

# 桩基码头前沿顶高程设计方法

朱利翔<sup>1</sup>, 孙英广<sup>2</sup>, 谷文强<sup>1</sup>

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

**摘要:** 分析和总结国内外规范中桩基码头前沿顶高程的设计方法, 分别从设计水位、设计波浪、波峰面高度和气隙高度或富裕高度等方面针对有掩护和开敞式桩基码头的高程设计方法进行研究, 总结出有掩护和开敞式桩基码头前沿顶高程的详细设计方法。尤其是针对开敞式码头得出了气隙方法和允许桩基码头上部结构承受波浪力的两种设计方法, 并通过气隙高度和超越概率的相关试验得出气隙高度设计方法, 针对允许桩基码头上部结构承受波浪力的情况给出了主要面板下表面设计在最大波峰面以上和所有的管架等在最大波峰面以上两种设计方法。

**关键词:** 顶高程; 有掩护码头; 开敞式码头; 气隙高度; 超越概率; 波浪力

**中图分类号:** U652.7; U656.113      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-7874(2017)06-0072-05

**doi:** 10.7640/zggwjs201706016

## Design methods of top elevation of piled wharf

ZHU Li-xiang<sup>1</sup>, SUN Ying-guang<sup>2</sup>, GU Wen-qiang<sup>1</sup>

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510230, China;

2. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

**Abstract:** We analyzed and summarized the design methods of top elevation of piled wharf in domestic and foreign specifications, studied the design methods of elevation for protected and unprotected piled wharfs from the aspects of design water level, design wave, wave crest height and air gap or safety height, etc., summarized the detailed design methods of top elevation of protected and unprotected piled wharfs. Especially for the unprotected wharf, both of design methods of air gap and superstructure bearing the wave loads are given and the design method of air gap is gotten by the test results of the air gap and its exceeding probability. As for the superstructure is designed to bear the wave loads, two situation of the underside of slab above the wave crest and pipe rack above the wave crest are introduced.

**Key words:** top elevation; protected jetty; unprotected wharf; air gap; exceeding probability; wave load

## 0 引言

在海外港口设计中, 业主和咨工一般要求采用英美规范等国际通用规范进行详细的参数化设计, 现将国际主流规范和中国规范中的桩基码头高程设计方法进行对比和分析, 总结出桩基码头前沿顶高程的详细设计方法。

## 1 国内外规范中桩基码头前沿顶高程设计方法

### 1.1 中国规范

根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》<sup>[1]</sup>,

一般桩基码头前沿顶高程按受力控制标准进行计算, 具体计算内容如下。

潮位与波浪组合的标准及富裕高度可按表 1 确定。

表 1 潮位与波浪的组合标准及富裕高度

Table 1 Combined standards of tide, wave and safety height

组合情况	设计水位	波浪重现期/a	富裕高度 $\Delta_r$ /m
基本标准	设计高水位	50	0~1.0

注: 1) 按受力标准设计时波浪采用波列累积频率为 1% 的波高;  
2) 对于风暴潮增水情况明显的码头, 应在设计高水位基础上考虑增水影响;

3) 受力标准的波浪重现期采用结构设计的规定, 一般为 50 a, 有特殊要求时, 可相应调整。

收稿日期: 2017-03-24      修回日期: 2017-04-28

作者简介: 朱利翔 (1964—), 男, 福建寿宁人, 硕士, 高级工程师, 董事长, 港口工程专业。E-mail: zhulx@fhdigz.com

按受力标准控制的码头前沿顶高程可按下式计算:

$$E = DWL + \eta - h_0 + h + \Delta_F \quad (1)$$

式中:  $E$  为码头前沿顶高程, m;  $h$  为码头上部结构高度, m;  $DWL$  为设计水位, m, 按表 1 选取;  $\eta$  为水面以上波峰面高度, m;  $h_0$  为水面以上波峰面高出上波结构底面的高度, m, 当波峰面低于上部结构底面时为 0;  $\Delta_F$  为受力标准的富裕高度, m, 按表 1 取值。

水面以上波峰面高度  $\eta$  可按下式计算:

$$\eta = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{4L} \cdot \text{cth}\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2)$$

式中:  $H$  为波高, m;  $d$  为水深, m;  $L$  为波长, m。

### 1.2 日本规范

根据日本规范《Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan》<sup>[2]</sup>, 来计算码头前沿顶高程。

#### 1.2.1 设计水位

码头顶高程设计时的设计水位应取平均月最高水位, 极端高水位可能起因于天文潮、风暴潮、假潮和径流。尚应考虑因温室效应产生的海平面上升。

#### 1.2.2 设计波浪

对于设计使用年限为 50 a 的码头建(构)筑物, 设计波浪一般取重现期为 50 a 的波高。

#### 1.2.3 有掩护码头前沿顶高程设计

对于有掩护码头, 码头前沿顶高程可由设计水位加上表 2 中的数值计算。

表 2 日本规范码头顶高程计算超高

Table 2 Safety height of top elevation calculation in Japanese standards

码头类型	码头顶高程计算超高/m	
	潮差 ≥ 3 m	潮差 < 3 m
大船码头(水深 ≥ 4.5 m)	0.5~1.5	1.0~2.0
小船码头(水深 < 4.5 m)	0.3~1.0	0.5~1.5

#### 1.2.4 开敞式码头顶高程设计

结构物或构件水下部分的宽度或直径  $W_s$  与波长  $L$  比值  $W_s/L < 0.2$ , 码头为透空式结构, 应用有限振幅波理论, 波峰面在设计水位以上高度可按照图 1(根据现场实测资料分析得出)计算, 图中  $\eta_c$  表示为设计水位以上最大波峰面高度;  $H_{\max}$  表示的是所记录最大波高;  $H_{1/3}$  表示的是有效波高;  $h$  表

示的是水深。

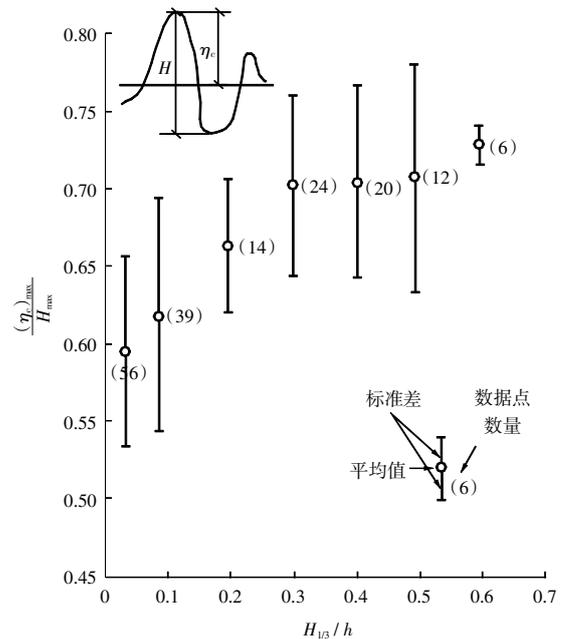


图 1 最大波峰面高度  $(\eta_c)_{\max}/H_{\max}$  与相对波高  $H_{1/3}/h$  关系图

Fig. 1 Relationship between maximum crest elevation  $(\eta_c)_{\max}/H_{\max}$  and relative wave height  $H_{1/3}/h$

文献[2]中并未给出明确的码头高程计算公式, 通过上述分析, 采用确定性设计方法计算, 当不考虑码头上部结构受力时, 码头前沿顶高程可按照式(3)计算。

$$E = EWL + (\eta_c)_{\max} + H + \Delta \quad (3)$$

式中:  $EWL$  为平均月最高水位;  $H$  为码头上部结构高度;  $\Delta$  为富裕高度。

### 1.3 英国规范

#### 1.3.1 考虑因素

英国规范 6349-2:2010 《Maritime works-Part 2: Code of Practice for the Design of Quay Walls, Jetties and Dolphins》<sup>[3]</sup>中规定, 计算码头前沿顶高程, 需要考虑如下因素。

- 1) 上水的风险和上水后的影响后果;
- 2) 温室效应造成的海平面上涨;
- 3) 装卸工艺的要求;

4) 对于油码头、液化天然气和液化石油气码头尚应考虑缆绳竖向角的要求。

#### 1.3.2 设计水位

根据英标 6349-1: 2003 《Maritime works-Part 1: Code of Practice for General Criteria》<sup>[4]</sup>, 设计水位应取重现期不小于 50 a 的极端高水位, 极端高

水位可能起因于天文潮、风暴潮、假潮和径流。尚应考虑因温室效应产生的海平面上升。

### 1.3.3 设计波浪

根据英标 6349-1: 2003<sup>[4]</sup>, 设计波浪应取重现期不小于 50 a 的最大波高。

### 1.3.4 有掩护码头顶高程设计

根据英标 6349-2: 2010<sup>[5]</sup>, 对于有掩护码头, 码头前沿顶高程至少应在工作水位以上 1.5 m。

此条规定中的设计水位为工作水位, 而非极端高水位。例如在风暴情况下, 码头一般不作业, 而极端高水位是考虑了风暴潮因素的。

而英标中并没有针对开敞式的桩基码头高程设计具体规定。

## 1.4 美国规范

根据美国国防部设计规范 (UFC)《Design: Piers and Wharves》<sup>[6]</sup>, 对于透空式码头, 为了避免上水, 码头顶高程计算如下:

$$E = MHHW + \eta + \Delta \quad (4)$$

式中:  $MHHW$  为平均高高潮;  $\eta$  为波峰面在静水面以上高度,  $\eta = 2/3H_{\max}$ ;  $\Delta$  为富裕高度, 最小取 0.9 m。

## 1.5 德国规范

### 1.5.1 考虑因素

根据德国港口工程协会规范《Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways》<sup>[6]</sup> 来计算码头前沿顶高程, 需要考虑如下因素:

1) 水位及水位变化, 特别是可能的风暴潮潮位和频率, 风引起的增水, 潮汐, 上游水流可能产生的影响, 天气影响引起港口水面的振动 (假潮), 波浪顺岸坡爬高 (马赫效应), 港池内水面共振, 长期而缓慢的水位升高, 海岸长期抬升或下沉;

2) 地下水平均水位, 包括地下水水位升降的频率和幅度;

3) 船舶运输作业、港口设备、货物装卸作业和活荷载;

4) 地面条件、地基土、回填料和可能的土方补偿;

5) 码头设计方案的选择以及环境影响。

为了得出最佳港口作业面高程, 根据港口作业、经济和施工方法的要求, 在作出决定时, 要判断上述因素的相对重要性。

## 1.5.2 设计水位

设计水位中必须选用潮位频率曲线中尽可能多的超过平均高潮位的水位, 并且必须考虑上述“考虑因素”中的第 1) 条因素。

## 1.5.3 设计波浪

设计波浪的重现期的确定应考虑潜在损害、潜在的码头淹没风险或对结构的严重损害可能性等因素。一般选择重现期不小于 50 a 的最大波高作为设计波浪。

## 1.5.4 有掩护码头前沿顶高程设计

在不被高水位淹没的封闭式港口内, 港口作业面高程必须按下述要求高于确定的平均作业水位, 并满足以下要求:

1) 防止在可能出现的最高作业水位时淹没港口陆域;

2) 在不同作业水位条件下, 港区地面均应比港区最高地下水水位高出一适当的高度;

3) 满足装卸作业的要求。

港口地面高程一般应高出平均作业水位 2.00~2.50 m, 至少为 1.50 m。

## 1.5.5 开敞式码头前沿顶高程设计

为了避免码头受到“波浪冲击”的作用, 通常会将平台底面的高程选择在高出设计波浪波峰面高度大约 1.5 m 的位置 (也就是所谓的气隙方法)。设计波浪的波峰面高度可以选取设计风暴时期的最大波高  $H_{\max}$ 。根据 Rienecker/Fenton (1981) 的傅里叶波浪理论, 波浪波峰面高度可以按照 Muttray (2000) 公式来进行估算:

$$H_{cr} = h_{DWL} + H_{\max} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \frac{\Pi}{3\Pi + 1/2} + \frac{1}{6} \frac{\Pi^2}{\Pi^2 + 1/30} \right) \quad (5)$$

$$\Pi = \frac{H_{\max}}{L} \coth^3 \left( \frac{2\pi}{L} d \right) \quad (6)$$

式中:  $H_{cr}$  为水面以上波峰的高度 (含设计水位), m;  $h_{DWL}$  为设计水位, m;  $H_{\max}$  为最大波高, m;  $\Pi$  为非线性参数;  $L$  为波长, m;  $d$  为水深, m。

综上, 桩基码头前沿顶高程可按照式 (7) 计算:

$$E = H_{cr} + h + 1.5 \quad (7)$$

式中:  $h$  为码头上部结构高度。

## 2 各国规范中的桩基码头前沿顶高程设计方法总结及实例分析

各国规范码头高程设计考虑的影响因素基本

一致, 码头顶高程应根据水文气象条件、港口作业要求、结构受力要求、越浪要求等因素确定。对于有掩护码头设计的方法也基本是采用设计水

位加上一定的安全高度。但是对于掩护条件不好的码头, 各国规范采用的计算模式各有不同, 各国规范码头前沿顶高程设计要求汇于表 3。

表 3 各国规范码头前沿顶高程设计要求

Table 3 Design requirements of wharf top elevation in different countries' standards

规范	设计水位	设计波浪	波峰面高度计算	安全富裕/m
中国规范	设计高水位, 对于风暴潮增水情况明显的码头, 应在设计高水位基础上考虑增水影响。	50 a 一遇的 $H_{1\%}$ 波高	微幅波理论公式	0~1.0
日本规范	月平均最高水位	50 a 一遇的最大波高	现场实测资料分析得出的曲线图	无明确规定
英国规范	重现期不小于 50 a 的极端高水位	重现期不小于 50 a 的最大波高	无明确规定	无明确规定
美国规范	平均高高潮	重现期不小于 50 a 的最大波高	$2/3H_{max}$	最小取 0.9
德国规范	潮位频率曲线中尽可能多的超过平均高潮位的水位, 并考虑增水、海平面上涨等因素。	重现期不小于 50 a 的最大波高	傅里叶波浪理论, Muttray(2000)公式	1.5

以孟加拉某 LNG 码头工程为实例, 按照各国规范要求计算码头前沿顶高程。本工程最高天文潮(LAT)5.67 m, 平均大潮高潮位(MHWS)4.63 m, 平均高高潮(MHHW)4.3 m; 50 a 一遇最大波高

( $H_{max}$ )4.9 m, 50 a 一遇波列累积频率 1 % 的波高( $H_{1\%}$ )为 3.7 m; 风暴增水为 2.09 m; 码头采用高桩墩台结构, 上部墩台厚度为 2.0 m。计算结果如表 4 所示。

表 4 孟加拉某 LNG 码头顶高程计算实例

Table 4 Example of top elevation calculation of a Bangladesh LNG Terminal

项目	中国规范	日本规范	英国规范	美国规范	德国规范
设计水位	4.63	5.67	5.67	4.30	5.67
风暴增水	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09
波峰面高度	1.96	3.11	2.64	3.27	2.78
富裕高度	1.00	1.00	1.00	0.90	1.5 0
码头上部结构高度	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
码头设计顶高程	11.70	13.90	13.40	12.60	14.00

注: 目标和英标中明确要求考虑平均海平面上涨的影响, 在计算中考虑这个因素以及安全富裕将富裕高度初步选取为 1.0 m, 其他国家规范对于气隙高度或富裕高度均有明确规定。

计算结果表明中国规范选取的设计水位和设计波浪均较小, 美标设计水位偏低, 但是采用的设计波浪也是最大波高, 而其他国家标准设计水位和设计波浪均较大, 使用国外规范计算得出的码头前沿顶标高均较大, 波浪超越概率较小。

### 3 桩基码头前沿顶高程设计方法总结

对于有掩护码头设计的方法也基本是采用设计水位加上一定的安全富裕高度, 内河或掩护特别良好的码头可以采用这种设计方法。

而对于开敞式的桩基码头, 根据上部结构是否允许受力, 码头顶高程有下列两种设计方法:

1) 气隙方法 (“Air Gap” Approach), 即将桩基码头上部结构布置在水面以上(包含极端情况下的波浪和风暴等因素), 仅允许桩承受波浪力。

2) 允许桩基码头上部结构承受波浪力。

在有条件的情况下, 一般推荐采用气隙方法设计码头高程, 但是由于船舶尺度、装卸要求和与后方衔接等原因, 码头高程经常需要设计的比较低, 需要考虑上部结构承受波浪力。并且, 还需要考虑经济因素, 需要考虑因抬高码头顶高程增加的费用和上部结构按照承受波浪力设计增加的费用或受到风暴影响导致的维修费用之间平衡。

开敞水域的桩基码头顶高程设计应按照下列程序进行设计:

1) 确定影响因素及对应重现期, 环境要求包括波浪、潮汐和增水, 而重现期应明显大于码头的设计使用年限(因为码头高程设计中使用的要素的重现期越大, 则在码头设计使用年限内该

设计要素被超越的可能性越小)。

2) 使用合理的方法确定气隙高度,即波峰面顶面距离码头上部结构下表面的高度。

### 3.1 气隙方法确定桩基码头顶高程设计方法

在确定气隙高度之前,一般需要先确定波峰面高度。

在码头高程设计中,波峰面高度的确定是比较重要的,但是相关的波浪理论较为复杂,手动计算较为困难。随着计算机技术的高速发展,相关研究机构开发了针对不同波浪理论情况的波峰面高度计算软件,例如美国陆军工程师团(USACE)的海岸工程研究中心开发的ACES软件(Automated Coastal Engineering System)。在设计中可以考虑采用国际通用的商业软件进行波峰面高度的计算甚至码头顶高程的计算。

在确定气隙高度时应考虑的影响因素包括超过设计波浪的更大极值波浪、潮汐和风暴增水的估计、结构下沉的估计、大的波浪和结构的相互作用。

当选择气隙高度时应同时考虑其对应的超越概率,据估计当气隙高度被超越时,即使只是超越一点,波浪也能对上部结构造成显著的荷载。美国API规范《Planning, Designing And Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design》<sup>[7]</sup>中采用气隙高度为1.5 m。但是普遍认为这个1.5 m的气隙高度(安全富裕高度)提供了不一致的安全富裕。因为在不同的港址有不同的环境条件,选用相同的气隙高度,对应的气隙高度超越概率必然不同。HR Wallingford公司编制的《Piers, Jettys and Related Structures Exposed to Waves: Guidelines for Hydraulic Loadings》<sup>[8]</sup>中介绍了有关不同气隙高度的波浪超越概率的试验,通过一系列试验证明采用1.5 m气隙高度在不同的港址和不同的分析方法中的超越概率均有较大差别。最终推荐采用年超越概率小于0.000 1的最大波高(重现期为10 000 a),这意味着气隙高度将从1.5 m提高到至少3.5 m。

### 3.2 上部结构允许承受波浪力的桩基码头顶高程设计

当桩基码头上部结构允许承受波浪力时,码头顶高程有以下两种设计标准:

- 1) 主要面板下表面设计在最大波峰面以上
- 2) 所有的管架等在最大波峰面以上

当考虑主要面板下表面设计在最大波峰面以上时,应考虑其他上部结构构件(例如横梁)承受波浪浮托力和侧压力。

当考虑管架等在最大波峰面以上时,码头上部水工结构设计需要考虑承受波浪力,码头上部不允许承受波浪力或不允许腐蚀的设备(如装卸臂和管道等)应布置在高于最大波峰面的操作平台上,或者可以选择将管道埋在管沟中。

系缆墩和靠船墩由于船舶尺度和系泊要求的限制,一般不能采用气隙理论设计,因此需要考虑上部结构承受波浪力,并应考虑在风暴情况下,系缆墩和靠船墩上水后相关设备的防护。

当具有详细的水文气象观测资料时,可以尝试进行概率设计方法,通过选用合适的分布函数,对水文和气象资料进行联合概率分析,进一步对码头顶高程进行优化设计。

#### 参考文献:

- [1] JTS 165—2013,海港总体设计规范[S]. JTS 165—2013, Design code of general layout for sea ports[S].
- [2] Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. Japan: MLIT, 2002.
- [3] BS 6349-2:2010, Maritime works—part 2: Code of practice for the design of quaywalls, Jetties and dolphins[S]. London: BSI, 2010.
- [4] BS 6349-1: 2003, Maritime structures—part 1: code of practice for general criteria, incorporating amendment No. 1[S]. London: BSI, 2003.
- [5] UFC 4-152-01, Design: piers and wharves[S]. USA, 2005.
- [6] Recommendations of the committee for waterfront structures, harbours and waterways[S]. 11th ed. EAU, 2012.
- [7] Planning, designing and constructing fixed offshore platforms: working stress design[S]. 20th ed. API, 2000.
- [8] HR Wallingford. Piers, jettys and related structures exposed to waves: guidelines for hydraulic loadings[M]. United Kingdom: Thomas Telford Publishing, 2004.