



氯盐环境下混凝土耐久性多因素模型的 试验研究及统计分析*

杨绿峰^{1,2}, 周明¹, 陈正¹, 蔡荣¹, 袁彦华¹, 蒋琼明¹

(1. 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, 广西南宁 530004;

2. 广西壮族自治区住房和城乡建设厅, 广西南宁 530028)

摘要: 为了准确评估混凝土的抗氯离子渗透性和耐久性, 开展了不同矿物掺合料混凝土的制备和电通量测试, 根据试验数据和文献数据分析了水胶比(水灰比)、粉煤灰掺量、矿渣掺量、硅灰掺量对混凝土电通量的影响, 通过回归分析研究建立了混凝土电通量的多因素计算模型, 通过对试验数据和文献数据的统计分析验证了该计算模型的正确性和广泛适用性。在此基础上, 通过定量计算氯盐环境下混凝土结构服役寿命, 分析了混凝土水胶比、掺合料组合及其掺量对混凝土耐久性的影响。结果表明, 降低混凝土的水胶比、或提高掺合料掺量均能提高混凝土耐久性; 使用矿物掺合料的高性能混凝土, 其耐久性明显优于普通混凝土; 矿渣对混凝土耐久性的改善优于粉煤灰; 复合掺加粉煤灰和矿渣对提高混凝土结构耐久性的效果更加明显。

关键词: 混凝土; 氯离子; 耐久性; 多因素计算模型; 电通量

中图分类号: P 731.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0055-08

Multi-factors model for durability of concrete under chloride environment based on experimental and statistical analysis

YANG Lv-Feng^{1,2}, ZHOU Ming¹, CHEN Zheng¹, CAI Rong¹, YUAN Yan-hua¹, JIANG Qiong-ming¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education,

School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Department of Housing and Urban-Rural Development, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530028, China)

Abstract: The charge passed through concrete is a key parameter for durability analysis of concrete under chloride environment. In this paper, the effect of the water/binder ratio, the replacements of fly ash, slag and silica fume on the charge passed is investigated by analyzing the experiment data and those collected from literatures, so that a multi-factor model is developed. The statistical analysis of data from literature and experiment demonstrates the satisfying accuracy and applicability of the model. The service life of reinforced concrete is studied based on Fick's second law and the multi-factors model, the results show that the reduction of water/binder ratio, or adding the content of blending admixtures can effectively improve the concrete service life. The concrete structures adding slag result in better durability than fly ash. The durability of high performance concrete (HPC) with both of fly ash and slag is better than those with fly ash or slag only.

Key words: concrete; chloride ion; durability; multiple factors; charge passed through concrete

收稿日期: 2012-10-29

*基金项目: 国家自然科学基金(51168003, 51208120); 广西自治区主席基金项目(2010GXNSFD169008); 广西自然科学基金项目(2011GXNSFB018013); 重大项目(2012GXNSFEA053002)

作者简介: 杨绿峰(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构耐久性和结构可靠度研究。

长期处于氯盐环境的工程结构,环境中的氯离子逐渐向混凝土内部扩散,钢筋附近的氯离子浓度随着时间的增长而逐渐增加。当钢筋表面的氯离子达到钝化膜破坏的临界浓度时,钢筋开始锈蚀,而钢筋锈蚀膨胀导致混凝土顺筋开裂,从而使混凝土结构过早失效。氯离子扩散速率主要取决于混凝土结构的抗氯离子渗透能力,扩散系数和电通量都是描述混凝土抗氯离子渗透性能的主要指标之一。通过大量的试验研究和实际工程的腐蚀调查报道可知,氯离子主要在混凝土的孔隙溶液中进行扩散,因此混凝土的孔隙率、孔隙特征等在很大程度上决定其抗氯离子扩散性能^[1](一般指标准养护28 d的混凝土氯离子扩散系数),而孔隙率主要取决于水灰比及掺合料的组合与掺量、骨料等。粉煤灰、矿渣和硅灰等矿物掺合料的火山灰效应、形态效应、微集料填充效应使得混凝土具有低渗透性、高致密性、匀化的孔隙结构等优点,因此矿物掺合料常用于制备高性能混凝土^[2-3]。Aitcin等^[4-7]研究表明,高性能混凝土与普通混凝土相比,在氯盐环境下具有更好的耐久性。

美国ASTM C1202标准^[8]是通过测试混凝土6 h电通量对混凝土氯离子渗透性能进行评价,我国的JTJ 275—2000《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》^[9]也采用了混凝土电通量法作为评价混凝土抗氯离子渗透性能的方法。宋立元^[10]通过试验分析了水灰比对混凝土电通量的影响,并认为水灰比与混凝土电通量成线性关系;王彩文等^[11-12]通过试验分析了粉煤灰对混凝土电通量的影响,研究表明在一定掺量范围内混凝土电通量随粉煤灰掺量的增加而降低;盛黎等^[12-13]通过试验分析了复掺矿物掺合料对混凝土电通量的影响,研究表明复掺矿物掺合料可以降低混凝土的电通量。然而上述研究成果大多只建立了某一个或几个影响因素与混凝土电通量的关系,没有分析水灰比、掺合料组合与掺量等影响因素对混凝土抗氯离子扩散性能的耦合作用,由此建立的耐久性分析模型只能适用于特定的混凝土,适用范围有限。因此,研究建立基于电通量的混凝土耐久性分析的多因素模型具有重要实用价值。

本文开展了不同矿物掺合料混凝土的制备和电通量测试,利用试验数据和文献数据,分析了影响混凝土电通量的主要因素如水胶比、粉煤灰、矿渣、硅灰掺量与混凝土电通量的关系,采用最小二乘法得到了混凝土电通量与水胶比和掺合料掺量的相关关系式,建立了基于电通量的混凝土耐久性分析的多因素模型,通过试验和数据分析验证了该计算模型的适用性和正确性,并在此基础上研究了氯盐环境下混凝土掺合料组合和掺量对混凝土服役寿命的影响。

1 电通量的单因素分析与计算模型

1.1 回归分析的最小二乘法

最小二乘法是一种数学优化方法,通过与数据偏差的平方和最小来确定拟合函数的系数。当确定了试验数据和拟合公式时,可以使用最小二乘法确定拟合函数中各变量系数和常数项,从而建立拟合函数与试验数据的最优关系式。

当变量 y 与多元变量 $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 之间存在线性关系时,可采用下式进行回归分析:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i \neq j=1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中: $b_0, b_1, \dots, b_n, b_{12}, \dots, b_{n-1,n}$ 为回归系数, 设第 j 次试验多元变量为 $(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nj})$, 则变量 y 的试验值为 Y_j , 对应的函数值为 $y_j(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})$, 对于 m 次试验结果作离差平方和:

$$P = \sum_{j=1}^m (Y_j - y_j)^2 \quad (2)$$

选择 $b_i (i=0, 1, \dots, n)$ 和 $b_{ij} (i \neq j=1, \dots, n)$, 使 P 达到最小, 即满足方程:

$$\frac{\partial P}{\partial b_i} = 0, \frac{\partial P}{\partial b_{ij}} = 0 \quad i \neq j \quad (3)$$

可得一个方程组, 联立求解即可得回归系数 $b_0, b_1, \dots, b_n, b_{12}, \dots, b_{n-1,n}$ 。

1.2 影响电通量的单因素分析模型

1.2.1 电通量与水灰比(水胶比)

笔者通过大量的文献调研, 收集到52组普通混凝土电通量与水灰比的试验数据^[11,14-20], 由此得到氯离子电通量与水灰比的拟合关系, 如图1所示。其拟合关系式为:

$$Q=10\,741.48R_{W/C}-1\,660.07 \quad (4)$$

式中: Q 为6 h电通量; $R_{W/C}$ 为混凝土水灰比。拟合关系式的相关系数 $R^2=0.812$,普通混凝土电通量与水灰比具有较好的线性关系。

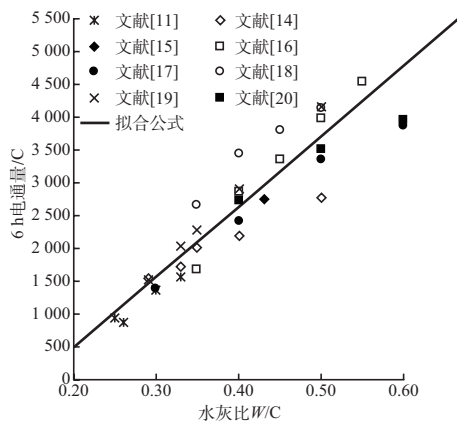


图1 普通混凝土电通量与水灰比关系

混凝土中掺合外掺料后,混凝土抗氯离子性能得到改善,图2为掺合20%粉煤灰时,文献[12,17-29]的电通量与水胶比的关系。从图中可以看出,电通量与水胶比仍具有较强的线性关系,拟合关系式为:

$$Q=10\,041.48R_{W/B}-2\,287 \quad (5)$$

式中: $R_{W/B}$ 为混凝土水胶比。拟合关系式的相关系数 $R^2=0.798\,3$ 。

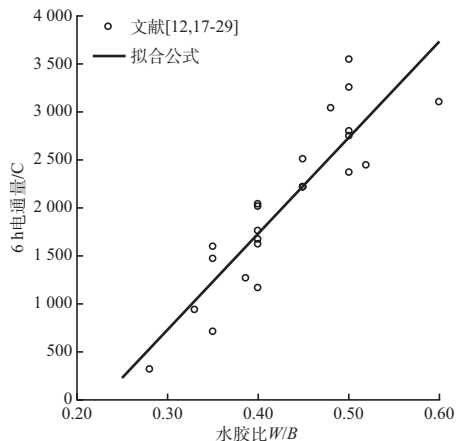


图2 掺合粉煤灰混凝土电通量与水胶比关系

比较式(4)和(5)可知,由于掺加掺合料使得电通量与水胶比的拟合系数与普通混凝土有差异。在混凝土掺合料掺量相同的情况下,可将电通量与水胶比的关系表示为:

$$Q=\alpha R_{W/B}-\beta \quad (6)$$

式中: α , β 为试验拟合系数。

1.2.2 电通量与粉煤灰掺量

掺粉煤灰的混凝土具有二次水化效应,混凝土抗氯离子性能得到增强,并且在一定范围内随着掺量的增加而增强。图3为文献[12,14,16,21]中单掺粉煤灰的混凝土电通量与掺量的关系。

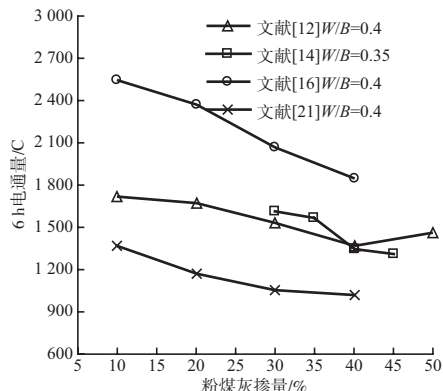


图3 混凝土电通量与粉煤灰掺量关系

从图3可以看出,在水胶比相同时,电通量与粉煤灰掺量具有较好的线性关系。电通量随着粉煤灰掺量 R_{FA} 的增加而减小,其关系可表示为:

$$Q=\alpha R_{FA}-\beta \quad (7)$$

当粉煤灰掺量超过40%,混凝土不能提供足够的水化产物与粉煤灰发生二次水化,混凝土的电通量随着粉煤灰的增加而变化平缓,甚至有上升的趋势,且JGJ 55—2011《混凝土配合比设计规程》^[30]规定混凝土粉煤灰掺量最高不超过30%~45%,本模型适用于粉煤灰掺量不超过40%的混凝土。

1.2.3 电通量与矿渣掺量

矿渣具有微集料等效效应,能改善混凝土中水泥浆体与集料间的孔隙结构和孔隙数量,因此掺矿渣混凝土比普通混凝土具有更好的抗氯离子侵蚀的能力。图4为文献[11,16,22,24]中单掺矿渣混凝土的电通量与掺量的关系。

从图4可知,矿渣掺量小于60%时,混凝土电通量随着矿渣掺量的增加成现线性下降的趋势。不同的水胶比之间的线性关系的斜率和截距不同。

在混凝土水胶比相同的情况下,电通量与矿渣掺量 R_{SG} 的关系可表示为:

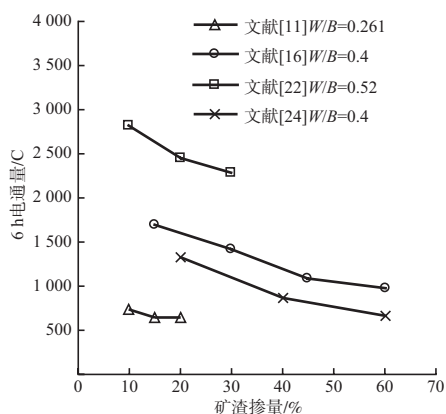


图4 混凝土电通量与矿渣掺量关系

$$Q = aR_{SG} - \beta \quad (8)$$

JGJ 55—2011《混凝土配合比设计规程》^[30]规定混凝土粒化高炉矿渣掺量最高不得超过45%~65%，本模型适用于矿渣掺量不超过60%的混凝土。

1.2.4 电通量与硅灰掺量

硅灰具有火山灰效应和微粒充填效应，使混凝土中孔隙结构得到改善，孔隙率降低，混凝土抗氯离子侵蚀的能力得到提高。图5为文献[14,25,27,29]中单掺硅灰混凝土的电通量与硅灰掺量的关系。

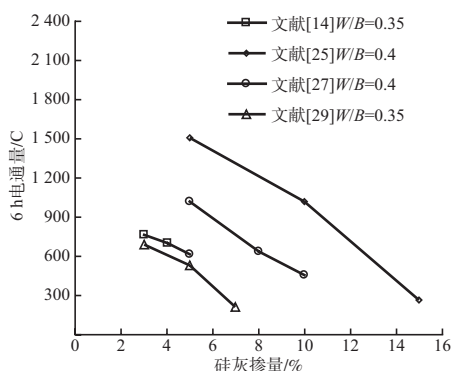


图5 混凝土电通量与硅灰掺量关系

从图5可知，硅灰掺量小于15%时，混凝土电通量随着硅灰掺量的增加成减小的线性关系，但对于不同的水胶比它们之间的的线性关系的截距和斜率不同。

在混凝土水胶比相同的情况下，电通量与硅灰掺量 R_{SF} 的关系可表示为：

$$Q = aR_{SF} - \beta \quad (9)$$

JGJ 55—2011《混凝土配合比设计规程》规

定^[30]硅灰掺量最高不得超过10%，本文模型可以适用于硅灰掺量不超过10%的混凝土，考虑混凝土的经济性，混凝土中硅灰掺量建议3%~7%。

2 电通量的多因素计算模型

2.1 混凝土多因素耐久性试验

在混凝土中掺加不同组分的粉煤灰、矿渣，制备16组混凝土试件，并开展混凝土的电通量测定试验。其原材料水泥采用华润（南宁）水泥有限公司生产的PII42.5硅酸盐水泥；细骨料中砂，表观密度为2 560 kg/m³，细度模数为2.7；粗骨料碎石，表观密度为2 590 kg/m³，粒径范围5~31.5 mm，连续级配；外加剂聚羧酸系高效减水剂，固含量为18.94%。矿物掺合料粉煤灰的性能参数为细度18.9%，需水比82%，烧失量5.92%，CaO含量3.13%，f-CaO含量0.21%，SO₃含量0.12%，氯离子0.002%；矿渣的性能参数为7 d活性指数69%，28 d活性指数95%，比表面积424 cm²/g，流动度比243%，烧失量0.46%，SO₃含量0.40%，氯离子含量0.004%。

根据ASTM C1202标准测试6 h电通量，表1为混凝土的水胶比、粉煤灰和矿渣掺量及6 h电通量试验结果。

表1 混凝土6 h电通量测试结果

水胶比	粉煤灰掺量/%	矿渣掺量/%	混凝土6 h电通量/C
0.53	10	0	1 797.5
0.53	15	0	2 411.5
0.53	20	10	1 087.7
0.53	25	20	1 522.9
0.47	10	0	1 507.1
0.47	15	0	1 562.8
0.47	20	20	1 282.8
0.47	25	10	597.7
0.43	10	10	914.4
0.43	15	20	1 608.3
0.43	20	0	1 059.3
0.43	25	0	780.0
0.35	10	20	660.1
0.35	15	10	703.2
0.35	20	0	675.8
0.35	25	0	620.1

2.2 电通量的多因素计算模型

通过单因素分析，可认为混凝土电通量与各

因素之间的关系为:

$$Q = \begin{cases} \alpha R_{W/C} - \beta & \text{普通混凝土} \\ (\alpha R_{W/B} - \beta)(\gamma R_{FA} + \lambda R_{SG} + \eta R_{SF} + \nu) & \text{掺矿物掺合料的混凝土} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \eta, \nu$ 为待定的系数, 将上式中的第二式展开并整理, 式(10)可表达为:

$$Q = \begin{cases} \alpha R_{W/C} - \beta & \text{普通混凝土} \\ b_1 R_{W/B} + b_2 R_{FA} + b_3 R_{SG} + b_4 R_{SF} + b_5 R_{W/B} R_{FA} + b_6 R_{W/B} R_{SG} + b_7 R_{W/B} R_{SF} + b_0 & \text{掺矿物掺合料的混凝土} \end{cases} \quad (11)$$

$$Q = \begin{cases} 10\,741.48 R_{W/C} - 1\,660.07 & \text{无掺合料} \\ 9\,220.21 R_{W/B} + 18.89 R_{FA} - 67.19 R_{FA} R_{W/B} - 1\,802.37 & \text{单掺粉煤灰} \\ 6\,693.07 R_{W/B} + 32.56 R_{SG} - 125.60 R_{SG} R_{W/B} - 991.68 & \text{单掺矿渣} \\ 5\,207.13 R_{W/B} - 205.31 R_{SF} + 396.56 R_{SF} R_{W/B} - 1\,003.38 & \text{单掺硅灰} \\ 2\,526.19 R_{W/B} + 70.39 R_{FA} - 53.00 R_{SG} - 1\,010.26 R_{SF} - & \text{复掺} \\ 168.18 R_{W/B} R_{FA} + 116.28 R_{W/B} R_{SG} + 2\,231.65 R_{W/B} R_{SF} + 108.51 & \end{cases} \quad (12)$$

Lounis等^[32-33]研究表明, 钢筋混凝土氯离子的电通量的变异系数 δ_D 达到0.300, 将拟合结果、试验数据和多因素计算模型绘制于图6, 图中横坐标为电通量试验数据, 纵坐标为式(12)计算得到的电通量, 虚线为多因素计算模型参考直线, 数据点越靠近虚线表明拟合程度越好, 黑实线和灰实线分别为变异系数为0.3且置信度为90%时拟合公式的上下限, 由图6可见, 数据点基本上在变异系数为0.3的上下限之内, 表明本文拟合公式能较好地反映各因素与电通量的关系。

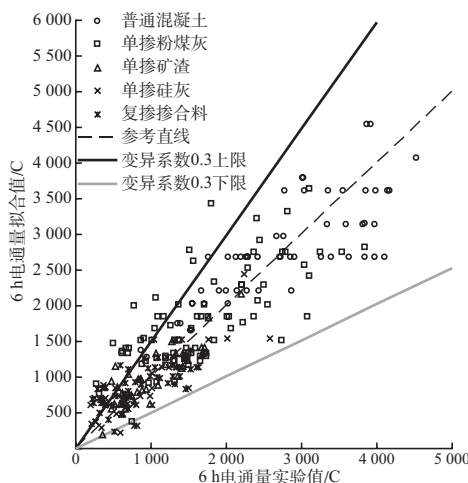


图6 电通量试验值与拟合值

式中: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ 为待定系数。

无论文献[11-12,14-29, 31]中的试验数据, 还是本文试验数据, 都是针对特定组分和配合比混凝土开展的, 因而建立的混凝土电通量分析模型不具有普适性。为了建立具有广泛适用性的电通量多因素分析模型, 本文根据采集到的256组其他课题组试验数据以及笔者课题组的试验数据, 根据式(11)和最小二乘法, 拟合得到普通混凝土、单掺掺合料混凝土、复掺掺合料混凝土的氯离子电通量的多因素计算模型:

本文氯离子电通量多因素计算模型与各文献中普通混凝土、单掺粉煤灰、单掺矿渣、单掺硅灰和复掺掺合料混凝土电通量试验值之间的相关系数见表2。

表2 拟合值与各类别混凝土试验值间的相关系数

混凝土类别	相关系数 R
普通混凝土	0.901
单掺粉煤灰混凝土	0.724
单掺矿渣混凝土	0.850
单掺硅灰混凝土	0.783
复掺掺合料混凝土	0.758

由表2可知, 模型拟合值与文献试验值之间的相关系数均大于0.7, 其中普通混凝土和单掺矿渣混凝土的拟合相关系数在0.85以上, 表明本文建立的模型可以很好地用于预测各类别混凝土的氯离子电通量, 证明了该计算模型具有更加广泛的适用性。

3 基于钢筋腐蚀诱导期的混凝土结构服役寿命分析

混凝土中氯离子扩散过程复杂, Maage等^[35]基于Fick第二定律, 通过工程试验发现氯离子扩散系数与时间的相关性, Tang等^[37]考虑了时间、空间、温度和浆体孔隙率等对扩散过程的影响, 对

混凝土中氯离子扩散模型进行了修正,余红发等^[38]考虑氯离子结合效应、扩散系数的时间依赖性和内部结构的微缺陷,建立了氯离子扩散的多因素模型,从材料细观层面揭示了氯离子在混凝土中扩散的影响因素和作用机理。

为了便于工程实践,混凝土结构耐久性检

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(x / \sqrt{\frac{4Dt_0^m}{(1-m)} [(t+t_0)^{1-m} - (t_0)^{1-m}]} \right) \right] \quad (13)$$

式中: $C(x,t)$ 为在 t 时刻距混凝土表面 x 深处的氯离子浓度(氯离子占混凝土的质量百分比, %); C_0 为氯离子初始浓度(%); C_s 为氯离子表面浓度(%); $\operatorname{erf}()$ 为误差函数; m 为龄期衰减系数; t_0 为结构暴露于氯盐环境的初始龄期。

$$T = \sqrt[1-m]{(1-m)d^2 / \left\{ 4Dt_0^m \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_{cr}}{C_s - C_0} \right) \right]^2 \right\}} + t_0^{1-m} - t_0 \quad (14)$$

式中: d 为钢筋的保护层厚度(mm)。

由于混凝土的腐蚀诱导期 T 占整个混凝土结构服役寿命的大部分,所以可以通过计算 T 的大小来评估混凝土抗氯离子扩散性能和结构的耐久性。

文献[11, 16, 34]通过研究表明混凝土6 h 电通量与扩散系数间存在线性关系:

$$D = \alpha Q + \beta \quad (15)$$

式中: Q 为标准养护28 d混凝土ASTMC1202法测得的电通量; D 为扩散系数($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)。但不同文献中拟合得到的系数 α 和 β 并不相同(表3)。

表3 系数 α 和 β 的取值

文献	混凝土类别	α	β
11	单掺矿渣	0.000 120	0.577 42
	复掺矿渣粉煤灰	0.000 550	0.243 20
		0.000 530	0.249 90
16		0.004 000	3.418 40
34		0.000 492	0.257 77

设计多组配合比,混凝土的水胶比(或水灰比)为0.35和0.40,分别为普通混凝土、单掺15%和30%粉煤灰(FA)、单掺15%和30%矿渣(SG)、复掺15%粉煤灰和15%矿渣。混凝土初始氯离子浓度 C_0 为0%,表面氯离子浓度 C_s 为1.8%,临界氯离子浓度为0.1%,钢筋的保护层厚度为70 mm,衰减系数 $m=0.2$,初始龄期为 $t_0=28 \text{ d}$ 。使用本文建

测和设计时,通常是现场取样或室内加速试验数据拟合得到氯离子扩散系数及其龄期衰减系数,据此可以综合反映混凝土的材性变化、结构损伤、氯离子结合效应等因素对混凝土中氯离子扩散过程的影响。文献[36]据此提出了氯离子扩散和浓度分布的时变解析解:

随着混凝土暴露于氯盐环境的时间增长,钢筋周围的氯离子浓度逐渐增大,达到钢筋钝化膜破坏的临界浓度 C_{cr} 时,暴露时间 T 称为混凝土结构的腐蚀诱导期。根据式(13)可得:

立的电通量多因素模型式(12)和式(15)可以预测各配合比混凝土的扩散系数,当取 $\alpha=0.000 492$, $\beta=0.257 765$ 时,计算结果见表4所示。

表4 28 d龄期混凝土氯离子扩散系数预测值

混凝土类别	D 预测值/($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)	
	$W/B=0.35$	$W/B=0.40$
普通混凝土	1.29	1.55
单掺15%FA	0.92	1.13
单掺30%FA	0.89	1.07
单掺15%SG	0.84	0.96
单掺30%SG	0.75	0.83
复掺15%FA+15%SG	0.74	0.78

使用式(14)计算不同类别混凝土结构基于钢筋腐蚀诱导期的服役寿命,计算结果见图7。由图7可以看出降低混凝土的水胶比可以显著提高混凝土的耐久性;掺加掺合料混凝土结构的服役寿命是普通混凝土的1.5~2倍,因而掺加掺合料的高性能混凝土能够显著提高混凝土的抗氯离子渗透性能;单掺矿渣混凝土结构的服役寿命明显高于单掺粉煤灰的混凝土,说明掺加矿渣对混凝土耐久性的改善要强于掺加粉煤灰,这与矿渣中含有氧化钙、自身具有水硬性有关,而且随着掺合料掺量的增加,混凝土的服役寿命均有明显提高;同时,复掺15%粉煤灰和15%矿渣混凝土结构的服役寿命均高于单掺30%粉煤灰混凝土和单掺30%矿渣

混凝土,说明复合掺加粉煤灰和矿渣有利于改善混凝土的内部孔结构,因此,在一定范围内复掺

粉煤灰和矿渣既能保证混凝土的耐久性要求,又具有一定的经济性。

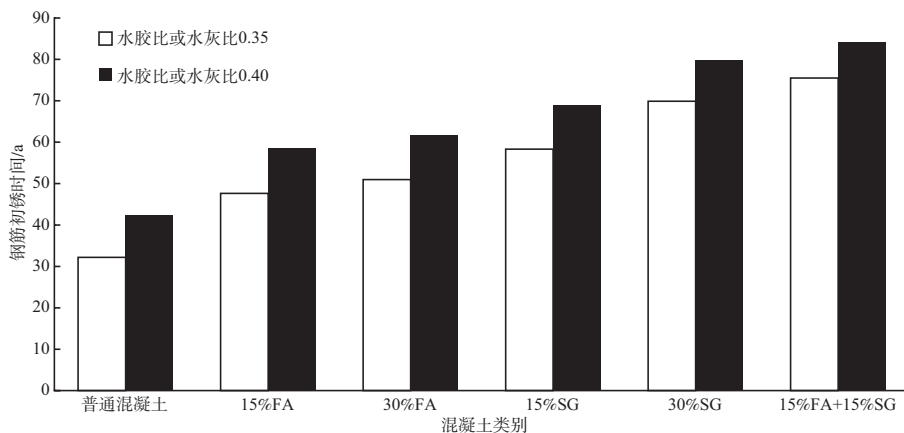


图7 不同水胶比和类别的混凝土中钢筋初锈时间

4 结论

根据试验数据和文献数据分析了水胶比(水灰比)、粉煤灰掺量、矿渣掺量、硅灰掺量与混凝土电通量的线性关系,在此基础上建立了混凝土耐久性分析的多因素计算模型,通过试验和数据分析验证了该计算模型的适用性和正确性,说明该模型可用于实际工程中混凝土的耐久性分析和预测。

依据本文建立的混凝土耐久性分析的多因素模型,计算不同配合比混凝土的电通量和氯离子扩散系数,分析了混凝土水胶比、掺合料组合及其掺量对氯盐环境下混凝土结构服役寿命的影响,结果表明,降低混凝土的水胶比或增加矿物掺合料都会提高混凝土结构的耐久性;单掺矿渣混凝土结构的耐久性优于单掺粉煤灰的混凝土;复合掺加粉煤灰和矿渣,能够更大幅度提升混凝土的耐久性。

参考文献:

- [1] Chalee W, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater[J]. Marine Structures, 2009, 22: 341-353.
- [2] 李志国. 试论盐溶液对混凝土及钢筋混凝土的破坏[J]. 混凝土, 1995(2): 10-14.
- [3] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社, 1999: 73-85.

- [4] Aitcin P C. The durability characteristics of high performance concrete: a review[J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25: 409-420.
- [5] Soleymanih R, Ismailm E. Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of laboratory OPC and HPC concrete specimens [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34: 2 037-2 044.
- [6] Kayali O, Zhu B. Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27: 117-124.
- [7] Gowripalan N, Mohamed H M. Chloride-ion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(8): 1 119-1 131.
- [8] ASTM C1202: 622-630. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration[S].
- [9] JTJ 275—2000 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S].
- [10] 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: 73-78.
- [11] 盛黎,姚谏. 高性能混凝土氯离子渗透性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41 (11): 142-145, 149.
- [12] 王彩文. 粉煤灰掺量对混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(7): 64-68.
- [13] 黎鹏平, 苏达根, 王胜年,等. 掺合料对胶凝材料水化热及混凝土氯离子扩散系数的影响[J]. 水运工程, 2009 (11): 6-10, 64.

- [14] 赵尚传. 钢筋混凝土结构基于可靠度的耐久性评估与试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2001: 90-98.
- [15] Byung Hwan Oh, Soo Won Cha, Bong Seok Jang. Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 212: 221-231.
- [16] 冯仲伟, 谢永江, 朱长华, 等. 混凝土电通量和氯离子扩散系数的若干问题研究[J]. 混凝土, 2007(10): 7-11.
- [17] 蒋林华. 试验方法对混凝土抗氯离子渗透扩散性的影响[J]. 混凝土, 2011(11): 8-11.
- [18] Omar S, Baghabra Al-Amoudi, Walid A Al-Kutti, et al. Correlation between compressive strength and certain durability indices of plain and blended cement concretes [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31: 672-676.
- [19] 冯乃谦, 邢峰. 高性能混凝土的氯离子渗透性和导电量[J]. 混凝土, 2001(11): 3-7.
- [20] Chung Chul-Woo, Shon Chang-Seon, Kim Young-Su. Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24: 1 739-1 745.
- [21] 唐旭光, 谢友均. 矿物掺合料对混凝土抗氯离子渗透性能影响的试验研究[J]. 湘潭师范学院学报:自然科学版, 2005, 25(2): 5-8.
- [22] 郭亮, 冷平, 李家和. 矿物掺合料对混凝土电通量的影响[J]. 低温建筑技术, 2011(1): 22-23.
- [23] 罗季英, 冷发光, 冯乃谦, 等. 粉煤灰掺量对高性能混凝土强度和耐久性的影响[J]. 水泥与混凝土, 2001(3): 15-18.
- [24] 谷坤鹏, 李漠, 时蓓玲, 等. 矿物掺合料改善混凝土抗氯离子渗透性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2008(11): 18-21.
- [25] 胡红梅. 矿物功能材料对混凝土氯离子渗透性影响的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2002: 44-48.
- [26] 孟振亚, 刘加平, 刘建忠, 等. 矿物掺合料的掺入对混凝土抗氯离子渗透性能影响的评价与研究[J]. 混凝土, 2010(11): 28-33.
- [27] 叶建雄, 李晓笋, 廖佳庆, 等. 矿物掺合料对混凝土氯离子渗透扩散性研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(3): 89-92.
- [28] 施惠生, 王琼. 掺复合胶凝材料混凝土的抗氯离子侵蚀性能[J]. 同济大学学报, 2004, 32(4): 490-493.
- [29] 罗碧丹, 刘文利, 范志宏. 矿物掺合料对混凝土性能的影响研究[J]. 华南港工, 2007(4): 12-18.
- [30] JGJ 55—2011 混凝土配合比设计规程[S].
- [31] 梁蜜达. 矿物掺和料对混凝土抗氯离子渗透性能的研究[J]. 福建建材, 2010(5): 16-17, 27.
- [32] Lounis Z, Amleh L. Reliability-based prediction of chloride ingress and reinforcement corrosion of aging concrete bridge decks[C]. Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures, 2004: 113-122.
- [33] Karimi A, Ramachandran K, Buenfeld N R. Probabilistic analysis of reinforcement corrosion with spatial variability[C]. Safety and Reliability of Engineering Systems and Structures, 2005: 679-685.
- [34] 冯乃谦, 邢峰. 高性能混凝土技术[M]. 上海: 原子能出版社, 2000: 258-261.
- [35] Maage M, Helland S, Poulsen E, et al. Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment[J]. ACI Materials Journal, 1996: 602-608.
- [36] 杨绿峰, 李冉. 混凝土中氯离子二维扩散规律的解析研究[J]. 水利水电科技进展, 2009(3): 20-23.
- [37] Tang L, Nilsson L O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars [J]. Cement and Concrete Research, 1993(2): 247-253.
- [38] 余红发, 孙伟. 混凝土氯离子扩散理论模型[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2006(S1): 69-76.

(本文编辑 武亚庆)