

氯盐环境下粉煤灰对混凝土中钢筋的损伤度影响测试*

Test of Influence of Fly Ash on Damage Degree of Reinforcing Bar in Concrete under Chlorinated Salt Environment

李 钟¹, 邹 挺²

(1. 东南沿海铁路福建有限责任公司, 福建 福州 350011;
2. 中铁电气化局集团有限公司, 北京 100036)

摘 要: 为分析氯盐环境下混凝土中粉煤灰掺入后, 混凝土中钢筋的损伤程度, 以 P52.5 级的硅酸盐水泥、HRB400 级钢筋和 I 级粉煤灰为主材料, 制备 0、30% 和 40% 三种粉煤灰掺量的钢筋混凝土试样, 即试样 A、试样 B 和试样 C, 通过孔隙率试验和加载试验, 测试三个试样的孔隙率变化; 并且采用氯离子扩散传输模型和有限元模型计算损伤程度以及钢筋的锈蚀程度。试验结果显示: 距离表面深度为 1 cm 时, 三个试样的氯离子浓度分布最高, 分别为 0.47%、0.31%、0.26%; 距离表面深度为 1 cm 时, 三者的氯离子扩散系数结果分别为 1.35×10^{-12} 、 0.42×10^{-12} 、 0.39×10^{-12} , 氯化钠溶液浓度达到 20% 时, 三个试样的孔隙率结果分别为 9.6%、6.4% 和 5.8%; 服役时间为 10 年时, 三个试样的受压承载力结果分别下降至 5650 kN、8465 kN 和 8620 kN 左右, 试样 C 的承担荷载比率结果最佳, 钢筋和混凝土的承担荷载比率结果分别为 19.6% 和 86.4%, 粉煤灰掺量越高钢筋的损伤程度越小。

关键词: 氯盐环境; 粉煤灰; 混凝土; 钢筋损伤度; 孔隙率; 锈蚀程度

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 06-0081-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.013

LI Zhong, ZOU Ting

(1. Southeast Coastal Railway Fujian Co., Ltd., Fuzhou 350011, China;

2. China Railway Electrification Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: For analysis of chlorine salt environment after the incorporation of fly ash in concrete, the damage degree of reinforcement in concrete, with levels P52.5 silicate cement, HRB400 steel and I grade fly ash as the main material, the preparation of 0, 30% and 40%, three kinds of reinforced concrete specimens, the dosage of fly ash or sample A and sample B and C samples, through the porosity test and load test, The porosity changes of the three samples were tested. The damage degree and corrosion degree of steel bar are calculated by using chloride ion diffusion and finite element model. The results show that when the depth from the surface is 1 cm, the chloride ion concentration distribution of the three samples is the highest, which are 0.47%, 0.31% and 0.26%, respectively. When the depth from the surface is 1 cm, the results of chloride ion diffusion coefficient of the three samples are $1.35 \times$

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (项目编号: 23874258)。

作者简介: 李钟 (1983—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 土木工程。

收稿日期: 2023-06-09

材料科学

10^{-12} , 0.42×10^{-12} and 0.39×10^{-12} , respectively. When the concentration of sodium chloride solution reaches 20%, the results of porosity of the three samples are 9.6%, 6.4% and 5.8%, respectively. When the service time is 10 years, the compressive bearing capacity of the three samples decreases to about 5650 kN, 8465 kN and 8620 kN respectively. The load bearing ratio of sample C is the best, and the load bearing ratio of steel bar and concrete is 19.6% and 86.4% respectively. The higher the fly ash content, the less the damage degree of steel bar is.

Keywords: chlorine salt environment; fly ash; concrete; reinforcement damage degree; porosity; the degree of corrosion

0 引言

钢筋混凝土是房屋、桥梁、大坝等各类建筑工程的重要组成部分,因此,其使用性能和寿命直接影响整个建筑的安全^[1]。当下,我国存在诸多处于氯盐环境中的混凝土建筑,该环境指的是长期处于海洋、盐湖以及盐渍土等侵蚀环境^[2],该环境中存在大量的氯离子,会引起混凝土中钢筋发生锈蚀,混凝土长期处于这类环境中^[3],会发生氯离子侵蚀,降低混凝土的密实度,影响混凝土结构的整体安全性。因此,在混凝土工程中掺入粉煤灰,增加混凝土的密实度,以此提升混凝土的使用性能^[4],成为一种普遍应用的方式。粉煤灰是一种微小的灰粒,将其掺入混凝土中,对于提升混凝土的性能具有显著效果。

高延红等^[5]和安强等^[6]分析粉煤灰掺量对混凝土氯离子扩散性和混凝土微观结构的影响,但对于氯盐环境下的影响情况仍需进一步验证。基于此,本文通过试样的制备以及有限元软件的分析,对钢筋的损伤情况进行测试和计算,分析氯盐环境下,不同粉煤灰掺量的混凝土中钢筋损伤情况。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料和试样制备

1.1.1 试验材料

采用山东正途钢材有限公司生产的 HRB400 级钢筋;由济南鑫资源化工有限公司生产的硅酸盐水泥,其型号为 P52.5;选择灵寿县科嘉矿产品有限公司生产的粗细两种骨料,两者分别采用中砂和石灰岩,前者细度模数为 2.4,后者为 5~16 mm 连续级;同时,也选择该公式生产的粉煤灰,其

等级为 I 级。水泥和粉煤灰的化学成分详情见表 1。

表 1 材料的化学成分
Table 1 Chemical composition of the material /wt%

化学成分	材料名称	
	水泥	粉煤灰
氧化钙	60.85	38.11
氧化镁	1.91	8.28
氧化铁	2.81	0.96
氧化铝	4.49	15.11
二氧化硅	20.51	32.11
三氧化硫	2.31	0.13
氧化钾	0.6	0.35
氧化钠	0.16	0.49

1.1.2 钢筋混凝土试样制备

采用上述材料制备钢筋混凝土试样,试样为 1.2 m×1.2 m×2 m 的长方体柱形,钢筋的布置位置见图 1;在制备过程中,制备 3 种粉煤灰含量的钢筋混凝土试样,分别为 0、30%、40%,混凝土的详细配合比用表 2 描述。试样的制备和养护需满足国家 DL-T5150-2001 《水工混凝土实验规程》的相关标准^[7]。

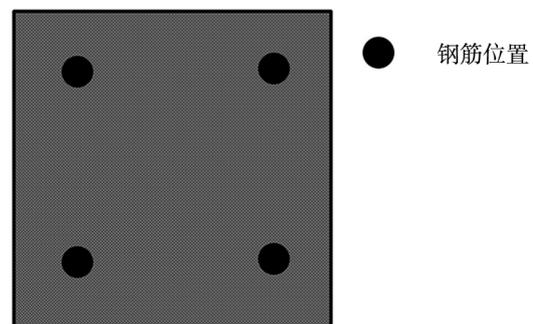


图 1 钢筋的布置位置
Fig. 1 Placement of steel bars

表 2 混凝土的配合比
Table 2 Relationship between excavation depth and deformation of supporting structure

配合比	试样		
	A	B	C
水泥/(kg/m ³)	440	308	264
粉煤灰/(kg/m ³)	0	132	176
细骨料/(kg/m ³)	720	720	720
粗骨料/(kg/m ³)	1080	1080	1080
水/(kg/m ³)	155	155	155
减水剂/(kg/m ³)	4.5	4.5	4.5

试样成型后和模具一起进行养护^[8], 持续时间为 24 h, 养护后拆除模具; 同时设定养护箱的温度为 20 ℃, 并将试样放入水箱中进行养护, 持续时间为 28 d, 完成试样制备, 取出后备用。

1.2 孔隙率试验

以 ASTM C642-06 的规定标准为依据, 进行水泥砂浆孔隙率试验, 试验在下述两种溶液组中完成:

(1) 试样饱和度 0 的盐溶液组:

步骤 1: 对试样实行加速养护, 持续时间为 5 d, 取出后称量并记录试样质量, 用 M_1 表示;

步骤 2: 设定真空干燥箱的温度, 使其保持在 100~110 ℃ 之间, 将试样置于箱内进行干燥处理, 持续时间为 5 d; 当试样质量不再变化后, 取出试样置于常温环境中冷却^[9], 进行第二次质量称量并完成记录, 用 M_2 表示。

步骤 3: 完成记录后将试样置于真空饱水机中进行饱盐处理, 持续时间为 24 h; 饱盐结束后, 将取出的试样置于盐溶液中^[10], 对试样进行时间为 7 d 浸泡处理。

步骤 4: 浸泡完成后, 将试样取出后并对其进行处理, 保证其表面干燥, 获取试样当下的质量^[11], 用 M_5 表示; 记录完成后重新进行烘干处理, 持续时间为 5 d, 当试样质量不再变化后, 称量此刻试样的质量, 用 M_6 表示;

步骤 5: 记录完成后, 将试样置于蒸馏水^[12], 对其浸泡, 持续时间为 5 d; 浸泡完成后, 将试样取出后并对其处理, 保证其表面干燥, 获取试样当下的质量, 用 M_7 表示。

(2) 试样饱和度 50% 的盐溶液组:

步骤 1: 该步骤与 (1) 中内容相同, 记录 M_1

的结果。

步骤 2: 将试样进行吸水处理直至饱和, 试样质量不再变化后^[13], 计算此时试样的吸水量 Δm ; 设定真空干燥箱的温度在 100~110 ℃ 之间, 将计算完成后的置于箱内, 完成试样干燥处理当。

步骤 3: 当试样的质量减少 $\Delta m/2$ 时, 将试样取出后称量并记录当下质量后; 将试样置于真空饱和盐溶液中进行浸泡处理, 持续时间为 7 d, 将试样取出后并对其进行处理, 保证其表面干燥, 获取试样当下的质量。

步骤 4: 将试样置于干燥箱中实行烘干处理, 持续时间为 5 d, 干燥处理后试样质量没有变化后, 称量和记录其当下质量。

步骤 5: 记录完成后, 将试样置于蒸馏水, 对其实行浸泡, 持续时间为 5 d; 浸泡完成后, 将试样取出后并对其进行处理, 保证其表面干燥, 获取试样当下的质量。

试样的孔隙率计算公式为:

$$V_o = \frac{M_5 - M_2}{M_2} \quad (1)$$

$$V_{Salt} = \frac{M_7 - M_6}{M_2} \quad (2)$$

$$V' = V_{Salt} - V_o \quad (3)$$

式中: V_o 和 V_{Salt} 均表示孔隙率, 前者对应原始试样, 后者对应盐溶液浸泡后; 孔隙率的变化值用 V' 表示。采用自然浸泡法将试件置于不同浓度的盐溶液中, 实行浸泡处理, 持续时间为 28 d; 将其去除后, 通过切片、磨粉以及浸泡等处理方式, 完成目标测量。

1.3 计算方法

1.3.1 氯离子扩散传输模型

在氯盐环境下, 混凝土的内部和外部存在两种离子, 分别为钙离子和氯离子, 两种离子分别由内而外、由外向内的进行渗透和传播^[14], 会导致混凝土孔隙率的扩大, 并且形成氯化钙, 该成分会提升钙的溶解速度。为了描述上述两种离子的传输和渗透过程, 构建钙离子扩散方程, 其依据质量守恒和 Fick 两个定律完成, 其公式为:

材料科学

$$\begin{cases} \frac{\partial (C_{ca} + C_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{ca} \frac{\partial C_{ca}}{\partial r} \right) + D_{ca} \frac{1}{r} \frac{\partial C_{ca}}{\partial r} \\ \text{InitialCond: } C_{ca} |_{t=0} = \varphi C_{satu} \\ \text{BoundCond: } D_0 \frac{\partial C_{ca}}{\partial r} = \varphi k (C_{ca} - C_{cao}) |_r \end{cases} \quad (4)$$

式中： φ 表示混凝土孔隙率； C_{ca} 和 C_s 均表示浓度，前者对应钙离子，后者对应固相钙； t 表示溶蚀时间； r 表示位置坐标，对应试样截面； D_{ca} 和 D_0 均表示钙离子扩散系数，前者对应混凝土，后者对应水； k 表示传输速度，对应试样表面钙离子； C_{cao} 和 C_{satu} 均表示浓度，前者对应环境水中的钙离子，后者对应混凝土中的钙离子。

在浓度梯度的作用下，依据 Fick 定律构建混凝土内部氯离子的渗透方程，其公式为：

$$\begin{cases} \frac{\partial C_{cl}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{cl} \frac{\partial C_{cl}}{\partial r} \right) + D_{cl} \frac{1}{r} \frac{\partial C_{cl}}{\partial r} \\ \text{InitialCond: } C_{cl}(r, t = 0) = 0 \\ \text{BoundCond: } C_{cl}(r = R, t \neq 0) = C_{c0} \end{cases} \quad (5)$$

式中： C_{cl} 和 C_{c0} 均表示氯离子含量，前者属于混凝土孔溶液，后者属于环境水中； t 表示试样在环境水中的浸泡时间。

试样的 φ 会在钙溶蚀过程中增加，以此可促进钙溶蚀的速度以及氯离子的扩散速率，因此，可采用该溶蚀时的试样 φ 描述钙和氯两种离子的传输。依据固相钙在溶解过程中发生的流式量和 φ 之间的关联，得出试样 φ 在钙溶蚀过程中的变化方程：

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{M_{C_s}}{\rho_{C_s}} (C_{s0} - C_s) \quad (6)$$

式中：试样的初始孔隙率用 φ_0 表示； $\frac{M_{C_s}}{\rho_{C_s}}$ 表示摩尔体积，对应试样中固相钙；试样在溶蚀前、后固相钙的含量分别用 C_{s0} 和 C_s 表示。

结合公式 (4) ~ (6) 构成试样中钙、氯两种离子的扩散传输方程，采用差分法对其实行求解后，可得出试样在氯盐环境下，钙、氯两种离子的时空分布规律，基于此，可计算得出该环境下，试样的损伤程度以及钢筋的锈蚀程度。

1.3.2 有限元模型

本文以混凝土长方体柱形为研究对象，通过 Opensees 有限元分析，研究氯盐侵蚀条件下混凝土柱中钢筋的侵蚀损伤过程。钢筋选用弹性的 Beam Column 单元，混凝土及砌体选用 Elastic Beam Column 单元，混凝土和钢筋单元长度分别取 200 mm 和 100 mm。混凝土强度等级为 c30，混凝土抗压强度为 29.4 MPa，弹性模量为 33.7 GPa，混凝土保护层厚度取为 25 mm，纵筋采用 HRB 400，屈服强度为 400 MPa，钢筋弹性模量为 200 GPa，环境参数中的离子浓度参照实际海洋环境，氯离子浓度取为 422.53 mol/m³，以此构建有限元模型。

基于侵蚀后混凝土长方体柱形的受力特点，作以下基本假定：

(1) 侵蚀过程中，混凝土试样截面仍符合平截面假定；(2) 柱截面网格中，各纤维内离子浓度、损伤程度、应力及应变等参数分布均匀；(3) 忽略锈蚀膨胀引起的钢筋—混凝土相互作用；(4) 柱截面中混凝土纤维失效时的损伤程度为 95%。采用有限元模型模拟试样中钢筋在氯盐环境下发生的侵蚀损伤情况，在模拟过程中，试样的截面可采用尺寸相同的纤维划分方式完成^[15]，划分的各个纤维内，离子浓度、损伤程度、应力应变等均呈现均匀分布状态；并且，在纤维失效时，钢筋的损伤程度为 95%。

根据上述柱截面所划分的混凝土和钢筋纤维，利用所建立的氯离子扩散传输模型，定义柱截面混凝土纤维性能，试样的损伤程度以及钢筋的锈蚀程度根据公式 (4) ~ (6) 确定，而柱截面中的钢筋纤维性能，由于氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀从表及里，钢筋内部未出现损伤。因此，锈蚀过程中，混凝土柱截面中钢筋纤维的力学性能不变，但其有效面积减小。按照基本假定 (4)，混凝土柱的轴压、受弯及抗震等力学性能的退化规律主要与柱截面混凝土纤维的损伤程度和钢筋纤维的有效面积有关。

对试样进行网格划分，沿试样截面的宽度和高度方向进行分割处理，形成等边长的正方形纤

维网格；试样截面则被离散成若干个混凝土纤维合格钢筋纤维，试样的网格划分结果用图 2 描述。

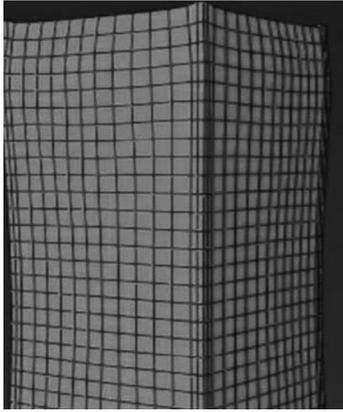


图 2 试样的网格划分结果
Fig. 2 Meshing results of samples

2 数值模拟结果分析

通过有限元模型获取试样在侵蚀过程中的轴向受压性能，结果用表 3 描述；同时获取试样在不同的服役时间下，三个试样中，钢筋和混凝土的承担荷载比率，结果如表 3 所示。

表 3 试样轴向受压能力结果

Table 3 Results of axial compression capacity of specimens /kN

服役时间/年	试样		
	A	B	C
1	16550	18055	19035
2	15890	17440	18256
3	12445	16862	17474
4	11050	15870	16650
5	9664	14864	15545
6	8996	13379	14242
7	8054	12274	13010
8	7228	11060	11998
9	6656	9886	10064
10	5650	8465	8620

表 4 钢筋和混凝土的承担荷载比率

Table 4 Load-bearing ratios of steel and concrete /%

服役时间/年	承担荷载比率					
	钢筋			混凝土		
	A	B	C	A	B	C
1	5.8	7.8	8.1	94.6	96.7	98.4
2	6.4	8.5	8.9	93.4	94.8	97.7
3	6.9	9.4	10.2	91.7	92.6	95.5
4	7.5	10.9	12.4	88.5	90.9	93.8
5	8.7	12.2	13.9	85.4	88.6	92.7
6	9.6	14.4	15.2	83.9	86.6	91.6
7	10.8	15.7	16.7	81.7	85.5	90.4
8	11.4	16.6	17.3	79.4	84.6	88.7
9	11.8	17.3	18.1	77.2	82.7	87.3
10	12.2	18.6	19.6	75.7	80.7	86.4

分析表 3 和表 4 的试验结果得出：随着服役时间的逐渐增加，3 个试样的受压承载力均发生逐渐下降趋势，其中，试样 A 的下降趋势显著，当服役时间为 10 年时，其受压承载力结果下降至 5650 kN 左右，试样 B 和试样 C 的受压承载力结果下降至 8465 kN 和 8620 kN 左右；并且，在不同的服役时间下，三个试样的钢筋和混凝土承担荷载比率结果存在明显差异，但是，其变化趋势一致，服役时间越长，钢筋的承担荷载比率呈现逐渐上升的变化趋势，混凝土则呈现逐渐下降趋势，是由于试样在受到氯盐环境侵蚀后，混凝土受到侵蚀后，性能逐渐下降；钢筋则发挥主要作用。服役时间为 10 年时，试样 C 的承担荷载比率结果最佳，钢筋和混凝土的承担荷载比率结果分别为 19.6% 和 86.4%；试样 A 的承担荷载比率结果最差，钢筋和混凝土的承担荷载比率结果分别为 12.2% 和 75.7%。因此，混凝土中掺入粉煤灰能够提升钢筋在氯盐环境下的耐锈蚀能力。

3 试验结果分析

3.1 试样中氯离子扩散性能分析

获取在试样横向方向，在距离表面不同深度下，氯离子的浓度分布情况，结果用图 3 描述；同时获取不同粉煤灰掺量和混凝土氯离子扩散系数之间的关联，结果用图 3 描述。

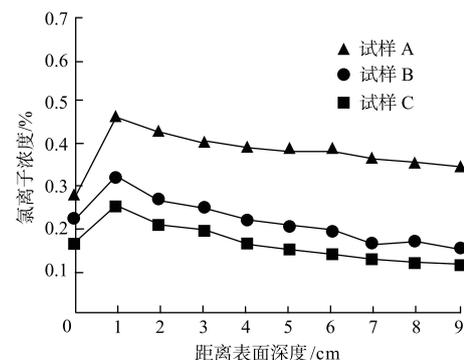


图 3 氯离子的浓度分布情况

Fig. 3 Distribution of chloride ion concentration

分析图 3 的试验结果得出：三个试样在距离表面不同深度下，氯离子浓度的分布情况也存在差异，在距离表面深度为 1 cm 时，三个试样的氯离子浓度的分布分别为 0.47%、0.31%、

材料科学

0.26%；此时浓度分布值为最高；随着深度的逐渐增加，三个试样的氯离子浓度逐渐下降，其中，试样 B 和试样 C 之间的结果差距较小；该结果表明，将粉煤灰掺入钢筋混凝土中后，掺量越高，对混凝土性能的提升越佳，氯离子的渗透速度越慢。

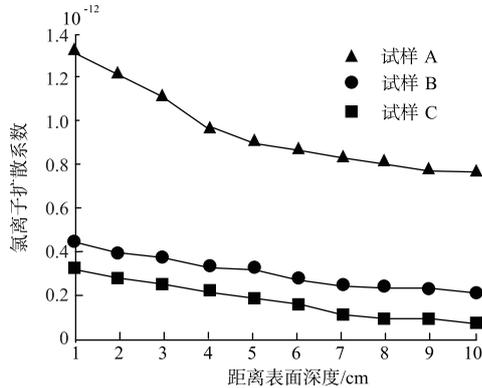


图 4 氯离子扩散系数的变化结果
Fig. 4 Variation of diffusion coefficient of chloride ion

分析图 4 的试验结果得出：在距离表面深度相同时，试样 A 的氯离子扩散系数结果，显著高于试样 B 和试样 C 氯离子扩散系数结果，在深度为 1 cm 时，三者的结果分别为 1.35×10^{-12} 、 0.42×10^{-12} 、 0.39×10^{-12} 。该试验结果进一步验证粉煤灰能够有效提升混凝土的抗氯离子侵蚀能力。

3.2 孔隙率变化结果分析

混凝土的密实程度会受到孔隙率的直接影响，孔隙率越大，氯离子的扩散性能越差。获取三个试样在经过不同浓度的氯化钠溶液浸泡后，孔隙率的变化结果，如图 5 所示。

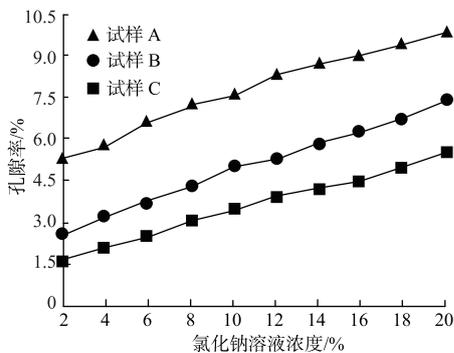


图 5 孔隙率的变化结果
Fig. 5 Changes of porosity

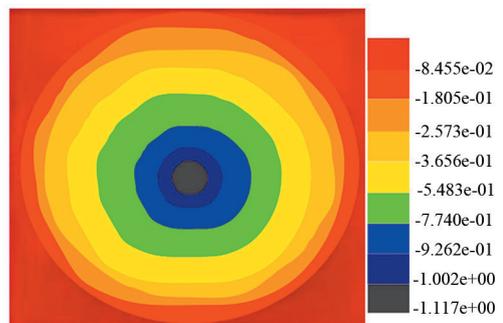
分析图 5 的试验结果得出：随着氯化钠溶液浓度的逐渐增加，三个试样的孔隙率变化结果均呈现逐渐上升趋势，其中试样 A 的整体孔隙率结果最高，表示其混凝土的密实度最低；试样 C 的整体孔隙率结果最低；当氯化钠溶液浓度达到 20% 时，三个试样的孔隙率结果分别为 9.6%、6.4% 和 5.8%。该结果表明：在试样中掺入混凝土后，会增加混凝土的密实性，掺量越高，密实性越佳。当混凝土密实性较高时，氯离子的渗透速度会降低，能够延缓氯离子侵蚀程度，延缓钢筋的损伤。

3.3 损伤程度分析

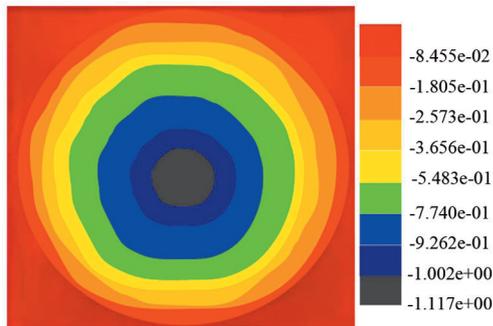
通过有限元模型获取 3 个试样中钢筋在相同的模拟的氯盐环境下，服役时间为 10 年时，三个试样中钢筋的锈蚀损伤程度，结果如图 6 所示。



(a) 试样 A 的锈蚀损伤程度



(b) 试样 B 的锈蚀损伤程度



(c) 试样 C 的锈蚀损伤程度

图 6 锈蚀损伤程度的有限元结果

Fig. 6 Finite element results of corrosion damage degree

分析图 6 的试验结果得出：三个试样在相同的氯盐环境下，试样中钢筋的损失程度存在一定差异，其中试样 A 的损伤明显，试样 B 和试样 C 的损伤明显小于试样 A；且两者的差异不大。该结果直观体现粉煤灰掺入混凝土中后，混凝土中的钢筋损伤程度会降低，延长钢筋的使用寿命。

3.4 对比实验

为验证上述数值模拟分析结果的正确性，将数值模拟结果与实际工程测量的实测数据进行比较，服役时间均为 1 年，模拟值及实测值具体对比结果如表 5 所示。

表 5 锈蚀混凝土中钢筋模拟值与试验值对比
Table 5 Comparison between simulated and test values of steel bars in corroded concrete

试样	轴向受压能力/kN			承担荷载比率/%		
	实测值	模拟值	误差/%	实测值	模拟值	误差/%
A	16589	16550	0.24	5.9	5.8	1.69
B	18064	18055	0.05	7.9	7.8	1.27
C	19050	19035	0.08	8.2	8.1	1.22

分析表 5 可知，各试样轴向受压能力模拟值与实测值误差小于 0.25%，吻合较好。由于锈蚀的不均匀性及试验误差，试样 A 承担荷载比率模拟值与实测值误差较大，其余试样该误差均小于 1.28%，基本吻合。因此本文采用的有限元建模法能对锈蚀混凝土中钢筋损伤程度全过程进行有效模拟。

4 结论

目前诸多钢筋混凝土工程处于氯盐环境下，对于混凝土而言，其使用性能和寿命均面临较大挑战。因此，诸多工程中，均选择将粉煤灰掺入混凝土中，以此提升混凝土性能。本文针对粉煤灰对混凝土中钢筋的损伤程度影响，展开相关试

验和分析。分析结果显示：在混凝土中掺入粉煤灰后，能够显著提升混凝土的应能，同时能够延缓其内部氯离子的渗透速度，使混凝土的性能更佳、使用寿命得到延长。

参 考 文 献

- [1] 左晓宝, 邹帅, 李向南, 等. 氯盐环境下粉煤灰-混凝土中钢筋的锈蚀过程 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (4): 875-881.
- [2] 钟小平, 戴仁礼, 袁承斌, 等. 氯盐环境下钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变本构模型 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 788-793.
- [3] 刘云雁, 范颖芳, 喻建, 等. 氯盐环境下锈蚀预应力混凝土梁抗弯性能试验 [J]. 复合材料学报, 2020, 37 (3): 707-715.
- [4] 范志宏, 杨海成, 于方. 基于暴露试验的大掺量粉煤灰混凝土耐久性试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (8): 2622-2627+2649.
- [5] 高延红, 汪蒙, 周晓芸, 等. 粉煤灰掺量对混凝土氯离子扩散性能稳定时间的影响及机理 [J]. 自然灾害学报, 2020, 29 (6): 30-40.
- [6] 安强, 潘慧敏, 王帅, 等. 粉煤灰和矿渣粒度分布对混凝土微观结构和抗氯离子渗透性的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (3): 884-893.
- [7] 许骋昱, 左晓宝, 殷光吉. 氯盐-硫酸盐环境下钢筋混凝土柱抗震性能退化过程的数值模拟 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41 (2): 376-384+402.
- [8] 朱红兵, 吕洪林, 李秀, 等. 氯盐环境下聚丙烯纤维陶粒混凝土冻融损伤模型试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (7): 46-50.
- [9] 蒋科, 郭辉, 李洋, 等. 氯盐环境下混凝土冻融循环及孔结构演化研究 [J]. 人民长江, 2021, 52 (12): 162-167.
- [10] 孙祯, 郑建岚. 氯盐环境下再生混凝土框架边节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41 (4): 82-91.
- [11] 裴新意, 邓晓阳, 刘自妥, 等. 粉煤灰中铵含量对新拌混凝土性能影响研究 [J]. 混凝土, 2021 (9): 106-108+115.
- [12] 杨昊, 左晓宝, 李向南, 等. 溶蚀和氯盐侵蚀条件下钢筋混凝土柱抗震性能退化过程的数值模拟 [J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42 (6): 20-29.
- [13] 喻宣瑞, 姚国文, 范伟庆. 交变荷载和氯盐环境作用下钢筋绞线的腐蚀疲劳性能研究 [J]. 材料导报, 2021, 35 (20): 20087-20091.
- [14] 马倩敏, 郭荣鑫, 史天尧, 等. 表面干湿循环条件下氯盐在碱矿渣混凝土中的传输 [J]. 混凝土, 2021 (10): 14-16+22.
- [15] 黄可. 钢筋混凝土墩柱实际损伤状态预测技术仿真 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (7): 414-417+454.