

波浪作用下趸船对高桩码头的受力影响

张金刚¹, 冯卫兵¹, 琚烈红², 汤本靖¹

(1. 河海大学, 江苏南京 210098; 2. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210024)

摘要: 在以往研究成果的基础上, 通过对不同水位波浪作用下码头前无趸船、有趸船但不与码头连接和有趸船并采用引桥连接3种布置方案进行物理模型试验, 测量了码头受到的水平力和上托力, 分析了3种布置方案趸船对码头受力的不同影响。试验结果表明: 趸船和引桥的传递作用会使码头受到的水平力增大, 趸船对波浪的阻碍作用会使码头受到的上托力减小。

关键词: 趸船; 高桩码头; 波浪水平力; 波浪上托力

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0047-05

Influence of pontoon on high-piled wharf under wave force

ZHANG Jin-gang¹, FENG Wei-bing¹, JU Lie-hong², TANG Ben-jing¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: When designing a high-piled wharf with pontoon, we need to take the influence of pontoon into account, but there is little research on this project. Based on that, we conduct the model experiment under combined conditions of different water stages and same wave parameters. The model experiment includes three projects, i.e. without pontoon, only pontoon, and pontoon with steel approach bridges in front of the wharf. According to the model experiment we obtain the horizontal wave force and the uplift wave force of three experimental schemes and analyze the effect of pontoon. The experimental results show that the transmission effects of pontoon and approach bridges increase the horizontal wave force to wharf and the blocking effects of pontoon to wharf decrease the uplift wave force to wharf.

Key words: pontoon; high-piled wharf; horizontal wave force; uplift wave force

高桩码头是一种广泛应用于港口工程的结构形式, 当码头所在工程区域潮差较大时, 码头前方通常设有趸船浮码头供旅客往返出行或船舶停靠, 并设有引桥连接码头主体和趸船。类似码头形式在国内港口工程中应用众多, 例如厦门BRT轮渡码头工程、张家港福北基地趸船码头工程、南通青龙港海事趸船浮码头工程等。

高桩码头的大型实体部分通常置于静水面以上, 在设计时往往预留一定的高度以避免波浪对码头面板的作用, 但是在水位较高或者波浪较大时其下部常遭受波浪的冲击, 使得面板造成整体

破坏或者局部损坏。因此波浪作用成为高桩码头结构设计的主要荷载, 波浪荷载的计算也一直是国内外学者研究的重要课题。目前, 关于水工建筑物构件波浪作用水平力的计算中, 《海港水文规范》^[1]对直墙式和斜坡式建筑物有明确的计算公式, 但还没有成熟的方法来计算波浪作用对高桩码头上部结构的水平力。而关于波浪上托力的研究国内外许多学者^[2-5]早已提出了各自的理论及得到的相关公式, 但是由于影响波浪上托力的因素非常复杂, 板下纵横梁系统、桩帽和桩基都会对波浪形态和空气层状况产生较大的影响, 因此各家

收稿日期: 2013-04-10

作者简介: 张金刚(1988—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程研究。

公式都有一定的局限性，计算结果也相差较大，往往通过物理模型试验来确定设计标准。

当高桩码头前设有趸船时，一般引桥与码头和趸船的连接均为铰接，由于沿海地区潮差较大，固定趸船的锚链一般抛设较长，所以趸船大多是有一定运动自由度的浮式结构。这使得趸船、钢引桥和码头这一结构系统在波浪作用下的运动和动力反应比较复杂：码头前方的趸船对波浪会有一些的阻碍作用，同时趸船运动的造波效果也会影响后方波浪场的分布；另一方面，趸船在波浪作用下的运动又有可能对钢引桥支座反力及后方码头平台受力产生影响。张芹等^[6]通过试验研究了趸船在波浪和水流作用下的变位对钢引桥受力的影响，但是总体上目前对于码头、引桥和趸船这一结构系统所做的理论和试验研究还较少，因此通过系统的物理模型试验研究在波浪作用下趸船运动对高桩码头受到的水平力和上托力的影响是很有必要的，相关研究成果可以为有趸船的高桩码头设计提供依据。

1 物理模型试验

1.1 基础资料

1.1.1 试验水位及波浪要素

试验水位及波浪要素见表1。

表1 试验水位及波浪要素

水位/m	$H_{13\%}/m$	T/s	L/m
极端高水位7.43	1.58	5.0	36.8
补充水位一6.70	1.58	5.0	36.4
设计高水位6.16	1.58	5.0	36.0
补充水位二5.50	1.58	5.0	35.4
补充水位三5.20	1.58	5.0	35.1
补充水位四4.90	1.58	5.0	34.8

通常随着水位的升高，波浪上托力及水平力先增大后减小，所以取极端高水位和设计高水位的中间水位6.7 m为补充水位一。由波浪上托力的相关研究可知，最大上托力通常发生在超高为零或者有一定超高的情况下，所以取补充水位二5.5 m超高为零，补充水位三5.2 m和补充水位四4.9 m分别有一定超高。

1.1.2 码头结构及尺寸

试验码头布置见图1，码头有1座150 m×20 m轮渡码头平台，平台前方为8个15 m×8 m窄墩台和1个30 m×8 m宽墩台，趸船通过2座92 m×21 m人行引桥与已建岸线相连。码头平台和人行引桥顶高程为7.50 m，码头平台面板厚40 cm，墩台C高1.6 m，其余墩台高2 m。码头平台前沿布置2座浮趸码头（包括2座60 m×15 m趸船，8座25 m×5 m钢引桥），趸船高2.6 m，吃水1.5 m。

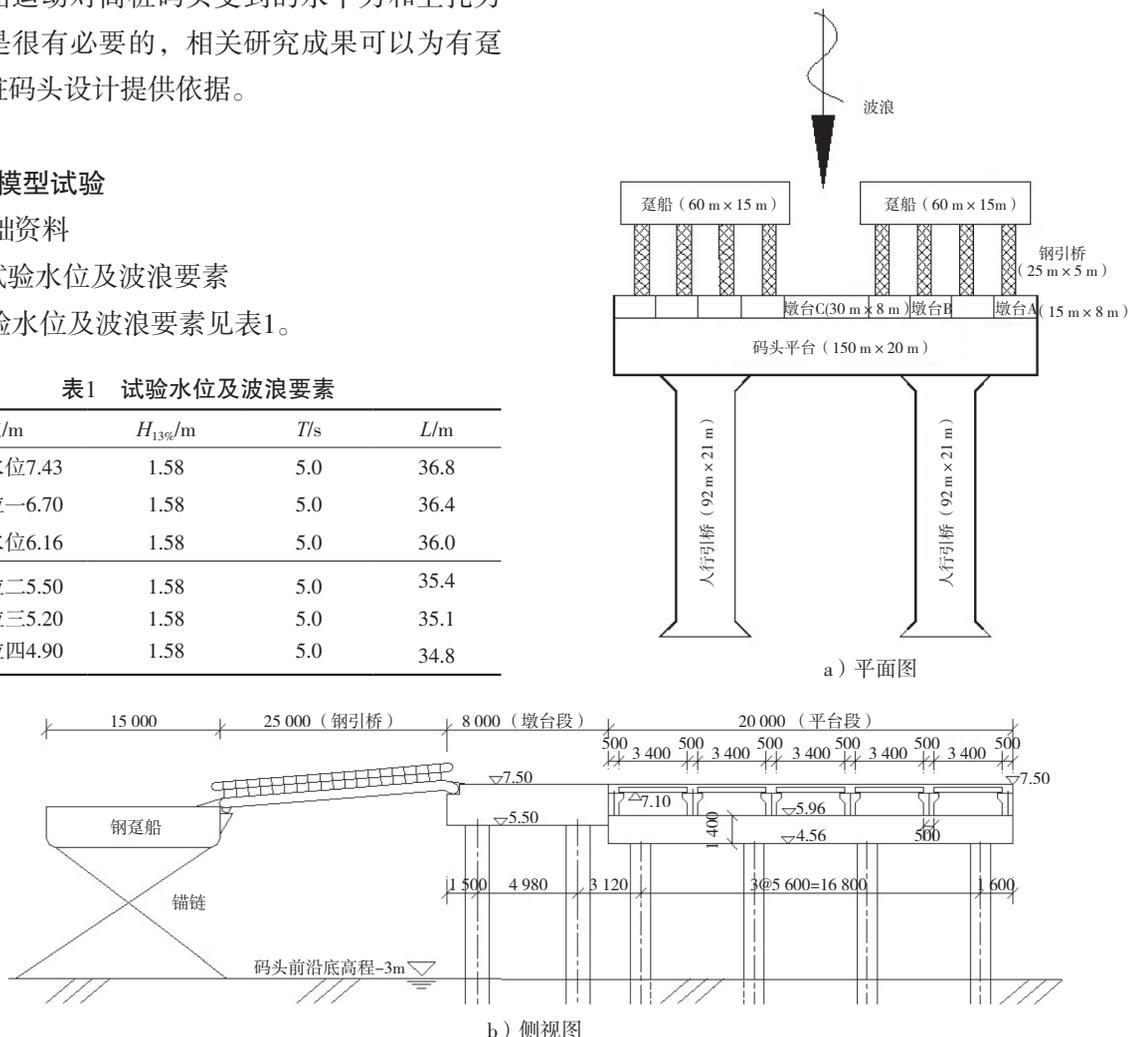
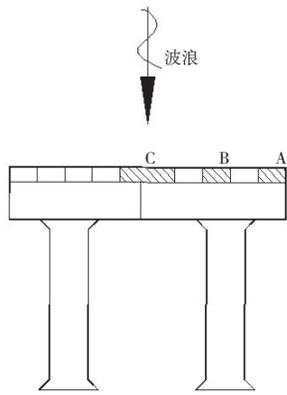


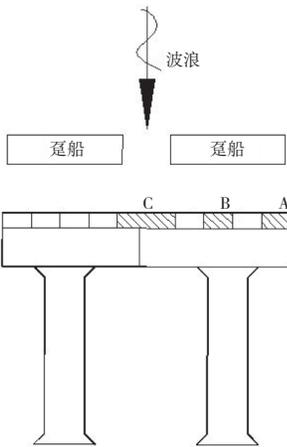
图1 码头布置及尺寸

1.2 模型设计和试验方法

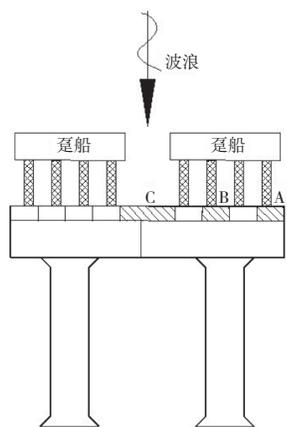
试验在南京水利科学研究院河港研究所波浪港池中进行, 按照《波浪模型试验规程》^[7]的规定, 模型比尺取为1:30。试验模型布置包括3种方案(图2): 码头前方没有趸船; 码头前方有趸船但是无钢引桥连接; 码头前方有趸船并且趸船与码头通过钢引桥连接。图中阴影部分A,B,C为有总



a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3

图2 试验模型布置方案

力传感器布置的墩台模块, 每种方案都按照表1中的试验条件进行, 利用总力传感器测出墩台模块结构在波浪作用下所受的水平力和上托力。

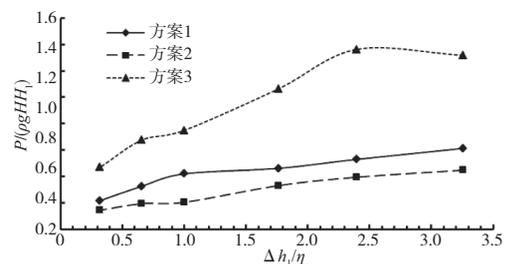
2 试验结果及分析

对于3种试验方案, 分析其受力, 有以下特点: 1) 码头前方没有趸船, 波浪将直接作用于码头结构上, 此时码头结构所受的力反映了波浪作用的大小; 2) 码头前方有趸船但是没有钢引桥连接, 作用于码头上的波浪受到趸船的阻碍作用会有所减小, 但同时趸船运动的造波作用也有可能引起局部波高增大, 此时码头结构所受的力反映了趸船阻碍作用和趸船造波作用的强弱; 3) 码头前方有趸船且趸船与码头通过钢引桥连接, 波浪受到趸船的阻碍作用, 并且钢引桥的存在限制了趸船的造波作用, 但由于钢引桥的连接使得趸船的受力会传递到码头, 此时码头结构所受的力反映了波浪作用、趸船阻碍作用和趸船动力作用的强弱。下面就不同方案的水平力和上托力试验结果进行具体分析。

2.1 水平力试验结果及分析

图3为A,B,C相对水平力与相对入水深度的关系。图中横坐标为相对入水深度 $\Delta h_1/\eta$, 纵坐标为相对水平力 $P/(\rho g H H_1)$ 。其中: P 为板上单位长度总水平力(kN/m), 该单位长度的方向与波浪入射方向相垂直; ρ 为水的密度, 通常取 0.98 t/m^3 ; H 为入射波波高; H_1 为水平板厚度 (A, B厚度2 m, C厚度1.6 m); Δh_1 为入水深度=静水面高程-水平板底高程+ η ; η 为波面距静水面的最大高度, 由二阶 Stocks 波理论算得:

$$\eta = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{2L} \left[\frac{\text{ch} \frac{2\pi d}{L} (\text{ch} \frac{4\pi d}{L} + 2)}{4 (\text{sh} \frac{2\pi d}{L})^3} \right] \quad (1)$$



a) A模块

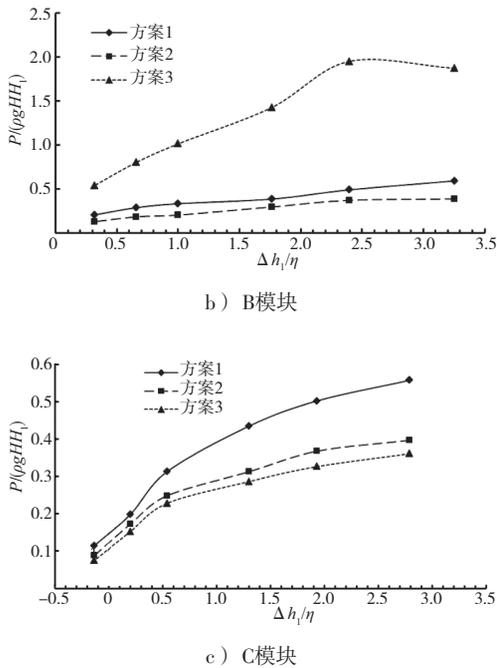


图3 相对水平力与相对入水深度的关系

由图3可知，A、B模块在方案3情况下水平力最大，方案1次之，方案2力最小。因为趸船对波浪具有阻碍作用，所以仅有趸船时A、B模块所受到的水平力要比无趸船时小。又因为A、B模块与钢引桥直接连接，趸船和引桥的动力作用大于趸船对波浪的阻碍作用，所以有钢引桥趸船时A、B模块所受到的水平力要比无趸船时大。在方案1和方案2情况下，A、B模块水平力的最大值发生在 $\Delta h_1/\eta=3.25$ （极端高水位7.43 m），而在方案3情况下最大水平力发生在 $\Delta h_1/\eta=2.39$ （补充水位-6.7 m）。A模块方案2的水平力约是方案1的0.5~0.75倍，B模块约是0.6~0.75倍，可见未通过引桥与码头连接的趸船对波浪的阻碍作用明显，水平力减小。A模块方案3的水平力约是方案1的1.8~2.6倍，B模块约是2.6~3.9倍，可见引桥的传递作用使A、B模块水平力明显增大。A模块和B模块都与钢引桥直接连接，之所以钢引桥传递的动力作用不同是因为从图2中可以看出A和B所连接的钢引桥并非对称，所以传递的动力作用也不相同，这也更加反映了趸船、引桥和码头系统结构受力的复杂性。

C模块方案1水平力最大，方案2次之，方案3最小。C模块方案2的水平力约是方案1的0.7~0.87倍，方案3约是方案1的0.65~0.77倍。C模块与A、B模块

的受力情况不同，是因为C模块本身不与钢引桥连接不会受到钢引桥传递的动力的作用，此时趸船对波浪的阻碍起主要作用，所以无趸船时力最大。又因为有钢引桥时趸船的运动受到限制，此时趸船的造波作用更小，阻碍作用更大，所以有引桥时力最小。

2.2 上托力试验结果及分析

图4为相对上托力与相对超高的关系。图中纵坐标为相对超高 $\Delta h/\eta$ ，横坐标为相对上托力 $P/\rho g H_x$ 。其中： P 为板上单位长度总上托力(kN/m)，该单位长度的方向与波浪入射方向相垂直； x 波浪作用于面板上的宽度，见式（2），如果 x 大于 B 则采用 B 代入， B 为码头面板沿波浪传播方向的长度； Δh 为码头面板底部距静水面的高度；其余符号所代表的物理意义和前述公式中所代表的物理意义一致。

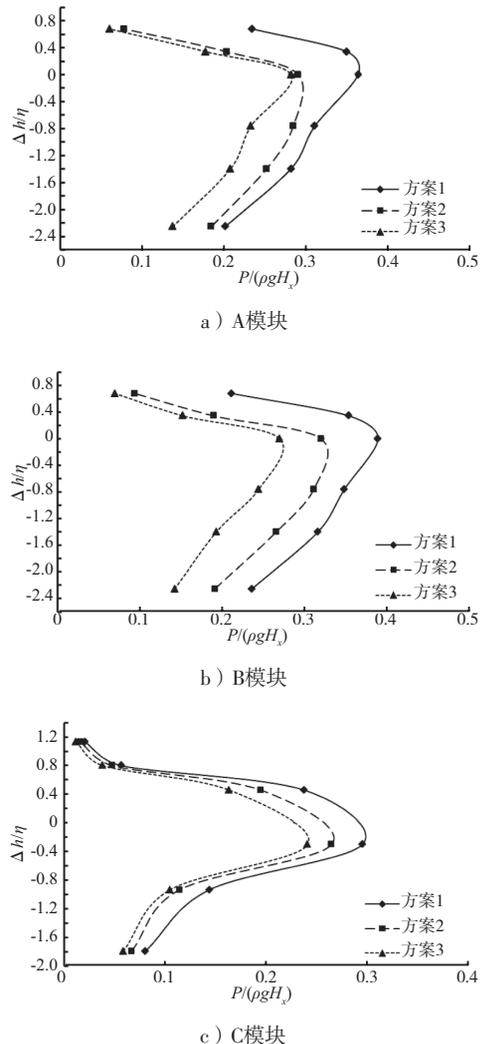


图4 相对上托力与相对超高的关系

$$x = \frac{L}{\pi} \arccos \frac{\Delta h}{\eta} \quad (2)$$

由图4可见, A、B模块所受的相对上托力在方案1时最大, 方案2次之, 方案3最小。这是因为无趸船时波浪直接作用于码头结构上, 而在仅有趸船时趸船对波浪的阻碍作用大于趸船在波浪作用下的造波作用, 所以无趸船时A、B所受的相对上托力大于有趸船时的受力。引桥随水位变化产生的坡度较小, 并且引桥与码头和趸船的连接均为水平铰接, 所以引桥作用于码头的垂直分力较小, 又由于钢引桥的存在限制了趸船的运动效果使得趸船的阻碍作用更加明显, 所以有引桥时力最小。方案3和方案1相对上托力比较(方案3/方案1): 在 $\Delta h/\eta < 0$ 时, A约为0.25~0.5, B约为0.33~0.43; 在 $\Delta h/\eta > 0$ 时, A约为0.68~0.77, B约为0.6~0.7。可见趸船对A、B模块的遮挡作用在低水位时更大, 由有关浮式防波堤的挡浪效果理论^[8]可知在趸船吃水相同的情况下, 水深越低挡浪效果越好。

C模块在方案1情况下相对上托力最大, 方案2次之, 方案3最小。由于引桥随水位变化产生的坡度较小, 引桥作用于码头的垂直分力较小, 对A、B相对上托力的影响也较小, 所以尽管C模块没有和钢引桥直接相连, 但是C与A、B的相对上托力关系是一致的。区别在于C模块相对上托力的最大值发生在相对超高 $\Delta h/\eta = -0.3$, 水位6.16 m, 而A、B模块发生在相对超高 $\Delta h/\eta = 0$, 水位5.5 m。这是因为C模块与A、B模块厚度不同导致底高程不同, 由高桩码头上部结构波浪相对上托力的计算理论可知波浪相对上托力的最大值通常发生在临界相对超高($\Delta h/\eta = 0$)附近。C模块方案3相对上托力约是方案1的0.7~0.8, 因为C模块位于两个趸船中间, 被遮挡的部分较小为16%, 趸船对C模块的阻碍作用明显小于A、B模块。

3 结语

1) 与码头前未设置趸船相比, 在设置趸船但不与码头连接时, 趸船对码头有一定的挡浪作

用, 但自身运动的造波作用削弱了其挡浪效果; 在设置趸船且采用钢引桥与码头连接时, 趸船亦有挡浪作用、造波作用, 同时引桥会传递趸船对码头的动力作用。

2) 码头前设有趸船但未通过引桥与码头连接时, 趸船主要起阻碍波浪的作用, 使A、B水平力和上托力都相应减小, 且水位越低挡浪效果越明显, 但对于位于两趸船中间被遮挡的部分较小的C模块则影响较小。

3) 码头前设有趸船并采用引桥与码头连接时, 码头所受的水平力会增大, 上托力会减小, 有钢引桥和趸船时A、B模块最大水平力分别增大了110%和210%, 最大上托力分别减小了25%和30%, 对于不与引桥相连的C则影响较小。趸船和引桥对于码头结构受力的影响非常复杂而且对于局部受力影响很大, 在实际码头设计过程, 对于码头前有趸船、引桥系统的工程结构, 建议采用物理模型试验测量码头结构所受的波浪荷载以确定合理的设计标准。

参考文献:

- [1] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [2] 合田良实. 构造物に動く波力[G]// 1967年度水工学に関する夏期研修会议义集. 东京: 海岸港湾コース, 1967.
- [3] 过达, 蔡保华. 透空式建筑物面板上波浪上托力的计算[J]. 河海大学学报, 1980(1): 14-33.
- [4] 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.
- [5] 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(1): 72-78.
- [6] 张芹, 戴冠英, 陈忠华. 趸船在波浪和水流作用下的变化对钢引桥受力的影响[R]. 南京: 南京水利科学研究院材料结构研究所, 1988.
- [7] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [8] 季大润, 李浙江, 应志峰. 浮式防波堤发展概况[J]. 浙江交通科技, 2006(2): 55-57.

(本文编辑 武亚庆)