

盐渍土地区钢筋混凝土结构寿命预测模型

林晓旭, 王起才, 谢 超

兰州交通大学, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年2月27日; 录用日期: 2022年3月21日; 发布日期: 2022年3月28日

摘 要

为了建立盐渍土地区钢筋混凝土结构的寿命预测模型, 将在盐渍土地区埋置混凝土试验桩并于3年后对试验桩表面氯离子浓度及钢筋锈蚀程度进行测试, 通过建立氯离子渗透模型以预测钢筋锈蚀所需时间, 并基于该渗透模型及混凝土构件状态预测钢筋锈蚀阶段及混凝土裂缝发展阶段所需时间。结果表明, 混凝土水灰比、外掺料及外界环境会对氯离子扩散系数造成显著影响, 从而影响钢筋锈蚀临界时间; 混凝土保护层厚度及水灰比也会影响构件开裂时间及裂缝的发展速度。

关键词

钢筋混凝土, 氯离子, 寿命预测, 半电池电位法

Life Prediction Model of Reinforced Concrete Structure in Saline Soil Area

Xiaoxu Lin, Qicai Wang, Chao Xie

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 27th, 2022; accepted: Mar. 21st, 2022; published: Mar. 28th, 2022

Abstract

In order to establish the life prediction model of reinforced concrete structures in the saline soil area, we will bury concrete test piles in the saline soil area and test the chloride ion concentration on the surface of test piles and the corrosion degree of steel bars three years later. The chloride ion penetration model is established to predict the corrosion time of steel bars. Based on the seepage model and the state of concrete members, the time required for the corrosion stage of reinforcement and the development stage of concrete cracks are predicted. The results show that the water-cement ratio of concrete, the external admixture and the external environment have a significant influence on the chloride ion diffusion coefficient, thus affecting the critical time of steel

corrosion. The thickness of concrete protective layer and water cement ratio also affect the cracking time and crack development speed.

Keywords

Reinforced Concrete, The Chloride Ion, Life Prediction, Half Cell Potentiometric Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢筋在混凝土中的腐蚀，包括混凝土碳化引起的均匀腐蚀和氯离子渗透引起的非均匀腐蚀，是钢筋混凝土结构备受关注的问题，事实上，混凝土结构在氯盐环境下的使用寿命取决于混凝土的氯离子渗透性能，而氯离子扩散系数是反映混凝土抗氯离子渗透性的主要指标，该系数受混凝土水灰比、湿度、温度、外掺材料、时间等普遍因素影响，针对影响因素的复杂性，国内外大量学者提出了关于氯离子扩散系数数值模拟的计算模型，Jin Xia [1]通过模拟混凝土中氯离子的输运过程和钢筋腐蚀演化过程，建立了预测混凝土结构中钢筋腐蚀的起始时间和腐蚀形貌发展的数值模型；赵翔宇[2]利用 ANSYS 热分析模块建立了预测混凝土中氯离子浓度随空间和时间分布的二维数值模拟方法，并运用所提出的数值方法研究了氯离子扩散系数等重要因素对混凝土中氯离子二维扩散的影响规律。

针对钢筋混凝土构件氯离子侵蚀破坏过程，本文采用半电池电位法对钢筋锈蚀程度进行测试，基于该测试结果确定钢筋锈蚀临界浓度。通过建立氯离子渗透模型以预测该侵蚀阶段所需时间，并分析水胶比对侵蚀过程影响，根据该分析结果，建立考虑保护层厚度、水胶比及时间影响下的钢筋锈蚀及混凝土裂缝发展寿命预测模型。

2. 实验

2.1. 试验材料

本文中所有用水泥为新疆天山生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥，其各项技术指标如表 1 所示，均满足规范 GB 175-2007 (通用硅酸盐水泥)中的各项要求；实验用粉煤灰为新疆巴州泛宇建材有限公司生产的 F 类 I 级粉煤灰，其各项性能指标如表 2 所示；实验用砂子为新疆库尔勒若羌县新奥达盛砂石料场提供的天然砂，其细度模数为 2.7，含泥量为 1.4%，表观密度为 2650 kg/m³，堆积密度为 1536 kg/m³，属于 II 区中砂；实验用石子为新疆库尔勒若羌县新奥达盛砂石料场提供的 5~10 mm、10~20 mm 和 16~31.5 mm 单粒级碎石，压碎指标为 7.5%，表观密度为 2686 kg/m³，具体级配见表 3。

Table 1. Cement performance index

表 1. 水泥性能指标

氯离子含量/%	碱含量/%	三氧化硫/%	细度/(m ² /kg)	体积安定性	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
					初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
0.016	0.48	2.12	348	合格	85	150	5.9	7.8	24.2	47.3

Table 2. Fly ash performance index
表 2. 粉煤灰性能指标

性能指标	需水量比/%	烧失量/%	含水量/%	三氧化硫含量/%	氯离子含量/%
实测值	93.1	2.1	0.1	0.53	0.016

Table 3. Coarse aggregate particle gradation for on-site concrete components
表 3. 现场混凝土构件所用粗骨料颗粒级配

5~10 mm	筛孔尺寸/mm	2.36	4.75	9.50	16.0
	累计筛余/%	96.2	87.5	13.1	0
10~20 mm	筛孔尺寸/mm	4.75	9.50	19.0	26.5
	累计筛余/%	98.1	86.7	12.3	0
16~31.5 mm	筛孔尺寸/mm	4.75	16.0	31.5	37.5
	累计筛余/%	97.3	88.4	9.6	0

2.2. 试验方案

实验采用尺寸为 $120 \times 120 \times 1500$ mm 钢筋混凝土试验桩，试验桩 800 mm 埋于土中，700 mm 裸露在空气，其配合比见表 4，钢筋分布位置见图 2，钢筋直径为 12 mm，保护层厚度为 20 mm。按照设计要求浇筑完成钢筋混凝土构件后将其放入标准养护室养护 24 h，24 h 后脱模并将试验桩继续在养护室养护到 28 天龄期，之后运送到选定的工点埋设，埋设完成的试验桩见图 1，试验桩氯离子渗透模式见图 2。

Table 4. Concrete mix design
表 4. 混凝土配合比设计

编号	胶材总量 kg/m ³	水 kg/m ³	水泥 kg/m ³	粉煤灰 kg/m ³	砂 kg/m ³	石 kg/m ³	减水剂 (%)	备注
A	465	150	325	140	764	1056	1.2	C50 混凝土
B	380	145	266	114	737	977	1.2	C35 混凝土



Figure 1. The completed test pile was buried
图 1. 埋设完成的试验桩

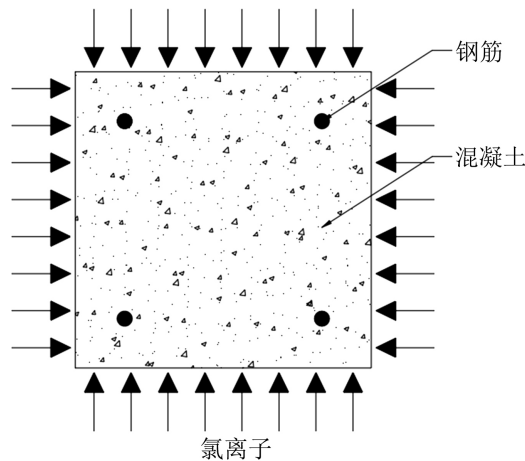


Figure 2. Chloride penetration mode
图 2. 氯离子渗透模式

2.3. 环境特点

实验地区位于台特玛湖，通过对近 40 年的年平均温湿度变化进行汇总，该地区平均湿度为 12.2℃，平均湿度为 35.6%，根据规范 GB/T50123-2019《土工试验方法》对试验桩埋置土壤的氯离子浓度进行测量，质量浓度为 5%，远超盐渍土含盐量界限 0.3%。该实验区域水分丰富，每年一半以上时间有水，部分年份全年有水，本文针对经受长期浸泡侵蚀部分构件进行采样研究。

2.4. 试验程序

在高氯盐湖区环境下埋置 3 年后，将试桩取回并根据 JGJ/T152-2008《混凝土中钢筋检测技术规程》对钢筋锈蚀情况进行检测，检测钢筋布置处氯离子浓度，并基于半电池电位法对不同埋置深度处钢筋的锈蚀程度进行测量分析，半电池电位法实验测区间隔为 20 cm。

3. 实验结果

根据 Pradhan B [3]的研究结果，由于临界氯离子浓度的定义具有不确定性，较多因素会对该临界浓度产生影响，如混凝土中氯离子和羟基离子浓度、钢材表面状况及其材料类型等。在目前常用的几种腐蚀监测方法中，半电池电位法是参照标准参考电极测量的，该测量结果取决于钢筋类型及混凝土环境，测量结果具有可靠性，因此，本文以半电池电位测试结果作为确定临界氯离子浓度的决定性参数。

接下来将对本文所用钢筋混凝土构件的钢筋锈蚀程度及钢筋布置处临界氯离子浓度进行测试，并基于钢筋锈蚀测试结果确定该混凝土构件临界氯离子浓度。

3.1. 半电池电位法测试结果

使用半电池电位法对侵蚀 3 年后的钢筋混凝土试验桩进行测试，测试结果如图 3 所示。

根据相关文献[4]，钢筋电位差为 0~-100 时，钢筋处于未锈蚀状态，钢筋电位差为-100~-200 时，锈蚀概率小于 10%，电位差为-200~-300 时，钢筋局部可能有锈蚀，电位差为-300~-400 时，发生锈蚀概率大于 90%，钢筋电位差小于-400 时，钢筋锈蚀严重。混凝土构件在盐渍土地区埋置 3 年后钢筋锈蚀情况测试结果见图，从图中可以看出，0.32 水灰比混凝土钢筋平均电位差为-217.4 mv，0.38 水灰比混凝土钢筋平均电位差为-312.4 mv，钢筋大概率发生锈蚀，以此时 0.38 水灰比混凝土氯离子浓度为临界氯离子浓度。

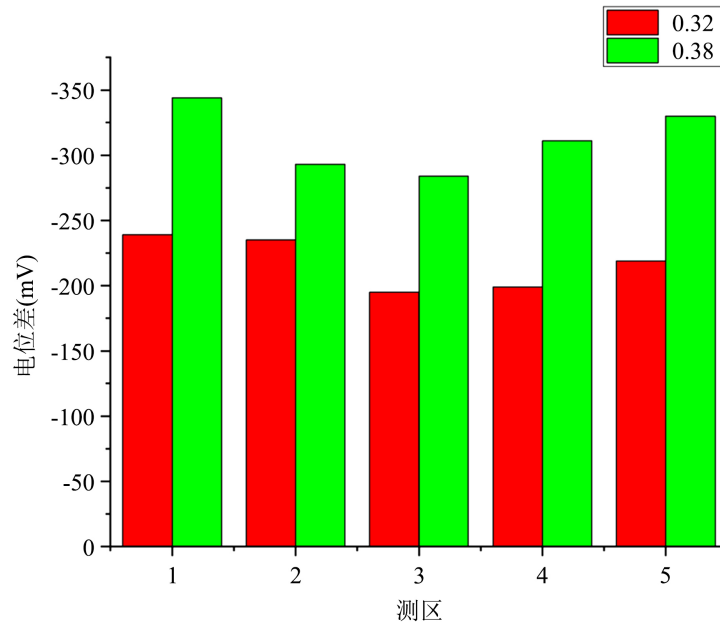


Figure 3. Comparison diagram of steel bar potential difference test results
图 3. 钢筋电位差测试结果对比图

3.2. 钢筋布置处自由氯离子浓度

根据规范 JGJ/T322-2013(《混凝土中氯离子含量检测技术规程》)中氯离子含量测试方法对钢筋布置处混凝土氯离子浓度进行检测,测试结果如下图 4:

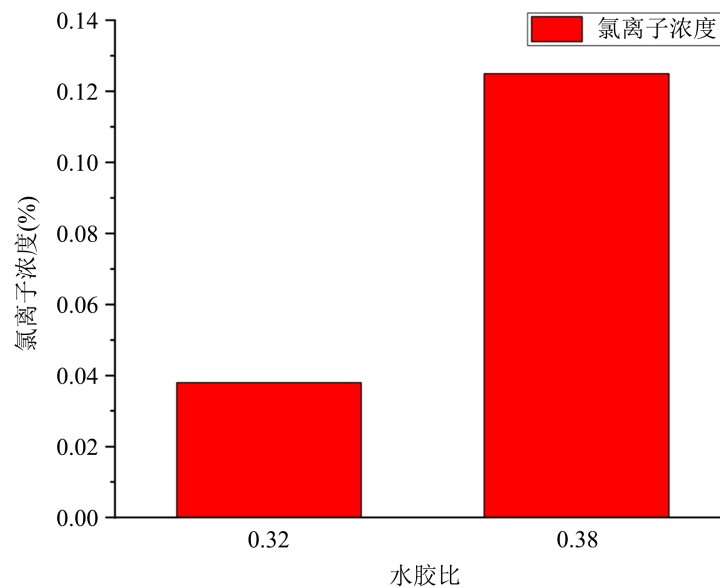


Figure 4. Free chloride ion concentration at reinforcement placement
图 4. 钢筋布置处自由氯离子浓度

随着氯离子的持续侵蚀,钢筋布置处氯离子浓度逐渐累积,从 3.1 实验结果可以看出,0.38 水灰比钢筋混凝土试验桩此时已经发生锈蚀,根据钢筋电位测试及氯离子浓度测试结果可以得出,本文所用构

件临界氯离子浓度为 0.125%。接下来首先建立氯离子扩散数值模拟以获取 0.32 水灰比混凝土达到临界条件所需时间，并基于该数值模型对钢筋混凝土构件剩余寿命进行预测。

4. 钢筋混凝土构件寿命预测

根据现有研究结果，氯离子引起混凝土劣化过程可分为三个阶段：1) 氯离子扩散阶段，该阶段指自混凝土暴露在氯盐环境，至钢筋表面氯离子浓度达到临界条件时所耗费时间，该过程取决于混凝土氯离子扩散系数的大小、外界氯离子浓度的高低、混凝土保护层的厚度等；2) 钢筋锈蚀阶段，该阶段指自钢筋开始锈蚀，至钢筋膨胀引起混凝土开裂所耗费时间，该过程取决于混凝土的抵抗能力；3) 混凝土裂缝发展阶段，该阶段指混凝土保护层自开裂到发展至极限裂缝宽度所耗费时间，该过程取决于混凝土质量。对于本文，氯离子扩散阶段所需时间本文以 T_1 表示；钢筋锈蚀阶段所需时间本文以 T_2 表示；混凝土裂缝发展阶段所需时间本文以 T_3 表示。

4.1. 氯离子扩散阶段

4.1.1. 氯离子扩散模型

根据 Xi Y [5] 的氯离子扩散控制方程，氯离子进入混凝土后，部分氯离子会粘附在水泥浆体和骨料的内表面，它们被称为结合氯离子，其他的被称为自由氯离子，只有自由氯离子可在混凝土中自由扩散。研究表明，钢筋的腐蚀只与自由氯含量有关，与总氯含量无关。控制方程见式

$$\frac{dC_f}{dt} = \frac{dC_f}{dC_t} \operatorname{div} [D_{cl} \operatorname{grad}(C_f)] \quad (1)$$

式中： C_t 为总氯离子浓度，以质量浓度计算；

C_f 为游离氯浓度，以质量浓度计算；

t 为时间，单位为 d；

D_{cl} 为氯离子扩散系数。

氯盐在混凝土结构中的扩散不仅受混凝土自身材料组成影响，还与服役环境有关。结合本研究的背景以及混凝土配合比特点，本文主要考虑龄期、温度以及粉煤灰对混凝土氯离子扩散系数的影响，氯离子扩散系数可表示为式 2：

$$D = D_0 \cdot f(t) \cdot f(T) \cdot f(FA) \quad (2)$$

杨绿峰等[6]对多因素影响下混凝土初始(养护完成时，即 28d)氯离子扩散系数进行研究，通过对大量氯离子扩散系数实验结果进行遴选及回归分析，提出初始氯离子扩散系数的计算方式：

$$D_0 = 36.6R_{w/B} - 0.06R_{FA} + 0.081R_{FA}R_{w/B} - 6.562 \quad (3)$$

式中： D_0 为初始氯离子扩散系数；

$R_{w/B}$ 为水灰比；

R_{FA} 为粉煤灰掺量百分比。

目前，大多学者以指数形式考虑龄期对氯离子扩散系数影响，Tang 和 Joost [7]提出了一种改进的数值方法来描述随时间变化的扩散系数：

$$f(t) = \frac{1}{m} \left[\left(1 + \frac{t_r}{t} \right)^{1-m} - \left(\frac{t_r}{t} \right)^{1-m} \right] \left(\frac{t_r}{t} \right)^m \quad (4)$$

温度对氯离子扩散系数的影响用 Arrhenius 定律描述来表示：

$$f(T) = e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (5)$$

氯离子扩散系数有显著的影响,其通过二次水化和微填充效应抑制氯离子的扩散。粉煤灰对氯离子扩散的影响可以描述为[8]:

$$f(FA) = 3.213FA^2 - 3.175FA + 0.999 \quad (6)$$

式中, t 为侵蚀时间;

D_0 为混凝土在 T_0 温度、28d 龄期、饱和状态的氯离子扩散系数;

t_0 为 28d;

m 为时间衰减系数,取 0.37;

E 为氯离子在混凝土中的迁移活化能,根据 model code-FIB 的耐久性寿命预测模型,取 40 kJ/mol;

R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T_0 为 293 K;

T 为温度;

W/c 为水灰比;

FA 为粉煤灰掺量。

氯离子在混凝土中传输时会以物理吸附、化学反应的方式与水泥水化产物相结合[9],通常认为只有自由氯离子能破坏钢筋的钝化膜并进一步产生锈蚀破坏,但混凝土对氯离子的结合能力影响临界氯离子浓度的判定,只有在考虑氯离子结合的情况下才能更加可靠地预测混凝土结构的使用寿命。

$$C_f = \frac{C}{1+R} \quad (7)$$

式中, R 为氯离子结合系数,取 0.85 [10]。

将上述公式带入式 1 即可得到混凝土中游离氯离子扩散浓度理论模型:

$$\frac{dC_f}{dt} = \frac{1}{1+R} \text{div} \left[\frac{1}{m} \left[\left(1 + \frac{t_r}{t} \right)^{1-m} - \left(\frac{t_r}{t} \right)^{1-m} \right] \left(\frac{t_r}{t} \right)^m \times e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \right. \\ \left. \times (3.213 \times FA^2 - 3.175FA + 0.999) \text{grad}(C_f) \right] \quad (8)$$

该游离氯离子扩散浓度理论模型边界条件如下:

1) 初始条件

混凝土内部氯离子含量为 0, 即

$$C(x, t=0) = 0 \quad (9)$$

2) 边界条件

对混凝土表面氯离子浓度进行测量, 0.32 水灰比混凝土表面氯离子浓度为 0.92% (水泥质量分数), 0.38 水灰比混凝土表面质量分数为 1.25%。

4.1.2. 氯离子扩散模型计算结果分析

使用 matlab 对氯离子扩散情况进行计算, 不同深度处氯离子扩散情况见图 5 及图 6、图 7, 从图中可以看出, 水胶比对混凝土氯离子含量影响显著, 对于相同侵蚀深度, 混凝土氯离子含量及氯离子最大侵蚀深度随水胶比增大而增大。侵蚀时间达到 365d 时, 0.38 水灰比混凝土侵蚀深度达到了 22.8 mm, 较

0.32 水灰比混凝土增加 4.8 mm；侵蚀时间达到 730d 时，0.38 水灰比混凝土侵蚀深度达到了 31.2 mm，较 0.32 水灰比混凝土增加 7.2 mm；侵蚀时间达到 1095d 时，0.38 水灰比混凝土侵蚀深度达到了 36 mm，较 0.32 水灰比混凝土增加 9.6 mm，显然 0.32 水胶比相较有着更好的抗氯离子侵蚀能力，这是因为氯离子在混凝土中的扩散取决于混凝土水泥石的密实程度，而水胶比是影响水泥石密实程度最主要的因素。对于氯离子浓度，本文主要关注钢筋布置处浓度变化情况。

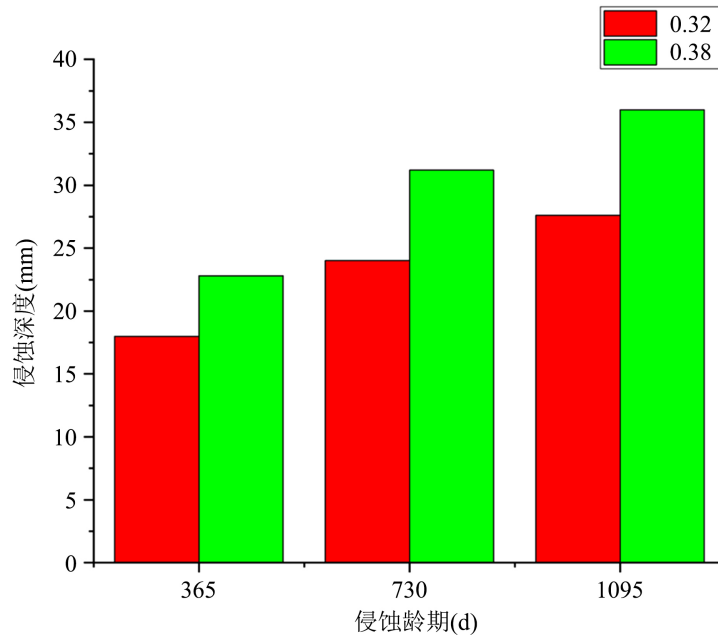


Figure 5. Maximum erosion depth of chloride ion at different erosion ages
图 5. 不同侵蚀龄期下氯离子最大侵蚀深度

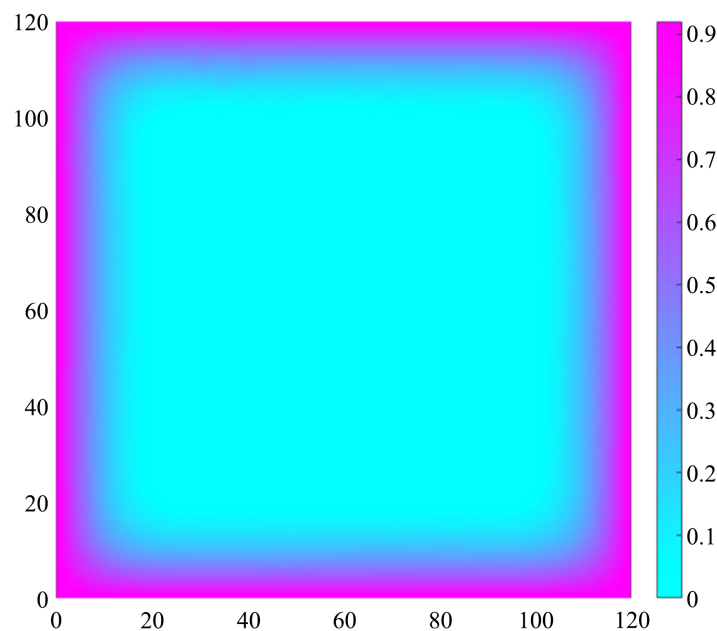


Figure 6. 0.32 Chloride ion diffusion of water-cement ratio concrete at 1095d
图 6. 0.32 水灰比混凝土 1095d 时氯离子扩散情况

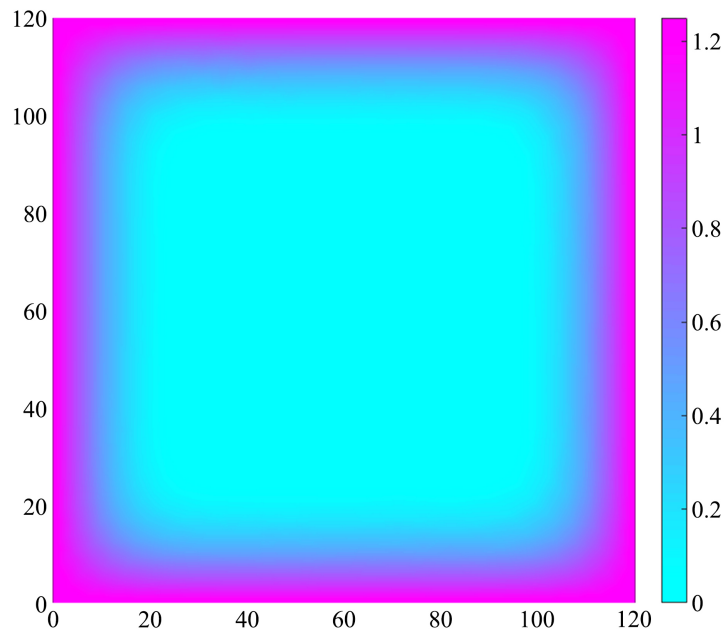


Figure 7. 0.38 Chloride ion diffusion of water-cement ratio concrete at 1095d
图 7. 0.38 水灰比混凝土 1095d 时氯离子扩散情况

本实验所浇筑的钢筋混凝土试桩混凝土保护层厚度为 20 mm，对该深度处氯离子浓度累积情况进行分析。氯离子浓度随侵蚀时间变化情况见图，从图 8 中可以看出，随着侵蚀时间的增加，主筋所在位置的氯离子浓度逐渐增加，侵蚀时间达到 1095d 时，0.32 水灰比混凝土该处氯离子浓度达到 0.041%，0.38 水灰比混凝土该处氯离子浓度达到 0.133%，浓度为 0.32 水灰比混凝土的 3.24 倍，这说明该水灰比混凝土的抗氯离子侵蚀能力更差，在长期侵蚀过程中，更容易达到临界氯离子浓度。

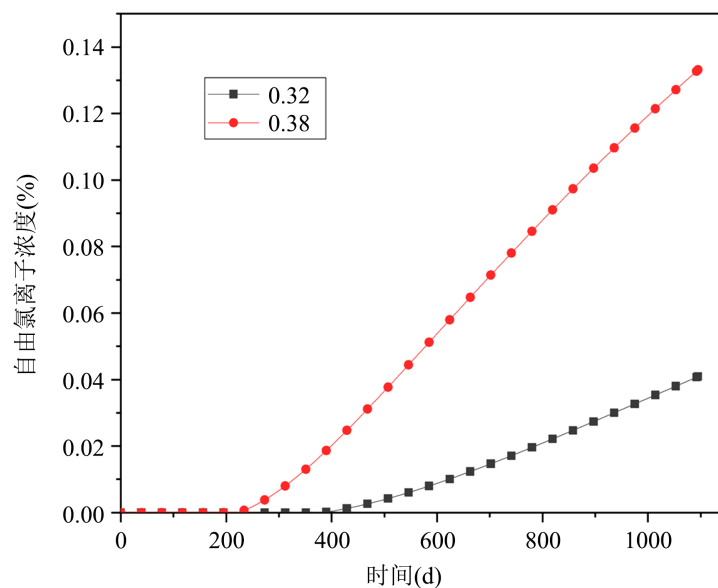


Figure 8. The variation of free chloride ion concentration at reinforcement placement with time
图 8. 钢筋布置处自由氯离子浓度随时间变化情况

4.1.3. 氯离子扩散模型验证

根据规范 JGJ/T322-2013 (《混凝土中氯离子含量检测技术规程》)中氯离子含量测试方法对钢筋布置处混凝土氯离子浓度进行检测, 对比结果如图 9, 从表中可以看出, 模型模拟结果与实际实验结果大致相同, 可将数值模型用于模拟氯离子侵蚀过程。

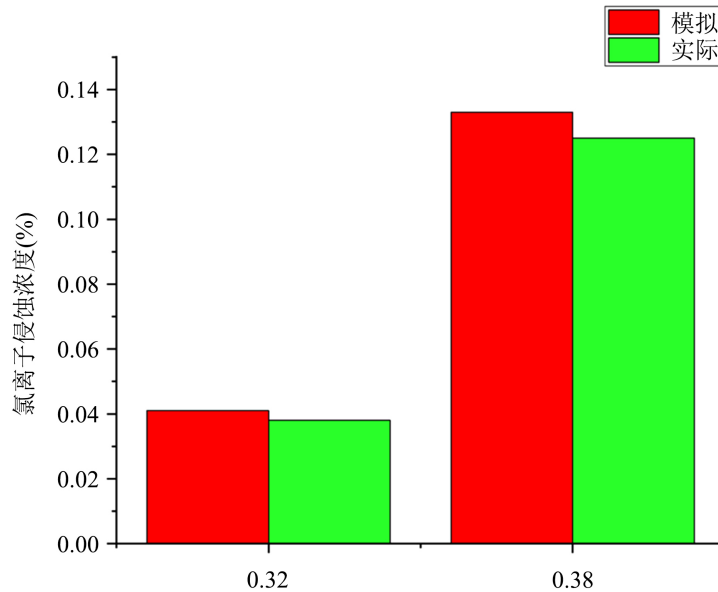


Figure 9. The maximum erosion concentration of chloride ion at 1095d
图 9. 侵蚀龄期为 3 年时氯离子最大侵蚀浓度

4.2. 钢筋锈蚀阶段

基于 4.1 中氯离子扩散模型, 推测 0.32 水灰比自开始腐蚀至 2731d 时达到钢筋表面临界氯离子浓度; 0.38 水灰比自开始腐蚀至 1096d 时达到钢筋表面临界氯离子浓度。

Vu K [11]以混凝土配合比、保护层覆盖厚度、环境条件等为控制因素, 建立了预测钢筋腐蚀速率的经验表达式如式所示:

$$i_{corr}(tp) = i_{corr}(1) \cdot 0.85t_p^{-0.29} \quad (10)$$

$$i_{corr}(1) = \frac{37.8(1-w/c)^{-1.64}}{\text{cover}} \quad (11)$$

式中: i_{corr} 为钢筋锈蚀电流密度;

w/c 为水灰比;

t_p 为侵蚀龄期, 单位为年;

Cover 保护层厚度, 单位为 cm。

王永东[12]以混凝土内部膨胀应力将超过混凝土的抗拉强度, 导致混凝土保护层开裂失效时的时间为开裂时间 T_2 。

$$T_2 = \frac{W_{rust}^2(t)}{2k_{rust}(t)} \quad (12)$$

$$W_{rust}^2(t) = 2 \int_0^t k_{rust}(t) dt \quad (13)$$

$$k_{rust}(t) = 0.383 \times 10^{-3} D i_{corr}(t) \quad (14)$$

式中: i_{corr} 为钢筋锈蚀电流密度;

D 为钢筋直径。

由于在腐蚀过程中, 钢筋会膨胀锈蚀, 减少有效直径。Andrade [13] 根据法拉第定律提出的腐蚀电流密度 i_{corr} 与钢筋直径减小的线性关系:

$$D = D_0 - 0.023 i_{corr} t \quad (15)$$

式中, D_0 为初始直径, 单位为 mm。

4.3. 混凝土裂缝发展阶段

钢筋混凝土达到临界开裂时间 T_2 后, 钢筋的截面面积因锈蚀持续进一步减小, Vu [14] 等基于加速腐蚀试验提出了计算裂纹扩展时间的经验模型 T_3 :

$$T_3 = 0.0167 i_{corr}^{-1.1} \left[42.9 \times \left(\frac{c}{W/C} \right)^{0.54} + \left(\frac{w_{lim} - 0.3}{0.0062} \right)^{1.5} \right] \quad (16)$$

上式中: c 为保护层厚度。

取《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010 所要求的混凝土极限裂缝宽度 0.3 mm 代入式 16:

$$T_3 = 0.0167 i_{corr}^{-1.1} \left[42.9 \times \left(\frac{20}{0.32} \right)^{0.54} \right] \quad (17)$$

下面对 0.32 及 0.38 水灰比混凝土不同阶段寿命进行预测, 预测结果见表 5。

Table 5. Life prediction of concrete at different stages
表 5. 不同阶段混凝土寿命预测

侵蚀阶段	0.32 混凝土寿命(a)	0.38 混凝土寿命(a)
T_1	7.48	3
T_2	5.72	4.62
T_3	6.683	5.95
合计	19.883	13.57

5. 结论

1) 通过半电池电位法对在盐渍土地区埋置三年的混凝土试验桩进行测试, 0.38 水灰比混凝土具有更显著的电位差, 说明该构件受侵蚀程度更为严重, 钢筋布置处更容易达到临界氯离子浓度。

2) 水灰比、环境温度、外掺料含量均会对混凝土氯离子扩散系数造成显著影响, 通过 matlab 对不同水灰比混凝土氯离子扩散情况进行数值模拟, 0.38 水灰比混凝土侵蚀更为严重, 氯离子浓度及侵蚀深度增加更快。

3) 对盐渍土地区不同水灰比混凝土寿命进行预测, 0.32 水灰比混凝土寿命为 19.883 年, 0.38 水灰比混凝土寿命为 13.57 年, 通过减小水灰比可显著提升钢筋混凝土构件寿命。

参考文献

- [1] Xia, J., Li, T., Fang, J.-X. and Jin, W.-L. (2019) Numerical Simulation of Steel Corrosion in Chloride Contaminated Concrete. *Construction and Building Materials*, **228**, Article ID: 116745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116745>
- [2] 赵翔宇. 基于氯离子渗透的混凝土结构耐久性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [3] Pradhan, B. and Bhattacharjee, B. (2009) Half-Cell Potential as an Indicator of Chloride-Induced Rebar Corrosion Initiation in RC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **21**, 543-552. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:10\(543\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:10(543))
- [4] 王献国, 贾东新. 漳河大桥桩基础综合检测[J]. 公路, 2002(9): 46-47.
- [5] Xi, Y.P. and Bazant, Z.P. (1999) Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11**, 58-65. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(58))
- [6] 杨绿峰, 周明, 陈正, 文涛. 基于强度和抗氯盐耐久性指标的混凝土配合比设计及试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(12): 65-74.
- [7] Tang, L. and Gulikers, J. (2007) On the Mathematics of Time-Dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete. *Cement and Concrete Research*, **37**, 589-595. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.006>
- [8] Niu, D.T., et al. (2016) Chloride Ion Diffusion Model of the Concrete under Multiple Factors. *Materials Science Forum*, **866**, 43-48.
- [9] Hall, C. (1993) Water Sorptivity of Mortars and Concrete—A Review. *Magazine of Concrete Research*, **419**, 51-61. <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.147.51>
- [10] 郭冬梅, 项贻强, 程坤, 林士旭, 李威. 沿海混凝土桥氯离子扩散修正模型及其应用[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 89-94.
- [11] Vu, K. and Stewart, M.G. (2007) Structural Reliability of Concrete Bridges Including Improved Chloride-Induced Corrosion Models. *Building Technique Development*, **22**, 313-333. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(00\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(00)00018-7)
- [12] 王永东. 氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀对地下结构耐久性影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.
- [13] Andrade, C., Alonso, C. and Molina, M.J. (1993) Cover Cracking as a Function of Bar Corrosion: Part I. Experimental Test. *Materials & Structures*, **26**, 453-464. <https://doi.org/10.1007/BF02472805>
- [14] 陆春华, 金伟良, 刘荣桂. 钢腐蚀和覆盖开裂的船用钢筋混凝土的概率寿命评估[J]. 中国海洋工程: 英文版, 2011, 25(2): 305-318.