

# 多因素影响下深中通道西人工岛挡浪墙 顶高程确定及优化研究

戈龙仔, 栾英妮\*, 刘海源

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 深中通道是我国继港珠澳大桥之后的又一项世界级的重大跨海交通工程, 其中西人工岛采用了形似中国传统的风筝形状。基于工程重要性和特殊的岛形, 以及所提出的越浪量小于  $15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  的高标准条件, 同时要求考虑天文潮+海平面上升的水位、重现期 300 a 的台风浪、岛形结构形式多样性和高程限制等多因素影响, 单独采用规范相关规定计算难以准确确定岛挡浪墙顶高程, 对此开展了波浪水槽断面物理模型试验, 同时结合规范公式计算和三维港池整体物理模型试验等多种手段结果的对比, 得出了基于多影响因素的综合考虑, 最终采用大台阶断面形式, 岛挡浪墙顶高程为 9.0 m 的方案可行。

**关键词:** 多因素影响; 深中通道西人工岛; 挡浪墙; 顶高程

中图分类号: U656.21 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2020)05-0001-06

doi: 10.7640/zggwjs202005001

## Determination and optimization of top elevation of the wave wall of the Shenzhen-Zhongshan Channel west artificial island under the influence of multi-factors

GE Long-zai, LUAN Ying-ni\*, LIU Hai-yuan

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** Shenzhen-Zhongshan Channel is another world-class major cross sea traffic project after Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge in China, in which the west artificial island is shaped like a traditional Chinese kite. Based on the importance of the project and the special island shape, as well as the proposed high standard condition that the overtopping rate is less than  $15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ , at the same time, it is required to consider the water level of astronomical tide + sea level rise, typhoon waves with a return period of 300 years, the different structural form and elevation of the island type and other factors, so it is difficult to accurately determine the top elevation of the island wave wall by adopting the relevant provisions of the specifications alone. Therefore, physical model test of the cross section of the wave flume was carried out, at the same time, the comparison between the results of multiple methods of standard formula calculation and three-dimensional physical model test was compared, and the comprehensive consideration based on multi-factors was obtained. Finally, a large step cross-section form was adopted. The scheme with the top elevation of 9.0 m is feasible.

**Key words:** influence of multi-factors; Shenzhen-Zhongshan Channel west artificial island; wave wall; top elevation

收稿日期: 2020-02-25 修回日期: 2020-03-24

基金项目: 国家重点研发计划专项资助 (2018YFC0809604); 天津市应用基础与前沿技术研究计划 (17JCYBJC21900); 中央级科研院所基本科研业务费专项 (TKS190503, TKS190304, TKS180102)

作者简介: 戈龙仔 (1977—), 男, 江西临川人, 副研究员, 主要从事港口航道及近海工程研究。

\* 通讯作者: 栾英妮, E-mail: Luanyingni\_2008@163.com

### 1 概述

深中通道是连接广东省深圳市和中山市的大桥, 是世界级超大的“桥、岛、隧、地下互通”集群工程, 规模空前、建设条件异常复杂、综合技术难度再上新高, 是我国继港珠澳大桥之后的又一项世界级的重大跨海交通工程。整个路线起于

广深沿江高速机场互通立交，与深圳侧连接线对接，向西跨越珠江口，在中山市翠亨新区马鞍岛上岸，终于横门互通，全长 24 000 m，西人工岛原泥面高程为-12~-15 m，岛形采用了分水效果较好的菱形，形似中国传统的风筝，人工岛岛壁轴线东、西长 625 m，南、北宽 430 m。文中为便于描述，将西人工岛各岸线按逆时针分为 5 条，分别为 AB、BC、CD、DE、EA，具体工程平面布置见图 1。西人工岛岛壁的断面结构设计采用台阶方案，挡浪墙顶高程为 8.0 m。

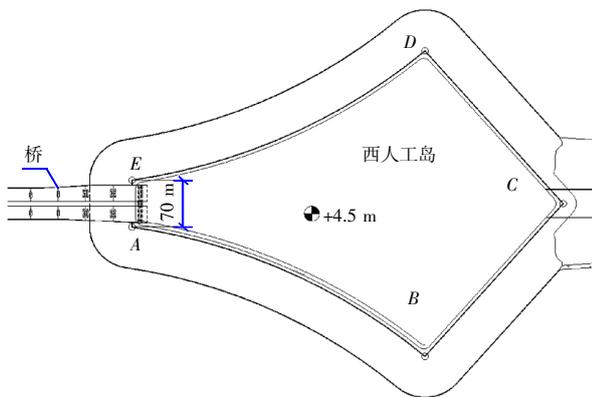


图 1 工程平面布置图

Fig. 1 Layout of the project plan

考虑工程重要性和特殊的岛形，以及所提出的越浪量小于  $15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  的高标准条件，同时要求考虑天文潮+海平面上升的水位、重现期 300 a 的台风浪、岛形结构形式多样性和高程限制等多因素影响，单独采用规范相关规定计算难以准确确定岛挡浪墙顶高程。关于上述各因素对堤顶高程确定的影响，前期研究根据各自工程的特点，前后开展了其中 1 个或者 2~3 个因素影响数值模拟或者物理模型试验研究，得出相应的研究成果。例如陈国平<sup>[1]</sup>等提出通过采用适当的护面形式和块体摆放方式来减少波浪的爬高和越浪量试验结论，从而达到降低堤顶高程，减少工程造价的目的。陈铭辉<sup>[2]</sup>等提出改变断面结构迎浪侧不同高程的形式，静水位处设置台和胸墙前肩台来减小爬高和越浪，从而降低顶高程。常江<sup>[3]</sup>等人通过物理模型试验论证，给出了堤顶宽度对越浪量衰减系数的影响关系式，为工程设计提供基础数据。孙大鹏<sup>[4]</sup>等人提出考虑波陡、相对水深、堤

顶超高、坡肩宽度和块体尺寸等影响因素，通过试验研究，给出了扭王字块体平均越浪量的计算修订公式，对斜坡堤工程设计具有重要参考意义。戈龙仔<sup>[5]</sup>等人通过物理模型试验验证，提出不同挡浪墙形式和其前方肩台宽度对越浪影响研究，并给出了在工程上常采用的减少越浪的措施。张金成<sup>[6]</sup>提出考虑潮位和台风浪的影响，针对较高的堤顶及防浪墙高度严重影响景观和后方土地开发利用的问题，探讨了降低防浪墙顶高程和控制越浪的设计优化方案。郭立栋<sup>[7]</sup>通过数值模拟方法，探讨了斜坡堤断面形式(胸墙高度、平台超高、平台宽度、外堤坡度)与波浪要素(波陡、相对水深)等因素对越浪量的影响，并与物模试验结果进行对比，得出相对胸墙高度  $H_c/H$  对越浪量系数具有十分显著的影响，它们之间存在指数反比关系；其它变量对越浪量也有一定影响，随着  $H_c/H$  的变化，变量与越浪量之间具有指数关系。

综上所述可知，针对深中通道工程的重要性和西人工岛岛形的特殊性，开展了多因素影响下波浪物理模型试验，论证各因素对高程影响敏感性，为高程的确定提供基础数据和技术指导，同时也为其它类似工程提供参考。文中为了能更明显反映多因素的影响，按照西人工岛的平面布置形式，试验断面选择在最外侧 AB 段。

## 2 试验研究

### 2.1 试验条件

1) 水位因素：采用重现期 300 a 极端高水位 3.61 m，以及在此基础上考虑的海平面上升水位 4.11 m。

2) 波浪要素因素：选择最不利台风浪，波浪要素见表 1。

表 1 试验波浪要素  
Table 1 Test wave elements

重现期/a	水位/m	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	$H/\text{m}$	$T/\text{s}$	$L/\text{m}$
300	极端高水位 3.61	4.15	3.42	2.88	1.84	6.53	62.9
	考虑海平面上升水位 4.11	4.27	3.52	2.96	1.89	6.53	63.6

3) 断面结构形式因素：设计断面，以及在设计断面基础上+1.0 m 高程至堤顶范围内分别采用小台阶、扭王字块+挡浪墙结构的 2 个对比工况，断面结构见图 2。

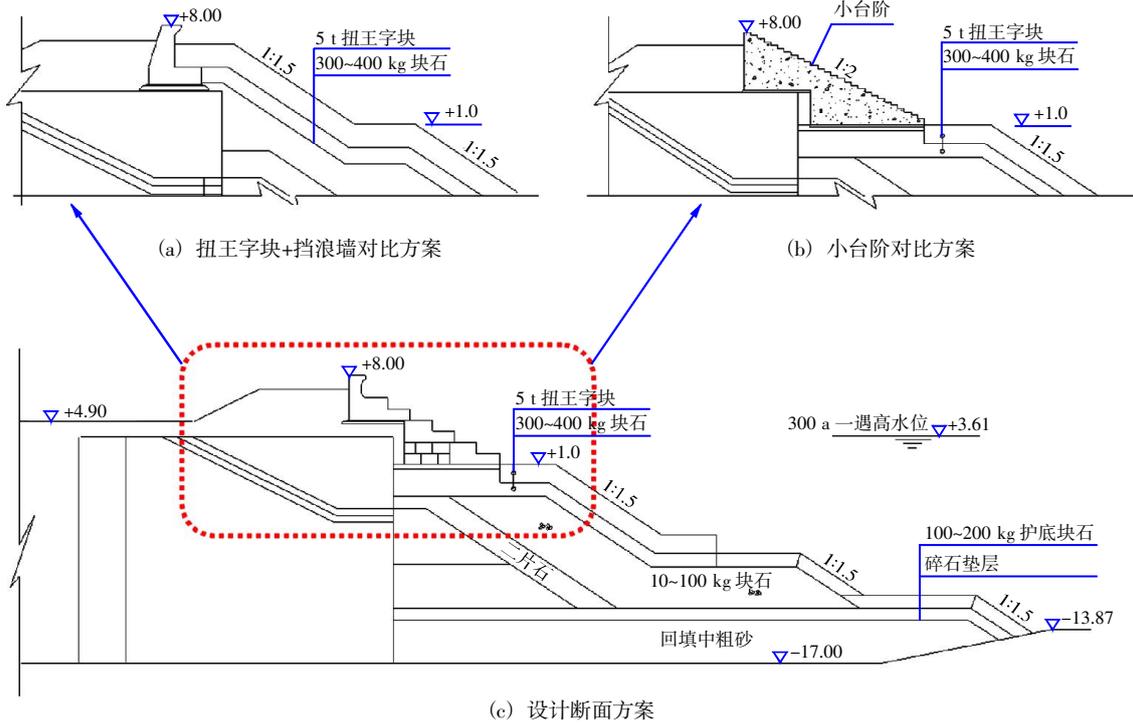


图2 结构断面图

Fig. 2 Structural cross-section diagram

4) 断面高程因素:设计断面顶高程 8.0 m, 以及当越浪量高于  $15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  时, 逐步抬高高程直到满足为止。

## 2.2 模型设计与制作

模型按重力相似准则设计, 采用定床、正态, 几何比尺为 25, 试验在交通运输部天津水运工程科学研究所风浪流水槽中进行, 水槽长 68 m, 宽 1.0 m, 高 1.5 m, 造波能力为最大造波水深 1.0 m、波高 0~35 cm、周期 0.5~5.0 s。模型混凝土挡浪墙以及台阶采用混凝土预制, 几何尺寸偏差控制在  $\pm 1\%$ , 且不超过  $\pm 5 \text{ mm}$ , 质量偏差控制在  $\pm 3\%$ 。模型中各种块石按重力比尺挑选, 质量偏差控制在  $\pm 5\%$  以内。扭王字块采用原子灰加铁粉配制, 重量偏差与几何尺寸误差均满足 JTJ/T 234—2001 《波浪模型试验规程》<sup>[8]</sup> 的要求。试验采用不规则波, 根据本工程的波浪特征, 及 JTS 145—2015 《港口与航道水文规范》<sup>[9]</sup> 的相关规定, 进行论证后, 确定最终频谱采用 JONSWAP 谱<sup>[10]</sup> ( $\gamma = 3.3$ ), 每种工况模拟的原型波作用时间不少于 2 h。

## 2.3 试验方法

越浪量测量, 利用收集越浪水体的装置(宽度为 0.2 m), 对越浪水体进行收集, 通过 1 000 mL 规格的量筒测量 1 个完整波列所收集到的水体总

体积, 然后利用下列公式计算单宽平均越浪量, 再按比例关系, 将模型越浪量换算成原体越浪量。单宽平均越浪量按式(1)计算:

$$q = \frac{V}{bt} \quad (1)$$

式中:  $q$  为单宽平均越浪量,  $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $V$  为 1 个波列作用下的总越浪水量,  $L$ ;  $b$  为收集越浪量的接水宽度,  $\text{m}$ , 模型上取 0.2 m 接水槽;  $t$  为 1 个波列作用的持续时间,  $\text{s}$ 。

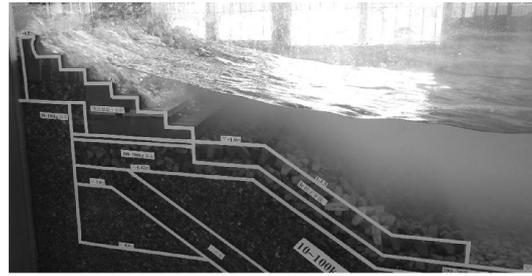
## 3 试验结果与分析

### 3.1 各因素影响试验

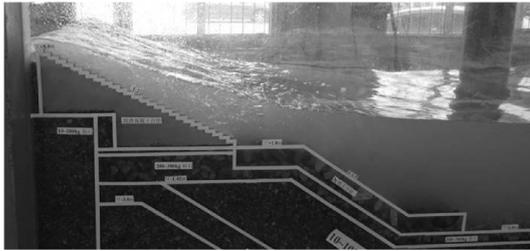
试验通过验证越浪量是否满足标准, 从而确定码头的高程, 但在确定的各影响因素之前, 首先开展断面结构形式试验。

#### 1) 断面结构形式因素

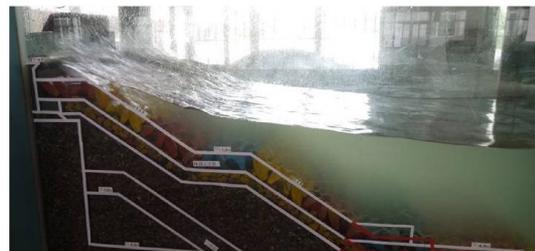
按照设计提出的大台阶方案以及对比方案, 即小台阶方案 and 扭王字块+挡浪墙, 在重现期 300 a 水位、重现期 300 a 波浪作用下, 得出堤顶越浪量分别为  $19.55 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 、 $60.36 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  和  $13.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。由上述越浪量结果可知, 扭王字块+挡浪墙方案, 受护面块体的消浪影响, 其越浪量最小, 大台阶方案次之, 小台阶方案最大, 3 种结构堤顶越浪现象见图 3。在综合考虑人工岛各影响因素后, 业主最终选择大台阶方案。



(a) 大台阶设计方案越浪现象



(b) 小台阶对比方案越浪现象



(c) 扭王字块+挡浪墙对比方案越浪现象

图3 3种结构堤顶越浪现象

Fig. 3 Phenomenon of wave overtopping on the top of three structures of dikes

2) 断面高程因素

采用选定的大台阶方案，根据越浪量的要求，试验通过逐步增加台阶高程方式，来测量不同挡浪墙高程下的越浪结果。

在重现期 300 a 水位、重现期 300 a 波浪作用

下，不同高程堤顶越浪结果见图 4。

从图 4 结果可知，随着高程的增加，越浪逐渐减小。在重现期 300 a 水位、重现期 300 a 波浪作用下，越浪量如要满足标准，则高程应高于 8.8 m 以上。

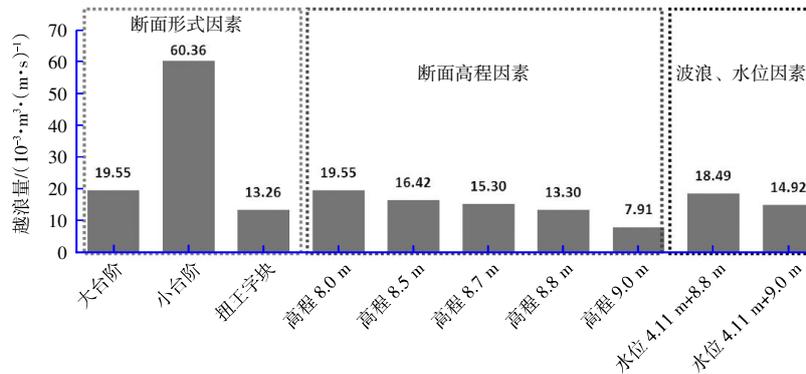


图4 各影响因素越浪量对比结果

Fig. 4 Comparison results of wave overtopping rate under multi influencing factors

3) 波浪、水位因素

采用选定的大台阶方案，3.61 m 和 4.11 m 水位对应波浪作用下，堤顶高程为 8.8 m 和 9.0 m，测得越浪量分别为 13.30 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/(m·s) 和 7.91 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/(m·s)、18.49 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/(m·s) 和 14.92 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/(m·s)，按照越浪标准，断面顶高程为 9.0 m 时，满足要求。

3.2 各影响因素综合分析及顶高程确定探讨

1) 各影响因素综合分析

由图 4 可见，结构影响下，挡浪墙顶越浪量结果变幅最大为 308.7%；水位影响下，挡浪墙顶越浪量结果变幅最大为 40.5%；动力条件(水位、波浪)影响下，挡浪墙顶越浪量结果变幅最大为 19.3%。因此通过本次试验可得：断面结构形式变

化因素影响对越浪量敏感度最大, 断面高程因素次之, 水动力条件(波浪、水位)因素最小。

2) 顶高程确定及优化探讨

对于西人工岛挡浪墙顶高程的确定, 根据上述大台阶断面试验研究成果, 9.0 m 高程能满足要求。但由于在断面模型试验中无法模拟三维波浪分布, 造成波浪条件与原型存在一定差异; 参考日本运输省港湾技术研究所(PARI)<sup>[11]</sup>和高峰<sup>[12]</sup>等文献, 文中提出水槽试验因正向浪作用和受水槽边壁壅水影响, 通常情况下, 断面试验越浪结果将大于采用规范公式计算和港池整体模型试验结果的 20%~30%。对此本模型参考规范公式和三维港池整体模型试验对本工程再次进行论证。

① JTS 145—2015《港口与航道水文规范》计算: 斜坡堤堤顶有胸墙时的计算公式见式(2)。

$$Q=0.07^{H_c'/H_{1/3}} \exp(0.5-\frac{b_1}{2H_{1/3}})BK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_p} [\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th}(\frac{d}{H_{1/3}}-2.8)^2] \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为单位时间单位堤宽的越浪量,  $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ ;  $H_c'$  为胸墙堤顶在静水面以上的高度,  $\text{m}$ ;  $H_{1/3}$  为有

效波波高,  $\text{m}$ ;  $b_1$  为胸墙前肩宽,  $\text{m}$ ;  $B$  为经验系数;  $K_A$  为护面结构影响系数;  $T_p$  为谱峰周期,  $\text{s}$ ;  $m$  为斜坡坡度系数;  $d$  为建筑物前水深,  $\text{m}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

通过式(2)计算得到在考虑海平面上升水位 4.11 m 对应波浪条件下, 采用大台阶方案, 岛挡浪墙顶高程在 8.0 m、8.1 m 和 9.0 m, 越浪量分别为  $15.57 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ 、 $14.23 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$  和  $6.34 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 因此可得通过规范计算, 高程在 8.1 m 以上均可以满足要求。

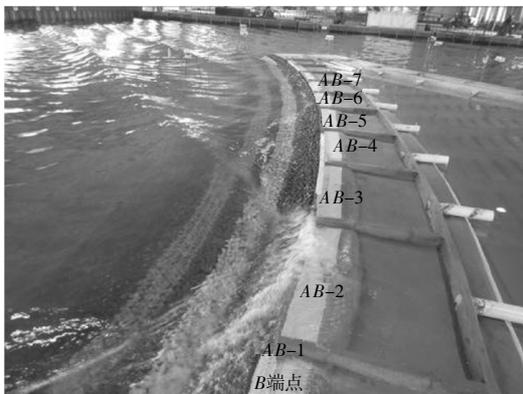
② 三维港池整体模型试验论证: 采用大台阶断面, 岛挡浪墙顶高程为 9.0 m 方案, 在考虑海平面上升水位 4.11 m 对应波浪条件下, 测量 AB 段挡浪墙顶越浪量结果。

由于人工岛 AB 段岛壁为内凹形状, 为了测量 AB 各区段越浪结果, 由 B 端点至 A 端点岛壁沿程进行分区, 然后测量每个区的越浪情况, 结果见表 2。由表中越浪结果可知: 除受 AB 岛岸线内凹波能集中后, 在端部集中释放产生最大越浪量为  $20.71 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 超过标准外, 其余均满足要求, 越浪现象见图 5。

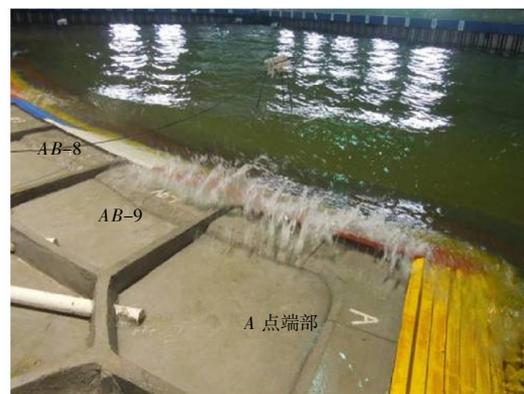
表 2 三维港池整体试验越浪量结果

Table 2 Wave overtopping results of 3D harbor basin integral test

位置	端部 B 点 转角区	AB-1 区	AB-2 区	AB-3 区	AB-4 区	AB-5 区	AB-6 区	AB-7 区	AB-8 区	AB-9 区	端部 A 点 转角区
代表长度/m	124	42	42	42	42	42	42	42	42	36.4	75.6
越浪量 $Q/$ ( $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot (\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ )	0.51	2.02	4.95	3.84	6.84	5.27	5.35	3.03	4.00	20.71	13.79



(a) B 端各区段



(b) A 端各区段

图 5 波浪作用下各区段越浪现象

Fig. 5 Wave overtopping in each section under wave action

通过本次三维整体试验也发现,受局部波能集中的影响和突出拐点地形影响,该特殊位置整体模型试验越浪结果大于断面试验,而其它各位置均为断面试验越浪结果大于整体试验。因此对工程上局部越浪大的区段,建议其后方内陆集中采用设置大功率排水泵的应对措施。

综合上述研究成果,针对工程所提出的小于  $15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  越浪标准,结合二维断面物理模型试验、规范公式计算和三维港池整体物理模型多种研究手段的对比论证,选择大台阶断面形式,岛挡浪墙顶高程为 9.0 m 方案是可行的。

#### 4 结语

1) 通过本次试验研究,针对各因素对越浪影响试验得出:结构形式变化因素对越浪结果影响敏感度最大,断面高程因素次之,水动力条件(波浪、水位)因素最小。

2) 按照工程所提出的小于  $15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  的越浪指标,结合二维断面物理模型试验、规范公式计算和三维港池整体物理模型多种研究手段的对比论证,选择大台阶断面形式,岛挡浪墙顶高程为 9.0 m 方案是可行的。

3) 由本工程二维水槽试验、三维港池整体物理模型试验和规范公式计算越浪结果可知,规范公式计算偏小,三维整体试验除出现局部波能集中个别位置外,二维水槽断面试验结果偏大。因此为了更能真实反映原型波浪作用情况,应采用三维整体物理模型试验研究进行验证。

#### 参考文献

- [1] 陈国平,周益人,据烈红,等.海堤护面型式对波浪爬高和越浪的影响[J].水运工程,2005(10):28-30.  
CHEN Guo-ping, ZHOU Yi-ren, JU Lie-hong, et al. Influence of protective styles of seawall on wave runup and overtopping[J]. Port & Waterway Engineering, 2005(10): 28-30.
- [2] 陈铭辉,周益人.斜坡堤坡肩及平台护面类型对越浪量的影响[J].水运工程,2013(3):45-47.  
CHEN Ming-hui, ZHOU Yi-ren. Influence of shoulder and flat protection on overtopping for sloping breakwater[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(3): 45-47.
- [3] 常江,柳淑学,李金宣,等.斜坡堤堤顶宽度对越浪量影响的试

- 验研究[J].水动力学研究与进展 A 辑,2014,29(5):544-551.  
CHANG Jiang, LIU Shu-xue, LI Jin-xuan, et al. Experimental research on influence of the crest width on overtopping discharge over sloping breakwater[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(5): 544-551.
- [4] 孙大鹏,修富义,王键,等.扭王字块体护面斜坡堤越浪量试验研究[J].海洋工程,2019,37(5):1-9.  
SUN Da-peng, XIU Fu-yi, WANG Jian, et al. Experimental investigation on mean overtopping rate of sloping breakwater with acropode armor blocks[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(5): 1-9.
  - [5] 戈龙仔,管宁,陈汉宝,等.带挡浪墙斜坡堤在满足越浪要求下的高程优化试验研究[J].水道港口,2018,39(3):275-280.  
GE Long-zai, GUAN Ning, CHEN Han-bao, et al. Experimental study on elevation optimization of wave barrier for sloping dike under requirements of overtopping[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(3): 275-280.
  - [6] 张金成.防浪与胸墙高程控制设计优化[J].珠江水利,2015(13):86-87.  
ZHAN Jin-cheng. Design optimization of wave protection and wave wall elevation control[J]. Pearl River Water Transport, 2015(13): 86-87.
  - [7] 郭立栋,孙大鹏,黄明汉,等.斜坡堤越浪量影响因素的数值研究[J].中国港湾建设,2014(8):1-4,19.  
GUO Li-dong, SUN Da-peng, HUANG Ming-han, et al. Numerical study of wave overtopping effect factors on a sloping breakwater[J]. China Harbour Engineering, 2014(8): 1-4, 19.
  - [8] JTJ/T 234—2001,波浪模型试验规程[S].  
JTJ/T 234—2001, Wave model test regulation[S].
  - [9] JTS 145—2015,港口与航道水文规范[S].  
JTS 145—2015, Code of hydrology for harbour and waterway[S].
  - [10] 俞聿修.随机波浪及其工程应用[M].3版.大连:大连理工大学出版社,2003.  
YU Yu-xiu. Random waves and its engineering applications[M]. 3rd ed. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003.
  - [11] HIRAIISHI T, MOEHIZUKI N. Wave overtopping rate of seawall in directional sea[C]// Proceedings of 26th IAHR Congress-HYDRA 2000, 1995, 3: 251-256.
  - [12] 高峰,张华平,周加杰,等.印尼 KARANG TARAJE 港防波堤工程波浪整体模型试验研究[J].中国港湾建设,2015(9):20-23,35.  
GAO Feng, ZHANG Hua-ping, ZHOU Jia-jie, et al. Wave model test research on breakwater engineering of KARANG TARAJE Port, Indonesia[J]. China Harbour Engineering, 2015(9): 20-23, 35.