



不同平面布置方案对港内波浪影响

林尚飞, 陈国平, 严士常, 陈小婷

(河海大学港口、海岸与近海工程学院 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 结合揭阳港靖海作业区通用码头项目的建设, 开展波浪整体物理模型试验, 对工程码头及护岸设计波要素, 码头上水和港内波高分布进行了测定。根据工程不同平面布置方案中的试验结果, 确定最优化的工程总平面布置方案, 为港口工程的设计、建设提供了科学依据。同时, 简要讨论了工程中航道及港池开挖对波浪传播及港内泊稳的影响。

关键词: 揭阳港; 布置方案; 波高分布; 波浪折射

中图分类号: U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0061-06

Influence of different layout schemes upon waves inside port

LIN Shang-fei, CHEN Guo-ping, YAN Shi-chang, CHEN Xiao-ting

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence Ministry of Education, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Three-dimensional model test in wave basin is set up combined with the project of all-purpose wharf in Jinghai district of Jieyang harbor. The design wave parameters for the wharf structure and the revetments are obtained in wave basin. Also, the overtopping on wharf surface and the distribution of wave heights are studied in the experiment. Based on the test, the wave heights distribution in different layout schemes is analyzed to determine the optimal scheme and provides a scientific basic for the design and construction of the harbor. Meanwhile, the effect of excavation of navigation channel and harbor basin on wave transmission and wave conditions in harbor is briefly discussed.

Key words: Jieyang harbor; layout scheme; wave height distribution; wave refraction

波浪是影响沿海港口最重要的水动力因素之一, 为了研究港湾设施和港口建筑物的合理布局, 必须了解波浪的传播和变形特性。在海港建设中, 船只的平稳停泊及装卸作业, 是实现海港功能的基础、海港建设中首要考虑的问题。这就要求在防波堤或天然障碍物的掩护下, 港内停靠区域具有良好的波况。精确确定港内波浪条件对于海岸工程设计至关重要, 因此港内波浪的分布与特性一直以来是许多学者关注的问题。

针对实际工程中的波浪传播问题, 一般有理论分析、实验研究、现场观测以及数学模型等解

决方法。对于复杂地形的港域波浪特性研究, 物理模型研究能够较好反映波浪的传播变形特性。早在20世纪70年代初, 丹麦水工研究所就展开了应用不规则波进行防浪掩护试验。接着日本港湾研究所、挪威河道和港口研究所等也做了一些有关的研究。80年代初, 我国南京水利科学研究所也开始了用不规则波进行防浪掩护的模型试验研究工作^[1]。1983年, 顾家龙^[2]开展了连云港渔港整体物理模型试验探讨了模型相似律。1987年, 余广明^[3]开展实验研究验证了丹麦Ronne港口的港内波况数值模拟的计算成果。1999年, 张华昌^[4]结合

收稿日期: 2012-07-22

作者简介: 林尚飞(1990—), 男, 硕士研究生, 从事波浪与港口建筑物相互作用研究。

整体物理模型确定了东营港港区规划最佳方案。2000年以后,波浪物理模型得到了更为广泛的应用。例如,三亚南山港池^[5]、青岛造船基地^[6]、烟台港^[7]、青岛董家口港区^[8]等工程均开展了物理模型实验研究港内波浪条件。本文以揭阳港靖海作业区通用码头工程为例,通过波浪整体物理模型,研究复杂地形条件下工程不同方案中港内波高分布及特性。同时,研究了航道及港池开挖后波浪传播的变形,对工程建设有重要意义及实用价值。

1 工程概况

揭阳港靖海作业区通用码头工程地处广东省东南部,位于靖海湾内侧。工程拟建3个通用泊位,其中包括1#10万吨级泊位,采用透空墩台沉箱结构;2#5万吨级泊位和3#5000吨级泊位,采用连片沉箱结构。工程项目还包括防波堤、进港航道,以及陆域堆场、码头配套设施、港口公用配套基础设施等。港区进港航道等级为15万t,航道底高程-19.4 m,设计底宽214 m。港区东侧已建成斜坡式防波堤,主堤长1200 m,副堤长200 m,两堤轴线夹角为110°。

设计的工程规划方案共计4个。方案1:1#泊位布置在东侧、防波堤不变,沿用已建成防波堤方案。航道为西南走向,有2个回旋水域,大回旋水域直径578 m,小回旋水域位于2#和3#泊位之间,直径为446 m(图1);方案2:1#泊位布置在东侧,主防波堤南延580 m,其余和方案1一致;方案3:1#泊位布置在中部,从2#和3#泊位之间伸出,防波堤不变,沿用已建成防波堤方案。航道为西南走向,有3个回旋水域,大回旋水域直径578 m,第2个回旋水域位于1#和2#泊位之间,回旋水域直径为446 m,第3个回旋水域位于1#和3#泊位之间,回旋水域直径248 m;方案4:1#泊位布置在中部,防波堤南延约580 m,其余和方案3一致(图2)。

2 模型设计

波浪整体物理模型试验遵循JTJ/T 234—2001

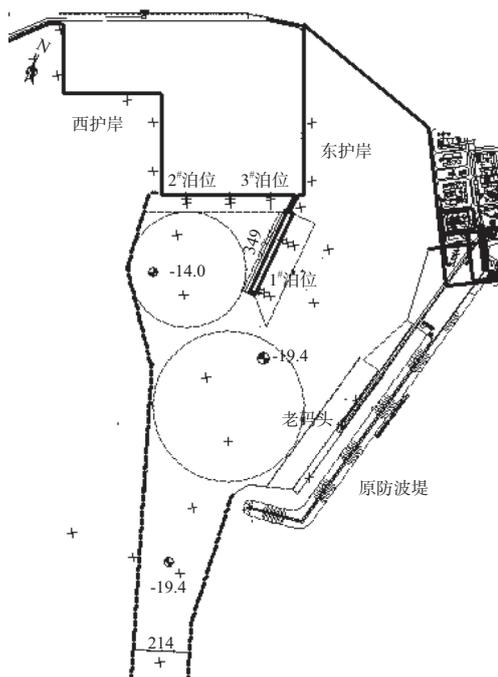


图1 方案1平面布置及测点分布

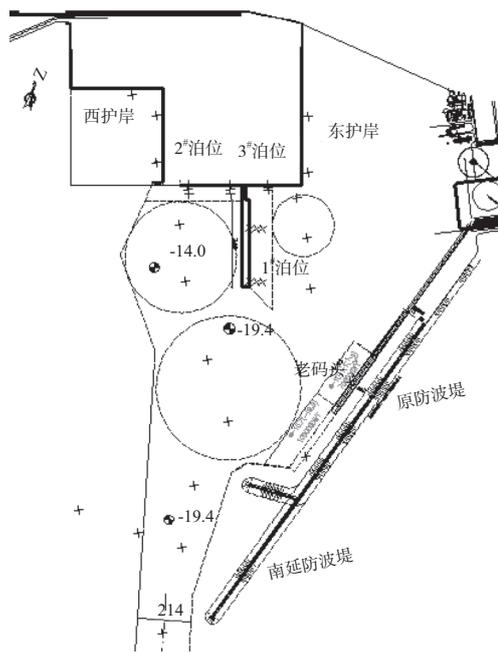


图2 方案4平面布置及测点分布

《波浪模型试验规程》,模型按重力相似准则设计,为定床、正态模型。综合考虑试验水池、模型范围、波浪要素以及实验仪器测量精度等因素,确定模型几何比尺为1:100。码头、引桥等建筑物的外形尺寸和高程均按设计图纸模拟制作,码头沉箱及引桥采用有机玻璃制造。实验在河海大学江宁校区的80 m×40 m×1.2 m的大型波浪

水池中进行, 水池中装备有多向不规则波造波机系统, 可按要求模拟规则波和各种谱型的不规则波。港内波高采用DJ-800型多功能数据采集、处理及分析。

试验采用波要素为数学模型计算提供, 考虑了不同的波浪重现期、水位及入射波方向, 同时进行了规则波 ($H_{4\%}$) 与不规则波 ($H_{13\%}$) 的试验 (表1)。试验中共开展了9种工况的试验, 考虑了4个平面布置方案中设置码头及护岸结构与否的8种工况及原始地形原防波堤条件下的工况。各方案无码头及护岸的波要素试验主要是为设计单位提供码头及东、西侧护岸等处的设计波要素, 同时与原始地形及原防波堤条件下波要素试验进行对比, 能够观察航道及回旋水域的开挖对港内码头、护岸等处的设计波要素所产生的影响, 这种工况下主要以50 a一遇的波要素为主。各方案有码头及护岸波要素试验, 主要观察码头的泊稳波高及各建筑物的波浪上水情况, 这种工况下主要以10 a一遇及2 a一遇的波要素为主。

表1 特征点设计波浪要素

潮位	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$	T/s	波向	重现期/a
极端高潮位 3.58 m		8.00	11.1	SE	50
		7.21	10.7	SSE	50
		5.99	9.9	S	50
		6.12	10.1	SE	10
		5.51	9.6	SSE	10
		4.53	8.9	S	10
		7.83	10.9	SE	50
		7.13	10.6	SSE	50
		5.92	9.9	S	50
设计高潮位 1.80 m		6.07	10.0	SE	10
		5.48	9.6	SSE	10
		4.51	8.9	S	10
		4.71	3.87	SE	2
		4.25	3.48	SSE	2
		3.47	2.82	S	2
设计低潮位 0.20 m		7.33	10.7	SE	50
		6.88	10.5	SSE	50
		5.86	9.9	S	50

3 试验结果及分析

3.1 建筑物设计波要素

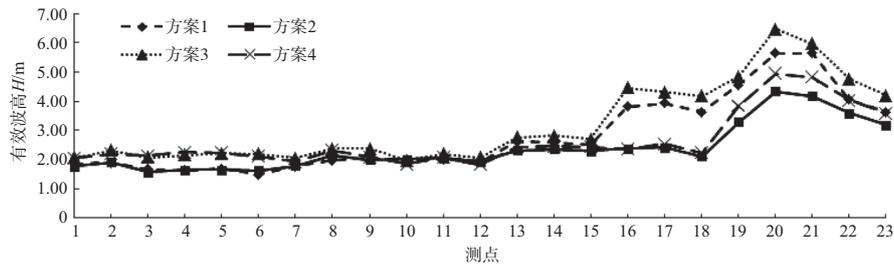
各方案无码头结构的试验组次在重现期为50 a一遇的波浪作用下, 比较码头、引桥、及护岸前沿的有效波高, 分析各建筑物的设计波要素。

图3~5表示各方案在极端高潮位50 a一遇的条件下SE向、SSE向、S向波浪作用时的建筑物前沿有效波高。图中横坐标为测点号, 纵坐标表示相应测点有效波高, 横坐标下方文字表示各测点位置。SE向波浪作用下, 入射波与防波堤轴线夹角为 58.5° , 原有防波堤已起到很好的掩护效果, 波浪主要通过绕射影响港内波高, 因此防波堤的延长对波高减小不明显, 仅西护岸区域波高显著减小。S向波浪作用时, 波浪从西侧向东传播, 防波堤的掩护效果较小。而且波浪入射方向与航道轴线夹角很小, 深水航道对波浪传播产生显著影响, 使得波浪在航道边坡处发生折射, 波能向航道两侧扩散, 传递至港内的波能较少, 使得防波堤延长前后港内波高均较小。而对于SSE向波浪, 入射波方向与防波堤轴线夹角为 36° , 防波堤延长使得港内的受掩护区域面积明显加大, 港内各测点波高明显减小。

SE向波浪作用时, 不论防波堤是否延长, 1#泊位码头结构布置在东部和中部时各处波高相差不大, 仅在西护岸区域东部布置方案的波高较小。防波堤未延长时, 在SSE向波浪作用下, 在东部布置方案均比中部布置方案波高小。在S向波浪作用下, 两方案中的波高仅有略微差别。防波堤延长后, 比较方案2和方案4。在SSE向及S向波浪作用下, 方案2中和方案4中在1#泊位及西护岸波高相差不大, 在引桥及东护岸处方案2中的波高略小, 3#泊位处方案2波高略大, 2#泊位处方案2波高明显较小。这主要因为方案4中1#泊位码头结构中布置, 3#泊位受到了1#泊位码头结构及引桥的掩护, 使得波高较小。

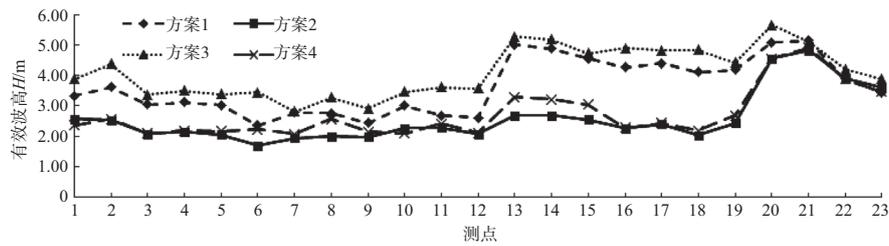
3.2 港内波高

各方案有码头结构的试验组次在设计高潮位重现期为2 a一遇的波浪作用下, 比较分析各泊位前沿、回旋水域及进港航道处的 $H_{4\%}$ 波高。从图6



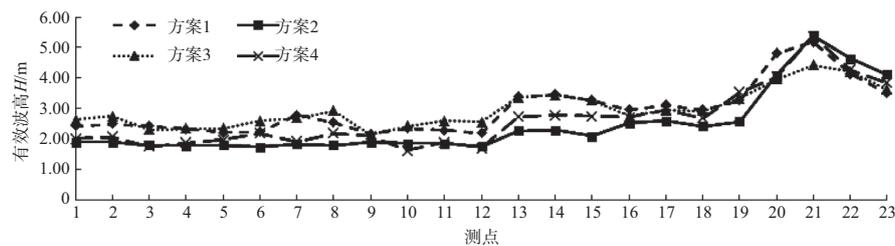
注：1[#]泊位（1~5），引桥（6），东护岸（7~9），3[#]泊位（10~12），2[#]泊位（13~18），西护岸（19~23）。

图3 SE向波浪作用时各方案建筑物前沿有效波高分布



注：1[#]泊位（1~5），引桥（6），东护岸（7~9），3[#]泊位（10~12），2[#]泊位（13~18），西护岸（19~23）。

图4 SSE向波浪作用时各方案建筑物前沿有效波高分布



注：1[#]泊位（1~5），引桥（6），东护岸（7~9），3[#]泊位（10~12），2[#]泊位（13~18），西护岸（19~23）。

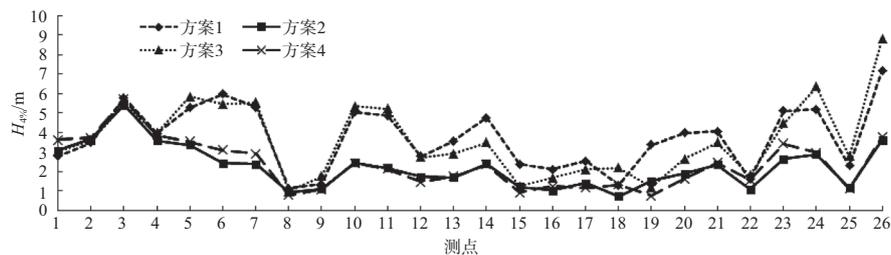
图5 S向波浪作用时各方案建筑物前沿有效波高分布

和图7可知，防波堤的延长使得港内波高减小，尤其对于SSE向波浪。比较防波堤延长后的方案，即方案2和方案4。SSE向及S向波浪作用时，1[#]泊位码头结构东部布置相比于中部布置，在进港航道及回旋水域处波高略小；在1[#]泊位和3[#]泊位波高略大；但2[#]泊位波高明显较小。主要原因仍是1[#]泊位码头结构的掩护作用。在设计高水位2 a一遇的规则波试验中，港内波高分布特征与不规则波类似。

3.3 码头上水

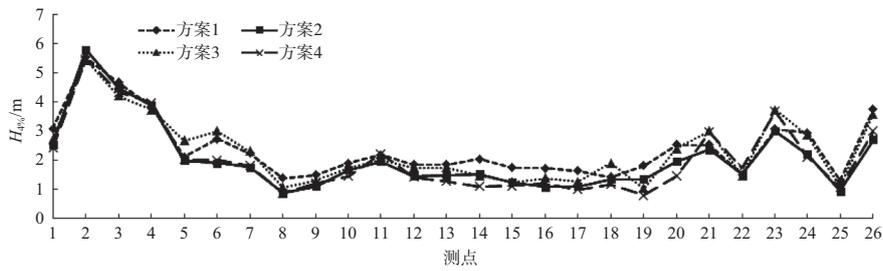
考虑设计高潮位、设计低潮位时以及波浪重现期为10 a, 2 a时，码头前沿基本不上水，分析比较极端高潮位重现期为50 a一遇的波浪作用，考虑各方案有码头结构的试验组次，比较分析各泊位码头上水。

表2表示各方案在极端高潮位50 a一遇SE向、SSE向、S向波浪作用时码头前沿上水高度。码头



注：进港航道（1~4），回旋水域（5~11），1[#]泊位（12~17），3[#]泊位（18~20），2[#]泊位（21~26）。

图6 设计高潮位2 a一遇SSE向不规则波作用时各方案港内H_{4%}分布



注: 进港航道(1~4), 回旋水域(5~11), 1[#]泊位(12~17), 3[#]泊位(18~20), 2[#]泊位(21~26)。

图7 设计高潮位2 a一遇S向不规则波作用时各方案港内 $H_{4\%}$ 分布

上水高度的计算方法为: 潮位加上波峰高度减去码头面高程, 向上为正, 向下为负, 正值表示码头上水高度, 负值表示码头不上水, 其绝对值为码头前波峰和码头面之间距离。

表2 不同向各方案码头上水高度 $\Delta H_{4\%}$ m

方向	位置	方案1	方案2	方案3	方案4
SE向	1 [#] 泊位	-3.16	-3.03	-3.19	-3.22
		-3.08	-3.22	-2.94	-3.22
	引桥	-3.68	-3.84	-3.67	-3.80
	3 [#] 泊位	-0.59	-0.95	-0.91	-1.07
		2 [#] 泊位	0.09	-0.17	0.54
SSE向	1 [#] 泊位	1.17	-0.62	1.43	-0.07
		-0.86	-2.04	-2.31	-2.46
	引桥	-2.68	-3.05	-2.21	-2.54
	3 [#] 泊位	-3.64	-4.04	-3.16	-3.49
		2 [#] 泊位	0.07	-0.43	-0.19
S向	1 [#] 泊位	2.30	0.20	3.49	1.15
		-1.82	-2.95	-2.37	-2.91
	引桥	3.59	-0.65	3.87	0.47
	3 [#] 泊位	-3.72	-3.99	-3.78	-3.81
		2 [#] 泊位	0.10	-0.62	-0.55
2 [#] 泊位	1.19	-0.13	1.28	0.70	
	2.33	0.43	1.78	0.78	

从表中可知, 2[#]泊位处码头上水高度较大, 而3[#]泊位上水高度极小, 1[#]泊位没有上水发生。主要因为1[#]泊位码头结构为透空式沉箱, 码头前沿反射较小; 2[#]泊位为连片直立式沉箱码头, 码头反射大; 3[#]泊位受掩护较好。防波堤的延长使得码头上水高度显著减小, 特别是2[#]泊位处。比较分析防波堤延长后的方案, 即方案2和方案4。1[#]、3[#]泊位码头均不上水, 2[#]泊位码头上水高度在方案4中明显较大。这主要因为1[#]泊位码头结构

中部布置时波能传递至2[#]泊位前沿, 能量较为集中, 使得波高较大。

3.4 航道及港池开挖的影响

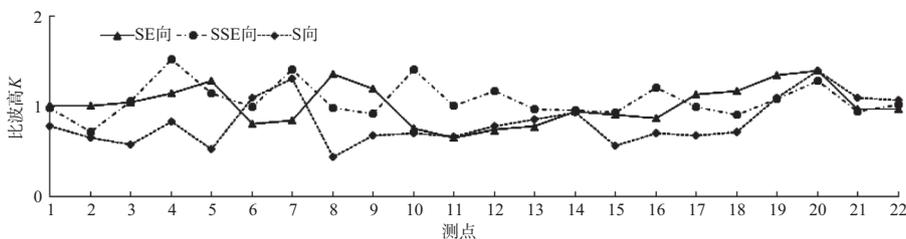
波浪在浅水区传播过程中, 波向线方向趋向于与等深线垂直, 波浪传播方向的变化是因为波速随深度的不同而改变导致波峰线的偏转。航道对波浪的影响表现为, 航道内的水深较大, 波速大于航道两侧波速, 波浪向航道外侧折射。

图8表示各方向波浪作用下, 方案1航道及港池开挖前后比波高分布。比波高 K 大于1, 表明航道开挖后波高变大; 反之, 波高变小。SSE及SE向波浪作用时, 在原始地形下, 波向传递趋向于西侧区域; 航道开挖后, 航道的迎浪侧波浪不有效穿越航道, 因而在航道的迎浪边坡及原防波堤堤头附近产生了波能集中现象, 使得靠近堤头处波高增大, 而后在航道背浪侧波浪向西侧折射, 使得2[#]泊位及西护岸等区域波高略微增大, 港内多数测点波高略有减小。S向波浪入射时, 方向基本沿着航道轴线, 波能向港区外侧扩散十分显著, 除西护岸区域部分波高增大外, 其余各测点波高均有明显减小。因此, 在进行总平面设计时, 应合理选择进港航道的方向, 尽量避免航道导致的波能集中造成的不利影响, 改善港内泊稳条件及航道航行条件。

开挖地形后, 不同的波浪入射方向对于港内波高的影响是有差别的。此外, 航道水深也是影响波浪传播变形的重要因素之一。航道水深的变化主要有2种方式: 一是航道的开挖, 二是水位的变化。对于航道某一固定断面, 水深的变化体现在航道内外水深之比 ($d_{内}/d_{外}$) 的变化。在本实验

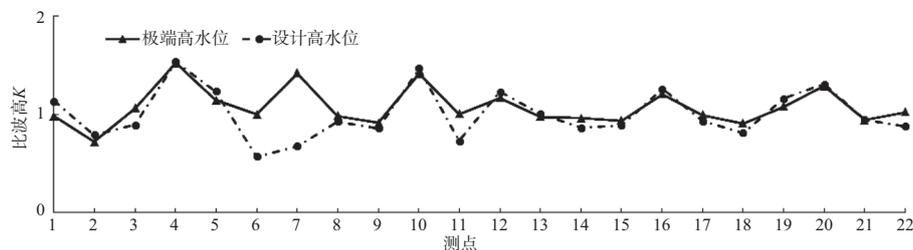
中，对于同一入射方向，不同潮位情况下，港内波高呈现规律性的变化。随着潮位降低，航道内外水深比增大，航道的折射作用加强，使得港内

各测点比波高值大于1处波高增大，比波高值小于1处波高减小（图9）。设计低水位时波浪破碎较为严重，因此此处不考虑设计低水位的情况。



注：进港航道（1~3），回旋水域（4~9），1#泊位（10），东护岸（11~14），3#、2#（15~17），西护岸（18~22）。

图8 极端高潮位50 a一遇各方向波浪作用下方案1航道开挖前后比波高分布



注：进港航道（1~3），回旋水域（4~9），1#泊位（10），东护岸（11~14），3#、2#（15~17），西护岸（18~22）。

图9 50 a一遇SSE向波浪作用下不同潮位方案1比波高分布

4 结论

试验过程主要针对不同的平面布置方案测量了码头、引桥及护岸的设计波要素，港内各特征点波高并计算码头上水。通过分析，防波堤的延长虽然加大了经济投资，但是能够明显加强港区内的掩护效果，降低了建筑物的设计波高，各泊位前沿的泊稳波高，进港航道及回旋水域处波高，能够较好地保证码头结构安全，增加泊位作业天数，并更好地保障进出港船只的航行安全。在防波堤延长后的2个方案中，1#泊位码头结构东侧布置时，3#泊位处波高略大，1#泊位、东西护岸处波高相差不大，进港航道及回旋水域处波高略小，2#泊位处波高明显较小，且码头前沿上水也较小。因此推荐方案2为工程平面布置方案，即1#泊位码头结构布置在东侧且原防波堤南延580 m的方案。

试验中也表明了航道开挖对于港内波浪的影响是十分显著的。当波浪平行于航道轴线入射时，航道内波浪由边坡向外扩散，航道轴线上波能迅速衰减。当波浪与航道轴线成一定夹角入射时，在迎浪侧局部地区产生波能集聚。且航道对

波浪的折射作用随着水深的降低而增强。在本工程中，对于S向入射波浪，防波堤的掩护效果较差，但波浪在传播过程，受到深水航道的折射作用后才将波能传递至港内，因此港内波浪条件良好。对于SSE向及SE向入射波，防波堤的掩护效果良好，但波浪传递至航道迎浪侧边坡时产生波能集聚，使得进港航道口门处局部区域波高增大，且传递至港内波能增多，港内多数区域波高也增大。因此，在港口工程规划设计中，必须充分认识进港航道对波浪传播的影响，合理选择航道走向及航道尺度。

参考文献：

- [1] 周家宝. 不规则波模型试验概述及入射波和反射波分解方法的简介[J]. 水利水运科学研究, 1983 (4): 72-81.
- [2] 顾家龙. 港口防浪掩护整体模型试验相似律探讨[J]. 水运工程, 1983(10): 9-16.
- [3] 余广明, Morten Rugbjerg, Asger Kej. 港域波动的数值模型及其与物理模型和现场观测的比较[J]. 水利水运科学研究, 1987(4): 39-45.
- [4] 张华昌, 饶永红. 东营港防波堤平面设计及整体模型试验[J]. 海岸工程, 1999, 18 (4):50-58.

（下转第108页）