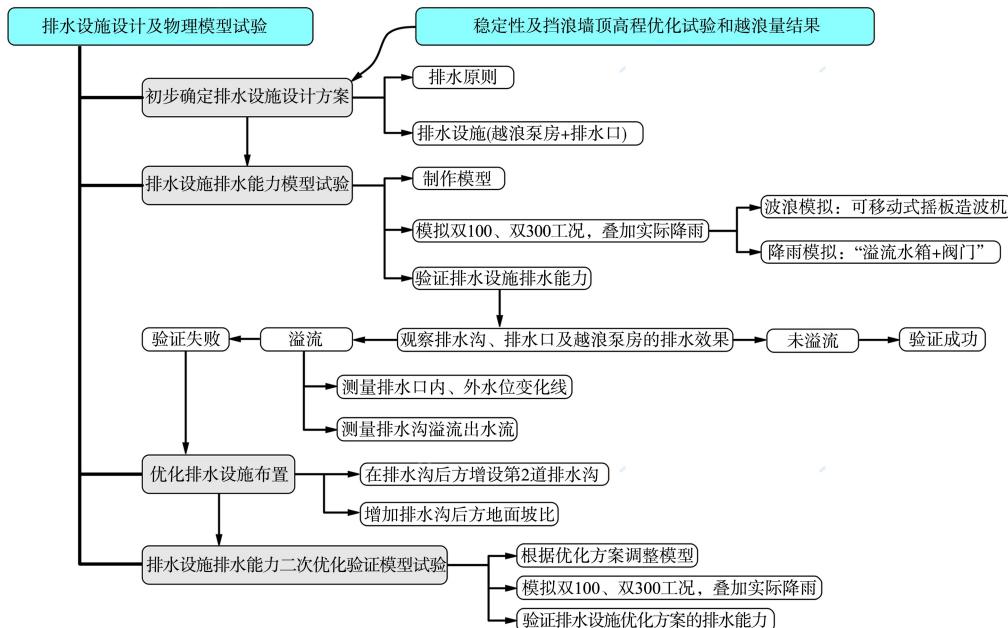


图 2 模拟指导设计的流程

2 排水设施布置

考虑 SW 向波浪作用下堤顶越浪量最大, 排水试验选取 SW 向波浪的双 300 工况为最不利工况, 其试验越浪分布情况见图 3。经分析, 各区域越浪分布极不均匀, 东北及东南侧基本无越浪, 西南侧越浪影响显著。因此, 东北及东南侧排水系统以排出径流雨水为主要目的, 考虑采用重力流排水方

式; 西南侧宜采用重力流+压力流的组合排水模式, 拟于救援码头附近区域设置 1 座越浪泵房, 总排水量 $9.33 \text{ m}^3/\text{s}$, 设置 2 个重力流、2 个压力流箱涵, 切换重力流、压力流工况。同时, 结合岛内隧道开敞段物理隔断影响, 初步确定排水汇水分区, 每个分区设置单独排出口, 岛四面均设置环岛沟, 见图 4。各分区的排水总量及排水设施的布置方案见表 1。

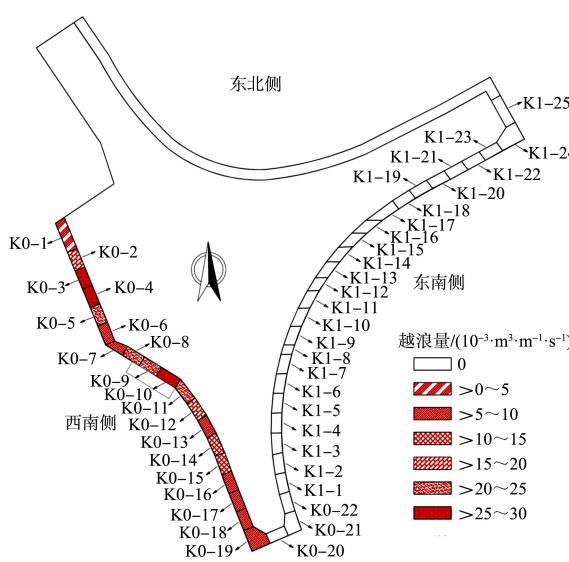
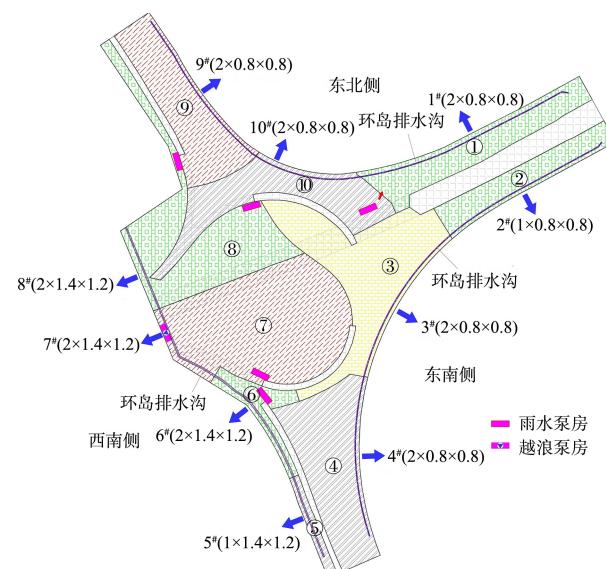


图 3 SW 向越浪分布



注: 1#~10# 为排水口编号, 括号内为数量×宽(m)×高(m)。

图 4 汇水分区划分

表 1 排水总量及排水设施布置情况

区域	排水分区 数量	排水总量/(m ³ ·s ⁻¹)		排水沟尺寸		重力流排水箱涵	
		降雨+双 100 越浪	降雨+双 300 越浪	沟宽/m	沟深/m	编号	宽×高/(m×m)
东南	3	3.326	3.411	1.0~1.2	0.60~0.95	2#~4#	0.8×0.8
西南	4	5.973	13.752	2.0~2.5	0.95~1.25	5#~8#	1.4×1.2
东北	3	3.223	3.223	1.0~1.2	0.60~0.95	1#、9#、10#	0.8×0.8

为保证雨水及越浪的顺利排出, 选取双 300 工况, 对重力流排出口排水可行性进行理论计算, 公式为:

$$H = H_1 + h_0 - h_f - H_2 \quad (2)$$

$$h_f = \frac{0.304}{Re^{0.239}} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中: H 为水压差 (m), $H > 0$ m 时, 可顺利排出; H_1 为环岛沟内底高程 (m); h_0 为环岛沟内实际水深 (m); h_f 为重力流排出口水头损失 (m); H_2 为考虑海平面上升后的极端高水位 (m); d 为管道直径 (m); l 为流段长度 (m); v 为断面平均流速 (m/s); Re 为雷诺数。

经计算, 各分区排水口均可通过重力流方式排出。另外, 为增加环岛沟过水断面、避免积水,

环岛沟沿程沟底坡降不宜低于 1.5‰。岛内雨水采用雨水口及暗管收集后, 集中汇入环岛沟排出口, 为保证重力流排出, 岛内雨水管线长度不宜超过 380 m。

3 排水模型验证

3.1 模型验证及分析

3.1.1 整体排水能力验证

本工程委托交通运输部天津水运工程科学研究所利用东岛三维整体模型选择 SW 向波浪对西南侧排水设施进行研究, 对理论计算进行验证, 并指导排水设施设计。排水物模试验根据不同重现期叠加暴雨, 分 5 个不同工况进行排水设施能力及效果的分析, 见表 2。

表 2 西南侧护岸排水情况

工况	排水情况	漫滩情况
重现期 100 a 水位 + 100 a 暴雨(工况 1)	顺利排出	水体均未越过沟顶
双 100 工况 + 100 a 暴雨(工况 2)	顺利排出	越浪水体跌落位置在挡浪墙与排水沟之间; 部分区域(6#~7#排水口范围), 水体能够跨过排水沟向岛内传递; 越过排水沟的水体, 受沟后岛面 1% 坡度影响, 能够返回至排水沟内
重现期 300 a 水位 + 100 a 暴雨(工况 3)	顺利排出	水体均未越过沟顶
双 300 工况 + 100 a 暴雨(工况 4)	5#~6# 排水口范围, 顺利排出; 6#~8# 排水口范围, 短时间内无法排出	越浪水体跌落位置在挡浪墙与排水沟之间; 大部分区域(6#~8# 排水口范围), 水体能够跨过排水沟向岛内传递; 靠近 6# 排水口时, 越过排水沟的水体, 受沟后岛面 1% 坡度影响, 能够返回至排水沟内, 其他区域未能在岛面坡度影响下返回至排水沟
双 300 工况 + 100 a 暴雨 + 3 台水泵(工况 5)	基本类似于工况 4, 但排水沟内水位有所下降	基本类似于工况 4

由排水试验结果可知, 在不同工况下, 越浪水体均跌落在挡浪墙与环岛沟之间, 通过地面坡度可顺利排入环岛沟。经验证, 初步方案中环岛沟的位置能满足越浪水体的收集需求。

水设施布置方案能满足排水需求, 可采用重力流排水方式; 工况 4、5 试验结论与理论计算结果存在偏差, 越浪及排水无法通过重力流排出, 西南侧 7#~8# 排出口附近, 出现不同程度的溢水情况。

工况 1~3 试验结论与理论计算结果一致, 排

工况 4、5 下, 越浪泵房泵组启动进行压力流

排水。试验结果显示,当泵组按设计能力的 67% 运行时,1 组波浪作用中有效排除的波浪约占 96.7%,仅有极端的几个大波越过排水沟向岛内传递,基本可达到最佳排水效果。因此,西南侧应设置越浪泵房,并结合试验验证结果对其进行优化,总流量宜调整为 $6.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

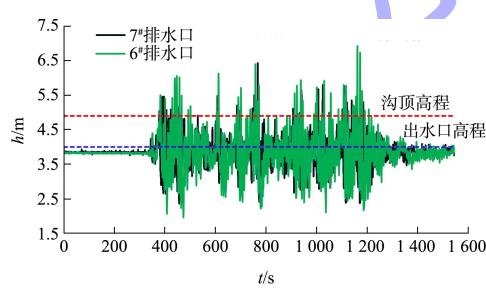
从排水效果来看,试验结果与理论计算存在一定偏差,这可能是由于理论计算采用平均越浪量,难以反映单个大波浪的工况。单个大波瞬间越浪时,将迅速充满排水沟并漫流,难以传递至泵房,导致泵组实际排水能力变化。

3.1.2 单出口排水能力验证

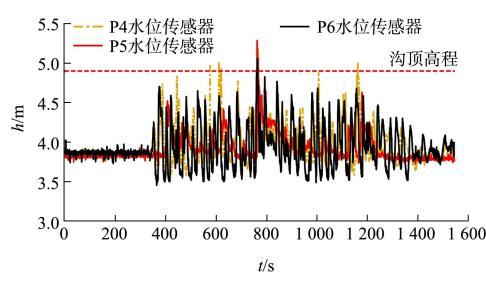
根据整体排水情况及效果,分别选择工况 2、5 进行 6#、7# 排出口范围排水情况、水位变化测定,试验结果见图 5、6。



a) 越浪水体运动情况



b) 排水口外水位变化

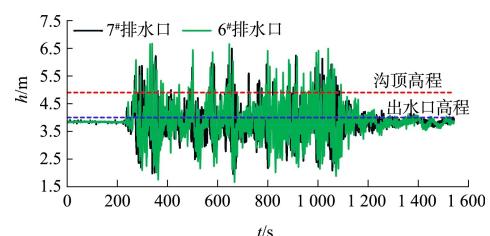


c) 环岛沟内水位变化

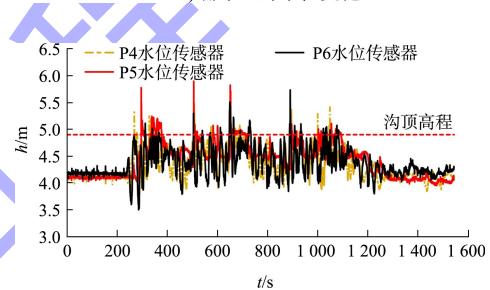
图 5 工况 2 6#~7# 排水口范围的排水效果



a) 越浪水体运动情况



b) 排水口外水位变化



c) 环岛沟内水位变化

图 6 工况 5 6#~7# 排水口范围的排水效果

排水口外水位为海面的模拟情况,与越浪的高度、频率有关,在一定程度上可反映越浪的强度;环岛沟内水位的变化可反映出排出口处的溢水情况,直接体现排水沟的排水能力。工况 2、5 外水位高点时间,与排水沟内水位高点时间基本一致,证明从越浪到最近的排出口,流经的时间很短,越浪下落后的速度很大。另外,工况 2、5 排水口外水位的明显峰值点分别有 9、11 处,高水位单峰延续时间长,而排水沟内明显峰值点分别为 4、5 处,高水位单峰延续时间明显缩短。这表明环岛沟等排水设施,对于越浪具有一定的调蓄、削弱作用。

工况 2 环岛沟内水位均低于沟顶,大部分时间留有约 20 cm 超高,仅 1 处高于沟顶,考虑是溅浪导致,表明排水收集未出现溢水情况,可通过重力流顺利排水。

工况 5 环岛沟内水位基本与环岛沟齐平,多个

点高于沟顶, 表明此工况环岛沟排水能力明显不足, 壶水现象严重。另外, 工况 5 的 900~1 200 s 期间排水口外水位高, 环岛沟内水位持续降低, 应为越浪泵房泵组启动后, 采用压力流+重力流结合的排水方式, 提高整体排水能力。

综上所述, 单出口排水情况能够从局部区域进一步证明排水设施对于越浪的削峰、调蓄作用, 并验证整体排水方案的准确性。

表 3 局部溢水情况

区域	造波时间/min	波数	溢水范围/m	收集水量/ m^3	平均单波溢水量/ $(m^3 \cdot m^{-1})$	单宽平均溢水量/ $(10^{-4} m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$
6#~7#排水口	16.33	4	160	102.4	0.16	6.5
7#~8#排水口	16.33	4	80	12.8	0.04	1.6

3.2.2 排水优化二次验证

为保证溢水的收集及排放, 于 6#~7#、7#~8# 排水口区域放坡坡顶后方增设 1 道排水沟, 宽度分别为 1.5、0.8 m, 深度均为 0.8 m, 同时设置 5 根直径 600 mm 的连通管与环岛沟相连。优化排水设施布置后, 采用工况 5、堵塞不同数量的连通管进行二次验证试验。

结果显示, 增加第 2 道排水沟后不再出现溢流, 排水沟的尺寸及布置能够满足排水收集要求。经分析, 当连通管小于 3 处时, 将出现沟内局部积水, 3 处及以上连通管可保证溢水顺利排出。

3.3 人工岛排水设计总结与对比

经分析总结, 常规人工岛排水设施主要由岛内排水沟及管线、环岛排水沟、重力流及压力流箱涵、越浪泵房组成。岛内径流雨水, 经岛内排水沟或雨水管线收集后汇入环岛排水沟; 越浪海水直接流入环岛沟, 分不同工况分别由重力流箱涵、越浪泵房及压力流箱涵排放。

文献[11]的港珠澳大桥工程排水节点试验表明, 设置双道横截沟、采用 0°栅条可有效控制过量值。但其节点试验采用理论平均计算值叠加, 未对复杂的波浪条件进行模拟, 对设施排水能力的验证具有一定的局限性。

本工程的整体物理模型试验首次采用随机越浪与实际降雨叠加, 对理论计算进行偏差的修正, 能更有效地验证排水设施的能力及效果, 以指导

3.2 方案优化及二次验证分析

3.2.1 局部溢水情况分析

工况 5 越浪泵的启动能够基本满足排水需求, 但由于局部越浪距离过大, 6#~8# 排水口段出现越浪过沟后向岛内溢水的情况。二次试验将此段范围环岛沟后岛面坡度调整为 2.5%、放坡范围调整为 36 m, 进行溢水范围、溢水量的测定, 情况见表 3。

设计。除此之外, 本工程根据试验效果进行排水设施布置的二次优化, 动态调整及优化排水设计, 以确保在极端工况下排水系统的安全可靠性、经济合理性。

4 结论

1) 人工岛排水设计主要考虑不同重现期(100、300 a)水位及波高下, 越浪量以及岛内雨水量计算, 岛内常规排水设施包括环岛排水沟、重力流及压力流箱涵、越浪泵房等。通过模拟不同方向越浪量的分布确定人工岛重力流、压力流的排水原则、形式和分区。

2) 建议人工岛排水设计应采用整体物模试验、节点试验等进行排水设施能力分析, 可以验证系统重力流排水可行性、越浪泵房设置的必要性、环岛沟尺度和布置位置的合理性。物理模型试验宜采用整体模型进行随机越浪叠加实际降雨模拟, 能够大幅提高结果的准确性, 以指导后续相关设计。

3) 建议重力流排出口宜等间距布设, 环岛排水沟深度、各排出口高度应充分考虑外海水位, 保证有效过水断面, 并满足顺利排出要求。压力流排水优先考虑增设越浪泵房, 越浪泵房总排水能力应通过试验验证。

4) 对越浪集中区域的排水设施, 其收水能力应做二次验证试验。在排水设施局部收水能力不足的情况下, 可提高环岛沟后地面坡度(不小于

2.5%)或增设一道截水沟，截水沟与环岛沟之间设置连通管，保证雨水、越浪的顺利排出。

参考文献：

- [1] 周益人,潘军宁,左其华.港珠澳大桥人工岛越浪量试验[J].水科学进展,2019,30(6):908-914.
- [2] 叶军,钟良生.港珠澳大桥东、西人工岛的洪涝防治策略[J].中国港湾建设,2019,39(5):20-27.
- [3] GODA Y. Estimation of the rate of irregular wave overtopping of seawalls[J]. Coastal engineering, 1977(1):221-241.
- [4] 卢永金,何友声,刘桦.海堤波浪爬高计算分析与越浪设计准则探讨[J].水利水电技术,2007(4):30-34.
- [5] 陈国平,周益人,严士常.不规则波作用下海堤越浪量试验研究[J].水运工程,2010(3):1-6.
- [6] SAVILLE T. Large-scale model tests of wave run up and overtopping on shore structures[R]. Washington: US Army Corps of Engineers, 1958.
- [7] 刘堃,陈哲淮,唐云,等.低桩承台直立结构波浪爬高与越浪量[J].水运工程,2018(9):38-41

(上接第 63 页)

6 结论

1) 水环境整治是一项系统工程,工程方案必须通过多方案、多维度综合比选确定。

2) 工程实施后,湾内涨落潮平均流速大多减小,原有深槽减小幅度较大,原有滩地流速略有增大,湾内水流较工程前有所改善。滩槽方案的导流作用不明显,对约束引导水流的作用不大。

3) 工程实施后,进出潮量大幅增加,湾内环境容量增加,有利于污染物的稀释,同时使湾内水体流动速度降低,水体交换时间总体变长。其中 A4 区略有降低但变化不大, A5 区由于清除了阻水浅滩、打通了同 A4 区的水体交换通道,所以水体交换改善较大, A1、A2、A3 区交换时间明显增加。

4) 工程实施后湾内不会产生大量泥沙淤积,泥沙淤积主要分布在口门区,湾内泥沙淤积 1~2 年基本平稳。

5) 汇入湾内的河渠水质是影响后期整治效果的关键,建议加强上游河渠的排入管理,提高汇入河渠的水质标准。

- [8] 王诺,郁蔚兰,吴暖,等.大连海上机场人工岛越浪量物模试验[J].水运工程,2015(5):1-7.
- [9] 王彦林,闫禹.物理模型试验在港珠澳大桥隧道人工岛设计中的应用[J].施工技术,2015,44(11):104-107.
- [10] 戈龙仔,蔡翠苏,胡鹏,等.深中通道西人工岛岛形对护面块体稳定性和堤顶越浪的影响[J].水运工程,2020(7):1-6.
- [11] 中交天津港湾工程研究院有限公司,中国交建海岸工程水动力重点实验室.港珠澳大桥东、西人工岛敞开段排水构筑物排水能力验证试验研究报告[R].天津:中交天津港湾工程研究院有限公司,2016.
- [12] 交通运输部天津水运工程科学研究所,港口水工建筑技术国家工程实验室,工程泥沙交通行业重点实验室.深圳至中山跨江通道项目东人工岛波浪三维整体物理模型及排水设施排水能力模型试验研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2020.
- [13] 深圳市气象局,深圳市规划和国土资源委员会.深圳市暴雨强度公式及查算图表(2015 版)[R].深圳:深圳市气象局,2015.

(本文编辑 王璁)

6) 采用“泥浆脱水固结一体化处理系统”对污染疏浚土进行固化处理,处理为含水率小于 40% 的泥饼,实现对淤泥的减量化、无害化、稳定化处理和资源化利用,对河道湖湾治理、航道疏浚等工程具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 黄鹄,任心欣,丁年,等.前海合作区水系统专项规划[R].深圳:深圳市城市规划设计研究院有限公司,2014.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司.深圳前海湾清淤工程(二期工程)初步设计[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2016.
- [3] 李冀刚,魏雷,孟妍.深圳前海湾清淤工程疏浚物黄茅岛海洋倾倒区环境现状调查报告[R].汕尾:国家海洋局汕尾海洋环境监测中心站,2013.
- [4] 陆文平,李冀刚,孟妍.深圳前海湾清淤工程(二期 A 区和 B 区)疏浚物检验评价报告[R].汕尾:国家海洋局汕尾海洋环境监测中心站,2017.
- [5] 莫思平,王志力,季荣耀.深圳前海湾清淤工程水动力泥沙模型开发研究[R].南京:南京水利科学研究院,2014.

(本文编辑 郭雪珍)