

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.079



海洋潮汐浪溅区混凝土表面氯离子浓度的改进计算模型

蔡荣¹, 杨绿峰², 余波²

(1. 广西财经学院 建设处, 南宁 530008; 2. 广西大学 土木建筑工程学院; 工程防灾与结构安全教育部重点实验室; 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘要:收集世界不同地区 304 组海洋潮汐浪溅区自然暴露混凝土的试验数据, 据此分析水胶比、胶凝材料种类和暴露时间对混凝土表面氯离子浓度 $C_{s,ts}$ 的影响规律, 进而结合二阶段多元非线性回归分析, 分别确定了硅酸盐水泥、粉煤灰、矿渣和硅灰等胶凝材料对 $C_{s,ts}$ 的修正系数, 建立了海洋潮汐浪溅区 $C_{s,ts}$ 的改进模型, 并利用现有模型和试验数据对比, 验证了该模型的适用性。分析表明: $C_{s,ts}$ 与水胶比之间近似呈线性关系, 且胶凝材料种类对 $C_{s,ts}$ 的影响显著; $C_{s,ts}$ 在前 5 a 内快速增长, 随后逐渐趋于稳定, 可以利用指数型函数来描述其时变规律。

关键词:潮汐浪溅区; 混凝土; 氯离子浓度; 回归分析; 胶凝材料

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)04-0122-08

Improved model for surface chloride concentration of concrete in marine tidal and splash zones

Cai Rong¹, Yang Lufeng², Yu Bo²

(1. Department of Construction, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530008, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture; Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education; Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

Abstract: The influences of water-to-binder ratio, binder type and exposure time on the surface chloride concentration $C_{s,ts}$ of concrete exposed to marine tidal and splash zones were investigated systematically in this study based on 304 sets of field test data selected from different sites around the world. Then, the correction factors of four binder types can be determined using the two-phase multiple nonlinear regression technique, including the ordinary Portland cement, fly ash, slag and silica fume. Finally, an improved model for $C_{s,ts}$ was developed. The applicability of the improved model for $C_{s,ts}$ was validated in comparison with existing models and field test data. Analysis results show that the surface chloride concentration

收稿日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(51678165, 51668008); 广西自然科学基金(2018GXNSFAA281344)

作者简介: 蔡荣(1970-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋混凝土耐久性研究, E-mail: rong2014xd@hotmail.com.

余波(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn.

Received: 2018-10-29

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51678165, 51668008); Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2018GXNSFAA281344)

Author brief: Cai Rong (1970-), senior engineering, PhD, main research interest: marine concrete durability, E-mail: rong2014xd@hotmail.com.

Yu Bo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) gxuyubo@gxu.edu.cn.

increases linearly with water-binder-ratio, while the influence of binder type on $C_{s,ts}$ cannot be ignored. Moreover, $C_{s,ts}$ increases over exposure time exponentially, which appears a fast increase in the first 5 years and then becomes constant.

Keywords: tidal and splash zones; concrete; chloride concentration; regression analysis; binder

海洋潮汐浪溅区是海洋混凝土结构耐久性劣化最为突出的区域,因此,有必要建立该区域混凝土表面氯离子浓度 $C_{s,ts}$ 的计算模型,为混凝土结构的耐久性分析和设计提供量化边界条件。目前,学者们建立了多种表面氯离子浓度计算模型。其中,Marques 等^[1]建立了 $C_{s,ts}$ 与水胶比之间的线性关系模型;文献[2]建立了考虑水胶比和胶凝材料种类影响的关系模型。上述模型只考虑了材料特性的影响,而忽略了暴露时间 t 的影响。由于水泥水化程度的发展,混凝土越来越密实,导致 $C_{s,ts}$ 具有显著的时变特性。对此,文献[3-8]分别利用对数型、幂函数型、指数型等函数来描述了 $C_{s,ts}$ 的时变规律,但无法合理描述初期增长较快、后期趋于稳定的时变规律。文献[9-11]建立了 $C_{s,ts}$ 与水胶比和暴露时间之间的关系模型,但忽略了胶凝材料种类对表面氯离子浓度的影响。由此可见, $C_{s,ts}$ 不仅与水胶比和胶凝材料种类等材料参数密切相关,而且具有显著的时变特性,因此,有必要综合考虑水胶比、胶凝材料种类和暴露时间的影响,建立 $C_{s,ts}$ 的多因素模型。蔡荣等^[12]初步建立了 $C_{s,ts}$ 与水胶比、胶凝材料种类和暴露时间之间的关系模型,但直接采用了 DuraCrete 模型^[2]的胶凝材料种类修正系数,无法合理描述不同胶凝材料对 $C_{s,ts}$ 的影响规律。

鉴于此,本文基于 304 组海洋潮汐浪溅区现场自然暴露混凝土的试验数据,分析了水胶比、胶凝材料种类和暴露时间对 $C_{s,ts}$ 的影响规律,进而结合二阶段多元非线性回归分析,分别确定了硅酸盐水泥(OPC)、粉煤灰(FA)、矿渣(SG)和硅灰(SF)等胶凝材料种类对 $C_{s,ts}$ 的修正系数,建立了 $C_{s,ts}$ 的改进模型,并利用试验数据和现有模型对比,验证了模型的适用性。

1 表面氯离子浓度的主要影响因素分析

1.1 潮汐浪溅区自然暴露混凝土的试验数据

为了研究海洋潮汐浪溅区混凝土表面氯离子浓度 $C_{s,ts}$ 的主要影响因素及其影响规律,从文献[10, 13-20]中搜集了 304 组现场自然暴露混凝土的试验数据。其中,文献[10, 13-19]直接提供了 297 组依据 Fick 第二定律一维解析解拟合确定的表面氯离子浓度数据,文献[20]仅提供了混凝土内部氯离子的浓度分布数据,本文依据 Fick 第二定律的一维解析解^[13, 16]通过逆向拟合^[21]分析得到对应的表面氯离子浓度数据,并据此建立了 $C_{s,ts}$ 的试验数据库,基本信息见表 1。

表 1 试验数据的信息

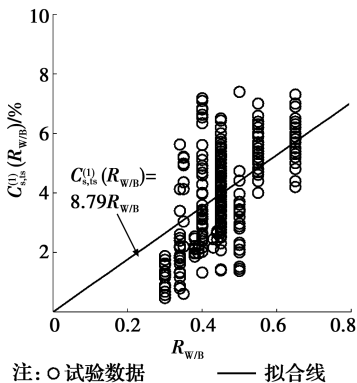
Table 1 Information of experimental data

| 序号 | 数据来源 | 水胶比 | 暴露时间/a | 外掺料 | 暴露地点 |
|----|----------------------------|----------------------|--------|---------|----------------|
| 1 | Chalee 等 ^[10] | 0.45, 0.55, 0.65 | 2~5 | OPC, FA | 泰国海湾潮汐区 |
| 2 | Costa 等 ^[13] | 0.3, 0.34, 0.5 | 0.5~5 | OPC, SF | 葡萄牙西海岸浪溅区和潮汐区 |
| 3 | Nanukuttan ^[14] | 0.4 | 1~7 | OPC | 苏格兰北海浪溅区和潮汐区 |
| 4 | Pack 等 ^[15] | 0.38~0.44 | 0.5~9 | OPC, SG | 南韩海域潮汐区 11 座桥梁 |
| 5 | Markeset 等 ^[16] | 0.45 | 0.5~9 | OPC, FA | 挪威海域, 潮汐区 |
| 6 | Pang 等 ^[17] | 0.4, 0.45, 0.5, 0.65 | 4~36 | OPC | 浙江现有码头 |
| 7 | 薛焕等 ^[18] | 0.34 | 2 | FA, SG | 青岛小麦岛 |
| 8 | Safedian 等 ^[19] | 0.3, 0.35 | 0.5~8 | SF | 伊朗波斯湾潮汐区 |
| 9 | Farahani 等 ^[20] | 0.45, 0.5 | 3, 5 | SF | 伊朗波斯湾潮汐区 |

1.2 材料参数的影响

在海洋潮汐浪溅区,混凝土表层对流区的氯离子传输主要受毛细吸附、干湿循环等作用的影响,而混凝土内部的氯离子传输主要受扩散作用控制,通常可以利用 Fick 第二定律来描述。由于水胶比($R_{w/B}$)和胶凝材料种类对混凝土的孔隙率和水化过程具有重要影响^[22],进而会影响混凝土中氯离子的扩散和积聚规律,所以 $R_{w/B}$ 和胶凝材料种类是影响混凝土表面氯离子浓度(C_s)的重要材料参数。

在 $R_{w/B}$ 的影响方面,王胜年等^[23-24]通过现场暴露试验数据分析发现, $R_{w/B}$ 与 C_s 之间近似呈线性关系;另外,文献[1-2,9]均认为 C_s 随着 $R_{w/B}$ 呈线性增大趋势。基于表 1 中的试验数据,可以分析 $R_{w/B}$ 对海洋潮汐浪溅区混凝土表面氯离子浓度($C_{s,ts}$)的影响规律,如图 1 所示。由图 1 可知, $C_{s,ts}$ 与 $R_{w/B}$ 近似呈线性关系。



注: ○ 试验数据 — 拟合线

图 1 水胶比对 $C_{s,ts}$ 的影响

Fig. 1 Influence of water-to-binder ratio on $C_{s,ts}$

混凝土组分中,水泥是最基本的胶凝材料。此外,粉煤灰、硅灰、矿渣粉等矿物掺合料都是常见的胶凝材料。由于水化作用,矿物掺合料会降低混凝土的孔隙率并阻断孔隙的连通性,从而影响混凝土中氯离子的传输和积聚规律,进而对 C_s 产生重要影响。然而,由于不同矿物掺合料的水化机理和过程不尽相同,所以,不同胶凝材料种类对 C_s 的影响变化规律也不同。研究表明^[16,25],掺加 FA 会增加 C_s ,其原因在于,粉煤灰颗粒为空心结构,且比表面积较大,因而具有物理吸附氯离子的能力;同时,FA 中含有大量的氧化铝,与氢氧化钙发生二次水化反应会生成水化铝酸钙,对氯离子具有较强的固化能力;此外,掺加 FA 会增强混凝土对水的吸附能力,而水溶液是传输氯离子的重要媒介。此外,与 FA 相比,SG 和 SF 的微集料效应和火山灰效应更加显

著,从而会改善混凝土的抗氯离子渗透性能,进而降低 C_s ^[26-28]。参考 DuraCrete^[2] 模型,通过引入修正系数 A_c 来考虑胶凝材料种类的影响,将材料参数与 $C_{s,ts}$ 之间的关系描述为

$$C_{s,ts}^{(1)}(R_{w/B}) = \alpha_1 \cdot A_c \cdot R_{w/B} \quad (1)$$

式中: $C_{s,ts}^{(1)}(R_{w/B})$ 为描述水胶比对 $C_{s,ts}$ 的影响函数即总氯离子浓度占胶凝材料质量的百分比,%; α_1 为拟合参数; A_c 为胶凝材料种类修正系数。

1.3 暴露时间的影响

由于水泥水化程度会随着暴露时间(t)的增加不断完善,导致混凝土逐渐趋于密实^[29],所以, C_s 在暴露初期增长较快,随着 t 的增加逐渐趋于稳定,时变特性显著。学者们通常利用对数型^[3-4,10]、幂函数型^[5,16]和指数型^[6-8,25]等函数形式来描述 C_s 的时变特性。其中,随着 t 的增加,对数型和幂函数型模型的预测值趋于稳定的规律不明显,而指数型模型更加符合 C_s 的时变规律。利用表 1 的试验数据,可以分析 $C_{s,ts}$ 的时变规律,如图 2 所示。图中, R^2 是可决系数,可以看出,4 条曲线的可决系数都大于 0.8,说明利用指数型模型可以较好地描述 $C_{s,ts}$ 的时变特性,所以, $C_{s,ts}$ 与 t 之间的关系可以表示为

$$C_{s,ts}^{(2)}(t) = \alpha_2 (1 - e^{-\beta_1 t}) \quad (2)$$

式中: $C_{s,ts}^{(2)}(t)$ 反映了暴露时间对 $C_{s,ts}$ 的影响规律,%; α_2 和 β_1 为待定拟合参数。

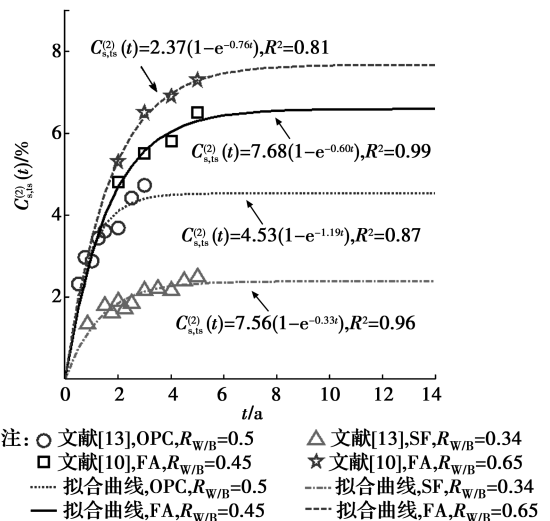


图 2 暴露时间对 $C_{s,ts}$ 的影响

Fig. 2 Influence of exposure time on $C_{s,ts}$

2 表面氯离子浓度的多因素模型

2.1 多因素模型的建立

根据上述 $C_{s,ts}$ 的主要影响因素分析可知, $C_{s,ts}$ 是关于 $R_{w/B}$ 和 t 的二元函数,且需要考虑胶凝材料种

类的影响。为了定量分析 $R_{w/B}$ 与 t 之间的相关性,根据表1中304组现场自然暴露混凝土的试验数据,利用式(3)计算 $R_{w/B}$ 与 t 之间的相关系数 ρ 。

$$\rho = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}} = 0.06 \quad (3)$$

式中: ρ 为暴露时间 t 和水胶比 $R_{w/B}$ 之间的相关系数; N 为试验数据的数量,这里为304; x_i 和 y_i 分别为第 i 组现场自然暴露试验数据中 t 和 $R_{w/B}$ 的取值。

根据式(3)的计算结果可知,暴露时间 t 和水胶比 $R_{w/B}$ 之间的相关系数 $\rho=0.06$,说明 t 和 $R_{w/B}$ 两个因素之间的相关性很小,可以近似认为两者不相关。鉴于此,在式(1)和式(2)所建立的单因素模型基础上,可以将 $C_{s,ts}$ 的多因素模型描述为

$$C_{s,ts}(R_{w/B}, t) = \alpha_{ts} \cdot A_c \cdot R_{w/B} \cdot (1 - e^{-\beta_{ts} \cdot t}) \quad (4)$$

式中: α_{ts} 和 β_{ts} 表示待定拟合系数。

2.2 模型参数的确定

基于表1中304组 $C_{s,ts}$ 的试验数据,结合高斯-牛顿迭代法^[30]和两阶段多元非线性回归分析方法^[21]来待定参数 α_{ts} 、 β_{ts} 和 A_c 。首先,令 $A_c=1$,通过多元非线性回归分析,可以确定 α_{ts} 和 β_{ts} 分别为10.01和0.96,将 α_{ts} 和 β_{ts} 的拟合值代入式(4),可获得考虑 $R_{w/B}$ 、胶凝材料种类和 t 影响的 $C_{s,ts}$ 改进模型。

$$C_{s,ts} = 10.01 A_c \cdot R_{w/B} \cdot (1 - e^{-0.96t}) \quad (5)$$

在式(5)的基础上,利用表1中不同种类胶凝材料(OPC、FA、SG和SF)的试验数据,通过回归分析,可以确定不同胶凝材料种类的修正系数 A_c ,并

与DuraCrete模型^[2]中的材料修正系数 A_c 取值进行对比分析,见表2。

表2 A_c 取值的对比分析

Table 2 Comparison of values of A_c

| 模型 | OPC | FA | SG | SF |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 本文模型 | 0.94 | 1.06 | 0.76 | 0.86 |
| DuraCrete 模型 | 7.76% | 7.45% | 6.77% | 8.96% |

由表2可知,本文模型和DuraCrete模型的胶凝材料修正系数 A_c 取值规律不同。从1.2节的影响机理分析可知,掺加FA会增加 $C_{s,ts}$,因而FA混凝土的 A_c 高于OPC混凝土的 A_c ;与此相反,掺加SG和SF能够显著降低 $C_{s,ts}$,因而SG混凝土和SF混凝土的 A_c 低于OPC混凝土的 A_c 。本文模型的 A_c 取值符合上述规律,能够正确反映胶凝材料种类对 $C_{s,ts}$ 的影响规律。而DuraCrete模型中SF混凝土的 A_c 值高于OPC混凝土的 A_c ,FA混凝土的 A_c 值低于OPC混凝土的 A_c ,与前述试验结果不符,由此说明,DuraCrete模型的 A_c 取值不能正确反映胶凝材料种类对 $C_{s,ts}$ 的影响规律。

将表2中本文模型的 A_c 值代入式(5),可以建立同时考虑暴露龄期、水胶比和胶凝材料种类影响的海洋潮汐浪溅区混凝土表面氯离子浓度 $C_{s,ts}$ 的多因素模型。

3 对比分析与验证

为了验证所建立 $C_{s,ts}$ 模型的有效性和适用性,选用现有的9种计算模型进行对比分析,见表3。需要说明的是,为了与试验数据进行对比分析,各模型的分项系数统一取为1.0。

表3 不同计算模型的表达式

Table 3 Expressions for different computational models

| 序号 | 模型名称 | 计算公式 |
|----|----------------------------|--|
| 1 | LNEC模型 ^[1,31] | $C_{s,ts}=2.5 \cdot R_{w/B} \cdot k_T \cdot C_b$,式中: C_b 为葡萄牙海岸特定条件下的表面氯离子浓度值; k_T 为温度影响系数。 |
| 2 | DuraCrete模型 ^[2] | $C_{s,ts}=A_c \cdot R_{w/B}$ |
| 3 | 文献[3]模型 | $C_{s,ts}=1.52 \cdot \ln(3.77t+1)$ |
| 4 | 文献[10]模型 | $C_{s,ts}=[-0.379(R_{w/B})+2.064]\ln(t)+[4.078(R_{w/B})+1.011]$ |
| 5 | 文献[11]模型 | $C_{s,ts}=10^{[0.814(R_{w/B})-0.213]}+2.11\sqrt{t}$ |
| 6 | 文献[12]模型 | $C_{s,ts}=1.46A_c \cdot R_{w/B} \cdot (1-e^{-0.68t})$ |
| 7 | 文献[13]模型 | $C_{s,ts}=0.38t^{0.37}$ |
| 8 | JTS 153模型 ^[32] | $C_{s,ts}=A_{c,w} \cdot R_{w/B}$,式中:浪溅区和水位变动区的 $A_{c,w}$ 分别取值为16.47和11.57 |
| 9 | 文献[33]模型 | $C_{s,ts}=10.3K_d K_{ws} K_{RH} K_T K_{HCS} R_{w/B}$,式中: K_d 、 K_{ws} 、 K_{RH} 、 K_T 和 K_{HCS} 分别表示混凝土表面干燥条件、海水季节浸润时间比、相对湿度、环境温度和年浸润时间比的影响系数。 |

3.1 模型预测效果对比分析

利用文献[13,16]提供的现场暴露混凝土的试验数据,检验分析不同模型的合理性,如图3所示。由图3可知, $C_{s,ts}$ 在前5 a内增长较快,后期逐渐趋于稳定,特别是在图3(b)、(c)中更为明显。DuraCrete模型低估了3 a以后的试验值;JTS 153模型高估了前5 a内的试验值;当暴露时间较短(如5 a内)时,文献[10]模型(对数型)和文献[11]模型(平方根型)的预测值与试验值吻合较好,但是当暴

露时间较长(如5 a后)时,则会出现明显高估,且文献[10]模型的初值出现负值,不符合工程的物理意义;由图3(a)、(b)可以看出,当暴露时间较长时,文献[12]模型的预测值明显高于实测值。文献[13]模型和文献[3]模型(对数型)的预测值在暴露初期显著低估,而当暴露时间较长时,文献[13]模型和文献[3]模型(对数型)出现高估。总体而言,本文模型的预测值与试验值吻合较好,前5 a快速增长,随后逐渐趋于稳定,符合工程规律。

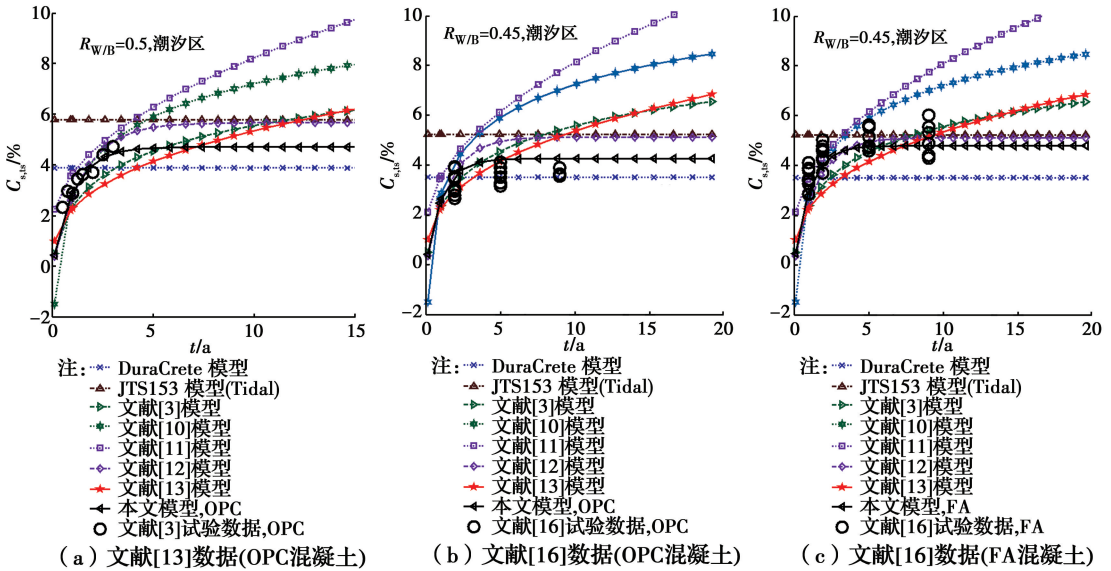


图3 基于试验数据的时变预测模型对比

Fig. 3 Comparison of time-dependent models based on experimental data

3.2 模型预测精度对比分析

基于表1中304组 $C_{s,ts}$ 的试验数据,将本文模型和表3中的9种模型进行对比分析,以验证各模型的计算精度,如图4所示。其中,文献[33]模型的参数根据文献[12]取值。为了定量对比分析各模型的预测精度,分别定义残差均方差 δ 、模型预测值与实测值比值的均值 μ 。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [C_{s,ts}(i) - \bar{C}_{s,ts}(i)]^2}; \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\bar{C}_{s,ts}(i)}{C_{s,ts}(i)} \quad (6)$$

式中: $C_{s,ts}(i)$ 和 $\bar{C}_{s,ts}(i)$ 分别表示第*i*组 $C_{s,ts}$ 的试验值与预测值; N 为样本数。残差均方差 δ 反映了模型预测值的离散性,其值越小,说明模型预测结果的离散性越小; μ 反映了表面氯离子浓度的模型预测值与试验值的接近程度,其值越接近1,表示预测值与试验值越接近,说明模型的预测精度越高。

由图4可以看出,文献[10]模型、文献[11]模型、JTS 153模型(潮汐区)、JTS 153模型(浪溅区)和文献[33]模型的散点大都在等值线上方,明显偏

大;而DuraCrete模型、文献[3]模型、文献[13]模型和LNEC模型的散点偏离30%上下界较多,说明这4个模型预测结果离散性大。同时,可以看到,上述9个模型的 δ 值都在1.46%以上,从概率统计的角度再次验证了上述模型预测值与试验值相比离散性较大,模型拟合效果较差。文献[12]模型和本文模型的散点相对集中分布在等值线附近,特别是本文模型的 δ 值最小,而且与文献[12]相比,本文模型的 μ 值更接近于1.0,说明本文模型具有更高的预测精度,且离散较小。

造成各模型拟合效果不同的原因在于,DuraCrete模型、文献[10]模型、文献[11]模型、文献[13]模型、文献[3]模型、LNEC模型和文献[33]模型都没有综合考虑暴露时间、水胶比和胶凝材料种类的影响,只是考虑了3个主要因素中的1~2个,导致预测精度低,且预测结果离散性大。而本文建立的多因素模型综合考虑了水胶比、胶凝材料种类、暴露时间的影响,能够合理反映自然暴露环境下混凝土表面氯离子浓度的变化规律,因而预测

结果精度较高,且离散性较小。文献[12]模型尽管综合考虑了 3 类主要因素的影响,但该模型的胶凝材料种类修正系数与 DuraCrete 模型相同,依据为数不多的试验数据并利用常规拟合分析方法确定,缺乏针对性,难以合理反映胶凝材料种类的影响规律。而本文模型有针对性地采用二阶段回归

方法分析确定胶凝材料种类修正系数,更加合理。特别需要说明的是,本文模型与其他模型相比,所依据的 304 组现场自然暴露试验数据来源地更加广泛,且样本总量远大于其他模型,从而保证了本文模型参数的拟合结果具有更高的稳定性和更广泛的适用性。

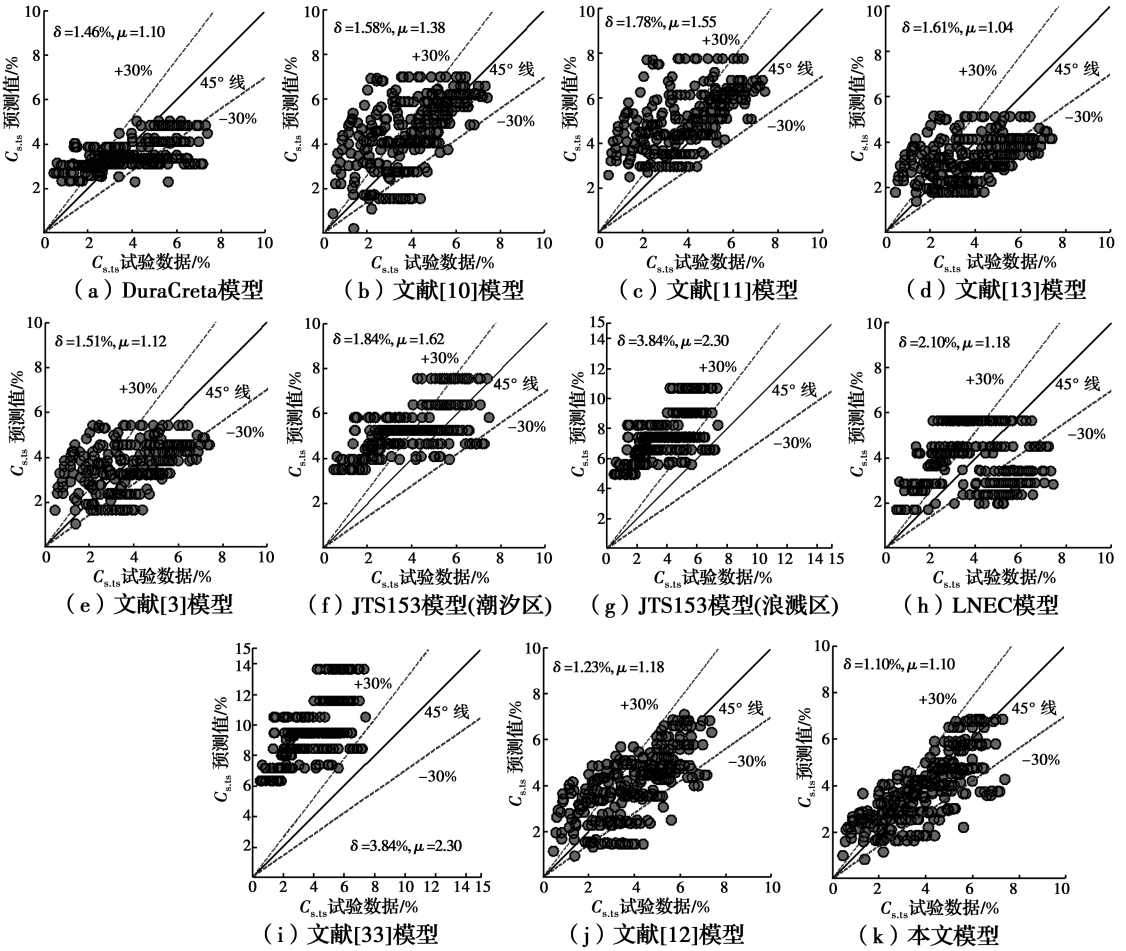


图 4 基于试验数据的模型预测值对比

Fig. 4 Comparison of predicted results of different models based on experimental data

4 结论

收集遴选了 304 组海洋潮汐溅区现场自然暴露混凝土的试验数据,利用二阶段多元非线性回归分析方法建立了混凝土表面氯离子浓度 $C_{s,ts}$ 的改进模型。分析表明:

1) $C_{s,ts}$ 与水胶比之间呈线性增大关系,且胶凝材料种类对 $C_{s,ts}$ 的影响显著; $C_{s,ts}$ 在暴露初期快速增长,随后逐渐趋于稳定,可以利用指数型函数来描述其时变规律。

2) 本文 $C_{s,ts}$ 模型综合考虑了暴露时间、水胶比和胶凝材料种类的影响,且利用二阶段多元非线性回归分析确定了胶凝材料种类修正系数,通过与现

有模型和试验数据的对比分析,验证了本文的 $C_{s,ts}$ 模型具有较好的适用性。

3) 本文 $C_{s,ts}$ 模型所依据的 304 组现场自然暴露混凝土的试验数据来源地更加广泛,且样本总量远大于其他模型,从而保证了本文 $C_{s,ts}$ 模型参数的拟合结果具有更高的稳定性和更广泛的适用性。

参考文献:

[1] MARQUES P F, COSTA A, LANATA F. Service life of RC structures: chloride induced corrosion: prescriptive versus performance-based methodologies [J]. Materials and Structures, 2012, 45(1): 277-296.
 [2] DURACRETE. Final technical report-general guidelines

- for durability design and redesign [R]. Denmark; The European Union, 2000.
- [3] SONG H W, LEE C H, ANN K Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(2): 113-121.
- [4] SONG H W, SHIM H B, PETCHERDCHOO A, et al. Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(2): 120-127.
- [5] COSTA A, APPLETON J. Chloride penetration into concrete in marine environment-Part II: Prediction of long term chloride penetration [J]. *Materials and Structures*, 1999, 32(5): 354-359.
- [6] LIN S H. Chloride diffusion in a porous concrete slab [J]. *Corrosion*, 1990, 46(12): 964-967.
- [7] ARORA P, POPOV B N, HARAN B, et al. Corrosion initiation time of steel reinforcement in a chloride environment: A one dimensional solution [J]. *Corrosion Science*, 1997, 39(4): 739-759.
- [8] KASSIR M K, GHOSN M. Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(1): 139-143.
- [9] LI Q W, LI K F, ZHOU X G, et al. Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong-Zhuhai-Macau sea link project [J]. *Structural Safety*, 2015, 53: 1-12.
- [10] CHALEE W, JATURAPITAKKUL C, CHINDAPRASIRT P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater [J]. *Marine Structures*, 2009, 22(3): 341-353.
- [11] PETCHERDCHOO A. Time dependent models of apparent diffusion coefficient and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 497-507.
- [12] 蔡荣, 杨绿峰, 余波, 等. 海洋潮汐浪溅区混凝土表面氯离子浓度计算模型[J]. *海洋工程*, 2014, 32(5): 25-33.
- CAI R, YANG L F, YU B, et al. Computing model for surface chloride concentration of concrete in marine tidal and splash zones [J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(5): 25-33. (in Chinese)
- [13] COSTA A, APPLETON J. Chloride penetration into concrete in marine environment: Part I: Main parameters affecting chloride penetration [J]. *Materials and Structures*, 1999, 32(4): 252-259.
- [14] NANUKUTTAN S V, BASHEER L, MCCARTER W J, et al. Full-scale marine exposure tests on treated and untreated concretes-initial 7-year results [J]. *ACI Materials Journal*, 2008, 105(1): 81-87.
- [15] PACK S W, JUNG M S, SONG H W, et al. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(2): 302-312.
- [16] MARKESET G, SKJ-LSVOLD O. International symposium on service life design for infrastructure time dependent chloride diffusion coefficient - field studies of concrete exposed to marine environment in norway [R]. Norway; SINTEF Building and Infrastructure, 2010.
- [17] PANG L, LI Q W. Service life prediction of RC structures in marine environment using long term chloride ingress data: Comparison between exposure trials and real structure surveys [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 113: 979-987.
- [18] 薛焕, 金祖权, 王晓杰. 混凝土在海洋暴露过程中的氯离子渗透研究[J]. *海洋工程*, 2015, 33(5): 60-65.
- XUE H, JIN Z Q, WANG X J. Chloride ion penetration into concrete exposed to marine environment for a long period [J]. *The Ocean Engineering*, 2015, 33(5): 60-65. (in Chinese)
- [19] SAFEHIAN M, RAMEZANIANPOUR A A. Prediction of RC structure service life from field long term chloride diffusion [J]. *Computers and Concrete*, 2015, 15(4): 589-606.
- [20] FARAHANI A, TAGHADDOS H, SHEKARCHI M. Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 59: 10-17.
- [21] 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 L F, CAI R, YU B. 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 (in Chinese).
- [22] 韩建国, 李克非. 混凝土抗氯离子渗透能力测试方法的适用性[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(4): 704-709,715.
- HAN J G, LI K F. Adaptability of the evaluation methods of concrete anti-chloride penetration ability [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(4): 704-709,715. (in Chinese)
- [23] 王胜年, 苏权科, 范志宏, 等. 港珠澳大桥混凝土结构

- 耐久性设计原则与方法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6): 1-8.
- WANG S N, SU Q K, FAN Z H, et al. Durability design principle and method for concrete structures in Hong Kong-Zhuai-Macau sea link project [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(6): 1-8. (in Chinese)
- [24] 王胜年, 李克非, 范志宏, 等. 港珠澳大桥主体混凝土结构 120a 使用寿命耐久性对策[J]. 水运工程, 2015(3): 78-84, 92.
- WANG S N, LI K F, FAN Z H, et al. Durability strategy for main concrete structure of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge with designed service life of 120 years [J]. Port & Waterway Engineering, 2015(3): 78-84, 92. (in Chinese)
- [25] 赵羽习, 王传坤, 金伟良, 等. 混凝土表面氯离子浓度时变规律试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(3): 8-13.
- ZHAO Y X, WANG C K, JIN W L, et al. Experimental analysis on time dependent law of surface chloride ion concentration of concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(3): 8-13 (in Chinese).
- [26] MAES M, GRUYAERT E, DE BELIE N. Resistance of concrete with blast-furnace slag against chlorides, investigated by comparing chloride profiles after migration and diffusion [J]. Materials and Structures, 2013, 46(3): 89-103.
- [27] 陈昌礼, 屠庆模, 凌友志. 硅粉混凝土的基本性能与工程应用[J]. 新型建筑材料, 2008, 35(4): 43-47.
- CHEN C L, TU Q M, LING Y Z. The basic properties and engineering applications of silica fume concrete [J]. New Building Materials, 2008, 35(4): 43-47. (in Chinese)
- [28] VALIPOUR M, PARGAR F, SHEKARCHI M, et al. In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2013, 46(1): 63-70.
- [29] 赵尚传, 贡金鑫, 王金锋. 氯离子环境下既有钢筋混凝土桥梁耐久性的概率分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(7): 82-86, 91.
- ZHAO S C, GONG J X, SHUI J F. Probability analysis of durability for existing reinforced concrete bridge in chloride environment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(7): 82-86, 91. (in Chinese)
- [30] 韩兆洲. 高斯·牛顿法在非线性回归分析中的应用[J]. 财贸研究, 1992, 1992(3): 72-75.
- HAN Z Z. Application of Gauss-Newton method in nonlinear regression analysis [J]. Finance and Trade Research, 1992, 3(3): 72-75. (in Chinese).
- [31] LNEC E465 L. Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or prestressed concrete structures under environmental exposures XC and XS (in Portuguese) [M]. Lisbon: National Laboratory for Civil Engineering, 2007: 67.
- [32] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153 — 2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- China's Ministry of Transport. Standard for durability of port and waterway engineering structure: JTS 153-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [33] 王晓舟, 金伟良. 海港码头混凝土结构干湿交替区域氯离子侵蚀规律研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(4): 97-104, 110.
- WANG X Z, JIN W L. Chloride penetration in wet-dry cycling zone of harbor concrete structure [J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(4): 97-104, 110. (in Chinese).

(编辑 王秀玲)