



密排桩基防波堤波浪力试验分析

李少斌, 丁建军, 谭彬政

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 针对密排桩基防波堤波浪力计算的问题, 基于某密排桩基防波堤工程, 进行密排桩基防波堤波浪力的物理模型试验研究。结果表明: 密排桩基防波堤波浪力计算可采用直墙式建筑物波浪力理论公式, OCDI 公式结果与试验值较接近; 波浪力沿堤身轴线呈现堤身大、堤头小的趋势; 斜向浪对密排桩基防波堤波浪力有一定影响, 可采用 Goda 公式折减系数进行近似评估。

关键词: 密排桩基防波堤; 波浪力; Goda 公式; 斜向浪

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0028-05

Test of wave loads on closely spaced pile breakwater

LI Shaobin, DING Jianjun, TAN Binzheng

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: To calculate the wave loads of closely spaced pile breakwater structure, we carry out the physical model test to do research on the wave load of closely spaced pile breakwater based on a breakwater project. The results show that the theoretical formula of wave load for vertical-walled structure can be calculated for the closely spaced pile breakwater structure, and the results of the OCDI formula is similar to the test results. The wave load along the axis of the closed-pile structure presents a trend of larger body and smaller head. Oblique waves have a certain influence on the wave load on the closely spaced pile breakwater structure, and the reduction coefficient of the OCDI formula can be used for approximate evaluation.

Keywords: closely spaced pile breakwater; wave load; Goda formula; oblique wave

密排桩基防波堤是由打入海床单排或多排等间距的桩基阻挡和减弱外海波浪作用, 近些年其被广泛应用于水深、浪大、地质条件复杂的港口工程。密排桩基防波堤的挡浪特性与桩间距 $b/(b+D)$ 有密切关系, 其中 b 为桩净距, D 为桩径。尤其在长周期波环境下, 可采用大直径桩、小间距布置的密排桩防波堤形式有效减小透浪系数。

密排桩基防波堤的波浪力是结构设计的重要指标, 桩基结构对荷载的大小及分布极其敏感, 因此对其波浪力的分析是研究密排桩基防波堤结构体系的关键。鉴于密排桩基防波堤的透浪性和小间距布置的特点, 其结构特性与传统的直墙式建筑物和桩基结构不同, 所承受的波浪力介于两者之间。

对于密排桩基防波堤波浪力的研究, 国内外未有成熟的研究成果。Shankar 等^[1]提出 $b/(b+D)$ 小于 0.5 时, 桩间干扰影响波浪特性, 从而单圆柱桩衰减波浪作用理论不适用; Hayashi 等^[2]假定桩间的波浪为通过孔隙的射流, 并用动量定理推导波浪力计算公式, 但所推导公式中将未知能量损失由一个未知综合流量系数考虑, 对公式的结果影响较大。国内的一些研究^[3-4]围绕于对海洋平台和桥梁等双桩或三桩排列的桩群波浪力作用, 主要集中在波浪作用于不同桩排列组合情况下, 群桩系数随 K_c 数、相对桩距、桩数和桩位的变化规律。

本文基于某密排桩基防波堤工程对密排桩基

收稿日期: 2023-08-06

作者简介: 李少斌 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事码头结构研究。

波压力进行物理模型试验研究, 从而为类似结构设计提供一定参考。

1 工程概况

1.1 设计水位

工程位于中国南海海域, 根据丹麦水利研究所 DHI 完成的数学模型报告, 本工程设计潮位为: 最高天文潮位 2.57 m, 平均大潮高潮位 2.50 m, 平均水位 1.52 m, 平均大潮低潮位 0.54 m, 最低天文潮位 0.00 m。

结构设计的高、低水位在考虑近岸波浪增水和海平面上升等影响后分别为 3.51、-0.16 m。

1.2 波浪条件

防波堤前沿选取波高相对较大测点的波浪要素进行研究, 设计波浪要素见表 1。

表 1 防波堤前沿设计波浪要素

工况	重现期/a	H_{m0}/m	$H_{1/3}/m$	T_p/s
高水位	50	3.3	3.3	14.0
	1	2.1	2.1	10.5
低水位	50	3.3	3.5	14.0
	1	2.1	2.2	10.5

注: H_{m0} 为有效波高, $H_{1/3}$ 为累积频率 1/3 的波高, T_p 为谱峰周期。

1.3 工程平面

该工程包含长 3 km 引桥以及长 500 m 泊位兼密排桩基防波堤。引桥走向受两侧海底电缆和海底管线限制, 以及考虑抵挡主浪, 方位角为 332°, 密排桩基防波堤与引桥夹角约为 90°, 平面布置见图 1。

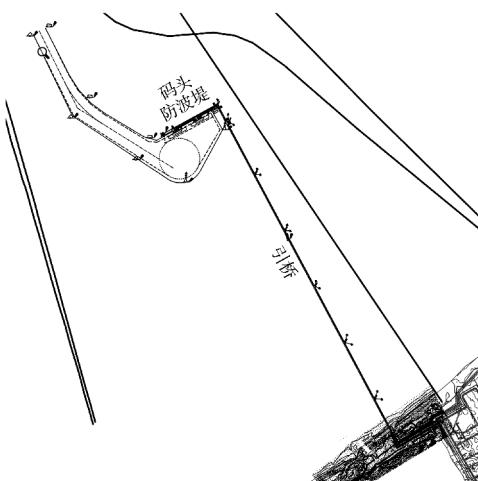


图 1 工程平面布置

1.4 典型断面

该工程泊位作业要求高, 且码头区域浪大、水深、淤泥厚等环境复杂, 因此基于“极端浪安全、平常浪可控”的设计理念, 采用新型双层密排桩基防波堤结构。结构下层海侧采用桩径为 2 m 的密排钢管桩直桩, 桩净距为 100 mm, 密排桩后设置若干根桩径为 1 000 mm 的预应力高强混凝土 (PHC) 斜桩以抵抗波浪荷载。上层平台采用梁板式结构, 作为工艺作业平台, 平台顶高程设置为 8.50 m。典型结构断面见图 2。

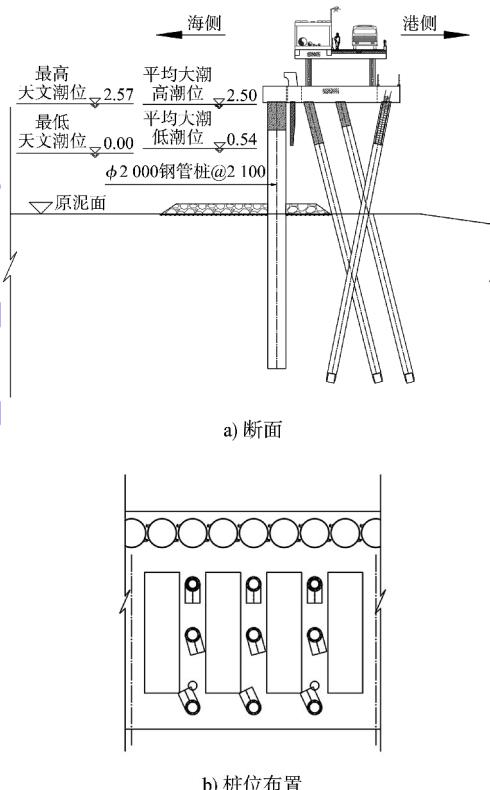


图 2 工程典型结构断面及桩位布置 (尺寸: mm; 高程: m)

2 模型试验设计

2.1 试验设备

为分析正向浪以及斜向浪下密排桩基防波堤的波浪力作用, 以及波浪力沿防波堤轴线的分布情况, 本工程采用二维和三维模型试验测试密排桩基防波堤波浪力。综合考虑试验水槽、模型大小以及准确模拟小桩间距和桩侧肋板等因素, 模型比尺均取 1:30.7。

二维断面试验于波浪水槽中进行, 水槽长 68 m、宽 1.0 m、深 1.8 m。水槽一端设有液压式推板造

波机，末端铺设消能缓坡。水槽外侧 0.5 m 作为有效试验宽度进行断面模拟，另一侧用以扩散二次反射的波能。三维整体试验在波浪港池中进行，港池长 70 m、宽 52 m、深 1.5 m，港池一端设有多向不规则造波系统，边界均设置消浪缓坡和消浪栅。

防波堤结构采用有机玻璃(桩)与塑料板(梁结构等)材料组合进行模拟，按刚性结构进行模拟。波压力测量采用压强传感器及 DS30 多功能自动采集系统。

2.2 试验布置

二维试验波浪水槽模型布置见图 3。其中 $W_0 \sim W_4$ 为测波仪以验证试验波高和堤前波高。波压力传感器布置见图 4，其中 1#、2# 布置于挡浪墙，3#、4# 布置于上部梁结构，5# ~ 10# 均匀布置于桩基迎浪面。试验时测力的采样频率为 100 Hz，每组试验重复 3 次，取 3 次测力结果的平均值作为该组的试验结果。

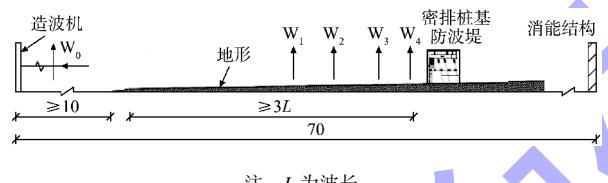


图 3 波浪水槽纵断面和模型布置 (单位: m)

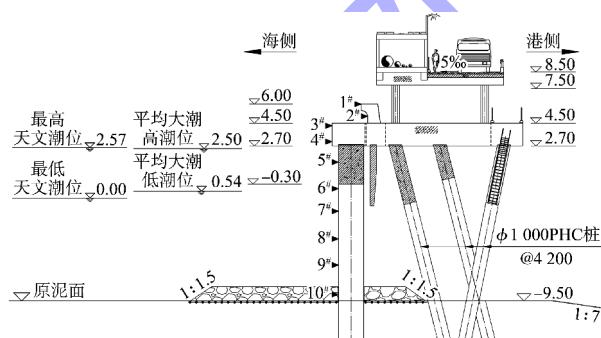
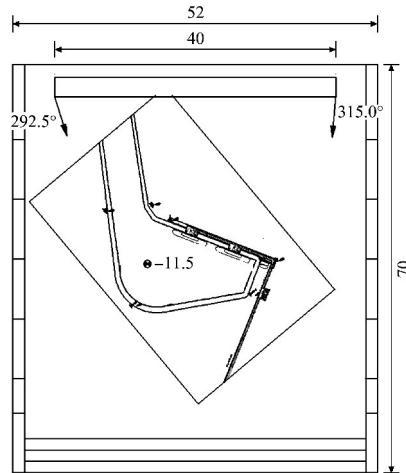


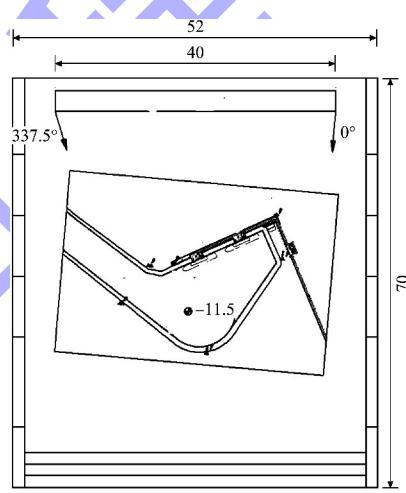
图 4 传感器布置 (尺寸: mm; 高程: m)

三维模型验中，由于波浪的主浪向方位角分别为 315° 和 337.5° ，考虑造波机性能，三维模型分 2 次试验摆放模型以测试 315° 和 337.5° 方向的波浪力。模型平面布置见图 5。在模型上选取堤头、堤身和拐弯处 3 处测试波浪总水平力，测试点布置见图 6。每个测试点沿着梁和桩身高度方向布置传

感器，传感器布置见图 4。试验波浪要素见表 2。



a) 波向 315.0°



b) 波向 337.5°

图 5 模型布置 (单位: m)

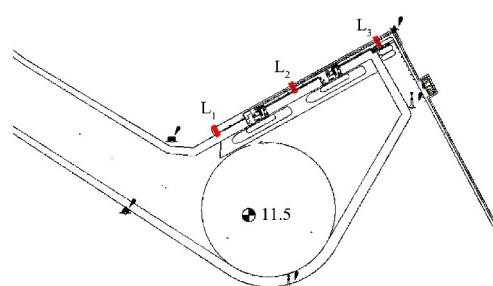


图 6 波浪力测点布置 (单位: m)

表 2 试验组次波浪要素

波浪方向/(°)	水位/m	重现期/a	H_m0 /m	T_p /s
315.0	3.51	50	3.3	14.0
	-0.16	50	3.3	14.0
337.5	3.51	50	3.0	13.3
	-0.16	50	3.1	13.3

3 试验结果与分析

3.1 波压力沿高程分布

本文的波浪力均指波峰作用于迎浪面时指向堤内侧的结构的水平力。试验中提取单位宽度上总波浪力最大值及相应的各传感器即时波压力进行分析。

根据二维物理模型试验的各传感器波压力结果,与国标JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[5]和OCDI公式计算的直墙式建筑物波浪力结果^[6-7]进行对比,见图7。

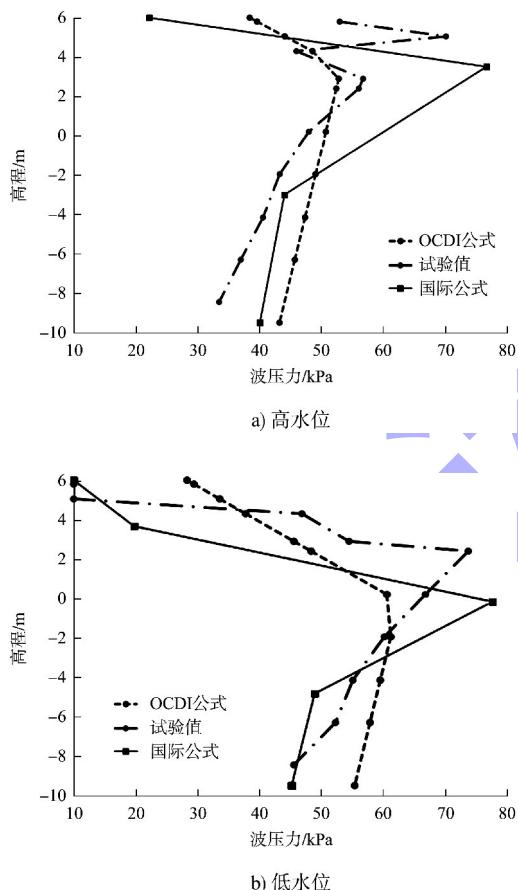


图7 波压力沿高程的结果对比

由图7可以得出,排除圆弧挡墙等波能集中因素的影响,密排桩基波压力沿高度方向分布与直墙式建筑波浪力分布一致。不同水位下单位宽度波浪力总力试验值与理论计算值对比见表3。

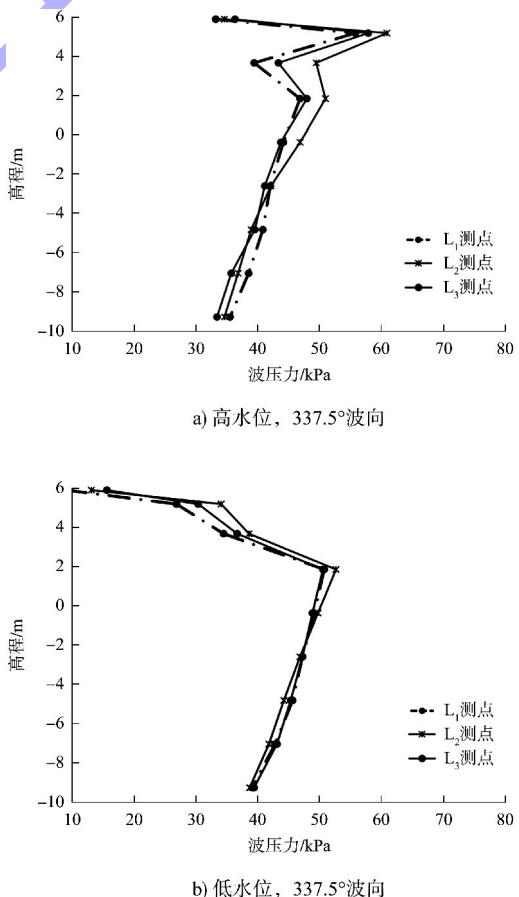
表3 单位宽度总波浪力对比 kN/m

工况	试验值	国标公式计算结果	OCDI公式计算结果
高水位	698	810	741
低水位	759	675	772

由表3可以得出,高水位下国标公式计算结果最大,较试验值大约16%; OCDI结果较试验值大约6%。低水位下 OCDI公式计算结果最大,较试验值大约1.6%; 国标公式计算结果最小,与试验值相差11%。另可看出,国标公式对水深的影响较为敏感,高水位和低水位波浪力结果相差20%,而 OCDI公式和试验结果相差分别为4%和8.7%。综上,密排桩桩基结构的波浪力可采用直墙式建筑物波浪力理论公式近似计算,且日本OCDI公式的结果较为接近试验值。

3.2 波浪力沿堤轴线分布

根据三维物理模型试验结果,不同水位及不同波浪入射角度下,波浪力沿堤轴线分布见图8。



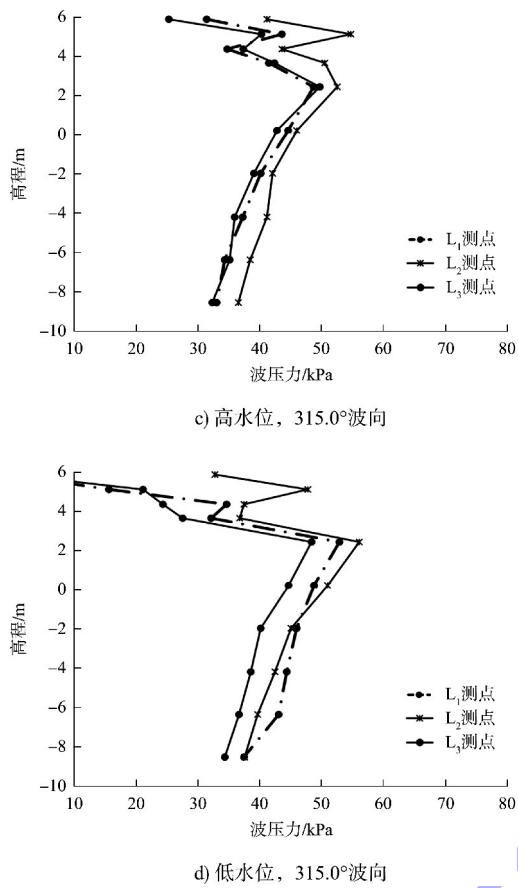


图 8 波压力沿堤轴线的结果对比

由图 8 可以得出, 不同浪向情况下, 堤身的波浪力大于两侧堤头的波浪力。在正向浪(337.5°波向)情况下, 堤身与两侧堤头的波浪力偏差不明显; 斜向浪(315.0°波向)情况下堤身波浪力明显大于两侧堤头。单位宽度总波浪力见表 4。可以看出, 在正向浪(337.5°波向)情况下, 堤身与两侧堤头的波浪力偏差不超过 7%; 在斜向浪(315.0°波向)情况下, 波浪力偏差最大可达 21%。

表 4 不同位置单位宽度总波浪力对比

工况	波向/($^{\circ}$)	单位宽度总波浪力/($kN \cdot m^{-1}$)		
		L ₁ 测点	L ₂ 测点	L ₃ 测点
高水位	337.5	654	707	676
	315.0	606	673	596
低水位	337.5	681	696	692
	315.0	634	680	564

3.3 斜向浪的影响

三维与二维物理模型试验结果对比见图 9。可以看出, 高水位和低水位情况下 315.0° 和 337.5° 波向下三维试验结果各点的波压小于二维试验结

果。单位宽度总波浪力见表 5。

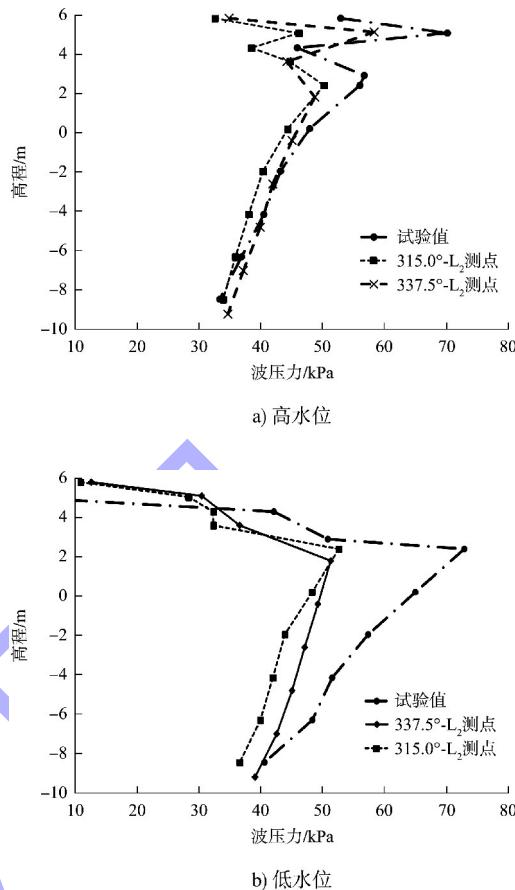


图 9 三维与二维物理模型试验结果对比

表 5 不同试验单位宽度总波浪力对比 kN/m

工况	二维试验	三维试验	
		337.5° 波向	315.0° 波向
高水位	698	687	625
低水位	759	690	626

根据现有斜向波浪对直墙式建筑波浪力的影响研究, 采用日本 Goda 斜向浪波浪力折减系数 $(1+\cos\theta)/2^{[8]}$, 其中 θ 为波浪方向与堤身轴线法向的夹角, 将理论计算值与试验值进行对比, 见表 6。可以看出, 高水位时采用 GODA 斜向浪折减公式计算所得结果与试验值相差不大, 偏差为 1%~8%; 低水位时结果偏差在 8%~15%。

表 6 斜向浪折减对比分析 kN/m

工况	337.5° 波向		315.0° 波向	
	Goda 公式结果	差值	Goda 公式结果	差值
高水位	696	9	684	59
低水位	756	66	744	118

(下转第 64 页)