

离岸式高桩码头对后方护岸工程的影响

查恩尧

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 针对受离岸高桩码头掩护的后方护岸工程设计波浪难以确定的问题, 结合实际工程, 通过波浪断面物理模型和局部整体物理模型试验, 研究码头工程对护岸设计波浪、越浪量和断面结构稳定性的影响。结果表明, 高桩码头上部结构对后方护岸有良好的掩护效果, 尤其在高位时, 消浪效果较好; 受掩护良好的后方护岸工程, 堤顶高程受高位控制, 可以适当降低堤顶高程; 护岸结构稳定性, 尤其护底、护脚块石, 主要受较低水位控制, 而低水位时码头对护岸的掩护效果有限, 波高降低幅度很小。

关键词: 离岸式高桩码头; 护岸; 堤顶高程; 越浪量

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0052-06

Impact of offshore high pile wharf on rear revetment project

ZHA En-yao

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to determine the design wave data of the rear revetment works sheltered by the offshore high-piled wharf, this paper combines the actual project with the 2D wave physical model and 3D wave physical model tests, and studies the design wave, overtopping and cross-section stability of the revetment under the influence of the wharf. The results show that the superstructure of a high-piled wharf has a good shelter effect on the rear revetment works, especially at the high water level has a good effect on wave attenuation. The embankment top elevation of the rear sheltered revetment is controlled by the high water level, and the embankment top elevation can be appropriately reduced. The stability of the revetment structure, especially the bottom protection and foot protection, is mainly controlled by the lower water level, but wave height reduction is limited because of the bad sheltered by the wharf when the lower water level.

Keywords: offshore high-piled wharf; revetment; embankment top elevation; overtopping

淤泥质海岸由于滩面比较平缓, 深水区离岸距离较远, 泥沙容易淤积, 通常采用离岸式高桩码头, 并通过引桥与陆域连接, 一般采用顺岸式布置, 在高位时, 码头上部结构对后方水域的波浪有良好的掩护作用, 有利于后方陆域护岸工程的安全稳定。有关高桩码头对后方护岸工程的影响研究较少, 以往研究主要针对透空式防波堤对港内泊稳波高的影响。1947 年 Ursell^[1] 首先研究

了无限水深下垂直挡浪板的透浪系数; 1960 年 Wiegel^[2] 利用波能流守恒, 由微幅波理论推导出有限水深情况下透浪系数的近似解析解; 苏联拉帕教授通过试验推导出透浪系数的经验公式, 并被我国《防波堤与护岸设计规范》^[3] 采纳。国内学者对透空式防波堤的透浪系数也开展了一些试验研究, 麻志雄^[4] 对上海吴淞口炮台湾船舶基地高桩承台透空堤断面进行了透浪系数的试验研究; 邵

收稿日期: 2020-06-05

作者简介: 查恩尧 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程咨询、设计与管理。

杰等^[5]采用物理模型试验对不规则波作用下垂直挡板式防波堤透浪系数进行了研究。本文结合实际工程，通过波浪断面和局部整体物理模型，研究桩基透空式码头对后方护岸的设计波浪、越浪量和结构稳定性的影响。

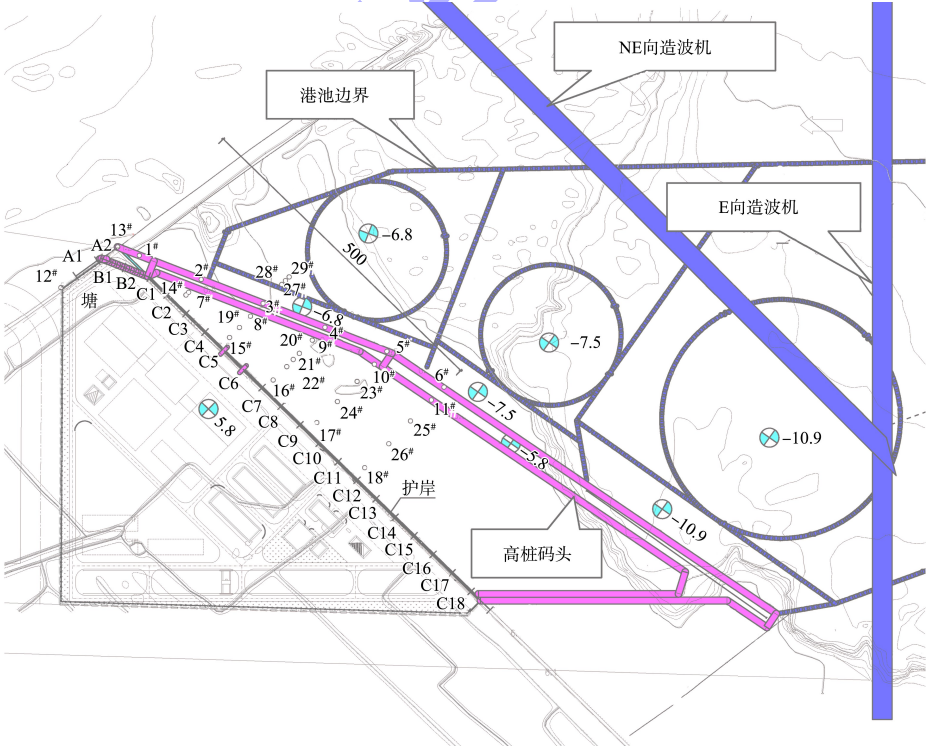
1 工程概况

本工程位于广州南沙港区南沙作业区，码头东侧为伶仃洋，南侧为陆域坑塘，西侧为龙穴岛东北角现有陆域，北侧为鳧洲水道。码头工程拟规划建设码头岸线 1 000 m，并在码头后方陆域建设车间、仓库等配套设施。码头为栈桥式布置(图 1)，采用高桩梁板式结构方案(图 2)，通过引桥与后方陆域连接。码头工程设计标准为 50 a 一遇；陆域临海侧为现有护岸，长约 870 m，护岸设计标准提高为 100 a 一遇，本工程须对现有护岸进行加固处理，断面见图 3。由于工程所在位置主要受 E~NE 向小风区浪控制，外海涌浪影响较小，不同重现期的设计水位和设计波浪要素见表 1。考

虑到高桩码头上部结构在较高潮位时，对波浪有一定的掩护作用，护岸设计波浪要素将明显减小，拟通过波浪断面物理模型试验和波浪局部整体物理模型试验，对护岸设计方案进行科学论证，为工程设计提供依据。

表 1 试验波要素

水位(当地理论基准面)/m	波浪重现期/a	波向	有效波高 H_e /m	周期 T /s
4. 87(200 a 一遇)	200	E	3. 0	5. 8
		NE	2. 6	4. 7
4. 71(100 a 一遇)	100	E	2. 5	5. 3
		NE	2. 2	4. 3
4. 57(极端高水位)	50	E	2. 3	5. 0
		NE	2. 0	4. 1
3. 24(设计高水位)	200	E	2. 8	5. 7
	100	E	2. 3	5. 1
	50	E	2. 1	4. 9
	200	NE	2. 4	4. 5
	100	NE	2. 0	4. 1
	50	NE	1. 8	3. 9



注：1#~29#为波高观测点；C1~C18为越浪量观测点。

图 1 工程平面布置 (单位: m)

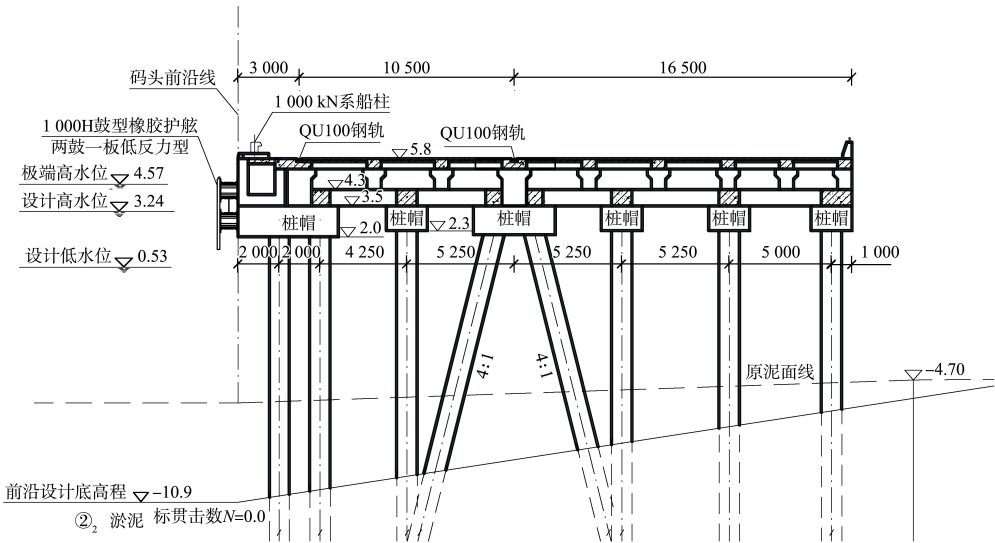


图 2 码头断面 (尺寸: mm; 高程: m)

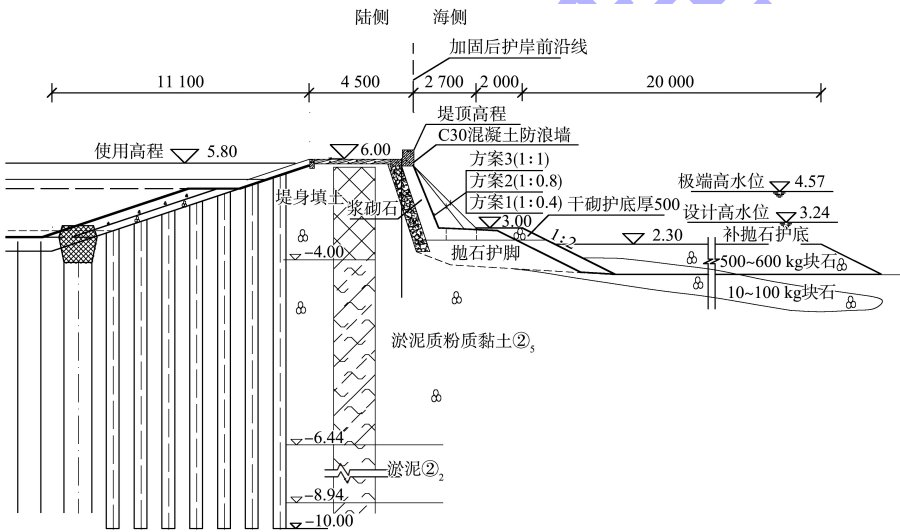


图 3 护岸加固断面 (尺寸: mm; 高程: m)

2 试验设备和方法

波浪断面物理模型试验在河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室的风浪水槽中进行(图4),水槽长80 m、宽1.0 m、高1.5 m,水槽一端安装不规则造波机,另一端设置消波系统,水槽纵向分为两部分,一部分铺设试验断面,另一部分用以消除波浪的二次反射,模型几何比尺1:16。波浪局部整体物理模型试验在长40 m、宽40 m、高1.5 m的大型波浪港池中进行,港池中装有可移动的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,港池四周装有消浪设施以减小波浪的二次反射,模型几何比尺

1:40。试验采用的不规则波频谱为 JONSWAP 谱,试验水位及波浪要素见表1。将波高传感器放置在计算点处进行波浪要素率定,在无建筑物的情况下,复核设计波浪要素,按照《波浪模型试验规程》^[6]的规定,波高误差 $\leq \pm 5\%$,周期误差 $\leq \pm 5\%$,波能谱总能量的允许偏差为 $\pm 10\%$ 。

采用断面板法模拟地形,地形制作完成后高程误差控制在 ± 2.0 mm 以内,块石按密度和级配相似挑选,混凝土胸墙采用砂浆加铁粉模拟,码头结构采用有机玻璃制作。波高采用 DJ-800 型多功能系统进行数据采集、处理及分析,越浪量采用集水称质量法。



a) 波浪水槽



b) 局部整体物理模型试验

图 4 波浪水槽和局部整体物理模型试验

3 试验成果分析

3.1 波浪断面物理模型试验结果

波浪断面试验中不考虑高桩码头对护岸的掩护作用，试验断面见图 3。护岸堤底土面高程为 1.0 m，堤底设置抛石护底，护底顶高程为 2.3 m，护底宽度为 20 m，护底单个块石质量为 500~600 kg。2.3 m 高程抛石护底上接 1:2 斜坡至 3.0 m 高程，3.0 m 高程设置宽度为 2 m 护脚棱体，采用厚度为 500 mm 干砌块石。护脚棱体后设置陡墙，陡墙斜面面层采用浆砌块石，斜面坡度设计 3 种方案：方案 1 坡度为 1:0.4；方案 2 坡度 1:0.8；方案 3 坡度 1:1。护岸上部采用 C30 混凝土防浪墙，防浪墙顶高程为 6.4 m，堤顶高程为 6.0 m，堤顶宽度为 4.5 m，堤顶采用厚度为 500 mm 路面护面，路面后侧布置混凝土格梁。

试验分别研究护底块石、护脚棱体、挡浪墙、堤顶路面等部位的稳定性。结果表明，500~600 kg 的护底块石质量偏大，采用 300~500 kg 块石也可满足稳定要求；150~250 kg 的护脚棱体块石，虽然能满足失稳率 < 5% 的要求，但考虑到护脚的重

要性和施工质量问题，拟采用 300~500 kg 块石，与护底块石一致，也便于施工；设计断面其余各部位均满足稳定要求。试验还测量了越浪量，并对断面进行优化，各方案越浪量结果见表 2。

表 2 各方案越浪量

潮位/ m	波高/ m	周期/ s	挡浪墙顶 高程/m	越浪量/(L·m ⁻¹ ·s ⁻¹)		
				方案 1	方案 2	方案 3
4.87	3.00	5.80	6.4	83	92	113
			6.7	61	64	—
			7.0	25	35	53
4.71	2.50	5.30	6.4	42	47	61
			6.7	32	34	—
			7.0	16	22	25
4.57	2.30	5.00	6.4	25	28	32
			6.7	15	15	—
			7.0	6.8	10	11
	2.80	5.70	6.4	0.3	0.5	1.6
			6.7	0.1	0	—
			7.0	0	0	0
3.24	2.30	5.10	6.4	0	0.1	0.5
			6.7	0	0	—
			7.0	0	0	0
	2.10	4.90	6.4	0	0	0
			6.7	0	0	—
			7.0	0	0	0

从试验结果可以看出：护岸坡度越陡，越浪量越小。研究确定护岸坡度采用 1:0.4，并根据试验结果对护岸结构进行优化，提出推荐方案见图 5，采用带挑檐挡浪墙，挑檐宽度 0.2 m，墙顶高程为 7.0 m，护底及挡浪墙前肩台采用单块质量为 300~500 kg 大块石保护。

对推荐断面进行验证性试验的结果表明：300~500 kg 护底块石个别滚动，经过各级潮位及相应波浪相当于原型 3 h 作用后，9 个护底块石失稳，失稳率为 1%，挡浪墙前肩台 1 个块石失稳，破坏数 N_d 为 0.06，满足稳定要求。挑檐的挑浪效果较好，特别是 50 a 及 100 a 一遇潮位时大部分越浪水体被挑向外海，50 a 一遇极端高潮位 4.57 m 及相应 50 a 一遇波浪有效波高 $H_s = 2.30$ m、平均周期 $\bar{T} = 5.0$ s 的作用下越浪量为 1.4 L/(m·s) (表 3)。虽然 200 a 一遇潮位下，越浪量仍然较大，但考虑到高桩码头对后方的掩护和斜向浪作用，拟在波浪局部整体物理模型试验中做进一步验证。

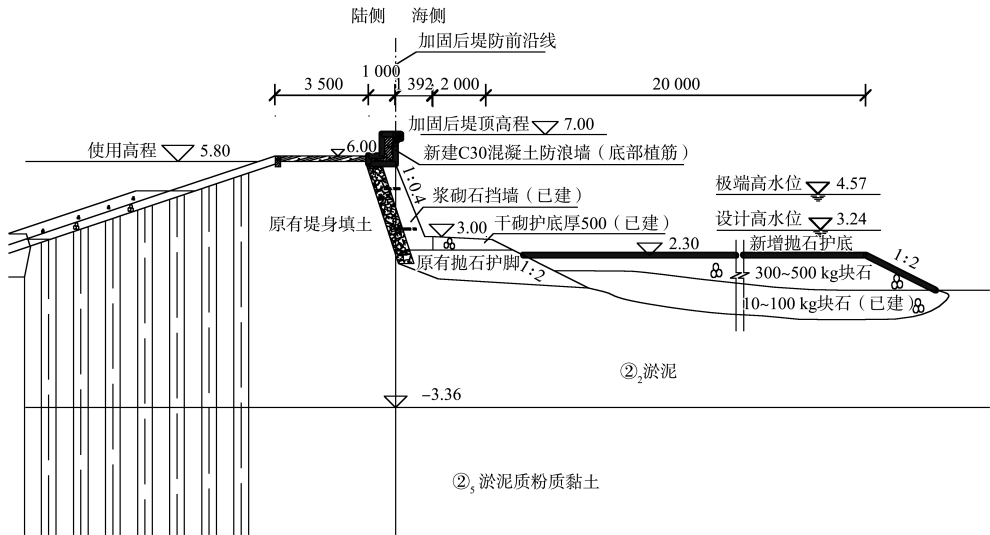


图 5 推荐断面 (尺寸: mm; 高程: m)

表 3 推荐断面越浪量

潮位/m	波高/m	周期/s	越浪量/(L · m ⁻¹ · s ⁻¹)
4.87	3.0	5.8	15.0
4.71	2.5	5.3	9.0
4.57	2.3	5.0	1.4

注: 坡度为 1:0.4, 带挑檐, 挡浪墙顶高程 7.0 m。

3.2 波浪局部整体物理模型试验结果

3.2.1 高桩码头对后方水域设计波浪的影响

试验分别测量了不同潮位、波浪作用下, 工程前、后码头和护岸附近的设计波浪分布, 测点位置见图 1。工程前是指原始地形条件下, 码头和护岸工程均未建; 工程后是指港池、航道局部开挖, 码头和护岸工程已建成。护岸加固工程采用断面模型试验的推荐方案。工程前后比波高 (工程后有效波高/工程前有效波高) 见表 4。

试验结果表明, 工程后受码头上部结构的影响, 波浪产生反射、绕射、透射和破碎, 具有较好的消浪效果, 码头后沿和护岸前沿波高明显减小。随着水位和波高的增大, 码头上部结构的影响越大, 比波高呈减小趋势; 码头东侧受波浪绕射影响, 因此, 由西向东沿程比波高略有增大; NE 向波浪作用下, 波向基本与码头和护岸轴线垂直, 受护岸工程反射影响较大; E 向波浪与码头轴线和护岸轴线夹角较大, 护岸工程反射较小; 因此, NE 向波浪作用下的比波高略大于 E 向波浪

作用下的比波高。

表 4 工程前后比波高分布

位置	测点	波向	比波高		
			200 a 一遇	100 a 一遇	50 a 一遇
码头 后方	7 [#]	NE	0.42	0.46	0.46
		E	0.45	0.38	0.29
	8 [#]	NE	0.48	0.49	0.52
		E	0.39	0.36	0.27
	9 [#]	NE	0.51	0.48	0.48
		E	0.45	0.39	0.37
	10 [#]	NE	0.57	0.55	0.62
		E	0.48	0.44	0.47
	11 [#]	NE	0.57	0.64	0.69
		E	0.52	0.49	0.41
护岸 前沿	14 [#]	NE	0.40	0.43	0.42
		E	0.42	0.44	0.34
	15 [#]	NE	0.51	0.51	0.48
		E	0.50	0.46	0.37
	16 [#]	NE	0.58	0.51	0.51
		E	0.57	0.51	0.47
	17 [#]	NE	0.63	0.62	0.64
		E	0.61	0.53	0.47
	18 [#]	NE	0.66	0.66	0.64
		E	0.65	0.58	0.54

3.2.2 高桩码头对护岸工程越浪量的影响

越浪量试验结果见表 5。可以看出, 在 NE 向波浪作用时, 高桩码头对波浪掩护条件较好, 护岸基本不越浪, 只有在 200 a 一遇潮位和波浪组合作用下, 局部有少量越浪量; 在 E 向波浪作用时,

由于波浪斜向作用，高桩码头对波浪掩护条件略差，由西向东越浪量逐步增大，但越浪量仍然较小，在 200 a 一遇潮位和波浪组合作用下，最大越

浪量小于 3 L/(m·s)，所有断面的越浪量均满足小于 10 L/(m·s)的设计要求，且比断面试验的越浪量小一个数量级(断面试验未模拟码头对护岸的影响)。

表 5 越浪量试验结果

波向	潮位/m	H_s/m	越浪量/(L·m ⁻¹ ·s ⁻¹)											
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
NE	4.87	2.6	0.15	0	0.08	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
	4.71	2.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4.57	2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	4.87	3.0	0.08	0.12	0	0.77	1.08	0.46	0.77	1.39	1.24	2.63	2.55	2.31
	4.71	2.5	0	0	0	0	0	0	0.15	0.15	0.15	0.62	0.69	0.23
	4.57	2.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.2.3 高桩码头对护岸结构稳定的影响

试验进行了 2 个方向 4 种潮位及相应波浪的组合试验。试验中块石的失稳率为累计值，即各级水位之间护岸断面不修复，最终的失稳率为护岸断面在各级水位与相应波浪累计作用后的统计值，试验结果见表 6。

表 6 护脚、护底块石失稳率

波向	潮位/m	H_s/m	失稳率/%				
			A1	A2	C1	C2	C3~C12
NE	4.87	2.6	0.16	2.13	0	0	0
	4.71	2.2	0.16	2.60	0.31	0.09	0
	4.57	2.0	0.16	3.46	0.63	0.09	0
	3.24	1.8	0.16	4.10	0.63	0.09	0
E	4.87	3.0	0	0.28	0	0	0
	4.71	2.5	0	1.92	0	0	0
	4.57	2.3	0.51	2.56	0	0	0
	3.24	2.1	0.64	2.95	0	0	0

试验结果表明，在各潮位及相应波浪组合作用下，波浪基本都被护岸前方码头阻挡，码头的消浪效果明显，护岸基本处于码头的掩护下，护脚棱体块石及护底块石只有个别滚落，挡浪墙及堤顶路面稳定，设计断面满足稳定性要求。但 A2 断面的块石失稳率较大，由于 A2 断面位于护岸的西北转角，受波浪绕射作用明显，在 NE 向波浪累计作用后，300~500 kg 块石失稳率为 3.63%；在 E 向波浪累计作用后，300~500 kg 块石失稳率为 2.95%。

4 结论

1) 高桩码头上部结构对后方护岸有良好的掩护效果，尤其在高水位时，透浪系数较小，但在低水位时，透浪系数较大。

2) 断面物模试验未考虑高桩码头掩护，护岸顶高程 7.0 m 尚无法满足越浪量的控制要求，局部物理模型试验考虑高桩码头掩护，护岸处波高减小明显，顶高程 7.0 m 能满足越浪量的控制要求，受高桩码头掩护的护岸顶高程可以适当降低。

3) 护岸结构稳定性，尤其护底、护脚块石主要受较低水位控制，高桩码头掩护效果有限，波浪减小较少，不建议减小块石质量；护岸端部、拐角位置处的护脚和护底块石质量应适当增加。

4) 高桩码头掩护的护岸工程，为反映断面试验的准确性，可先开展其他试验获得受码头掩护的护岸设计波浪要素，再进行断面试验。

参考文献：

[1] URSELL F. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water[J]. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1947, 43(3): 374-382.

[2] WIEGEL R L. Transmission of wave past a rigid vertical thin barrier[J]. Journal of waterways and harbors division, 1960, 86: 1-12.

(下转第 69 页)