



老旧码头混凝土桩基的牺牲阳极阴极保护方案 研究与应用

唐光星¹, 李海洪¹, 刘虎军¹, 范志宏^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080)

摘要: 保护电流密度的选取是钢筋混凝土阴极保护系统设计的关键参数, 而对处于潮湿环境受污染混凝土如何选取保护电流密度参数, 目前国内还没有相关研究。基于实验室环境进行阴极保护电流密度的研究, 确定潮湿环境被盐污染混凝土阴极保护电流密度参数, 在此基础上形成一套系统的混凝土桩基牺牲阳极阴极保护设计方案, 并应用于湛江港某码头改建工程中, 解决桩基混凝土氯离子含量高、钢筋腐蚀严重的问题。结果表明, 此方案保护效果良好, 对潮差区的保护距离能延伸至水面以上1 m, 对泥下区的保护距离能延伸至泥面以下18 m以上。

关键词: 混凝土桩基; 阴极保护; 耐久性; 电流密度

中图分类号: U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0023-05

Research and application of sacrificial anode cathodic protectionscheme for concrete pile of old wharf concrete pile

TANG Guang-xing¹, LI Hai-hong¹, LIU Hu-jun¹, FAN Zhi-hong^{1,2}

(1.Engineering Technology Research Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519080, China)

Abstract: Current density is the key parameter of cathodic protection system design for the reinforced concrete, but how to select the current density parameter for contaminated concrete in a wet environment, there is no relevant research in China. We carry out the research of current density based on laboratory condition, determine the current density parameter of the concrete contaminated by salt in a wet environment, on this basis can form a design of reinforced concrete sacrificial anode cathodic protection system, and apply the scheme in a reconstruction wharf project in Zhanjiang Port to solve the problems of high chloride ion content in pile foundation concrete and serious corrosion of steel bars. The results show that the protective effect of this scheme is good. The protection distance of the intertidal zone can extend to 1 m above the water, protection distance of the under mud zone can extend to 18 m under the mud.

Keywords: concrete pile; cathodic protection; durability; current density

在对老旧码头进行改造、加固或升级工程中, 为保证混凝土桩基础的剩余使用年限达到设计要求, 须对混凝土桩基进行耐久性修复。参考《港口水工建筑物修补加固技术规范》^[1], 对修补后目标使用年限大于15年的混凝土桩基础, 除对裂缝进行耐久性修复外, 还需要采用电化学脱盐处理、

外加电流阴极保护等方法^[2]。其中, 电化学脱盐法实施成本较高, 且对于水下部分的混凝土桩基实施难度大, 工程应用较困难。对于受氯盐污染的混凝土阴极保护系统设计, 其关键参数是保护电流密度。混凝土中氯离子含量、钢筋腐蚀状态及环境的温湿度均对混凝土中钢筋达到阴极保护所需

的电流密度有一定影响，故受氯盐污染的混凝土保护电流密度取值与新建工程混凝土有很大区别。科研人员已对大气区受氯盐污染混凝土的阴极保护参数进行了研究^[3-4]，但对于水位变动区和水下区受氯盐污染的混凝土阴极保护系统设计，目前国内缺少相关的研究，也缺乏相关的规范指引。

本文结合湛江某杂货码头改造工程，对混凝土桩牺牲阳极阴极保护电流密度参数进行研究，确定被污染混凝土阴极保护电流密度关键参数，形成一套系统的、比较成熟的混凝土桩基阴极保护设计方案，可为类似的混凝土桩牺牲阳极阴极保护设计提供参考。

1 被盐污染混凝土的阴极保护电流密度研究

1.1 试验设备及原料

Cu/CuSO₄饱和硫酸铜电极，恒电位仪，10 mm 宽的 MMO 网状辅助阳极，铜导线，电流表，Q235 钢筋，混凝土。

1.2 混凝土配合比

混凝土配合比设计资料见表 1。其中混凝土水胶比为 0.44，胶凝材料总量 380 kg，砂率 40%。

| 表 1 混凝土配合比 | | | | | | | kg/m ³ |
|------------|-----|-----|---------|----------|------|-------|-------------------|
| 水泥 | 粉煤灰 | 砂 | 碎石 | | 减水剂 | 水 | |
| | | | 5~10 mm | 10~20 mm | | | |
| 266 | 114 | 732 | 330 | 768 | 4.56 | 167.2 | |

1.3 阴极保护电流密度试验试件

试件外观及钢筋布置设计见图 1。试件中两根钢筋通过焊接铜导线实现电连接。焊接处需要环氧材料密封。辅助阳极正对钢筋，辅助阳极和钢筋之间通过厚度为 7 mm 的水泥垫片实现电绝缘。两根辅助阳极之间通过点焊钛导电条实现电连接。

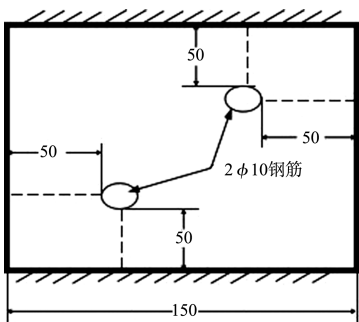


图 1 阴极保护电流密度试件钢筋布置 (单位: mm)

通过在混凝土试件中掺加 2%、3%、4% 含量 (占胶凝材料的质量比) 的 NaCl，在相对湿度为 90% 的潮湿环境中放置不同时间，得到不同腐蚀状态的钢筋混凝土，从而研究不同腐蚀状态下钢筋所需阴极保护电流密度的大小。

首先用恒电位仪对试件施加电流密度为 1 mA/m² 的恒电流，逐渐增大电流，记录电流极化过程中钢筋的瞬断电位。

对于潮湿环境中混凝土的钢筋腐蚀可以通过半电池电位法检测钢筋的腐蚀状态。半电池电位与腐蚀程度的对应关系见表 2^[5]。

表 2 半电池电位与腐蚀程度的对应关系

| 半电池电位(SCE)/mV | 半电池电位(CSE)/mV | 腐蚀程度 |
|---------------|---------------|------|
| <-426 | <-500 | 严重腐蚀 |
| -426~-<-276 | -500~-<-350 | 高度腐蚀 |
| -276~-<-126 | -350~-<-200 | 中度腐蚀 |
| >-126 | >-200 | 轻微腐蚀 |

注: SCE 为采用饱和甘汞电极作为参比电极进行测量; CSE 为采用饱和硫酸铜电极作为参比电极进行测量。

混凝土中的 NaCl 含量分别为 2%、3%、4% 时，不同腐蚀状态的钢筋所需电流密度见表 3，表中电流密度值为极化 1.5 h 后满足极化电位衰减值不小于 100 mV 的判断准则^[6]所附加的保护电流大小。

表 3 不同腐蚀状态钢筋阴极保护数据

| 混凝土中 NaCl 含量/% | 自然腐蚀电位 (SCE)/mV | 所需的电流密度/(mA·m ⁻²) |
|----------------|-----------------|-------------------------------|
| 2 | -111 | 1.6 |
| | -254 | 4.5 |
| | -353 | 8.3 |
| | -441 | 15.9 |
| 3 | -118 | 1.5 |
| | -393 | 12.9 |
| | -491 | 15.1 |
| | -520 | 18.6 |
| 4 | -102 | 1.0 |
| | -225 | 2.5 |
| | -330 | 8.8 |
| | -457 | 16.0 |

由表 3 可看出，在轻微腐蚀状态下，钢筋达到极化 100 mV 的阴极保护所需电流密度均小于 2 mA/m²。对于中度腐蚀的，即钢筋自然腐蚀电位在 -276~-126 mV 之间的，钢筋达到极化 100 mV

的阴极保护所需电流密度均小于 5 mA/m²。在高度及严重腐蚀状态下, 钢筋达到极化 100 mV 的阴极保护所需电流密度均在 5~20 mA/m²。电位值在负于-426 mV 的情况下, 钢筋达到极化 100 mV 的阴极保护所需电流密度均大于 15 mA/m²。

因此, 随着钢筋腐蚀程度的增加, 钢筋达到极化 100 mV 的阴极保护所需电流密度也随之增加。需要指出的是, 阴极保护电流密度与测试的自然腐蚀电位绝对值并不是严格成比例关系, 这是因为自然腐蚀电位值测量本身带有一定的不确定性。在阴极保护设计时, 需要结合构件的腐蚀电位、混凝土中氯离子含量、构件外观状态等综合考虑, 确定设计电流密度参数。

2 工程应用

湛江某码头原为 2 个 1.5 万吨级杂货船泊位, 本工程将其改造为 1 个 10 万吨级散货船泊位。改建后的码头后承台是由原码头前、后承台进行改造而成。码头改造须将原码头前后承台梁板拆除并新建梁板结构, 桩基尽量利用原有桩, 桩基础为边长 500 mm 混凝土方桩, 主筋为 8 根直径 22 mm 螺纹钢。

在桩身潮差区取样进行混凝土中氯离子渗透扩散情况检测, 得到桩基主筋位置附近混凝土中氯离

子占胶凝材料质量百分比的最大值为 4.2%、最小值为 2.9%。钢筋腐蚀电位检测结果显示桩主筋钢筋电位值均负向大于-350 mV (Cu/CuSO₄ 饱和硫酸铜电极), 腐蚀程度为高度腐蚀以上。根据耐久性寿命预测计算报告中的结论, 显示桩身剩余使用年限约为 19 年。为了保障改建后的水工建筑物的 50 年设计使用年限, 考虑对桩基水位变动区、水下及泥下区采取牺牲阳极阴极保护措施, 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。初始设计保护年限为 25 年, 而后根据阳极的使用情况, 进行更换或增加。

2) 阳极型号及数量。采用铝-锌-铜-镁-钛合金, 铝阳极尺寸见表 4。其中 I 型铝合金阳极, 每块阳极净质量 53.3 kg, 毛质量 65.5 kg, C~E 排桩每根桩布置 1 块, F 排桩布置 2 块; II 型铝合金阳极, 每块阳极净质量 91.2 kg, 毛质量 105.6 kg, A、B 排桩每根桩布置 2 块。将每根桩内钢筋焊接在现浇横梁内厚 4 mm、宽 40 mm 的扁钢上, 确保每排桩内所有钢筋电连接。阳极布置见图 2。

表 4 牺牲阳极尺寸

| 型号 | 长/mm | 宽/mm | 高/mm |
|-----------|------|---------------|------|
| I 型铝合金阳极 | 600 | 上宽 220、下宽 240 | 160 |
| II 型铝合金阳极 | 900 | 上宽 220、下宽 240 | 180 |

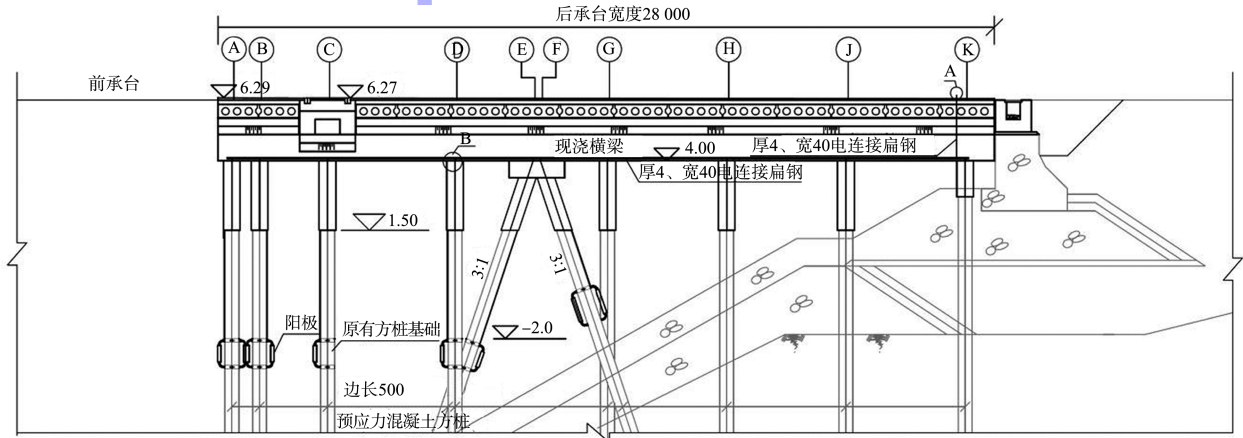


图 2 阳极布置 (尺寸: mm; 高程: m)

3 工程应用及效果评价

3.1 保护效果评价

工程完工 5 年后, 对阴极保护系统的保护效果做实测验证。采用 Cu/CuSO₄ 参比电极, 实测各桩的电

位值, 参考 ISO 12696^[7], 相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极, 瞬断电位应低于-790 mV, 但不得负于-1 100 mV (普通钢筋) 或-900 mV (预应力钢筋)。实测的各桩电位值见表 5 (表中为实测的 36 排架电位值)。

表 5 实测各桩电位值

| 轴号 | A | B | C | D | E | F | G | H | J | K |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 电位值/mV | -922 | -933 | -948 | -910 | -931 | -907 | -842 | -857 | -848 | -843 |

由表 5 可知，各桩电位都满足-790 mV 电位标准，桩内钢筋处于良好的保护状态。值得注意的是，排架后排的 G~K 轴桩身没有焊接阳极块，而是通过扁钢进行电连接，实测数据显示 G~K 轴桩身钢筋电位值虽然略有上升，但都满足-790 mV 电位标准。

3.2 潮差区保护面积研究

国外实验室的研究成果显示，水下区阴极保护可以扩散至水面以上大约 1.0 m 的高度，本文对其工程实践效果进行研究。

选择同一根桩，在相邻两个高潮段和低潮段对其潮差区的保护电位进行测量，测量采用 Cu/CuSO₄ 参比电极，以水面为基准，在桩基上沿竖向每间隔 10 cm 布置一个测点。经查询潮位表，检测当天高潮为 260 cm，低潮位为 80 cm，潮差 180 cm，测量结果见表 6。

表 6 36 排架 C 桩基阴极保护电位测量结果

| 相对于水面高程/cm | 高潮电位值/mV | 低潮电位值/mV |
|------------|----------|----------|
| 10 | -865 | -983 |
| 20 | -844 | -979 |
| 30 | -833 | -973 |
| 40 | -832 | -961 |
| 50 | -821 | -939 |
| 60 | -824 | -914 |
| 70 | -815 | -900 |
| 80 | -817 | -868 |
| 90 | -802 | -817 |
| 100 | -791 | -810 |
| 110 | -759 | -804 |
| 120 | -710 | -816 |
| 130 | -630 | -820 |
| 140 | -583 | -795 |

由表 6 可知，潮差对保护电位的影响非常显著。主要表现在 2 个方面：1) 低潮时，由于保护面积有所减少，距离水面相同高度，其保护电位值普遍负移 100 mV 左右；2) 潮差区保护距离也有

所变化，根据-790 mV 准则，高潮时其有效保护距离在 100 cm 左右，而低潮时可以延伸至 140 cm 左右。

实测结果表明，无论涨退潮，水下阴极保护对潮差区的保护距离均能延伸至水面以上 1m。

3.3 泥下区保护范围研究

泥下钢结构的阴极保护的面积计算问题比较复杂。对于水下海工结构特别是桩基结构，泥下区是一个非常笼统的称呼。事实上，桩基不仅包含传统意义上的电阻率较小的淤泥区，往往还有相当长度在砂砾区、风化岩区。对于泥下区的计算长度，现有大部分规范默认是整个桩长，甚者有规范要求将嵌岩段也计算在内。在《港工设施牺牲阳极保护设计和安装》^[8] 中，将泥下区钢桩基阴极保护计算面积按泥下区划分为 10 m 以内和超过 10 m 的部分，从而采取不同的设计保护电流密度。这是一个比较合理的规定，因为牺牲阳极的电压差有限，其在泥下区高电阻率的环境下，显然电流发散的长度有限。此外，随着入泥深度的加大，其含水量及含氧量必然下降，其腐蚀性也必然下降，需要的保护电流必然减少。而相当于与腐蚀介质直接接触的泥下钢结构，钢筋混凝土结构在泥下区的腐蚀性因为有混凝土保护层的存在则更为微弱。

本文选取一个排架，采用电流钳表对各桩的阳极电流进行实测，设计保护电流与实测值对比见表 7，实测的排架总电流值为 2 280 mA。然后按下式计算设计总电流值：

$$I = \sum I_n = \sum i_n S_n \tag{1}$$

式中：I 为总保护电流(mA)；I_n 为分区域的保护电流(mA)；i_n 为分区域的面积(m²)，可根据实测的总电流值和设计电流密度推算；S_n 为分区域的保护电流密度(mA/m²)。

表 7 按泥下区保护长度 18 m 计算的设计保护电流值与实测值对比

| 区域 | 设计电流密度/ (mA·m ⁻²) | 设计保护电流/mA | | | | | | | | | |
|---------|----------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | A 轴 | B 轴 | C 轴 | D 轴 | E 轴 | F 轴 | G 轴 | H 轴 | J 轴 | K 轴 |
| 水位变动区 | 20 | 40.78 | 40.78 | 40.78 | 40.78 | 42.99 | 42.99 | 40.78 | 40.78 | 40.78 | 40.78 |
| 水下区及泥下区 | 15 | 238.31 | 232.71 | 220.59 | 196.35 | 204.71 | 174.31 | 170.24 | 148.79 | 132.94 | 117.09 |
| 实测值 | — | 520.00 | 420.00 | 250.00 | 200.00 | 320.00 | 570.00 | — | — | — | — |

按泥下区保护长度 18 m 计算的各桩保护面积见表 8, 按此面积计算得到的总电流值为 2 248.31 mA, 与实测总电流值接近。因此在不考虑其他因素影响的情况下, 可知泥下区的保护长度应能达到 18 m 左右。

表 8 按泥下区保护长度 18 m 计算的各桩保护面积

| 轴号 | 水位变动区 保护长度/m | 水位变动区 保护面积/m ² | 水下及泥下区 保护长度/m | 水下及泥下区 保护面积/m ² |
|----|-----------------|------------------------------|------------------|-------------------------------|
| A | 3.69 | 2.04 | 28.75 | 15.89 |
| B | 3.69 | 2.04 | 28.07 | 15.51 |
| C | 3.69 | 2.04 | 26.61 | 14.71 |
| D | 3.69 | 2.04 | 23.69 | 13.09 |
| E | 3.89 | 2.15 | 24.69 | 13.65 |
| F | 3.89 | 2.15 | 21.03 | 11.62 |
| G | 3.69 | 2.04 | 20.54 | 11.35 |
| H | 3.69 | 2.04 | 17.95 | 9.92 |
| J | 3.69 | 2.04 | 16.04 | 8.86 |
| K | 3.69 | 2.04 | 14.12 | 7.81 |

4 结论

1) 本文基于实验室环境对被盐污染混凝土的阴极保护电流密度进行研究, 结果表明: 在混凝土轻微腐蚀状态下, 钢筋达到极化 100 mV 的阴极保护所需电流密度均小于 2 mA/m²; 对于中度腐蚀的, 钢筋达到极化 100 mV 的阴极保护所需电流密度均小于 5 mA/m²; 在高度及严重腐蚀状态下, 钢筋达到极化 100 mV 的阴极保护所需电流密度均在 5~20 mA/m²。

2) 根据实验室研究成果, 针对被污物的混凝土桩基础钢筋采用了牺牲阳极阴极保护方案, 采用水位变动区 20 mA/m²、水下及泥下区 15 mA/m² 的电流密度, 现场实测各桩电位都满足 -790 mV

电位标准, 达到良好的保护效果。

3) 对被污染的混凝土桩基础钢筋采用牺牲阳极阴极保护方案, 无论涨退潮, 水下阴极保护对潮差区的保护距离均能延伸至水面以上 1 m。

4) 牺牲阳极阴极保护方案对钢筋混凝土桩基础泥下区的阴极保护区域可达到泥下 18 m 以上。

参考文献:

[1] 中交四航工程研究院有限公司. 港口水工建筑物修补加固技术规范: JTS 311—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

[2] 黄君哲, 岑文杰, 潘峻, 等. 海水环境混凝土结构损坏修补技术探讨[J]. 水运工程, 2010(10): 12-15.

[3] 房毅, 陈龙, 方翔. 新建混凝土结构外加电流阴极保护的研究[J]. 广东化工, 2013, 40(1): 35-37.

[4] 陈龙, 李海洪, 方翔. 大气区被氯盐污染的钢筋混凝土外加电流阴极保护电流分散的研究[J]. 水运工程, 2012(8): 38-42.

[5] American Society of Testing Materials. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete: ASTM C876: 1999[S]. West Conshohocken: ASTM, 1999.

[6] 南京水利科学研究院. 海港工程钢筋混凝土结构电化腐蚀防腐技术规程: JTS 153-2—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[7] European Committee for Standardization. Cathodic protection of steel in concrete: ISO 12696: 2012[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2012.

[8] 中国船舶重工集团公司第七二五研究所. 港工设施牺牲阳极保护设计和安装: GJB 156A—2008[S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.

(本文编辑 王璁)