

引文格式:马川义,渠广镇,李帆,等.基于长期暴露试验的海工混凝土氯离子扩散规律研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(4):115-123.

MA Chuanyi, QU Guangzhen, LI Fan, et al. Study on chloride ion diffusion in marine concrete based on long-term exposure test[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 115-123.

DOI:10.19815/j.jace.2023.10014

基于长期暴露试验的海工混凝土氯离子扩散规律研究

马川义^{1,2}, 渠广镇³, 李帆^{1,2}, 黄平明⁴, 尚志强¹, 袁阳光⁵

(1. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东省高速公路技术和安全评估重点实验室, 山东 济南 250101;

3. 济南大学 土木建筑学院, 山东 济南 250022; 4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

5. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为探究海洋环境下氯离子侵蚀扩散对混凝土结构耐久性的影响,开展了青岛胶州湾大桥暴露站暴露腐蚀14年内混凝土立方体试件的跟踪试验测试,分析大气区、浪溅区和水变区等不同腐蚀区域环境内混凝土氯离子浓度随暴露龄期的变化规律,提出了氯离子扩散系数与混凝土表面氯离子浓度时变模型,并对海洋环境下钢筋混凝土耐久寿命进行预估。结果表明:在暴露龄期为14年内,浪溅区混凝土氯离子侵蚀程度最为明显;在暴露龄期为1、5、14年时,浪溅区构件在4 mm深度处的氯离子浓度分别是大气区的7.4倍、7.6倍和6.9倍;混凝土氯离子扩散系数及表面氯离子浓度在1~3年的暴露龄期内变化尤为明显,而后变化逐渐趋于缓慢直至稳定;随保护层厚度增加,混凝土结构抗氯离子耐久寿命逐渐增加,混凝土保护层厚度为70 mm时耐久性寿命相比保护层厚度为40 mm时提高约2倍;结构耐久寿命受表面氯离子浓度、临界氯离子浓度及保护层厚度的影响敏感程度依次增加;相关研究可为氯盐环境下混凝土结构耐久性设计与评估提供参考。

关键词:海工混凝土;长期暴露试验;氯离子扩散;耐久性寿命

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)04-0115-09

Study on chloride ion diffusion in marine concrete based on long-term exposure test

MA Chuanyi^{1,2}, QU Guangzhen³, LI Fan^{1,2}, HUANG Pingming⁴,

SHANG Zhiqiang¹, YUAN Yangguang⁵

(1. Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China; 2. Shandong Key Laboratory of Highway Technology and Safety Assessment, Jinan 250101, Shandong, China; 3. School of Civil Engineering

and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, Shandong, China; 4. School of Highway, Chang'an

University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 5. College of Civil Engineering, Xi'an University of

Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the influence of chloride ion erosion and diffusion on the durability of concrete structures under marine environment, a tracking test was carried out on concrete cube

specimens exposed to corrosion for 14 years at Qingdao Jiaozhou Bay bridge exposure station, and the change law of chloride ion concentration of concrete with exposure age in different corrosion areas such as atmospheric area, splash area and water-varying area was analyzed. A time-varying model of chloride ion diffusion coefficient and chloride ion concentration on concrete surface was proposed, and the durability of reinforced concrete under marine environment was predicted. The results show that the chloride ion erosion degree of concrete in the splash area is the most obvious during the exposure period of 14 years. At the exposure age of 1, 5, 14 years, the chloride ion concentration at the depth of 4 mm in the splash area is 7.4 times, 7.6 times and 6.9 times of that in the atmospheric area, respectively. The diffusion coefficient of concrete chloride ion and the surface chloride ion concentration change significantly within 1-3 years of exposure age, and then the change gradually tends to be slow until stable. With the increase of the protective layer thickness, the durability life of the concrete structure against chloride ions gradually increases. The durability life of the concrete structure with the protective layer thickness of 70 mm is about 2 times higher than that with the protective layer thickness of 40 mm. The sensitivity of structural durability life to surface chloride ion concentration, critical chloride ion concentration and protective layer thickness increases in turn. The relevant research can provide reference for the durability design and evaluation of concrete structures in chlorine environment.

Key words: marine concrete; long-term exposure test; chloride ion diffusion; durability life

Author resume: MA Chuanyi(1987-), male, engineer, E-mail: machuanyi2006@163.com.

0 引 言

自混凝土应用于建筑工程以来,其耐久性问题一直是研究的热点和重点,特别是海洋及近海地区的海工混凝土结构,出现耐久性问题较为普遍。究其原因,海洋环境中氯盐含量高,氯离子侵蚀是造成混凝土结构耐久性能退化的重要因素^[1-2]。明确海工混凝土氯离子扩散规律与侵蚀机理,进而采取措施延长结构使用寿命,可有效节约能源,减少环境污染。

氯离子侵入混凝土内部迁移机制复杂^[3-4],其侵入试验方法包括室内快速侵蚀的电测法和现场暴露试验。快速测试氯离子扩散电测法是通过施加外电场来加速混凝土中氯离子的迁移,然后再通过化学分析方法分析不同位置的氯离子浓度值,其主要特点是试验周期短,具体实施中分为非稳态电迁移法(RCM)^[5]、稳态电迁移法(NordTest NTBuild 335)^[6]、电导率法(NEL)^[7]等。现场暴露试验是将制作的试件放于真实环境中进行自然劣化发展,实施周期在 10 年甚至 20 年以上,该方法试验结果真实,具有较高的参考价值。Nosratzchi 等^[8]开展了为期 5 个月的实际环境的海洋暴露试验,探明了自密实混凝土中氯离子传输的时变特性,发现氯离子扩散系数与时间呈负相关趋势;Ababneh 等^[9]建立

了干湿交替状态下混凝土氯离子对流扩散方程;关博文等^[10]在日本沿海地区开展了 3 年的现场试验,分析了混凝土表面氯离子浓度与盐雾沉降量之间的关系,建立了混凝土表面氯离子浓度与环境特征因素的数值模型;陈昌等^[11]对已有海洋暴露试验数据成果进行综合分析,建立了考虑胶凝材料组成与暴露时间耦合影响的表面氯离子浓度时变模型。上述研究均开展了真实构件暴露试验,但暴露时间相对较短,所得结论有一定局限性,因此有必要开展更长时限的暴露试验研究。

氯离子在混凝土中输运会发生扩散、对流、绑定和电迁移等一系列物理化学过程。混凝土中外加掺合料如粉煤灰、硅灰等或结构承受外部荷载的作用等因素都会对氯离子输运产生影响^[12-13]。耐久性寿命预测基于以上输运机理,采用 Fick 第二扩散定律表述氯盐环境混凝土结构中氯离子扩散分布^[14-15],将氯离子的扩散浓度与扩散系数和扩散时间联系起来,达到预测混凝土结构使用寿命的目的^[16]。较为经典的耐久性寿命预测模型有欧洲的 Duracrete 模型^[17]、美国的 Life-365 模型^[18]等。

本文基于青岛胶州湾大桥暴露站内混凝土在不同腐蚀环境下的暴露试验,研究海洋环境下氯离子在混凝土内部的扩散规律,为严酷环境下结构耐久性设计和维修养护提供参考。

1 试验概况

1.1 混凝土试件设计

自然暴露试验对象为边长 100 mm 的海工混凝土立方体试件,原材料为:P·I 52.5 水泥,其化学指标检验结果如表 1 所示,其中各元素含量均为质量

分数;I 级粉煤灰,比表面积 $420\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$;S95 级磨细矿渣粉,比表面积 $456\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$;河砂,表观密度 $2\,600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,细度模数 2.9;石灰岩碎石,表观密度 $2\,700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积密度 $1\,480\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;高性能聚羧酸减水剂,减水率(质量分数)为 25%。混凝土立方体试件配合比如表 2 所示。

表 1 水泥化学指标

Table 1 Cement chemical index

水溶性 Cl^- 含量/%	SO_3 含量/%	$\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$ 含量/%	f-CaO 含量/%	MgO 含量/%	烧失量/%
0.019	2.05	0.77	2.16	1.92	1.94

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of concrete

腐蚀区域	胶凝材料用量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	各胶凝材料质量分数/%			水胶比
		水泥	粉煤灰	矿渣	
大气区	467	51	34	15	0.33
浪溅区	426	40	14	46	0.34
水变区	426	40	14	46	0.34

根据现场暴露试验条件,将暴露环境设置为大气区、浪溅区和水变区,试件的设计配合比与青岛胶州湾大桥实体工程一致。混凝土试件放置前,预留 2 个对立的侧面,其余面采用环氧树脂进行封闭,预留的侧面用于取粉测试混凝土中的氯离子含量。

1.2 现场暴露试验

混凝土试件放置于青岛胶州湾大桥暴露站,试件暴露站所在地最高气温 $38.9\text{ }^\circ\text{C}$,最低气温 $-16.9\text{ }^\circ\text{C}$,平均气温 $12.3\text{ }^\circ\text{C}$,该海域的海水 Cl^- 含量为 $17\,568\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

现场暴露站处于胶州湾大桥红岛连接线,其外观如图 1(a)所示。试件处于腐蚀环境的大气区、浪溅区和水变区,放置标高分别为 $+6.0$ 、 $+2.0\text{ m}$ 和 $+0.1\text{ m}$ 。大气区的氯离子主要来自于海洋上空气中的盐雾;浪溅区的氯离子主要来自于海水、波浪或喷沫,其特点是较长时间干燥、短时间浸水,结构处于干湿循环状态;水变区试件基本处于平均海平面高度附近,其每天露出与浸泡在海水中的时间基本相同。有研究表明,浪溅区结构是沿海工程中破坏最严重的区域。长期来看,海洋环境下的混凝土结构无论是处于大气区、浪溅区或水变区,其氯离子源浓度主要是海水表层的氯离子浓度。大气区、浪溅区和水变区腐蚀环境暴露试件如图 1(b)~(d)所示。

1.3 试验方案

对暴露龄期为 1、3、5、8、12、14 年的混凝土样品开展取样测试工作,每次在各不同腐蚀区域内取 3 个试件,利用分层磨粉法获取其混凝土样粉(图 2)。

每次试验设定磨粉厚度 2 mm 为一组,各腐蚀区试样磨粉深度均为 30 mm,因此每个试件收集 15 组混凝土粉样。收集每层粉样之后用吸尘器将残余粉末清理干净后再进行下一层的取样。

磨粉取样完毕后,将粉样放置于恒温箱(设定温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$)干燥,干燥至恒重后,放置于干燥器内冷却至室温,称取不低于 15 g 的样品放置于锥形瓶(200 ml 规格)中,并加入 100 ml 的 HNO_3 溶液(浓度为 15%),然后用瓶塞塞紧锥形瓶,将其放置于振荡器上震荡 24 h。采用滤纸对上述锥形瓶中制备的溶液进行过滤处理,并采用移液管精确移取过滤溶液 20 ml,利用 905 Titrand 自动电位滴定仪(图 3)进行粉样总氯离子浓度测试(以占混凝土质量百分含量计),滴定溶液为 $0.02\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 AgNO_3 溶液,滴定完成后,根据电位-体积曲线进行绘图,样品中的氯离子浓度通过消耗的 AgNO_3 体积,参照《水运工程混凝土试验检测技术规范》(JTS 236—2019)的规定计算得出。

2 试验结果与分析

2.1 不同腐蚀环境混凝土中氯离子浓度时变规律

大气区、浪溅区和水变区混凝土试件中氯离子浓度随时间和深度的变化规律如图 4~6 所示。由图 4~6 可知,相比浪溅区和水变区,暴露在大气区腐蚀环境下混凝土中氯离子侵蚀速度相对缓慢,在暴露龄期为 14 年时仅在距离表层 10 mm 处具有一定的氯离子含量渗透,且氯离子含量比较少,最大氯



(a) 暴露站外观



(b) 大气区暴露试件



(c) 浪溅区暴露试件



(d) 水变区暴露试件

图 1 青岛胶州湾大桥暴露站

Fig. 1 Qingdao Jiaozhou bay bridge exposed station
离子含量约为 0.2%。

暴露在浪溅区腐蚀环境下的混凝土氯离子侵蚀程度最为明显,其最大氯离子含量约为 1.1%。在暴露龄期为 1、5、14 年时,浪溅区试件在 4 mm 深度



图 2 混凝土芯样取粉

Fig. 2 Concrete powder extraction

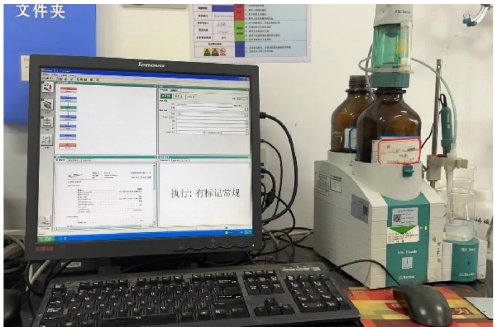


图 3 氯离子含量测试

Fig. 3 Test for chloride ion content

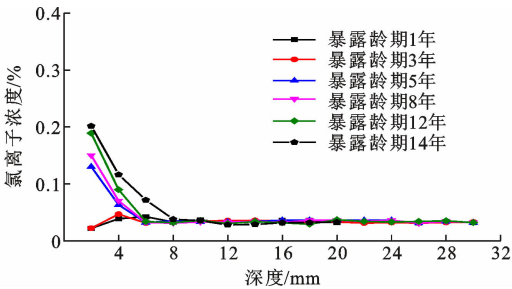


图 4 大气区混凝土氯离子浓度随时间和深度的变化

Fig. 4 Variation of concrete chloride ion concentration with time and depth in atmospheric region

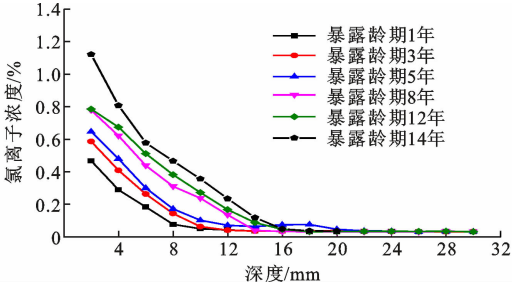


图 5 浪溅区氯离子浓度随时间和深度的变化

Fig. 5 Variation of concrete chloride ion concentration with time and depth in splash region

处的氯离子浓度分别是大气区的 7.4 倍、7.6 倍和 6.9 倍。

水变区混凝土氯离子侵蚀程度略低于浪溅区,

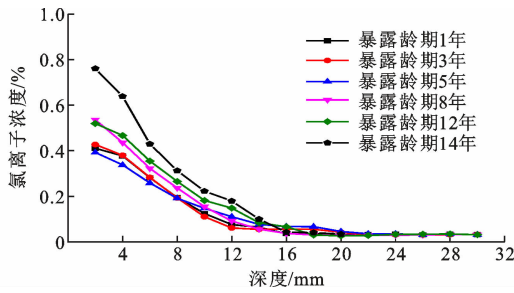


图 6 水变区氯离子浓度随时间和深度的变化

Fig. 6 Variation of concrete chloride ion concentration with time and depth in water-varying region

其最大氯离子含量约为 0.8%。在暴露龄期为 14 年时,浪溅区与水变区混凝土中氯离子侵蚀深度均约为 20 mm。

随暴露时间的延长,混凝土中不同深度氯离子含量均不断增加,且在 1~3 年暴露龄期时混凝土中氯离子渗透速度较快,随后氯离子在混凝土中侵蚀的速度不断变缓。

2.2 氯离子扩散系数时变规律

氯离子扩散系数是评价混凝土抗氯离子侵蚀扩散性能的重要指标,是进行混凝土结构耐久性寿命预测的依据,广泛采用 Fick 第二扩散定律来描述其传输行为^[14-15],如式(1)所示。

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: $C(x,t)$ 为混凝土在暴露 t 时距离表面 x 处的自由氯离子质量分数; D_c 为混凝土自由氯离子扩散系数。

根据边界条件和初始条件 $C|_{x=0} = C_s$ 、 $C|_{x>0,t=0} = C_0$ 得出其解析解为^[19]

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c g t}} \right) \right] \quad (2)$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\beta^2) d\beta \quad (3)$$

式中: C_s 为混凝土暴露表面的自由氯离子质量分数; C_0 为混凝土初始自由氯离子质量分数; $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数; g 为重力加速度。

根据浪溅区与水变区测出的暴露试件在不同深度的氯离子浓度数值,利用最小二乘法优化,通过式(2)计算得出氯离子扩散系数 D_c 的时变规律,如图 7 所示。由图 7 可以看出,浪溅区与水变区混凝土随着暴露时间的延长,氯离子扩散系数 D_c 呈逐渐减小的趋势,暴露龄期在 1~3 年内,氯离子扩散系数降低较明显,降低了约 50%,而后逐渐趋于稳定,这是由于混凝土成熟度对于氯离子扩散有较大

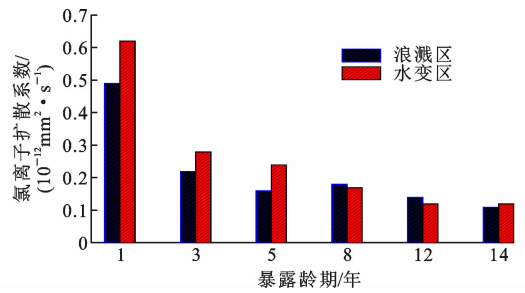


图 7 混凝土氯离子扩散系数的时变规律

Fig. 7 Time-varying law of concrete chloride ion diffusion coefficient

影响。混凝土试件是加入了粉煤灰和矿渣粉的胶凝料体系,粉煤灰和矿渣粉早期水化进程较慢,随暴露时间延长,其二次水化越充分,混凝土内部越密实,抗侵蚀能力越强,进而表现为后期氯离子扩散系数的稳定性。

实海暴露试验和室内盐雾模拟试验结果均表明,随着外界腐蚀时间的增加,混凝土氯离子扩散系数初期减小较快,后期逐渐趋缓, D_c 与腐蚀时间呈现幂指数变化关系^[20],可用式(4)描述氯离子扩散系数随时间的变化关系。

$$D(t) = D_i \left(\frac{t_i}{t} \right)^n \quad (4)$$

式中: D_i 为环境腐蚀作用时间 t_i 后的混凝土氯离子扩散系数; n 为氯离子扩散系数衰减系数。

青岛胶州湾大桥暴露站暴露试件浪溅区与水变区暴露不同龄期时混凝土氯离子扩散系数变化规律如图 8 所示,由曲线回归拟合得出的相应氯离子扩散系数如式(5)所示。

$$D_c = \begin{cases} 0.463 \ 9t^{-0.541} & \text{浪溅区} \\ 0.607 \ 9t^{-0.622} & \text{水变区} \end{cases} \quad (5)$$

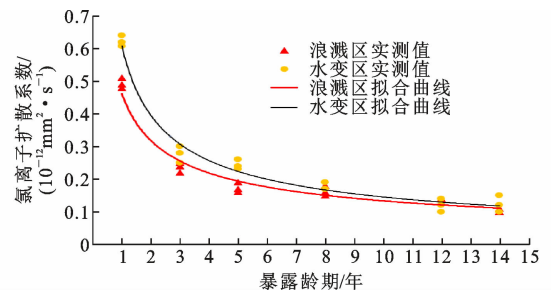


图 8 混凝土氯离子扩散系数与暴露时间的拟合关系

Fig. 8 Fitting relationship between chloride ion diffusion coefficient and exposure time of concrete

扩散系数衰减系数 n 的大小决定了扩散系数随暴露时间增长而衰减的幅度,表 3 列出不同国家对于衰减系数 n 的推荐值。由表 3 可知,已有研究成

表 3 不同研究成果的衰减系数

Table 3 Attenuation coefficients of different research results

模型	DuraCrete ^[17]	Life-365 ^[18]	FIB model code ^[21]	中国行业标准 ^[22]	本文	
					浪溅区	水变区
<i>n</i>	0.600	0.430	0.450	0.550	0.541	0.622

果中 n 的取值有所不同,本文拟合所得的浪溅区混凝土氯离子扩散衰减系数 n 为 0.541,这与中国行业标准^[22]中约定的衰减系数 0.55 基本一致,拟合所得的水变区 n 为 0.622。暴露试验数据相对有限且具有一定的离散性,尚需后期更多暴露试验数据进行修正。

2.3 表面氯离子浓度时变规律

实际环境中表层的氯离子浓度易受外界雨水冲刷、温湿度等因素的影响,具有较大的波动性^[23]。海洋环境下的混凝土结构表面氯离子浓度 C_s 越高,内外浓度差越大,则其扩散作用就会越显著,引起钢筋锈蚀的风险越高。表面氯离子浓度 C_s 的时变发展规律与 D_e 类似,表现为早期增长显著,后期增长缓慢,一般在足够长的时间后才能达到相对稳定^[22]。

美国 Life-365 模型^[10] 预测暴露于浪溅区氯盐环境中钢筋混凝土的使用年限,对 C_s 的取值最大值为 1.00%;欧洲 DuraCrete^[17] 和中国行业标准^[22] 对高性能混凝土浪溅区表面氯离子浓度分别按 1.29% 和 0.90% 取值。本文利用 Fick 第二定律[式(2)]回归得出名义混凝土表面氯离子浓度,暴露试件浪溅区与水变区暴露不同龄期时混凝土表面氯离子浓度变化如图 9 所示,由曲线拟合得出浪溅区和水变区混凝土表面氯离子浓度与暴露龄期之间的关系式,如式(6)所示。

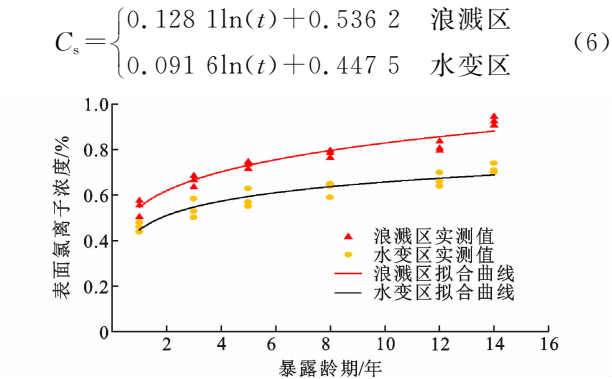


图 9 混凝土表面氯离子浓度与暴露时间的拟合关系
Fig. 9 Fitting relationship between chloride ion concentration and exposure time on concrete surface

由图 9 可知,暴露早期 C_s 增长较快,尤其在 3 年龄期内增长显著,后期增长缓慢,在暴露 12 年龄期后表面氯离子浓度基本趋于稳定。由计算获得浪

溅区和水变区构件设计使用年限的 C_s 值分别为 1.12%、0.87%。与欧洲 DuraCrete^[9]、Life-365^[10] 和中国行业标准^[22] 相比较,浪溅区数值接近前两者的平均值,水变区数值与中国行业标准^[22] 的取值相吻合。

3 混凝土结构耐久性寿命评估

3.1 耐久性寿命定义与计算模型

海工混凝土的腐蚀离子主要有 SO_4^{2-} 、 Mg_2^+ 、 Cl^- ,其中 Cl^- 含量高且离子半径小,具有最强的腐蚀能力,混凝土不同区域的形貌描述及对应的主要元素^[24] 如图 10 所示。氯离子进入海工混凝土内部会破坏钢筋的钝化膜,形成腐蚀电池回路,氯离子浓度的增加可以增强导电作用,进而加速钢筋腐蚀,明显影响结构耐久性。

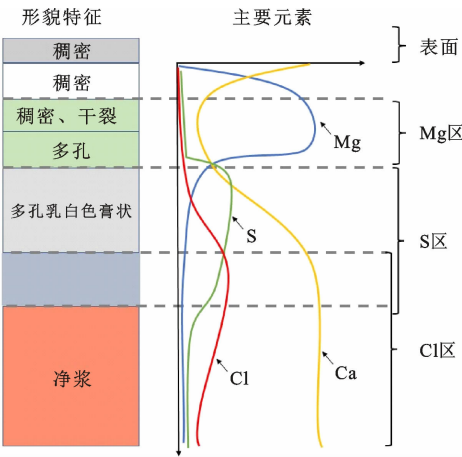


图 10 混凝土不同区域的形貌及对应的主要元素
Fig. 10 Topography of different areas of concrete and corresponding main elements

氯离子对海工混凝土腐蚀破坏一般分 3 个阶段^[22]:腐蚀诱导阶段 t_1 、腐蚀发展阶段 t_2 和腐蚀破坏阶段 t_3 (图 11)。腐蚀诱导阶段 t_1 是指结构物自氯离子开始侵蚀至在内部积聚达到混凝土保护层深度 c 处的钢筋开始锈蚀的临界浓度值 C_r 所经历的时间,该时间与混凝土所处环境条件及抗氯渗透性能有关。海洋环境下 t_1 计算模型^[22] 为

$$t_1 = c^2 / \{ 4D_i [\text{erf}^{-1}(1 - \frac{C_r - C_0}{C_s - C_0})]^2 \}$$

(7)

$$D_i = K_e D_0 (\frac{t_0}{t})^n$$

(8)

$$D_0 = \frac{10^{-6} x^2}{4t_0 [\text{erf}^{-1}(1 - C(x, t_0) / D_s)]^2}$$

(9)

式中: D_i 为混凝土有效氯离子扩散系数; k_e 为混凝土环境系数; D_0 为不考虑时间依赖性的氯离子扩散

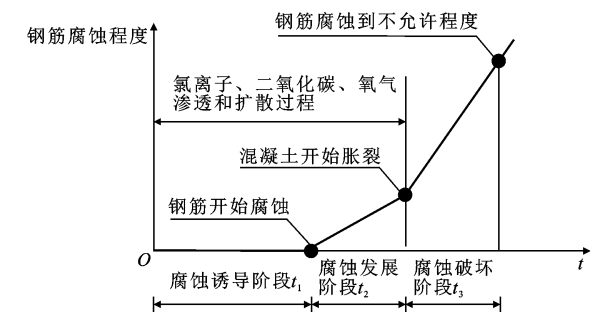


图 11 混凝土腐蚀破坏过程

Fig. 11 Corrosion failure process of concrete
系数^[25]; x 为氯离子扩散深度; t_0 为混凝土结构成型至测试时的时间; t' 为混凝土氯离子扩散系数衰减至恒定值的时间。

3.2 耐久性寿命预测

混凝土耐久性寿命预测模型中临界氯离子浓度值 C_r 是钢筋开始锈蚀的氯离子浓度^[26], 其是预测钢筋初锈时间的关键参数, 这受到混凝土配合比、水泥类型、外部环境等多因素的影响。

国内外大量研究成果及相关规范、指南等对临界氯离子浓度的取值有一定差异, 以浪溅区为例, Durecrete^[17] 取值为 0.08%~0.15%, 美国 Life365^[10] 取值为 0.05%, 中国行业标准^[22] 依据中国华南海港工程暴露试验站获得的长期钢筋混凝土暴露试件的破坏性测试数据, 对超过 100 个样本数据进行统计分析, 认为浪溅区临界氯离子浓度取值为 0.06%~0.08%。对于传统的碳素钢, 钢筋锈蚀风险与总氯离子含量的关系如表 4 所示, 然而锈蚀能否发生还取决于环境条件、混凝土质量等因素^[27], 三者的关系如图 12 所示。本文海洋环境浪溅区工程临界氯离子浓度取 0.10%, 有效氯离子扩散系数与表面氯离子浓度通过浪溅区构件试验得出。

表 4 基于总氯离子含量的钢筋锈蚀风险

氯离子含量/%		锈蚀风险
占水泥质量的百分比	占混凝土质量的百分比 (水泥用量为 440 kg·m ⁻³)	
>2.0	>0.36	一定锈蚀
1.0~2.0	0.18~0.36	可能锈蚀
0.4~1.0	0.07~0.18	或许锈蚀
<0.4	<0.07	可不考虑锈蚀

3.2.1 保护层厚度对安全使用寿命的影响

经现场实测, 青岛胶州湾大桥梁、柱等保护层厚度分别不少于 50、60 mm, 由此设定计算保护层厚

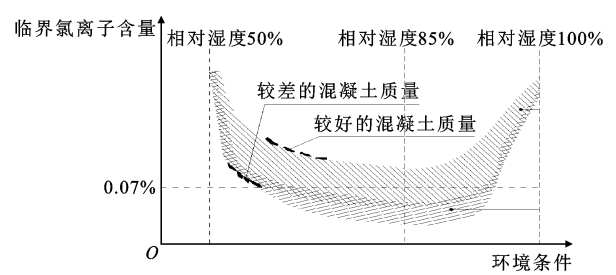


图 12 临界氯离子浓度、环境条件和混凝土质量之间的关系

Fig. 12 Relationship between critical chloride ion concentration, environmental condition and concrete quality
度范围为 40~70 mm。图 13 列出了在设定不同保护层厚度下混凝土腐蚀诱导阶段 t_1 、腐蚀发展阶段 t_2 及安全使用寿命(t_1+t_2)的计算结果。

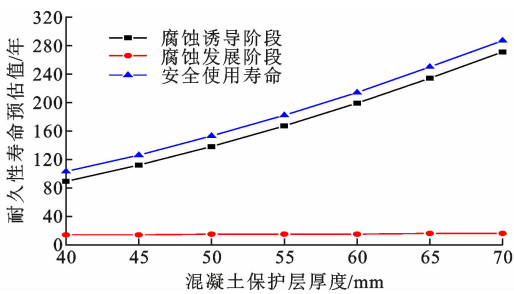


图 13 不同保护层厚度下抗氯离子侵蚀寿命计算结果

Fig. 13 Calculation results of anti-chloride corrosion life under different protective layer thickness

从图 13 可以看出, 随保护层厚度增加, 混凝土结构抗氯离子耐久寿命逐渐增加, 混凝土保护层厚度从 40 mm 增加到 70 mm, 即增加 1.75 倍时, 耐久性寿命提高约 2 倍。在大桥最小保护层厚度为 50 mm 的状况下, 其腐蚀诱导时间和安全使用寿命分别为 138 年和 153 年, 满足 100 年设计使用寿命要求。

3.2.2 表面氯离子浓度及临界氯离子浓度对腐蚀诱导时间的影响

在设计保护层厚度为 40 mm 的状况下, 混凝土表面氯离子浓度及临界氯离子浓度对腐蚀诱导时间 t_1 的影响如图 14 所示。由图 14 可知: 混凝土表面氯离子浓度从 0.8% 扩大 1 倍, 腐蚀诱导时间 t_1 增加不到 10%; 临界氯离子浓度从 0.08% 扩大 1 倍, 腐蚀诱导时间 t_1 减小约 20%, 这说明腐蚀诱导时间 t_1 对临界氯离子浓度较为敏感。

4 结 语

(1)混凝土结构在长期海洋环境暴露状态下, 浪溅腐蚀区域混凝土氯离子侵蚀程度最为明显, 水变区侵蚀程度略低于浪溅区, 都明显高于大气区。

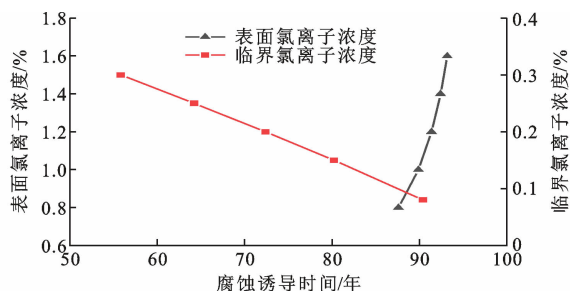


图 14 表面氯离子浓度及临界氯离子浓度对 t_i 的影响

Fig. 14 Effect of surface chloride ion concentration and critical chloride ion concentration on t_i

(2)通过现场暴露试验确定了海洋环境结构耐久性寿命计算模型中关键参数的取值,提出的浪溅区混凝土氯离子扩散衰减系数与中国行业标准规定值基本吻合。

(3)提高混凝土保护层厚度可有效提升耐久性寿命,表面氯离子浓度、临界氯离子浓度及保护层厚度对结构耐久寿命的影响敏感程度依次增加。

(4)考虑到实际工程混凝土结构需要承受一定的荷载,因此在海洋环境长期暴露下,需进一步研究应力状态对混凝土氯离子扩散的影响规律。

参考文献:

References:

- [1] 应敬伟,钱邵同,覃盛昆. 双轴受压下再生混凝土氯离子扩散规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(2): 90-98.
YING Jingwei, QIAN Shaotong, QIN Shengkun. Chloride diffusion law in recycled concrete under bi-axial compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(2): 90-98.
- [2] TIAN J, WU X W, ZHENG Y, et al. Investigation of damage behaviors of ECC-to-concrete interface and damage prediction model under salt freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 238-249.
- [3] 鲍玖文,庄智杰,张 鹏,等. 基于相似性的海洋潮汐区环境混凝土抗氯盐侵蚀性能研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7087-7095.
BAO Jiuwen, ZHUANG Zhijie, ZHANG Peng, et al. Research progress of chloride corrosion resistance of concrete exposed to marine tidal environment based on similarity theory[J]. Materials Reports, 2021, 35(7): 7087-7095.
- [4] 姜凤娇. 混凝土水泥水化、氯离子扩散及钢筋锈蚀的电化学分析[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
JIANG Fengjiao. Electrochemical analysis of cement

hydration, chloride ion diffusion and steel corrosion of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

- [5] WANG Y Z, FU K. Comparisons of instantaneous chloride diffusion coefficients determined by RCM method and chloride natural diffusion test[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 595-604.
- [6] YANG C C, CHO S W, HUANG R. The relationship between charge passed and the chloride-ion concentration in concrete using steady-state chloride migration test[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2): 217-222.
- [7] 混凝土结构耐久性设计与施工指南:CCES 01—2004[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
Guide to durability design and construction of concrete structures: CCES 01—2004[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [8] NOSRATZEH N, MIRI M. Experimental investigation on chloride diffusion coefficient of self-compacting concrete in the Oman sea[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2020: 647-657.
- [9] ABABNEH A, BENBOUDJEMA F, XI Y P. Chloride penetration in nonsaturated concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(2): 183-191.
- [10] 关博文,杨 涛,於德美,等. 干湿循环作用下钢筋混凝土氯离子侵蚀与寿命预测[J]. 材料导报, 2016, 30(20): 152-157.
GUAN Bowen, YANG Tao, YU Demei, et al. Chloride erosion and life prediction of steel reinforced concrete under dry and wet cycles[J]. Materials Reports, 2016, 30(20): 152-157.
- [11] 陈 昌,杨绿峰,余 波. 海洋潮汐区混凝土表面氯离子浓度的时变规律及多因素模型[J]. 材料导报, 2019, 33(增 2): 321-326.
CHEN Chang, YANG Lyufeng, YU Bo. Multi-factor model and time-varying law for surface chloride concentration of concrete in marine tidal zone[J]. Materials Reports, 2019, 33(S2): 321-326.
- [12] 修建得,金祖权,李 宁,等. 海洋盐雾环境下混凝土中氯离子传输研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(3): 771-785.
- [13] XIU Jiande, JIN Zuquan, LI Ning, et al. Research progress of chloride ion transport in concrete under marine salt spray environment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(3): 771-785.
- [13] 陆春华,宋泽鹏,李锤奥,等. 氯盐与重复荷载共同作

- 用下海工混凝土梁受弯性能退化分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 52-59.
- LU Chunhua, SONG Zepeng, LI Zhongao, et al. Degradation analysis of flexural performance of marine concrete beams under combined action of chloride and repeated load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 52-59.
- [14] 王胜年, 黎鹏平, 范志宏, 等. 环境和荷载共同作用下的海工混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WANG Shengnian, LI Pengping, FAN Zhihong, et al. Durability of marine concrete structure under the combined action of environment and load[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [15] LIU J, LIAO C Y, JIN H S, et al. Numerical model of the effect of water vapor environment on the chloride transport in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 311: 125330.
- [16] 庞 龙, 应宗权, 范志宏, 等. 基于实测数据的港工混凝土结构环境荷载模型及耐久性分析[J]. 工程力学, 2016, 33(增1): 168-172.
- PANG Long, YING Zongquan, FAN Zhihong, et al. Environmental load model and durability analysis of harbor concrete structure based on measured data[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(S1): 168-172.
- [17] General guidelines for durability design and redesign; DuraCrete BE 95-1347[S]. Denmark: The European Union, 2000.
- [18] THOMAS M D A, BENTZ E C. Life-365 computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides[R]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2000.
- [19] 金伟良, 袁迎曙, 卫 军, 等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- JIN Weiliang, YUAN Yingshu, WEI Jun, et al. Durability theory and design method of concrete structure in chloride environment[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [20] ZHANG H F, ZHANG W P, GU X L, et al. Chloride penetration in concrete under marine atmospheric environment-analysis of the influencing factors[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016: 1-11.
- [21] FIB model code for concrete structures 2010: CEB-FIP[S]. Lausanne: FIB, 2013.
- [22] 海港工程高性能混凝土质量控制标准: JTS 257-2-2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- Quality control standard of high performance concrete for sea port engineering: JTS 257-2-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [23] 杨绿峰, 蔡 荣, 余 波. 海洋大气区混凝土表面氯离子浓度的形成机理和多因素模型[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 46-55.
- YANG Lufeng, CAI Rong, YU Bo. Formation mechanism and multi-factor model for surface chloride concentration of concrete in marine atmosphere zone[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12): 46-55.
- [24] 刘玉美, 杨 浪, 饶 峰, 等. 氯离子对海工混凝土钢筋腐蚀的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(9): 3059-3074.
- LIU Yumei, YANG Lang, RAO Feng, et al. Research progress of chloride ions on corrosion of marine concrete reinforcement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(9): 3059-3074.
- [25] 既有混凝土结构耐久性评定标准: GB/T 51355—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Evaluation standard for durability of existing concrete structures: GB/T 51355—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [26] 孙丛涛, 刘诗群, 牛获涛, 等. 干湿循环条件下钢筋锈蚀的临界氯离子浓度[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 385-389.
- SUN Congtao, LIU Shiqun, NIU Ditao, et al. Critical chloride concentration of rebar corrosion under dry-wet cycles[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 385-389.
- [27] GJORV O E. 严酷环境下混凝土结构的耐久性设计[M]. 赵铁军, 译. 2 版. 北京: 中国建材工业出版社, 2015.
- GJORV O E. Durability design of concrete structures in severe environments[M]. Translated by ZHAO Tiejun, 2nd ed. Beijing: China Building Material Press, 2015.