



正向浪作用下离岸高桩墩台结构 波浪总浮托力计算

宋军营, 卢海斌

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 波浪总浮托力是离岸高桩墩台结构设计时需要注意的重要外荷载之一。根据具体工程实例计算结果和试验结果的对比, 分析正向波浪作用下离岸高桩墩台结构波浪总浮托力不同计算公式的适用性, 研究工程实际计算波浪总浮托力需要注意的条件, 并提出建议。

关键词: 正向浪; 离岸高桩墩台; 波浪总浮托力

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0094-04

Calculation of total wave uplift force on offshore high-piled pier structure under forward waves

SONG Jun-ying, LU Hai-bin

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The total wave uplift force is an important external load in offshore high-piled pier structure designing. According to the comparison between the calculation result and the experimental result, this paper analyses the applicability of different formula about calculation of the total wave uplift force upon the offshore high-piled pier structure, researches the conditions needing attention in practical calculation, and puts forward corresponding suggestions.

Key words: forward waves; offshore high-piled pier; total wave uplift force

我国港口建设越来越向外海深水发展。对于离岸开敞式高桩墩式码头而言, 外海波浪是高桩墩台结构设计中需要考虑的重要因素。波浪对墩台的浮托力和水平力, 不仅影响到墩台高程的确定, 也影响到墩台桩基的选型和布置。墩台高程较低, 底部将承受一定的波浪力作用; 墩台高程提高, 又可能会影响到码头使用和工程造价增加。在一些工程中, 波浪荷载为墩台桩基上拔力控制荷载, 在这种情况下, 为确保墩台结构安全性、耐久性和造价合理, 结构设计应建立在对波浪总浮托力正确计算的基础上。

波浪对高桩码头上部结构浮托力的计算方法, 国内外很多学者做了大量的研究工作, 提出

了一些经验公式, 其计算结果有时差别较大^[1]。对于广大工程设计人员而言, 为确保工程安全, 国家或行业正式颁布的标准、规范中的计算理论和方法才能作为工程设计时的依据。并且在实际工程设计中, 不可能每个项目都进行波浪物理模型试验去验证计算结果, 规范、手册的公式更显得尤为重要。本文对水运行业标准、规范、设计手册中有关波浪对高桩墩台上部结构浮托力规定的计算方法进行研究、分析, 并结合某工程实例所进行的波浪物理模型试验结论, 对有关计算方法和计算公式的适用性和参数取值进行探讨。

1 波浪对高桩墩台上部结构浮托力的计算公式

目前规范中无针对高桩墩台结构波浪总浮托

收稿日期: 2013-05-31

作者简介: 宋军营(1985—), 男, 工程师, 从事港口、航道工程设计与研究咨询工作。

力的计算公式, 在计算中参照波浪对高桩码头上部面板结构的计算公式。

1.1 《海港码头设计手册》计算方法^[2]

作用在高桩码头梁板上的波浪侧压力, 分为静水压力和动水压力两部分(图1), 静水压力在波面上为零, 在静水面上为:

$$p_s = \rho g \eta \tag{1}$$

静水面以下 p_s 可认为不变。

动水压力:

$$p_d = 1.7 \frac{\rho g}{2g} u^2 \tag{2}$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi(d-z)}{h}}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \cos \frac{2\pi x}{L} \tag{3}$$

式中: u 为水质点轨道运动的水平分速度(m/s)。

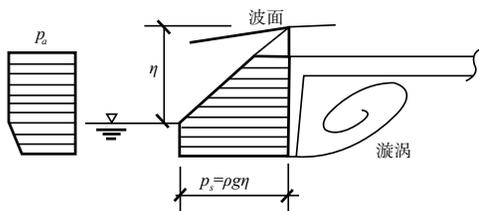


图1 静水压力与动水压力计算图示

根据在梁板侧面与底面相交处波浪侧压力和浮托力相等的原则, 波浪对底面的浮托力即为侧面静水压力和动水压力之和。底部总浮托力最大时底部按照均布压强计算, 由此得到波浪对上部结构底面的总浮托力。

1.2 《海港工程设计手册(中册)》计算方法^[3]

因码头上部结构的存在, 波面在静水面以上的高度被压制为 h_i , 作用在上部结构底面上的浮托力 p 按下式计算:

$$p = \beta \rho g (\eta - h_i) \tag{4}$$

$$\eta = \frac{H}{z} \cos(kx) + \frac{\pi H^2}{2L} f\left(\frac{d}{L}\right) \cos(2kx) \tag{5}$$

式中: η 为波峰面在静水面以上的高度, 按照二阶Stocks波理论计算; β 为压力反力系数, 当上部结构宽度约为10 m以下时, 可取 $\beta=1.5$, 当上部结构宽度较大时, 可取 $\beta=2.0$ 。

1.3 《JTS 145-2—2013海港水文规范》计算方法^[4]

JTS 145-2—2013《海港水文规范》^[4]8.5条

“离岸式高桩码头面板底部波浪浮托力”, 给出了正向规则波、不规则波作用下高桩码头面板底部波浪最大总浮托力的计算方法。

以上3种计算方法是目前水运工程设计领域作为标准或设计手册正式公布的, 可作为设计依据。

2 某工程案例设计计算结果

2.1 工程概况

某港口工程建设30万吨级原油泊位和10万吨级成品油泊位各1个。30万吨级原油泊位与10万吨级成品油泊位均为离岸开敞式泊位, 呈“蝶”型布置, 各由1个工作平台、2个靠船墩和6个系缆墩组成。30万吨级原油码头长度为460 m, 码头面顶高程为8.5 m(以当地理论最低潮面为基准, 下同), 码头前沿底高程-24.2 m; 靠船墩顶高程为7.5 m; 系缆墩顶高程为6.5 m, 平面尺寸为13 m×13 m; 采用高桩墩台结构, 墩台厚度为2.5 m。10万吨级成品油码头长度为320 m, 码头面高程为7.5 m, 码头前沿水深-16.1 m; 靠船墩顶高程为7.5 m, 平面尺寸为16 m×22 m, 其中沿波浪传播方向宽度为16 m。墩台厚度为2.5 m; 系缆墩顶高程为7.5 m。

2.2 设计条件

工程位置极端高水位、设计高水位、设计低水位、极端低水位分别为6.36, 3.96, 0.47, -0.43 m。30万吨级原油泊位和10万吨级成品油泊位码头前沿设计波要素见表1, N向为码头强浪向方向, 属于正向浪。

表1 码头前沿设计波要素(N向)

泊位	水位/m	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	\bar{T}/s	L/m
30万吨级原油泊位	极端高水位6.36	4.5	3.9	3.7	3.1	6.5	65
	设计特定水位5.0	4.3	3.6	3.4	2.9	6.3	62
	设计高水位3.96	4.1	3.4	3.2	2.7	6.2	59
	设计特定水位3.0	3.8	3.1	3.0	2.5	6.0	55
10万吨级成品油泊位	极端高水位6.36	4.0	3.6	3.3	2.8	6.5	58
	设计特定水位5.0	3.9	3.5	3.3	2.7	6.4	56
	设计高水位3.96	3.7	3.3	3.1	2.6	6.2	53
	设计特定水位3.0	3.5	3.1	2.9	2.4	6.0	50

2.3 计算结果

30万吨级原油泊位和10万吨级成品油泊位靠船墩、系缆墩底部均承受波浪浮托力的作用，墩台桩基的布置需建立在对波浪浮托力准确计算的基础上。本工程对具有代表性的30万吨级原油泊位系缆墩和10万吨级成品油泊位靠船墩开展了波浪物理模型试验。为方便对比，本文仅列出以上两个墩台波浪浮托力的计算结果。按照上述3种计算方法，对墩台底部浮托力分别进行计算，结果见表2。

表2 系缆墩波浪最大总浮托力计算结果 kN

泊位	水位/m	《海港码头设计手册》	《海港工程设计手册》(中册)	JTS 145-2-2013	
				规则波	不规则波
	极端高水位6.36	4 598	7 573	903	1 007
30万吨级原油泊位	设计特定水位5.0	4 839	7 247	2 257	2 893
	设计高水位3.96	5 047	6 779	3 550	4 852
	设计特定水位3.0	4 249	6 386	3 924	5 495
	极端高水位6.36	7 845	13 975	2 836	4 101
10万吨级成品油泊位	设计特定水位5.0	9 024	17 429	6 201	8 464
	设计高水位3.96	8 573	10 459	7 147	9 850
	设计特定水位3.0	8 117	0	1 466	2 203

注： h_i 和 Δh 为面板底部在静水面以上的高度，根据经验， h_i 为负值取0， Δh 可取负值；30万吨级原油泊位设计高水位时 h_i 和 Δh 为正值；10万吨级成品油泊位设计特定水位时 h_i 和 Δh 为0。

墩台波浪最大总浮托力应计算设计水位范围内可能出现的最大值，找准设计水位是关键。结合物理模型试验成果，本工程计算时选取模型试验4种水位情况。

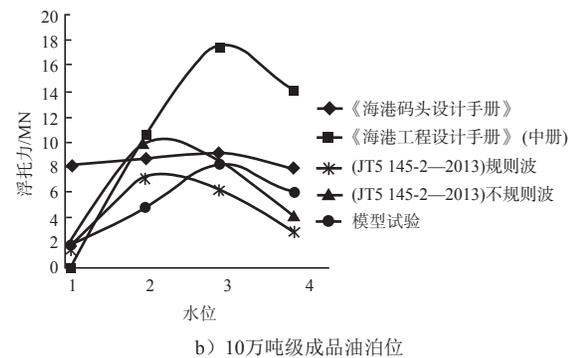
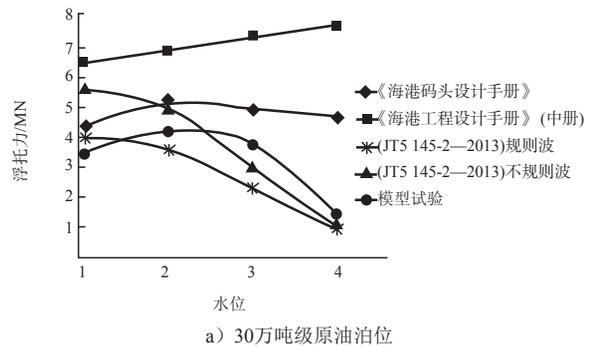
3 波浪物理模型试验结论^[5]

根据波浪试验规程的要求，南京水利科学研究院对该项目30万吨级原油泊位系缆墩和10万吨级成品油泊位靠船墩开展了波浪物理模型试验，物理模型试验采用的波浪资料与上述计算时的波浪资料相同。波浪对墩台底部最大总浮托力的试验结果见表3。

表3 墩台底部波浪最大总浮托力物理模型试验结果 kN

水位/m	30万吨级原油泊位系缆墩	10万吨级成品油泊位靠船墩
极端高水位6.36	1 341	6 007
设计特定水位5.0	3 705	8 216
设计高水位3.96	4 102	4 799
设计特定水位3.0	3 419	1 760

30万吨级原油泊位系缆墩顶高程为6.5 m，底面高程为4.0 m，在设计特定水位2（3.0 m）、设计高水位（3.96 m）、设计特定水位1（5.0 m）、极端高水位（6.36 m）50 a一遇波浪作用下，系缆墩墩台波浪总浮托力总体变化趋势是：先随水位上升不断增大，在设计高水位（3.96 m）最大，然后随水位上升不断减小。10万吨级成品油泊位靠船墩顶高程为7.5 m，底面高程为5.0 m，在设计特定水位2（3.0 m）、设计高水位（3.96 m）、设计特定水位1（5.0 m）、极端高水位（6.36 m）50 a一遇波浪作用下，靠船墩墩台波浪总浮托力总体变化趋势是：先随水位上升不断增大，在设计特定水位1（5.0 m）最大，然后随水位上升不断减小。见图2。



注：横轴1~4分别对应的水位为：设计特定水位2（3.0 m）、设计高水位（3.96 m）、设计特定水位1（5.0 m）、极端高水位（6.36 m）。

图2 靠船墩不同水位浮托力比较（N向）

4 结果分析

1) 《海港工程设计手册》(中册)^[3]计算公式得到的波浪总浮托力最大。即便 h_i 为负值时取0, 仍严重高于试验结论。 β 值为经验值, 与多种因素有关, 准确确定比较困难。因此该公式不宜作为高桩墩台结构的波浪总浮托力计算的依据。

2) 《海港码头设计手册》^[2]的计算方法, 30万吨级原油泊位系缆墩最不利水位为设计高水位, 10万吨级成品油泊位靠船墩最不利水位为特定水位5.0 m, 在最不利水位下最大波浪总浮托力与试验结果较为接近, 前者较试验值大23%, 后者较试验值大10%。但在其它水位下, 特别是极端高水位时, 计算结果严重大于试验值。

3) 《海港水文规范》^[4]中的计算方法, 按不规则波计算, 波浪总浮托力计算结果与试验结果较为接近, 但对应的最不利水位不同。30万吨级原油泊位系缆墩在最不利水位下的波浪总浮托力计算结果较试验结果大34%, 前者对应最不利水位为设计特定水位3.0 m, 后者为设计高水位; 10万吨级成品油泊位靠船墩波浪总浮托力较试验结果大19%, 前者对应最不利水位为设计高水位, 后者为设计特定水位5.0 m。

4) 波浪对高桩码头上部结构底部浮托力计算时, 相对超高 Δh 对计算结果非常敏感。一些研究认为要特别注意 $\Delta h/\eta=0.3$ 附近^[6], 《海港水文规范》^[4]认为 $\Delta h/\eta=0.4\sim 0.6$ 附近出现最大总浮托力。根据《海港水文规范》^[4]中的计算公式和上述计算结果, 30万吨级原油泊位系缆墩、10万吨级成品油泊位靠船墩波浪总浮托力出现最大值时, $\Delta h/\eta$ 分别为0.44和0.51; 二者试验结果波浪总浮托力出现最大值时, $\Delta h/\eta$ 分别为0.02和0。因此在实际工程计算时, 由于不可能每个工程都进行波浪物理模型试验验证计算结果, 笔者建议 $\Delta h/\eta$ 在0~0.6, 均需注意波浪总浮托力的计算。

5) 《海港水文规范》^[4]中的计算公式需要满足的条件之一为 $-0.5 \leq \Delta h/c\eta \leq 1.0$, 可以看出 Δh 可以取负值。通过上述计算验证, 在极端高水位

时, Δh 为负值, 30万吨级原油泊位系缆墩、10万吨级成品油泊位靠船墩波浪总浮托力计算结果较试验结果偏小。对于 $\Delta h/c\eta < -0.5$ 的情况, 建议 Δh 取 $-0.5c\eta$ 。

6) 《海港水文规范》^[4]中有规则波与不规则波两种计算公式, 但规则波的计算结果偏小。实际工程中波浪为不规则波, 建议按照不规则波的公式计算。

5 结语

1) 在实际工程计算时, 对于波浪对离岸高桩墩台上部结构的波浪总浮托力, 可以按照《海港水文规范》^[4]中的不规则波的计算公式进行计算; 《海港工程设计手册》(中册)^[3]计算公式不宜作为波浪对离岸高桩墩台上部结构的波浪总浮托力的依据; 《海港码头设计手册》^[2]的计算方法, 最不利水位时的计算结果较试验结果略大, 必要时也可以作为校核波浪总浮托力大小计算是否合理的参考。

2) 《海港水文规范》^[4]中的计算公式, 特别需注意相对超高 Δh 的取值, 实际工程计算时, 需注意 $\Delta h/\eta$ 在0~0.6的波浪总浮托力计算。

参考文献:

- [1] 施斌. 离岸透空式结构波浪上托力计算方法的探讨[J]. 水运工程, 2005(11): 20-28.
- [2] 交通部第一航务工程局设计研究院. 海港码头设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1975.
- [3] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册(中册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [4] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [5] 南京水利科学研究院. 中科合资广东炼化一体化项目码头工程波浪力物理模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013.
- [6] 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.