



大型椭圆墩式码头波浪力计算与试验分析

李成强

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 椭圆墩式码头为一种较为新型的墩式码头结构形式, 目前水运工程相关规范对大型椭圆墩式码头的波浪力计算等尚不完全适用。基于水运工程规范中墩柱波浪力计算理论, 结合工程案例和试验数据进行对比研究。结果表明: 1) 对于大型椭圆墩式码头, 小尺度桩体横向波浪力实测值小于计算值, 大尺度墩体纵向波浪力实测值大于计算值。2) 对于小尺度桩体, 水运规范计算方法不能反映边墩与中墩的波浪力差异, 边墩横向波浪力实测值略小于中墩。对于大尺度墩体, 规范计算不能充分反映出边墩和中墩的纵向波浪力差异。3) 对于重要工程, 建议波浪力以物模试验结果为准。

关键词: 椭圆墩式码头; 物模试验; 波浪力

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0056-05

Calculation and test analysis of wave forces on large elliptic pier-type wharf

LI Chengqiang

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

Abstract: The elliptic pier-type wharf is a relatively new type of wharf structure. At present, the relevant standards of water transportation engineering are not fully applicable to the wave force calculation of large elliptic pier-type wharfs. Based on the calculation theory of wave force on pier and pile in the water transportation engineering code, a comparative study is carried out with engineering cases and test data. The results show that: 1) For large-scale elliptic pier, the measured values of small-scale pile transverse wave force are less than the calculated values, and the measured values of large-scale pier longitudinal wave force are greater than the calculated values. 2) For small-scale piles, the difference of wave forces between the side pier and the middle pier cannot be reflected by the calculation method of water transport code, and the measured value of the lateral wave forces of the side pier is slightly smaller than that of the middle pier. For large-scale piers, the difference of longitudinal wave forces between side pier and middle pier cannot be fully reflected in the calculation of code. 3) For important engineering, it is suggested that the wave force should be determined by the results of physical model test.

Keywords: elliptic pier-type wharf; physical model experiment; wave force

随着国内港口的建设发展, 天然深水岸线日益减少。为满足水深要求, 同时考虑到投资限制, 大型码头常常采用无防波堤掩护的开敞式布置^[1]。开敞式码头具有波浪大等特点, 需考虑码头结构形式对环境条件的适应性以及码头本身的使用特性。对于大型散货码头(干散、液散), 墩式结构

为适应开敞式布置的一种较为典型、经济的码头结构形式, 传统的墩式码头常采用圆沉箱、矩形沉箱、桩等结构基础形式^[2]。

椭圆墩式码头为一种较为新型的墩式码头结构形式, 目前国内应用的工程案例相对较少, 主要具有以下特点: 1) 具备透空式结构的普遍性优

收稿日期: 2022-06-16

作者简介: 李成强(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事港航工程结构设计、研究。

点，对海域水动力环境条件影响较小；2) 椭圆沉箱整体性较好，基床不均匀沉降较小^[3]，且沉箱基础前后两端为圆弧段，减少波浪反射，对波浪的适应性较好；3) 目前的施工技术已具备预制、安装超大型椭圆沉箱的能力，可减少沉箱基础的预制、安装件数，缩短工期。综合来看，大型椭圆墩式码头是一种较好的、有应用前景的码头结构形式。然而，目前水运工程相关规范对大型椭圆墩式码头的波浪力计算等方面尚不完全适用，本文以广西地区某大型椭圆墩式码头为案例，根据水运规范墩柱波浪力计算理论进行波浪力计算，并结合物理模型实测资料进行分析、研究。

1 计算方法

根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》中墩柱波浪力计算理论，椭圆沉箱墩横向尺度满足小尺度桩要求，可近似按矩形桩根据式(1)~(8)分别计算作用于墩体上的最大速度力、最大惯性力和最大总波浪力，但规范对于 $a/b > 1.5$ (a 、 b 分别为桩体断面平行和垂直于波向的宽度) 的长条形桩体断面的速度力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 未作明确规定，本文假定 C_D 和 C_M 按 $a/b = 1.5$ 进行横向波浪力计算。

$$P_{D\max} = \alpha C_D \frac{\rho g D H^2}{2} K_1 \quad (1)$$

$$M_{I\max} = \gamma_p C_M \frac{\rho g A H}{2} K_2 \quad (2)$$

$$M_{D\max} = \beta C_D \frac{\rho g D H^2 L}{2\pi} K_3 \quad (3)$$

$$M_{I\max} = \gamma_M C_M \frac{\rho g A H L}{4\pi} K_4 \quad (4)$$

$$P_{\max} = P_{I\max} \quad (P_{D\max} \leq 0.5 P_{I\max}) \quad (5)$$

$$M_{\max} = M_{I\max} \quad (P_{D\max} \leq 0.5 P_{I\max}) \quad (6)$$

$$P_{\max} = P_{D\max} \left(1 + 0.25 \frac{P_{I\max}^2}{P_{D\max}^2} \right) \quad (P_{D\max} > 0.5 P_{I\max}) \quad (7)$$

$$M_{\max} = M_{D\max} \left(1 + 0.25 \frac{M_{I\max}^2}{M_{D\max}^2} \right) \quad (P_{D\max} > 0.5 P_{I\max}) \quad (8)$$

式中： $P_{D\max}$ 为作用于柱体计算高度上的最大速度力； $P_{I\max}$ 为作用于柱体计算高度上的最大惯性力；

$M_{D\max}$ 为作用于柱体计算高度上的最大速度力矩； $M_{I\max}$ 为作用于柱体计算高度上的最大惯性力矩； P_{\max} 为作用于柱体计算高度上的最大总波浪力； M_{\max} 为作用于柱体计算高度上的最大总波浪力矩； C_D 、 C_M 分别为速度力系数和惯性力系数； ρ 为水的密度； D 为柱体的直径； H 为建筑物所在处进行波波高； A 为柱体的横断面面积； L 为波长； K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为系数； α 、 β 、 γ_p 、 γ_M 为系数。

根据《港口与航道水文规范》中墩柱波浪力计算理论，椭圆沉箱墩纵向尺度满足大尺度墩体要求，将椭圆沉箱墩等效成圆形截面墩柱，可按式(9)~(10)计算作用于墩体上的最大总波浪力：

$$P_{\max} = \alpha_P P_{I\max} \quad (9)$$

$$M_{\max} = \alpha_M M_{I\max} \quad (10)$$

式中： $P_{I\max}$ 为作用于柱体计算高度上的最大惯性力，按式(2)计算； $M_{I\max}$ 为作用于柱体计算高度上的最大惯性力矩，按式(4)计算； P_{\max} 为作用于柱体计算高度上的最大总波浪力； M_{\max} 为作用于柱体计算高度上的最大总波浪力矩； α_P 、 α_M 为系数。

2 物模试验

2.1 工程背景

以广西地区某大型椭圆墩式码头为工程案例，该码头为外海开敞式码头，波浪条件较为恶劣，以大型椭圆沉箱为水工结构基础，并采用墩式布置。该码头面高程为 11.0 m，前沿设计泥面高程为 -24.9 m，椭圆沉箱中心间距为 35.5 m。椭圆沉箱为两端半圆+中间矩形的结合形式^[4]，沉箱沿泊位长度方向宽度 13.5 m，趾宽 1.8 m，垂直于码头岸线方向宽 29.0 m，高 27.9 m。基槽开挖至中风化泥质粉砂岩，沉箱整体坐落于中风化岩上，沉箱内回填海砂。上部结构采用预制块体、现浇胸墙、现浇搁置梁以及预应力箱梁、预制 π 形板等以形成码头面。

根据《港口与航道水文规范》中墩柱波浪力计算理论，该码头椭圆沉箱墩横向尺度符合小尺度桩要求，椭圆沉箱墩纵向尺度符合大尺度墩体要求。

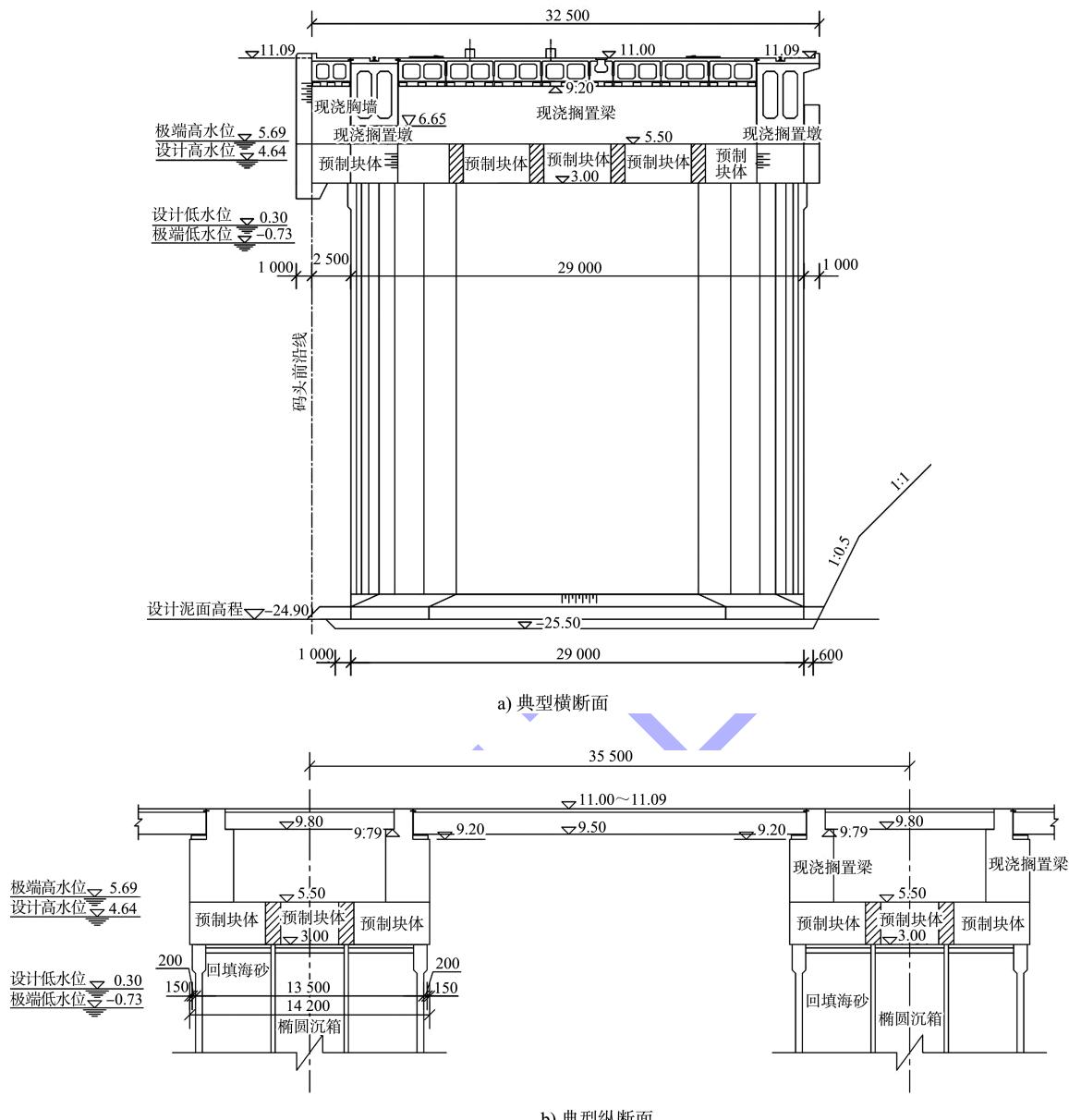


图 1 码头典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2.2 试验设备及波浪模拟

波浪试验在南京水利科学研究院波浪试验厅波浪港池中进行, 港池长 50 m、宽 52 m、高 1.2 m, 港池配有多向不规则波造波机, 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同谱型的不规则波。采用电容式波高仪测量波高、DS300 多功能自动采集系统采集数据, 最终由计算机形成数据文件; 采用总力(拉压力)传感器测量总力、压强传感器测量波压力, 由计算机自动采集量测数据,

测量结果采用计算机程序分析处理。模型地形制作按 1:2 000 地形图及总平面设计要求, 建筑物模型与造波器、水尺边界间应保持合适的距离。

波浪按重力相似准则模拟, 按不规则波进行试验。不规则波的波谱取 JONSWAP 谱, 谱密度函数为:

$$s(f) = \alpha H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \gamma^{\exp[-(T_p f^{-1})^2 / (2\sigma^2)]} \quad (11)$$

式中: α 为无因次常数, $\alpha = 0.062 \cdot 4 / [0.230 +$

$0.033 6\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}$]; H_s 为有效波高(m); T_p 为谱峰周期(s); f 为频率; γ 为谱峰升高因子, 取 3.3; σ 为峰形参数量, $f \leq f_p$ 时, $\sigma = 0.07$, $f > f_p$ 时, $\sigma = 0.09$ 。

2.3 试验内容

本次模型试验的波向为 SE、SSE 和 S 共 3 个波向。模型范围包括拟建泊位南端前 6 个椭圆沉箱墩及 1 个圆形系缆沉箱墩及其上部结构, 见图 2。海域工程模型布置于距离造波机约 15 m 处, 大于 6 倍波长, 符合 JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》的规定, 每组试验不规则波波数大于 120 个, 每组试验重复 3 次。整体模型中地形、码头等都按《波浪模型试验规程》要求准确模拟, 做到与原型几何相似。本次模型几何长度比尺 $\lambda_L = 42.8$, 拟建泊位处波浪试验波浪要素见表 1。

模型试验选择泊位南端较为典型的第 1 个椭圆沉箱墩(统称为边墩)和第 2 个椭圆沉箱墩(统称为中墩)测量水平波浪力, 所测结构包含上部结构。进行总力测量时, 沉箱墩结构仅与总力传感器接触, 总力传感器用铁架和金属螺杆固定住, 传感器布置见图 3。

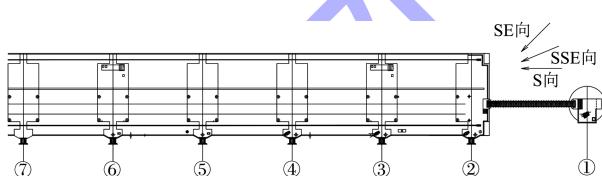


图 2 沉箱墩布置

表 1 拟建泊位处波浪试验波浪要素

水位/m	波向	波浪重现期/a	波浪要素		
			$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$
极端高水位 5.69	SE	50	6.43	6.00	5.24
	SSE	50	6.43	5.85	5.09
	S	50	5.38	4.77	4.09
设计高水位 4.64	SE	50	5.75	5.42	4.74
	SE	10	5.30	4.72	4.07
	SSE	50	5.75	5.30	4.62
设计高水位 4.64	SSE	10	5.16	4.59	3.94
	S	50	4.95	4.40	3.78
	S	10	4.35	3.84	3.26
					6.5

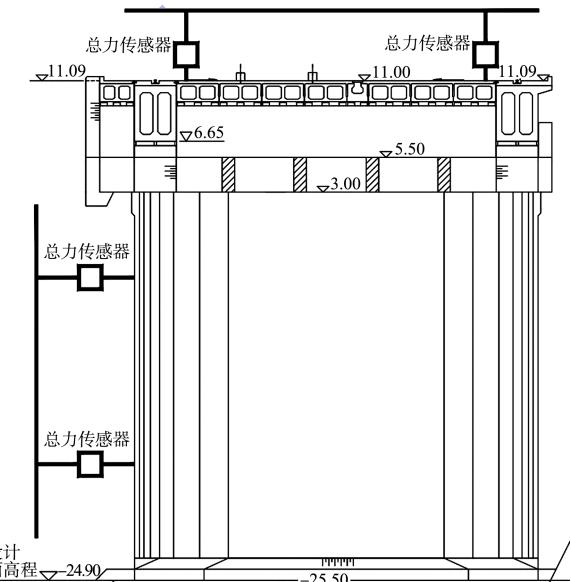


图 3 总力传感器布置 (单位: m)

3 结果分析

根据《港口与航道水文规范》, 结合工程案例, 该椭圆沉箱墩波浪力计算所采用的主要参数见表 2。

表 2 波浪力计算主要参数

水位	横向波浪力							
	水密度 ρ / ($t \cdot m^{-3}$)	速度力系数 C_D	惯性力系数 C_M	系数 K_1 (沉箱底至顶、沉箱顶至波峰面)	系数 K_2 (沉箱底至顶、沉箱顶至波峰面)	系数 K_3 (沉箱底至顶、沉箱顶至波峰面)	系数 K_4 (沉箱底至顶、沉箱顶至波峰面)	
极端高水位	1.025	2.0	2.2	0.106、0.124	0.802、0.210	0.066、0.015	0.863、0.024	
设计高水位	1.025	2.0	2.2	0.118、0.104	0.859、0.149	0.079、0.010	0.986、0.012	
横向波浪力								
水位	系数 α	系数 β	系数 γ_p	系数 γ_M	水密度 ρ / ($t \cdot m^{-3}$)	惯性力系数 C_M (沉箱底至顶、沉箱顶至波峰面)	系数 K_2 (沉箱底至顶、沉箱顶至波峰面)	系数 K_4 (沉箱底至顶、沉箱顶至波峰面)
极端高水位	1.06	1.07	1.0	1.0	1.025	1.93、1.75	0.802、0.192	0.863、0.020
设计高水位	1.00	1.00	1.0	1.0	1.025	1.85、1.65	0.859、0.137	0.986、0.010

基于上述主要计算参数,运用《港口与航道水文规范》分别计算中墩、边墩横向波浪力及纵向波浪力,并与物模试验实测数据进行对比分析。表3、4分别为极端高水位、设计高水位下的中墩波浪力及边墩波浪力计算值与试验值对比。从表3、4可以看出:中墩横向水平波浪力试验值比计算值小32.5%~32.6%,中墩横向水平波浪力矩试验值比计算值小25.3%~27.4%,边墩横向水平波浪力试验值比计算值小34.2%~38.5%,边墩横向水平波浪力矩试验值比计算值小29.4%~31.6%,表明横向波浪力物模试验实测值普遍小于计算值。对比表3、4可以看出规范中小尺度桩体波浪力计算方法不反映边墩与中墩的波浪力差异,而实测值表明,即使是小尺度桩体,边墩与中墩波浪力

仍然存在一定差异,由于边墩对波浪的群桩效应较小,边墩横向波浪力略小于中墩。

同时,从表3、4可知:中墩纵向水平波浪力试验值比计算值大20.4%~34.4%,中墩纵向水平波浪力矩试验值比计算值大22.8%~41.4%,边墩纵向水平波浪力试验值比计算值大39.6%~52.8%,中墩纵向水平波浪力矩试验值比计算值大40.2%~57.6%,表明纵向波浪力试验实测值普遍大于计算值。对比表3、4可以看出:边墩纵向波浪力实测值约为中墩实测值的1.15~1.17倍,而边墩纵向波浪力计算值仅约为中墩计算值的1.01倍,表明规范通过查选群墩系数计算大尺度椭圆墩体最终波浪力不能充分反映出边墩和中墩的纵向波浪力差异。

表3 中墩波浪力对比

水位/m	横向水平波浪力			横向水平波浪力矩		
	计算值/MN	试验值/MN	差值百分比/%	计算值/(MN·m)	试验值/(MN·m)	差值百分比/%
极端高水位 5.69	19.239	12.958	32.6	383.987	278.597	27.4
设计高水位 4.64	16.882	11.397	32.5	323.340	241.616	25.3
水位/m	纵向水平波浪力			纵向水平波浪力矩		
	计算值/MN	试验值/MN	差值百分比/%	计算值/(MN·m)	试验值/(MN·m)	差值百分比/%
极端高水位 5.69	24.469	29.459	-20.4	477.259	586.234	-22.8
设计高水位 4.64	20.983	28.191	-34.4	394.719	558.182	-41.4

注:差值百分比= (计算值-试验值)/计算值×100%。

表4 边墩波浪力对比

水位/m	横向水平波浪力			横向水平波浪力矩		
	计算值/MN	试验值/MN	差值百分比/%	计算值/(MN·m)	试验值/(MN·m)	差值百分比/%
极端高水位 5.69	19.239	12.661	34.2	383.987	270.945	29.4
设计高水位 4.64	16.882	10.388	38.5	323.340	221.264	31.6
水位/m	纵向水平波浪力			纵向水平波浪力矩		
	计算值/MN	试验值/MN	差值百分比/%	计算值/(MN·m)	试验值/(MN·m)	差值百分比/%
极端高水位 5.69	24.697	34.468	-39.6	481.719	675.573	-40.2
设计高水位 4.64	21.187	32.366	-52.8	398.374	627.900	-57.6

4 结论

1) 对于开敞海域大型椭圆墩式码头,横向波浪力物模试验实测值普遍小于小尺度桩体波浪力计算值,而纵向波浪力实测值普遍大于大尺度墩体波浪力计算值。

2) 对于小尺度桩体,水运规范中边墩和中墩群桩系数取值一致,无法反映边墩与中墩的波浪力差

异。而根据实测值,由于边墩对波浪的群桩效应较小,边墩横向波浪力实际上略小于中墩。对于大尺度墩体,水运规范通过查选群墩系数计算最终波浪力,不能充分反映出边墩和中墩的纵向波浪力差异。

3) 现行水运规范波浪力计算与实测值存在一定偏差,日后可根据大量模型试验结果进一步修正,对于重要工程,设计需以物模试验结果为准。

(下转第172页)