



桩基双挡板透空式码头波浪上托力试验研究

尹亚军, 陈国平, 严士常, 许忠厚, 黄璐

(河海大学 港口海岸及近海工程学院 海岸灾害与防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 依托沈家湾客运码头拟建二期工程, 通过物理模型试验, 对桩基双挡板码头面板所受波浪力上托力进行研究。结果表明: 相对波高 (H/d)、相对波长 (L/d)、后挡板结构形式、后挡板相对入水深度 (t_2/d) 均对码头面板及横梁上所受波浪上托力具有较为显著的影响。通过将最大上托波压强的试验值与现有研究成果进行对比, 在后挡板相对入水深度 ≤ 0.65 时, 最大上托波压强的计算可以参考周益人的拟合公式; 在后挡板入水深度 > 0.65 时, 最大上托波压强的计算可以参考过达的拟合公式。

关键词: 桩基双挡板透空式码头; 波浪上托力; 物理模型试验

中图分类号: U 656.1⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0071-05

Experiment study on uplift wave force of piled double baffles permeable wharf

YIN Ya-jun, CHEN Guo-ping, YAN Shi-chang, XU Zhong-hou, HUANG Lu

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education,

College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the second-stage engineering of Shenjiawan passenger terminal, we carry out a physical model experiment to study the uplift wave force distribution of the piled double baffles permeable wharf. The results show that the relative wave height (H/d), relative wave length (L/d), back baffle structure and relative underwater penetration of the back baffle (t_2/d) have obvious effects on the uplift wave force. Comparing the uplift wave force measured in the experiment and calculated by different formulas, we find that when the relative underwater penetration of the back baffle is equal to or less than 0.65, the formula derived by Zhou Yiren is more applicable to calculate the biggest uplift wave pressure on the face plate. While the formula derived by Guo Da is more applicable when the relative underwater penetration of the back baffle is more than 0.65.

Keywords: piled double baffles permeable wharf; uplift wave force; physical model experiment

桩基挡板透空式码头是一种新型码头结构形式, 兼有码头与防波堤的双重功能, 具有防止泥沙淤积、改善港内水质条件、造价低等优点。目前桩基挡板透空式码头在国内成功运用的案例有东营港一期扩建工程、沈家湾客运站码头工程等。其中, 东营港为单挡板结构, 沈家湾为双挡板。当前针对桩基码头波浪上托力的研究成果较多^[1-8], 但大多是针对普通的桩基码头或单个水平板, 而针对带挡板桩基码头波浪上托力的研究成

果较少。因而, 本文依托沈家湾客运码头拟建二期工程, 通过物理模型试验, 对桩基双挡板码头面板所受波浪力上托力进行研究。

1 物理模型试验设计

1.1 试验设备

物理模型试验在风浪水槽中进行, 水槽长 80 m、高 1.5 m、宽 1 m, 水槽一端安装有液压式推板造波机, 另一端铺设消能缓坡, 以减小波浪

收稿日期: 2015-07-19

作者简介: 尹亚军 (1990—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸与近海工程研究。

反射。同时在水槽的中后部用隔板将水槽分隔成等间距的两部分，物理模型试验在外侧的 50 cm 宽水槽内进行，从而减少波浪的二次反射。波高和波浪力的测量和采集均采用北京水科院研制的 DJ800 多功能检测系统及配套传感器。

1.2 试验参数

此次物理模型试验是严格按照实际工程设计的，试验过程中高水位越浪是允许的，在此前提下研究码头面板所受波浪上托力。采用不规则波作为入射波，不规则波的谱型选用改进的 JONSWAP 谱，试验波要素如表 1 所示（已转化为模型值）。试验中，前挡板开孔，开孔率 38.8%，挡板底部与泥面距离记为 s_1 ， s_1 取 18 cm；后挡板分为开孔和不开孔 2 种形式，后挡板底部与泥面的距离记为 s_2 。后挡板开孔时，开孔率 38.8%， s_2 取 18 cm；后挡板不开孔时， s_2 取 0、6、14、18 cm 这 4 种情况。当后挡板底部距离泥面 0 cm 时，码头结构及压力测点布置如图 1 所示。

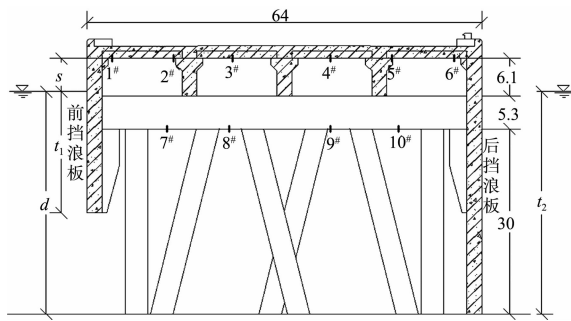


图 1 码头结构及压力测点分布 (单位: cm)

表 1 试验波要素

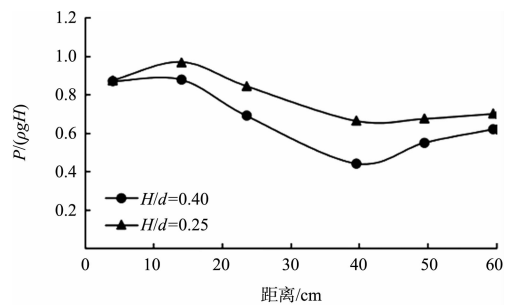
水深 d/cm	有效波高 H/cm	平均周期 T/s	波长 L/cm
41	16.0	2.4	460
41	10.5	2.4	460
41	13.6	2.0	370
36	12.6	2.4	430
36	9.5	2.4	430
36	6.3	1.6	270
36	6.3	0.9	120
20	10.3	2.0	270
20	7.5	2.0	270
20	5.4	2.0	270
20	4.7	0.8	90

2 试验结果分析

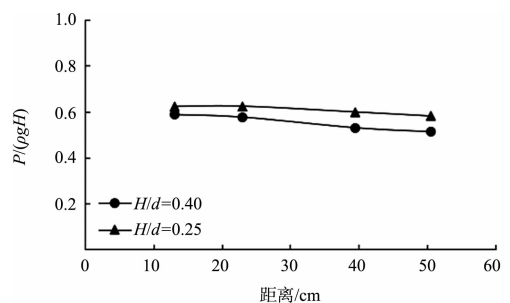
试验分析中所用的 P 为压强峰值 1/3 大值的平均值， H 为波高 1/3 大值的平均值。横轴的距离为压力测点距离前挡板的距离。

2.1 相对波高对波浪上托力分布影响

图 2 显示不同水深情况下面板及横梁底部所受相对波压强随相对波高变化。在 $d = 41$ cm 时，面板及横梁底部所受相对波压强随相对波高的增大而减小；在 $d = 36$ cm 时，面板及横梁底部所受相对波压强随相对波高的增大而增大。且横梁底部所受相对波压强对相对波高变化的敏感性小于面板，横梁底部的相对波压强分布很均匀，而面板底部不同位置的相对波压强差异明显。由于码头面上护轮坎顶部距离泥面 44.5 cm，在 $d = 41$ cm 时，大部分波浪都能越过护轮坎，相对波高越大，越浪越严重，波浪穿过前挡板的能量越小，因而面板及横梁底部所受相对波压强越小。而在 $d = 36$ cm 时，静水面与护轮坎顶部的距离大于半倍波高，只有部分波浪的波峰尖部越过护轮坎，因而绝大部分波能均作用在前挡板上并有部分波能透过前挡板作用在面板及横梁底部，此时相对波高越大，面板及横梁底部所受相对波压强越大。



a) 面板底部, $d=41$ cm



b) 横梁底部, $d=41$ cm

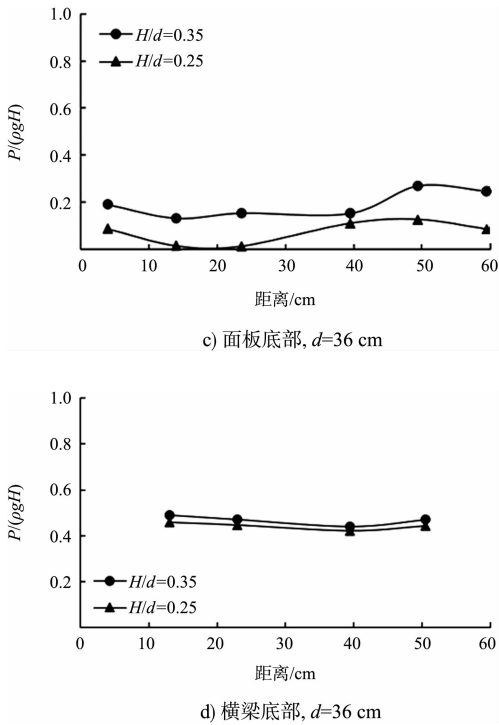


图 2 相对波压强随相对波高变化

2.2 相对波长对波浪上托力分布影响

图 3 显示横梁底部相对波压强随相对波长变化。图 3 表明, 在 $d=36$ cm 时, 横梁底部所受相对波压强随相对波长的增加而加大。在波高相同的情况下, 波长越长, 单宽波峰线长度的波能流越大, 同时波浪的透射能力越强, 因而穿过前挡板作用在横梁底部的波浪上托力越大。

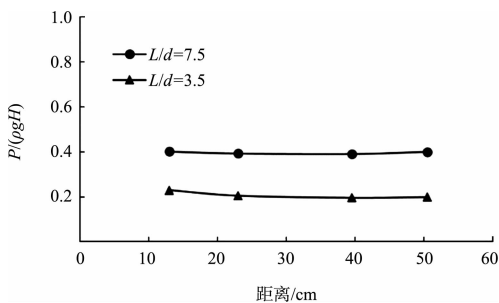


图 3 相对波压强随相对波长变化

2.3 后挡板结构形式对波浪上托力分布影响

图 4 显示相对波压强随后挡板结构形式变化情况。图 4 表明: 在 $d=36$ cm 时, 后挡板从开孔结构形式变为不开孔结构形式, 面板上靠近后挡板位置的竖向波压强有所加大, 而靠近前挡板的竖向波压强轻微减小。横梁底部靠近后挡板位置

的竖向波压强有所加大, 靠近前挡板的几乎不变, 横梁对后挡板结构形式的变化的敏感性明显小于面板。总体而言, 后挡板结构形式的变化主要影响靠近后挡板位置的波浪上托力, 而对靠近前挡板处的波浪上托力影响较小。

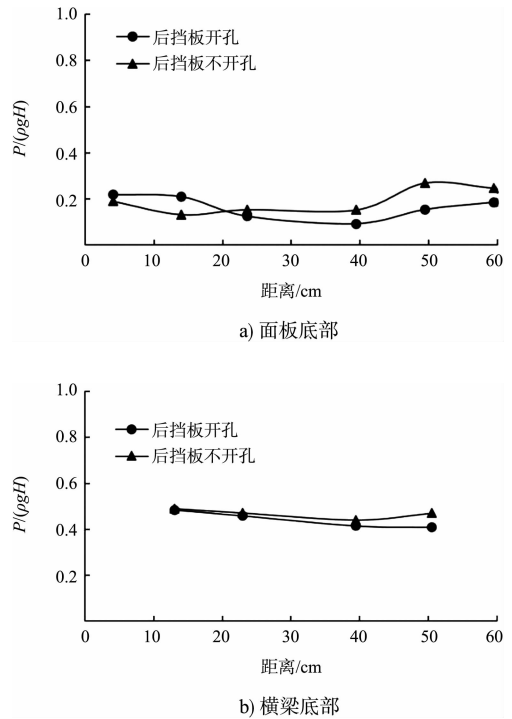


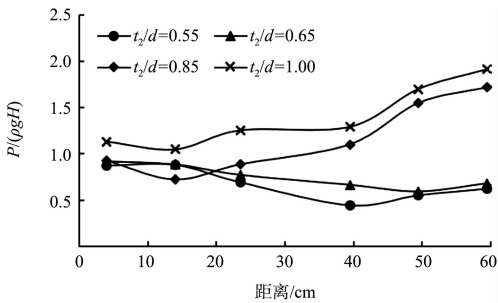
图 4 相对波压强随后挡板结构形式变化

2.4 后挡板入水深度对波浪上托力分布影响

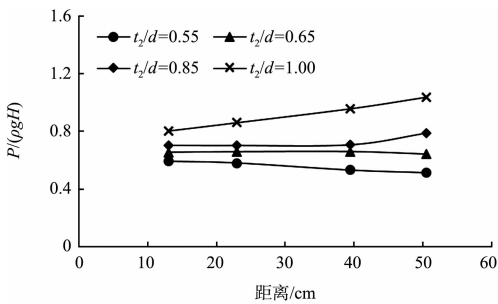
图 5 为相对波压强随后挡板入水深度变化图。图 5a)、5b) 在相对入水深度为 0.55 和 0.65 时, 码头面板所受的波浪上托力的大值均在靠近前挡板部位, 越靠近后挡板的位置, 波浪上托力越小, 且相对入水深度从 0.55 增加到 0.65 时, 所受波浪上托力的增加较小。当后挡板相对入水深度增加到 0.85 时, 面板底部所受波浪上托力的分布规律明显改变, 靠近后挡板处的波浪上托力迅速加大, 越靠近前挡板, 波浪上托力越小。在相对入水深度增加到 1 时, 面板底部所受波浪上托力进一步加大。在后挡板相对入水深度从 0.55 增加到 0.85 时, 横梁底部所受波浪上托力无明显变化, 而在后挡板相对入水深度增加到 1 时, 横梁底部所受波浪上托力显著加大, 且越靠近后挡板, 波浪上托力越大。这是因为在 $d=41$ cm 时, 码头面

板与静水位的距离仅有 0.4 cm，当波峰作用过来时，涌入码头面板下部的水体会迅速增加，而后挡板相对入水深度太大，且后挡板不开孔，突然涌入的水体无法及时排走，且码头面板与静水位间的空间很小，无法容纳突然增加得水体，这就导致突然涌入的水体对靠近后挡板处的面板形成巨大的冲击压强。可见，后挡板相对入水深度太大，容易导致在靠近后挡板的位置形成过大的冲击压强，这会严重影响码头面板的结构安全，因而在实际应用中要避免此类设计。

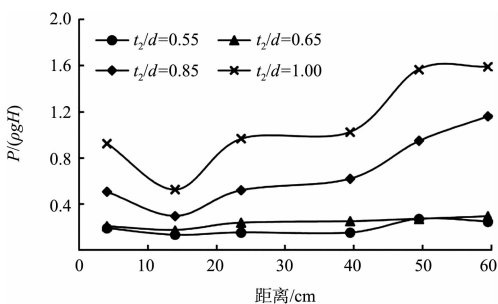
图 5c)、5 d) 中面板在后挡板相对入水深度为 0.85 和 1 时所受的最大相对波压强显著小于图 5a)、5b)，其原因是 $d=36\text{ cm}$ 时，码头面板底部与静水位的空间明显加大，增加了波峰过来时对突然增加的水体的容纳能力，减小了波浪对码头面板的冲击压强。



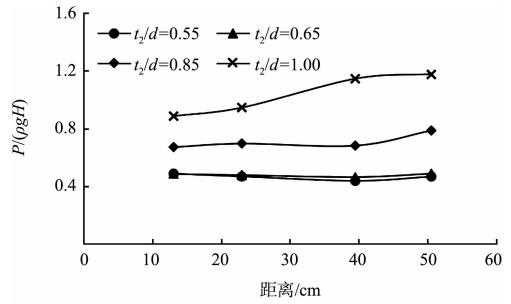
a) 面板底部, $d=41\text{ cm}$



b) 横梁底部, $d=41\text{ cm}$



c) 面板底部, $d=36\text{ cm}$



d) 横梁底部, $d=36\text{ cm}$

图 5 相对波压强随后挡板入水深度变化

3 波浪上托力计算方法讨论

当前波浪上托力的研究主要关注最大上托波压强和最大上托总力，对于这两方面的研究成果较多，但各家公式的计算结果的偏差均较大，这就给实际工程的选用带来麻烦。因而本文针对面板所受最大上托波压强，选取过达等^[1]、周益人^[3]、孙龙^[7]人的研究成果（分别简称过达公式、周益人公式、孙龙公式），将实验值与他们公式的计算值进行对比，从而给出桩基双挡板透空式码头面板的最大上托波压强的推荐计算公式。

过达公式的形式如式(1)所示，公式中具体参数的意义及选取见参考文献[1]；周益人公式的形式如式(2)所示，公式中具体参数的意义及选取见参考文献[3]；孙龙公式的形式如式(3)所示，公式中具体参数的意义及选取见参考文献[7]。

$$\frac{P}{\rho g H} = K_1 \left[K_2 \frac{\eta}{H} - \frac{\Delta h}{H} \right] e^{\mp n \left(\frac{\Delta h}{H} - a \right)} \quad (1)$$

$$\frac{P}{\rho g H} = K \left(1 - \frac{\Delta h}{\eta} \right)^{0.6} e^{-2.2K \left(\frac{\Delta h}{H} - 0.25 \right)^2} \quad (2)$$

$$\frac{P}{\rho g H} = \pi \text{th} \frac{2\pi d}{L} \left(0.7 - \frac{\Delta h}{H} \right) e^{\mp 2.7 \left(\frac{\Delta h}{H} - 0.2 \right)} \quad (3)$$

此次试验中，后挡板的相对入水深度对面板所受的水平波压强的影响显著，因而将后挡板不同相对入水深度的试验值与公式计算值进行对比，如图 6 所示。通过之前分析可知，试验中相对波压强大于 1.5 都是由于后挡板相对入水深度太大，导致码头面板受到过大的冲击压强。分析图 6 可知，在后挡板相对入水深度较小 ($t_2/d \leq 0.65$)，码头面板没有受到过大的冲击压强时，过达公式计算出的相对波压强显著大于试验值；而当后挡

板相对入水深度较大 ($t_2/d > 0.65$), 码头面板受到过大的冲击压强时, 过达公式的计算值较试验值稍微偏小。周益人公式的计算值整体小于过达公式计算值, 在面板没有受到过大冲击压强时, 计算值较试验值偏大, 但与试验值的吻合度优于过达公式, 而在面板受到过大冲击压强时, 周益人公式计算值显著偏小。孙龙公式的计算值整体小于试验值, 在后挡板入水深度较大时, 计算值偏小尤为显著。综上分析可知, 后挡板入水深度 $t_2/d \leq 0.65$ 时, 推荐使用周益人公式计算面板所受最大上托波压强; 当后挡板入水深度 $t_2/d > 0.65$ 时, 推荐使用过达公式计算面板所受最大上托波压强。

4 结论

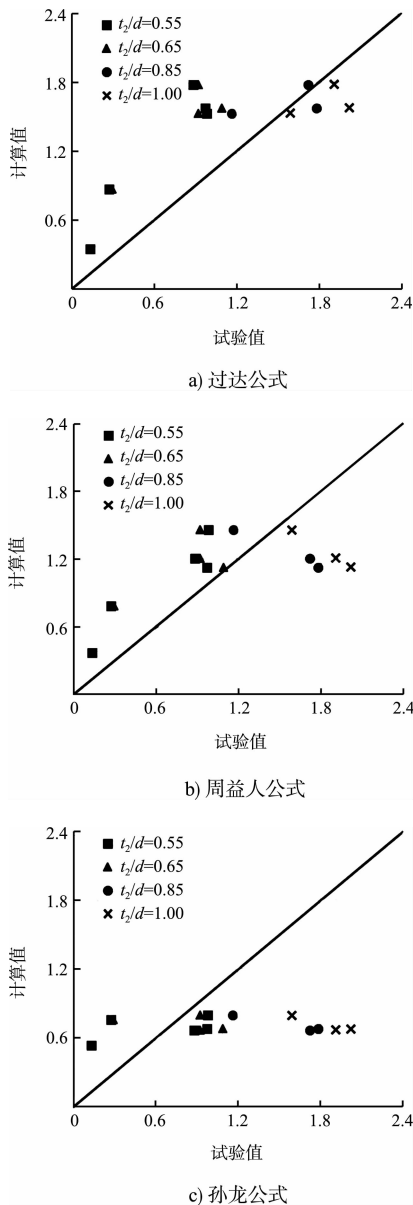
1) 高水位时, 相对波高越大, 码头面的越浪越大, 导致面板及横梁底部所受相对波压强越小; 水位较低、越浪较小时, 相对波高越大, 码头面板和横梁所受相对波压强越大。

2) 水位较低、越浪较小时, 相对波长越大, 面板所受的相对波压强越大。

3) 后挡板从开孔改为不开孔时, 面板及横梁靠近后挡板处所受相对波压强有所增大。

4) 后挡板相对入水深度 $t_2/d > 0.65$ 时, 靠近后挡板处的面板易受到过大的冲击压强, 且水位越高冲击压强越明显。

5) 后挡板入水深度 $t_2/d \leq 0.65$ 时, 推荐使用周益人公式计算面板所受最大上托波压强; 当后挡板入水深度 $t_2/d > 0.65$ 时, 推荐使用过达公式计算面板所受最大上托波压强。



参考文献:

- [1] 过达, 蔡保华. 透空式建筑物面板波浪上托力计算[J]. 华东水利学院学报, 1980 (1): 9-11.
- [2] 周益人, 王登婷. 高桩码头面板波浪上托力试验研究[C]// 上海《水动力学研究与进展》杂志社. 第十七届全国水动力学研讨会暨第六届全国水动力学学术会议文集, 2003.
- [3] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪上托力分布[J]. 海洋工程, 2003, 21(4): 41-47.
- [4] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪上托力冲击压强试验研究[J]. 海洋工程, 2004, 22(3): 30-40.
- [5] 周益人, 陈国平, 王登婷. 透空式水平板波浪上托力计算方法[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 26-30.
- [6] 盛祖荫, 过达. 深水桩基码头波浪力的计算[J]. 华东水利学院学报, 1984, (2): 54-65.
- [7] 孙龙, 盛祖荫. 双层梁板桩基码头的波浪力计算[J]. 水运工程, 2000 (7): 24-28.
- [8] 孟艳秋, 陈国平, 严士常. 离岸式高桩码头面板上托力试验及分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2010, 11(1): 72-78.

图 6 最大上托波压强试验值与计算值对比

(本文编辑 郭雪珍)