

· 施 工 ·



高桩码头方桩维修加固技术

徐明磊, 邹建强

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 建设年代较早的混凝土方桩码头, 常规维修加固方法很难保证其设计使用寿命。针对这一问题, 基于桩基氯离子含量分布情况、桩基保护层厚度和桩基剩余使用年限的计算结果, 进行了旧码头桩基耐久性评价研究。采用对旧码头平台方桩桩头局部凿除、重新浇筑, 并创新性地应用安装牺牲阳极以阻止方桩钢筋继续锈蚀的技术方案, 保证其满足耐久性使用要求。实践证明该方案切实可行, 既避免了旧桩基全部拆除、节省了投资, 又成功地将牺牲阳极技术应用于混凝土方桩防腐。

关键词: 高桩码头; 混凝土方桩; 维修加固; 耐久性; 牺牲阳极

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0197-05

Repair and reinforcement technology for square piles of suspended jetty

XU Ming-lei, ZOU Jian-qiang

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: It is difficult to ensure the design service life of the concrete square pile of suspended jetty constructed in the early years by conventional repair and reinforcement methods. For the problem, based on the distribution of chloride ion content in the pile, the pile concrete cover and the calculation results of the remaining service life of the pile, this paper studies the durability evaluation of the pile foundation of the old jetty. By cutting and casting of the pile head of the square pile of the old jetty, and innovative application of the installation of sacrificial anode to prevent the continuous corrosion of square pile reinforcement, the durability requirements are ensured. The construction of this project proves that this method is feasible, which not only avoids demolishing of all the old structure and cost saving, but also successfully applies the sacrificial anode technology to the anti-corrosion of concrete square piles.

Keywords: suspended jetty; concrete square pile; repair and reinforcement; durability; sacrificial anode

目前部分国内建设时间较早的高桩码头在环境与荷载作用下, 构件普遍存在钢筋锈蚀、混凝土开裂、剥落等现象。为适应船舶大型化及码头未来运营需求, 通常会在旧码头前沿新建一装卸平台, 并将港池浚深以停靠更大船舶, 而旧码头平台往往会被全部拆除新建, 造成较大浪费。

对于如何将已有混凝土方桩^[1]维修加固并利用, 保证其使用寿命, 国内外对此研究较少。通常做法是将水位变动区以上桩头部分凿除并重新

浇筑, 但这并不能保证其与码头整体结构的 50 a 寿命。

本文以湛江某旧码头改造项目为例, 基于桩基氯离子含量分布情况、桩基保护层厚度、桩基剩余使用年限的计算结果, 对旧码头桩基耐久性进行评价, 提出对旧码头平台方桩桩头局部凿除、重新浇筑, 并创新性地应用安装牺牲阳极以阻止方桩钢筋继续锈蚀的技术方案, 保证其满足耐久性使用要求。

收稿日期: 2020-06-05

作者简介: 徐明磊(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程设计工作。

1 已有桩基耐久性评价

1.1 工程概况

该码头设计靠泊能力为 2 个 1.5 万 t 杂货码头。码头主体为高桩梁板式结构，岸线总长为 420 m，由 6 个标准结构段、1 个长 46 m 非标准段以及长 14 m 南墩组成，其中标准段长 60 m、宽 29 m(前

承台 14 m,后承台 15 m)，每个标准结构段有 9 个排架，排架间距 7.0 m。前承台每排 6 根 500 mm×500 mm 方桩，后承台每排 4 根 500 mm×500 mm 方桩。两个泊位建成使用至今已有 30 a，码头构件普遍存在钢筋锈蚀及混凝土开裂、剥落现象。码头典型断面见图 1。

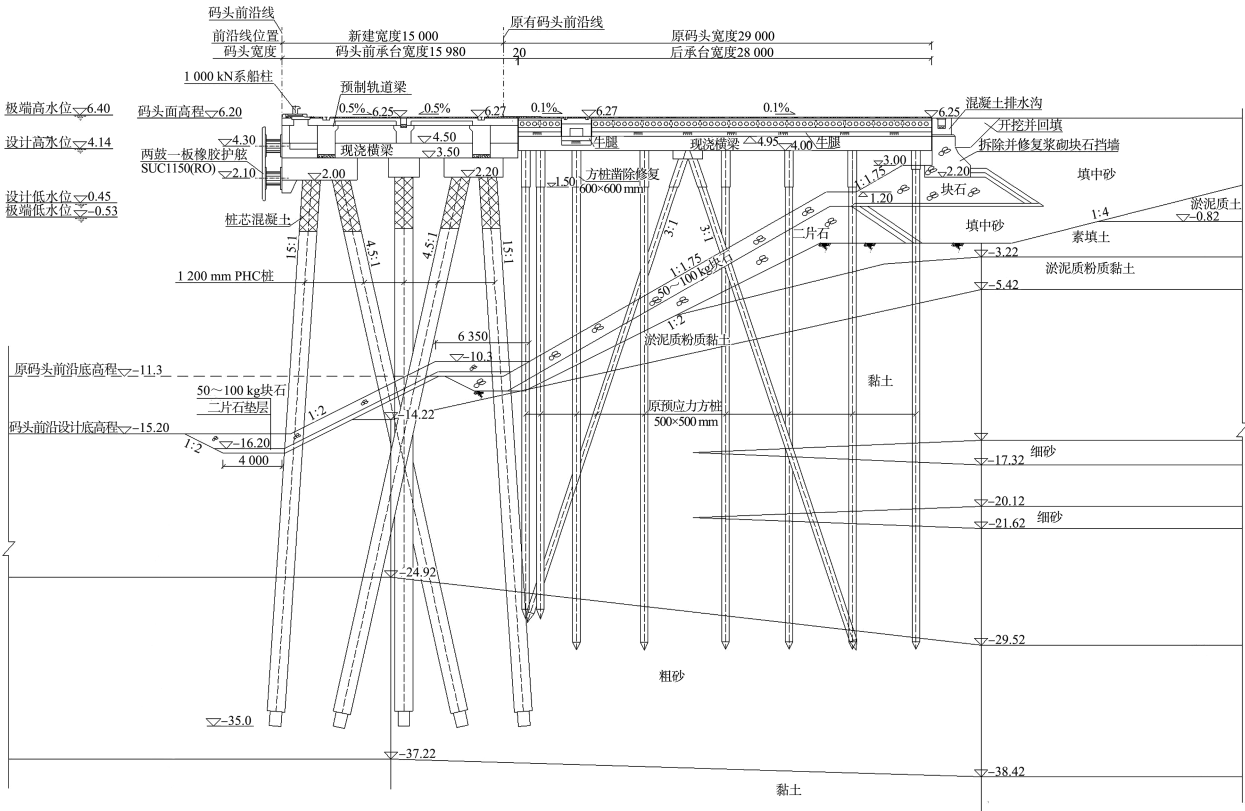


图 1 码头典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

1.2 已有桩基保护层厚度检测

随机选取 30 根码头桩基进行检测，检测部位为基桩处于水位变动区的桩头。每根桩基选取一个面布置 1 个测区，每个测区内布置 9 个测点进行检测。检测结果表明：码头桩基钢筋保护层厚度^[2]平均值在 48~53 mm，测点最大值为 56 mm，最小值为 46 mm。

1.3 已有桩基氯离子含量分布情况检测

检测取样位置位于水位变动区，检测结果表明：距离表面 0~10 mm 范围内，氯离子含量平均值为 2.243 8%；在 10~20 mm 范围内，氯离子含量平均值为 1.683 4%；在 20~30 mm 范围内，氯离子含量为 1.210 4%；在 30~40 mm 范围内，氯离子含量为 0.983 0%；在 40~50 mm 范围内，氯

离子含量为 0.745 2%。

而引起混凝土中钢筋发生腐蚀的氯离子含量临界值 C_l 为 0.55^[3]，结合保护层厚度检测，部分已有桩基在主筋位置附近混凝土中氯离子含量占胶凝材料的质量百分率大于引起构件钢筋锈蚀的临界氯离子含量值，可见，部分已有桩基内钢筋表面氯离子浓度已达到导致钝化膜破坏的临界浓度，桩基中钢筋可能开始锈蚀。

1.4 桩基剩余使用年限计算

码头竣工投入使用已有 30 a，抽检的部分方桩在主筋位置的氯离子含量已经达到钢筋锈蚀的临界值。根据混凝土构件氯离子分布情况检测结果，可计算混凝土构件的使用剩余年限。

海工钢筋混凝土构件中，混凝土内氯离子含

量随深度变化规律符合 Fick 第二定律:

$$\frac{\partial C}{\partial t}=D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

(1)

此方程的解为:

$$C=C_s\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right]$$

(2)

其边界条件为:

$$\begin{cases} C=0 & (x>0, t=0) \\ C=C_s & (x=0, t>0) \end{cases}$$

(3)

式中: C 为 x 深度时的氯离子浓度(%); C_s 为混凝土表面氯离子浓度(%), 以占胶凝材料质量百分率计; x 为距混凝土表面的深度(mm); D 为混凝土有效扩散系数(mm^2/a); t 为扩散时间(a); erf 为误差函数。

经过计算, 可得到构件表面氯离子的表面浓度 C_s 和扩散系数 D , 然后按 JTS 304—2019《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》推算出构件在不同保护层厚度时钢筋锈蚀起始年限, 即锈蚀起始期。钢筋开始锈蚀阶段所经历的时间可按下列公式计算:

$$t_i=\left(\frac{c}{k_{\text{Cl}}}\right)^2$$

(4)

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

(5)

式中: t_i 为从混凝土浇筑到钢筋开始锈蚀所经历的时间(a); c 为混凝土保护层厚度(mm); k_{Cl} 为氯离子侵蚀系数($\text{mm}/\sqrt{\text{a}}$); C_t 为引起混凝土中钢筋发生腐蚀的氯离子含量临界值(%), 以占胶凝材料质量百分率计; γ 为氯离子双向渗透系数, 角部区取 1.2, 非角部区取 1.0。

保护层锈胀开裂阶段所经历的时间按下式计算:

$$t_c=\frac{\delta_{cr}}{\lambda_1}$$

(6)

式中: t_c 为自钢筋开始锈蚀至保护层开裂所经历的时间(a); δ_{cr} 为保护层开裂时钢筋临界锈蚀深度(mm); λ_1 为保护层开裂前钢筋平均腐蚀速度(mm/a)。

保护层开裂时钢筋临界锈蚀深度按下式计算:

$$\delta_{cr}=0.012\frac{c}{d}+0.00084f_{\text{cuk}}+0.018$$

(7)

式中: d 为钢筋原始直径(mm); f_{cuk} 为混凝土立方体抗压强度标准值(MPa)。

保护层开裂前钢筋平均腐蚀速度按下式计算:

$$\lambda_1=0.0116i$$

(8)

式中: i 为钢筋的腐蚀电流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)。

功能明显退化阶段所经历的时间按下式计算:

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

(9)

式中: t_d 为自保护层开裂到钢筋截面面积减小至原截面 90% 所经历的时间(a); λ_2 为自保护层开裂后钢筋平均腐蚀速度(mm/a)。

钢筋混凝土结构使用年限预测按下式计算:

$$t_e=t_i+t_c+t_d$$

(10)

式中: t_e 为钢筋混凝土结构使用年限(a); t_i 为从混凝土浇筑到钢筋开始锈蚀所经历的时间(a); t_c 为自钢筋开始锈蚀至保护层开裂所经历的时间(a)。

混凝土结构剩余使用年限 t_{re} 按下式计算:

$$t_{re}=t_e-t_0$$

(11)

式中: t_0 为混凝土结构自建成至检测时已使用的时间(a)。

桩基剩余使用寿命检测所选取的区域为水位变动区, 根据设计资料及《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》内相关规定, 计算时取 $f_{\text{cuk}}=28\text{ MPa}$ 、 $d=22\text{ mm}$ 、 $\lambda_1=0.5$ 、 $\lambda_2=0.06\text{ mm}/\text{a}$ 、 $C_t=0.55\%$ (按占胶凝材料质量百分率计), 保护层厚度 c 按实测厚度平均值选取, 桩基剩余使用年限范围分布见表 1。

表 1 桩基剩余使用年限范围分布

| t_{re}/a | 桩基数/根 | 百分比/% |
|------------------------|-------|-------|
| $10\leq t_{re}\leq 15$ | 7 | 23.33 |
| $15\leq t_{re}\leq 20$ | 6 | 20.00 |
| $20\leq t_{re}\leq 25$ | 12 | 40.00 |
| $t_{re}>25$ | 5 | 16.67 |

1.5 方桩耐久性评价结果

1) 抽检的大部分桩基在主筋位置附近混凝土中氯离子含量占胶凝材料的质量百分率大于引起构件钢筋锈蚀的临界氯离子含量值, 钢筋可能已

经发生锈蚀。

2)抽检桩基总体使用年限平均值为 49.96 a, 剩余使用年限平均值为 19.96 a; 抽检的部分桩基现使用年限超过了 t_i (从混凝土浇筑到钢筋开始锈蚀所经历的时间), 即桩基处于钢筋混凝土腐蚀破坏的第二阶段, 钢筋开始腐蚀, 随着腐蚀产物的增加, 其体积膨胀, 混凝土保护层将可能产生与钢筋平行的顺筋裂缝。

2 维修加固方案

2.1 总体设计思路

维修加固后码头目标使用年限为 50 a, 码头上部梁板破损较严重, 考虑全部拆除重建, 满足码头后承台耐久性的关键点: 1)解决水位变动区基桩混凝土耐久性问题(氯离子已存在); 2)处于水位变动区并且同时在抛石区内的方桩混凝土耐久性问题。对现有解决耐久性措施对比分析见表 2。

表 2 现有解决措施对比

| 解决方案 | 技术特点 | 缺点 | 可行性分析 | 备注 |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|----------------|
| 增大桩截面或包覆 | 施工较简便 | 难以解决氯离子已存在的问题 | 不适宜 | |
| 电脱盐 | 脱出混凝土中氯离子,使混凝土中氯离子降低至临界氯离子浓度下 | 不适宜水变区,较分散结构实施起来工期较长 | 不适宜 | |
| 混凝土外加电流阴极保护 | 使钢筋停止腐蚀 | 较分散的结构实施难度较大,易造成过保护,后期维护较困难 | 不适宜 | 水下区须同时实施阴极保护 |
| 凿除受污染混凝土 | 使混凝土恢复至初建状态 | 抛石区难以实施 | 较适宜 | 须解决抛石区内基桩耐久性问题 |
| 桩头实施埋入式牺牲阳极 | 使钢筋停止腐蚀 | 造价高,50 a 内至少还需更换 1 次 | 不适宜 | 水下区须同时实施阴极保护 |
| 牺牲阳极(水下区安装) | 使钢筋停止腐蚀 | 保护区域受限,一般保护至表面长期潮湿的部分 | 较适宜 | |

综合比较现有的各种解决措施,本工程的主要技术思路为: 1)码头上部处于浪溅区的梁板结构由于破损较严重,考虑全部拆除新建; 2)对于已有方桩结构,采用新的混凝土替换已经受污染的混凝土,并结合牺牲阳极阴极保护方法保护钢筋,确保方桩耐久性使用要求。见图 2。

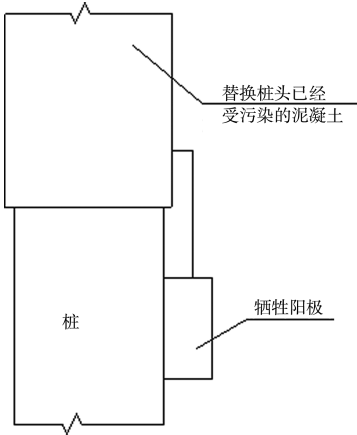


图 2 方桩修复典型断面

2.2 维修加固设计方案

将码头混凝土桩从海侧开始编号, 每一排编号分别对应 A~H、J、K。根据《水运工程结构防

腐蚀施工规范》, 牺牲阳极^[4]保护范围可涵盖水位变动区、水下区及泥下区。由于现场环境所限, 桩凿除混凝土范围难以涵盖整个水位变动区, 这里考虑结合牺牲阳极阴极保护确保其耐久性。

根据检测结果及主要技术思路, 结合现场具体施工环境, 本工程已有方桩维修加固方案为: A~H、J 排桩凿除桩顶至高程 1.5 m 范围的桩头混凝土后, 立模浇注, 并水下安装牺牲阳极块; K 排桩凿除桩顶至抛石面范围的桩头混凝土后, 立模浇注, 并水下安装牺牲阳极块。目标年限为 50 a, 牺牲阳极暂按 25 a 使用寿命设计, 25 a 后根据阳极使用情况更换或增加。预计工期为 6 个月。

2.2.1 桩头混凝土凿除

1)搭建工作平台。2)凿除桩头混凝土前, 在凿除范围的底部切割 3 cm 深、2 cm 宽的槽, 以保护凿除范围外的基桩混凝土不受影响。3)凿除桩头混凝土。如发现钢筋锈蚀, 须凿去锈蚀钢筋周围 10~20 mm 混凝土, 锈蚀钢筋应先除去钢筋浮锈, 然后用淡水对混凝土和钢筋进行彻底冲洗, 彻底除去其表面的盐份。4)立模板。在待修复的

部位采取立钢模板浇注修补混凝土, 浇注混凝土厚度比桩原有保护层厚度多 2 cm, 修补混凝土掺入阻锈剂。5) 桩顶空隙处用聚合物水泥砂浆进行填充修补。6) 对修补后的结构施加涂层保护, 涂层^[5]设计使用年限为 10 a。

2.2.2 牺牲阳极块水下安装

A~H、J、K 排桩须同时采用水下安装牺牲阳极块进行保护, 每根桩安装 1 块阳极。

牺牲阳极设计参数如下: 1) 保护电流密度: 水位变动区 20 mA/m²; 水下及泥下区 15 mA/m²。2) 初始设计保护年限: 25 a。3) 牺牲阳极采用铝-锌-铜-硅, 并符合 GB/T 4948—2002《铝-锌-铜系合金牺牲阳极》的要求。

牺牲阳极安装如下: 1) 牺牲阳极安装在极端低水位下 1 m。2) 凿除桩头混凝土后, 焊接电连接筋, 确保桩内钢筋电连接。3) 凿除桩头混凝土后, 从桩头钢筋焊接出 1 根钢筋作为阳极的连接筋, 使桩内钢筋与阳极电连接。4) H、J 和 K 排桩牺牲阳极放置在抛石面, A~G 排桩牺牲阳极固定在桩上, 从桩头钢筋焊接出的电连接筋与钢箍焊接, 见图 3。

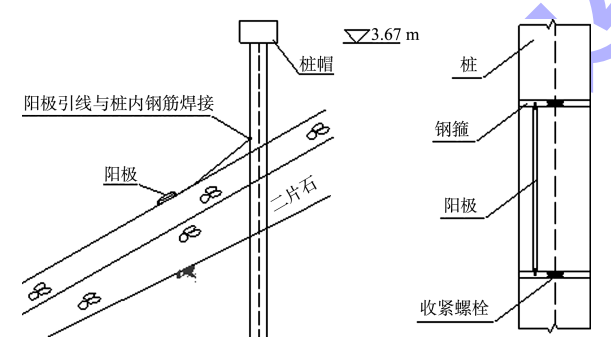


图 3 阳极安装

3 结语

1) 通过考虑荷载与环境腐蚀作用, 基于桩基氯离子含量分布情况、桩基保护层厚度、桩基剩余使用年限的计算结果, 对旧码头桩基耐久性进行评价, 极大提升了码头方桩耐久性设计的可靠性, 对于确保工程的 50 a 设计使用年限、保证结构物在服役期内安全、经济地营运将发挥重要作用。

2) 本文提出的对旧码头平台方桩桩头局部凿除、重新浇筑, 并创新性地应用安装牺牲阳极以阻止方桩钢筋继续锈蚀的技术方案, 保证其满足耐久性使用要求。实践证明该方案切实可行, 既避免了旧桩基全部拆除, 节省了投资, 又成功地将牺牲阳极技术应用于混凝土方桩防腐, 具有重要借鉴意义。

参考文献:

[1] 黄金保, 杨秀玲. 预应力方桩混凝土施工质量的控制要点[J]. 水运工程, 2019(S1): 82-86.
[2] 涂启华, 唐光星, 翁龙, 等. 海港工程钢筋保护层厚度分析[J]. 水运工程, 2014(4): 43-47.
[3] 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTJ 304—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
[4] 杨照兵, 陆周, 宋双. 牺牲阳极阴极保护技术在码头桩基工程中的应用[J]. 水运工程, 2011(7): 95-99.
[5] 陆瑞兴, 岑文杰. 湛江港一区南一期突堤码头维修设计[J]. 水运工程, 2006(6): 30-33.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。