

高桩码头结构耐久性及其剩余使用寿命研究

韩雨莘

同济大学水利工程系, 上海

收稿日期: 2023年1月23日; 录用日期: 2023年2月13日; 发布日期: 2023年2月27日

摘要

高桩码头的结构耐久性影响着在役码头的工作状况和剩余使用寿命。本文参考相关工程规范并结合工程实践总结归纳了影响高桩码头结构耐久性的各项物理指标及相应的现场测度方法, 以实现高桩码头结构耐久性的全面评估。通过确定性方法, 即采用工程现场实测的混凝土保护层厚度、环境氯离子浓度和钢筋截面积等关键耐久性指标, 提出了确定性计算方法对高桩码头结构剩余使用年限进行预测, 并基于此高桩码头的后期保养、维护提供具体指导意见。

关键词

高桩码头, 耐久性, 使用年限

Research on Durability and Remaining Service Life of High-Piled Wharf Structure

Yushen Han

Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Jan. 23rd, 2023; accepted: Feb. 13th, 2023; published: Feb. 27th, 2023

Abstract

The structural durability of a high-piled wharf affects the working condition and remaining service life of the wharf in service. Referring to relevant engineering specifications and combining with engineering practice, this paper summarizes various physical indicators and corresponding on-site measurement methods that affect the durability of high-piled wharf structures, in order to achieve a comprehensive evaluation of the durability of high-piled wharf structures. Through the deterministic method, that is, using the key durability indicators such as the thickness of the concrete protective layer, the concentration of environmental chloride ions and the sectional area of reinforcement measured on the project site, a deterministic calculation method is proposed to

predict the remaining service life of the high-piled wharf structure, and based on this, specific guidance is provided for the later maintenance and maintenance of the high-piled pile head.

Keywords

High-Piled Wharf, Durability, Service Life

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国 2019 年颁布的《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476-2019)对耐久性的定义为:使结构达到设计使用年限并具有规定保证率的最低要求。设计中可根据工程的具体特点、当地的环境条件与实践经验以及具体的施工条件等适当提高。

钢筋混凝土结构在腐蚀环境中发生的腐蚀损坏过程是一个不可逆的过程,它导致的结构损坏不同于外部作用力引起的结构损坏,而是由钢筋混凝土材料的物理、化学、生物作用等产生内部应力的结果。对于海港工程混凝土结构而言,其耐久性可定义为:在规定的设计年限内,在海洋环境中,混凝土结构不需要额外维修、加固仍能保证其安全性和适用性的能力。

大量工程实践表明,海港高桩码头在结构耐久性方面面临的问题要远比在结构安全性和结构适用性方面所面临的问题要现实和迫切得多。处于海洋环境中的高桩码头无时无刻不处于海洋腐蚀介质的包围中,其钢筋混凝土构件耐久性腐蚀损坏的后果是非常严重的。在构件钢筋锈蚀的初始阶段,这种损伤难以发现,也不影响码头结构的正常使用,但是,一旦产生钢筋锈胀的顺筋裂缝或混凝土脱落现象时,构件接下来的腐蚀损坏速度是非常快的,产生的危害也相当大,不仅使结构承载力降低,甚至导致结构失稳、失效,使用年限大为缩短。并且腐蚀损坏的修复加固的费用非常高昂,因此科学、合理的结构耐久性检测评估就显得尤为重要。

2. 结构耐久性参数研究

钢筋混凝土结构的主要材料就是钢筋和混凝土,因此对其结构腐蚀的评估重点是钢筋和混凝土,其相关的耐久性参数包括:混凝土裂缝、混凝土强度、混凝土碳化深度、混凝土保护层厚度、混凝土中氯离子含量、钢筋锈蚀电位、锈蚀钢筋截面损失等。

1) 混凝土裂缝宽度和裂缝深度

裂缝是影响钢筋混凝土构件耐久性最主要因素,反映混凝土开裂情况的指标主要包括裂缝长度、宽度、深度、裂缝走向及分布情况。

裂缝宽度和裂缝深度是外观质量检测中的重要指标,也是后期采用何种修复加固方法的重要依据;裂缝深度则是判断构件开裂程度的直接标准,其是否大于混凝土保护层厚度是分析构件耐久性的重要依据。裂缝宽度可采用裂缝测宽仪直接测得,裂缝深度需采用非金属超声波测试仪进行检测。

2) 混凝土强度

强度是混凝土最基本的力学性能指标,同时也是表现混凝土整体性能的综合指标之一。由于在混凝土结构的耐久性设计中往往根据环境作用等级提出混凝土的水胶比限值,而强度在很大程度上反映了混凝土水胶比的大小,同时强度也可以表征混凝土抵抗各种侵蚀破坏的能力。因此,为保证混凝土的耐久性,在我国现行的国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T50476-2019)对处于不同环境类别或环

境侵蚀暴露部位下的混凝土提出了混凝土最低强度等级的要求。

3) 混凝土碳化深度

混凝土碳化是混凝土所受到的一种化学腐蚀。碳化使混凝土的碱度降低,当碳化超过混凝土的保护层时,在水与空气存在的条件下,就会使混凝土失去对钢筋的保护作用,导致钢筋生锈。可见,混凝土碳化作用一般不会直接引起其性能的劣化,对于钢筋混凝土来说,碳化会使混凝土的碱度降低,同时增加混凝土孔溶液中氯离子数量,因而会使混凝土对钢筋的保护作用减弱。

当钢筋钝化膜破坏后,由于混凝土材料本身的不均匀性以及各部位环境条件的差异,造成在钢筋表面各处电位不一致,有电位差,形成微电池。微电池反应生成的产物是铁锈,体积是金属的2~4倍,由于钢筋体积增大,在其周围会引起很大的膨胀力,当膨胀力大于混凝土的抗拉应力时,就会导致混凝土保护层沿钢筋开裂或剥落。混凝土一旦开裂,氧气和水就直接与钢筋表面接触,从而加速了锈蚀。同时由于金属的溶解,使钢筋截面变小,承载能力下降。

4) 混凝土保护层厚度

混凝土主要从两方面对钢筋进行保护:一是混凝土中的氢氧化钙提供的碱性环境,在钢筋表面形成了一层钝化保护膜,使钢筋相对于中性与酸性环境下更不易腐蚀;二是混凝土的保护避免了钢筋与空气或其他介质的直接接触,延缓了钢筋锈蚀的过程。混凝土保护层的厚度直接影响了钢筋锈蚀的速率,一定程度上决定了混凝土的耐久性和使用寿命。

5) 混凝土中氯离子含量

海洋环境中存在大量氯离子,氯离子是引起钢筋锈蚀并导致混凝土结构破坏最主要的原因,氯离子不但能穿透钢筋外面致密的保护膜,降低混凝土pH值,还能增强腐蚀电流,进而加速钢筋锈蚀过程。同时,作为腐蚀介质的氯离子可反复地侵蚀钢筋表面而自身的含量并未消耗,一般可使钢筋截面直径每年因锈蚀而损失达1mm,如果钢筋产生局部坑蚀时,其腐蚀量每年可达2~3mm。

6) 混凝土钢筋锈蚀电位

混凝土钢筋锈蚀电位检测采用钢筋锈蚀测定仪。该参数的测试结果最能直观反应混凝土构件内部钢筋的锈蚀状态,其测试结果可以和构件的表观腐蚀情况、混凝土中氯离子含量等检测结果相互印证,共同反应混凝土构件的腐蚀情况。

7) 锈蚀钢筋截面损失

锈蚀钢筋截面损失检测对象是腐蚀严重的混凝土构件,如保护层混凝土已明显开裂甚至脱落的构件。截面损失检测可分为两种,对于钢筋轻度锈蚀的构件,可以凿除开裂的混凝土后清除钢筋表面浮锈,采用游标卡尺进行现场测量,这种检测方法精度略差,但不影响构件钢筋整体性;对于钢筋的浮锈层较厚或已产生明显坑蚀的钢筋,在进行现场检测的同时,需截取部分锈蚀严重的钢筋,带回实验室进行酸洗后再量取钢筋最小截面尺寸。

以上提及的各项参数的具体测量、评定方法参考相关工程规范[1]-[6]。

3. 结构剩余使用寿命预测

目前,混凝土结构剩余使用寿命预测的常用方法主要归结为两类,即确定性方法和基于可靠度理论的随机性方法。

3.1. 确定性方法

受氯离子扩散渗透作用的钢筋混凝土构件寿命是指结构自混凝土浇筑起、经正常使用、钢筋锈蚀、混凝土开裂、结构失效所经历的时间,主要包括钢筋锈蚀准备阶段经历的时间,钢筋锈蚀发展阶段经历

的时间, 如果采取防腐措施的, 需另外加上防腐涂层的设计使用年限。主要分为以下几个进程:

t_0 ——开始使用~钢筋开始锈蚀阶段: 海水中氯离子渗透进入混凝土, 钢筋周围积聚的氯离子随时间不断增加, 当钢筋表面氯离子含量达到使钢筋锈蚀的临界含量时, 钢筋表面的钝化膜失去保护功能, 钢筋开始发生锈蚀。

t_1 ——钢筋开始锈蚀~保护层锈胀开裂阶段: 钢筋在氧气和水分的共同作用下, 锈蚀进程逐步发展, 随着腐蚀产物的增加, 其体积逐渐膨胀, 直至混凝土保护层产生与钢筋平行的顺筋裂缝。

t_2 ——保护层锈胀开裂功能明显退化阶段: 混凝土保护层开裂破坏, 钢筋直接与氯盐、水分、氧气接触, 腐蚀急剧加速, 其有效截面逐步减少, 直到功能明显退化(通常为钢筋截面面积减小至原截面的 90%)。

a) 钢筋锈蚀准备阶段计算模型

钢筋锈蚀准备阶段是结构耐久性的主要时间, 占到整个结构使用年限的大部分。其计算模型见式(2.1)

$$t_0 = \left(\frac{c}{k_d} \right)^2 \quad (2.1)$$

$$k_{cl} = 2\sqrt{D} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_t}{C_s \gamma} \right) \quad (2.2)$$

式中: t_0 ——钢筋锈蚀准备阶段时间, 即从混凝土浇筑到钢筋开始锈蚀所经历的时间(a);

(注: a——年, 下同)

C ——混凝土保护层厚度(mm);

k_{cl} ——氯离子侵蚀系数($\text{mm}/\sqrt{\text{a}}$);

D ——混凝土有效扩散系数(mm^2/a);

erf ——误差函数;

C_t ——引起混凝土中钢筋发生锈蚀的氯离子含量临界值(%), 以占胶凝材料重量百分比计;

C_s ——混凝土表面氯离子含量(%), 以占胶凝材料重量百分比计;

γ ——氯离子双向渗透系数, 角部区取 1.2, 非角部区取 1.0。

混凝土有效扩散系数取值规定如下:

当结构使用时间达 10 年及以上时, 按实测值取值;

当结构使用时间小于 10 年时, 按式(2.3)计算

$$D = D_t \left(\frac{t}{10} \right)^m \quad (2.3)$$

式中:

D_t ——结构使用时间 t 时的实测扩散系数(mm^2/a);

D ——混凝土有效扩散系数(mm^2/a);

t ——结构使用时间(a);

m ——扩散系数衰减系数, 按表 1 选取。

Table 1. Diffusion coefficient attenuation value

表 1. 扩散系数衰减系数

混凝土类型	扩散系数衰减系数 m
普通硅酸盐混凝土、掺加硅灰的混凝土	0.20
掺加粉煤灰或磨细矿渣粉的混凝土	$0.20 + 0.40 (F/50 + K/70)$

注: F 、 K 分别为粉煤灰和磨细矿渣粉掺量占胶凝材料总量的百分比。

引起混凝土中钢筋锈蚀的氯离子含量临界值取值见表 2。

Table 2. Critical value of chloride ion content causing reinforcement corrosion in concrete (%)

表 2. 引起混凝土中钢筋锈蚀的氯离子含量临界值(%)

大气区	浪溅区			水位变动区
	$0.40 < W/B \leq 0.45$	$0.35 < W/B \leq 0.40$	$W/B \leq 0.35$	
0.55 (占胶凝材料); 0.09 (占混凝土)	0.35 (占胶凝材料); 0.06 (占混凝土)	0.40 (占胶凝材料); 0.07 (占混凝土)	0.45 (占胶凝材料); 0.08 (占混凝土)	0.55 (占胶凝材料); 0.09 (占混凝土)

C_s 取值如下：当结构使用时间达 10 年及以上时按实测取值，当结构使用时间小于 10 年时按表 3 取值。

Table 3. Chloride ion content of concrete surface (%)

表 3. 混凝土表面氯离子含量(%)

水位变动区	浪溅区	大气区
5.0 (占胶凝材料); 0.93 (占混凝土)	4.5 (占胶凝材料); 0.75 (占混凝土)	3.0 (占胶凝材料); 0.50 (占混凝土)

b) 钢筋锈蚀发展阶段计算模型

在环境中的腐蚀成分侵入混凝土，在水和氧气的作用下对钢筋产生锈蚀作用，锈蚀后的钢筋体积膨胀，当钢筋锈胀力大于混凝土的拉应力时，混凝土表面就产生顺筋开裂。

1) 钢筋锈蚀初始期计算模型

t_1 的计算模型见式(2.4)

$$t_1 = \frac{\delta_{cr}}{\lambda_1} \quad (2.4)$$

式中：

t_1 ——自钢筋开裂锈蚀至保护层开裂所经历的时间(a)；

δ_{cr} ——保护层开裂时钢筋临界锈蚀深度(mm)；

λ_1 ——保护层开裂前钢筋平均锈蚀速度(mm/a)。

其中：

$$\delta_{cr} = 0.012 \frac{c}{d} + 0.00084 f_{cuk} + 0.018 \quad (2.5)$$

$$\lambda_1 = 0.0116i \quad (2.6)$$

式中：

c ——混凝土保护层厚度(mm)；

d ——钢筋直径(mm)；

f_{cuk} ——混凝土立方体抗压强度标准值(MPa)；

λ_1 ——保护层开裂前钢筋平均腐蚀速度(mm/a)；

i ——钢筋的腐蚀电流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)， i 取值按表 4。

Table 4. Corrosion current density of reinforcement before cracking of protective layer
表 4. 保护层开裂前钢筋腐蚀电流密度

混凝土品质	浪溅区	水位变动区	大气区
普通混凝土	1.00	0.50	0.50
高性能混凝土	0.50	0.25	0.25

2) 钢筋锈蚀破坏期计算模型

t_2 的计算模型见式(2.7)

$$t_2 = \left(1 - \frac{3}{\sqrt{10}}\right) \frac{d}{2\lambda_2} \quad (2.7)$$

式中:

t_2 ——自保护层开裂到钢筋截面面积减小到原截面 90% 所经历的时间, 即钢筋锈蚀破坏期(a);

d ——钢筋原始直径(mm);

λ_2 ——保护层开裂后钢筋平均腐蚀速度(mm/a), λ_2 取值按表 5。

Table 5. Average corrosion rate of reinforcement

表 5. 钢筋平均腐蚀速度

浪溅区	水位变动区	大气区
0.20/0.05 (板类)	0.06	0.05

c) 使用年限的理论计算基础

1) 根据现场检测结果, 码头各项参数需基本正常, 如果混凝土强度、保护层厚度实测值大于设计值, 计算过程中可按设计值取值; 如果小于设计值, 需按实测值取值。钢筋锈蚀概率小于 10% 的, 钢筋直径可按设计取值, 腐蚀概率大于 90% 或性状不确定的, 需进行现场测量, 钢筋直径按实测取值; 混凝土表面氯离子含量按实测值推算。

2) 构件氯离子散系数, 按氯离子含量实测值计算, 混凝土强度、保护层厚度、钢筋直径等参数均为定值, 不考虑各项指标的随机分布和随时间变化。

d) 结构剩余使用寿命 t_{re} 预测

对于未采取防腐措施的结构, 剩余使用寿命就是结构计算使用年限-已使用的年限; 对于采取防腐措施的结构, 就是结构本体的计算使用年限-防腐措施设计年限-已使用年限。剩余使用寿命能更直观的体现结构“还能用多久”的概念。其计算公式见式(2.8)。

$$t_{re} = t - t' \quad (2.8)$$

式中:

t_{re} ——混凝土结构剩余使用寿命(a);

t ——混凝土结构设计使用年限(a);

t' ——混凝土结构自建成至今已使用的年限(a);

3.2. 基于可靠度理论的随机性方法

在基于可靠度理论的随机性方法进行混凝土耐久性寿命预测时, 需要先确定极限状态方程 Z , 对于钢筋初锈时间的预测, 其极限状态方程 Z 如公式(2.9)和(2.10)所示:

$$Z = C_{cr} - C(x, t) \quad (2.9)$$

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (2.10)$$

式中:

C_{cr} —— 氯离子临界浓度

C_s —— 混凝土表面氯离子浓度

x —— 扩散深度

D —— 表观氯离子扩散系数

t —— 扩散时间

$\operatorname{erf}(g)$ —— 误差函数

对于基于混凝土保护层开裂的极限状态 Z , 可用公式(2.11)表示:

$$Z = w_{cr} - w(t) \quad (2.11)$$

式中:

w_{cr} —— 裂缝宽度限值

$w(t)$ —— 时变裂缝发展模型

3.3. 小结

确定性方法将影响结构构件使用寿命的各项因素均作为确定的量值, 将钢筋锈蚀的时间或混凝土表面裂缝达到某一限值所需要的时间作为混凝土结构剩余使用寿命。基于可靠度理论的随机性方法将影响混凝土剩余寿命的众多因素诸如材料性能、环境条件、荷载状况以及结构响应等都作为随机变量, 而非确定值。基于可靠度理论的随机性方法综合考虑影响混凝土耐久性寿命的多项因素, 相比于确定性方法更加准确, 但由于其考虑的参数较多且参数的分布方式又比较多样, 往往需要借助性能优异的计算机进行大量的数值模拟, 工作量巨大。因此在工程实践中, 对于在役高桩码头的剩余寿命进行预测, 往往更多采用确定性方法进行初步的预测和评估, 随机性方法可在后续的评估中用于对确定性方法的补充及验证[6]。

4. 结论

1) 高桩码头结构耐久性受各种因素影响, 主要取决于结构中混凝土、钢筋的工作状况。在役高桩码头结构的耐久性损失, 一方面来自结构随服役时间增长导致的性能退化, 另一方面来自环境中氯离子对结构的侵蚀作用。

2) 本文提出的确定性年限预测方法, 主要基于混凝土保护层厚度、环境氯离子浓度和钢筋截面积等关键耐久性指标, 适用于对高桩码头结构的剩余使用寿命进行初步的预测和评估。想要达到更准确、全面的估计需要借助随机性方法进行进一步补充。

参考文献

- [1] 行业标准——交通. JTJ/T 272-99 港口工程混凝土非破损检测技术规程[S]. 1991.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1334-2012 混凝土裂缝宽度及深度测量仪校准规范[S]. 2012.
- [3] 行业标准——建筑业. JGJ/T23-2011 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[S]. 2011.
- [4] 中国建筑科学研究院. CECS03: 2007 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S]. 2007.
- [5] 行业标准——建筑业. JGJ/T 152-2019 混凝土中钢筋检测技术规程[S]. 2008.
- [6] 李俊. 南方海港高桩码头钢筋混凝土结构耐久性评估及修复研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.