

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.04.014

# 海工混凝土结构不同防腐技术现场暴露试验

杨海成<sup>1</sup>, 盖国晖<sup>2</sup>, 李超<sup>1</sup>, 王迎飞<sup>1</sup>, 熊建波<sup>1</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 山东高速青岛公路有限公司, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 采用不同防腐技术制作长期暴露试件, 试件放置在青岛海湾大桥常规暴露实验站进行暴露试验, 以研究不同防腐技术在北方微冻海洋环境中的防护性能。研究表明: 经过1 a暴露试验, 涂层、聚脲试件外观无明显变化, 与混凝土表面的粘结强度大于2.0 MPa, 且试件内部均未受到氯离子的侵蚀, 防护效果良好; 硅烷浸渍试件内部有一定浓度的氯离子积聚, 但相比空白试件, 浸渍硅烷混凝土不同深度的氯离子浓度约为空白试件同深度的50%, 且浪溅区降低效果更显著。浸渍硅烷能够减少氯离子对混凝土的侵蚀。

**关键词:** 桥梁工程; 海工混凝土结构; 暴露试验; 防腐技术; 氯离子渗透性

中图分类号: U444.03

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2012)04-0078-07

## Field Exposure Test of Different Anticorrosion Technologies for Marine Concrete Structure

YANG Haicheng<sup>1</sup>, GAI Guohui<sup>2</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, WANG Yingfei<sup>1</sup>, XIONG Jianbo<sup>1</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute, Guangzhou Guangdong 510230, China;

2. Qingdao Highway Co., Ltd, Shandong High-speed Group, Qingdao Shandong 266061, China)

**Abstract:** The test specimens were made by different anticorrosion technologies and placed in the routine exposure station of Qingdao Bay Bridge for exposure test to study the protection performance of different anticorrosion technologies for marine concrete in the northern micro frozen marine environment of China. The result indicates that (1) the coating and spray polyurea specimens looked no change, the adhesive strength with concrete surface was more than 2.0 MPa, and no chloride ion penetrated into specimens after one year exposure test, which shows good protection; (2) the inside of specimen with silicane impregnant has certain concentration of chloride ion accumulation, but about 50% reduction compare with unprotected concrete at the same depth, and has better effect in splash zone, which shows that silicane impregnant can reduce the erosion of chlorine ion permeation.

**Key words:** bridge engineering; marine concrete structure; exposure test; anticorrosion technology; chlorine ion penetration

## 0 引言

由于海港工程混凝土结构耐久性受现场环境、原材料性能、施工质量、服役状况等多因素影响, 耐久性失效过程极其复杂。为提高海港工程混凝土结构耐久性, 确保结构满足设计寿命要求, 需要设置合理的保护层厚度、选用耐腐蚀的海工高性能混凝土, 同时还应针对不同构件所处的环境条件, 采

取必要的辅助措施, 如采用混凝土表面防护技术、阴极保护技术、阻锈剂技术等措施, 以提高海工混凝土结构的防腐蚀能力。混凝土表面防护技术主要是在混凝土表面形成一层可以隔绝腐蚀性介质的隔离层, 以达到混凝土结构整体耐久性和设计使用寿命要求。目前通常采用表面涂层、硅烷浸渍等表面防护措施以提高混凝土结构耐久性。

本文采用青岛海湾大桥承台、墩柱应用的涂层

收稿日期: 2011-09-29

基金项目: 山东省部联合攻关课题项目 (2009353337510)

作者简介: 杨海成 (1982-), 男, 山东济宁人, 硕士. (yhaicheng@gzpcc.com)

配套体系和施工工艺,对暴露试件进行防腐处理,并将暴露试件放置在青岛海湾大桥常规暴露实验站进行长期暴露,研究涂层体系对混凝土结构耐久性的防护效果。同时选用喷涂聚脲弹性体、浸渍膏体硅烷等其他防护技术,研究不同防腐技术在北方微冻海洋环境中的防护性能,为后期的桥梁维护及耐久性再设计提供参考。

## 1 暴露试验环境条件

### 1.1 暴露环境

#### (1) 气候特征

青岛海湾大桥桥区属季风气候区,气候季节变化较明显。桥区年均气温  $12.3^{\circ}\text{C}$  左右,极端最高气温  $38.9^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温  $-16.9^{\circ}\text{C}$ ,1月份最低平均气温  $-1.0^{\circ}\text{C}$ ,8月份最高平均气温  $25.1^{\circ}\text{C}$ 。桥位处冰冻期一般从12月下旬开始到次年2月中旬结束,冰期在60 d左右,其中1月下旬至2月上旬为重冰期。桥位处年平均自然冻融循环约47~52次。

#### (2) 潮汐特征

胶州湾属规则半日潮类型,潮汐周期约为722 min,涨潮时间相对较短,落潮时间相对较长,两者相差70 min左右。平均高潮位1.39 m,平均低潮位 $-1.40\text{ m}$ 。

### 1.2 试件放置

暴露试件放置在青岛海湾大桥常规暴露实验站,实验站位于红岛连接线箱梁L6~L7之间,见图1。暴露实验站分为3层,第1层标高为 $+0.1\text{ m}$ ,放置水变区试件,第2层标高为 $+2.0\text{ m}$ ,放置浪溅区试件,第3层标高为 $+6.0\text{ m}$ ,放置大气区试件。

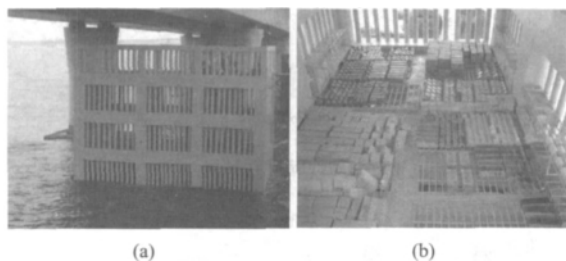


图1 青岛海湾大桥常规暴露实验站

Fig. 1 Field exposure station of Qingdao Bay Bridge

## 2 暴露试件制作

### 2.1 混凝土原材料及配合比

采用山水PI 52.5水泥,主要的化学指标见表1;选用青岛家樑足球工贸有限公司生产的磨细矿渣粉,主要技术指标见表2,日照华能电厂I级粉煤灰,其

化学成分见表3;细集料采用莱西大沽河中粗砂,表观密度 $2\,600\text{ kg/m}^3$ ,含泥量1.0%,细度模数2.9;粗集料为沂水石灰岩碎石,5~10 mm及10~20 mm组合级配,含泥量0.3%,压碎值11.8%,表观密度 $2\,700\text{ kg/m}^3$ ,堆积密度 $1\,480\text{ kg/m}^3$ ;减水剂为上海巴斯夫生产的RHEOPLUS 326,引气剂为巴斯夫MICRO AIR 202。混凝土配合比见表4。

表1 水泥化学指标检验结果

Tab. 1 Inspection result of cement chemical index

| $\text{Cl}^-/\%$ | $\text{SO}_3/\%$ | $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}/\%$ | $f-\text{CaO}/\%$ | $\text{MgO}/\%$ | 烧失量/ $\%$ |
|------------------|------------------|----------------------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| 0.019            | 2.05             | 0.77                                               | 2.16              | 1.92            | 1.94      |

表2 磨细矿渣粉主要技术指标

Tab. 2 Main indexes of ground slag

| 密度/<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 比表面<br>积/( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 活性指数/ $\%$<br>7 d 28 d | 流动度<br>比/ $\%$ | 含水<br>率/ $\%$ | 三氧化<br>硫/ $\%$ | 氯离<br>子/ $\%$ | 烧失<br>量/ $\%$ |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| 2.8                                        | 368                                            | 77 106                 | 105            | 0.1           | 0.19           | 0.012         | 1.19          |

表3 粉煤灰化学成分(单位:%)

Tab. 3 Chemical components of fly ash (unit: %)

| 等级 | $\text{SiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $f-\text{CaO}$ | $\text{SO}_3$ |
|----|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| I  | 60.81          | 5.76                    | 24.12                   | 3.03         | 0.55         | 0.62           | 0.63          |

表4 混凝土配合比

Tab. 4 Mixing proportion of concrete

| 放置区域 | 编号 | 胶凝材料<br>用量/kg | 胶凝材料组成/ $\%$ |     |    | 水胶比  |
|------|----|---------------|--------------|-----|----|------|
|      |    |               | 水泥           | 粉煤灰 | 矿渣 |      |
| 水变区  | S  | 397           | 40           | 15  | 45 | 0.36 |
| 浪溅区  | L  | 426           | 40           | 14  | 46 | 0.34 |
| 大气区  | D  | 467           | 51           | 34  | 15 | 0.33 |

## 2.2 表面防腐材料及工艺

### (1) 涂层配套系统涂装

暴露试件在室内标准养护14 d后,拿到室外养护4 d,然后按照《青岛海湾大桥涂层设计与防腐施工指南》<sup>[1]</sup>要求进行表面处理及涂装。涂层配套性能见表5。

表5 涂层配套性能

Tab. 5 Coating system performance

| 涂层名称 | 配套名称           | 颜色  | 与固化剂之比 | 用量/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | 厚度/<br>$\mu\text{m}$ |
|------|----------------|-----|--------|--------------------------------------------|----------------------|
| 底层   | 湿固化环氧封闭底漆(1道)  | 透明  | 4:1    | 0.12                                       | $\leq 50$            |
| 中间层  | 湿固化环氧云铁中间漆(3道) | 浅灰色 | 10:1   | 0.4                                        | 300                  |
| 面层   | 聚氨酯面漆(2道)      | 浅灰色 | 6:1    | 0.14                                       | 90                   |

## (2) 喷涂聚脲弹性体

混凝土基材打磨平整,倒圆角,刮涂基材处理剂,堵孔、找平;再打磨平整后使用美国 Gusmer 公司 H20/35 主机、GX7-400 喷枪喷涂聚脲材料,动态压力 13 790 kPa,静态压力 17 237.5 kPa。聚脲弹性体性能指标如表 6 所示。

表 6 聚脲弹性体性能指标

Tab. 6 Performance indexes of polyurea elastomer

| 品种  | 颜色 | 拉伸强度/<br>MPa | 断裂伸长<br>率/% | 硬度     | 撕裂强度/<br>(N·mm <sup>-1</sup> ) | 厚度/<br>mm |
|-----|----|--------------|-------------|--------|--------------------------------|-----------|
| 纯聚脲 | 灰色 | 18           | 450         | 邵氏 A85 | 65                             | >2        |

## (3) 硅烷浸渍

暴露试件在室内标准养护 14 d 后,拿到在室外养护 4 d,然后对混凝土基材打磨,按每次 150 g/m<sup>2</sup> 的用量,分别涂刷膏体硅烷 2 遍,每遍涂刷间隔 6 h。硅烷的性能指标见表 7。

表 7 硅烷性能指标

Tab. 7 Performance indexes of silane

| 硅烷种类                                   | 主要组分     |       | 外观           | 活性物质含量 /% |
|----------------------------------------|----------|-------|--------------|-----------|
| Wacker BS creme C                      | 异辛基三乙基硅烷 | 白色膏体  | 80           |           |
| 25 ℃ 下密度 /<br>( g • cm <sup>-3</sup> ) | pH 值     | 闪点 /℃ | 稀释剂          | 储存期       |
| 0.9                                    | 6        | 74    | 不稀释，<br>直接使用 | 至少 1 a    |

## 3 试验结果及分析

### 3.1 无防护混凝土氯离子渗透性

不同环境分区 1 a 暴露龄期混凝土试件氯离子渗透情况见图 2,由图可知,水变区、浪溅区暴露试件不同深度的氯离子含量随深度的增加而降低,且氯离子渗透深度已达 1 cm,而大气区不同深度的氯离

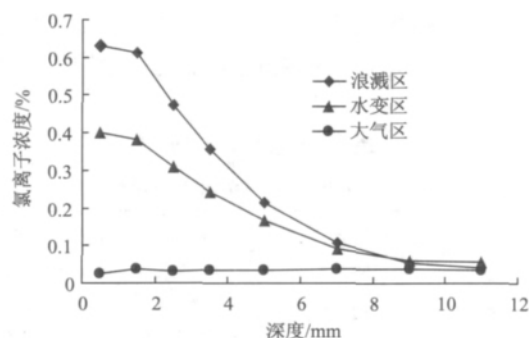


图 2 1 a 暴露龄期混凝土试件不同深度的氯离子浓度变化规律

Fig. 2 Chloride ion concentration of specimens changing with depth after one year exposure

子含量普遍较低,基本与混凝土初始浓度相同,说明大气区的混凝土内部并未受到氯离子的侵蚀。

采用硬化混凝土氯离子渗透快速试验方法 (NT BUILD 443) 测试了标准条件养护 28、56 d 以及 84 d 时混凝土抗氯离子渗透性能,并根据 Fick 第 2 定律,对不同深度氯离子浓度数据处理,得到不同养护龄期时混凝土氯离子扩散系数,如表 8 所示。混凝土氯离子扩散系数随养护龄期的延长,氯离子扩散系数不断减小,水变区、浪溅区及大气区 84 d 养护龄期时混凝土氯离子扩散系数分别为 28 d 养护龄期时混凝土氯离子扩散系数的 40%、43% 和 63%。

表 8 混凝土氯离子扩散系数

Tab. 8 Chloride ion diffusion coefficient of concrete

| 编号  | 扩散系数 $D_b / (\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ |      |      |       |      |
|-----|----------------------------------------------------------------|------|------|-------|------|
|     | 28 d                                                           | 56 d | 84 d | 180 d | 1 a  |
| 水变区 | 5.74                                                           | 3.34 | 2.31 | 0.74  | 0.48 |
| 浪溅区 | 5.39                                                           | 2.59 | 2.37 | 0.43  | 0.39 |
| 大气区 | 3.95                                                           | 3.36 | 2.5  | -     | -    |

对暴露试件 180 d、1 a 龄期的暴露试件取样测试,回归得到混凝土氯离子扩散系数,如表 8 所示。水变区、浪溅区 1 a 暴露龄期混凝土氯离子扩散系数分别为 180 d 暴露龄期混凝土氯离子扩散系数的 65% 和 81%,说明在现场暴露环境下,1 a 暴露龄期内混凝土氯离子扩散系数仍然存在衰减。其主要是由于混凝土中掺入大量粉煤灰和磨细矿渣粉,混凝土早期水化程度不高,随着混凝土水化的进行,混凝土结构致密程度不断提高,氯离子扩散系数不断降低。

大量的试验结果表明,混凝土氯离子的扩散系数随时间衰变的关系可以用一个指数的形式加以描述<sup>[2]</sup>:

$$D_t = D_{\text{ref}} \left( \frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^m,$$

式中,  $D_t$  为时间  $t$  时的扩散系数;  $D_{\text{ref}}$  为某一参数时间点  $t_{\text{ref}}$  上的扩散系数;  $m$  为与混凝土配合比、掺和料品种等有关的系数。

随着混凝土龄期的延长,氯离子扩散系数逐渐变小,尤其是在 1~3 a 内,扩散系数的降低尤其明显,经过一定时间后,扩散系数趋于定值。有相关文献规定,  $m$  值的衰减以 30 a 龄期为限,在此后的计算时期内,扩散系数将保持常量。中交四航工程研究院华南湛江港工程材料暴露试验站 20 多年长期暴露试验对此结果给予了证实,而对于北方微冻海洋环境条件下,海工高性能混凝土氯离子渗透性能

的变化规律还有待于后期连续跟踪监测。

### 3.2 涂层试件暴露试验

暴露试件采用青岛海湾大桥承台和墩柱涂层体系,按照《青岛海湾大桥涂层设计与防腐施工指南》要求进行表面处理及涂装,将试件放置到青岛海湾大桥常规暴露实验站,分别测试了180 d、1 a暴露龄期涂层的粘结力、干膜厚度及涂层试件不同深度的氯离子含量。

#### (1) 涂层外观

水变区涂层试件表面生长大量海蛎子以及其他海洋生物,而浪溅区试件表面无海蛎子生长。清除涂层表面的海蛎子以及其他附作物后,发现涂层试件外观保持良好,无粉化、龟裂、起层现象,涂层与混凝土表面的粘结良好,如图3所示。

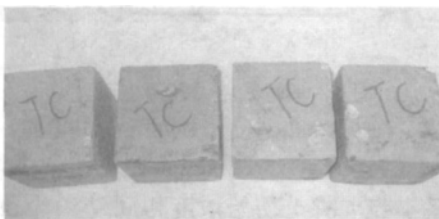


图3 涂层外观

Fig. 3 Appearance of coating

#### (2) 涂层粘结强度及干膜厚度

涂层粘结强度及干膜厚度随暴露龄期的变化规律见图4、5。1 a暴露龄期混凝土涂层粘结强度比初始粘结强度有所提高,主要原因是涂层粘结强度测试时表面破坏类型以混凝土破坏为主,如图6所示,而混凝土随着龄期的增长,表面强度不断提高,从而造成测试的涂层粘结强度有所提高;且1 a暴露龄期涂层粘结强度大于2.0 MPa,满足《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ275—2000)的要求,涂层干膜厚度也基本满足设计要求。

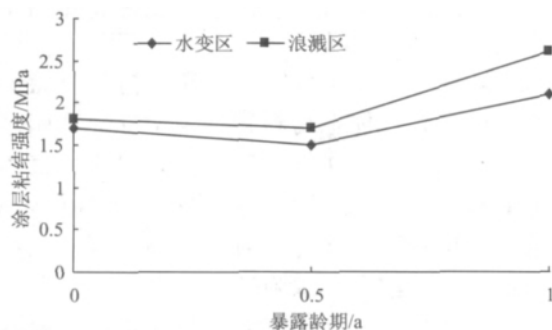


图4 涂层粘结强度随暴露龄期的变化规律

Fig. 4 Adhesive strength of coating changing with exposure age

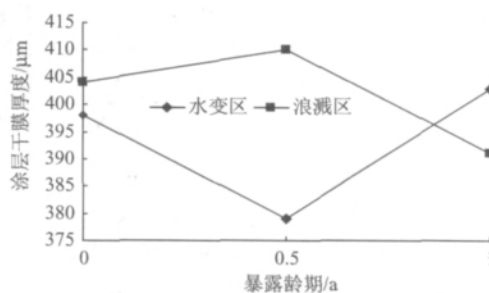


图5 涂层干膜厚度随暴露龄期的变化规律

Fig. 5 Thickness of coating changing with exposure age

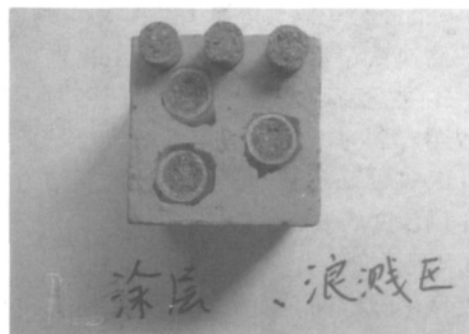


图6 涂层粘结力测试

Fig. 6 Coating adhesive strength test

#### (3) 涂层试件不同深度氯离子含量

通过对取回试件打磨清除试件表面涂层,测量不同深度混凝土的氯离子含量,测试结果见表9,试件内部不同深度处氯离子浓度基本与混凝土初始浓度相当,约为0.02~0.03(占混凝土的重量比),说明混凝土内部并未受到氯离子的侵蚀,涂层防护效果良好。

表9 涂层试件不同深度氯离子浓度(单位:%)

Tab. 9 Chloride ion concentrations in coating specimens in different depths (unit: %)

| 编号    | 0~1<br>mm | 1~2<br>mm | 2~3<br>mm | 3~4<br>mm | 4~6<br>mm | 6~8<br>mm | 8~10<br>mm | 10~12<br>mm |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|
| 水变区   |           |           |           |           |           |           |            |             |
| 180 d | 0.03      | 0.02      | 0.03      | 0.02      | 0.03      | 0.03      | 0.03       | 0.03        |
| 1 a   | 0.03      | 0.03      | 0.03      | 0.02      | 0.03      | 0.03      | 0.03       | 0.03        |
| 浪溅区   |           |           |           |           |           |           |            |             |
| 180 d | 0.02      | 0.03      | 0.03      | 0.04      | 0.03      | 0.03      | 0.03       | 0.03        |
| 1 a   | 0.02      | 0.03      | 0.03      | 0.02      | 0.02      | 0.03      | 0.03       | 0.03        |

涂层配套体系可以在混凝土表面形成一层连续的膜,能够有效阻止氯离子、氧气、二氧化碳等腐蚀介质的侵入。华南湛江港工程材料暴露试验场近10 a的暴露试验表明<sup>[3]</sup>,不同腐蚀区域采用不同涂层配套保护的混凝土试件,混凝土中各层深度范围内的氯离子积聚量均比无涂层混凝土底7倍以上,

并且氯离子含量值基本接近混凝土原有的初始浓度，说明混凝土表面涂层能够有效抵抗氯离子对混凝土的渗透和扩散作用。针对北方微冻海洋环境条件，在氯盐与冻融耦合作用下表面涂层对海工混凝土的长期防护效果还有待后期连续跟踪测试。

3.3 聚脲暴露试验

聚脲是近年来兴起的一种新型防护材料，具有优异的柔韧性和高强度，能够抵御昼夜、四季环境温度差对被保护物体造成的热胀冷缩，不会产生开裂和脱落现象。目前聚脲防护已在美国加利福尼亚州圣弗兰西斯克湾的 San Mateo 大桥、海上钻井平台台湾 Formosa 石化公司码头等海工结构中得到应用，我国在京沪高速铁路工程、南水北调工程也采用了聚脲防护。本课题采用聚脲弹性体封闭暴露试件，将试件放置到青岛海湾大桥常规暴露实验站，分别测试了 180 d、1 a 暴露龄期聚脲试件的粘结力、干膜厚度及不同深度的氯离子含量。

(1) 聚脲外观

水变区聚脲试件表面生长部分海蛎子和其他海洋生物，但相比涂层试件，海蛎子有所减少，其他腐蚀分区无海蛎子存在，如图 7 所示。清除涂层表面的海蛎子以及其他附作物，发现聚脲试件外观保持良好，无明显变色、起鼓现象，聚脲与混凝土表面的粘结良好。

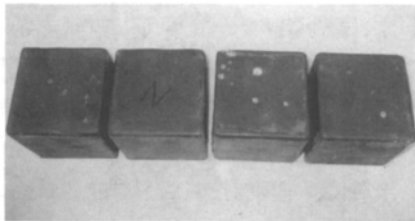


图 7 聚脲外观  
Fig. 7 Appearance of polyurea elastomer

(2) 聚脲粘结强度

聚脲粘结强度及干膜厚度随暴露龄期的变化如表 10 所示，由表可知，聚脲粘结强度随龄期的延长而有所增大，聚脲试件 1 a 暴露龄期的粘结强度大于 2.0 MPa，聚脲粘结效果良好。聚脲粘结强度测试时破坏类型与涂层破坏类型不同，以聚脲层破坏为主，如图 8 所示。聚脲干膜厚度随暴露龄期的增加无明显变化。

(3) 聚脲试件不同深度氯离子含量

打磨清除试件表面聚脲，测量混凝土不同深度氯离子含量。测试结果见表 11，试件不同深度氯离

表 10 不同腐蚀分区聚脲试件的粘结强度及干膜厚度  
Tab. 10 Adhesive strengths and dry film thicknesses of polyurea elastomer specimens in different corrosion areas

| 分区  | 初始          |                         | 180 d       |                         | 1 a         |                         |
|-----|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
|     | 粘结力/<br>MPa | 干膜厚<br>度/ $\mu\text{m}$ | 粘结力/<br>MPa | 干膜厚<br>度/ $\mu\text{m}$ | 粘结力/<br>MPa | 干膜厚<br>度/ $\mu\text{m}$ |
| 水变区 | 1.8         | 1 210                   | 1.8         | 1 072                   | 2.1         | 1 323                   |
| 浪溅区 | 2.0         | 1 207                   | 2.1         | 1 194                   | 2.7         | 1 327                   |
| 大气区 | 1.8         | 1 191                   | 1.8         | 1 080                   | 2.5         | 1 278                   |



图 8 聚脲粘结力及厚度测试  
Fig. 8 Test of adhesive strength and thickness of polyurea elastomer

子含量基本与混凝土初始浓度相同（约为 0.02% ~ 0.03%，占混凝土的重量比），说明试件内部并未受到氯离子的侵蚀，聚脲防护效果良好。

表 11 聚脲试件不同深度的氯离子积聚情况（单位：%）  
Tab. 11 Chloride ion concentrations of Polyurea elastomer specimens in different depths (unit: %)

| 编号  |       | 0 ~ 1 | 1 ~ 2 | 2 ~ 3 | 3 ~ 4 | 4 ~ 6 | 6 ~ 8 | 8 ~ 10 | 10 ~ 12 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|
|     |       | mm    | mm    | mm    | mm    | mm    | mm    | mm     | mm      |
| 水变区 | 180 d | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.02  | 0.03  | 0.03   | 0.04    |
|     | 1 a   | 0.03  | 0.02  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03   | 0.03    |
| 浪溅区 | 180 d | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.04  | 0.03  | 0.02  | 0.03   | 0.03    |
|     | 1 a   | 0.02  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03   | 0.02    |
| 大气区 | 180 d | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.04  | 0.03  | 0.03  | 0.02   | 0.02    |
|     | 1 a   | 0.04  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.02  | 0.02  | 0.03   | 0.03    |

文献 [4] 认为，与传统的环氧树脂类涂层相比，喷涂聚脲弹性体在材料物理力学性能和耐老化性上具有明显优势。文献 [5 - 6] 通过室内试验研究了聚脲弹性体对混凝土抗渗性和抗冻性的影响，研究表明，聚脲弹性体能够有效提高混凝土的抗渗性和抗冻性。目前，聚脲弹性体对混凝土耐久性影响的研究，还局限与室内试验，然而室内试验并不能完全模拟现场实际环境，因此对于现场海洋环境下聚脲弹性体对混凝土的防护效果、以及聚脲弹性体本身的耐久性还有待于现场暴露试验的进一步研

究。本课题已进行1 a 多的现场暴露试验,针对处于北方微冻海洋环境条件,聚脲弹性体在海水冲刷、微生物侵蚀、干湿交替作用、盐冻等多因素耦合作用下长期防护效果将在后期进一步跟踪监测。

### 3.4 硅烷

对1 a 暴露龄期硅烷试件取样测试,水变区、浪溅区1 a 暴露龄期膏体硅烷试件不同深度氯离子含量见图9。浸渍膏体硅烷的暴露试件内部有一定浓度的氯离子积聚,但与暴露条件相同的空白试件(未采取防护)相比,浸渍膏体硅烷能够减少氯离子对混凝土的侵蚀。在混凝土内部2~7 mm 深度,位于水变区的硅烷试件不同深度的氯离子浓度约为空白试件同深度的50%左右;而对于浪溅区的硅烷试件,不同深度的氯离子浓度为空白试件同深度位置的35%左右,说明浪溅区硅烷降低效果更明显。其主要是由于硅烷渗透到混凝土的毛细孔隙后,首先与水发生水解反应形成硅烷醇,再通过活性基团与硅酸盐基体中的羟基反应形成硅氧烷链并相互缩合,从而在基体孔隙壁上形成一层均匀的憎水膜,抑制水分和其他有害离子的侵入,但憎水膜并非完全封闭混凝土表面,尤其在水压作用下仍会有部分氯离子渗入。

研究表明:硅烷防护效果与硅烷在混凝土中浸渍深度有关<sup>[7-8]</sup>,其中文献[8]认为,对浸渍深度为2.5 mm 的硅烷试件,在长期室外海水干湿交替作用下,不足以有效抑制 $\text{Cl}^-$ 的侵入。本文采用海工高性能混凝土,由于混凝土内部比较密实,硅烷浸渍深度约在2~3 mm,研究结论与文献[8]有所差别,可能是由于现场暴露环境和混凝土性能存在差

表12 涂层、聚脲、硅烷浸渍的综合技术经济比较

Tab. 12 Comprehensive technical and economic comparison of coating, spray polyurea and silicane impregnant

| 防腐措施   | 防腐原理                                 | 防护年限<br>(预计) /a | 成本                                                                                   | 维护、检测周期                  | 优点                                                              | 缺点                             |
|--------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 涂层     | 混凝土表层形成隔绝层                           | 20              | 涂料费约 65 元/ $\text{m}^2$ ,<br>施工费 15 元/ $\text{m}^2$ , 综合单价为 80 元/ $\text{m}^2$       | 每 10 a 进行局部修复, 20 a 进行大修 | 施工简便, 保护效果显著; 可根据需要改变混凝土外观                                      | 因耐候性原因后期易粉化、脱落而影响外观            |
| 聚脲防水涂料 | 混凝土表层形成隔绝层                           | > 10            | 综合单价约为 120 元/ $\text{m}^2$                                                           | 每 10 a 根据实际情况选择修复        | 具有很高的拉伸强度和断裂延伸率; 防渗水和抗氯离子渗透功能优; 抗冲刷性能好。                         | 成本较高, 需要专门设备, 对施工质量要求高, 修补相对困难 |
| 硅烷浸渍   | 渗入混凝土毛细孔中, 使毛细孔壁憎水化, 使水分和所携带的氯化物难以渗入 | > 15            | 材料费约 50 元/ $\text{m}^2$ ,<br>施工等其他费用为 15 元/ $\text{m}^2$ , 综合单价约为 65 元/ $\text{m}^2$ | 每 10 a 根据实际情况选择涂覆维修      | 施工方便, 费用低; 在最高天文潮水位以上的浪溅区和盐雾区、大气区防腐蚀效果好; 不改变混凝土外观且; 达到使用年限后重涂容易 | 水变区和位于最高天文潮水位以下的浪溅区防护效果一般      |

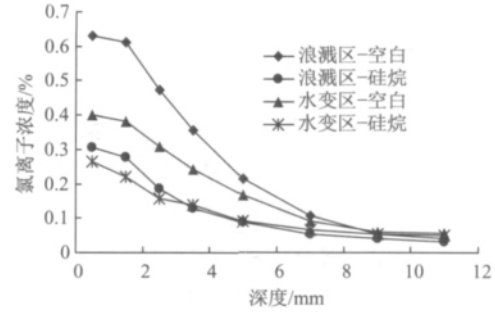


图9 1 a 暴露龄期硅烷试件不同深度氯离子浓度的变化规律

Fig. 9 Chloride ion concentration of silane specimens

changing with depth after one year field exposure

别有关,文献[8]中采用模拟海水浪溅区暴露环境,每天海水干湿交替循环2次,每次循环包括4 h 的海水喷淋和8 h 的自然干燥,且采用的是水灰比0.68 的普通混凝土。文献[9-10]对硅烷在海洋环境下实体结构的防护效果进行了跟踪研究,但得出的结论不同。文献[10]对比利时 Zeebrugge 港口的硅烷防护混凝土结构耐久性进行了12 a 的跟踪监测,认为硅烷防护效果良好,但文献[9]确有不同结论。本项目研究已进行1 a 多的现场暴露试验,针对处于北方微冻海洋环境条件下,硅烷在干湿交替、盐冻、微生物侵蚀等多因素耦合作用下长期防护效果将会长期跟踪分析。

### 3.5 不同防腐技术的综合技术经济比较

根据防腐技术的相关研究成果,并结合本项目到目前为止所获得的成果,对涂层、聚脲、硅烷浸渍防护措施的综合技术经济比较,具体上述不同防腐技术的优缺点见表12。

本试验采用的混凝土涂层配套,满足《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ275—2000) 20 a 设计使用年限的要求。华南地区涂层试件暴露试验表明<sup>[11]</sup>: 涂层混凝土经历 19 a 的现场暴露,涂层与混凝土表面仍然具有较高的粘结强度,混凝土内部基本未受到氯离子侵蚀,说明涂层在海洋环境中能够有效防止氯离子的侵蚀。

喷涂聚脲是一种有效的防水措施,其自身弹性、抗海水冲刷性较好,喷涂以后即使混凝土出现裂缝也能保持良好的防水性。但施工工艺复杂,施工必须严格控制,否则聚脲涂层容易剥落,且成本较高。目前尚无聚脲使用寿命的相关文献报道。

针对硅烷浸渍,其防腐机理是通过在混凝土内部孔隙或孔隙壁形成憎水膜,抑制水分和有害介质的侵入,但其本身并非完全封闭混凝土表面,尤其在水压作用下仍会有水分或其他腐蚀介质渗入,防护效果相对减弱,因此,不建议使用在水变区和位于最高天文潮水位以下的浪溅区。同时由于硅氧键突出的抗紫外线老化性能,使用寿命长,根据 Zeebrugge 港口硅烷浸渍混凝土耐久性的跟踪监测表明: 经历 12 a 工程实际服役周期,其防护效果仍然较好。同时硅烷浸渍施工方便,成本较低,可作为海工混凝土结构主要的附加防腐蚀措施之一。

综合以上分析认为: 涂层具有施工简便,成本低,且长期保护效果好的诸多优点,是海工结构非常有效的防腐措施之一; 硅烷可用在处于最高天文潮水位以上的浪溅区和盐雾区、大气区等部位混凝土结构的防腐,且施工简便,成本较低; 喷涂聚脲是一种有效的防水措施,但由于成本较高,且对施工质量要求高,现场不易控制等缺点,目前还未在海工结构中得到广泛应用。针对胶州湾微冻海洋环境,考虑到现场暴露试验周期短,上述不同防腐技术的优劣,还需后期跟踪监测,以便从施工综合成本、耐老化性能、长期防护性能等各方面进行更准确的分析,为服役于类似海洋环境中的工程防腐设计方案提出合理化建议。

#### 4 结论

(1) 经过 1 a 现场暴露试验,水变区、浪溅区无防护混凝土氯离子侵蚀深度已达 1 cm,而大气区无防护混凝土试件不同深度的氯离子浓度较低,基本与混凝土初始浓度相同; 随着混凝土龄期的延长,氯离子扩散系数存在明显的衰减。

(2) 经过 1 a 现场暴露试验,涂层、聚脲外观

无明显变化,与混凝土表面的粘结强度大于 2.0 MPa,且试件内部均未受到氯离子的侵蚀,防护效果良好。

(3) 浸渍膏体硅烷的暴露试件经过 1 a 现场暴露试验,试件内部有一定浓度的氯离子积聚,但与暴露条件相同的空白试件(未采取防护)相比,膏体硅烷能够减少氯离子对混凝土的侵蚀,采用硅烷浸渍混凝土不同深度的氯离子浓度约为空白试件同深度的 50%,且浪溅区降低效果更显著。

(4) 在北方微冻海洋环境中分别采用硅烷、涂层、聚脲 3 种防护技术,从 1 a 暴露试验结果来看,采用涂层、聚脲对混凝土的防护效果要优于膏体硅烷。但需综合考虑上述 3 种防腐措施在施工方便性、综合成本、耐老化性能、长期防护性能等各方面指标,因此上述防腐措施的优劣还有待长期跟踪监测与综合分析。

参考文献:

References:

- [1] 王胜年,熊建波,王迎飞. 青岛海湾大桥涂层设计与防腐施工指南 [R]. 青岛: 中交四航工程研究院有限公司, 2008.  
WANG Shengnian, XIONG Jianbo, WANG Yingfei. Guidelines for Concrete Coating Design and Anticorrosion Construction of Qingdao Bay Bridge [R]. Qingdao: CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., 2008.
- [2] MAAGE M, HELLAND S. Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93 (6): 602-608.
- [3] 黄君哲,周欲晓,王胜年,等. 海工混凝土结构表面涂层暴露试验及应用效果 [J]. 中国港湾建设, 2002, 21 (6): 17-20.  
HUAN Junzhe, ZHOU Yuxiao, WANG Shengnian, et al. Analysis of Exposure Experiment and Application of Coatings for Marine Concrete Structures [J]. China Harbour Engineering, 2002, 21 (6): 17-20.
- [4] 吴怀国,孙志恒,赵德海. 喷涂聚脲弹性体技术应用展望 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1 (3): 232-235.  
WU Haiguo, SUN Zhiheng, ZHAO Dehai. Research Prospect of a New Type Abrasion Resistant Material and Its Application [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1 (3): 232-235.

(下转第 90 页)

- ZHU Ziping, WU Pingping. Causes and Measures of Beam Distortion and Bearing Disjoint of Curved Bridge with Little Radius [J]. Transport Standardization, 2009 (13): 129-132.
- [8] 吴健. 施工过程中钢箱梁支座脱空病害分析及处理 [J]. 城市道桥与防洪, 2011 (3): 95-98.
- WU Jian. Analysis and Treatment of Support Cavity Fault of Steel Box Girder in Course of Construction [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2011 (3): 95-98.
- [9] 陶海生, 刘建华. 弯桥上的固结墩裂缝及支座脱空的处理 [J]. 中南公路工程, 1998, 23 (1): 50-52.
- TAO Haisheng, LIU Jianhua. Treatment of Crack in Fixed Pier and Bearing Separation in Curved Bridge [J]. Central South Highway Engineering, 1998, 23 (1): 50-52.
- [10] 李洁, 李国平. 曲线连续箱梁桥侧倾和支座脱空原因分析 [J]. 上海公路, 2011 (4): 47-50.
- LI Jie, LI Guoping. Analysis on the Reason for Overturning and Bearing-disengaging of Curved Continuous Box Girder Bridges [J]. Shanghai Highways, 2011 (4): 47-50.
- [11] 张绍宽. 曲线梁桥支座脱空破坏与对策研究 [J]. 山西建筑, 2011, 37 (14): 176-177.
- ZHANG Shaokuan. Research on Support Disengaging Damage of Curved Beam and Strategies [J]. Shanxi Architecture, 2011, 37 (14): 176-177.
- [12] 王吉英, 屈国, 郝海洪, 等. 曲线匝道桥支座脱空原因分析及加固处理 [J]. 北方交通, 2006 (4): 56-58.
- WANG Jiying, QU Guo, HAO Haihong, et al. Reasons for Curved Ramp Bridge Bearing Hanging in the Air and Strengthening of It [J]. Northern Communications, 2006 (4): 56-58.
- [13] 文峰, 孔令刚. 某独柱支承曲线连续梁桥支座脱空事故处理 [J]. 黑龙江交通科技, 2011 (3): 86-88.
- WEN Feng, KONG Linggang. Treatment of Bearing Separation in a Curved Continuous Beam Bridge Supported by a Single Column [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2011 (3): 86-88.
- [14] 叶华. 某互通匝道桥现浇曲线连续空心板梁支座脱空处理 [J]. 福建建设科技, 2010 (2): 29-30.
- YE Hua. The Tilt Support Treatment of the Cast-in-situ Continuous Hollow Plate-beam on a Curve Interchange Ramp Bridge [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2010 (2): 29-30.
- [15] 李晓宇. 现浇连续箱梁支座脱空问题探讨 [J]. 北方交通, 2009 (3): 81-82.
- LI Xiaoyu. An Approach to Hang in the Air of Pedestal of in Place Cast Continuous Box Beam [J]. Northern Communications, 2009 (3): 81-82.
- 
- (上接第84页)
- [5] 杨林, 葛海艳, 吕平. 喷涂聚脲涂层混凝土抗氯离子渗透性能的研究 [J]. 化学建材, 2008, 24 (2): 23-25.
- YANG Lin, GE Haiyan, LÜ Ping. Research of Spray Polyurea Coating Concrete Resist Chloride Penetration [J]. Chemical Materials for Construction, 2008, 24 (2): 23-25.
- [6] 庞玉坤, 李志高, 马红亮. 聚脲涂层和环氧涂层对混凝土抗冻性的影响 [J]. 上海涂料, 2009, 47 (9): 8-10.
- PANG Yukun, LI Zhigao, MA Hongliang. Influences of Polyurea and Epoxy Coating on the Frost Resistance of Concrete [J]. Shanghai Coatings, 2009, 47 (9): 8-10.
- [7] 熊建波, 王胜年, 吴平. 硅烷浸渍剂对混凝土保护作用的研究 [J]. 混凝土, 2004, 15 (9): 63-65.
- XIONG Jianbo, WANG Shengnian, WU Ping. Research and Application of Silane Impregnant in Protecting Concrete [J]. Concrete, 2004, 15 (9): 63-65.
- [8] 张鹏, 戴建国, 赵铁军, 等. 海水暴露环境下带裂缝混凝土的表面防水处理 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12 (2): 214-218.
- ZHANG Peng, DAI Jianguo, ZHAO Tiejun, et al. Water Repellent Treatment on Surface of Cracked Concrete under Sea Water Exposure Environment [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12 (2): 214-218.
- [9] SCHUEREMANS L, GEMERT D VAN, FRIEDAL M, et al. Durability of Hydrophobic Agents Applied in a Marine Environment [C] // Proceedings of 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials. Brussels: Aedificatio Publishers, 2008: 357-368.
- [10] NANUKUTTAN, SREEJITH V, BASHEER, et al. Full-Scale Marine Exposure Tests on Treated and Untreated Concretes-Initial 7-Year Results [J]. ACI Materials Journal, 2008 (1): 81-87.
- [11] 黄君哲, 范志宏, 王胜年, 等. 海洋环境中混凝土涂层防腐蚀效果分析 [J]. 水运工程, 2006, 33 (2): 16-20.
- HUANG Junzhe, FAN Zhihong, WANG Shengnian, et al. Corrosion Prevention Effectiveness of Coating System Applied in Marine Environment [J]. Port & Waterway Engineering, 2006, 33 (2): 16-20.