



石化码头墩台结构波浪力研究

史晓平¹, 张学军², 黄海龙³

(1. 上海海图中心, 上海 200090; 2. 上海交通建设总承包有限公司, 上海 200136;
3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要:海上栈桥式码头的上部一般由置于静水面以上的带有纵横梁水平面板构成, 为估算作用于结构上的波浪力, 已有相当多的理论和试验研究, 提出许多波浪力和相应的压强分布经验公式。然而, 由于影响因素非常复杂, 且工程梁系结构多变, 因此通过模型试验来确定梁系结构等的波浪上托力和水平力是十分必要的。利用物理模型试验, 测定了厦门港海沧港区石化码头结构在不同水位波浪组合情况下码头平台、墩台和桩基上的波浪力, 并且得到了设计部门的实际采用。

关键词:墩台; 结构; 波浪力

中图分类号: U 656.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0096-05

Wave force on petrochemical wharf's abutment structure

SHI Xiao-ping¹, ZHANG Xue-jun², HUANG Hai-long³

(1. Shanghai Chart Center, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Communications Construction Contracting Co., Ltd., Shanghai 200136, China;
3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The upper part of a pier wharf on the sea is usually made up of horizontal panel with both vertical and horizontal beams above the still water level. There have been quite a few theories and empirical studies that calculate the wave force on structures and propose many empirical equations concerning the wave force and corresponding pressure distribution. Nevertheless, due to the complex variables and changeable girder systems, it is necessary to determine the pop-up force and horizontal force on beam structures by physical model tests. The current study, by physical model tests, tests and calculates the wave force on the wharf platform, abutment and pile foundation under different situations of water level and waves at the petrochemical wharf, Haicang harbor, Xiamen. The test results have been adopted in practice by some design units.

Keywords: abutment; structure; wave force

随着海上采油和水运业的发展, 在近海和开敞海域内建造的透空式码头或海上石油钻井平台日益增多, 透空结构面板上的波浪浮托力计算是结构设计中需要研究的主要问题之一。日本和中国的学者都进行了很多的试验和理论研究, 得到一些波浪浮托力计算公式。

在《海港工程设计手册》^[1]中将结构面板的波

浪压强 p 概化为按照波面形状分布, 波浪产生的总上托力为:

$$P = \int_{x_1}^{x_2} p dx \quad (1)$$

压强为:

$$p = \beta \gamma (\eta - \Delta h) \quad (2)$$

式中: p 为波浪上托力压强 (kN/m^2); β 为压力

收稿日期: 2014-08-21

作者简介: 史晓平 (1977—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道工程工作。

反应系数, 当上部结构的宽度约在 10 m 以下时, 可取 $\beta = 1.5$, 当上部结构的宽度较大时, 可取 $\beta = 2.0$; Δh 为超高 (m); η 为波峰面在静水面上的高度 (m), 可按式计算:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx) + \frac{\pi H^2}{2L} \left[\frac{\cosh \frac{2\pi h}{L} \left(\cosh \frac{4\pi h}{L} + 2 \right)}{4 \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^3} \right] \cos(2kx) \quad (3)$$

而合田良实^[2]则认为透空面板上的最大上托力主要为冲击荷载, 假定承受的波浪压强是均匀分布的。压强的计算长度为 $L/4$, 波浪产生的总上托力大小和与面板高程有关, 可表示为:

$$P = \xi \rho g H \cdot \frac{L}{4} B \tanh \frac{2\pi h}{L} \cdot \left(\frac{H}{\Delta h_0} - \frac{\Delta h_0}{H} \right) \quad (4)$$

式中: P 为面板上波浪上托力总压力值 (t); ξ 为压力修正系数, 随面板在波浪中心线上的不同高程而变化, 由试验确定; ρ 为水的体积质量 (t/m^3); B 为桥面板宽度 (m); h 为栈桥前水深 (m); Δh_0 为面板在波浪中心线上的超高 (m), 可表示为:

$$\Delta h_0 = \Delta h - \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \quad (5)$$

式中: Δh 为面板在静水面上的超高。

另外, 谷本胜利、过达等^[3]也曾对透空平板、高桩梁板等进行过模型试验, 都认为波浪上托力和透空面板的相对超高是一条指数函数关系曲线。但是这些经验公式的主要特点是结构形式相对比较简单, 且并未考虑冲击角度的影响, 大多为超高和入射波高的函数。

周益人^[4,7]认为, 面板上最大波浪上托力不仅受到冲击压强和压强分布宽度的影响, 同时还应该考虑超高、波陡等相关变量。由于不同超高、波陡条件下平板上的压强分布是不同的, 所以简单以最大压强值乘以一定的面积来推得最大总上托力, 是考虑不全面的。他的透空式水平板单位长度最大波浪上托力计算公式为:

$$\frac{P}{\rho g H B} = K \left(1 - \frac{\Delta h}{\eta} \right)^{0.8} \exp \left[-2.7K \left(\frac{\Delta h}{H} - 0.35 \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: P 为水平板上单位长度最大上托力, 这个单位长度的方向与波浪入射方向相垂直; η 为波面距静水面最大高度, 由二阶 Stocks 波理论算得; K 为冲击角度影响系数, 可由下式求得:

$$K = K_0 K_1 \exp \left[-600 K_1 \left(\frac{H}{L} - 0.055 \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中: K_0 为相对板宽影响系数, 当 $L/B > 10$ 时取 $K_0 = 1.7$, 当 $L/B \leq 10$ 时取 $K_0 = 1.4$; K_1 为板宽和水深影响系数, 可由下式求得:

$$K_1 = 0.9 \tanh \left(\frac{B}{2.5H} \right)^{1.5} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (8)$$

式中: B 为水平板沿波浪传播方向的宽度, 当 $B/H < 1.68$ 时, 取 $B/H = 1.68$; L 为入射波波长。

由此可知, 波浪上托力产生的机理至今未得到统一的认识, 且影响因素非常复杂, 而试验数据的离散和局限, 又导致了各种经验关系公式的千差万别, 所以采用不同公式计算可能相差十几倍。

周益人公式虽然考虑的影响因子较为全面, 能够作为理想概化计算时参考, 但是由于该公式是在完全透空平板的实验室研究得出的, 未计入存在桩基和纵横梁等实际情况, 故在工程设计时, 依然需要利用物理模型试验对平板、墩台的结构实际受力进行测定。

1 工程概况

厦门港海沧港区 5 万 DWT 化工码头, 码头长度 280 m, 由 4 个系缆墩、3 个平台和连接栈桥组成, 码头前沿设计水深 -13.8 m, 平台顶高程为 9.0 m, 平面布置见图 1。工程设计重现期为 50 a 一遇, 设计水位及其波浪要素见表 1。

表 1 设计水位及其波浪要素

水位	波高/m		T/s
	$H_{1\%}$	$H_{13\%}$	
极端高水位 7.34 m	3.5	2.4	5.8
设计高水位 6.14 m	3.4	2.3	5.7
设计低水位 0.72 m	2.7	1.9	5.2

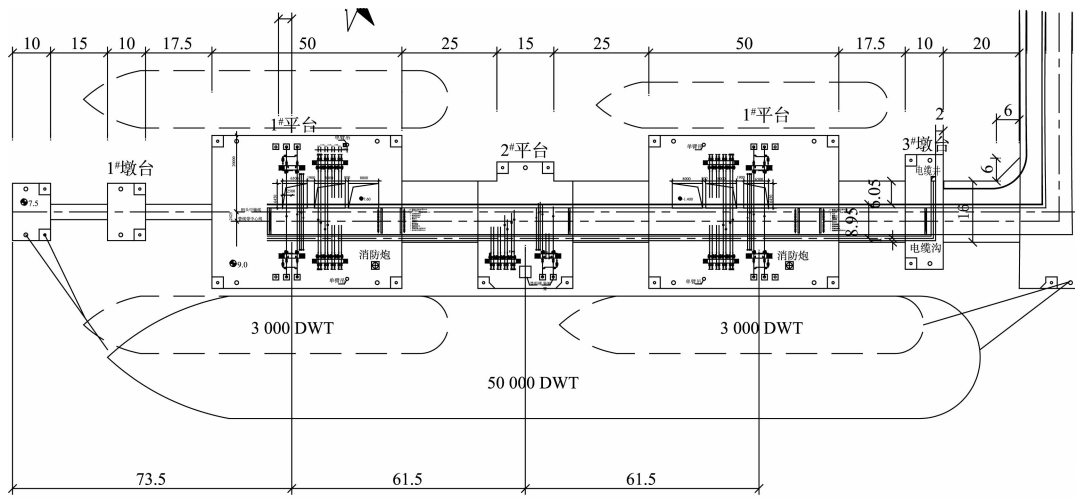


图1 码头平面布置 (单位: m)

2 试验研究和分析

由于影响波浪力和相应压强分布的因素非常复杂,且工程梁系结构多变,所以虽然已有相当多的理论和试验研究,提出许多公式,依然需要模型试验验证。试验采用 1:40 比尺,测定各级水位及不同的波浪要素组合作用下墩台各结构的最大水平力、最大浮托力,并对试验结果进行分析。

为了研究水位的影响,确定最不利工况,增加了几组非设计特定水位进行试验。采用的试验水位和波浪要素见表 2。

表 2 试验水位及波浪要素

水位/m	$H_{1\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	\bar{T} /s
极端高水位 7.34	3.5	2.4	5.8
设计高水位 6.14	3.4	2.3	5.7
特定水位 4.4	3.4	2.3	5.7
特定水位 3.0	3.4	2.3	5.7
特定水位 1.6	3.4	2.3	5.7

试验在南京水科院波浪水池中进行。水池长 52 m、宽 17.5 m、深 1.2 m,港池的一端配有消浪缓坡,另一端配有美国 MTS 公司生产的摇摆式不规则波造波机,由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素。该造波系统可根据需要产生规则波和不规则波。

波压力采用 2000 型多功能监测系统测量,它

是由计算机、多功能监测仪和各种传感器组成的数据采集和处理系统,能进行动、静态压力测量。各传感器通过 4 芯屏蔽线连接到多功能监测仪的通道接口上。压力传感器是硅横向压阻式的,可以在水下操作。在传感器的背后安装有一根长度为 2.5 m 的塑料管,塑料管的另一端与大气相通,以保证传感器的背景压强是大气压强。其测量范围为 $-4 \sim 24$ kPa,分辨率为 0.01 kPa,误差 $< 1.0\%$ 。总力(拉压力)传感器是应变式的,采用一体化防水结构,分辨率为 0.01 N,自振频率为 1 000 Hz,温度稳定性高。波要素采用电阻式波高仪测量,由计算机自动采集处理。

试验遵照《波浪模型试验规程》相关规定,采用正态模型,按照 Froude 数相似律设计。根据设计水位、波浪要素、试验建筑物结构及试验设备条件等因素,模型几何比尺取为 1:40。

试验采用不规则波及规则波进行。不规则波的波谱采用 JONSWAP 谱, γ 取 3.3。按重力相似准则模拟各特征波要素及波谱。将按模型比尺换算后的特征波要素输入计算机,产生造波讯号,控制造波机产生相应的不规则波序列。模型试验中波高和周期模拟值与设计值的误差控制在 3% 以内。造波机每次连续造波不规则波波数大于 120 个,规则波波数大于 30 个。

首先是率定波要素即根据试验水位在港池内产生所要求的特征波要素, 然后放置模型, 模型布置见图 2。墩台上的压力传感器布置见图 3~5。

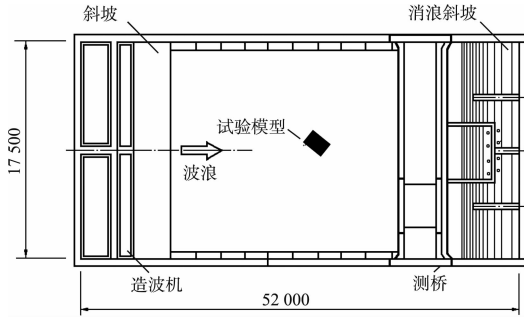


图 2 模型试验布置 (单位: mm)

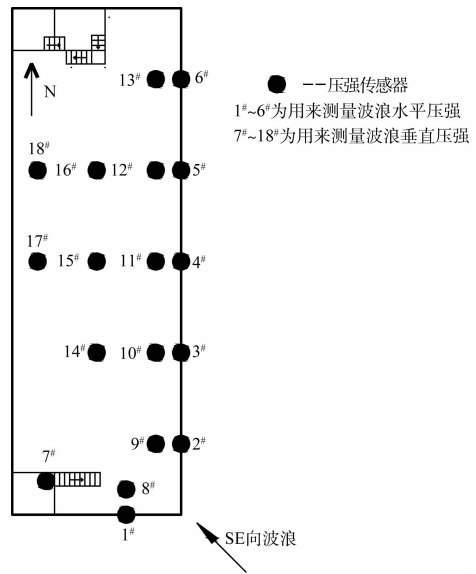


图 5 3#墩台波浪压强传感器布置 (俯视图)

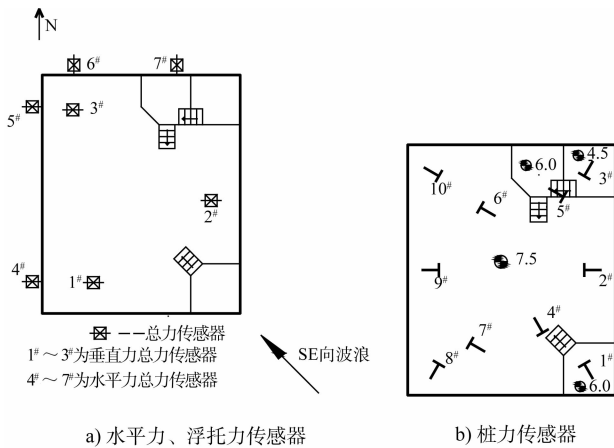


图 3 1#墩台传感器布置

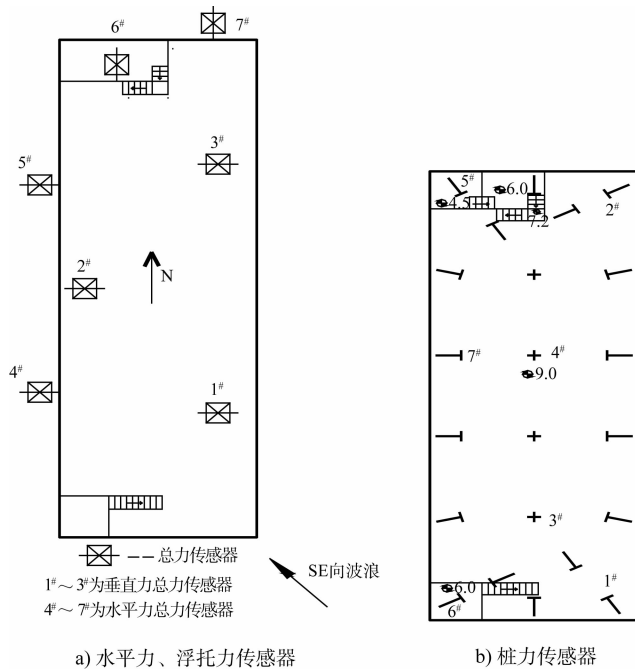


图 4 3#墩台传感器布置

从试验数据中得出, 两墩台均在极端高水位 (7.34 m) 时发生最大水平力, 在相同波浪要素作用下, 随着水位的降低, 墩台所受到的波浪水平力逐渐减小; 在特定水位 (4.4 m) 时墩台发生最大浮托力, 这时墩台底面距静水位很近, 当墩台被淹没或相对超高 (墩台底面高程和静水位的差值与入射波高之比) 相对较大, 其所受到的浮托力都较特定水位 (4.4 m) 时要小。其中 1#墩台的试验结果见表 3。

表 3 1#墩台波浪总力测量同步结果 kN

水位	波浪要素	水平力最大时		浮托力最大时	
		水平力	浮托力	水平力	浮托力
极端高水位 (7.34 m)	不规则波				
	$H_{13\%} = 2.4 \text{ m}$ $T = 5.8 \text{ s}$	677.5	360.3	358.1	481.3
设计高水位 (6.14 m)	不规则波				
	$H_{13\%} = 2.3 \text{ m}$ $T = 5.7 \text{ s}$	507.9	479.0	413.3	634.4
特定水位 (4.4 m)	不规则波				
	$H_{13\%} = 2.3 \text{ m}$ $T = 5.7 \text{ s}$	279.5	784.8	214.4	1 245.5
特定水位 (3.0 m)	不规则波				
	$H_{13\%} = 2.3 \text{ m}$ $T = 5.7 \text{ s}$	118.0	96.9	73.2	137.4
特定水位 (1.6 m)	不规则波				
	$H_{13\%} = 2.3 \text{ m}$ $T = 5.7 \text{ s}$	70.6	36.9	42.1	97.3

在设计高水位 (6.14 m), $H_{13\%} = 2.3 \text{ m}$ 、 $T = 5.7 \text{ s}$ 的不规则波作用时, 将平台结构予以概化, 不

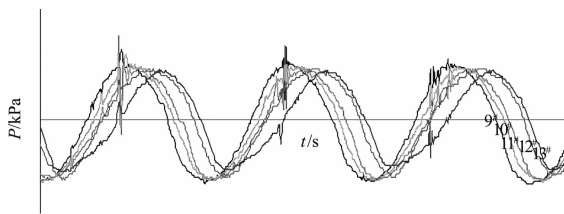
考虑梁板结构时,进行了不同公式的计算(表4)。由表4计算值和实测数据对比可以看出,周益人公式计算值和实测值较为接近。

表4 1#墩台波浪力计算值和实测值比较 kN

计算值			实例值			
海港工程设计手册公式	合田良实公式	周益人公式	水平力最大	浮托力最大	水平力	浮托力
735.4	688.5	577.0	507.9	479.0	413.3	634.4

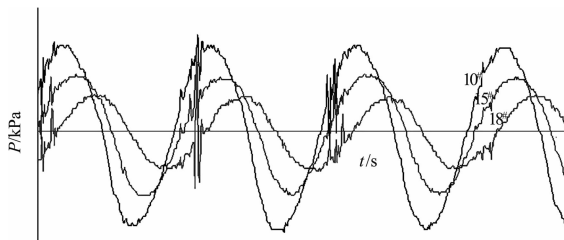
注:设计高水位为6.14 m,不规则波 $H_{13\%}=2.3$ m、 $T=5.7$ s。

由于波浪作用,各点垂直压强的峰值有一定时间相位差别,但是由于是透空结构,在同一波峰线其最大值基本一致。由于梁板影响,个别脉动峰值较高但是时间极短(图6)。随着波浪向后推进过程中,由于上部面板的影响,波高衰减,波能释放,其后部点位不仅相位落后,且压强值小于前部(图7)。



注:水位7.34 m, $H_{1\%}=3.5$ m, $T=5.8$ s。

图6 3#墩台9#~13#波浪垂直压强的相位差

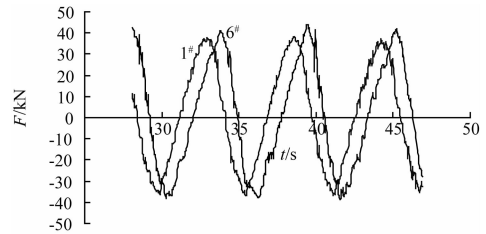


注:水位7.34 m, $H_{1\%}=3.5$ m, $T=5.8$ s。

图7 3#墩台10#、15#、18#波浪垂直压强的相位差

试验结果表明,在极端高水位(7.34 m)和设计高水位(6.14 m)时,由于墩台下部的桩处于完全淹没状态,并且受到上部墩台结构的影响,桩所受到的波浪水平力较其它水位要小;在特定水位(4.4 m)及以下各级水位,由于墩台上部结构对波浪的影响较小,故桩所受到的波浪水平力较极端高水位和设计高水位时有所增大。另外,由于墩台平面尺寸较入射波长小,故桩之间的水

平力相差不大(图8)。总的来讲,随着水位的降低,群桩系数逐渐增大;当水位降低至4.4 m以下后,群桩系数变化不大,且大都接近于1.0。



注:水位3.0 m, $H_{1\%}=3.4$ m, $T=5.7$ s和。

图8 1#墩台1#、6#桩总力的相位差

3 结语

1) 最大上托冲击压强一般发生在相对超高(墩台底面高程和静水位的差值与入射波高之比)0~0.4之间,相对超高在此范围之外均减小。因此,本工程最大浮托力出现在特定水位(4.4 m)时。

2) 对本工程而言,采用水平压强同步值合成得到的水平总力值与实测总力值相接近,本次试验所得的墩台结构的水平压强和水平总力是合理的。

3) 各断面中,水位越高,波浪受到上部结构的影响就越大,基桩所受到的波浪水平力随之减小。

4) 对各断面,随着水位的降低,群桩系数逐渐增大;当水位降低至4.4 m或4.6 m以下后,群桩系数变化不大,均接近于1.0。

参考文献:

- [1] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册(中)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [2] 合田良实. 構造物に働く波力[C]//1967年度水工学に関する夏期研修会講義集. B. 东京: 海岸港湾コース, 1967.
- [3] 谷本勝利, 高橋重雄, 泉田芳和. 水平版に働く揚圧力に関する研究[J]. 港湾技術研究所報告, 1978, 17(2): 3-46.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪总上托力试验研究[J]. 海洋工程, 2004, 22(4): 43-50.

(本文编辑 武亚庆)