



波长对桩基透空式防波堤透浪性的影响

柳玉良¹, 荆 昆², 王海峰¹

(1. 海军工程设计研究院, 北京 100070; 2. 中交天津港湾工程设计院有限公司, 天津 300222)

摘要: 桩基透空式防波堤的透浪性主要受波浪水深条件、挡浪板入水深度、桩基结构布置等因素的影响, 并且各种因素相互作用, 较为复杂。结合两个实际工程的断面物模试验, 着重分析了波长对防波堤透浪性的影响, 试验结果对类似工程的设计具有较好的参考价值。

关键词: 桩基; 波长; 挡浪板; 防波堤; 透浪系数

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0070-05

Effect of wave length on wave permeability of cylinder-foundation breakwater

LIU Yu-liang¹, JING Kun², WANG Hai-feng¹

(1. Navy Engineering Design and Research Institute, Beijing 100070, China; 2. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Many factors influence the permeability of the cylinder-foundation breakwater, such as wave, depth of water, depth of manger board and structure arrangement of cylinder, etc., which are very complicated. The effect of wave length on the permeability of breakwater is analyzed by two 2D physical model tests. The results may serve as reference for the design of harbor engineering.

Key words: cylinder foundtion; wave length; manger board; breakwater; coefficient of wave transmission

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, 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。透空式防波堤在材料使用上和经济学上是合理的, 但它不能阻止泥沙入港, 也不能减小水流对港内水域的干扰。一般适用于水深较大而

波浪不大又无防沙要求的情况^[1]。

1 试验资料

1.1 工程 1

某港扩建工程规划两个泊位, 采用了桩基透空式防波堤兼码头结构, 试验断面见图 1。

影响扩建港区的常浪向和强浪向均为 NE 方向, 试验采用的波要素为 NE 和 NW 向 2 a 一遇, 见表 1。

表 1 工程 1 试验波浪要素

工程	水位/m	重现期/a	波向	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{1/3}/m$	T_s/s	波长 L/m	$\delta = H_{4\%}/L$	d/L
工程 1	设计高水位 1.86	2	NE	5.08	4.37	4.24	3.60	8.2	69.3	1/16	0.21
	NE		4.90	4.23	4.11	3.50	8.1	65.6	1/16	0.20	
	设计低水位 0.08	2	NW	3.71	3.17	3.08	2.60	6.9	51.6	1/16	0.25
工程 2	极端高水位 3.53	50		1.20	1.00	0.97	0.80	8.9	82.0	1/83	0.12
		2		0.72	0.60	0.58	0.48	7.5	58.2	1/97	0.16
	设计高水位 2.75	50		1.14	0.95	0.92	0.76	8.9	77.9	1/82	0.11
		2		0.68	0.57	0.55	0.46	7.5	55.3	1/97	0.16
	设计低水位 0.28	50		1.08	0.90	0.87	0.72	8.9	73.8	1/82	0.09
		2		0.65	0.54	0.52	0.43	7.5	52.4	1/97	0.12

收稿日期: 2013-10-10

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。

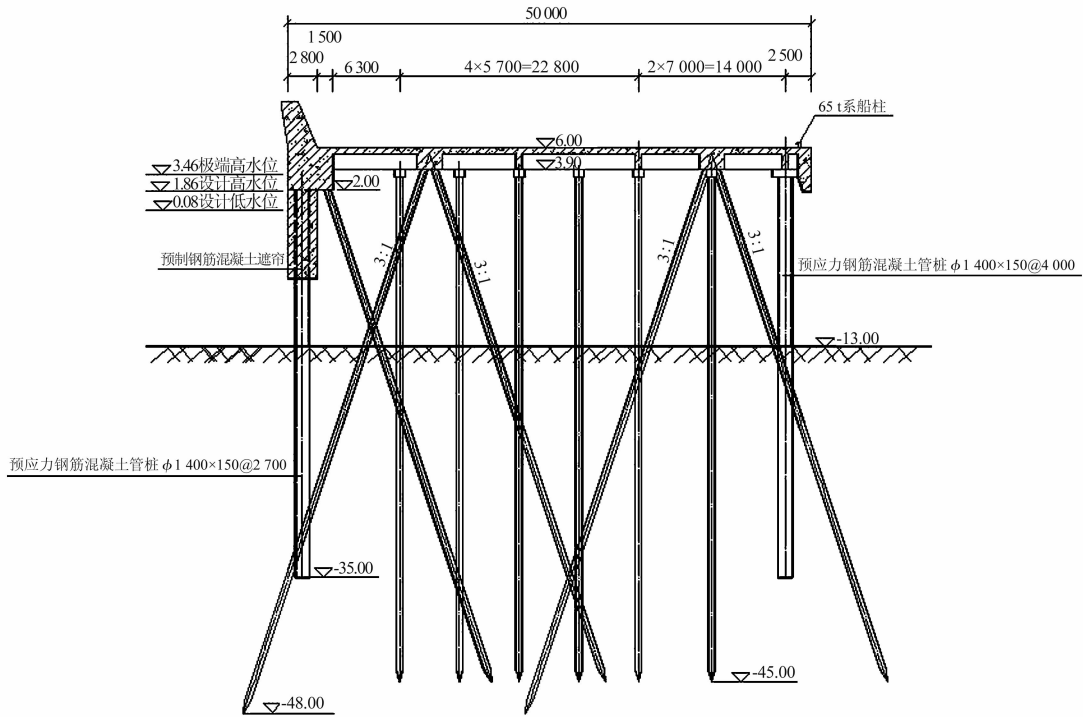
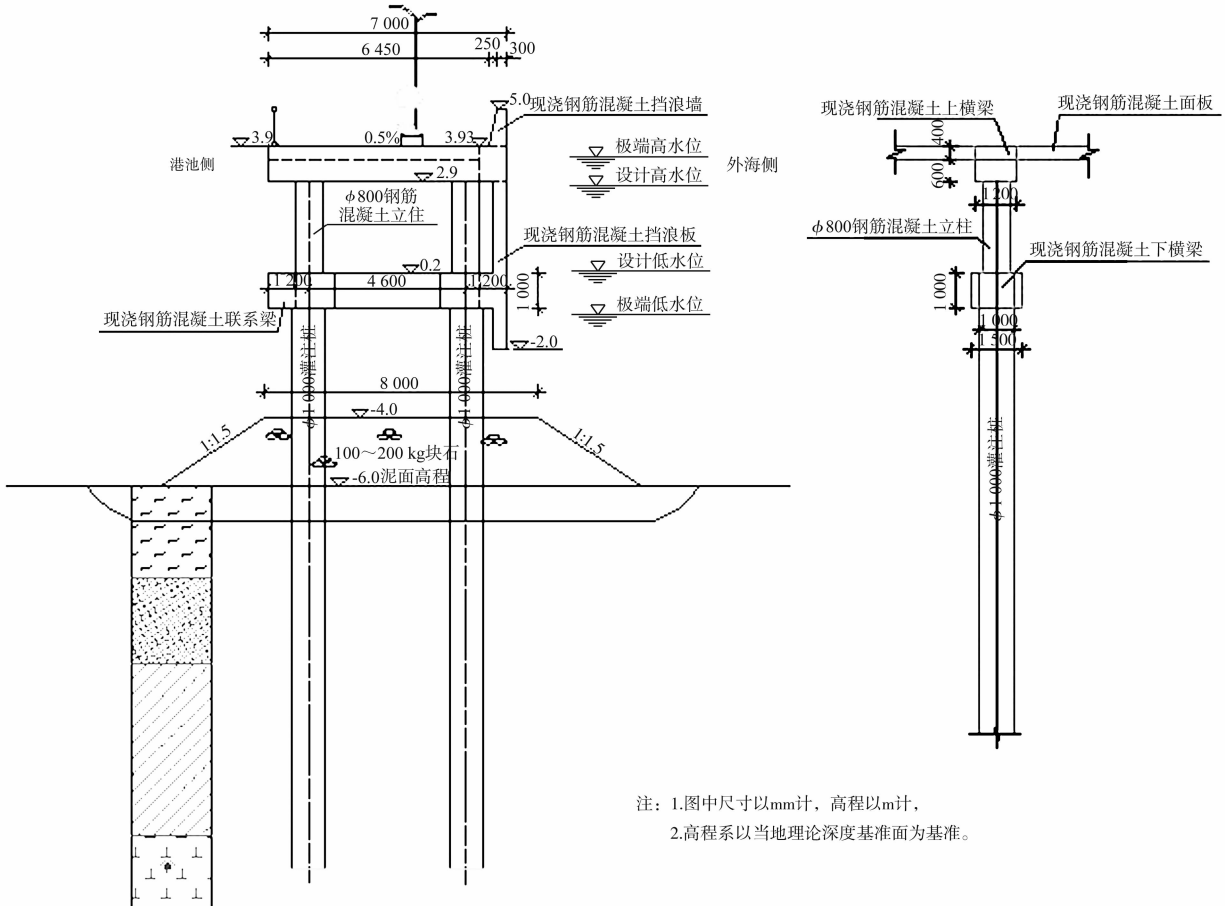


图 1 工程 1 防波堤兼码头断面

1.2 工程 2

某游艇码头工程的防波堤也采用桩基透空式

结构, 试验断面见图 2。试验采用的波要素为 NW 向 50 a 和 2 a 一遇, 见表 1。



注: 1.图中尺寸以mm计, 高程以m计,
2.高程系以当地理论深度基准面为基准。

图 2 工程 2 防波堤断面

1.3 试验条件

两个工程的试验均在 55 m × 1.2 m × 1.2 m 的室内水槽中进行,造波系统为电机推板式不规则波造波机。工程 1 模型长度比尺 λ = 40, 时间比尺 λ_t = √40; 工程 2 模型长度比尺 λ = 15, 时间比尺 λ_t = √15。波高测量采用多个电阻式波高仪和 DS-30 数据采集及处理系统进行观测。

试验采用单向不规则波,按照 JONSWAP 风浪谱模拟^[2]:

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

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

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

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。

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 ±5% 以内。

为研究桩基透空堤的透浪性,在港内侧距防波堤 50 m 处布置浪高仪测点,观测不同波浪作用下外海入射波经防波堤后的透浪情况。

2 试验结果

试验均在防波堤顶不越浪的情况下观测。调整防波堤挡浪板的入水深度,在不同水位、不同波浪作用下,观测港内透射波情况,并计算测点实测波高 H_{4%} 与外海入射波高 H_{4%} 的比值,即透浪系数。对观测的波浪数据进行统计分析,试验结果见表 2。

表 2 港内 H_{4%} 透浪系数

工程	挡浪板底高程/m	挡浪板入水深度/m	水位	波向	重现期/a	外海入射波 H _{4%} /m	透浪系数 实测 H _{4%}	Wiegel 公式	规范公式	
1	-6.5	8.36	设计高水位	NE	2	4.37	0.52	0.51	0.39	
		6.58	设计低水位	NE	2	4.23	0.55	0.58	0.45	
				NW	3.17	0.50	0.51	0.39		
		-8.5	10.36	设计高水位	NE	2	4.37	0.34	0.41	0.29
			8.58	设计低水位	NE	2	4.23	0.34	0.46	0.34
		NW			3.17	0.32	0.40	0.29		
	-11.5	13.36	设计高水位	NE	2	4.37	0.14	0.23	0.15	
		11.58	设计低水位	NE	2	4.23	0.20	0.26	0.17	
				NW	3.17	0.16	0.22	0.14		
					5.53	极端高水位		50	1.00	0.51
	-2.0	4.75	设计高水位	NW	50	0.95	0.57	0.63	0.52	
		2.28	设计低水位		50	0.90	0.70	0.78	0.69	
				50	1.00	0.47	0.52	0.40		
2	-3.0	6.53	极端高水位	NW	2	0.60	0.45	0.48	0.36	
		5.75	设计高水位	NW	50	0.95	0.55	0.54	0.42	
				2	0.57	0.49	0.50	0.38		
				50	0.90	0.64	0.67	0.56		
	3.28	设计低水位	NW	2	0.54	0.59	0.64	0.53		

3 防波堤透浪系数的理论计算

近年来,透空式防波堤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^[3]。关于桩基透空堤,国外学者也曾经做过一些试验研究和理论探讨^[4-5],取得了一定的

成果,发表的资料包括 Wiegel 和 Haysshi 等的研究。

Wiegel 假设透射波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, $k = 2\pi/L$ 。

《防波堤设计与施工规范》^[6]中也给出了桩基透空堤透浪系数的近似计算公式, 作为工程设计计算的依据:

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

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

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

采用以上两个公式分别计算本文中工程 1 及工程 2 各波浪条件下的透浪系数, 见表 2。

4 波长对防波堤透浪性的影响

两个工程实例的实测防波堤透浪系数介于两个理论公式计算结果之间, 比公式 (4) 计算结果平均偏小 16%, 比公式 (5) 计算结果平均偏大 10%, 实测值与计算值吻合较好, 试验结果具有较高的可信度。Wiegel 的波浪透射率近似计算公式和《防波堤设计与施工规范》的计算公式中, 都考虑了桩基防波堤波长的影响, 说明波周期对透浪系数是非常重要的影响因素。但波长是一个带量纲的绝对参数, 不便于分析比较, 将其无量纲化为波陡 (H/L) 和相对水深 (d/L) 两个参数进行分析。

4.1 波陡 (H/L) 的影响

从表 1 可以看到, 工程 1 试验波要素波陡较大, $H_{4\%}/L$ 为 1/16, 工程 2 试验波要素波陡较小, $H_{4\%}/L$ 在 1/97 ~ 1/82, 两个工程入射波的波陡相差 5 ~ 6 倍。进一步分析波陡对实测透浪系数的影响, 见表 3。

表 3 港内 $H_{4\%}$ 透浪系数分析

工程	挡浪板底 高程/m	水位	波向	重现期/a	外海入射 波 $H_{4\%}$ /m	实测 $H_{4\%}$ 透浪系数	挡浪板入水 深度/入射波 $H_{4\%}$	$\delta = H_{4\%}/L$	d/L
1	-6.5	设计高水位	NE	2	4.37	0.52	1.91	1/16	0.21
		设计低水位	NE	2	4.23	0.55 [#]	1.56 [#]	1/16 [#]	0.20 [#]
			NW	2	3.17	0.50 [*]	2.08 [*]	1/16 [*]	0.25 [*]
		-8.5	设计高水位	NE	2	4.37	<u>0.34</u>	<u>2.37</u>	<u>1/16</u>
	设计低水位		NE	2	4.23	0.34	2.03	1/16	0.20
			NW	2	3.17	0.32	2.71	1/16	0.25
	-11.5		设计高水位	NE	2	4.37	0.14	3.06	1/16
		设计低水位	NE	2	4.23	0.20	2.74	1/16	0.20
			NW	2	3.17	<u>0.16</u>	<u>3.65</u>	<u>1/16</u>	<u>0.25</u>
		-2.0	极端高水位		50	1.00	0.51 [*]	5.53 [*]	1/83 [*]
	设计高水位		NW	50	0.95	0.57	5.00	1/82	0.11
	设计低水位			50	0.90	<u>0.70</u>	<u>2.53</u>	<u>1/82</u>	<u>0.09</u>
极端高水位			NW	50	1.00	0.47	6.53	1/83	0.12
2	-3.0	设计高水位	NW	50	0.95	0.55 [#]	6.05 [#]	1/82 [#]	0.11 [#]
			2	0.57	0.49 [*]	10.09 [*]	1/97 [*]	0.16 [*]	
	设计低水位	NW	50	0.90	<u>0.64</u>	<u>3.64</u>	<u>1/82</u>	<u>0.09</u>	
			2	0.54	0.59	6.07	1/97	0.12	

这里定义挡浪板的相对入水深度 = 挡浪板入水深度/入射波 $H_{4\%}$ 。从表 3 中数据可以看到, 带

有“ ”的两组数据, 虽然二者挡浪板的相对入水深度比较接近, 分别为 2.37 和 2.53, 但由于

波陡相差 5 倍 ($\frac{1}{16} : \frac{1}{82} = 5$)，导致实测透浪系数相差较大，分别为 0.34 和 0.7，两个工程防波堤的消浪效果差别亦较大，表 3 中带有“ \sim ”的两组数据也反映了同样的现象。再分别对比带有“ $_$ ”和“ \sim ”的数据，工程 1 波陡较大，透浪系数随挡浪板相对入水深度的增加 (2.37→3.65) 而减小明显 (0.34→0.16)，工程 2 波陡较小，透浪系数随挡浪板相对入水深度的增加 (2.53→3.64) 而稍有减小 (0.7→0.64)，可见，当入射波波陡较小时，试图通过加大挡浪板入水深度来减小港内透射波高，其效果并不理想。

表 3 中带有“#”的两组数据，透浪系数均为 0.55，即相同的消浪效果，工程 1 的挡浪板相对入水深度却只有工程 2 的 1/4 ($1.56 : 6.05 = 1/4$)，原因是工程 1 波陡较大，约为工程 2 的 5 倍 ($\frac{1}{16} : \frac{1}{82} = 5$)。再对比表 3 中带有“*”的数据，3 组数据透浪系数非常接近，分别为 0.5，0.51，0.49，但各自对应的挡浪板相对入水深度和波陡则差别明显。将 3 组数据绘成曲线，见图 3。经分析可见，在本文的两个工程试验范围内，防波堤达到同样的消浪效果，波陡越大时，挡浪板的相对入水深度就越小，反之，波陡越小，则挡浪板的相对入水深度越大。

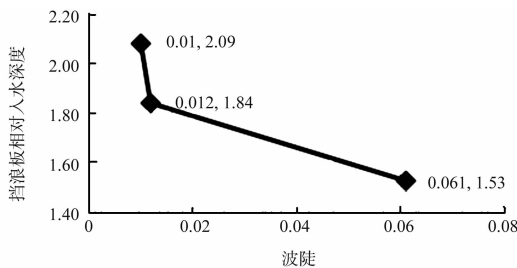


图 3 波陡-挡浪板相对入水深度关系 (透浪系数相同)

4.2 相对水深 (d/L) 的影响

分析相对水深对透浪系数的影响同样采用上述方法，对比表 3 中带特殊标记的数据可见：挡浪板相对入水深度接近时，相对水深较大，防波堤消浪效果好；相对水深较小，则防波堤消浪效果欠佳。而相对水深较大 (工程 1) 时，防波堤透浪系数对挡板相对入水深度反应敏感，增加挡板

入水深度可有效减小港内透射波高；相对水深较小 (工程 2) 时，增加挡板入水深度后港内透射波高减小不够明显。

5 结语

诚然，工程 1 和工程 2 防波堤的断面宽度不同、桩基结构不同，但实测透浪系数与理论计算值均较接近，说明通常情况下断面宽度和桩基结构不是影响防波堤透浪的主要因素，理论计算公式中也未考虑这些因素。

通过对两个桩基透空式防波堤实测透浪系数的分析对比，可以看到，长周期波在传播过程中波能衰减较少，入射波波长是港内透射波高大小的主要影响因素。波长较短时，防波堤消浪效果较好，波长较长则反之。因此，当外海入射波浪周期较大时，应尽量避免采用桩基透空式结构的防波堤，以使港内有良好的泊稳条件。本文中的两个工程具有各自的特点，工程 1 防波堤经多年使用，效果良好；工程 2 防波堤虽消浪效果不很理想，但由于入射波高小，港内波况仍能满足使用要求。因此，这两个工程都是综合考虑了水文及地质条件、使用要求、造价等因素而采用的比较合理的结构形式。

参考文献:

- [1] 陈万佳. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [2] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2002.
- [3] 滕斌, 韩凌, 李玉成. 波浪对透空外壁双筒柱的绕射[J]. 海洋工程, 2001(1): 32-37.
- [4] 赫尔别克. 海岸及海洋工程手册(第一卷)[M]. 李玉成, 陈士荫, 俞聿修, 等. 译. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.
- [5] Herbich J B, Douglas B. Wave transmission through a double-row pile breakwater[C]//Proc 20th International Conference on Coastal Engineering: ASCE, 1987: 2 303-2 313.
- [6] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [7] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [8] 柳玉良, 夏运强, 张华昌, 等. 桩基挡板式防波堤内的泊稳状况研究[J]. 水运工程, 2013(8): 86-91.