

基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤

陆 敏, 顾祥奎, 吴 辉

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对传统透空式防波堤消浪性能存在的局限性问题, 提出一种基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤, 采用桩侧设置肋板及桩位前后轴线交叉布置的方式, 实现迎浪面的全遮挡。以某陆岛交通码头工程为例, 对密排斜桩结构受力特点进行分析, 对密排斜桩本体、肋板、吊耳及上部结构连接等设计细节进行研究, 并提出对应的解决方案。结果表明, 该型防波堤透射系数可降低至 0.2 以下, 适用于波高较大、周期较长的波浪环境。

关键词: 密排斜桩; 透空式防波堤; 高桩码头

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0038-05

Pile foundation breakwater with low permeability based on closely spaced battered piles

LU Min, GU Xiangkui, WU Hui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: For the limitations of the wave dissipation performance of traditional permeable breakwaters, we innovatively propose a pile foundation breakwater with low permeability based on closely spaced battered piles. It realizes full shielding of the wave face by setting rib plates on the pile side and crossing the front and rear axes of the pile positions. We analyze the stress characteristics of a closely spaced battered pile structure base on a land-island traffic wharf project. Then we study the design details of closely spaced battered pile, rib plate, lifting lug and superstructure connection and put forward corresponding solutions. The results show that the transmission coefficient of this type of breakwater can be reduced to below 0.2, and it is suitable for waves of higher heights and longer periods.

Keywords: closely spaced battered pile; permeable breakwater; high-piled wharf

透空式防波堤理论研究开展较早, Ursell 等^[1]在 1947 年首先研究无限水深时挡浪板的透射系数, 并给出深水直立薄板的精确解; Wiegel^[2]于 1960 年在不考虑挡浪板反射的条件下, 推导出有限水深、无越浪情况下的透射系数近似解析解; Steimer 等^[3]用匹配法求解厚板式直立防波堤的波浪反射系数与透射系数; Liu 等^[4]用边界积分法给出了竖直和倾斜板式防波堤的数值解; Hayashi 等^[5]从连续方程和 Bernoulli 定理出发, 综合考虑堤前水深、堤前波高、桩群的透空率 3 个因素对透射系数的影响。

邱大洪等^[6]于 1980 年在分析 Ursell、Wiegel 等

研究成果的基础上, 考虑波浪在深水直立薄板前的绕射作用, 提出该种透空式防波堤的解析解, 该成果的计算更为高效, 且与实际结果更相符。

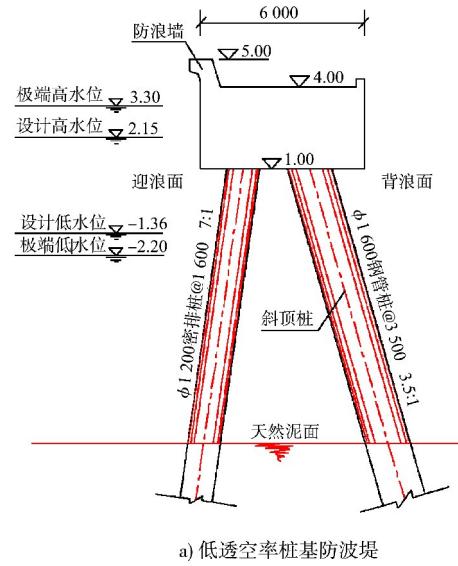
桩基挡板透空式防波堤正是在上述理论研究的基础上发展而来, 并得到广泛应用, 其构造上的特点是上部结构挡浪、下部透空, 其消浪原理是利用波能集中于水面以上 1 倍至水面以下 2 倍波高范围内的特点进行消浪。从相关断面物理模型研究结果来看, 在小波长、短周期波作用下, 桩基挡板透空式防波堤的透浪系数可降低至 0.5。但桩基挡板式防波堤的消浪结构——悬臂式挡板伸入水中的长度有限, 波浪能量会从挡板下方通

收稿日期: 2022-10-25

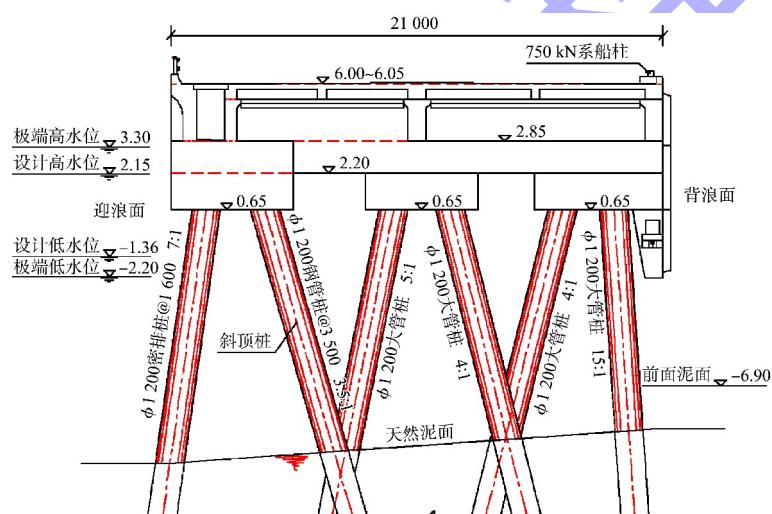
作者简介: 陆敏 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程规划及设计。

过, 其消浪效果进一步提高的潜力有限。此外, 对于波长较大的长周期波, 桩基挡板式防波堤消浪效果较差。

桩基挡板透空式防波堤存在的局限性, 本质上是由于悬臂式挡板伸入水中的长度有限, 迎浪面始终存在较大的透空率。针对这一问题, 本文提出一种基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤, 见图 1a)。其迎浪面布置密排斜桩, 背浪面为斜顶桩, 通过上部结构形成整体, 迎浪面从上至下均可挡浪, 消浪效果更好, 并委托河海大学进行断面物理模型试验^[7], 其结果表明透射系数最低可降至 0.2 以下。该结构形式还可与高桩码头相结合, 使结构兼具消浪和靠船功能, 见图 1b)。



a) 低透空率桩基防波堤



b) 与高桩码头相结合的低透空率桩基防波堤

图 1 基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤 (高程: m; 尺寸: mm)

1 密排斜桩布置

密排桩常用作板桩结构, 如洋山工程接岸结构密排板桩均采用直桩布置, 沉桩施工时, 桩基可贴着相邻的桩进行下桩, 桩基之间的缝隙可控制在 50 mm 左右, 施工过程中若板桩结构无法合拢, 方便采取补桩措施。由于桩基缝隙控制的可靠性, 密排板桩很好地发挥了挡墙作用。但从结构受力角度, 密排板桩主要发挥的是水平抗弯承载力, 其轴向承载力未得到充分发挥。

面对波浪荷载时, 密排桩采用垂直布置也能解决问题, 但波浪在直墙前沿会形成立波, 且波

压力和波吸力方向相反, 会导致斜顶桩承担的荷载偏大, 造成结构造价偏高。为解决这一问题, 本文将密排桩斜向布置, 波浪水平荷载由密排斜桩和斜顶桩共同承担, 有效降低了工程造价。

密排桩采用斜向布置在施工应用中尚无先例, 特别是施工的可行性有待验证。根据 JTS 215—2018《码头结构施工规范》^[8]、JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》^[9]的相关规定, 常规情况下, 斜桩的允许偏位在 150 mm 以内; 而掩护条件较好、斜度不大的情况下, 斜桩施工偏位可控制在 100 mm 以内, 因此, 为更好地控制施工偏

位, 密排斜桩的斜度不宜过大, 建议不超过 6:1; 同时, 桩基之间的缝隙应控制在 100~150 mm。密排斜桩之间的缝隙与消浪效果密切相关, 从提高消浪效果的角度, 应尽可能减小密排桩之间的缝隙, 相应地施工难度增加。

为了解决密排桩斜度与桩间缝隙之间的矛盾, 本文提出一种带肋板的密排斜桩, 采用前后轴线交叉布置的方式, 肋板从结构顶部延伸至泥面以下。采用该布置方式后, 密排斜桩正面投影完全不透空, 但存在曲折狭小的空隙, 前后沿完全透水。由于密排斜桩迎浪面不透空, 也仅存在曲折狭小的空隙, 相较桩基挡板式结构, 其消浪效果大幅提高; 采用前后错位布置之后, 密排桩结构表面之间的缝隙约 120 mm, 施工难题得以解决。密排斜桩的布置见图 2。

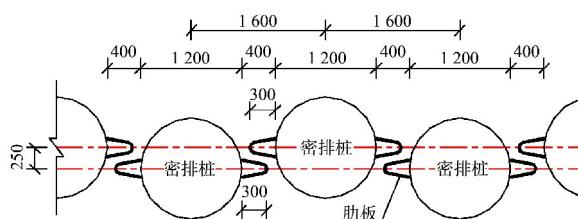


图 2 密排斜桩布置 (单位: mm)

2 消浪效果

为研究基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤的消浪效果, 以图 2 与高桩码头相结合的低透空率桩基防波堤断面作为研究对象, 分别设置不同水位下 50 a 一遇波浪、8 和 7 级风波浪的试验工况, 进行断面物理模型试验研究。结果表明, 该防波堤断面消浪效果优越, 透射系数在 0.15~0.27, 消浪效果研究结果见表 1。

表 1 密排斜桩低透空率桩基防波堤透射系数研究成果

波浪	水位	波周期/ s	入射有 效波高/ m	透射有 效波高/ m	透射 系数
50 a 一遇 波浪	极端高水位	8.10	4.65	0.79	0.17
	设计高水位	8.10	4.47	0.86	0.19
8 级风 波浪	设计高水位	6.20	2.63	0.42	0.16
	设计低水位	6.20	2.33	0.60	0.26
7 级风 波浪	设计高水位	6.00	2.00	0.31	0.15
	设计低水位	6.00	1.70	0.46	0.27

分析透射系数的分布可发现 2 个特点: 1) 水位较低时透射系数相对较大; 2) 入射平均波高 4.5 m 且波周期大于 8 s 的情况下, 该防波堤仍具有明显的消浪效果。对于第 1 点, 主要是由于上部结构完全不透水, 而下部密排斜桩相对透水性较高, 水位较低时, 波浪能量分布在密排斜桩的范围比例较高, 从而透射系数相对较大。基于此, 在施工可行的情况下, 可降低上部结构底高程, 有利于进一步提高消浪效果。对于第 2 点, 说明基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤作为一种透水结构, 可以适应更大波高及更长波周期的波浪, 其消浪特性明显优于桩基挡板式结构。

3 波浪荷载

低透空率桩基防波堤的密排斜桩之间采用肋板叠合遮挡, 肋板布置范围从桩顶延伸至泥面以下, 使结构在迎浪面上正向投影不透空, 但存在曲折的空隙。该迎浪面的布置有 3 个特点: 1) 迎浪面为斜面; 2) 迎浪面是曲折的而非光滑立面; 3) 迎浪面正向投影透空率为 0, 但曲折的空隙使得结构的透水性较强。若近似按照 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[10] 中波浪作用于不透水的直墙式建筑物计算波浪荷载, 波浪荷载明显偏大。

根据断面物理模型试验结果, 对比规范近似计算结果, 实测最大波压强小于计算值, 而实测水平波浪合力仅为计算合力的 70%~82%, 波浪荷载研究结果见表 2。因此, 结构分析时, 波浪荷载近似按规范中波浪作用于不透水直墙式建筑物计算结果, 并根据波浪断面物理模型试验, 波浪荷载可进行适当折减。

表 2 波浪荷载研究结果

水位	实测最大 波压力/ kPa	计算最大 波压力/ kPa	实测总力/ (kN·m ⁻¹)	计算总力/ (kN·m ⁻¹)
极端高水位	52.49	67.21	591.09	847.92
设计高水位	50.37	51.25	566.45	690.04

4 结构计算分析

4.1 工程概况

某陆岛交通码头及防波堤工程拟新建 4 个车

渡及客船泊位, 为改善码头前沿泊稳条件, 新建防波堤1条, 总长约650 m。

防波堤采用基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤, 上部结构为实体式墩台, 宽6 m, 顶高程为4.0 m(防浪墙顶高程为5.0 m), 墩台下方迎浪面布置 $\phi 1200$ mm密排斜桩, 间距1.6 m; 背浪面布置 $\phi 1600$ mm斜顶桩, 间距3.5 m。密排斜桩之间采用肋板叠合遮挡, 肋板外伸0.3 m, 焊接于桩基两侧。

工程区域天然泥面高程约-10.0 m, 表层覆盖约20 m厚的淤泥质粉质黏土, 下卧层为粉质黏土和砂质粉土, 50 a一遇设计最大 $H_{1\%}$ 波高为6.29 m, 波周期8.1 s; 潮流运动呈典型往复流形态, 设计最大流速为1.5 m/s。

4.2 计算模型

1) 基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤, 根据JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[11], 按高桩墩台结构进行计算。

2) 桩基与土体相互作用采用 m 法进行计算, 其中密排桩地基土的水平抗力系数的比例系数 m 值按板桩结构考虑, 其余桩基按单桩考虑。

表3 内力计算结果

桩型	压桩力/kN	拉桩力/kN	桩弯矩/(kN·m)	压应力/MPa	拉应力/MPa
$\phi 1200$ mm密排斜桩(间距1.6 m)	1 960	-1 580	1 869	125	-117
$\phi 1600$ mm钢管桩(间距3.5 m)	5 140	-1 820	7 289	248	-175

4.4 结果分析

1) 密排斜桩共同参与分担波浪荷载, 特别是在波压力作用下, 密排斜桩受拉, 斜顶桩受压, 密排斜桩减小斜顶桩的压桩力。

2) 斜顶桩弯矩较大, 主要由于在波压力作用下, 墩台结构位移达到最大值, 桩顶受约束而承受了较大弯矩; 同时, 钢管桩压应力也较大。

3) 密排斜桩及斜顶桩的规格、斜度、间距等应根据波浪、地质等条件多方案比选, 结合消浪效果、结构内力、桩基承载力、位移等多因素后综合确定。

3) 波浪直接作用于密排斜桩上, 波浪荷载根据断面物理模型试验, 并结合规范中波浪作用于不透水直墙式建筑物的计算结果, 对波浪荷载进行适当折减。计算模型见图3。

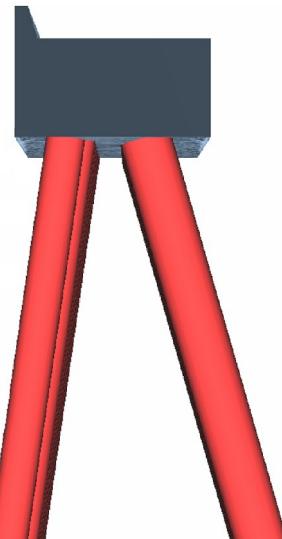


图3 计算模型

4.3 计算结果

基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤内力计算结果见表3。墩台顶最大位移为27.79 mm。

5 结构细部设计

5.1 密排斜桩

密排斜桩在防波堤轴线上紧密分布, 其用钢量与管节壁厚成正比, 而与钢管桩的直径关联性不大。从结构受力角度, 密排斜桩直接承受水平波浪荷载, 桩身弯矩较大, 而桩轴力较小。根据密排斜桩的特点, 管节壁厚保持不变, 可在JTS 167—2018《码头结构设计规范》的允许范围内, 适当增大密排斜桩直径, 达到提高桩基抗弯承载力的目的。同时, 由于桩基轴力较小, 总桩长相对其他桩基结构可适当优化, 桩尖进入良好土层满足承载力和弹性长桩要求即可。

5.2 肋板

密排斜桩肋板主要发挥封堵密排桩之间缝隙的作用,使结构在正投影面上不透空,仅存在曲折的空隙;同时将相邻桩位适量前后交错偏移,使其净间距加大,降低施工难度;肋板的布置范围从桩顶一直延伸至泥面以下,确保结构泥面以上透空率降至最低。

肋板结构利用钢板冷弯成半封闭的曲面,焊接在钢管桩侧面,其焊缝及防腐要求与钢管桩焊缝一致,内部中空为封闭空间,避免肋板钢材发生两面腐蚀,肋板与钢管桩的构造见图 4。

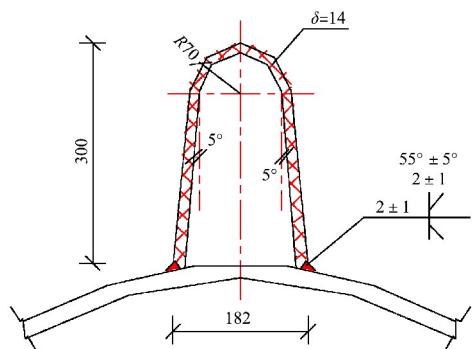


图 4 密排斜桩肋板构造 (单位: mm)

5.3 吊耳

密排斜桩采用常规的三点吊,考虑斜桩施工及定位,吊耳必须和肋板布置在同一轴线上,当钢管桩起吊下桩时,同步实现肋板在斜度方向上的定位。此外,吊耳的高度不应超过肋板的外边缘线,避免碰桩。吊耳及肋板的关系见图 5。

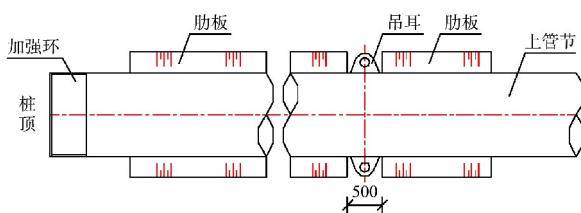


图 5 吊耳与肋板的关系 (单位: mm)

5.4 密排斜桩与上部结构的连接

钢管桩与上部结构的连接是桩基伸进上部结构 1 倍桩径即可,但针对本文的密排斜桩,若采

用该做法会导致上部结构主筋在密排桩顶部完全断开,且通过桩基侧面进行补充加强仍显不足。由于波浪荷载直接作用在密排斜桩上,桩顶弯矩和结构位移较大,其与上部结构的连接牢靠与否直接关系到整个结构的安全。

为此,设计上对密排斜桩顶部的连接采取加强措施,桩基伸入上部结构的长度仍然取 1 倍直径,但伸入部分的两侧钢管予以切割,使得主筋可以穿过桩基顶部的空间加大。此外,还在前后钢板钻孔,孔内穿插加强钢筋,使得密排斜桩与上部结构可靠连接,其构造见图 6。

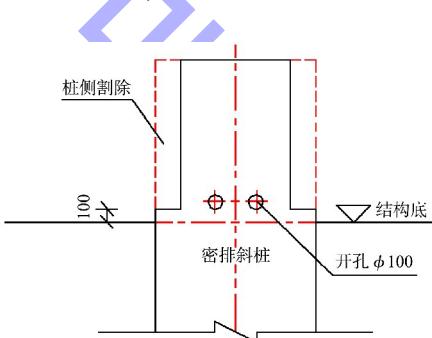


图 6 密排桩顶伸入上部结构 (单位: mm)

6 结语

1) 基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤采用带肋板的密排斜桩和上部结构共同作为消浪主体,其中密排斜桩采用前后轴线交叉布置的方式,桩基之间肋板叠合遮挡,正投影面不透空,仅存在曲折的空隙,其消浪效果优越,波浪透射系数可降低至 0.2 以下,且对波高较大、周期较长的波浪,该防波堤仍然具有明显的消浪效果。

2) 密排斜桩波浪荷载近似按规范中波浪作用于不透水直墙式建筑物的计算结果,并根据波浪断面物模试验,波浪荷载可进行适当折减。

3) 本文以某陆岛交通码头工程为例,研究基于密排斜桩的低透空率桩基防波堤受力特点,并针对其受力特点和构造要求,对密排斜桩结构细部设计进行研究,结果可为类似工程提供参考。

(下转第 55 页)