



# 高桩码头上部结构波浪水平力试验研究

荣传亚<sup>1</sup>, 周益人<sup>2</sup>

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 南京水利科学研究院 河流海岸研究所, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 通过物理模型试验, 分析纵梁迎浪面压强和上部结构总水平力, 指出影响上部结构波浪水平力 $P$ 的主要因素有: 波高 $H$ , 纵梁高度 $R$ , 超高 $\Delta h$ , 波周期 $T$ , 单个波峰同时作用的纵梁根数 $n$ 。根据试验资料应用因次分析法拟合出了波浪水平力包络线计算公式, 并且对试验值和包络线计算值进行了比较。

**关键词:** 高桩码头; 上部结构; 波浪; 水平力

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0055-05

## Experimental study on wave horizontal force on superstructure of high-pile wharf

RONG Chuan-ya<sup>1</sup>, ZHOU Yi-ren<sup>2</sup>

(1. CCC-CFHD Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. River Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** This paper analyzes the wave pressure on the sea face of the longitudinal beam and the horizontal force of the upper structure through the physical model test. It points out dominant factors which influence the horizontal force of the superstructure, such as wave height  $H$ , longitudinal beam height  $R$ , overheight  $\Delta h$ , wave period  $T$ , as well as the number of longitudinal beams  $n$  affected by the single wave crest. The formulas of wave horizontal force are fitted by the actor analysis method, and the calculated values are compared with the trial values.

**Key words:** high-pile wharf; upper structure; wave; horizontal force

目前, 很多科研人员对直墙式建筑物、桩基和墩柱的波浪水平力进行了理论分析和试验研究, 得出的结论已应用到工程设计中。但是对高桩码头上部结构波浪水平力的研究却很少, 在结构设计中非常关心开敞水域高桩码头上部结构所受到的波浪水平力, 通常按动、静水压力来估算上部结构受力。动、静水压力方法只考虑码头最前沿受力, 没有考虑单个波峰与多根纵梁同时作用对波浪水平力的影响。

盛祖荫等<sup>[1]</sup>通过物理模型试验研究了深水桩基码头所受到的波浪水平力。文中把码头的受力归纳为反射、穿透、消能3种不同的情况。根据码头前不同的波况给出不同的计算方法。本文还指

出: 在试验中, 波浪水平力主要反映在码头前沿的上部结构, 其桩基部分承受的水平力相对来说非常小, 和上部结构受力比较起来完全可以忽略。

杨正己等<sup>[2]</sup>通过波流试验, 给出了作用在面板上的上托力和下压力, 纵横梁上的侧压力以及前边梁和靠船构件上的侧压力。文中认为码头在波、流共同作用下纵向总水平力和码头面板以下阻水面积有关, 高水位时阻水面积大, 水平力就大, 低水位时阻水面积小, 水平力就小, 不规则波时, 码头分段纵向力为瑞利分布。

隋华等<sup>[3]</sup>对一侧设有挡板的透空码头的波浪水平力进行了研究。笔者根据物理模型试验求解的透空高桩码头前的反射系数, 由反射波高按推

收稿日期: 2013-02-26

作者简介: 荣传亚(1986—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口工程结构设计工作。

进波公式计算了透空高桩码头前沿挡板所承受的水平波压力。

### 1 试验概况

试验在南京水利科学研究院河港所大波浪水槽内进行，采用正态模型，模型几何比尺 $\lambda=36$ 。

水槽宽1.2 m，高1.8 m，长170 m。水槽工作段在纵向预先被分隔成2个部分，试验段设在0.6 m宽部分，另一部分用以扩散二次反射波能。水槽两端均铺设消浪缓坡，以减小波浪的反射。波浪水槽一端安装推板式不规则波造波机，由计算机控制，可以产生试验所需的波浪，波浪水槽布置见图1。

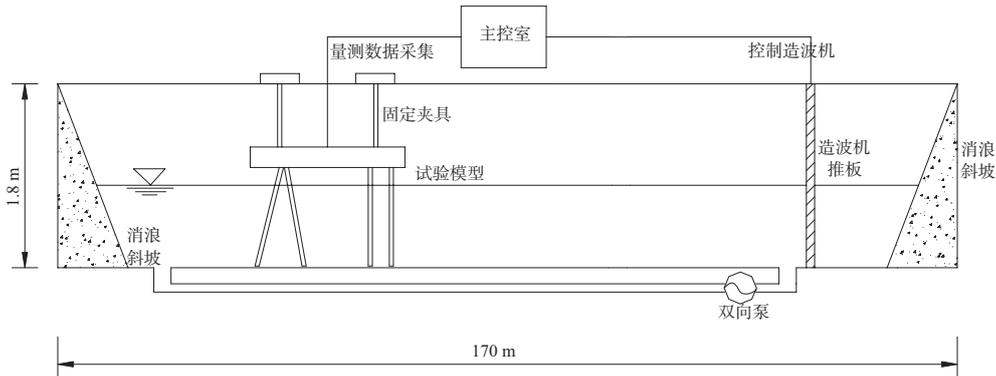


图1 波浪水槽布置

试验采用规则波，规则波平均波高采用试验波浪要素的 $H_{1\%}$ 值（表1），波高、波周期等物理量按模型比尺换算后输入计算机，产生造波讯号，控制造波机产生相应的波列。每组试验规则

波波数不小于20个，每组试验重复3次。模型试验中波高和周期模拟值的误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。

表1 试验波浪要素

水位/m	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_2/m$	$T_1/s$	$T_2/s$
极端高水位5.26	3.83	3.21	2.57	6.2	9.0
补充水位4.42					
设计高水位3.70	3.30	2.70	2.20	6.2	9.0
补充水位2.80					

为了对码头面板和纵梁上的波压强进行分析，在码头面板和纵梁迎浪面的中间部分安装了压强传感器，由计算机自动采集测量数据，压强传感器布置如图2所示；为了对码头上部结构的总水平力和总上托力进行分析，在码头面板顶面和结构尾部安装总力传感器，由计算机自动采集测量数据，总力传感器的布置如图3所示。

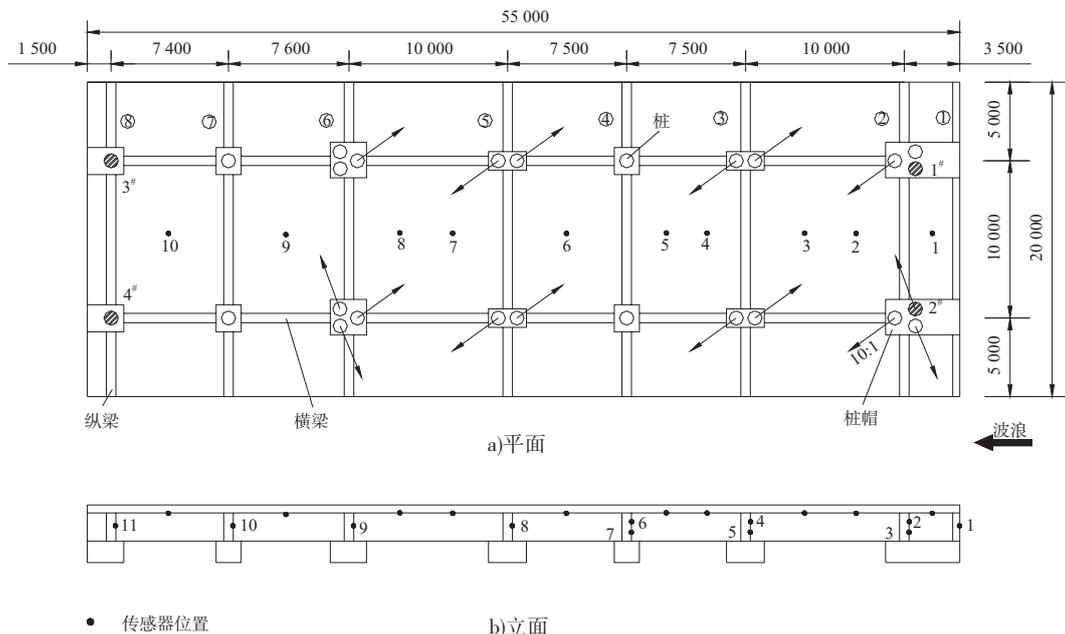


图2 压强传感器布置

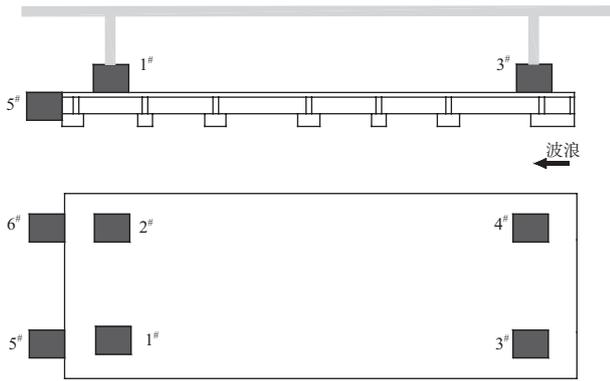


图3 总力传感器布置

## 2 试验结果和分析

### 2.1 波浪水平力试验值与传统方法计算值的比较

在分析波浪水平力时同样忽略桩基的作用，并且不考虑纵梁背面的压强。假如码头前沿是直立岸壁，波浪入射后会产生立波，如果在码头上部结构受力范围内按照立波压强来计算水平力，得出的值必然要大于试验值，因为试验情况下码头前沿产生的是非完全立波。图4为试验值和立波计算值之间的比较。从图4中可以看出，试验值却高于立波计算值，和理论分析的结果相反。笔者认为在试验情况下，尽管作用在结构上的波压强小于立波值，但是单个波峰会同时与多根纵梁作用，造成一个较大的波浪水平力，这一点在下文中会通过纵梁上的压强曲线来验证。

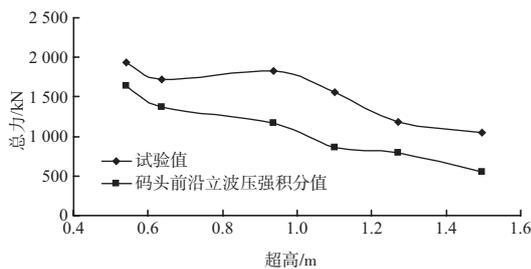


图4 波浪水平力试验值和计算值比较 (T=9.0 s)

### 2.2 纵梁上波浪压强

当波浪传播至码头前沿时，码头前沿先是水面下降，随着波峰的不断逼近，水面迅速上升与码头上部结构发生冲击，波峰高于码头面板的部分水体散落在码头前沿的面板上，在码头面板下部波峰能量不断耗散，但仍然不断向前推进；接着，码头前部水面开始下降，即要发生第二次冲击。图5为规则波作用下码头纵梁迎浪面上波浪压

强随时间变化过程。由图5可见，压强随时间周期性变化，主要表现为一个瞬时冲击部分和一个缓慢变化部分，并且在瞬时变化的最后一部分变为零或者负值。同一种工况规则波作用下，其缓慢变化部分基本相等，但其瞬时冲击峰值却有所差异。

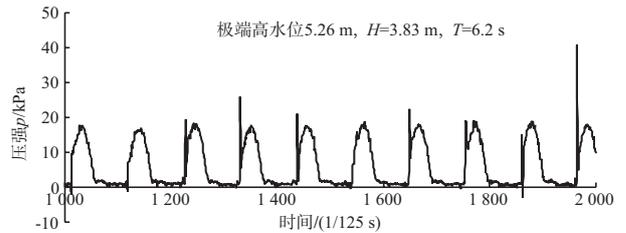


图5 规则波作用下纵梁上压强随时间同步变化过程

从前面的分析可知，单个波峰同时作用的纵梁根数 $n$ 在计算波浪水平力时是个非常关键的因素，纵梁数 $n$ 由波峰和上部结构的作用宽度来决定（图6），作用宽度内的纵梁根数即单个波峰同时作用的纵梁根数 $n$ 。本文仍然采用周益人<sup>[4-5]</sup>提出的计算方法，作用宽度计算公式如下所示：

$$x = \frac{L}{\pi} \arccos \frac{\Delta h}{\eta} \quad (1)$$

式中： $x$ 为波峰与上部结构的作用宽度， $L$ 是波长， $\Delta h$ 为超高， $\eta$ 为最大波峰面上升高度，按2阶斯托克斯波计算。

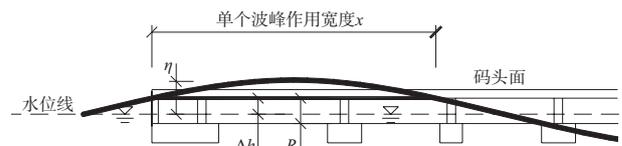


图6 波峰与上部结构作用宽度示意图

图7和8为规则波作用下不同纵梁迎浪面同时刻压强曲线叠合在一起的结果。从图7中可以看出在极端高水位， $T=6.2$  s， $H=3.83$  m波浪作用下，单个波峰同时和1#~3#纵梁作用；从图8中可以看出在极端高水位 $T=9.0$  s， $H=3.3$  m时，一个波峰同时和1#~4#纵梁作用。波峰同时作用的纵梁根数和按式(1)计算出来的纵梁根数相吻合。其它试验波况情况类似。

### 2.3 码头上部结构波浪总水平力

在规则波作用下，波浪水平力时程曲线周期性很好，波形类似于规则波，但波剖面上下不对

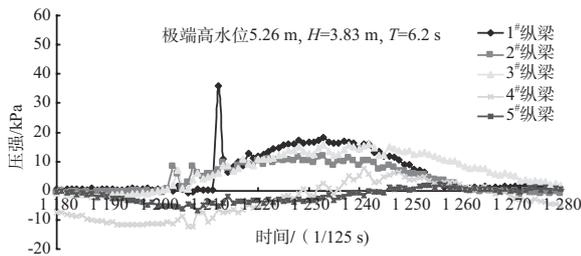


图7 一个波峰同时和3根纵梁作用(规则波)

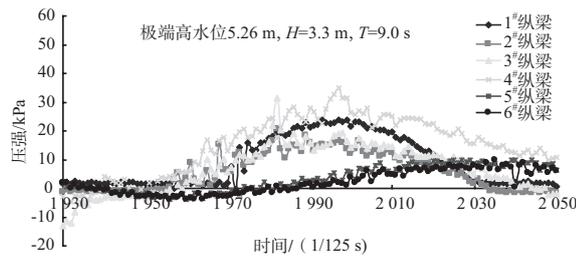


图8 一个波峰同时和4根纵梁作用(规则波)

称。正值大于负值,即沿波浪传播方向的水平力大于和波浪传播方向相反的水平力(图9)。长周期波浪水平力平均值大于短周期波浪水平力平均值。

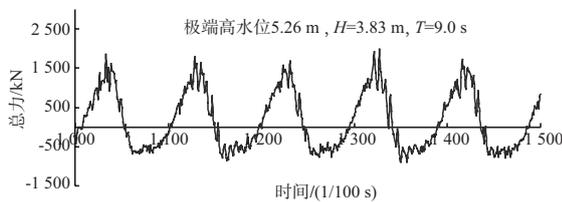


图9 规则波作用下上部结构水平力随时间同步变化过程

由以上分析可知:在规则波作用下,影响上部结构波浪水平力P的主要因素有:波高H,波周期T,纵梁高度R(纵梁底面到面板底面的距离),超高Δh(静水面到面板底面的距离),一个波峰同时作用的纵梁根数n,由式(1)计算得出。应用因次分析的方法可得到如下关系:

$$f\left(\frac{P}{\gamma HR}, \frac{H}{L}, \frac{\Delta h}{H}, n\right) = 0 \quad (2)$$

码头面板是连续的,波浪与码头面板作用也是连续的,所以波浪上托力公式是个连续函数;但纵梁根数n是间断的,这就说明了波浪水平力计算公式是个分段函数。根据试验资料拟合出码头上部结构波浪总水平力包络计算公式如下:

$$\text{当 } \frac{\Delta h}{\eta} \leq 0.5 \text{ 时, } \frac{P}{\gamma HR} = 0.3n \quad (3)$$

当  $0.5 < \frac{\Delta h}{\eta} < 1.2$  时,

$$\frac{P}{\gamma HR} = \left(0.8 \frac{\Delta h}{\eta} - 0.1\right)n \quad (4)$$

当  $\frac{\Delta h}{\eta} \geq 1.2$  时,  $\frac{P}{\gamma HR} = 0.86n \quad (5)$

式中:P是单宽总水平力(kN/m);n是一个波峰同时作用的纵梁根数,波浪上托力分布宽度内的纵梁数即是n,当计算得到的波浪分布宽度大于码头断面宽度时n取纵梁的总数;R是纵梁的高度(m);规则波作用下H按平均波高计算(m)。

当  $\frac{\Delta h}{\eta} \leq 0.5$  时,波浪的冲击强度逐渐减弱,尽管超高在减小,波峰同时作用的纵梁个数在增加,但是纵梁个数增加造成的力增加量小于冲击强度减小造成的力减小量。

当  $0.5 < \frac{\Delta h}{\eta} < 1.0$  时,按式(1)计算n值,当  $1.0 \leq \frac{\Delta h}{\eta} < 1.2$  时,n取1。此时总水平力和单个波峰同时作用的纵梁的根数成线性关系,尽管超高增大时波峰同时作用的纵梁根数减少,但由于波浪的浅水效应,波浪冲击强度变大,冲击强度增大造成的力增大量大于纵梁减少造成的力减小量,总水平力不断增大。当作用宽度大于码头宽度时,波峰同时作用的纵梁根数达到上限,此时上部结构总水平力达到最大值。

当  $\frac{\Delta h}{\eta} \geq 1.2$  时,等式右边n前的系数为0.86,尽管比较大,但总水平力P反而会比较小。此时超高比较大,波浪无法作用到码头面板底部,波浪作用宽度为0,考虑到波浪与桩帽和桩基的作用,笔者认为取n=1,只有在波峰触及不到桩帽时取n=0。图10为包络公式计算值和试验数据的比较。

图11为本次研究提出的高桩码头上部结构总水平力公式计算值与试验值的比较。从图中可以看出在较长周期(T=9.0 s)作用下本文提出的公式计算值和实测值拟合结果较好;但是在短周期(T=6.2 s)作用下公式计算值普遍大于实测值,拟合结果较差,主要是因为文中给出的公式是包络线,偏大实属正常。图中的斜线为45°理想线。总体来说,计算值和实测值拟合结果较好。

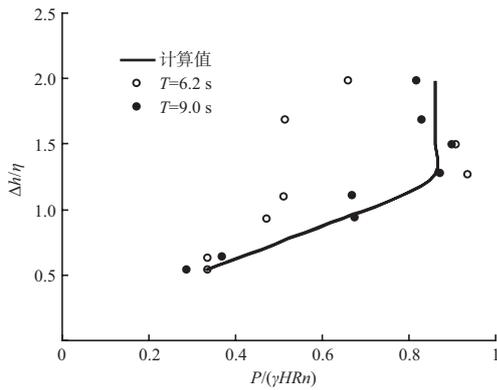


图10 高桩码头上部结构总水平力计算公式与试验结果的比较(规则波)

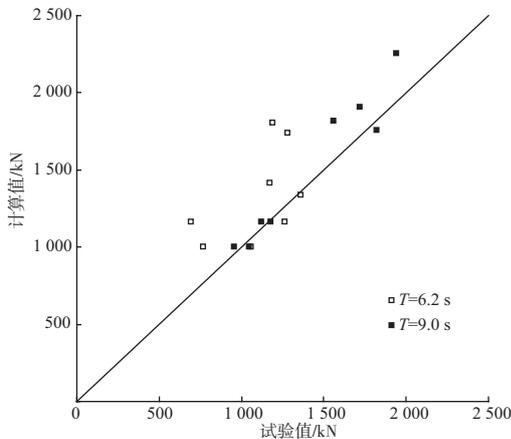


图11 高桩码头上部结构总水平力计算值与实测值的比较(规则波)

### 3 结论

1) 纵梁迎浪面压强随时间周期性变化, 主要表现为一个瞬时冲击部分和一个缓慢变化部分, 并且在瞬时变化的最后一部分变为零或者负值。

2) 影响上部结构波浪水平力 $P$ 的主要因素有: 波高 $H$ , 纵梁高度 $R$ , 超高 $\Delta h$ , 波周期 $T$ , 单个波峰同时作用的纵梁根数 $n$ 。

3) 应用因次分析法拟合出了波浪水平力包络线计算公式, 由于纵梁根数 $n$ 是间断的, 所以总水平力计算公式是个分段函数。

### 参考文献:

- [1] 盛祖荫, 过达. 深水桩基码头波浪力的计算[J]. 华东水利学院, 1984, 27(2): 54-65.
- [2] 杨正己, 贺辉华, 高正荣. 作用在桩基梁板式码头上的波、流力试验 [J]. 水运工程, 1989, 35(9): 15-21.
- [3] 隋华, 王文鼎, 高晨. 挡板透空式码头水平波浪力计算方法的探讨[J]. 海岸工程, 2009, 28(3): 20-26.
- [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, 等. 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] JTJ 213—1998 波浪模型试验规程[S].

( 本文编辑 郭雪珍 )

## · 消 息 ·

### 上航局中标黄骅港综合港区吹填造陆施工工程

日前, 上航局与沧州港务集团有限公司签署黄骅港综合港区一港池南岸线作业区吹填造陆工程施工合同。项目合同额2.38亿元, 工期100日历天。

综合港区以一般散杂货、集装箱和成品油、液体化工品运输为主, 承担临港工业服务、腹地物资中转运输和综合物流服务等功能, 重点建设10万吨级以下的各类深水码头, 形成大型综合性港区。上航局实施的港池南岸线吹填造陆工程, 吹填疏浚土方量1 562万 $m^3$ , 建设吹填隔堰200 m, 子堰6 676 m。

该工程位于黄骅港综合运输核心港区, 是黄骅港下一阶段发展的核心工程。该项目的顺利实施对优化黄骅港港口布局、实现可持续发展具有重要推动作用。

摘编自《中国交通建设网》