

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.08.034

# 上海轨道交通 14 号线穿越黄浦江段防汛墙的耐久性加固研究

钱程

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

**摘要:**对隧道保护范围内的防汛墙进行耐久性加固,可避免因防汛墙大修而给隧道带来的不利影响,保障隧道和防汛墙安全。以上海轨道交通 14 号线穿越黄浦江段防汛墙的耐久性加固工程为案例,分析了防汛墙耐久性影响因素,介绍了在防汛墙外立面采用“双层聚合物水泥防水砂浆+硅烷浸渍剂”加固方案的设计和施工过程,并通过结构复核和耐久性评定验证了该加固方案的合理性。研究思路可为类似堤防维修加固工程提供参考和借鉴。

**关键词:**防汛墙;耐久性加固;聚合物水泥防水砂浆;硅烷浸渍剂

**中图分类号:**TV33

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-7716(2024)08-0143-04

## 0 引言

黄浦江横穿上海,是上海市最大的河流。河道两侧的防汛墙作为重要防汛设施,先后经历了 4 次全市性建设,已完成封闭,具备了完善的防御能力<sup>[1]</sup>。

近年来,随着上海市基础设施的不断更新完善,浦东浦西间已修建多条连通隧道。由于新建隧道与其保护范围内的防汛墙建设年代及标准不同,二者耐久性不一致的问题不断出现。如何合理利用现有防汛墙结构,提高墙体的合理使用年限,避免隧道使用年限内因防汛墙大修而影响隧道安全,已成为防汛墙耐久性加固的一大难题。

本文结合上海轨道交通 14 号线穿越黄浦江段防汛墙的耐久性加固实例,开展了在防汛墙外立面采用“双层聚合物水泥防水砂浆+硅烷浸渍剂”加固方案来提高防汛墙耐久性的研究,以期类似工程的设计和施工提供参考。

## 1 工程概况

上海轨道交通 14 号线是上海市重要的东西向交通连接通道<sup>[1]</sup>。轨道交通 14 号线隧道起于上海市嘉定区,终于浦东新区,全长约 38.5 km,横跨 5 个行政区划,共布置有 31 个站点;工程全线均为地下

线路,采用双线圆形隧洞,内径为 5.90 m,外径为 6.60 m,整体设计使用年限不少于 100 a。隧道掘进以盾构法施工为主,局部辅以明挖施工。

轨道交通 14 号线走向示意图见图 1。



图 1 轨道交通 14 号线走向示意图

本工程于人民路隧道与延安路隧道之间横穿黄浦江,属陆家嘴站—豫园站区间。该段采用盾构法施工,下穿黄浦江两侧防汛墙。线路从浦西豫园站逐渐向东北侧转向至浦东陆家嘴站,转弯半径 350 m,站点距离 1.2 km。

豫园站—陆家嘴站轨道交通 14 号线工程 11 标施工地理位置图见图 2。

穿越段浦东侧防汛墙为高桩承台结构,于 2005 年设计建设,原设计使用年限为 100 a。墙体为钢筋混凝土,底板下采用 2 排钻孔灌注桩+1 排板桩的基础桩型,板桩桩尖标高 -4.60 m,钻孔灌注桩桩尖标高 -15.10 m,与该处隧道顶标高 -21.50 m 存在 6.40 m 安全空间。

收稿日期:2023-12-04

作者简介:钱程(1991—),男,硕士,工程师,从事水利水电工程设计工作。



图2 豫园站—陆家嘴站轨道交通14号线工程11标  
施工地理位置图

地铁穿越段剖面图见图3;穿越段防汛墙典型断面型式见图4。

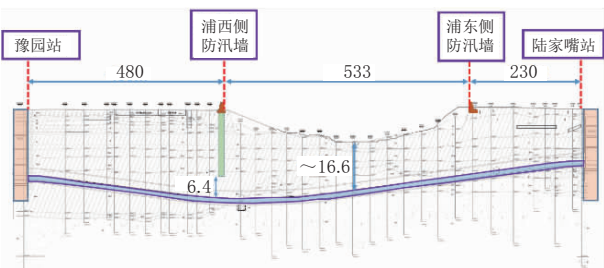


图3 地铁穿越段剖面图(单位:m)

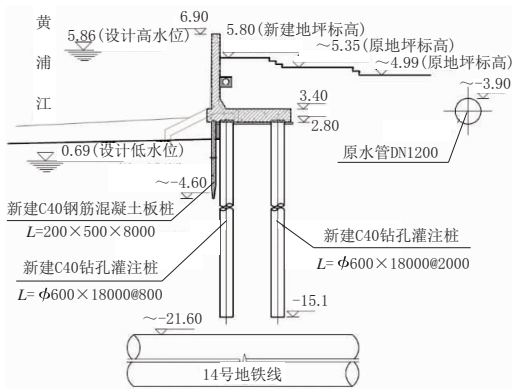


图4 穿越段防汛墙典型断面型式(标高单位:m;其他单位:mm)

## 2 防汛墙耐久性加固必要性分析

由于防汛墙早于隧道建设(至隧道建设之前防汛墙已服役运行16 a),防汛墙剩余使用年限短于隧道结构的设计使用年限,未来将面临在隧道服役期间上部防汛墙大修的情况。为避免在隧道使用年限内因防汛墙大修而影响隧道安全,并降低防汛墙维修的施工难度和影响,应在隧道建设期间同步开展穿越段防汛墙的耐久性复核和加固设计。

## 3 防汛墙耐久性影响因素和加固原理

### 3.1 影响因素

本工程防汛墙所处环境为一般大气环境,影响混凝土耐久性的主要因素为混凝土碳化诱导的钢筋锈蚀和氯离子引起的钢筋腐蚀2种。

### 3.1.1 混凝土碳化诱导的钢筋锈蚀<sup>[2]</sup>

混凝土碳化主要由大气中的酸性氧化物( $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ )或水中的硫酸盐中和混凝土内部碱性物质引起,并伴随有混凝土体积收缩、面层裂缝问题。钢筋失去混凝土保护层碱性防护后会发生锈胀,进一步加剧混凝土面层开裂、脱落,从而影响结构耐久性。

### 3.1.2 氯离子引起的钢筋腐蚀<sup>[3]</sup>

氯离子引起的钢筋腐蚀主要分为4个阶段:

(1)水中游离氯离子附着于防汛墙结构表面,造成混凝土面层pH值降低。

(2)随着氯离子不断渗透,防汛墙主筋表面钝化膜被破坏,腐蚀电池形成,锈蚀发生。

(3)随着铁离子不断反应、游离,锈蚀加剧。

(4)宏观上,防汛墙主筋因锈蚀、体积膨胀而致其有效截面降低,混凝土保护层被破坏,防汛墙结构耐久性降低。

## 3.2 加固原理

本次耐久性加固应尽量遵循经济性、安全性原则,即防汛墙结构应尽量保留利用,以降低投资;同时,加固方案应避免基坑开挖、挤土、振动等影响,以确保隧道结构安全。

针对上节提出的影响混凝土耐久性的2种主要因素,本次加固方案采取的针对措施为:(1)增加混凝土表面防水涂层,以延缓碳化引起的钢筋锈蚀;(2)鉴于防汛墙为临水构筑物,背水侧结构埋藏于地下,属于封闭环境,迎水侧结构则受江水浸泡和水位变动淘刷,更易发生氯离子引起的钢筋锈蚀,故考虑在迎水侧采用防腐层,以延缓江水中氯离子对钢筋的锈蚀作用。

## 4 防汛墙耐久性加固设计

### 4.1 加固设计

#### 4.1.1 混凝土表面防水涂层设计

与传统水泥砂浆不同,聚合物水泥防水砂浆中增加了有机聚合物<sup>[4]</sup>。有机聚合物一方面可作为水泥机体与混凝土结构的黏结材料,保证防水砂浆与混凝土基层间的黏结效果;另一方面可提高砂浆的抗渗透性能,进而增强结构的防水性,有效防止基层内部结构被 $\text{CO}_2$ 或水分侵蚀。

考虑到聚合物水泥防水砂浆具有以上特性,本次加固方案先在防汛墙墙身和底板表面采用双层聚合物水泥防水砂浆(厚度为10~12 mm)防护,以减少

CO<sub>2</sub>或水分侵蚀,降低结构碳化可能。

#### 4.1.2 迎水侧混凝土表面防腐层设计

高速公路、桥梁工程中常采用硅烷浸渍剂作为结构防腐涂层<sup>[5]</sup>。硅烷浸渍剂作为一种有机硅,在涂刷混凝土面层后可有效渗入基层内部,与基层中水分子反应形成隔离膜,防止氯离子渗透进入混凝土内部,从而发挥防腐作用。

参考市政工程中成熟的防腐处理方案,本次加固方案在防汛墙迎水侧于聚合物水泥砂浆表层增加硅烷浸渍剂2道,以延缓氯离子侵蚀,提高防汛墙结构耐久性和使用寿命。

#### 4.2 施工要求

具体施工步骤如下:

- (1)清洗、凿毛并湿润防汛墙墙身和底板面层;
- (2)配制聚合物水泥防水砂浆,且应现配现用,配制至使用完成不超过45 min;
- (3)涂刷面层聚合物水泥防水砂浆,涂刷厚度10~12 mm;
- (4)抹平、压实、保湿养护7 d后自然干燥72 h;
- (5)在防汛墙迎水侧于聚合物水泥防水砂浆表面涂刷硅烷浸渍剂2道,2次涂刷应连续,待第1道涂刷的表层渗透吸收后立即涂刷第2道;
- (6)养护及检测;利用涂料湿膜仪,确保涂料渗透深度满足《混凝土结构防护用渗透型涂料》(JG/T 337—2011)要求。

### 5 基于可靠度的防汛墙耐久性评定

#### 5.1 防汛墙耐久性评定等级标准

本工程防汛墙耐久性加固目标为:在轨道交通14号线100 a设计使用年限内,防汛墙结构无需大修即可保证其正常使用安全。参照《水工混凝土结构耐久性评定规范》(SL775—2018),加固后的防汛墙耐久性等级应不小于B级。耐久性等级划分见表1。

表1 耐久性等级划分

评定等级	含义
A	期望使用年限内满足耐久性要求
B	期望使用年限内基本满足耐久性要求,不需采取或部分采取修复及其他防护补救措施
C	期望使用年限内不能满足耐久性要求,应及时采取修复或其他防护补救措施

#### 5.2 结构安全复核

混凝土芯样抗压强度实测值为32.1 MPa。以此来复核承载能力极限状态下防汛墙墙身和底板的受弯、受剪承载力以及正常使用极限状态下防汛墙墙

身和底板的裂缝宽度。

结构安全复核成果一、成果二见表2、表3。

表2 结构安全复核成果一(承载能力极限状态)

构件	计算项目	结构受力值 $K_s$	结构抗力值 $R$	安全性 ( $R/K_s$ )
墙身	最大弯矩 / (kN·m)	30.79	88	2.85(≥1)
	最大剪力 / kN	34.96	298	8.52(≥1)
底板	最大弯矩 / (kN·m)	70.20	165	2.35(≥1)
	最大剪力 / kN	81.00	427	5.27(≥1)

表3 结构安全复核成果二(正常使用极限状态)

构件	最大弯矩 / (kN·m)	裂缝宽度 / mm		适用性 $r$
		计算值	允许值	
墙身	18.5	0.067	0.25	≥1
底板	43.0	0.162	0.25	≥1

计算结果显示,防汛墙结构承载力和裂缝宽度均能满足《水工混凝土结构耐久性评定规范》安全要求。

#### 5.3 防汛墙剩余使用年限计算

本工程剩余使用年限可按式计算<sup>[6]</sup>:

$$t_{re} = t_{cr} - t_0 \quad (1)$$

$$t_{cr} = t_i + t_c \quad (2)$$

式中: $t_{re}$ 为剩余使用年限,a; $t_0$ 为结构建成时间,a,本工程已开展耐久性加固, $t_0$ 可取为0; $t_{cr}$ 为钢筋面层混凝土开裂脱落年限,a。

$t_{cr}$ 发生过程可分为2个阶段:阶段一为防汛墙耐久性加固完成至钢筋发生锈蚀的年限,即 $t_i$ ;阶段二为防汛墙因钢筋锈胀导致面层混凝土开裂脱落的年限,即 $t_c$ 。

#### 5.4 防汛墙耐久性加固完成至钢筋发生锈蚀的年限

防汛墙耐久性加固完成至钢筋发生锈蚀的年限 $t_i$ 计算式为:

$$t_i = K_k K_c K_m \quad (3)$$

式中: $K_k$ 为碳化速率影响系数; $K_c$ 为保护层厚度影响系数,本工程加固后保护层厚度为40 mm,查表得 $K_c=2.67$ ; $K_m$ 为局部环境影响系数,经防水处理后,混凝土处于干燥环境,考虑室外环境和施工质量系数等,局部环境系数 $m=2.5$ ,相应的 $K_m=0.94$ 。

碳化速率影响系数 $K_k$ 与碳化系数 $k$ 有关,碳化系数 $k$ 可根据快速碳化试验推算或采用经验公式计算。经验公式计算式为:

$$k = 3K_{co_2} K_{K1} K_{Kt} K_{KS} K_F T^{1/4} RH^{1.5} (1-RH) \left( \frac{58}{f_{cuk}} - 0.76 \right) \quad (4)$$



$$K_{co_2} = \sqrt{C_o / 0.03} \quad (5)$$

$$K_F = 1.0 + 13.34 F^{0.3} \quad (6)$$

式中: $k$ 为碳化系数, $\text{mm}/\sqrt{\text{a}}$ ;  $K_{co_2}$ 为 $\text{CO}_2$ 浓度影响系数,取1.3;  $K_{K1}$ 为位置影响系数,取1.0;  $K_{K1}$ 为养护浇筑影响系数,取1.2;  $K_{KS}$ 为工作应力影响系数,取1.1;  $T$ 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ ,取上海市年平均温度 $15.6^{\circ}\text{C}$ ;  $RH$ 为环境相对湿度,取上海市年均湿度70%;  $K_F$ 为粉煤灰取代系数;  $f_{\text{cu}k}$ 为混凝土强度评定值,30 MPa;  $C_o$ 为 $\text{CO}_2$ 浓度,%;  $F$ 为粉煤灰取代量(质量比),取15%。

经计算, $K_F=1.03$ , $k=2.17$ ,查表得 $K_K=1.48$ 。

综合计算得到 $t_i=56.4 \text{ a}$ 。

### 5.5 防汛墙因钢筋锈胀导致面层混凝土开裂脱落的年限

防汛墙因钢筋锈胀导致面层混凝土开裂脱落的年限 $t_c$ 可按式计算:

$$t_c = t_s H_c H_f H_d H_T H_{RH} H_m \quad (8)$$

式中: $t_s$ 为标准状态下防汛墙因钢筋锈胀导致面层混凝土开裂脱落的年限,本工程计算参考室外墙板,取为3.9;  $H_c$ 、 $H_f$ 、 $H_d$ 、 $H_T$ 、 $H_{RH}$ 、 $H_m$ 分别为防汛墙保护层厚度、防汛墙混凝土强度、防汛墙主筋直径、防汛墙处温度、防汛墙处湿度、防汛墙状态对防汛墙因主筋锈胀致面层混凝土开裂脱落进程的影响系数,各系数取值见表4。

表4 各系数取值表

系数	取值	备注
$H_c$	4.62	实测保护层厚度为40 mm
$H_f$	1.92	实测混凝土强度为32.1 MPa
$H_d$	1.25	墙身主筋直径14 mm,底板主筋直径16 mm
$H_T$	1.17	
$H_{RH}$	1.21	
$H_m$	1.40	耐久性加固之后防汛墙内部处于干燥环境

计算得到防汛墙因钢筋锈胀导致面层混凝土开裂脱落的年限 $t_c=85.7 \text{ a}$ 。

### 5.6 防汛墙剩余使用年限

根据以上计算,防汛墙钢筋面层混凝土开裂脱落年限 $t_{cr}=t_i+t_c=56.4+85.7=142.1 \text{ a}$ ;因防汛墙剩余使用年限 $t_{re}=t_{cr}-t_0$ ,而 $t_0=0$ ,故 $t_{re}=t_{cr}-t_0=142.1-0=142.1 \text{ a}$ 。

### 5.7 防汛墙耐久性等级评定

设 $t_e$ 为防汛墙期望使用年限, $\gamma_0$ 为结构耐久重要性系数,则根据防汛墙剩余使用年限计算结果,计算得到 $t_{re}/t_e \gamma_0$ 值为:

$t_{re}/t_e \gamma_0 = 142.1 / (100 \times 1.1) = 1.29$ ,即 $1.0 \leq t_{re}/t_e \gamma_0 < 1.8$ ,由《水工混凝土结构耐久性评定规范》(SL 775—2018)可知,该防汛墙耐久性评定等级为B级,满足耐久性加固目标<sup>[7]</sup>。也就是说,在轨道交通14号线100 a设计使用年限内,防汛墙结构无需大修即可正常使用安全。

## 6 结 语

上海轨道交通14号线穿越黄浦江段防汛墙已采用“双层聚合物水泥防水砂浆+硅烷浸渍剂”方案完成耐久性加固。结合理论分析和施工经验,该方案可有效提高防汛墙结构的合理使用年限,满足耐久性要求;同时,相较于常规加固方案,该方案具有施工简单、方便快捷、影响小等优势,在防汛墙设施耐久性加固工程中具有一定的适用性,可在类似工程中推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 胡欣.上海市黄浦江堤防防洪能力调查评价[J].城市道桥与防洪,2014(9):156-160.
- [2] 黑瑞文.混凝土结构的劣化分析与控制[J].北京工业职业技术学院学报,2013,12(3):6-10,24.
- [3] 禹虹机.不同盐类对混凝土的宏-微观损伤机理[D].长春:吉林大学,2017.
- [4] 迟玉萌.聚合物水泥防水砂浆的改性研究[D].长春:吉林建筑大学,2023.
- [5] 张伟,史琛,项志敏,等.改性有机硅涂料对混凝土耐久性的影响[J].混凝土,2010(8):73-75.
- [6] 孟乔,黄维蓉.基于耐久性能的混凝土寿命预测方法研究进展[J].科学技术与工程,2022,22(5):1751-1759.
- [7] 牛荻涛,杨德柱,罗大明.混凝土结构耐久性评定方法体系[J].建筑结构,2021,51(17):115-121.