

# 高性能混凝土及防腐涂料在浙江某码头中的应用

吉 鸣<sup>1</sup>, 干岳良<sup>1</sup>, 丁朝梅<sup>1</sup>, 娄文波<sup>1</sup>, 车 磊<sup>2</sup>, 董建锋<sup>3</sup>

(1. 舟山市交通规划设计院, 浙江 舟山 316021; 2. 嵊泗县交通运输局, 浙江 舟山 202450;

3. 浙江大学 结构工程研究所, 杭州 310058)

**摘 要:** 依托舟山嵊泗县李柱山西侧客运码头工程, 将高性能混凝土应用于部分码头结构, 分析码头涂敷防腐涂料隔绝码头受海洋环境的影响。通过分析这两项措施对改善码头耐久性能的有效性和经济性, 提出改善混凝土码头耐久性能的建议。研究认为, 就原材料成本而言, 高性能混凝土价格略微低于原普通混凝土, 氯离子迁移系数仅为约原普通混凝土的一半, 防腐涂料的采用将增加码头建设成本。建议防腐涂料仅在结构中重要的部位或容易受腐蚀的部位采用, 而不必整个码头采用。

**关键词:** 高性能混凝土; 氯离子迁移系数; 防腐涂料

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S0-0023-05

## Application of high performance concrete and coating of protective paint on a port in zhejiang province

Ji Ming<sup>1</sup>, Gan Yueliang<sup>1</sup>, Ding Chaomei<sup>1</sup>, Lou Wenbo<sup>1</sup>, Che Lei<sup>2</sup>, Dong Jianfeng<sup>3</sup>

(1. Institute of Communications Planning and Design of Zhoushan, Zhoushan 316021, P. R. China;

2. Bureau of Communications of Shengsi County, Zhoushan 202450, P. R. China;

3. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

**Abstract:** The durability of Lizhushan Port in Shengsi County, Zhejiang Province was studied. High performance concrete (HC) was partly applied in the port with protective paint was coated on it. The chloride diffusion coefficient of both HC and original concrete (OC) was tested and compared. The cost of the application of HC and the protective paint was calculated. The results show that the application of HC could reduce the cost slightly, and the chloride diffusion coefficient of HC was smaller than that of OC. The coating of protective paint could increase the cost significantly. A suggestion was made that the protective paint may be coated on key parts of the port.

**Key words:** high performance concrete; chloride diffusion coefficient; protective paint

舟山群岛新区是中国第四个国家级新区, 也是中国首个以海洋为主题的新区。为加快对舟山群岛的开发开放, 全力打造国际物流岛, 舟山群岛交通基础设施亟待加强, 码头工程是其重要内容。然而, 由于海洋环境恶劣, 氯离子等有害介质侵入混凝土内

部, 会破坏钢筋钝化膜, 诱发钢筋锈蚀, 造成混凝土的锈胀开裂, 甚至混凝土保护层剥落<sup>[1-2]</sup>, 位于浪溅区的构件腐蚀尤为严重<sup>[3-4]</sup>, 这将造成混凝土构件结构性能的大幅退化, 影响结构的继续使用。据统计<sup>[5]</sup>, 中国早期建设的 89% 的海港码头仅使用 7 至

25 年,就遭受不同程度腐蚀破坏,需要修复加固,有的码头尚未达到设计年限就得拆除重建,造成巨大的经济损失。

大量耐久性问题的暴露引起了学术界和工程界的普遍关注。与此同时,近些年来新材料、新工艺和新技术的不断涌现,使得耐久性的设计理念可以通过材料配比等方法更早、更好地在结构设计和施工过程中各个环节有所体现。比如,高性能混凝土概念已被提出几十年,采用粉煤灰、高炉矿渣等工业废料代替部分水泥而制成的高性能混凝土,大大改善了混凝土的耐久性,并且高性能生产过程中能够有效利用工业废料,从而已被应用到混凝土结构工程。然而,这个成熟的技术,在舟山地区的码头建设中却尚未被广泛采用。

此外,大量的工程实践证明<sup>[6-11]</sup>,对于未涂覆保护涂料的构件,因腐蚀造成的海洋工程混凝土建筑破坏几乎遍及沿海岸线各地区,且破坏情况都十分严重和迅速。混凝土防腐涂层能够有效抵抗氯盐向混凝土的渗透,对钢筋混凝土结构具有明显的保护效果。由于涂层施工简便,如对涂层配套进行科学、合理的设计,并严格控制施工质量,混凝土防腐涂层应该是延长钢筋混凝土结构使用寿命的较经济和有效的措施。

可见,要改善混凝土码头的耐久性能,主要从 2 方面考虑:一方面需要通过对混凝土的优化设计,改善混凝土本身的抗氯离子侵蚀性能,以延缓钢筋锈蚀的发生,从而使结构本身对恶劣环境具有更强的适应能力;另一方面需要配合防腐涂料等附加措施的使用,使得混凝土结构能够有效隔绝氯离子等有害离子。因此,依托舟山嵊泗县李柱山西侧客运码头工程,将高性能混凝土应用于部分码头作为对比分析研究,同时对码头涂敷防腐涂料隔绝码头受海洋环境的影响。通过分析这两项措施对改善码头耐久性能的有效性和经济性,提出改善混凝土码头耐久性能的建议。

1 高性能混凝土及防腐涂料的应用

1.1 应用位置

李柱山西侧客运码头工程位于浙江省嵊泗县泗礁岛,工程结构型式采用高桩梁板式,建设规模为 1 000 t 级客运码头,包括码头平台 92 m×12 m,接长平台 39.42 m×12 m 及栈桥 23 m×8 m。

一般说来,码头浪溅区的腐蚀最为严重,相关规范也将浪溅区作为腐蚀最严重的区域来对待,现浇构件横梁和立柱恰好处于浪溅区。此外,立柱与横梁受力情况比较简单而比较典型,立柱主要轴心受压,横梁则以受弯为主。因此,选定  $P_1$  和  $P_2$  榀排架的横梁和立柱应用高性能混凝土配合比,而其他排架仍用原混凝土配合比,作为对照。为了保证码头整体的美观及顺利验收,在码头所有水上部分均涂敷防腐涂料,而不做涂涂料与不涂涂料的对比研究。码头工程如图 1 所示。



图 1 李柱山西侧客运码头

1.2 混凝土配合比

根据码头结构图纸,立柱和横梁的混凝土强度等级为 C40。设计了强度等级同为 C40 的高性能混凝土 (high performance concrete, HC) 作为对照。原混凝土 (original concrete, OC) 和高性能混凝土配合比及实测 28 d 抗压强度如表 1 所示。

表 1 原混凝土及新设计混凝土配合比

编号	1 m <sup>3</sup> 混凝土所需各组分的量/kg								28 d 抗压强度/MPa
	水	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	碎石	减水剂	阻锈剂	
OC	180	400	0	0	607	1 234	0	0	42.01
HC	139	180	180	90	779	1 032	5.4	9.0	44.46

两种混凝土所采用的原材料完全相同,材料信息如下:水泥为嘉兴东锦水泥厂生产的 42.5 级普通

硅酸盐水泥;粉煤灰产自舟山定海,为 I 级粉煤灰;矿粉产自江苏沙钢集团,为 S95 级矿粉;石子产自嵊

泗县黄龙宝山石子厂,粒径 5~25 mm;砂产自定海,为淡化粗中砂;减水剂产自南京友西科技有限责任公司,为 UC-1A 型高效缓凝减水剂;阻锈剂产自天津市新隆茂化共销售有限公司,为一等品,主要成分亚硝酸钙。

根据两种混凝土配合比,进行试配并检验混凝土抗压强度、氯离子迁移系数等检测合格后方用于码头实体结构中。在浇筑码头的同时,两种混凝土各浇筑边长为 150 mm 的混凝土立方体试件 2 个,用于测定两种混凝土氯离子迁移系数。

1.3 防腐涂料的应用

作者对市场上常见的 6 种涂料进行长达半年的研究后,认为所采用的 6 种混凝土防腐材料中,E-26 性能最好,因此,将其应用于码头整体水上部分(见

表 2)。

表 2 本文采用的 E-26 防腐涂料信息

防腐涂料名称	涂层	作用机理	涂料用量	涂敷工艺
H06-10 底漆	底层	渗入砼	100	一次涂敷
E-26 H45-ZF101	中间层	砼表面成膜	333.3	一次涂敷
PV-50 面漆	面层	砼表面成膜	208.3	一次涂敷

2 成本分析

2.1 高性能混凝土成本对比

确定采用 HC1 组配合比应用于码头工程后,项目组成员对本工程所采用的混凝土原材料相关价格,汇总如表 3 所示。

表 3 码头所用混凝土各原材料价格 元/t

原材料	水	水泥	粉煤灰	矿渣粉	砂子	碎石	减水剂	阻锈剂
单价	5.4	485	194	220	53.8	73.1	3 500	3 000X

根据两种混凝土配合比,按原材料价格计算每立方米混凝土的价格,如表 4 所示。

表 4 新设计和原有的混凝土配合比价格对比

混凝土类型	每立方米混凝土各材料价格/元								合 计
	水	水泥	砂	碎石	矿粉	粉煤灰	阻锈剂	减水剂	
HC	0.75	87.3	41.91	75.44	19.8	34.92	27	18.9	306.02
OC	0.97	194	32.66	90.21	0	0	0	0	317.84

由表 4 可以看出,在不考虑交通运输等费用的情况下,仅考虑原材料成本,则经优化设计的混凝土配合比每立方米能比原混凝土配合比节省约 12 元。这主要是因为水泥相对较为昂贵,而经优化设计的混凝土减少了水泥用量。新配合比涉及到的费用较昂贵的是减水剂及阻锈剂,但二者用量均非常少,所以整体来看,经优化设计的混凝土配合比成本较低。

根据本码头工程混凝土的构件信息,计算实际浇筑混凝土体积约为 800 m<sup>3</sup>。若全部采用经提升技术后的混凝土,在不考虑交通运输费用的情况下,仅单纯成本,则完全使用优化设计的配合比将为本码头工程节省约 1 万元。若考虑所有混凝土构件(包括预制构件),则可以节省更多材料费用。

如果能合理利用舟山市本地粉煤灰和矿粉等工业废料,交通运输费并不会增加太多。综合而言,采用新配比高性能混凝土与原配比混凝土的经济水平基本持平。

2.2 防腐涂料成本分析

据统计,使用 E-26 型涂料后,每平方米混凝土将增加成本 14.28 元,考虑施工增加的人工等费用,则每平方米涂料将增加码头成本 45 元。根据李柱山西侧客运码头工程构件的尺寸,计算水上部分构件外露表面积约为 5 800 m<sup>2</sup>,使用后,码头初始成本将增加约 26×10<sup>4</sup> 元。根据耐久性规范,防腐涂料的采用至少能够延长结构使用寿命 10 年。

3 应用效果

浇筑码头时一起浇筑的试件置于码头现场,在 180 d 时,根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)检测两种混凝土氯离子迁移系数。检测步骤主要包括取芯机取芯,切割机切割,超声浴清洗后放入橡胶筒通电,最后劈裂及硝酸银滴定测氯离子侵蚀深度,如图 2 所示。根据规范,RCM 各步骤数据记录及处理如表 5 所示。对两种混凝土氯离子迁移系数分别取平均值,

得到原混凝土(OC-1 和 OC-2)180 d 时的氯离子迁移系数为  $6.95 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ;而高性能混凝土(HC-1 和 HC-2)180 d 氯离子迁移系数为  $3.55 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。可见,新配合比高性能混凝土的抵抗氯离子侵入能力高于原混凝土。

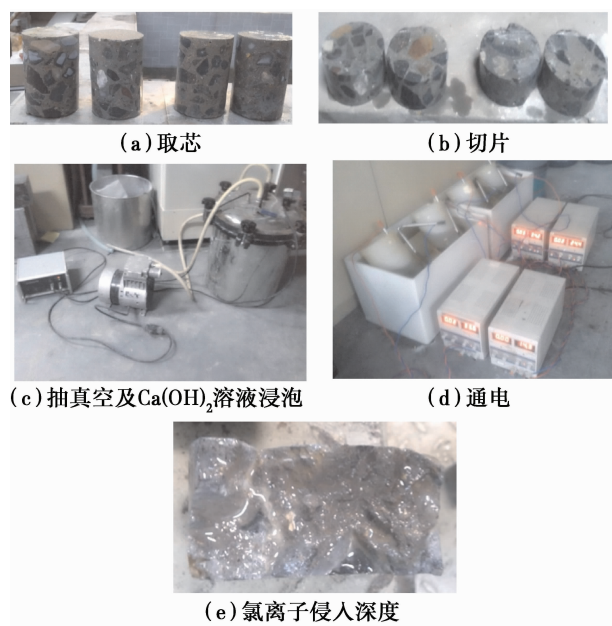


图 2 RCM 法检测氯离子迁移系数主要步骤

表 5 RCM 各步骤数据记录及处理

	温度均值 $T/^\circ\text{C}$	电压 $U/\text{V}$	试件厚度 $L/\text{mm}$	渗透深度 $X_d/\text{mm}$	试验 时间 $t/\text{h}$	氯离子迁移系 数/ $(\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
OC-1	10.9	24.6	51.4	13.0	24	7.0
OC-2	10.9	14.7	50.2	8.5	24	6.9
HC-1	10.9	34.4	50.4	9.3	24	3.4
HC-2	10.9	34.6	49.5	10.1	24	3.7

根据已有的研究和试验结果分析认为,在混凝土中掺入粉煤灰、矿渣等矿物掺合料后,对混凝土抗氯离子渗透性能起到的改善作用,主要归因于以下 2 个方面:

1) 矿物掺合料的掺入改善了混凝土内部的微观结构和水化产物的组成,混凝土孔隙率降低,孔径细化,使混凝土对氯离子渗透的扩散阻力提高。由于火山灰效应,减少了粗大晶体颗粒的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  数量及其在水泥石——集料界面过渡区的富集与定向排列,优化了界面结构,并生成强度更高、稳定性更优、数量更多的低碱度水化硅酸钙凝胶。同时掺合料粉末的密实填充作用会使水泥石结构和界面结构更加致密。

2) 矿物掺合料提高了混凝土对氯离子的物理吸附或化学结合能力,即固化能力。水泥石孔结构的细化使其对氯离子的物理吸附能力增强;二次水化反应生成的碱性较低的 C-S-H 凝胶也增强了结合氯离子的能力;掺合料中较高含量的无定型  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,能与氯离子、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,生成 Friedel 盐<sup>[12]</sup>,这些均有利于降低氯离子在混凝土中的渗透速度,提高混凝土的抗氯离子渗透的能力。

氯离子迁移系数反映混凝土抗氯离子侵蚀的能力,因此,可以用于预测钢筋锈蚀。钢筋初锈时刻的氯离子浓度根据 Fick 第二定律<sup>[1]</sup>

$$C_{\text{cl}}(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{t D_{\text{Cl}}}} \right) \right], \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{cl}}$  为钢筋表面氯离子浓度,当其达到阈值则钢筋开始锈蚀。 $x$  为混凝土深度(从表面至某一深度的距离),  $t$  为时间(年数),  $C_0$  为混凝土中初始氯离子浓度,  $C_s$  为混凝土表面氯离子浓度,  $D_{\text{Cl}}$  为氯离子迁移系数。

码头 2013 年 6 月投入使用,使用部位为立柱和上横梁,标高在 0.3~2.8 m 范围内。在距离海平面 0~3 m 范围内,  $C_s = 0.81\%$ 。横梁保护层厚度  $x = 70 \text{ mm} = 0.07 \text{ m}$ ,立柱保护层厚度  $x = 50 \text{ mm} = 0.05 \text{ m}$ ,因此,从氯离子侵蚀的角度来看,立柱的钢筋将先于横梁钢筋发生锈蚀,因此,考虑立柱

$$C_{\text{cl}}^{\text{OC}}(x, t) = C_0^{\text{OC}} +$$

$$(C_s^{\text{OC}} - C_0^{\text{OC}}) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{t^{\text{OC}} D_{\text{Cl}}^{\text{OC}}}} \right) \right], \quad (2)$$

$$C_{\text{cl}}^{\text{HC}}(x, t) = C_0^{\text{HC}} +$$

$$(C_s^{\text{HC}} - C_0^{\text{HC}}) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{t^{\text{HC}} D_{\text{Cl}}^{\text{HC}}}} \right) \right], \quad (3)$$

两种混凝土所处环境相同,因此,  $C_0^{\text{HC}} = C_0^{\text{OC}}$  和  $C_s^{\text{HC}} = C_s^{\text{OC}}$  相同。一般假设当  $C_{\text{cl}}$  达到胶凝材料的 0.9% 时钢筋开始锈蚀,而原混凝土 OC 配合比每方混凝土内的胶凝材料质量为 400 kg,高性能混凝土 HC 则为 450 kg,因此,  $C_{\text{cl}}^{\text{OC}}(x, t) < C_{\text{cl}}^{\text{HC}}(x, t)$ 。于是可以得到两者误差函数值之比

$$\frac{\operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{t^{\text{HC}} D_{\text{Cl}}^{\text{HC}}}} \right)}{\operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{t^{\text{OC}} D_{\text{Cl}}^{\text{OC}}}} \right)} < 1, \quad (4)$$

$$\frac{\frac{x}{2 \sqrt{t^{\text{HC}} D_{\text{Cl}}^{\text{HC}}}}}{\frac{x}{2 \sqrt{t^{\text{OC}} D_{\text{Cl}}^{\text{OC}}}}} < 1, \quad (5)$$

$$\frac{t_{OC}^{HC}}{t_{OC}^{OC}} > \frac{D_{Cl}^{OC}}{D_{Cl}^{HC}}, \quad (6)$$

对于原混凝土,  $D_{Cl}^{OC} = 6.93 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ , 高性能混凝土  $D_{Cl}^{HC} = 3.56 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ 。

$$\frac{t_{OC}^{HC}}{t_{OC}^{OC}} > \frac{D_{Cl}^{OC}}{D_{Cl}^{HC}} = 1.95. \quad (7)$$

上述计算可以看出,在正常使用情况下,同样环境中服役的高性能混凝土码头从开始使用到钢筋出现锈蚀所需要的时间约是普通混凝土码头时间的 2 倍。可见,在没有增加经济成本的情况下,达到延长寿命的效果,采用高性能混凝土是一种非常值得推广的码头提性延寿方案。

事实上,码头的实际寿命由于环境、荷载等的影响会与上述分析有所差异,但是从以上定性的讨论可以看出,采用高性能混凝土之后,由于抗氯离子迁移能力大幅提升,因此,码头服役时间将延长近一倍。

根据耐久性规范,防腐涂料的采用至少能够延长结构使用寿命 10 年。本文分析指出,防腐涂料的使用将增加码头建设成本约  $26 \times 10^4$  元。因此,若从节约成本的角度考虑,不采用涂料技术也应该能满足设计使用年限的要求,即防腐涂料没有必要在整个码头完全使用,可以有针对性的使用,对于结构中重要的部位或容易受腐蚀的部位,服役过程中可能会较其他地方先受腐蚀,因此,这些部位可考虑采用表面涂料方法,以延长结构寿命。

## 4 结 论

笔者对嵊泗县李柱山西侧客运码头工程采取部分采用高性能混凝土,全部涂敷防腐涂料的耐久性措施,并分析了该措施的成本即性能提升效果。研究主要获得以下结论:

1) 高性能混凝土大幅降低了水泥用量,就原材料成本而言,可以略微降低混凝土造价。防腐涂料的采用将增加码头建设成本。

2) 采用的高性能混凝土氯离子迁移系数仅为约原普通混凝土的一半,抗氯离子侵蚀能力增强。根据 Fick 第二定律,正常服役的高性能混凝土码头从开始使用到钢筋出现锈蚀的时间约是普通混凝土码头的 2 倍。

3) 从节约成本的角度考虑,防腐涂料可以仅在结构中重要的部位或容易受腐蚀的部位的采用,而不必整个码头采用。

## 参考文献:

- [1] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 范宏, 赵铁军, 田砾, 徐红波. 暴露 26 年后的混凝土的碳化和氯离子分布[J]. 工业建筑, 2006(8): 50-53.
- [3] 金伟良, 吕清芳, 潘仁泉. 东南沿海公路桥梁耐久性现状[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 254-257.
- [4] 张菀竹. 混凝土结构耐久性检测、评定及优化设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [5] 叶雄顺. 提高海港码头钢筋混凝土结构耐久性的措施[J]. 水运工程, 2004(10): 63-65.
- [6] 黄洁, 李周波, 张松. 混凝土结构的耐久性措施[J]. 腐蚀与防护, 2005(3): 129-132.
- [7] 张宝胜, 干伟忠, 陈涛. 杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性解决方案[J]. 土木工程学报, 2009(6): 72-77.
- [8] 沈海鹰. 我国海洋工程用混凝土保护涂料的现状[J]. 涂料工业, 2003, 33(9): 41-43.
- [9] 丁示波, 杨群燕. 混凝土结构外防腐涂料防腐机理及应用[C]. 第四届混凝土结构耐久性科技论坛论文集, 2006.
- [10] 于杰. 海上石油平台防护涂料与涂装控制[J]. 施工与应用, 2006(6): 37-39.
- [11] 王俊杰. 基于细微观界面的再生混凝土力学性能及耐久性能提升机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

(编辑 王维朗)