

延缓氯离子对钢筋混凝土侵蚀的试验研究

王理杰

(中交一航局城市交通工程有限公司, 天津 300457)

摘要: 为了保证混凝土结构在海洋环境中的使用寿命, 针对该环境下氯离子对钢筋混凝土侵蚀快的问题, 进行了延缓氯离子对钢筋混凝土侵蚀的试验研究。从控制原材料的氯离子含量、增加混凝土密实度、掺入阻锈剂及确定掺入量的角度进行了探索。现场试验结果显示, 同期混凝土中氯离子渗透量明显降低, 钢筋表面锈蚀明显减少, 证明提出的方法可以有效延缓氯离子对钢筋混凝土的侵蚀; 并且确定阻锈剂的最佳掺入量为 12 kg/m³。

关键词: 混凝土; 配合比; 阻锈剂; 氯离子; 渗透

中图分类号: U654

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2025)01-0070-04

doi:10.7640/zggwjs202501011

Experimental research on delaying chloride-induced corrosion in reinforced concrete

WANG Li-jie

(Urban Communications Engineering of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: To ensure the service life of concrete structures in marine environments, an experimental research was carried out to delay the rapid corrosion of reinforced concrete by chloride ions in view of the fast erosion of reinforced concrete by chloride ions. This paper explores strategies such as controlling the chloride content in raw materials, increasing concrete density, incorporating rust inhibitors and determining their optimal dosage. The results from the on-site experimental research demonstrate a significant reduction in chloride penetration and visible rust on the reinforcement over the same period, validating that the proposed methods are effective in delaying chloride-induced corrosion of reinforced concrete; furthermore, the optimal dosage of the rust inhibitor is determined to be 12 kg/m³.

Key words: concrete; mix proportion; rust inhibitor; chloride ion; penetration

1 试验背景

新建肯尼亚蒙巴萨通勤米轨铁路桥, 位于蒙巴萨岛与大陆之间的海湾地区, 桥梁为通航而设, 有 53 根深植海底的混凝土灌注桩, 海水中氯离子含量达到 19 000 mg/L, 严重超出了普通钢筋混凝土的工作环境氯离子要求。氯离子具有较强的渗透性, 会侵蚀钢筋表面的钝化膜保护层^[1], 加速铁锈的生长, 钢筋生成铁锈后体积膨胀, 引起混凝土结构开裂、钢筋保护层脱落、钢筋抗拉应力减小, 影响混凝土结构使用寿命。

国内的环氧涂层钢筋可以满足该工程的防腐

要求, 但是造价高; 非洲地区资源匮乏, 资金不足, 为了保证工程能正常实施, 必须研究出更经济的可行性方案。本文从钢筋外部结构—混凝土入手, 探索延缓氯离子渗透速率的试验研究。

2 方案制定

为解决氯盐环境带来的质量隐患, 延缓海洋环境中氯离子对混凝土中钢筋的侵蚀, 制定针对性方案如下:

1) 控制原材料的氯离子含量

加强料源筛选, 在满足其他检测项目合格的前提下优先选择氯离子含量低的原材料, 严格控

制原材料的氯离子含量^[2-3]。

2) 增加混凝土密实度

通过减小混凝土水胶比、掺入微细矿物成分、增加消泡剂等方法，增大混凝土密实度，降低混凝土孔隙率。

3) 掺入阻锈剂

亚硝酸钙能够阻止水性介质进入混凝土内部，有效增强混凝土的抗渗透能力，从而增强混凝土的抗腐蚀能力；亚硝酸离子能够把二价铁离子氧化成为稳定的三价铁氧化物，吸附在钢筋表面形成稳定的钝化膜^[4]，从而降低氯离子对钢筋的腐蚀速率。本文在混凝土配合比中掺入亚硝酸钙阻锈剂，检测氯离子在混凝土中的渗透系数、钢筋的锈积率及失重率。

3 方案验证

3.1 原材料的氯离子含量

通过查阅相关资料，结合现场实际，采用第 2 节中的方案对原材料进行筛选：

1) 选用氯离子含量低、凝结气泡少、密实度高的普通硅酸盐水泥^[5]，以降低混凝土本身氯离子的含量及外界氯离子侵入的速度；选用质量稳定，有利于提高混凝土抗腐蚀性能的水泥。经过筛选，最终选定 Bamburi CEM I 42.5 级水泥。

2) 严控粉煤灰中氯离子含量。掺加一定量的粉煤灰取代部分水泥以降低水化热，从而减少出现裂缝，但掺量不超过胶凝材料总量的 30%。最终选用 India F-60 I 级粉煤灰。

3) 采用河砂，并用干净的自来水清洗，严格控制河砂含泥量不超过 2%。最终选用 Malindi river sand 中砂。

4) 选择碱骨料反应膨胀系数比较低的骨料，有利于混凝土的体积稳定，减少混凝土收缩徐变产生裂缝。本工程选用 5~26.5 mm 碎石(双级配碎石，碎石比例(5~16) mm:(16~26.5) mm =3:7)。

5) 加入外加剂，减小混凝土收缩徐变引起开裂的机率。本工程采用 Conbero 聚羧酸减水剂，

在改善和易性、提高耐久性的同时，降低水胶比，减小裂缝出现的机率。

6) 选择氯离子含量不超过 200 mg/L 的自来水作为拌合用水，并对拌合用水的水池进行封闭处理，防止携带氯化物的雨水进入水池。

3.2 混凝土密实度

海洋中的氯离子会通过混凝土的孔隙渗透到钢筋表面，对钢筋造成腐蚀，从而影响混凝土结构的耐久性。为了减少及延缓氯离子渗透，采取提高混凝土密实度、减小混凝土孔隙率的措施，从而减少氯离子的渗透路径。

3.2.1 配合比设计

选用强度等级 C50 桩基混凝土配合比^[6-8]进行试验，通过试验确定该配合比原材用量，命名为 1 号配合比；在 1 号配合比中加入消泡剂，通过试验确定增加量为 1 kg，水胶比由 0.32 降低至 0.28，测得混凝土密度由 2 350 kg/m³ 提高至 2 435 kg/m³。由此确定增加消泡剂能增加混凝土的密实度。1 号、2 号配合比原材用量见表 1。

表 1 1 号、2 号配合比原材用量
Table 1 Quantities of raw materials in proportioning schemes 1 and 2

配合比 编号	水泥	粉煤灰	砂	碎石		水	外加剂	
	CEM I 42.5	F-60	中砂	5~16 mm	16~26.5 mm	自来水	减水 剂	消泡 剂
1 号	368	123	613	327	762	157	4.91	—
2 号	377	162	628	335	782	151	5.39	1

3.2.2 配合比试件氯离子渗透试验

采用 1 号、2 号配合比在实验室分别制作试件 20 组，每组 3 块；其中每组配合比试件 4 组进行混凝土强度检测；8 组为标准养护试件进行氯离子渗透试验、8 组为同条件养护试件进行氯离子渗透试验。每项试验做 2 次平行试验，取平均值作为试验数据。按照规范要求标准养护及同条件养护，按混凝土龄期检测氯离子渗透系数，检测结果统计见表 2。

表 2 1 号、2 号配合比试件氯离子渗透试验数据
Table 2 Experimental data on chloride ion permeation with proportioning schemes 1 and 2

配合比 编号	28 d 抗压强度/MPa	56 d 抗压强度/MPa	氯离子渗透系数/(10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)							
			标准养护				同条件养护			
			28 d	56 d	120 d	240 d	28 d	56 d	120 d	240 d
1 号	50.3	58.1	6.4	5.4	3.5	2.2	7.0	6.3	5.3	3.3
2 号	53.6	61.1	4.9	4.0	3.1	1.1	6.0	4.8	3.7	2.5

由表2可知,2号配合比试件比1号配合比试件的抵抗氯离子渗透能力更强,增加混凝土密实度能有效降低氯离子侵蚀;但面对氯盐环境,其抗侵蚀能力有限,无法大幅度延缓氯离子侵蚀,仍需要进一步研究。以下试验将在2号配合比的基础上,掺入不同剂量阻锈剂。

3.3 掺入阻锈剂

使用2号配合比,采用第2节方案在密实混凝土中掺入亚硝酸钙阻锈剂溶液^[9],以每 m^3 混凝土掺入3 kg、6 kg、9 kg、12 kg、15 kg的剂量分别进行试验,分别对应3号、4号、5号、6号、7号配合比,对应配合比原材用量见表3。

表3 不同配合比原材用量

Table 3 Quantities of raw materials in different proportioning schemes

配合比编号	水泥	粉煤灰	砂	碎石		水	外加剂		阻锈剂
	CEM I 42.5	F-60	中砂	5~16 mm	16~26.5 mm	自来水	减水剂	消泡剂	亚硝酸钙
3号	377	162	628	335	782	151	5.39	1	3
4号	377	162	628	335	782	151	5.39	1	6
5号	377	162	628	335	782	151	5.39	1	9
6号	377	162	628	335	782	151	5.39	1	12
7号	377	162	628	335	782	151	5.39	1	15

3.3.1 氯离子渗透试验

采用3号、4号、5号、6号、7号配合比在实验室分别制作试件20组,每组3块;其中每组配合比试件4组进行强度检测;8组为标准养护

试件进行氯离子渗透试验;8组为同条件养护试件进行氯离子渗透试验。按照规范要求对混凝土试件进行标准养护和同条件养护,按混凝土龄期检测氯离子渗透系数,检测结果统计见表4。

表4 不同配合比试件氯离子渗透试验数据

Table 4 Experimental data on chloride ion permeation with different proportioning schemes

配合比编号	28 d 抗压强度/MPa	56 d 抗压强度/MPa	氯离子渗透系数/($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)							
			标准养护				同条件养护			
			28 d	56 d	120 d	240 d	28 d	56 d	120 d	240 d
3号	52.5	59.9	3.6	2.6	1.7	0.7	4.3	3.5	2.5	1.6
4号	53.1	60.1	2.7	2.2	1.1	0.5	3.2	2.6	1.6	0.8
5号	51.8	59.7	2.1	1.6	0.7	0.4	2.7	2.0	1.2	0.6
6号	52.8	59.1	1.5	1.0	0.4	0.3	2.2	1.4	0.7	0.5
7号	51.5	59.1	1.4	0.8	0.4	0.3	1.5	0.7	0.4	0.3

各组配合比标准养护试件中氯离子渗透系数对比曲线见图1。由图1可以得出:混凝土中掺入阻锈剂在标准养护条件下可有效降低氯离子的渗透系数;分别掺入 3 kg/m^3 、 6 kg/m^3 阻锈剂时,配合比试件中初始氯离子渗透系数较大,240 d时氯离子渗透系数仍然较大;掺入 9 kg/m^3 阻锈剂时,配合比试件中初始氯离子渗透系数较大,150 d时氯离子渗透系数降低速率趋于平缓;分别掺入 12 kg/m^3 、 15 kg/m^3 阻锈剂时,配合比试件中初始氯离子渗透系数明显降低,120 d时氯离子渗透系数曲线逐渐重合,且趋于平缓。

各组配合比同条件养护试件中氯离子渗透系数对比曲线见图2。

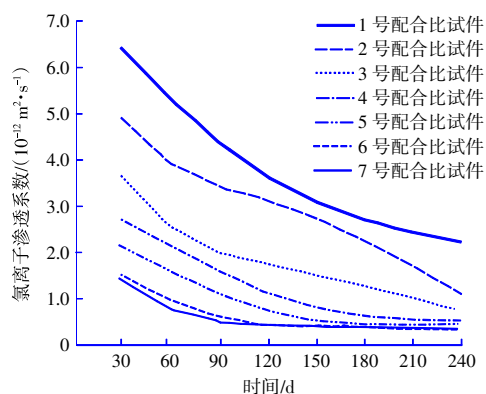


图1 各组配合比标准养护试件中氯离子渗透系数对比曲线
Fig.1 Comparison curve of chloride permeability coefficients in specimens cured under the standard conditions for all proportioning schemes

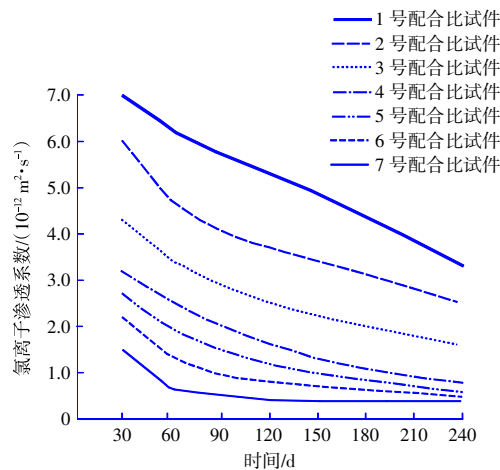


图 2 各组配合比同条件养护试件中氯离子渗透系数对比曲线

Fig. 2 Comparison curve of chloride permeability coefficients in specimen cured under the same conditions for all proportioning schemes

由图 2 可以得出：混凝土中掺入阻锈剂在同条件养护下可有效降低氯离子的渗透系数；分别掺入 3 kg/m^3 、 6 kg/m^3 、 9 kg/m^3 阻锈剂时，配合比试件中初始氯离子渗透系数较大，120 d、240 d 时氯离子渗透系数有所降低，但是渗透曲线斜率较大，表明氯离子渗透系数仍未稳定；分别掺入 12 kg/m^3 、 15 kg/m^3 阻锈剂时，配合比试件中初始氯离子渗透系数有所降低，随着时间的推移，掺入 15 kg/m^3 阻锈剂的试件于 120 d 时趋于稳定，240 d 时掺入 12 kg/m^3 、 15 kg/m^3 阻锈剂试件中氯离子渗透系数曲线逐渐靠近，且趋于平缓。根据混凝土随着时间的推移越来越稳定的特性，在相对稳定的环境下，氯离子渗透系数随着时间的增长而逐步降低。

3.3.2 钢筋腐蚀试验

以 2 号配合比及表 3 配合比，在实验室分别制作钢筋混凝土试件，每组配合比制作 20 组试件，每组试件 3 块，共计 360 块；标准养护 13 d 后，按照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行浸烘循环试验，用浓度为 3.5% 的盐水浸泡 24 h 后取出，再放入烘箱在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下烘 13 d，每循环 1 次后劈开 1 块对比 2 号配合比试件，观察是否出现锈蚀，如无锈蚀，继续进行浸烘循环，直到检查发现有铁锈生成^[10]，检测结果统计见表 5。

由表 5 的数据可以得出：混凝土中掺入阻锈

剂能明显降低钢筋的锈积率和失重率，延缓钢筋的锈蚀；分别掺入 3 kg/m^3 、 6 kg/m^3 、 9 kg/m^3 阻锈剂时，随着掺入量的增加，配合比试件中钢筋的锈积率及失重率明显降低但最终数值较大；掺入 12 kg/m^3 、 15 kg/m^3 阻锈剂时，配合比试件中钢筋的锈积率及失重率明显降低且最终数值较小。

表 5 掺入阻锈剂密实混凝土试件中钢筋腐蚀试验数据
Table 5 Experimental data on corrosion of reinforcing bars in concrete with rust inhibitor admixture

配合比编号	掺入阻锈剂 量/kg	循环次数/ 次	钢筋锈积率/ %	钢筋失重率/ %
2 号	0	8	27.64	0.63
3 号	3	24	21.50	0.22
4 号	6	30	13.14	0.11
5 号	9	36	6.88	0.07
6 号	12	40	0.85	0.04
7 号	15	40	0.81	0.03

4 结果与讨论

- 1) 加强料源筛选，从源头控制混凝土原材料中带入氯离子的含量，可减少氯离子侵蚀钢筋混凝土，达到延缓氯离子对钢筋混凝土的侵蚀作用。
- 2) 通过调整配合比，增加混凝土密实度、减小孔隙率，可以减少氯离子的渗透路径，达到延缓氯离子对钢筋混凝土侵蚀的目的。
- 3) 掺入阻锈剂能延缓氯离子的渗透，延缓钢筋的锈蚀；掺入 12 kg/m^3 、 15 kg/m^3 阻锈剂均能满足 GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》^[11] 的要求，在 240 d 时混凝土中氯离子的渗透系数基本稳定，并在规范要求之内；本工程从经济成本的角度出发，选用掺入 12 kg/m^3 阻锈剂作为标准，降低氯离子的渗透速率，延缓氯离子对钢筋混凝土的侵蚀。

以上 3 个方案合并使用，能充分满足《混凝土结构耐久性设计标准》中氯离子迁移系数小于 $3.0\times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ 的规范指标，同时满足项目施工经济适用性，因此选定 3 种方案合并使用，作为该工程桩基混凝土的实施方案。

5 结语

沿海地区桥梁基础结构一般都长期置于富含氯盐等氯化物的海洋环境中，钢筋混凝土容易受到腐蚀，减少使用寿命、影响质量安全。本文从实际环境出发，立足非洲经济条件，从原材料控制、增加混凝土密实度、掺入阻锈剂及其掺入量

等方面,论证了海洋环境中延缓氯离子对钢筋混凝土侵蚀的试验研究,以供非洲地区海洋环境条件下的其他类似工程参阅。

参考文献:

- [1] 宋立元. 海洋钢筋混凝土结构氯离子腐蚀耐久性研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
SONG Li-yuan. Study on chloride corrosion durability of reinforced concrete marine structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [2] JTJ 275—2019,海港工程混凝土结构防腐技术规范[S].
JTJ 275—2019, Corrosion prevention technical specifications for concrete structures of marine harbour engineering[S].
- [3] JTS/T 236—2019,水运工程混凝土试验检测技术规范[S].
JTS/T 236—2019, Technical specifications for concrete testing and inspection in water transport engineering[S].
- [4] 唐诗. 亚硝酸钙阻锈剂对钢筋钝化膜的影响[J]. 材料保护, 2017, 50(8): 28-31.
TANG Shi. Influence of calcium nitrite on passive films of rebar in simulated concrete pore solution[J]. Materials Protection, 2017, 50 (8): 28-31.
- [5] GB/T 50082—2009,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
GB/T 50082—2009, Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S].
- [6] TB10005—2010,铁路混凝土结构耐久性设计规范[S].
TB10005—2010, Code for durability design on concrete structure of railway[S].
- [7] JGJ 55—2011,普通混凝土配合比设计规程[S].
JGJ 55—2011, Specification for mix proportion design of ordinary concrete[S].
- [8] 王彭生,曾俊杰,范志宏,等. 海工结构混凝土耐久性设计中英标准对比及工程应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(6): 703-709.
WANG Peng-sheng, ZENG Jun-jie, FAN Zhi-hong, et al. Comparison of durability design for marine concrete structure between Chinese and British standards and their applications for engineering[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(6): 703-709.
- [9] GB/T 33803—2017,钢筋混凝土阻锈剂耐蚀应用技术规范[S].
GB/T 33803—2017, Technical specification for application of reinforced concrete anti-corrosion inhibitor[S].
- [10] 徐强,俞海勇. 大型海工混凝土结构耐久性研究与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
XU Qiang, YU Hai-yong. Research and practice on durability of large-scale marine concrete structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [11] GB/T 50476—2019,混凝土结构耐久性设计标准[S].
GB/T 50476—2019, Standard for design of concrete structure durability[S].

《中国港湾建设》期刊 2025 年征订通知

《中国港湾建设》期刊为月刊,每月 25 日出版,定价 20 元/册,全年 240 元。

订阅办法:

订户可通过银行或网银转账,汇款后将汇款凭证发送到《中国港湾建设》编辑部邮箱,并注明期刊邮寄详细地址及姓名。本刊开户银行:交通银行天津学苑支行,银行账号:120066023018010031133,户名:中交天津港湾工程研究院有限公司。请在汇票上注明“中国港湾建设款”。

如需开发票,请注明发票抬头、单位纳税人识别号(个人须提供身份证号)、地址、电话、开户行名称及账号,否则将无法开具增值税发票。

另外还有《港口工程》1993—1996 年两年精装合订本,每册 80 元;1997—1998 年两年精装合订本,每册 100 元;《中国港湾建设》1999—2000 年、2003—2006 年两年精装合订本,每册 120 元(大 16 开);2007—2013 年一年精装合订本,每册 100 元(大 16 开);2014—2024 年半年精装合订本,每册 100 元(大 16 开,全年 200 元);定价均含邮资。

本刊还开展广告业务,欢迎惠顾。

如需本订单电子文档,可从本刊网站下载。

本刊邮箱:zgghwjs@126.com

网址:www.zgghwjs.com