



高桩码头设计中波浪力计算方法的探讨

王 恺

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 透空式高桩码头上部结构与波浪相互作用的问题非常复杂, 现行规范找不到计算依据。在无规范依据情况下, 高桩码头设计时一般采用《海港码头结构设计手册》中进行波对码头上部结构作用力公式进行计算。根据设计手册相关公式, 提出了采用AutoCAD制图软件绘制理论波面的图形计算方法。并通过在AutoCAD中调整波面与码头结构断面相对位置, 分工况计算了某工程实例, 供工程设计时参考。

关键词: 高桩码头; AutoCAD; 波面线; 波浪力; 排架计算

中图分类号: U 652.7⁴

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0138-05

Calculation method of wave force in design of high-pile wharf

WANG Kai

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The interaction between wave and superstructure is very complicated, and there is no calculation basis in the current design codes. In this case, when the high-pile wharf is designed, the formula of wave force to the high-pile wharf superstructure, which is in the Handbook for Design of Sea Harbour Structure, is usually adopt. According to the handbook formula, this paper proposes to adopt the graphical calculation method of using AutoCAD to draw the theoretical wave surface. By adjusting the relative position between wave surface and wharf structure across-section, an engineering example is calculated in different working conditions, to serve as reference for the engineering design.

Key words: high-pile wharf; AutoCAD; wave surface; wave force; bent frame calculation

为避免受波浪力的作用, 一般要求透空式高桩码头的上部结构要高出高水位时设计波浪的波峰顶点以上^[1], 但受客观条件限制, 有时只能布置在波峰面以下。由于上部结构与波浪相互作用的问题非常复杂, 目前, 《海港水文规范》仅对直墙式、斜坡式建筑物以及透空式高桩梁板码头的基桩和墩柱结构有明确的计算公式, 但对透空式高桩梁板码头上部结构所受的波浪水平力和波浪上托力并没有明确规定。在无规范依据情况下, 高桩码头设计时一般采用《海港码头结构设计手册》(简称设计手册)中进行波对码头上部结构作用力公式进行计算。根据设计手册相关公式,

本文提出了采用AutoCAD制图软件绘制理论波面的图形计算方法。并针对某实际工程, 通过在AutoCAD中调整波面与码头结构断面相对位置, 分别计算了波峰顶点作用在排架端部、中部及后部的3种工况。供工程设计时参考。

1 波浪力计算公式

1.1 波浪对桩基和墩柱建筑物的作用

对于桩基、墩柱等构件, 现行的《海港水文规范》中已有规定, 本文不作赘述。

1.2 波浪对梁板的上托力及码头面下梁上的侧压力

1) 作用在码头梁板上的波浪上托力计算公式。

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 王恺(1983—), 男, 工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

根据设计手册，波浪上托力公式为

$$p = \beta \rho g (\eta - h_i) \quad (1)$$

式中： p 为波浪上托力（ kN/m^2 ）； β 为压力反应系数，当码头宽度在10 m以下、码头面与岸坡不连接时， β 可取1.5，当码头宽度较大或者码头面与岸坡相连时， β 可取2.0； ρ 为水的密度（ t/m^3 ）； h_i 为静水面至梁板底的高度（m）； η 为静水面至波面的高度（m），可按斯托克斯波理论的二阶波面方程计算^[2]：

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

式中： H 为波高（m）； L 为波长（m）； d 为水深（m）； x 为波面点至波峰顶点的水平距离。

由于波面是一条变化的曲线，因此计算单位宽度梁板底部的波浪总上托力时，不宜直接用波峰顶点处的最大压强乘以梁板的底面积，理论上应通过积分的计算方法求出波浪总上托力^[3-4]。单位宽度梁板底部的波浪总上托力可以写为：

$$P = \int_{x_1}^{x_2} p dx \quad (3)$$

由线形波理论可以近似算得结构物在波浪传播方向上的作用宽度：

$$x = \frac{L}{\pi} \arccos \frac{2h_i}{H} \quad (4)$$

2) 作用在码头面下梁上的波浪侧压力计算公式。

梁顶 a 点压强：

$$p_a = \beta \rho g (\eta - h_i) \quad (5)$$

当梁高 $h_b < h_i$ 时，梁底 b 点压强为

$$p_b = \beta \rho g (\eta - h_i + h_b) \quad (6)$$

a 与 b 间压力成直线变化；当梁高 $h_b > h_i$ 时，与静水面相交的 o 点的压力为

$$p_o = \beta \rho g \eta \quad (7)$$

a 与 o 间压力成直线变化，而 o 点以下压力保持不变。因为梁背后可能产生漩涡，为安全起见，不计梁背后反向的压力。波浪对码头面下梁板的上托力、侧压力见图1。

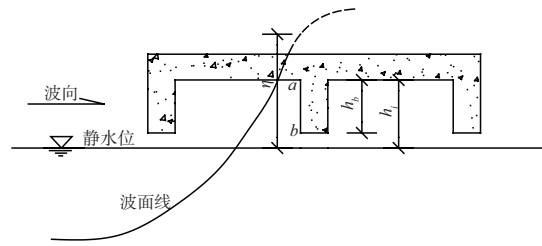


图1 波浪对码头面下梁板的上托力、侧压力计算图示

1.3 作用在码头正面梁和靠船构件上的波浪侧压力

根据设计手册，作用在码头正面梁和靠船构件上的波浪侧压力为静水压力和动水压力之和。

$$\text{静水压力: } p_s = \rho g \eta \quad (8)$$

$$\text{动水压力: } p_d = 1.7 \frac{\rho}{2} u^2 \quad (9)$$

式中： u 为水质点轨道运动的水平分速度，可按下式计算：

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh \frac{2\pi(d-z)}{L}}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \cos \frac{2\pi x}{L} \quad (10)$$

式中： d 为水深； T 为周期； z 为计算点在静水面以下的距离，水面以上均取 $z=0$ 。

因为梁背后可能产生漩涡，为安全起见，不计梁背后反向的压力。波浪对正面梁和靠船构件侧压力见图2。

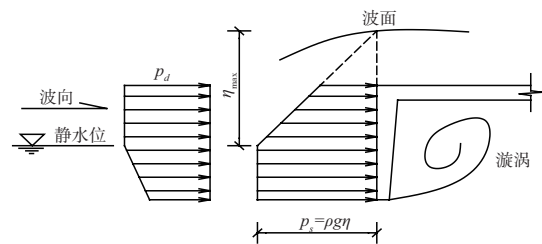


图2 波浪对正面梁和靠船构件侧压力计算图示

2 工程计算实例

2.1 工程概况

东营港东营港区3[#]、4[#]液体化工品泊位工程位于山东省东营市东北部、渤海西南岸，黄河入海口以北约50 km处，其建设2万吨级码头液体化工码头1座，安全等级为Ⅱ级。码头尺度515 m × 28 m，码头面高程8.5 m（当地理论最低潮面，下同），前沿天然泥面-12.5 m，码头方位角

141.318° ~ 321.318°，排架间距9 m。

2.2 排架计算控制工况

由于液体化工品泊位工艺荷载较小，本工程控制工况为极端高水位下波浪作用，对应荷载组合为永久荷载+极端高水位波浪力。

设计条件：极端高水位 3.46 m；天然泥面-12.5 m；波向NE和NNE，50 a—遇 $H_{1\%}=6.98$ m， $T=9.8$ s， $L=110.2$ m。

根据JTS 167-1—2010《高桩码头设计与施工规范》，极端高水位下承载能力极限状态持久组合波浪力分项系数取1.4。

2.3 根据波面线与码头结构断面相对位置确定计算工况

首先根据式(2)将本工程理论波面线绘制出来(图3)。由于浅水效应，本工程码头位置波浪的波峰、波谷呈现明显的不对称，峰陡谷坦，波动中心线在静水位以上，峰顶和谷底均有所抬高，波谷出现二级峰谷。

通过笔者编译的AutoCAD应用程序将波面线

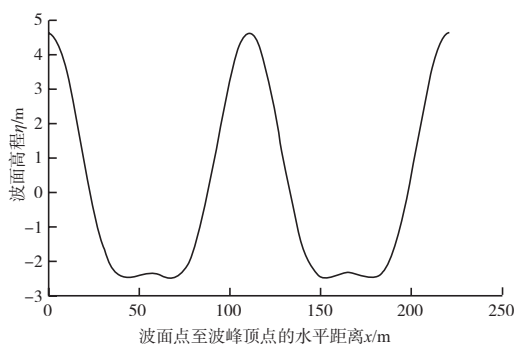


图3 本工程理论波面线

导入到CAD图中，使波面线和码头结构断面结合起来(图4)。在CAD图中波面和整个排架的相对位置关系非常直观，可以清楚地看到哪些构件会受到波浪作用，而且上托力和水平力之间的相位关系也非常明确。各点的压制波峰面高度可在图上直接量取。求构件上托力时，直接将波面线与结构物底面所围成的面积乘上系数即可，省去了繁琐的积分。同时还可以直接在CAD图上通过调整波面与梁格系统的相对位置，求出各工况下的波浪力，提高了计算效率。

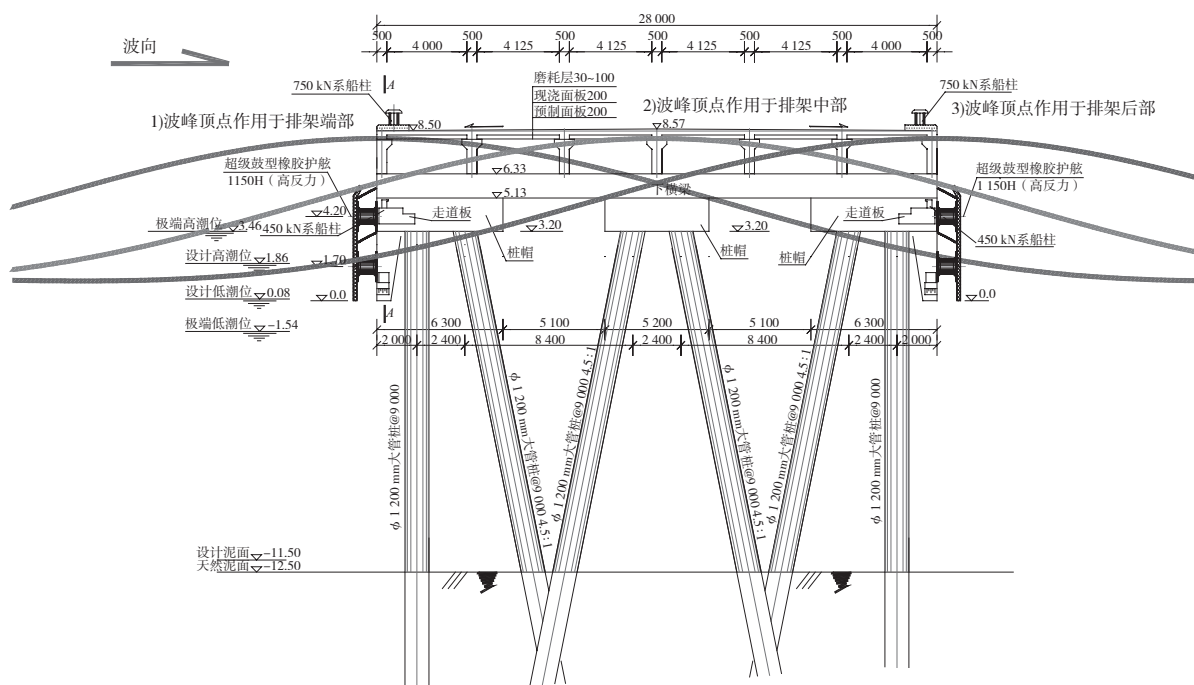


图4 不同工况下波面线与排架相对位置

极端高水位设计波浪作用时，根据波峰顶点作用位置的不同，分3种工况进行计算：工况1：波峰顶点作用于排架端部，取 $\beta=2.0$ ；工况2：波

峰顶点作用于排架中部，考虑到正面梁、靠船构件、边梁等构件对波浪的掩护作用，取 $\beta=1.5$ ；工况3：波峰顶点作用于排架后部，取 $\beta=1.5$ 。

2.4 主要构件各工况所受波浪力

根据规范及第1节所列公式计算波浪力，不同工况下的各构件（图5）受力情况见表1~5。

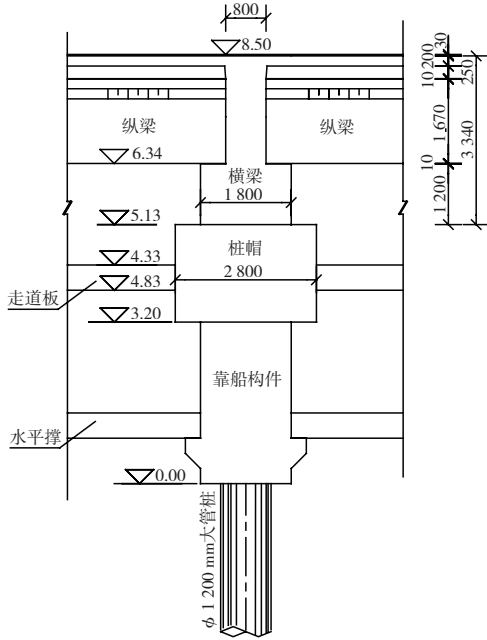


图5 码头结构剖面

表1 桩基所受波浪力

工况	波峰相位/(°)	合力/kN
工况1	0	92.02
工况2	-45.735	517.75
工况3	-91.470	549.81

表2 码头正面所受波浪侧压力

工况	波峰相位/(°)	合力/kN	作用点高程/m
工况1	0	1 294.93	3.73
工况2	-45.735	467.82	2.54
工况2	-91.470		

表3 纵梁所受波浪力

纵梁 编号	工况1		工况2		工况3	
	上托力/ kN	侧压力/ kN	上托力/ kN	侧压力/ kN	上托力/ kN	侧压力/ kN
1#	144.73					
2#	117.34	187.85	38.86	26.47		
3#	49.89	44.55	89.56	128.00		
4#			120.11	194.16		
5#			89.56	148.92	37.42	24.31
6#			38.86	35.93	88.01	125.50
7#					108.26	193.05

注：1.纵梁由左向右依次编号；2.1#纵梁（边梁）受到的波浪侧压力已在码头正面波浪侧压力中考虑，本表不再计入。

表4 横梁所受的波浪上托力

工况	作用点坐标/m		竖向均布力/(kN·m)	
	X ₁	X ₂	Q ₁	Q ₂
工况1	6.3	9.3	90.77	70.15
	9.3	11.4	70.15	52.40
工况2	6.3	9.3	61.49	74.22
	9.3	11.4	74.22	79.68
	16.6	19.6	79.68	71.01
	19.6	21.7	71.01	61.49
工况3	16.6	19.6	39.30	57.84
	19.6	21.7	57.84	68.08

注：1.横梁受到的波浪侧压力已在码头正面波浪侧压力中考虑，本表不再计入；2.由于波面较为平缓，计算中段采用梯形荷载近似代替原曲面荷载。

表5 桩帽所受波浪力

工况	桩帽 编号	作用点坐标/m		竖向均布力/(kN·m)		侧压力/kN
		X ₁	X ₂	Q ₁	Q ₂	
工况1	1#	0	3.15	266.34	258.76	
		3.15	6.3	258.76	237.06	
	2#	11.4	14	177.37	138.10	263.72
		14	16.6	138.10	96.43	
工况2	1#	0	3.15	103.58	138.58	
		3.15	6.3	138.58	167.55	
	2#	11.4	14	195.88	199.67	319.47
		14	16.6	199.67	195.88	
	3#	21.7	24.85	167.55	138.58	264.63
		24.85	28	138.58	103.58	
工况3	2#	11.4	14	72.32	103.58	80.68
		14	16.6	103.58	133.02	
	3#	21.7	24.85	177.80	194.07	284.57
		24.85	28	194.07	199.75	

注：1.桩帽由左向右依次编号；2.1#桩帽受到的波浪侧压力已在正面波浪侧压力中考虑，本表不再计入。

2.5 排架计算结果

排架采用三航院高桩梁板式码头设计程序计算，桩力与横梁弯矩计算结果见表6~7。

表6 桩基计算结果

工况	最大桩力/ kN	最小桩力/ kN	最大桩弯矩/ (kN·m)	位移/ mm
工况1	5 193.1	-2 993.1	1 473.4	16.08
工况2	4 953.5	-3 299.4	1 736.8	16.31
工况3	4 010.1	-994.9	1 440.1	8.35
包络值	5 193.1	-3299.4	1 736.8	16.31

表7 横梁弯矩计算结果 kN·m

构件	承载能力持久组合		正常使用准永久组合	
	跨中弯矩	支座弯矩	跨中弯矩	支座弯矩
工况1	6 405.5	-4 967.4	3 348.3	-2 128.9
工况2	6 460.8	-4 921.5	3 372.0	-2 109.2
工况3	6 636.5	-1 750.4	3 447.3	-750.2
包络值	6 636.5	-4 967.4	3 447.3	-2 128.9

由表6可见，极端高水位设计波浪作用下，最大桩力对应工况1，最小桩力及最大桩身弯矩对应工况2。工况1与工况2的码头位移相当，均小于20 mm。工况3不起控制作用。

由表7可见，3个工况的横梁正弯矩差别不大，工况3由于所受的波浪水平力和上托力较小，负弯矩较小。

根据上述计算结果，最终确定本工程码头桩基采用φ 1200 mm大管桩，直桩选用B1-2型，斜桩选用C1-1型，斜度4.5:1。

3 结语

1) 高桩码头波浪力计算时，根据设计手册中进行波对码头上部结构作用力公式，采用AutoCAD制图软件绘制理论波面的图形计算方法是可行的，并且提高了计算效率。

2) 图形计算方法有如下优点：在AutoCAD图中波面和整个排架的相对位置关系非常直观；上托力和水平力之间的相位关系非常明确；各点的压制波峰面高度可在图上直接量取；求构件上托力时，直接将波面线与结构物底面所围成的面积乘上系数即可。

3) 当码头上部结构承受较大波浪力时，可在AutoCAD图中直接调整波面和梁板系统的相对位置，求出各工况下的波浪力。

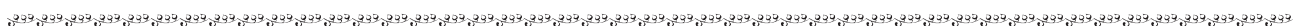
4) 仅考虑结构承受波浪力时，波峰作用于排架端部和中部2种工况，是桩基承载力及码头位移计算的控制工况。

5) 建议下阶段结合高桩梁板码头波浪物理模型的波压力数据，对不同波峰作用位置的波浪力公式系数取值进行验证与优化。

参考文献:

[1] 交通部第一航务工程局设计研究院. 海港码头结构设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1975.
 [2] 邹志利. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980.
 [3] 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.
 [4] 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)



(上接第137页)

[4] 北京金土木软件技术有限公司. Pushover分析在建筑工程抗震设计中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
 [5] POLA SEISMIC CODE 2010. The Port of Los Angeles, Code for Seismic Design, Upgrade and Repair of Container Wharves [S].
 [6] POLA SEISMIC CODE 2010 COMMENTARY. Commentary on The Port of Los Angeles, Code for Seismic Design, Upgrade and Repair of Container Wharves [S].
 [7] FEMA273. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings [S].
 [8] POLB WDC Version 3.0. Port of Long Beach Wharf Design Criteria [S].

[9] API RP 2A-LRFD. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms [S].
 [10] Reese L C, Isenhower W M, Wang S. Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2005.
 [11] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
 [12] Working Group No.34 of the Maritime Navigation Commission, International Navigation Association. Seismic Design Guidelines for Port Structures [M]. The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2001.
 [13] NSR-10. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente [S].

(本文编辑 武亚庆)