



陡坡海岸栈桥式码头波浪浮托力计算

曹 帅, 杨海宁, 陈志乐

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对陡坡海岸栈桥式码头在长周期波和浅水变形工况下的波浪浮托力计算问题, 以援萨尔瓦多拉利伯塔德省码头建设项目为例, 对于上部结构承受的波浪浮托力采用物理模型试验和国内外相关规范手册的理论计算结果对比分析, 结果表明: 1) 理论公式多适用于行进波, 对于长周期的卷破波, 很少有适用的理论公式; 2) 断面物理模型试验考虑了陡坡海岸地形、长周期、波浪浅水变形、波浪破碎等因素, 较为贴合实际波况, 浮托力试验值相对合理准确; 3) 波浪浮托力的确定建议综合采用物理模型试验和理论公式的数值。成果用于水工结构的优化设计, 并为以后类似工况的码头设计提供一定的借鉴意义。

关键词: 陡坡海岸; 栈桥式码头; 浮托力; 理论计算; 模型试验

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S1-0069-06

Calculation of wave uplift force on trestle-type wharf on steep coast

CAO Shuai, YANG Hai-ning, CHEN Zhi-le

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

Abstract: To calculate the wave uplift force on a trestle-type wharf on a steep coast under working conditions of long-period waves and shallow water deformation, this paper takes the China-assisted wharf construction project in La Libertad Department of El Salvador as an example. Results of physical model tests and theoretical calculations according to relevant domestic and foreign code manuals are compared to analyze the wave uplift force on the superstructure. The following observations can be made from the results: 1) The theoretical formulas work mostly for progressive waves, and those applicable to long-period plunging waves are rare in number; 2) Considering steep coast topography, long period, shallow water deformation of waves, wave breaking, and other factors, cross-sectional physical model test is more in line with actual wave conditions, and the uplift force tested is more reasonable and accurate; 3) The wave uplift force should be determined under comprehensive consideration of values obtained from physical model tests and theoretical formulas. The results are used in the optimization design of hydraulic structures, and they provide a reference for future wharf design under similar working conditions.

Keywords: steep coast; trestle-style wharf; uplift force; theoretical calculation; model test

1 项目概况

萨尔瓦多位于中美洲北部, 南濒太平洋, 本工程位于其首都圣萨尔瓦多市南部 22 km 处的拉利伯塔德省南部, 西距现有拉利伯塔德码头约 94 m, 其后方为渔产品交易市场。

本工程建设一座码头(含引桥)2 990 m², 一座海上景观平台 1 000 m², 配备起吊渔船的升降

机 2 台, 房建总面积 536 m² 以及给排水、供电、通信等相关设施。

码头位于引桥端部, 长 30 m, 宽 16 m, 顶面高程 6.0 m, 三面临水, 前沿设计底高程-1.9 m, 码头位置天然水深为-5.5~-4.5 m。景观平台位于引桥根部, 长 40 m, 宽 33.3 m, 顶面高程 5.4 m。

码头通过连接引桥与后方景观平台连接, 引桥

长 110 m，宽 8.3 m，高程为 5.4~6.0 m，坡度约为 5.5‰。景观平台通过接岸引桥与后方陆域连接，引桥长 15.4 m，宽 11.3 m，高程为 4.6~5.4 m。总平面见图 1。



图 1 总平面

2 码头结构形式及水文地形条件

2.1 码头结构形式

1)本工程海域土层主要以卵石层，黏性土混砾石，强风化岩和中风化岩为主；2)拟建港址处没有任何掩护条件，浪大流急；3)拟建港址西侧为高桩码头结构，已使用多年；4)高桩码头施工经验丰富，上部结构除预制面板外，其余均采用现浇结构，施工速度快；5)高桩码头为透空式结构，对环境破坏小。基于以上条件，综合考虑采用高桩梁板码头结构，典型断面见图 2。

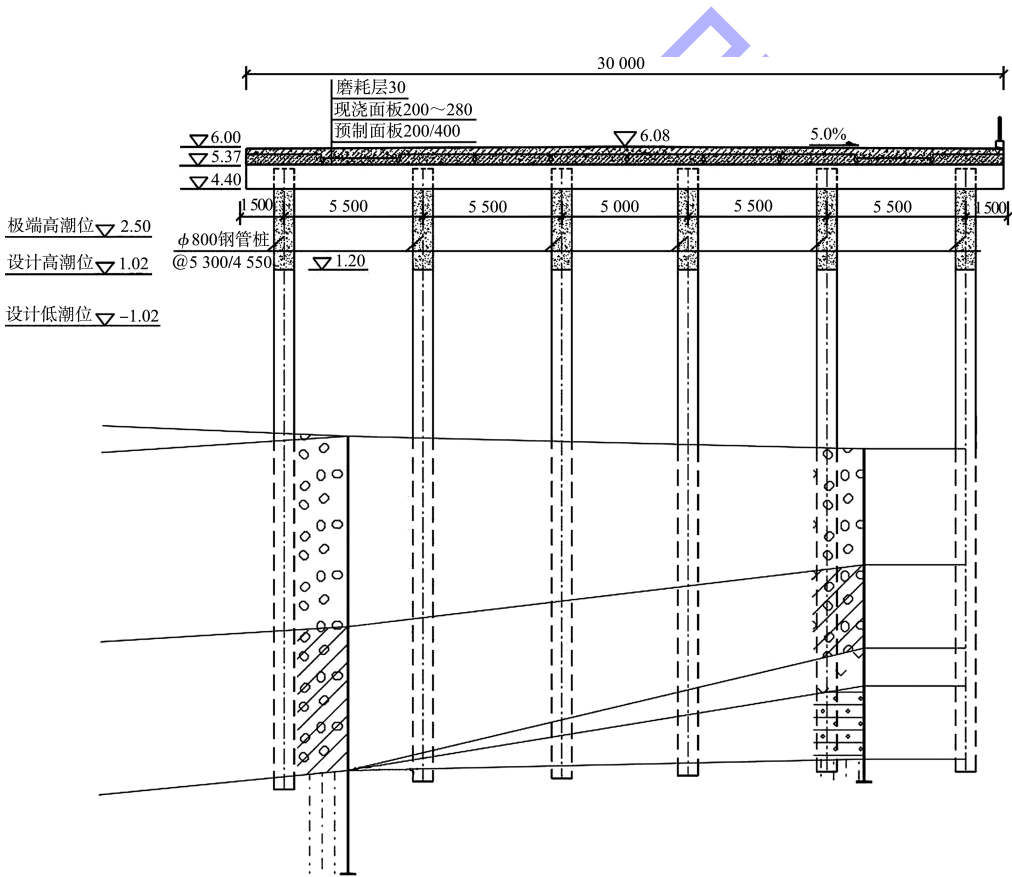


图 2 码头典型断面（尺寸：mm；高程：m）

2.2 设计水位

码头设计水位见表 1。

表 1 码头设计水位

100 a 一遇极端高水位/m	50 a 一遇极端高水位/m	设计高水位/m	设计低水位/m	50 a 一遇极端低水位/m
2.65	2.50	1.02	-1.02	-2.00

2.3 设计波浪

根据波浪数学模型和波浪断面物理模型试验, 本工程 50 a 一遇设计波要素取值见表 2。

表 2 50 a 一遇设计波要素

区域	水位/m	$H_{1\%}$ /m	谱峰周期 T_p /s	波峰面高度 η /m
码头	极端高水位 2.65	8.38	19	6.48
	设计高水位 1.02	7.62	19	6.40
引桥 (岸侧 100 m 内)	极端高水位 2.65	6.51	19	5.48
	设计高水位 1.02	5.97	19	5.64

2.4 海流

工程水域流速不大, 较大流速主要受涡旋、大涌浪和海啸影响。受涡旋影响, 外海深水区流速可达 2.0 m/s 以上; 因地形因素, 近岸浅水在大涌浪尤其是海啸期间流速极大, 可达 4.0~6.0 m/s。结合水位、波浪等因素, 工程水域极限流速确定为 4.0 m/s。

2.5 地形

工程海域海底主要是火山爆发产生的火山灰和石落淤, 在长周期涌浪, 尤其是每年 3~4 次巨浪的长期作用下, 对海底及岸滩进行塑造, 主要特征是形成海底陡坎, 水深变化大, 岸边为卵石岸滩。海底边坡由外海到近岸逐渐变陡(图 3), 外海码头区域平均坡度为 1:40, 近岸引桥区域平均坡度为 1:20。



图 3 纵断面

3 波浪浮托力计算

3.1 计算公式和模型试验

对于波浪浮托力, 采用国内外理论经验公式进行计算, 分别参考《海港设计手册》(中册)^[1]、JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[2]、日本港工规范^[3]、英国标准^[4]等。

3.1.1 《海港设计手册》(中册)推荐公式

根据《海港工程设计手册》中册, 作用在上部结构底面上的浮托力(图 4):

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

式中: p 为上部结构底部所受浮托力 (kN/m³); β 为压力反应系数, 取 2.0; ρ 为水的密度 (t/m³), 取 1.0; η 为波峰面在静水面以上的高度 (m), 采用物模试验数值, 取值 6.48、5.48 m; h_i 为波面在水面以上被压制的高度 (m)。

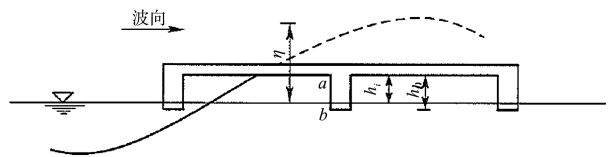


图 4 波浪对上部结构的作用

3.1.2 《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)推荐公式

正向不规则波作用下, 高桩码头面板底部纵向单位长度上的最大总浮托力可按下列公式计算:

$$\frac{P_{1\%}}{\rho g x_{1\%} H_{1\%}}=K_1\left(1-\frac{\Delta h}{1.1\eta_{1\%}}\right)^{0.3}e^{-0.9\left(\frac{\Delta h}{1.1\eta_{1\%}}-0.75\right)^2}$$
 (2)

其中,

$$K_1=0.85+0.35\text{th}\left(\frac{L_s}{2B}-2\right)$$
 (3)

$$\eta_{1\%}=\frac{H_{1\%}}{2}+\frac{\pi H_{1\%}^2}{2L_s}\left(\text{ch}\frac{2\pi d}{L_s}\right)\left(\text{ch}\frac{4\pi d}{L_s}+2\right)/4\left(\text{sh}\frac{2\pi d}{L_s}\right)^3$$
 (4)

$$x_{1\%}=\frac{L_s}{\pi}\arccos\frac{\Delta h}{1.1\eta_{1\%}}$$
 (5)

$$L_s=\frac{gT_s^2}{2\pi}\text{th}\frac{2\pi d}{L_s}$$
 (6)

式中: $P_{1\%}$ 为 $H_{1\%}$ 作用下面板底部纵向单位长度上的最大总上托力 (kN/m); ρ 为海水密度 (kg/m³), 取 $\rho=1.025\text{ kg/m}^3$; $x_{1\%}$ 为波浪作用在面板底的宽度 (m), 即均布压强分布宽度, 大于 B 时取 B ; $H_{1\%}$ 为累积频率为 1% 的入射波波高 (m); K_1 为面板宽度影响系数; Δh 为面板底部在静水面以上的高度 (m); $\eta_{1\%}$ 为 $H_{1\%}$ 波高对应的波峰在静水面以上的高度 (m); L_s 为有效波波长 (m); B 为沿波浪传播方向的面板宽度 (m); d 为码头前沿水深 (m); g 为重力加速度 (m/s²); T_s 为有效波周期 (s)。

3.1.3 日本规范(OCDI)

根据日本港工技术规范,对于行进波,波浪浮托力按照下列公式计算:

$$\frac{F_{qs}}{F^*}=a\left(\frac{\eta_{max}-c_1}{H_s}\right)^{-b} \tag{7}$$

$$F^*=b_w b_1 p_2 \tag{8}$$

$$p_2=(\eta_{max}-c_1)\rho g \tag{9}$$

$$\eta_{max}=\frac{H_{max}}{2}e^{\left(\frac{2\pi}{L}\cdot\frac{H_{max}}{2}\right)} \tag{10}$$

式中: H_{max} 为最大波高(m),按照 $1.8H_s$ 考虑; H_s 为有效波高(m); F_{qs} 为波浪浮托力; F^* 为波浪力标准值; c_1 为面板底部在静水面以上的高度(m); b_1 为结构底部长度; b_w 为结构底部宽度; η_{max} 为静水面以上的波峰面高度(最大波

高)(m); L 为计算波长(m); a 、 b 为与结构件有关的系数。无掩护时, $a=0.82$, $b=0.61$; 有掩护时,对板 $a=0.71$, $b=0.71$, 对梁 $a=0.82$, $b=0.61$ 。

3.1.4 英国标准

英标没有给出波浪力计算的公式,按照以下公式和图 5 计算:

$$P_1=[\eta_{max}-(b_h+c_1)]\rho_w g \tag{11}$$

$$P_2=(\eta_{max}-c_1)\rho_w g \tag{12}$$

$$F_v=b_w b_1 p_2 \tag{13}$$

式中: P_1 为顶部压强(kPa); P_2 为底部压强(kPa); η_{max} 为波峰面高度(m); c_1 为底部超高(m); b_w 为结构宽度(m); b_1 为结构长度(m); b_h 为结构高度(m); F_v 为波浪浮托力(kN)。

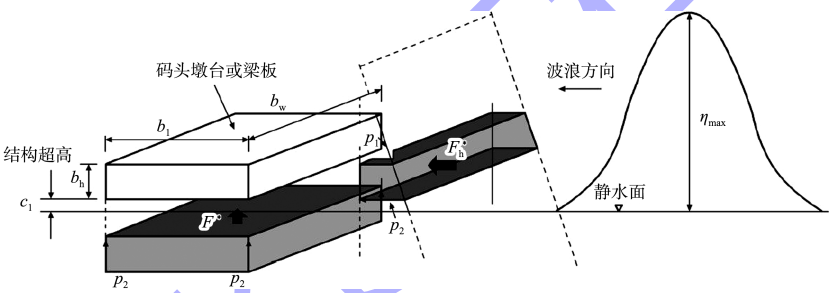


图 5 浮托力计算示意

3.1.5 物模试验

工程所在地外海波浪以涌浪为主,周期很长,近岸底坡坡度较陡,近岸波浪较大,波浪破碎以卷破为主,对结构作用力较大,特别是码头及引桥面板作用力很大,通过波浪断面物理模型试验

确定波浪作用力,为工程决策提供参考依据。

试验在宽 1 m 的水槽中进行,采用重力相似准则设计模型,试验采用不规则波,面板设置传感器测量波浪浮托力,试验模型见图 6。物模试验^[5]中给出了结构波浪荷载 1% 最大值,见表 3。



图 6 波浪断面模型试验

表 3 码头和近岸引桥波浪作用力统计

位置	水位/m	垂直总力/kN	作用范围/m	折算均布压强/kPa
码头	极端高水位 2.65	8 882.0	0.5~1.0 倍码头面宽度(15~30)	37.01
	特定水位 2.00	7 060.0		29.42
近岸引桥	极端高水位 2.65	6 453.0	3 跨(18)	43.19
	特定水位 2.00	2 254.5		15.09

试验结论如下：1) 波浪向近岸传播过程中，波高总体呈现先增大后减小的趋势，周期越长越为明显。

2) 波浪压力分布主要为均布型和冲击型两种。均布型点压强较小、分布宽度较大，总力相对较大，主要用于整体结构受力验算(结合总力测量结果)；冲击型点压强较大，分布宽度较小，总力相对较小，主要用于局部结构强度验算。

3) 对于波浪冲击压力，由于作用持续时间很

短，冲击频率远大于结构自振频率，在面板等局部结构强度计算时，需考虑结构的动力响应问题。物模试验中的结构动力响应分析表明，如果以波浪冲击压力作为静力计算结构内力，结果明显偏大，因此，波浪荷载可以做适当折减，采用 0.3~0.4 的系数。

3.2 公式计算和模型试验结果

不同水位的波浪浮托力理论公式值和模型试验值见表 4 和图 7。

表 4 浮托力汇总

结构	工况	水位数值/m	浮托力/kPa				
			《海港工程设计手册》公式	《港口与航道水文规范》公式	日本规范公式	英国标准公式	模型试验
码头	极端高水位	2.65	76.47	74.59	40.04	37.49	37.01
	特定水位 1	2.00	66.01	73.23	37.81	30.96	29.42
	设计高水位	1.02	41.41	61.91	31.52	21.11	—
	特定水位 2	0	10.25	41.99	18.29	10.86	—
近岸引桥	极端高水位	2.65	68.27	50.63	38.31	33.37	43.19
	特定水位 1	2.00	47.15	45.42	33.16	26.94	15.09
	设计高水位	1.02	38.13	38.11	30.52	17.09	—
	特定水位 2	0	6.15	20.34	14.98	6.84	—

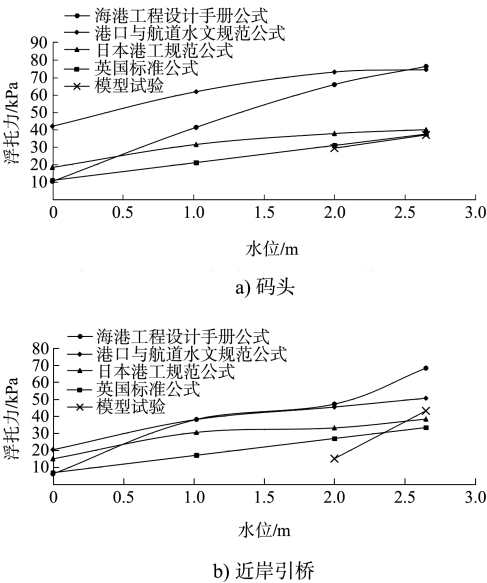


图 7 波浪浮托力

3.3 结果分析

- 1) 波浪浮托力与水位呈正比例增长关系。
- 2) 根据《海港工程设计手册》计算得到的波浪浮托力数值均大于物模试验数值，受底部超高影响较大，尤其对于深水区域，基本呈线性关系，极端高水位计算值较其余规范结果更保守，压力反应系数 β 为经验值，与很多因素有关，不宜作为码头浮托力计算的依据。
- 3) 根据现行行业规范《港口与航道水文规范》计算得到的波浪浮托力数值除极端高水位略小于《海港工程设计手册》外，整体数值相对较大，在公式适用范围内，作为设计依据较为稳妥。
- 4) 根据日本港工规范和英国标准计算得出的

波浪浮托力数值较前两者均更小，对于深水区域，英国标准结果与物模试验较为贴近；对于浅水区域，考虑波浪的破碎和变形，理论公式计算和物模试验值拟合较差。对于依据国外标准设计的项目，两本规范可作为设计依据。

5)物模试验数值整体较理论公式计算值更小，对于深水区域，浮托力试验值与水位基本呈线性关系；对于浅水区域，考虑到低水位波浪破碎，浮托力衰减较为明显。

6)理论公式适用于行进波，根据水文和地形条件，波浪在码头位置开始破碎，以卷破波为主，很少有适用的理论公式；物模试验采用重力相似准则，数值较理论公式计算值偏小，由于考虑了陡坡海岸地形、长周期、波浪浅水变形、波浪破碎等因素，数值更为合理。

4 结语

1)对于栈桥式码头，当面板底高程相对较低时，需考虑波浪浮托力；

2)对于波浪浮托力，国内外有很多较为成熟的理论经验公式，本文分别采用《海港工程设计手册》《港口与航道水文规范》、日本港工规范和英国标准进行计算，数值差异较大，且理论公式多适用于行进波，对于长周期的卷破波，很少有适用

的理论公式；

3)断面物理模型试验考虑了陡坡海岸地形、长周期、波浪浅水变形、波浪破碎等因素，较为贴合实际波况，数值更为合理；

4)对于陡坡海岸栈桥式码头结构，波浪浮托力建议综合采用物模试验和理论公式的数值。

参考文献：

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,海港工程设计手册(中册)[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口与航道水文规范:JTS 145—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[3] Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan.The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan [S]. Tokyo: Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, 2009.

[4] MCCONNELL K, ALLSOP W, CRUICKSHANK L.Piers, jetties and related structures exposed to waves: guidelines for hydraulic loading[M]. London: Thomas Telford Publishing, 2004.

[5] 河海大学, 援萨尔瓦多拉利伯塔德省码头建设项目波浪断面物理模型试验报告[R].南京:河海大学, 2021.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 62 页)

参考文献：

[1] 中交水运规划设计院有限公司.琼州海峡客滚运输滚装港口布局方案(初步方案)[R].北京:中交水运规划设计院有限公司, 2020.

[2] 海南省交通运输厅.海南省港口布局规划(修编)(征求意见稿)[R].海口:海南省交通运输厅, 2020.

[3] 中交水运规划设计院有限公司.海口港总体规划(修

编)(征求意见稿)[R].北京:中交水运规划设计院有限公司, 2020.

[4] 海南省交通运输厅.琼州海峡与新海港片区综合交通枢纽规划[R].海口:海南省交通运输厅, 2020.

[5] 海南海事局.琼州海峡船舶定线制、琼州海峡船舶报告制[R].海口:海南海事局, 2021.

(本文编辑 王璵)