



桩基挡板式防波堤内的泊稳状况研究

柳玉良, 夏运强, 张华昌, 沈如军
(海军工程设计研究院, 北京 100070)

摘要: 以某港扩建工程设计方案为范本, 通过整体水工物理模型试验, 观测到大量的桩基挡板式单突堤在不同工况波浪作用下港内的泊稳数据, 并对这种较为特殊的防波堤的防护效果及影响因素进行了较为完整的分析, 试验结果为工程设计提供了很好的参考依据, 同时对类似环境条件下的建港工程具有借鉴意义。

关键词: 桩基; 挡板; 防波堤; 泊稳; 透射; 绕射

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0086-06

Wave conditions behind breakwater through cylinder foundation

LIU Yu-liang, XIA Yun-qiang, ZHANG Hua-chang, SHEN Ru-jun
(Navy Engineering Design and Research Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: Taking the design scheme of a port expansion project as an example, this paper observes large amounts of data on mooring steadiness of cylinder foundation single jetty under a great variety of wave conditions by the 3D physical model test, and analyses the defended effect and influential factors. The test results provide a reference for the harbor engineering construction.

Key words: pile foundation; baffle; breakwater; mooring steadiness; transmission; diffraction

通常, 透空式防波堤由不同结构形式的支墩和在支墩之间没入水中一定深度的挡浪结构组成, 利用挡浪结构挡住波能传播, 来达到减小港内波浪的目的。支墩可采用重力式、桩式或管柱式结构。挡浪结构可采用箱式、挡板式和带消能栅的挡板式等形式。透空式防波堤一般适用于水深较大而波浪不大又无防沙要求的情况^[1]。近年来透空式结构受到了人们的青睐, 做了大量的研究并被应用于防波堤的建设中^[2]。关于桩基透空堤, 国内外学者曾经做过一些试验研究和理论探讨^[3-4], 取得了一定的成果。

1 试验资料

某港位于渤海湾西南岸的黄河三角洲。随着国民经济的发展和黄河三角洲的不断开发, 原港

区的吞吐能力已远远不能适应经济发展的需求, 港口扩建势在必行。该扩建工程规划的两个泊位呈L型布置, 采用了桩基透空挡板式防波堤兼码头结构, 两个泊位有效长度均为300 m, 通过引桥与后方陆域连接(图1~3)。

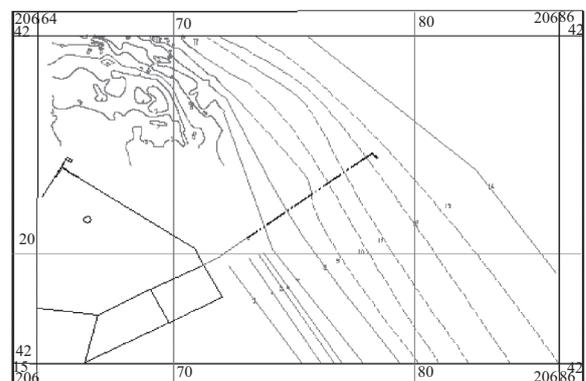


图1 防波堤平面布置

收稿日期: 2013-01-18

作者简介: 柳玉良(1971—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事近海及海岸工程物模试验研究工作。

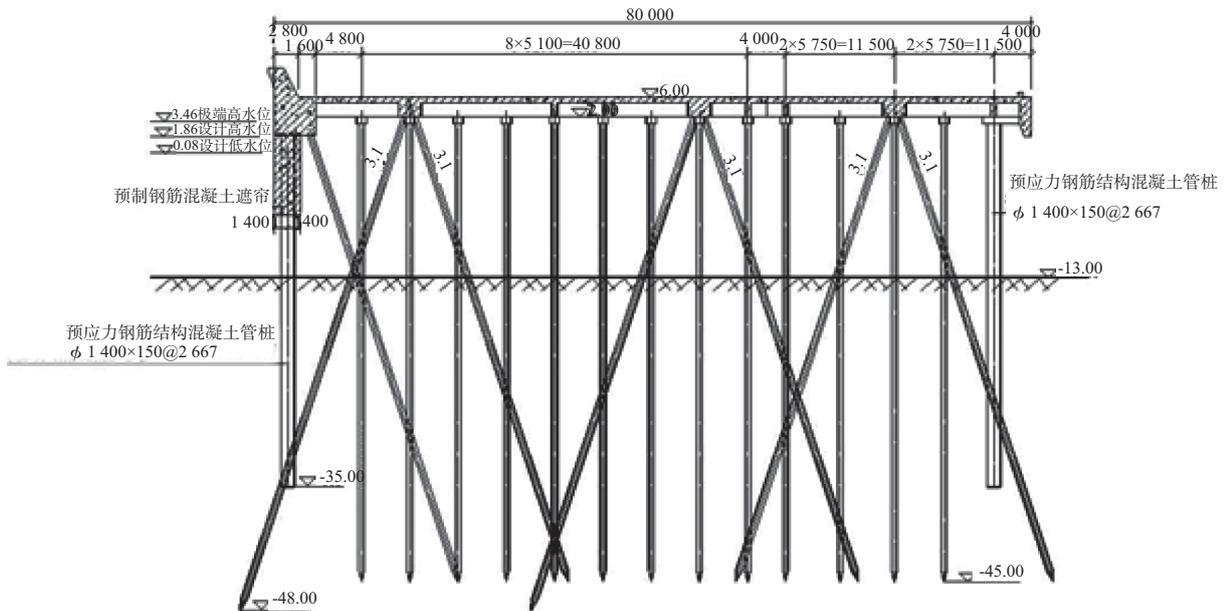


图2 1#防波堤兼码头断面

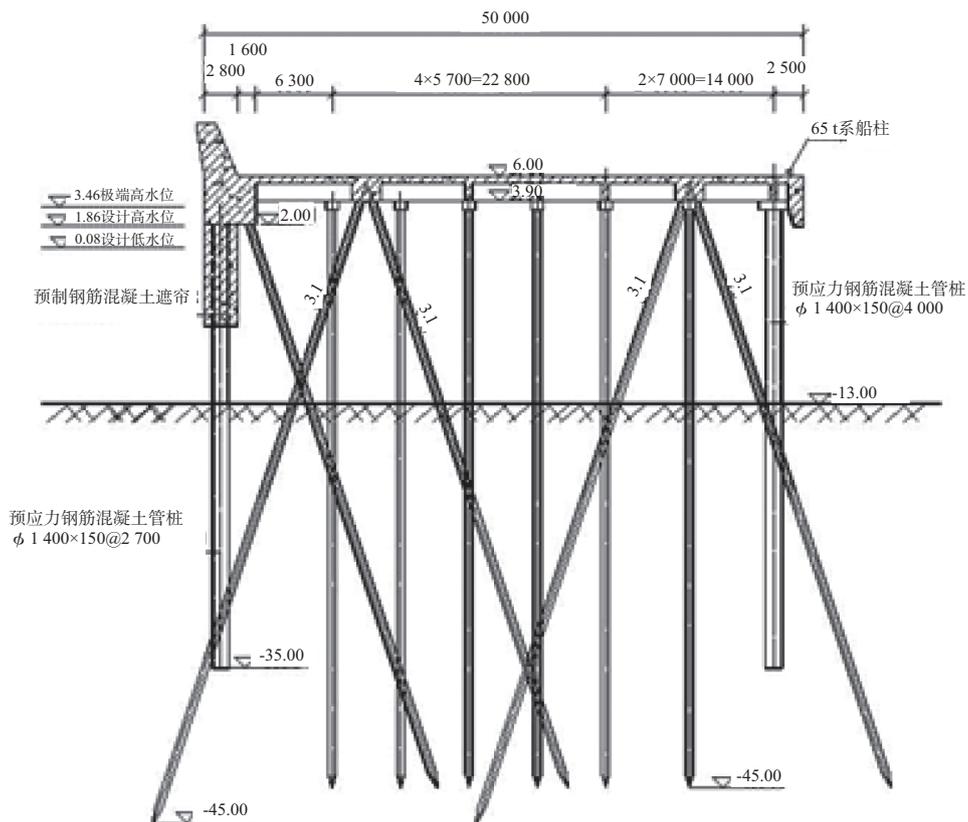


图3 2#防波堤兼码头断面

影响扩建港区的常浪向和强浪向均为NE方向，波浪条件见表1。外海入射波浪经过该构筑物以绕射和透射叠加方式行进入到港内，遇桩基和挡板又产生反

射波，因此港内波况较为复杂，而目前没有较为合适的计算方法解决这一问题，该防波堤的防护效果及港池的泊稳条件难以确定，不利于港口的管理和使用。

表1 试验波浪要素

水位	NE,NNE				ENE			
	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{1/3}/m$	T_s/s	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{1/3}/m$	T_s/s
极端高水位3.46 m	6.98	6.05	5.05	9.8	6.79	5.88	4.90	9.7
设计高水位1.86 m	6.92	6.03	5.05	9.8	6.73	5.85	4.90	9.7
设计低水位A 0.08 m	6.51	5.68	4.78	9.6	6.35	5.53	4.64	9.4
设计低水位B 0.08 m	4.90	4.23	3.50	8.1	4.26	3.66	3.00	7.5

试验在长55 m, 宽30 m, 深1.1 m的室内水池中进行, 造波系统为液压伺服多向不规则波造波机, 造波板单宽0.5 m, 总宽度为26 m。模型长度比尺 $\lambda=80$, 时间比尺 $\lambda_t = \sqrt{80}$ 。波高测量采用多个电阻式波高仪和SG2000型数据采集及处理系统进行同步观测。

试验采用单向不规则波, 按照JONSWAP风浪谱模拟^[5]:

$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{5.5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \gamma^{\exp[-(f/f_0 - 1)^2/2\sigma^2]} \quad (1)$$

式中: $H_{1/3}$ 为有效波高(m); T_p 为谱峰周期(s); γ 为谱峰升高因子, 取3.3。

$$\beta_j = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^1} \cdot (1.094 - 0.01915\ln\gamma) \quad (2)$$

$$T_p = \frac{\bar{T}}{1 - 0.532(\gamma + 2.5)^{-0.569}} \quad (3)$$

不规则波在波形稳定后, 采集连续作用的有效波数不少于100个, 数据采集时间间隔为20 ms, 有效波高、有效周期的偏差为 $\pm 5\%$ 以内。

为观测港内泊稳情况, 布置21个浪高仪测点(图4)。

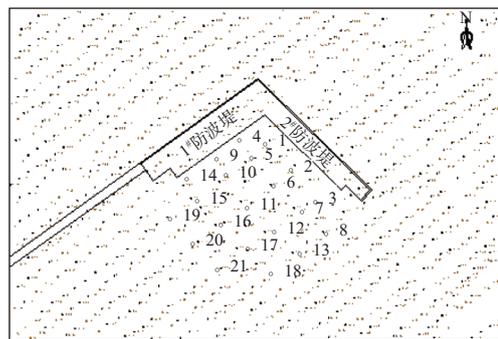


图4 港内波高测点布置

2 试验结果

调整2#防波堤挡板入水深度, 挡板底高程分别为-6.5, -10, -11.5, -13.0 m, 在不同水位、不同方向波浪作用下, 观测港内泊稳情况, 并计算各测点实测波高 $H_{4\%}$ 与外海入射波高 $H_{4\%}$ 的比波高值。

对观测的波浪数据进行统计分析, 并分别计算不同工况下各测点比波高的平均值, 结果见表2。

表2 港内各测点 $H_{4\%}$ 比波高值

挡板底高程/m	水位	波向	测点号										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-6.5	极端高	ENE	0.47	0.42	0.66	0.38	0.40	0.44	0.62	0.89	0.34	0.38	0.57
		NE	0.27	0.36	0.33	0.27	0.27	0.31	0.40	0.64	0.35	0.25	0.30
	设计高	ENE	0.58	0.51	0.64	0.52	0.54	0.52	0.70	0.90	0.51	0.52	0.65
		NE	0.45	0.45	0.49	0.50	0.43	0.42	0.59	0.68	0.57	0.47	0.44
	设计低A	ENE	0.59	0.56	0.65	0.58	0.60	0.56	0.73	0.79	0.54	0.57	0.67
		NE	0.50	0.56	0.56	0.54	0.53	0.53	0.58	0.69	0.60	0.51	0.55
-10.0	极端高	ENE	0.28	0.24	0.41	0.22	0.22	0.20	0.43	0.87	0.19	0.21	0.33
		NE	0.22	0.24	0.25	0.19	0.18	0.20	0.28	0.61	0.26	0.20	0.24
	设计高	ENE	0.45	0.35	0.50	0.37	0.39	0.38	0.58	0.80	0.35	0.33	0.46
		NE	0.39	0.31	0.36	0.38	0.38	0.30	0.41	0.65	0.42	0.40	0.32
	设计低A	ENE	0.40	0.40	0.51	0.37	0.39	0.39	0.59	0.81	0.34	0.40	0.50
		NE	0.37	0.33	0.35	0.37	0.37	0.33	0.38	0.65	0.42	0.34	0.32

续表2

挡板 底高程/m	水位	波向	测 点 号										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-11.5	极端高	NNE	0.20	0.19	0.22	0.28	0.22	0.19	0.22	0.30	0.32	0.30	0.20
		ENE	0.24	0.19	0.34	0.18	0.18	0.15	0.38	0.87	0.15	0.17	0.27
		NE	0.21	0.21	0.22	0.17	0.16	0.16	0.24	0.60	0.23	0.18	0.22
	设计高	NNE	0.25	0.28	0.28	0.35	0.29	0.26	0.30	0.36	0.41	0.39	0.28
		ENE	0.40	0.31	0.45	0.33	0.35	0.33	0.53	0.76	0.30	0.28	0.41
		NE	0.31	0.25	0.28	0.28	0.28	0.23	0.32	0.62	0.32	0.30	0.25
	设计低A	NNE	0.28	0.31	0.31	0.39	0.36	0.31	0.34	0.39	0.46	0.45	0.34
		ENE	0.34	0.35	0.47	0.31	0.33	0.34	0.54	0.82	0.29	0.35	0.44
		NE	0.33	0.27	0.29	0.32	0.32	0.27	0.32	0.61	0.36	0.29	0.26
-13.0	设计低B	ENE	0.26	0.27	0.36	0.30	0.29	0.24	0.41	0.87	0.31	0.23	0.30
		NE	0.28	0.29	0.27	0.26	0.31	0.27	0.27	0.58	0.21	0.20	0.23

挡板底高 程/m	水位	波向	测 点 号										
			12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	平均
-6.5	极端高	ENE	0.74	0.84	0.35	0.52	0.68	0.76	0.87	0.56	0.68	0.71	0.58
		NE	0.45	0.60	0.34	0.29	0.28	0.50	0.58	0.29	0.26	0.46	0.37
	设计高	ENE	0.69	0.89	0.51	0.54	0.72	0.77	0.91	0.66	0.75	0.75	0.65
		NE	0.62	0.67	0.57	0.51	0.48	0.63	0.67	0.55	0.51	0.61	0.54
	设计低A	ENE	0.74	0.82	0.57	0.66	0.73	0.73	0.88	0.67	0.76	0.73	0.67
		NE	0.64	0.66	0.58	0.60	0.56	0.66	0.64	0.62	0.59	0.65	0.59
-10.0	极端高	ENE	0.56	0.88	0.20	0.25	0.48	0.60	0.83	0.28	0.51	0.65	0.42
		NE	0.35	0.57	0.27	0.24	0.22	0.37	0.54	0.24	0.24	0.37	0.30
	设计高	ENE	0.59	0.87	0.31	0.34	0.55	0.65	0.88	0.41	0.59	0.71	0.52
		NE	0.45	0.63	0.43	0.39	0.34	0.48	0.64	0.42	0.38	0.50	0.43
	设计低A	ENE	0.66	0.85	0.37	0.44	0.59	0.70	0.86	0.47	0.64	0.66	0.54
		NE	0.45	0.67	0.38	0.40	0.32	0.48	0.66	0.42	0.35	0.49	0.42
-11.5	极端高	NNE	0.21	0.20	0.33	0.33	0.25	0.22	0.15	0.35	0.29	0.31	0.25
		ENE	0.50	0.89	0.17	0.19	0.42	0.54	0.82	0.22	0.46	0.63	0.38
		NE	0.32	0.56	0.24	0.22	0.20	0.33	0.52	0.22	0.23	0.34	0.27
	设计高	NNE	0.26	0.25	0.43	0.41	0.35	0.32	0.21	0.44	0.42	0.37	0.33
		ENE	0.56	0.86	0.26	0.29	0.50	0.60	0.87	0.35	0.53	0.70	0.47
		NE	0.37	0.59	0.33	0.30	0.26	0.39	0.58	0.32	0.30	0.41	0.35
设计低A	NNE	0.32	0.27	0.48	0.45	0.43	0.36	0.25	0.51	0.52	0.43	0.38	
	ENE	0.64	0.86	0.31	0.37	0.54	0.68	0.84	0.41	0.60	0.63	0.5	
	NE	0.39	0.65	0.32	0.34	0.26	0.43	0.67	0.37	0.29	0.44	0.37	
-13.0	设计低B	ENE	0.55	0.87	0.28	0.23	0.37	0.55	0.84	0.28	0.43	0.71	0.43
		NE	0.37	0.62	0.28	0.26	0.29	0.32	0.62	0.23	0.30	0.49	0.33

由于海底高程为-13.0 m, 该防波堤试验中当挡板底高程为-13.0 m时, 实际上就是直墙式结构, 该工况港内波浪以堤头绕射波为主。

3 影响港内波况的因素分析

就桩基透空式防波堤而言, 由于其结构的特

殊性, 影响港内波况的因素很多, 并且各种因素相互影响, 较为复杂, 现仅从挡板入水深度、水深及波向3个较主要方面的作用进行讨论。

3.1 挡板的作用分析

从入射波的方向及防波堤的平面布置看, 分析挡板的作用, NE向的试验数据更具有代表性。

计算NE向各工况波浪作用下港内测点的比波高平均值，以及挡板相对入水深度（实际入水深度与相应入射波高 $H_{4\%}$ 的比值），绘出平均比波高与挡板相对入水深度的关系曲线（图5）。由图5可见，港内波高随着挡板入水深度的增加而减小，但这种变化的幅度受到入射波及堤头绕射波等因素的影响，反映到各个水位是不尽相同的。经进一步计算分析，防波堤挡板的底高程为-6.5 m时，比波高较大，在设计高水位NE向波浪作用下，港内各测点 $H_{4\%}$ 比波高的平均值为0.54；将挡板底高程降低至-10.0 m，在同样的波浪作用下，港内各测点 $H_{4\%}$ 比波高的平均值为0.43，防波堤消浪效果提高了24%；继续降低挡板底高程至-11.5 m，在设计高水位NE向波浪作用下，港内各测点 $H_{4\%}$ 比波高的平均值为0.35，防波堤消浪效果比挡板-6.5 m高程时提高了41%。由此可见，对于这种桩基透空式防波堤，设置挡板并根据使用要求调整其入水深度，可行之有效地提高消浪效果。

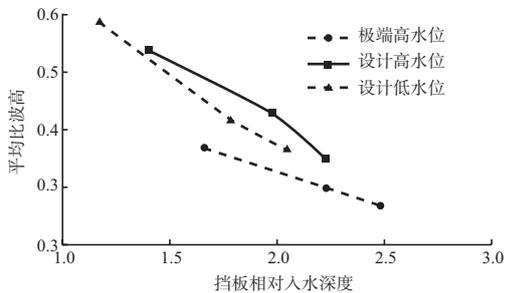


图5 平均比波高与挡板相对入水深度的关系曲线

3.2 水深的影响性分析

受潮汐的影响，防波堤工程区水位处在不断变化过程中，由于水深的不同，波能作用集中的范围也不同，由挡板下进入港内的波能肯定有所差异，所以，同一个建筑物结构，其在不同水深情况下的消浪性能就有待分析掌握。

利用试验中采集到的极端高水位、设计高水位和设计低水位A工况下NE向波浪作用数据，分别计算3种水位下港内各测点比波高的平均值及水深与入射波高的比值（ d/H ），绘制平均比波高与 d/H 的关系曲线，见图6。从图6可以看出，2#防波堤挡板底高程分别为 -6.5,-10.0,-11.5 m时，在试验中测到的比波高随水深波高比(d/H)的变化规律

是基本一致的，即在试验工况下比波高随 d/H 的增大而减小。

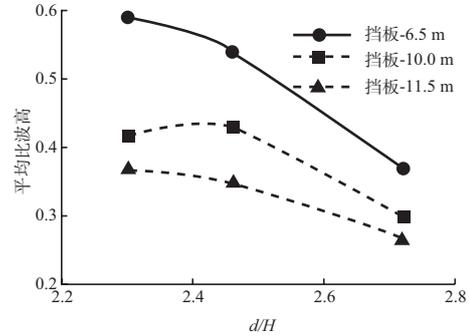


图6 港内平均比波高与 d/H 的关系曲线

3.3 波向的影响性分析

该防波堤试验中，2#防波堤挡板底高程为-11.5 m时进行了3个波浪方向的港内波况测试，即NNE向、NE向和ENE向，以便掌握不同方向波浪对港内水域平稳度的影响。NE向波浪与2#防波堤轴线的法线夹角仅为 0.55° ，将其视为 0° 垂直入射，NNE向波浪则以 -22.5° 作用于2#防波堤，ENE向波浪以 22.5° 作用于2#防波堤。以波向角度为横坐标，平均比波高为纵坐标，绘制港内波况随入射波向的曲线变化，见图7。试验采用的入射波浪在NNE向至ENE向 45° 范围内变化，由于该港口的1#和2#防波堤呈L型布置，波浪从NNE至NE向进入港内时，受到1#防波堤的遮挡，一部分波能被挡板反射回去。从图7可以看出，在 $-22.5^\circ \sim 0^\circ$ 的波向范围内，港内波高以透射波为主，平均比波高变化很小；而从波向 $0^\circ \sim 22.5^\circ$ ，平均比波高陡然增大，说明由堤头绕射进入港内的波能大幅增加，这时港内水域平稳度的主要影响因素是透射波浪及堤头绕射波浪相互叠加的合成波。

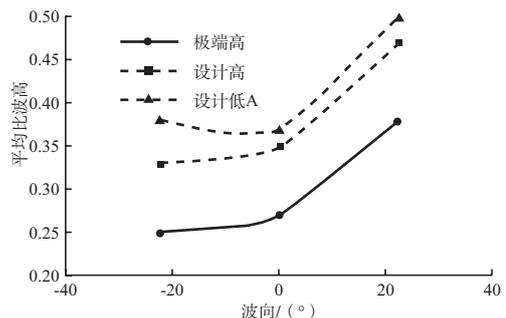


图7 遮帘-11.5 m港内平均比波高与波向关系曲线

4 绕射波对港内波况影响的理论计算

对于本工程桩基透空式的防波堤, 港内波浪是堤头绕射波、挡板下的透射波、折射波以及港内波浪遇桩基和挡板产生的反射波组成的合成波, 而以绕射波和透射波为主。该防波堤的平面布置决定了在ENE和NE向波浪作用下, 波浪在2#防波堤堤头产生的绕射波对港内影响较大。但目

前理论上还难以计算其绕射波高, JTJ 213—1998《海港水文规范》中也只给出了直墙式和斜坡式两种结构形式的图解法^[6]。假设该桩基防波堤为直墙式单突堤, 利用《海港水文规范》中图7.2.1-3和图7.2.1-4计算在设计低水位B的ENE和NE向波浪作用下, 图4中各测点处港内绕射系数(即比波高), 见表3。

表3 理论计算港内绕射系数值

波向	测点编号																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ENE	0.32	0.38	0.45	0.35	0.38	0.44	0.54	0.83	0.44	0.47	0.54	0.69	0.83	0.50	0.54	0.63	0.72	0.84	0.61	0.68	0.76
NE	0.27	0.29	0.38	0.28	0.29	0.31	0.40	0.70	0.29	0.30	0.38	0.53	0.70	0.34	0.37	0.43	0.55	0.70	0.40	0.46	0.54

理论计算直立式单突堤的绕射系数与实测港内绕射波高(挡板底高程-13.0 m)相比, 靠近开敞区域的测点, 二者比较接近, 说明实测数据较为可靠, 而掩护区内实测值略小于理论计算值。由于受防波堤布置形式及结构的影响, 试验中绕射波传至港内, 遇桩基及挡板, 构建前后交错遮掩, 多次改变水质点的运动方向, 使之相互碰撞或产生涡流, 消耗波能, 从而使掩护区内实测波浪较理论计算值小。

式中: H_t 为透射波高; H 为入射波高; L 为波长; d 为堤前水深; t_0 为挡板的入水深度; ξ 为系数。

5 透射波对港内波况影响的理论计算

Wiegel假设透射能量等于挡板下的入射波能量, 用微幅波理论推导出有限水深情况下波浪透射系数的近似解:

$$K_t = \sqrt{\frac{2k(d-h) + \text{sh}[2k(d-h)]}{2kd + \text{sh}(kd)}} \quad (4)$$

式中: d 为堤前水深; h 为挡板的入水深度; k 为波数。

我国的《防波堤设计与施工规范》^[7]中也给出了桩基透空堤透射系数的近似计算公式, 作为工程设计计算的依据:

我国的《防波堤设计与施工规范》^[7]中也给出了桩基透空堤透射系数的近似计算公式, 作为工程设计计算的依据:

$$K_t = \frac{H_t}{H} = \sqrt{\frac{(1-\xi)\text{sh}\left[\frac{2\pi}{L}(d-t_0)\right]\text{sh}\frac{2\pi}{L}[(2d-t_0)]}{\text{sh}\frac{2\pi d}{L}\text{sh}\frac{4\pi d}{L}}} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{H}{H+0.5L} \exp\left[-\frac{t_0}{2(d-t_0)}\right] \quad (6)$$

表4 理论计算波浪透射率值

公式	水位	流向	挡板底高程/m		
			-6.5	-10.0	-11.5
《防波堤设计与施工规范》公式	极端高水位	ENE	0.39	0.23	0.16
		NE	0.39	0.24	0.16
	设计高水位	ENE	0.43	0.26	0.17
		NE	0.44	0.26	0.17
	设计低水位A	ENE	0.48	0.28	0.19
		NE	0.49	0.29	0.19
Wiegel公式	极端高水位	ENE	0.52	0.34	0.24
		NE	0.52	0.35	0.24
	设计高水位	ENE	0.56	0.37	0.26
		NE	0.57	0.37	0.26
	设计低水位A	ENE	0.62	0.40	0.28
		NE	0.62	0.41	0.29

从表4可见, 《防波堤设计与施工规范》公式的计算值较Wiegel公式计算值偏小, 但不同公式理论计算值的变化趋势都与试验实测港内合成