



渗透型涂层在高桩码头上部结构中的应用

杨林虎¹, 吴 澎¹, 武 政¹, 戴建国²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 香港理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘要: 依托某高桩码头工程, 采用毛细吸水率、氯离子电通量、氯离子扩散深度3个指标, 对码头上部结构实施渗透型涂层的效果进行取样检测和评价。结果表明: 涂刷渗透型硅烷后, 芯样的毛细吸水率降低90%以上; 氯离子电通量处于极低甚至可忽略水平; 氯离子扩散深度降低60%以上。因此, 采用渗透性涂层后码头上部结构构件的耐久性能得到显著提升。

关键词: 高桩码头; 渗透型涂层; 毛细吸水率; 电通量; 扩散深度; 耐久性

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0050-05

Application of permeable coating in upper structure of high-pile wharf

YANG Lin-hu¹, WU Peng¹, WU Zheng¹, DAI Jian-guo²

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

2. Shenzhen Research Institute of the Hong Kong Polytechnic University, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Permeable coating is one of the ideal coatings to improve the concrete durability in view of balancing concrete's "breathing" ability and the effect of water-proof. Three indicators of capillary absorptivity, chloride ion flux and chloride diffusion depth were used to test and estimate the effect of the permeable coating of a high-pile wharf, on the upper structures of which the permeable coating was applied. Results show that after the permeable coating is applied on the upper structures, the capillary absorptivity of the specimens is decreased by 90%, chloride ion flux is reduced to a level that is extremely low and could be even ignored, and chloride diffusion depth is decreased by over 60%. Therefore, a conclusion can be drawn that the permeable coating can enhance the durability of upper structures of high-pile wharves significantly.

Keywords: high-pile wharf; permeable coating; capillary absorptivity; chloride ion flux; chloride diffusion depth; durability

氯离子侵蚀带来的钢筋锈蚀是影响海洋环境下混凝土结构耐久性最主要的因素。据世界各国的统计, 每年因腐蚀所造成的经济损失约占国民经济生产总值(GDP)的2%~4%, 我国海洋环境下由钢材腐蚀所带来的损失每年也高达1 000亿美元^[1]。对处于严酷海洋环境下的港口钢筋混凝土结构, 除了改善混凝土质量以外, 对其实施附加措施、进行主动保护是提高结构耐久性、降低结构全寿命成本的一种行之有效的方法^[2]。特别是

近二三十年来, 随着港口工程的全寿命设计理念逐步得到重视, 混凝土表面防腐技术在工程建设中日益重要。JTJ 275—2000《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》^[3]中有一章专门描述附加防腐措施, 其中, 对混凝土表面进行涂层是混凝土附加防腐措施中最常见的方法^[4-7]。

根据作用原理不同, 码头结构的混凝土表面防护施工技术主要有3种^[8]: 1) 表面成膜型涂层(如环氧树脂涂层), 即在水泥基材料表面形成一

收稿日期: 2015-09-29

作者简介: 杨林虎(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港口工程结构全寿命设计与耐久性研究。

层连续的高分子材料或水泥基材料涂层而起到防护作用;2)堵塞气孔型涂层(如基于水玻璃的防护技术),即通过涂料堵塞表层基体的毛细孔而达到防护作用;3)渗透型涂层,即采用硅烷浸渍对基体表面进行处理,硅烷由基体表面渗入内部孔隙,在水的作用下水解产生硅醇,硅醇与硅酸盐基体内部羟基反应并在其孔隙壁上形成憎水膜(硅氧烷链)而防水,但不堵塞其毛细孔隙。由于前2种表面处理方式会阻碍孔隙中的水汽向外扩散,因而会导致其它耐久性问题^[9]。第3种渗透型涂层技术被认为是平衡混凝土材料透气性和防水性的最理想防水措施^[10]。该技术中混凝土毛细孔表面的憎水结构阻止了外部的水分侵入,但可以允许混凝土内部水分的蒸发,保持了混凝土的“呼吸”功能。该技术与传统涂层施工相比,施工简单快速,大大缩短工期和降低施工成本,且不

改变混凝土的外观。近年来,对水泥基材料进行硅烷表面浸渍憎水处理已经被广泛应用于沿海混凝土工程,目前在美国,欧洲、日本及我国得到越来越多的认可和应用^[11]。本文依托某高桩码头工程,检测经渗透型涂层处理的码头面板、梁和桩帽芯样的吸水性能、氯离子电通量和氯离子扩散深度,分析渗透型涂层在该工程上的实施效果。

1 工程概况

该工程为2012年11月新建码头,位于深圳港妈湾港区。设计岸线长为200 m,陆域纵深为300 m。港址地处亚热带,属南亚热带海洋性季风气候,年平均气温为24.0℃,年最高气温为36.7℃,最低气温为2.7℃。码头采用高桩梁板式宽承台结构,桩基结构采用预应力高强混凝土(PHC)桩(图1)。

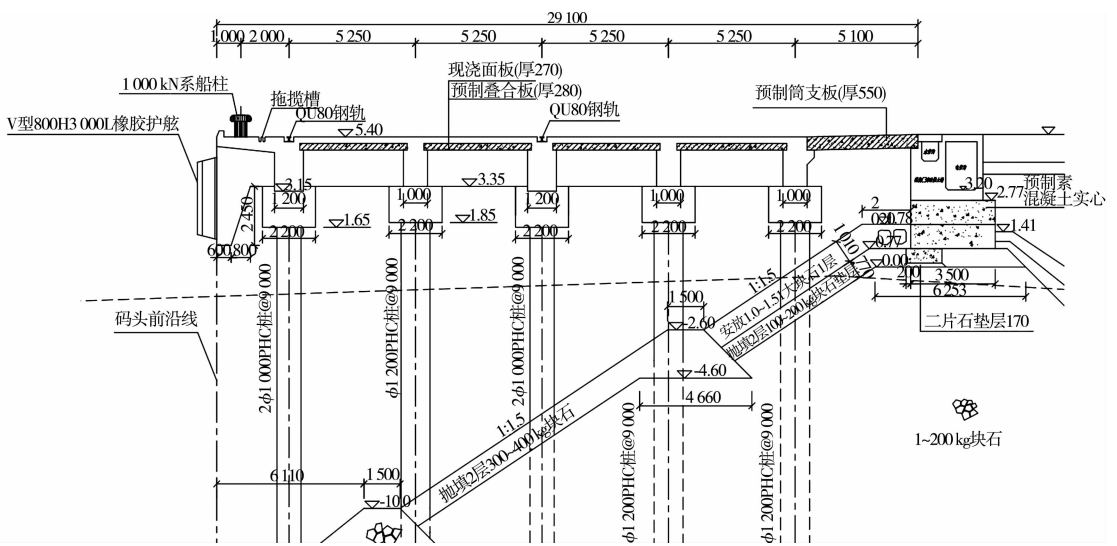


图1 码头结构断面(高程:m;尺寸:mm)

码头上部结构采用C45高性能混凝土。设计中为提高上部结构混凝土的耐久性,对混凝土梁、面板、桩帽涂刷了渗透型硅烷防腐涂料(SP-603硅烷乳胶)。施工方法执行标准JTJ 275—2000《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》。施工注意事项如下:1)喷涂硅烷的混凝土龄期不应少于28 d,或混凝土修补后不少于14 d。2)喷涂前对混凝土进行表面处理,清除表面碎屑及不牢固的

附着物,当清除工作需要使用饮用水冲洗时,应在冲洗后自然干燥72 h。在水位变动区喷涂时,应在海水落到最低潮位混凝土表面看不到水时喷涂硅烷,以尽量延长喷涂前的自然干燥时间。喷涂前保持混凝土表面为面干状态。3)喷涂硅烷连续实施,使被喷涂表面达到饱和溢流状态。在立面上,应自下而上地喷涂,使被涂立面至少有5 s保持“看上去是湿的”的状态;在顶面或底面上,

都至少有 5 s 保持“看上去是湿的镜面”的状态。每遍喷涂量为 300 mL/m²，喷涂 2 遍。2 遍之间的间隔时间至少为 6 h。

2 试验方法

选取构件受力较小的部位，通过雷达钢筋定位仪避开钢筋位置，按照 CECS 03:2007 《钻芯法检测混凝土强度技术规程》，在混凝土构件上钻芯取样，对芯样加工处理后，进行吸水性能试验、氯离子电通量试验和氯离子扩散深度试验，以评价涂层系统的实施效果。试件尺寸、来源及数量见表 1。

表 1 试件尺寸、来源与数量

试验名称	试件尺寸 ($\phi \times h$) / (mm × mm)	试件来源-数量 (个)
吸水性能试验	50 × 40 70 × 40	面板 - 10, 梁 - 30, 桩帽 - 29
氯离子电通量试验	100 × 50	梁 - 10, 桩帽 - 10
氯离子扩散深度试验	100 × 60	梁 - 9, 桩帽 - 9

2.1 吸水性能

根据 JTJ 275—2000 《海港工程混凝土结构防腐技术规程》，研究硅烷处理后的混凝土的吸水性能。吸水性能的测试应在最后一次喷涂硅烷后至少 7 d 后进行。钻取芯样后，除原表面外，其余各面包括原表面小于 5 mm 的周边，均涂以无溶剂环氧涂料，若涂层有针孔，尚应加涂予以密封。全部芯样在 40 ℃ 下烘 48 h 后称重。在容器底部放置多根直径 100 mm 的玻璃棒，将这些芯样原面朝下放在这些玻璃棒上，注入 23 ℃ 的水，使水面在玻璃棒以上 1 ~ 2 mm，按照 5、10、30、60、120 和 140 min 的时间间隔，取出芯样，称重后立即放回去，直到完成所有测试。将每一个时间间隔的吸水量增量折算为吸水高度 (mm)，然后以吸水高度为纵坐标，以该时间间隔的平方根为横坐标作图，取该关系直线的斜率为吸水率值。

2.2 氯离子电通量

根据 ASTM C1202-12 试验方法，评价硅烷憎水处理的混凝土的抗氯离子侵蚀性能。首先将混凝土芯样切割成厚度 50 mm、直径 100 mm 的圆柱

体试件，然后用环氧树脂将其侧面密封。密封好后，先对试件进行真空饱水，最后测量其在 60 V 电压下通过的电量。ASTM 对氯离子电通量的判断标准见表 2。

表 2 ASTM C1202-12 氯离子电通量试验判断标准

通过的电量/C	>4 000	2 000~4 000	1 000~2 000	100~1 000	<100
氯离子渗透性	高	中	低	极低	可忽略

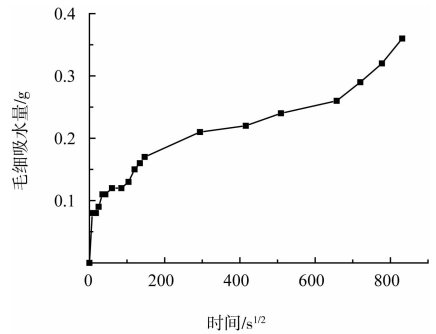
2.3 氯离子扩散深度

采用染料指示法测试氯离子扩散深度。钻取芯样后，用密封袋封好。试验时，芯样在 40 ℃ 下烘 24 h，然后将芯样沿直径方向劈开，在劈开表面上喷洒 0.1 mol/L 的硝酸银溶液，颜色变白的区域即为氯离子已经渗透的区域，并在芯样上标示扩散深度的边界。然后每隔 1 cm 测量一个点，如果某测点因粗骨料阻挡而无法测量，则跳过此点不记录。

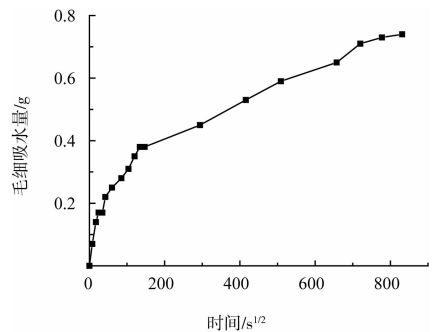
3 结果与分析

3.1 吸水性能

码头面板、梁、桩帽芯样的代表性“毛细吸水量-时间”曲线见图 2。



a) 编号S6面板



b) 编号B37梁

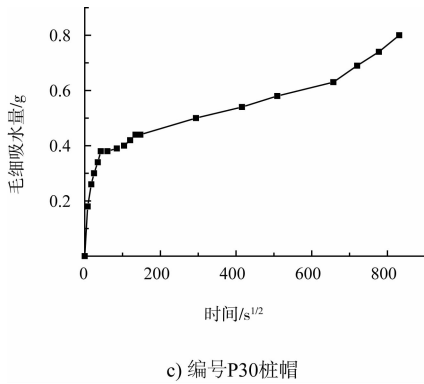


图2 码头芯样毛细吸水性能试验结果

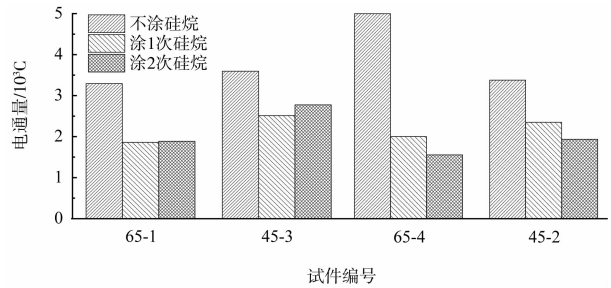
对芯样的毛细吸水试验数据进行概率分析, 其初始毛细吸水率和后期毛细吸水率的平均值分别为 $3.5 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ 和 $1.44 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ 。相比未经硅烷浸渍处理试件的实验室测试值 ($4.34 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^{1/2}$ 和 $2.88 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^{1/2}$), 降低幅度均在 90% 以上。根据该码头设计文件规定, 硅烷浸渍处理后混凝土构件的毛细吸水率平均值不应大于 $1.29 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ ($0.01 \text{ mm/min}^{1/2}$), 试验测得的试验结果完全满足设计要求。

渗透型涂层降低了混凝土的吸水性, 这是由于硅烷从混凝土表面渗入内部孔隙后, 在水蒸汽作用下水解生成硅醇, 硅醇与硅酸盐基体内部羟基反应, 并在其孔隙壁上形成憎水膜(硅氧烷链), 从而起到防水的目的。这是硅烷涂层提高混凝土耐久性的主要原因所在。其对电通量和氯离子渗透深度的降低, 也主要是基于这一原因。更为突出的一点是, 硅烷涂层并不因此而堵塞混凝土的毛细孔隙, 在达到防水目的的同时, 仍为孔隙中的水汽向外扩散留出通道。

3.2 氯离子电通量

首先, 为衡量该项目中所用硅烷涂料对降低氯离子电通量的效果, 在实验室分别采用水灰比为 0.45 和 0.65 的普通混凝土重新制作 2 组试件, 试件 28 d 龄期强度分别达到 70 MPa 和 40 MPa。将试件分为“不涂硅烷”、“涂 1 次硅烷”、“涂 2 次硅烷” 3 类, 涂刷方法同上。制作“涂 2 次硅烷”试件时, 涂刷 2 遍之间的时间间隔为 6 h。试件制作完成至少 7 d 后, 分别测试其电通量。通过比较

涂刷硅烷前后试件的氯离子电通量评价该种硅烷涂料的效果。测试结果见图 3 所示。



注: 65 表示水灰比为 0.65 的混凝土, 45 表示水灰比为 0.45 的混凝土。

图3 实验室试件氯离子电通量试验结果

由图 3 可见, 经硅烷处理后, 试件 6 h 的电通量数值为未经硅烷处理试件的 1/3 ~ 2/3。由此可见, 该硅烷涂料能明显改善混凝土抗氯离子侵入的能力。针对现场芯样, 电通量的测试结果见图 4 所示。由于面板处于大气区且 100 mm 直径芯样数量有限, 仅对腐蚀严重的处于浪溅区的梁和桩帽进行了电通量试验。

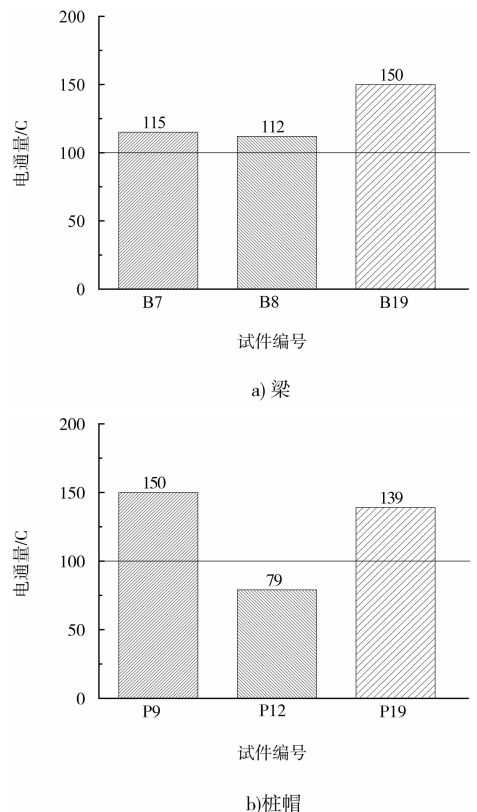


图4 码头构件芯样氯离子电通量试验结果

由图 4 可知, 经硅烷处理后试件的电通量仅为 79 ~ 150 C。根据表 2 的评价标准, 其氯离子渗

透性处于极低甚至可忽略的水平。由此可见码头混凝土构件的抗氯离子侵蚀性能很强。

3.3 氯离子扩散深度

芯样氯离子扩散深度的测试结果平均值见表3, 芯样剖面见图5。

表3 码头构件芯样氯离子扩散深度 mm

构件	未涂硅烷芯样的氯离子扩散深度平均值	涂硅烷后芯样的氯离子扩散深度平均值
梁	10.82	4.26
桩帽	12.76	4.33



图5 氯离子扩散深度测试芯样

从试验结果可以看出, 涂刷硅烷后芯样的氯离子扩散深度大幅度降低, 降低幅度在 60.6% ~ 66.1%。可见, 硅烷浸渍对降低氯离子扩散的效果十分明显。但在测试过程中, 发现芯样氯离子扩散深度的离散性仍较大。施工过程中应加强硅烷涂刷的均匀性控制。

4 结论

对某高桩码头上部结构涂刷渗透型涂层的实施效果进行取样检测分析。测试了码头面板、梁和桩帽芯样的吸水性能、氯离子电通量和氯离子扩散深度。结果表明: 涂刷渗透型硅烷后, 发现芯样的吸水性能降低 90% 以上; 氯离子电通量处于极低甚至可忽略水平; 氯离子扩散深度降低 60% 以上。构件的耐久性能得到显著提升。

在测试过程中, 芯样的各测试指标有较大的离散性, 建议今后类似工程施工, 除按照规范进行外, 还应加强硅烷涂刷的均匀性控制。

参考文献:

- [1] National Materials Advisory Board. Concrete durability, a multibillion-dollar opportunity: Report of the committee on concrete durability: needs and opportunities, national materials advisory [R]. Washington DC: National Academy Press, 1987.
- [2] 王胜年. 我国海港工程混凝土耐久性技术发展及现状[J]. 水运工程, 2010(10): 1-7.
- [3] JTJ 275—2000 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S].
- [4] Almusallam A, Khan F, Dulaijan S, et al. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability [J]. Cement and Concrete Composites, 2003(4): 473-481.
- [5] Bertolini L, Elsener B, Pedeferri P, et al. Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair [M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [6] 张鹏, 赵铁军, 戴建国, 等. 硅烷改性混凝土防水和抗氯离子性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011(3): 72-78.
- [7] 赵羽习, 杜攀峰, 金伟良. 混凝土防腐涂料抗氯离子侵蚀性能试验研究[J]. 长安大学学报: 建筑与环境科学版, 2009(2): 26-31.
- [8] Dai J G, Akira Y, Wittmann F H, et al. Water repellent surface impregnation for extending the service life of reinforced concrete structures in marine environments: The role of cracks [J]. Cement and Concrete Composites, 2010(32): 101-109.
- [9] Bertolini L, Elsener B, Pedeferri P, et al. Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair [M]. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000.
- [10] Selander A. Hydrophobic impregnation of concrete structures-effects on concrete properties[D]. Belgium: Royal Institute of Technology, 2010.
- [11] 田周宪, 尚朝杰, 韩艳玲. 混凝土硅烷防护剂在港口码头的施工技术[J]. 全面腐蚀控制, 2010, 24(1): 35-38.

(本文编辑 郭雪珍)