



## 波浪对低透空率密排斜桩码头的影响\*

王自文<sup>1</sup>, 郭兆珈<sup>2</sup>, 张蕊<sup>2</sup>, 雷杨<sup>1</sup>, 潘文博<sup>3</sup>

(1. 中国矿产资源集团舟山发展有限公司, 浙江 舟山 316000;

2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

3. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 港口水工建筑技术国家工程研究中心,  
工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 某工程采用在码头前沿设置低透空率密排斜桩方案归顺前沿流态, 即密排斜桩与高桩码头结构相结合。为了探究不同水位、不同波向及重现期波浪作用下, 新型密排斜桩码头结构的波浪反射及其受到的波浪荷载情况, 通过开展波浪整体物理模型试验对不同工况波浪要素进行分析。结果表明: 密排斜桩前方不同位置的波浪反射情况差异显著, 综合反射系数最大值为 1.45, 综合透射系数最大值为 0.40; 90°横浪与 25°斜向浪波浪反射作用差异明显, 约为 1.22 倍。密排斜桩间有缝隙及上部越浪空间对波浪能量起到消散作用, 结构方案可行。该方案的使用可打破实体导流堤对于用海政策的依赖, 同时减少对海洋环境的影响, 实现复杂海岸线的集约利用。

**关键词:** 低透空率密排斜桩; 码头; 波浪反射; 波浪力

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0101-08

### Influence of waves on low-permeability closely arranged inclined pile wharves

WANG Ziwen<sup>1</sup>, GUO Zhaojia<sup>2</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, LEI Yang<sup>1</sup>, PAN Wenbo<sup>3</sup>

(1. CMR Zhoushan Development Co., Ltd., Zhoushan 316000, China;

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

3. National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology,  
Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications,  
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** A certain engineering adopts the scheme of setting closely arranged inclined piles with low permeability at the forefront of the wharf to conform to the flow state of the forefront, which is combined closely arranged inclined piles with high pile wharf structure. To investigate the wave reflection and wave load on the new closely arranged inclined pile wharf structure under different water levels, wave directions, and recurrence periods of wave action, we carry out overall physical model tests of waves to analyze wave elements under different operating conditions. The results show that there are significant differences in wave reflection at different positions in front of the closely arranged inclined piles, with a maximum comprehensive reflection coefficient is 1.45 and a maximum comprehensive transmission coefficient is 0.40. The difference in wave reflection between 90° transverse waves and 25° oblique waves is significant, about 1.22 times. There are gaps between the closely arranged inclined piles and upper wave crossing spaces that dissipate wave energy, and the structural scheme is feasible. The use of this scheme can break the dependence of physical diversion embankments on maritime policies, while reducing the impact on the marine environment and achieving intensive utilization of complex coastlines.

**Keywords:** closely arranged inclined piles with low permeability; wharf; wave reflection; wave force

收稿日期: 2024-09-27

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 王自文(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事岩土勘查和港口工程建设管理。

低透空率密排斜桩结构是近几年提出的一种新型结构形式,应用于流向分散、流速大,尤其是横流较大的工程海域。通过密排桩基的设置,可明显改善码头前沿的流态,使背流面码头前沿流速降低,横流明显减小<sup>[1-2]</sup>。将低透空率密排桩式结构用作防波堤时,通过透空率的调整可以将防波堤透射系数降至0.2以下,适用于波高较大、周期较长的波浪环境<sup>[3]</sup>。孙骁帆等<sup>[4]</sup>通过物理模型试验,验证新型低透空率桩基防波堤的消浪效果,结果表明,在水深 $d > 10.0$  m、波高 $H_{1/10} > 2.5$  m、海域开阔度接近 $180^\circ$ 条件下,该结构方案基本可实现内外波高比控制在0.3以内;李少斌等<sup>[5-6]</sup>、王强等<sup>[7]</sup>通过物理模型试验,研究密排桩防波堤的透浪规律,得出密排桩桩间距、插板方式以及放浪板开孔率等对透浪系数影响的规律;房卓等<sup>[8]</sup>、魏建宇等<sup>[9]</sup>通过数值分析,得出波浪周期与掩护和透浪效果的关系,以及波高与危险水位的关系。

目前对基于低透空率密排斜桩结构的研究有限,且主要集中于该结构对潮流场的影响以及透浪效果等,而针对外海低透空率密排桩结构的波浪反射及其受力情况的研究甚少。本文通过开展波浪整体物理模型试验,探究不同水位、不同波向及重现期波浪作用下,新型密排斜桩码头结构的波浪反射及其所受波浪荷载情况,进而分析此新型结构的水动力特性。

## 1 工程概况

工程位于外海开敞式海域,掩护条件较差、潮流场分布复杂。在围垦工程实施后,码头前沿落潮期间码头区长时间受逆时针回流影响,回流强度和分布范围随落潮过程发展及潮型不同而变化,成为影响系泊安全的重要因素。因此,本工程需要建设导流设施归顺码头前沿流态。但拟建工程区域附近的已建海底管线分布范围广、数量多且距离近,无法通过建设实体导流结构归顺潮流,故在码头前沿局部设置密排桩,并与码头结构相结合(即密排桩位于码头前沿第1排桩),实

现归顺潮流功能,见图1。

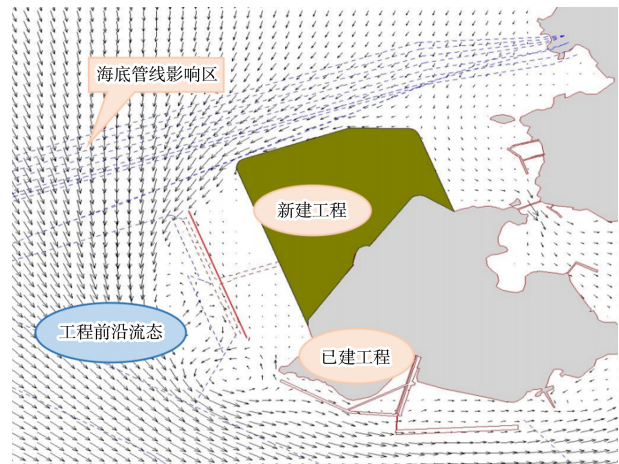


图1 工程建设后的流态分布  
Fig. 1 Flow pattern distribution after engineering construction

## 2 物理模型试验

### 2.1 结构方案

码头采用高桩梁板与框架相结合,排架间距10.5 m,每榀排架布置7根基桩,其中含1根 $\phi 1\ 600$  mm(最前排)和6根 $\phi 1\ 500$  mm钢管桩。为归顺水流,码头前部设置梳式密排斜桩,下部增设横向承台、纵向帽梁和立柱形成框架结构。梳式密排斜桩布置于纵向帽梁下方,密排桩采用 $\phi 1\ 600$  mm钢管桩(桩基两侧设肋板,肋板宽400 mm,肋板布置高程为泥面至1.0 m),桩顶高程为2.7 m,间距2.1 m,为确保结构刚度,排架跨中增设1根 $\phi 1\ 500$  mm钢管斜顶桩,见图2;密排斜桩采用前后轴线交叉布置方式,见图3,密排斜桩正面投影完全不透空,同时肋板间存在狭小空隙(肋板间缝隙约120 mm),既能起到一定的消浪效果,同时还能保证一定的透水性能。码头上部结构采用桩帽节点、预制横梁、预制纵向梁、叠合面板结构。密排桩及斜顶桩顶通过纵向帽梁连成整体,同时帽梁与承台相连接,形成码头结构与导流设施相结合的整体结构。

开敞式外海条件下,SSW—SSE向波浪均对工程影响显著,分析导流设施后,在偏NW—SW向波浪作用下,易在码头前沿形成反射。对本结构方案进行波浪整体物理模型试验,见图4。

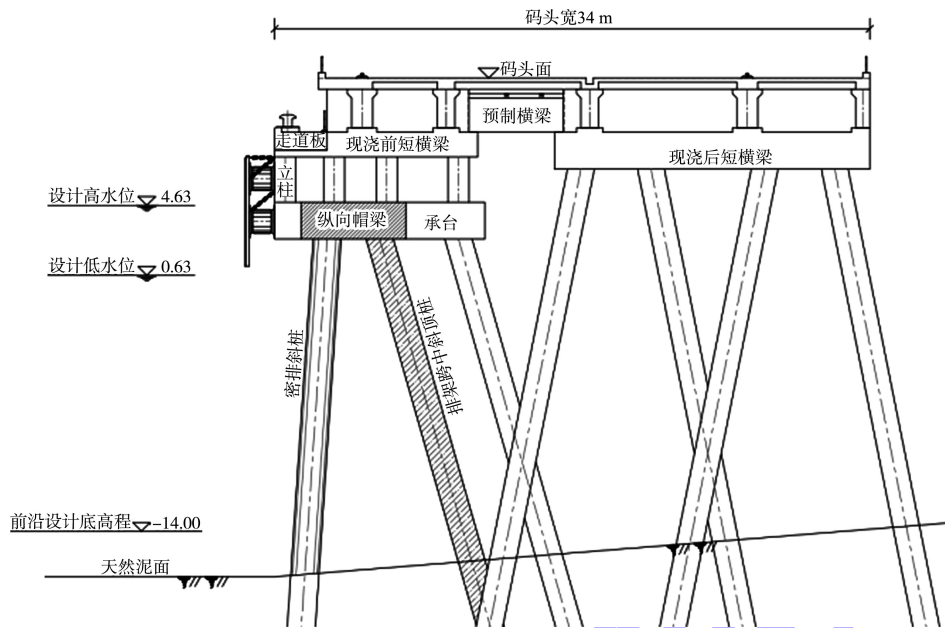


图 2 低透空率密排斜桩码头结构断面 (单位: m)

Fig. 2 Cross-section of closely arranged inclined pile wharf structure with low permeability (unit: m)

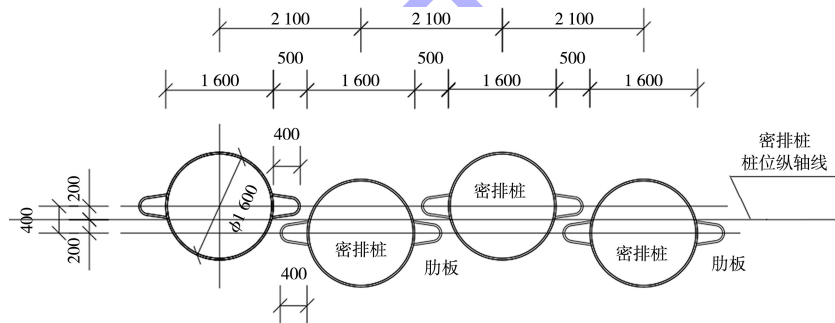


图 3  $\phi 1\ 600\ \text{mm}$  密排斜桩平面布置 (单位: mm)

Fig. 3 Planar of  $\phi 1\ 600\ \text{mm}$  closely arranged inclined pile (unit: mm)

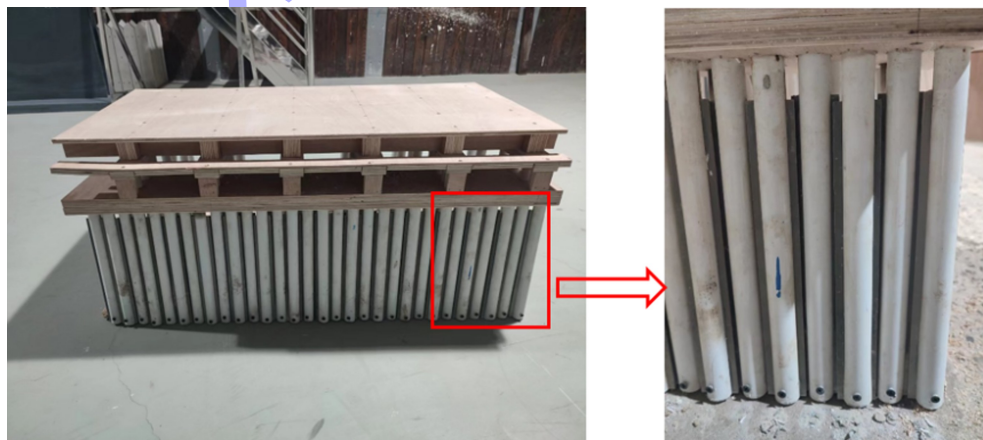


图 4 低透空率密排斜桩码头结构试验模型

Fig. 4 Experimental model of closely arranged inclined pile wharf structure with low permeability

### 2.2 模型参数及试验设置

考虑工程地形条件、波浪传播过程中主要地形特征及范围、试验设备条件等多种因素，对模型比尺  $\lambda$  取 65。模拟原型范围为 3.3 km×3.1 km

(长×宽)。对于 90°横浪，测量码头中间位置(简称 M 测区)前方波高；25°斜向浪，分别测量码头迎浪向端部(简称 N 测区)和中间位置的波高<sup>[10]</sup>。试验水位及设计波要素见表 1。

表 1 WSW 和 NW 向波浪作用下码头位置波浪要素  
Tab. 1 Wave elements at wharf location under action of WSW and NW waves

波向	重现期/a	水位类型	水位/m	测区	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	平均波高 $H_m/m$	平均周期 $T_m/s$	波长 $L/m$
WSW	50	极端高水位	5.71	M	5.07	3.50	2.27	7.1	73
	50	设计高水位	4.63	M	4.83	3.37	2.17	7.1	73
	50	设计低水位	0.63	M	4.16	2.92	1.88	7.1	69
	10	极端高水位	5.71	M	3.43	2.35	1.49	5.8	52
	10	设计高水位	4.63	M	3.31	2.28	1.44	5.8	51
NW	50	极端高水位	5.71	M	6.07	4.28	2.77	8.2	92
				N	6.13	4.32	2.80	8.2	92
	50	设计高水位	4.63	M	5.67	4.00	2.59	8.2	90
				N	5.73	4.04	2.62	8.2	90
	10	极端高水位	5.71	M	4.68	3.25	2.08	7.1	73
				N	4.66	3.24	2.07	7.1	73
	10	设计高水位	4.63	M	4.47	3.11	1.99	7.1	72
				N	4.46	3.10	1.99	7.1	72

### 2.3 试验内容及方法

试验内容：1) 测定不同水位、不同波向及重现期波浪作用下，新型低透空率密排斜桩码头结构前沿、后方波浪分布，分析结构的波浪反射及透射情况；2) 测定密排斜桩结构受力情况，明确密排斜桩结构受到的正向波压强和负向波压强随波向、水深等参数的变化规律。

件，在码头前沿 50%船宽、1 倍船宽和 1 倍波长位置处以及码头后方 1 倍波长位置处设置浪高仪，测量不同水位及入射波情况下的水域波浪情况，并通过在密排斜桩由上至下均匀点位置压强传感器，测定不同方向、水深、重现期波浪作用下，码头结构受到的波浪荷载。试验步骤见图 5，浪高仪测点布置见图 6，波浪压强传感器测点布置见图 7。

试验方法：通过波浪的率定拟合实际波浪条

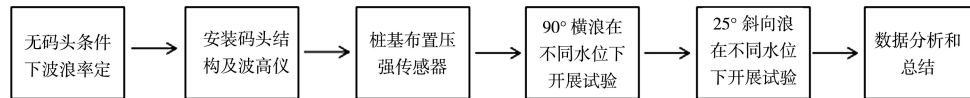
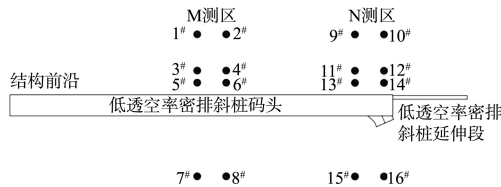


图 5 试验步骤  
Fig. 5 Test steps



注：M 测区为浅水区，N 测区为深水区。

图 6 浪高仪测点布置

Fig. 6 Layout of wave height gauge measurement points

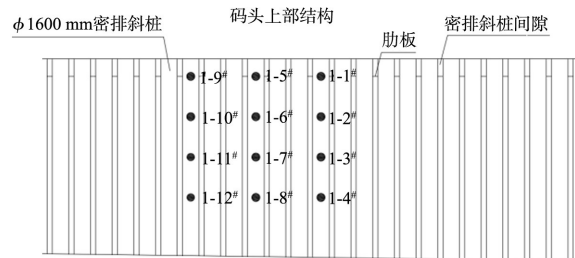


图 7 波浪压强传感器测点布置

Fig. 7 Layout of wave pressure sensor measurement points



### 3 试验结果分析

#### 3.1 波浪反射试验结果

码头前沿水域, 波浪反射后的综合波高与设计波高之比为结构的综合反射系数  $C_R$ ; 码头结构后方, 透射波浪波高与设计波高之比为结构的综合透射系数  $C_T$ 。故  $H_{1\%}$ 、 $H_{4\%}$  和  $H_{13\%}$  对应的系数分别为:  $C_{R(T), H_{13\%}}$ 、 $C_{R(T), H_{4\%}}$ 、 $C_{R(T), H_{1\%}}$ 。

不同水位 90°横浪作用下不同位置波浪分布见表 2, 极端高水位和设计高水位 25°斜向浪作用下不同位置波浪分布见表 3。可以看出: 1) 25°斜向浪相较 90°横浪作用时前沿反射效果有所降低。不同水位时, 结构反射效果不同, 在设计高、低水位时反射明显; 极端高水位时, 反射综合波高略小, 同时结构后方的透射波高相对较大。同理, 相同水位条件下, 当波浪波高较大时, 结构反射

效应略小于波高较小时的作用结果。2) 90°横浪+设计高水位+重现期 50a 时, 各位置综合波高从大到小排序为: 1 倍船宽、50% 船宽、1 倍波长位置; 密排桩结构前方 1 倍船宽位置的综合反射系数  $C_{R, H_{13\%}} = 1.36$ 、综合透射系数  $C_{T, H_{13\%}} = 0.40$ 。3) 90°横浪+设计高水位+重现期 10 a 时, 码头前方 1 倍船宽位置的综合反射系数  $C_{R, H_{13\%}} = 1.46$ 、综合透射系数为  $C_{T, H_{13\%}} = 0.36$ 。4) 25°斜向浪+设计高水位+重现期 50 a 时, 各位置综合波高从大到小排序为: 码头前方 1 倍船宽、1 倍波长、50% 船宽; 码头前方 1 倍船宽位置的综合反射系数  $C_{R, H_{13\%}} = 1.17$ 。5) 25°斜向浪+设计高水位+重现期 10a 时, 码头前方 1 倍船宽位置的综合反射系数  $C_{R, H_{13\%}} = 1.19$ 。6) 斜向浪作用下波浪沿结构传播过程中未出现延堤波现象。

表 2 不同水位 90°横浪作用下不同位置波浪分布

Tab. 2 Wave distribution at different positions under action of 90° transverse waves at different water levels

特征点位置	浪高仪编号	50 a 重现期 (极端高水位)			50 a 重现期 (设计高水位)			50 a 重现期 (设计低水位)			10 a 重现期 (极端高水位)			10 a 重现期 (设计高水位)		
		$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R, H_{13\%}}$	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R, H_{13\%}}$	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R, H_{13\%}}$	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R, H_{13\%}}$	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R, H_{13\%}}$
数学模型结果	-	5.02	3.50	-	4.83	3.37	-	4.16	2.92	-	2.91	2.35	-	2.81	2.28	-
率波结果	-	5.00	3.52	-	4.86	3.37	-	4.19	2.94	-	2.93	2.34	-	2.83	2.30	-
码头前 1 倍波长	1#	5.27	3.67	1.04	5.40	3.80	1.13	4.66	3.49	1.19	2.97	2.50	1.07	3.39	2.85	1.24
	2#	5.19	3.69	1.05	5.32	3.69	1.10	4.57	3.46	1.18	2.99	2.53	1.08	3.26	2.67	1.16
码头前 1 倍船宽	3#	5.69	4.31	1.22	5.89	4.56	1.35	5.24	4.25	1.45	3.57	3.02	1.29	4.13	3.32	1.44
	4#	5.82	4.28	1.22	6.10	4.58	1.36	5.27	4.23	1.44	3.49	3.04	1.30	4.07	3.33	1.45
码头前 50% 船宽	5#	5.36	4.17	1.18	6.07	4.34	1.29	5.70	3.73	1.27	3.22	2.78	1.19	3.49	3.01	1.31
	6#	5.33	4.04	1.15	5.98	4.31	1.28	5.66	3.90	1.33	3.26	2.71	1.16	3.47	2.97	1.29
码头后 1 倍波长	7#	1.89	1.41	0.40	1.88	1.33	0.39	1.44	1.22	0.40	1.08	0.87	0.37	0.96	0.82	0.36
	8#	1.92	1.40	0.40	1.89	1.36	0.40	1.63	1.15	0.39	1.02	0.86	0.37	0.95	0.80	0.35

综上, 该新型低透空率密排斜桩码头结构透浪及消浪效果显著, 波浪综合反射系数远低于直

墙结构。码头后方的透射波浪较小, 综合透射系数小于 0.40, 结构前沿综合反射系数小于 1.45。

表3 极端高水位和设计高水位 25°斜向浪作用下不同位置波浪分布  
 Tab.3 Wave distribution at different positions under action of 25° oblique waves with extreme high water level and design high water level

水位	特征点位置	浪高仪编号	50 a 重现期(N 测区)			50 a 重现期(M 测区)			10 a 重现期(N 测区)			10 a 重现期(M 测区)		
			$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R,H_{13\%}}$	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R,H_{13\%}}$	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R,H_{13\%}}$	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$C_{R,H_{13\%}}$
极端高水位	数学模型结果	-	6.13	4.32	-	6.07	4.28	-	3.97	3.24	-	3.98	3.25	-
	率波结果	-	6.15	4.33	-	6.04	4.30	-	3.99	3.24	-	4.00	3.28	-
	码头前1倍波长	9#	6.65	4.75	1.10	6.46	4.67	1.09	4.03	3.27	1.01	3.62	3.18	0.97
		10#	6.61	4.68	1.08	6.71	4.64	1.08	4.09	3.37	1.04	3.60	3.10	0.95
	码头前1倍船宽	11#	6.37	4.88	1.13	6.23	4.49	1.04	4.83	3.71	1.15	4.25	3.48	1.06
		12#	6.35	4.79	1.11	6.19	4.41	1.03	4.49	3.79	1.17	4.37	3.46	1.05
	码头前50%船宽	13#	6.66	4.57	1.06	6.63	4.47	1.04	4.71	3.78	1.17	4.19	3.21	0.98
14#		6.78	4.75	1.10	6.16	4.41	1.03	4.44	3.69	1.14	4.15	3.22	0.98	
设计高水位	数学模型结果	-	5.73	4.04	-	5.67	4.00	-	3.80	3.10	-	3.81	3.11	-
	率波结果	-	5.70	4.07	-	5.62	4.04	-	3.83	3.14	-	3.84	3.14	-
	码头前1倍波长	9#	6.31	4.26	1.05	6.36	4.20	1.04	3.97	3.07	0.98	3.88	3.15	1.00
		10#	6.32	4.29	1.05	6.37	4.22	1.04	4.11	3.11	0.99	3.93	3.13	1.00
	码头前1倍船宽	11#	6.41	4.71	1.16	6.44	4.66	1.15	4.59	3.71	1.19	4.38	3.55	1.13
		12#	6.43	4.74	1.16	6.49	4.69	1.16	4.46	3.67	1.17	4.35	3.57	1.14
	码头前50%船宽	13#	5.90	4.33	1.06	5.85	4.17	1.03	4.39	3.58	1.14	4.27	3.57	1.14
14#		5.85	4.28	1.05	5.87	4.10	1.01	4.32	3.53	1.13	4.29	3.52	1.12	

3.2 波浪力试验结果

与波浪反射试验工况相同，每根桩上的压力传感器测点为沿着桩身由上至下均匀布置，传感器朝着码头前方。不同工况下密排斜桩受到的波浪荷载情况见表4。可以看出：1) 90°横浪作用、极端高水位时，密排桩受到的波浪荷载略小于设计高水位时的作用结果，而透浪效果更为明显；

波浪荷载试验结果与结构波浪反射试验结果规律一致。2) 密排斜桩受到的正向波压强和负向波压强均沿桩身由上至下逐渐减小。在90°横浪作用下，桩顶和桩底测点压强差可达50%左右。3) 密排桩受到的波压力小于波吸力，横浪作用时更为明显；设计高水位时，斜向波浪作用时正向波压强大于横浪作用，负向波压强小于横浪作用。

表4 90°横浪和25°斜向浪作用密排斜桩波压强试验结果  
 Tab.4 Test results of wave pressure on closely arranged inclined piles under action of 90° transverse wave and 25° oblique wave

波浪作用	重现期/a	桩号	测点	极端高水位				设计高水位			
				正向最大波压强	负向最大波压强	同步正向最大波压强	同步负向最大波压强	正向最大波压强	负向最大波压强	同步正向最大波压强	同步负向最大波压强
90°横浪	50	桩1	1#	26.9	-39.3	26.9	-39.3	31.3	-52.0	31.3	-52.0
			2#	20.7	-33.8	20.1	-31.7	22.3	-30.7	21.7	-30.2
			3#	15.4	-27.9	15.0	-26.5	16.6	-30.6	16.1	-29.5
			4#	15.0	-26.8	14.4	-25.9	15.8	-27.7	15.5	-26.2
		桩2	5#	26.8	-38.5	26.8	-38.5	28.9	-44.0	28.9	-44.0
			6#	21.7	-34.1	20.7	-32.9	20.4	-32.6	20.0	-31.1
			7#	15.0	-30.2	14.9	-28.8	22.0	-33.8	18.9	-30.2
			8#	14.7	-30.5	14.1	-28.5	20.5	-30.9	17.1	-28.8
		桩3	9#	25.1	-38.0	25.1	-38.0	29.1	-54.1	29.1	-54.1
			10#	20.8	-34.2	20.4	-33.2	21.3	-37.6	20.1	-33.3
			11#	14.0	-30.6	14.0	-29.7	20.9	-34.5	18.9	-30.0
			12#	13.0	-27.7	13.0	-27.1	19.4	-30.7	18.1	-27.6

续表 4

波浪作用	重现期/ a	桩号	测点	极端高水位				设计高水位			
				正向最大 波压强	负向最大 波压强	同步正向 最大波压强	同步负向 最大波压强	正向最大 波压强	负向最大 波压强	同步正向 最大波压强	同步负向 最大波压强
25° 斜向浪	50	桩 1	1#	29.9	-37.9	29.9	-37.9	31.9	-37.8	31.9	-37.8
			2#	28.9	-30.0	27.9	-29.3	31.6	-35.2	31.1	-35.2
			3#	24.2	-27.3	23.1	-26.6	24.7	-31.1	23.9	-30.0
			4#	23.2	-23.7	21.9	-22.5	20.9	-30.5	19.3	-29.4
		桩 2	5#	32.0	-35.5	32.0	-35.5	31.5	-34.5	31.2	-34.5
			6#	28.1	-29.1	28.1	-28.0	32.9	-33.6	32.9	-33.1
			7#	27.0	-27.6	26.3	-25.9	23.5	-36.6	23.1	-35.5
			8#	25.0	-27.1	24.1	-25.1	22.2	-33.8	21.6	-32.1
		桩 3	9#	30.0	-40.1	30.0	-40.1	33.2	-38.1	32.7	-38.0
			10#	33.3	-34.0	30.3	-30.0	35.5	-39.7	35.5	-39.7
			11#	25.7	-30.8	25.1	-27.8	25.7	-38.6	25.1	-37.6
			12#	24.4	-28.8	24.0	-25.6	23.9	-37.8	22.6	-36.8

综上,波浪作用下密排桩所受波压强远低于直墙结构,主要原因有:1)因密排斜桩的设置使得波浪在密排桩表面更利于回流,且纵向帽梁前沿起到胸墙挑浪嘴的作用,阻挡波浪爬升,也使波浪在回落过程中出现势能转化;2)桩间缝隙有一定的透浪现象,波浪能量没有完全转化为波压强。

#### 4 结语

1) 本文创新性提出一种带肋板的低透空率密排斜桩式码头结构。密排斜桩正面投影完全不透空,同时肋板间存在狭小空隙(肋板间缝隙约 120 mm),既起到一定的消浪效果,同时保证一定的透水性能,可更好兼顾低透空率密排桩码头结构波浪反射效应及透水性能。

2) 横浪及斜向浪作用下均具有波浪反射,码头前沿 1 倍船宽位置综合波高 >50% 船宽位置综合波高 >1 倍波长位置综合波高;90°横浪作用下,综合反射系数最大为 1.45、综合透射系数最大为 0.40,90°横浪与 25°斜向浪作用下综合反射系数最大值之比约为 1.22。

3) 波浪沿本结构传播过程中未出现类似直墙结构中的延堤波现象,结构方案可行;同时密排桩受到的波压力小于波吸力,设计时须结合作用点高程综合考虑。

#### 参考文献:

- [1] 叶宇旻,浦伟庆,于传见.马迹山矿石码头三期工程水域平面布置[J].水运工程,2018(6):87-92.  
YE Y M, PU W Q, YU C J. Waters layout of Majishan ore terminal phase III project [J]. Port & waterway engineering, 2018(6):87-92.
- [2] 叶宇旻,张卓先.码头桩基阻流设施效果潮流物理模型试验研究对比分析[J].中国港湾建设,2020,40(4):36-40,45.  
YE Y M, ZHANG Z X. Comparative analysis of tidal current physical model study on the effect of wharf pile foundation choke flow facilities [J]. China harbour engineering, 2020, 40(4):36-40, 45.
- [3] 陆敏,顾祥奎,吴辉.基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤[J].水运工程,2023(8):38-42.  
LU M, GU X K, WU H. Pile foundation breakwater with low permeability based on closely spaced battered piles [J]. Port & waterway engineering, 2023(8):38-42.
- [4] 孙骁帆,闻学,刘鹏飞.低透空率桩基防波堤消浪效果研究[J].水运工程,2022(5):14-20.  
SUN X F, WEN X, LIU P F. Study on wave dissipation effect of low-permeability breakwater with pile foundations [J]. Port & waterway engineering, 2022(5):14-20.
- [5] 李少斌,丁建军,沈雨生.组合式密排桩基防波堤透浪特性研究[J].水运工程,2024(8):127-133,151.  
LI S B, DING J J, SHEN Y S. Wave transmission characteristics of breakwater with combined closed-pile

- foundation[J]. Port & waterway engineering, 2024 (8): 127-133.
- [6] 李少斌, 丁建军, 谭彬政. 密排桩基防波堤波浪力试验分析[J]. 水运工程, 2024(4): 28-32, 64.  
LI S B, DING J J, TAN B Z. Test of wave loads on closely spaced pile breakwater[J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 28-32, 64.
- [7] 王强, 刘睿, 梁丙臣. 倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤的消浪性能研究[J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 95-104.  
WANG Q, LIU R, LIANG B C. Experimental study on wave-dissipating performance of pile-supported breakwater with perforated inclined wave screen [J]. Coastal engineering, 2022, 41(2): 95-104.
- [8] 房卓, 苏孟超, 张民辉, 等. 透空式梳式防波堤冲击压力特性及危险水位研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(9): 1211-1221.  
FANG Z, SU M C, ZHANG M H, et al. Study on the characteristics of impact wave pressure and dangerous water level of permeable comb-type breakwater [J]. Journal of ship mechanics 2021, 25(9): 1211-1221.
- [9] 魏建宇, 谭彬政, 任赵飞. 基于 FLOW 3D 的密排管桩防波堤透射系数研究[J]. 水运工程, 2023(12): 55-59.  
WEI J Y, TAN B Z, REN Z F. Transmission coefficient of breakwater for densely packed pipe pile based on FLOW 3D[J]. Port & waterway engineering, 2023 (12): 55-59.
- [10] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部. 2021.  
Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, MOT. Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- (本文编辑 王璁)
- 
- (上接第 95 页)
- [4] 曹永勇, 侯贺营, 张宁, 等. 回填荷载作用下桶式结构的内力变化研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (S2): 107-111.  
CAO Y Y, HOU H Y, ZHANG N, et al. Change of internal force of bucket-based structure under backfill loads [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2018, 40(S2): 107-111.
- [5] 曹永勇. 离岸多隔舱钢桶基础下沉和顶升原位试验[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 219-223.  
CAO Y Y. In-situ tests on sinking and lifting on off shore steel-bucket foundation with multi-bay[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42(S1): 219-223.
- [6] WATSON P G, RANDOLPH M F. Failure envelopes for caisson foundations in calcareous sediments [J]. Applied ocean research, 1998, 20(1): 83-94.
- [7] VILLALOBOS F A, BYRNE B W, HOULSBY G T. Model testing of suction caissons in clay subjected to vertical loading [J]. Applied ocean research, 2010, 32 (4): 414-424.
- [8] 朱小军, 李文帅, 费康, 等. 砂土中桶形基础静压沉贯过程桶-土受力分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 199-206.  
ZHU X J, LI W S, FEI K, et al. Load analysis of bucket-soil interaction of bucket foundation in sand during jacked penetration[J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(1): 199-206.
- [9] 朱小军, 李文帅, 龚维明, 等. 砂土中筒型基础静压下沉试验及受力特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(3): 512-518.  
ZHU X J, LI W S, GONG W M, et al. Static pressure penetration test and mechanical characteristics of bucket foundation in sand [J]. Journal of Southeast University (Natural science edition), 2018, 48(3): 512-518.
- [10] 彭剑, 张杰. 海上工程吸力筒导管架基础沉贯理论与实证分析研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(5): 143-153.  
PENG J, ZHANG J. Analytical research on theory and authenticity for sinking penetration of suction bucket jacket foundation in offshore engineering [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural science edition), 2024, 54(5): 143-153.
- (本文编辑 王传瑜)