

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.062

近海大气环境下 RC 结构钢筋锈蚀程度预测

郑山锁^{a,b}, 梁泽田^{a,b}, 杨松^{a,b}, 明铭^{a,b}, 韩超伟^{a,b}

(西安建筑科技大学 a. 土木工程学院; b. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 钢筋锈蚀是影响近海大气环境下 RC 结构使用寿命的重要因素之一。为研究近海大气环境下混凝土碳化与氯离子侵蚀双重作用对钢筋锈蚀的影响, 对沿海地区不同龄期钢筋混凝土结构进行了工程实测, 包括混凝土抗压强度、碳化深度、钢筋表面氯离子浓度及锈蚀深度。基于实测结果, 拟合得到了混凝土碳化深度与抗压强度间的关系模型, 建立了同时考虑混凝土碳化深度与钢筋表面氯离子浓度的钢筋锈蚀深度预测模型。在此基础上, 利用 Abaqus 分析软件对不同龄期、轴压比的 RC 框架柱进行了损伤塑性分析, 得到了锈蚀 RC 框架柱抗震性能随服役龄期与轴压比的变化规律。

关键词: RC 结构; 钢筋锈蚀模型; 损伤塑性分析; 混凝土碳化; 氯离子腐蚀

中图分类号: TU375; TU503

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)02-022-10

Corrosion prediction of reinforced concrete structure in marine atmospheres

ZHENG Shansuo^{a,b}, LIANG Zetian^{a,b}, YANG Song^{a,b}, MING Ming^{a,b}, HAN Chaowei^{a,b}

(a. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology; b. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: Reinforcement corrosion is an important factor influencing the service life of reinforced concrete structures in offshore atmospheric environment. To study the effects of concrete carbonation and chloride corrosion on reinforcement corrosion in offshore atmospheres, an engineering measurement of reinforced concrete structures with varying ages was conducted. This assessment included measurements of compressive strength, carbonation depth of concrete, surface chloride concentration, and corrosion depth of steel. Utilizing the obtained measurements and prior research findings, a relationship model between concrete carbonation depth and compressive strength was developed. Additionally, a prediction model for reinforcement corrosion depth was established, taking into account both concrete carbonation depth and the surface chloride concentration of reinforcement. Building upon these models, a damage plastic analysis of reinforced concrete frame columns with

收稿日期: 2021-11-06 网络出版日期: 2022-02-16

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1509302); 陕西省重点研发计划资助项目(2021ZDLSF06-10); 西安市科技计划资助项目(2019113813CXSF016SF026)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFC1509302), Shaanxi Province Key R&D Program Project (2021ZDLSF06-10), and Xi'an Science and Technology Plan Project (2019113813CXSF016SF026).

作者简介: 郑山锁(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震研究, (E-mail) zhengshansuo@263.net。

通信作者: 梁泽田(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事工程结构抗震研究。

different ages and axial compression ratios was performed using Abaqus analysis software, revealing the seismic performance variation of corroded reinforced concrete frame columns concerning service age and axial compression ratio.

Keywords: reinforced concrete structure; reinforcement corrosion model; damage plastic analysis; concrete carbonation; chloride corrosion

钢筋混凝土(reinforce concrete, RC)结构在设计使用年限内应具有足够的耐久性,能抵抗外界环境或自身缺陷所产生的侵蚀破坏能力。牛荻涛等^[1]研究表明,大多数 RC 结构未达到设计使用年限,因其内部钢筋发生锈蚀,结构抗力与耐久性退化,无法正常使用。对于近海大气环境下 RC 结构,由于长期受碳化与氯离子侵蚀双重作用,导致内部钢筋锈蚀进一步加剧,结构服役寿命相应缩短^[2]。因此,近海大气环境下 RC 结构钢筋锈蚀程度研究应受到重视。

针对混凝土碳化反应对氯离子侵蚀效应的影响,国内外学者开展了广泛研究。Tumidajski 等^[3]与 Chindaprasirt 等^[4]通过在腐蚀溶液中加入二氧化碳气体的方式,模拟碳化反应与氯离子侵蚀双重作用,分析了碳化反应对氯离子扩散速率的影响。Matsumura 等^[5]将碳化后的混凝土试件进行氯盐溶液喷淋试验,发现碳化反应对氯离子扩散系数的影响与温度有关。牛荻涛等^[1]采用盐溶液浸泡与快速碳化交替方式,研究了碳化作用对氯离子侵蚀效应的影响,认为碳化作用一方面改变了混凝土微观结构,加速氯离子的扩散进程,同时部分结合氯离子转化为自由氯离子,增加了混凝土内部氯离子浓度。但针对碳化与氯离子侵蚀双重作用下,RC 结构内部钢筋锈蚀规律研究,目前尚未见报道。

鉴于此,笔者基于近海大气环境下 RC 结构工程实测结果,建立了考虑混凝土碳化与氯离子侵蚀双重作用下钢筋锈蚀程度预测模型,分析了锈蚀 RC 框架柱抗震性能随服役龄期的退化规律,以为沿海地区 RC 结构耐久性研究提供科学依据。

1 近海大气环境下钢筋锈蚀机理

近海大气环境下,环境中氯离子在浓度梯度差的作用下逐渐扩散到混凝土内部。一部分由于化学结合与物理吸附作用,转化为结合氯离子^[6];另外一部分游离于混凝土孔隙溶液中,逐渐向内渗透并聚集于钢筋表面,当钢筋表面氯离子浓度达到一定阈值,钢筋表面钝化膜将在氧气、水分与氯离子的共同作用下受到破坏,钢筋开始发生锈蚀^[7]。

混凝土碳化反应是一个复杂的多相理化过程,大致可概括为^[8]:1)由于水泥水化反应,混凝土内部产生孔隙;2)大气中 CO₂ 通过孔隙向混凝土内部扩散并溶解于孔隙溶液;3)溶解 CO₂ 的孔隙溶液与水泥水化作用产物 Ca(OH)₂、CaSiO₃ 等发生碳化反应,生成 CaCO₃ 等产物,混凝土碳化产物改变了混凝土微观结构,同时降低了混凝土 pH 值,破坏了钢筋表面钝化膜。

研究表明,服役于近海大气环境下的 RC 结构,长期经受碳化与氯离子侵蚀的复合作用,混凝土内部钢筋锈蚀速率明显加快^[9]。一方面,碳化反应将混凝土内部单氯铝酸钙(化学结合氯离子产物)转化为自由氯离子,进而提高混凝土内部自由氯离子浓度;另一方面,碳化反应产生碳酸钙使混凝土体积增大,混凝土中的各孔隙被碳化产物堵塞,引起混凝土内部孔隙重分布,增大了有效孔径,增加了氯离子的扩散速率。

2 混凝土碳化深度对氯离子扩散影响

文中对服役于近海大气环境下的泉州与青岛地区共 54 例 RC 结构进行了工程实测,所测结构服役龄期范围为 10~51 a,实测内容包括:混凝土碳化深度、碳化深度处 pH 值、氯离子浓度(%)、混凝土裂缝宽度与钢筋锈蚀深度等参数,部分实测结果如表 1 所示。建立了混凝土抗压强度退化模型、混凝土碳化深度模型与钢筋锈蚀深度模型。

表1 在役RC结构实测结果
Table 1 Measurement results of RC structures in service

地区	工程名称	龄期/a	混凝土保护层厚度/mm	混凝土抗压强度		碳化深度/mm	碳化深度处pH值	氯离子浓度/%	顺筋裂缝宽度/mm	钢筋锈蚀深度/mm
				推定值	相对抗压强度					
泉州地区	新北区学生宿舍楼35#	10	23.3	33.4	1.051	5.31	10.3	0	0.102	0
	北区变电所	14	22.5	21.9	1.118	9.65	11.6	0.005	0	0
	泉清研究生楼	20	23.8	22.8	1.139	10.87	9.2	0.08	0.096	0
	高知楼南区31#	24	22.4	22.7	1.08	11.41	8.5	0.076	0.155	0.101
	华侨大学机械楼	32	24.5	24.8	1.13	17.08	8.9	0.176	0.159	0.103
	华侨大学会堂	34	23.7	25.6	1.111	12.01	10.9	0.251	0.176	0.111
	华侨大学图书馆	49	22.6	16.8	0.869	26.04	8.8	0.276	0.822	0.394
青岛地区	青岛建工学院职工住宅	18	22.7	31.8	1.119	7.76	12.9	0.006	0	0
	青岛建工学院浴室工程	29	24.0	20.8	1.102	12.87	11.2	0.173	0.369	0.2
	青岛理工大学7#楼	42	22.9	20.8	0.916	19.05	9.1	0.267	0.545	0.282
	青岛理工大学新建职工住宅	43	25.6	21.2	1.018	17.38	10.4	0.225	0.717	0.363
	青岛理工大学冶金试验场	46	24.4	19.7	1.052	17.77	8.7	0.219	0.591	0.261
	青岛理工大学二食堂	51	21.6	27.8	0.914	17.07	9.6	0.265	0.732	0.351

2.1 混凝土抗压强度退化模型

为研究混凝土抗压强度与服役龄期间的量化关系,对实测混凝土抗压强度结果进行归一化处理,将每栋结构混凝土抗压强度实测值与其初始抗压强度比值作为研究参数,以下称为混凝土相对抗压强度,可利用式(1)计算:

$$\zeta(t) = f_{cu,c}^c(t) / f_{cu}, \quad (1)$$

式中: $\zeta(t)$ 为混凝土相对抗压强度; $f_{cu,c}^c(t)$ 为混凝土抗压强度实测值; f_{cu} 为混凝土初始抗压强度,按以下方法取值:1)对于有详细竣工资料的建筑,初始抗压强度取竣工时预留混凝土试块抗压强度平均值;2)对于详细竣工资料丢失建筑,根据设计资料中混凝土抗压强度设计值及标准值,参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[10]有关规定,计算测区混凝土28 d抗压强度作为初始抗压强度。

图1为混凝土相对抗压强度 $\zeta(t)$ 随结构服役龄期变化的散点图及拟合曲线。可以看出,混凝土抗压强度在一定服役龄期内呈增长趋势,而达到某阶段服役龄期后,随着服役龄期的增加而不断降低。结合研究成果,选取二次多项式模型对混凝土抗压强度随服役龄期的变化关系进行拟合,拟合结果如式(2)所示。拟合函数相关系数 $p=0.606$,在95%置信区间的统计量 F 大于临界值,表明该模型具有较高的可信度。

$$\zeta(t) = -4.104 \times 10^{-4} t^2 + 1.981 \times 10^{-2} t + 0.885, \quad (2)$$

式中: t 为服役龄期,其余符号同前。

2.2 混凝土碳化深度模型

混凝土碳化深度受多种因素影响,学者们建立了多种混凝土碳化深度模型^[11-13]。文中采用牛荻涛^[8]提出的碳化深度模型,该模型考虑了碳化位置混凝土养护浇筑面、工作应力、环境因子、 CO_2 与混凝土质量等影响因素,碳化深度与混凝土抗压强度间关系为

$$X(t) = K_{mc} k_j k_{co_2} k_p k_s K_c K_r \sqrt{t}. \quad (3)$$

式中: k_j 为角部修正系数,角部取 $k_j=1.4$,非角部取 $k_j=1.0$; k_{co_2} 为 CO_2 浓度影响系数,对民用建筑室内环境,根据人群的密集程度取1.0~2.5; k_p 为浇筑面修正系数,主要考虑混凝土在施工过程中振捣、养护及拆模时间对碳化速度的影响,建议取 $k_p=1.2$; k_s 为工作应力影响系数,混凝土受压时,取 $k_s=1.0$,受拉时,取 $k_s=1.1$; K_c 为环境因

子影响变量,主要考虑环境温度与湿度对碳化的影响; K_f 为混凝土质量影响系数; K_{mc} 为计算模式不定性随机变量。

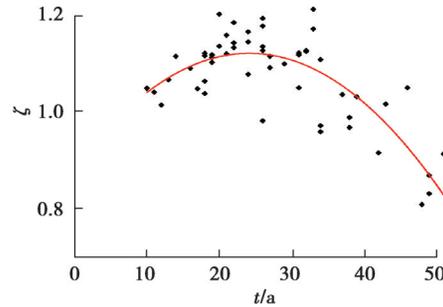


图 1 混凝土相对抗压强度与服役龄期关系

Fig. 1 Relationship between compressive strength and age of concrete

按照《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344—2004)^[14]要求,采用酚酞溶液滴定法测量测区混凝土深度,并利用混凝土抗压强度实测结果作为预测碳化深度的参数,对不同强度混凝土碳化深度进行统计分析,图 2 给出了碳化系数与混凝土抗压实测强度间的散点图及关系曲线。可以看出,混凝土碳化系数随混凝土抗压强度增大而减小。结合研究成果^[8],分别采用以下 3 种模型对二者间关系进行拟合。拟合结果见式(4)~式(6),其相关系数依次为 0.645、0.668 和 0.658,故文中选用式(5)表示混凝土抗压强度与碳化系数间相关关系。

$$k_c = 30.45 * f_{cu,e}^{-0.8}, \rho = 0.645, \quad (4)$$

$$k_c = \frac{18.596}{\sqrt{f_{cu,e}}} - 1.39, \rho = 0.668, \quad (5)$$

$$k_c = \frac{45.272}{f_{cu,e}} + 0.502, \rho = 0.658, \quad (6)$$

式中: $f_{cu,e}$ 为混凝土抗压强度推定值,由 2.1 节方法计算; k_c 为碳化系数。

考虑到式(3)中碳化位置、混凝土养护浇筑面、工作应力修正、环境因子变量等因素影响,引入碳化深度修正系数 R 对碳化系数进行综合修正,经修正的碳化深度预测模型为

$$x = R \left(\frac{18.596}{\sqrt{f_{cu,e}}} - 1.39 \right) \sqrt{t}, \quad (7)$$

式中: x 为碳化深度; R 为碳化深度修正系数,取 0.8~1.2 之间。

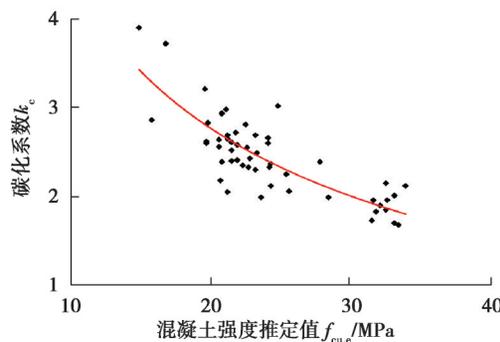


图 2 碳化系数与混凝土抗压强度推定值关系

Fig. 2 Relationship between carbonation coefficient and the presumption value of concrete compressive strength

2.3 钢筋锈蚀深度模型

2.3.1 钢筋表面氯离子浓度

按照《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344—2004)^[14]要求,利用硝酸银滴定法测定混凝土芯样中氯离

子含量,继而得到钢筋表面氯离子浓度 C_c (氯离子含量与混凝土质量的比值)。具体操作方法:利用切割机将混凝土芯样沿钢筋外表面切开,在不含钢筋部分的平行切割面切取 10 mm 薄片,继而将薄片磨碎测定其中氯离子含量。

钢筋表面氯离子浓度 C_c 随结构龄期变化规律如图 3 所示。可以看出,钢筋表面氯离子浓度随结构龄期增加而增大,但其增加速率随龄期增加而逐渐变缓。因为随着结构服役龄期的增加,混凝土不断发生水化反应,其内部密实度逐渐增加;此外,混凝土内部氯离子浓度逐渐增加,混凝土表面与内部的氯离子浓度差、电位差逐渐减小,氯离子扩散速率随着结构服役龄期增加而不断减小。为建立钢筋表面氯离子浓度与结构服役龄期间的量化关系,选用二次多项式模型对其进行拟合,拟合结果如式(8)所示,拟合函数相关系数为 0.820,表明该模型具有较高的可信度。

$$C_c = -1.358 \times 10^{-4} t^2 + 1.536 \times 10^{-2} t - 0.166, \quad (8)$$

式中: t 为结构龄期; C_c 为氯离子浓度。

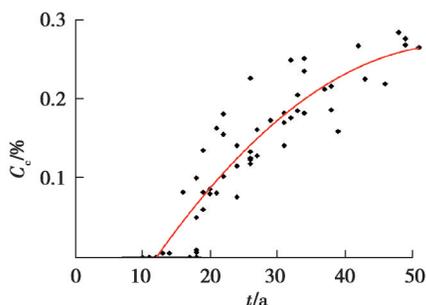


图3 钢筋表面氯离子浓度与服役龄期关系

Fig. 3 Relationship between chloride ion concentration on steel surface and service age

2.3.2 钢筋锈蚀深度随结构龄期的变化

钢筋锈蚀后,锈蚀产物体积膨胀会造成保护层混凝土径向受拉。随着钢筋锈蚀发生到一定程度,混凝土保护层开始出现裂缝,开裂宽度与钢筋锈蚀深度存在一定的相关关系。国内外学者对此进行了大量研究,证明了通过锈胀裂缝宽度可合理地表征对应位置处钢筋锈蚀深度^[15-18]。课题组基于大量试验数据并结合已有研究成果,得到顺筋裂缝与钢筋锈蚀深度的关系模型^[9],如式(9)所示:

$$\delta = \frac{1}{2} \left\{ d - \sqrt{\left[d - 2 \left(0.0523 \frac{c}{d} - 0.0352 \right) \right]^2 - 36.397 \omega} \right\}, \quad (9)$$

式中: δ 为钢筋锈蚀深度; d 为钢筋直径; c 为钢筋保护层厚度; ω 为混凝土表面顺筋裂缝宽度。

根据《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344—2004)^[14]规定,采用自然电位法判别钢筋是否发生锈蚀。测量已发生钢筋锈蚀结构得到顺筋裂缝宽度 ω ,并由式(9)计算钢筋锈蚀深度,同时开槽验证具备破损检测条件结构。图 4 为钢筋锈蚀深度随结构龄期变化的散点图及拟合曲线,可以看出,随着结构龄期的增长,钢筋锈蚀速率基本不变,拟合曲线接近直线;钢筋起锈蚀间大约在 10~15 a 范围内,明显小于一般大气环境下 RC 结构的钢筋起锈时间。

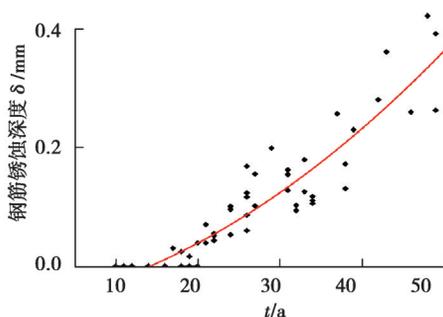


图4 钢筋锈蚀深度与服役龄期的关系

Fig. 4 Relationship between corrosion depth and service age of steel reinforcement

2.3.3 钢筋锈蚀深度与其表面氯离子浓度的关系

综上所述,钢筋表面氯离子浓度随着服役龄期的增长而增大,但氯离子浓度增加速度逐渐变缓;而锈蚀速率随服役龄期的增大,其变化幅度并不明显。图 5 为钢筋锈蚀深度与钢筋表面氯离子浓度 C_c 的关系散点图及拟合曲线。可以看出,当钢筋表面的氯离子浓度达到一定阈值时,钢筋开始出现锈蚀,随着钢筋表面氯离子浓度的增加,锈蚀速率呈加速趋势。

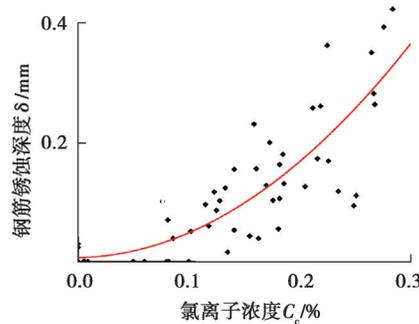


图 5 钢筋锈蚀深度与钢筋表面氯离子浓度的关系

Fig. 5 Relationship between corrosion depth and surface chloride concentration of reinforcements

2.4 考虑碳化与氯离子侵蚀复合作用的钢筋锈蚀深度预测模型

碳化作用一方面改变了混凝土微观结构,加速氯离子的扩散进程,同时将部分结合氯离子转化为自由氯离子,增加了混凝土内部氯离子浓度。因此,有必要同时考虑混凝土碳化和氯离子侵入对钢筋锈蚀的作用,利用曲面拟合钢筋锈蚀深度与碳化深度、钢筋表面氯离子浓度间关系,拟合结果如式(10)所示。

$$\delta(x, C_c) = \begin{cases} -0.043 + 0.006x, \\ -0.276C_c + 0.053x * C_c, \end{cases} \quad (10)$$

式中: C_c 为钢筋表面氯离子浓度(氯离子与混凝土质量的比值); x 为碳化深度, mm。

图 6 为钢筋锈蚀深度拟合曲面,可以看出,钢筋锈蚀深度随着混凝土碳化深度增加而增大,随钢筋表面氯离子浓度增加而增大;当氯离子浓度与碳化深度同时增加时,钢筋锈蚀发展最快。

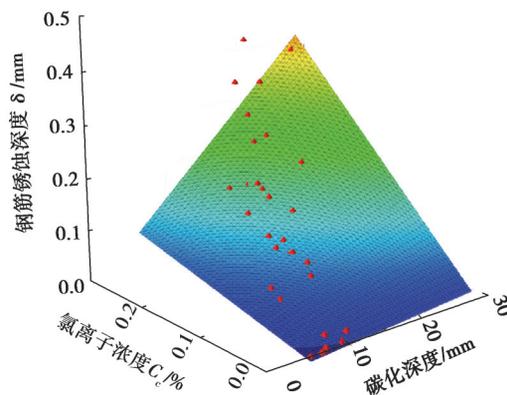


图 6 钢筋锈蚀深度拟合曲面

Fig. 6 Fitting surface of reinforcement corrosion depth

将修正后的碳化深度预测模型式(7)代入上式,可获得钢筋锈蚀深度预测模型为

$$\delta(t) = \begin{cases} -1.595 \times 10^{-2} + 1.27 \times 10^{-2} R^* \\ \left(\frac{18.743}{\sqrt{f_{cu,c}}} - 1.231 \right) \sqrt{t} + 6.687 \times 10^{-2} C_c + \\ 4.932 \times 10^{-2} R \cdot \left(\frac{18.743}{\sqrt{f_{cu,c}}} - 1.231 \right) \sqrt{t} \cdot C_c \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\delta(t)$ 为钢筋锈蚀深度, 其余符号同前。其中, 混凝土抗压强度 $f_{cu,c}$ 、钢筋表面氯离子浓度 C_c 已于前文得到。

3 锈蚀 RC 框架柱抗震性能退化模型

为进一步研究锈蚀 RC 框架柱抗震性能随服役龄期退化规律, 设计了截面尺寸为 400 mm×400 mm、长度 2 m 的 RC 框架柱进行损伤塑性分析。其中, 混凝土强度等级为 C30, 纵筋采用 6@28(HRB400), 配筋率为 1.32%; 箍筋采用 10@200(HPB300), 设计变化参数为轴压比与钢筋锈蚀程度, 构件受力与截面配筋如图 7 所示。

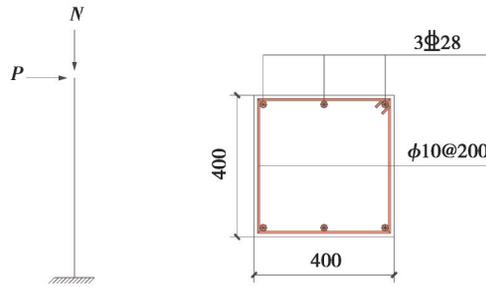


图 7 构件受力与截面配筋图

Fig. 7 Force model as well as section and reinforcement drawing of member

3.1 材料构件本构关系

3.1.1 锈蚀钢筋本构关系

锈蚀钢筋通常在锈蚀最严重处发生破坏, 钢筋材料性能试验结果表明: 锈蚀仅减小了钢筋横截面积, 导致名义抗拉强度降低, 钢筋的实际强度并未发生明显变化^[20]。因此, 锈蚀后钢筋本构模型仅需对完好钢筋本构模型进行修正即可, 钢筋计算参数如表 2 所示。基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[10]中所规定钢筋应力-应变关系, 锈蚀钢筋本构关系为

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & , \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \\ f_{ym} + k(\varepsilon_s - \varepsilon_y) & , \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u; \\ 0 & , \varepsilon_s > \varepsilon_u \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ_s 为钢筋应力; E_s 为钢筋的弹性模量; ε_s 为钢筋应变; f_{ym} 为屈服强度平均值; f_{stm} 为极限强度平均值; ε_y 为与 f_{ym} 相对应的钢筋屈服应变; ε_u 为与 f_{stm} 相对应的钢筋峰值应变; k 为钢筋硬化段斜率。

钢筋屈服强度及极限强度平均值可按式(13)(14)计算:

$$f_{ym} = f_{yk} / (1 - 1.645\delta_s), \quad (13)$$

$$f_{stm} = f_{stk} / (1 - 1.645\delta_s). \quad (14)$$

式中: δ_s 为钢筋强度变异系数, 文中取 0.07; f_{yk} 为钢筋屈服强度标准值; f_{stk} 为极限强度标准值。

表 2 钢筋计算参数
Table 2 Calculation parameters of rebar

钢筋种类	抗拉强度/MPa	塑性应变/ $\times 10^{-3}$	钢筋种类	抗拉强度/MPa	塑性应变/ $\times 10^{-3}$
HRB400(纵筋)	452.1	0.000	HPB300(箍筋)	339.0	0.000
	610.3	16.952		474.7	12.109

3.1.2 混凝土本构关系

损伤塑性模型假定混凝土破坏主要由拉伸开裂与压缩破碎引起^[21],该模型材料本构关系在弹性阶段采用线弹性模型,塑性阶段则考虑了损伤折减。混凝土本构关系可表征为

$$\sigma = (1 - d) E_0 \varepsilon, \quad (15)$$

式中: d 为包括 d_c 与 d_t 的损伤因子; E_0 为初始弹性模量,取混凝土受拉开裂时割线模量。

3.2 构件有限元模型建立

为研究轴压比与服役龄期对 RC 框架柱抗震性能的影响,损伤塑性分析中分别考虑 0.2、0.4、0.6 3 种轴压比以及 0、20、30、40、50 a 5 个服役龄期,其中不同服役龄期框架柱钢筋截面损失率按式(11)计算。

利用 ABAQUS 有限元软件对 RC 框架柱进行建模分析,混凝土单元采用 C3D8R(八节点线性六面体单元,减缩积分,沙漏控制),钢筋单元采用 T3D2(两节点线性三维桁架单元),单元尺寸为 0.05 m,构件分析模型如图 8 所示。

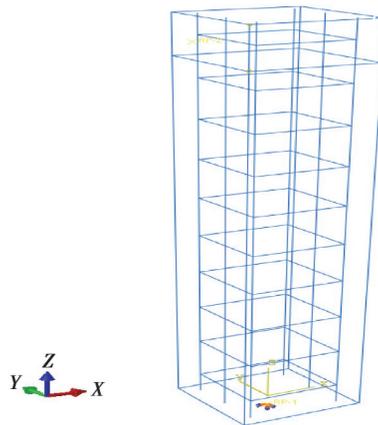


图 8 构件分析模型

Fig. 8 Analysis model of member

3.3 构件 P - Δ 骨架曲线

图 9 为轴压比 n 分别为 0.2、0.4、0.6 时不同服役龄期(0、20、30、40、50 a)钢筋混凝土框架柱的 P - Δ 骨架曲线。可以看出,不同轴压比框架柱在弹性阶段,水平承载力随服役龄期(钢筋锈蚀程度)增加而降低,且降低趋势较为规律。当轴压比较小时,塑性阶段承载力降低,但承载力并非随服役龄期增加呈现出规律性降低;当轴压比较大时,水平承载力随着服役龄期增加而呈现规律性下降趋势。图 10 为服役龄期分别为 0 a、30 a 及 50 a 时不同轴压比框架柱的 P - Δ 曲线(仅给出推向加载曲线)。表 3 分别定量列出了各龄期下轴压比 $n=0.4$ 及 $n=0.6$ 的框架柱相比 $n=0.2$ 时水平承载力的增加量,结果表明钢筋混凝土柱的水平承载力随着轴压比的增大而增大,且弹性受力阶段增长。

表3 不同轴压比时RC柱极限承载力提升情况

Table 3 Improvement of ultimate bearing capacity of RC columns with different axial compression ratios

轴压比/%	龄期/a				
	10	20	30	40	50
$n=0.4$ 承载力增加	11.5	13.9	15.7	16.0	19.5
$n=0.6$ 承载力增加	31.6	31.4	32.4	27.6	33.9

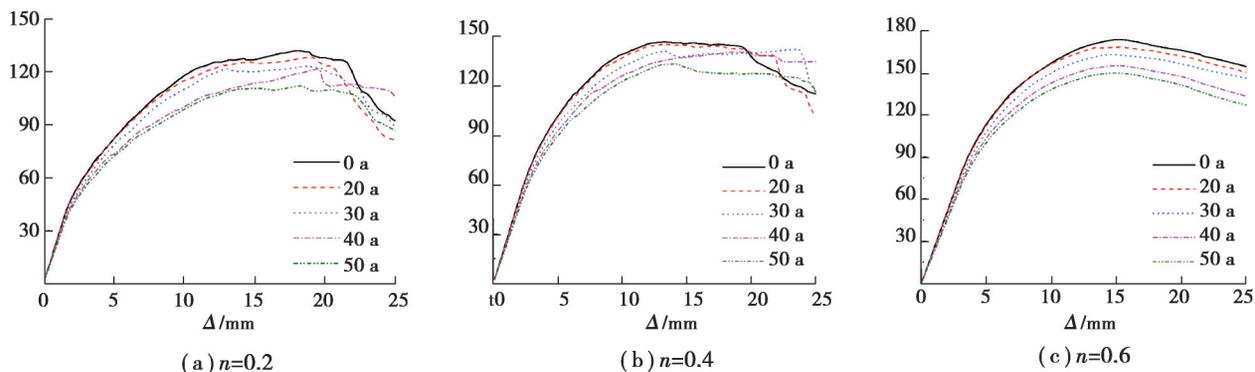


图9 不同轴压比构件P-Δ曲线

Fig. 9 P-Δ curve of member with different axial compression ratios and service ages

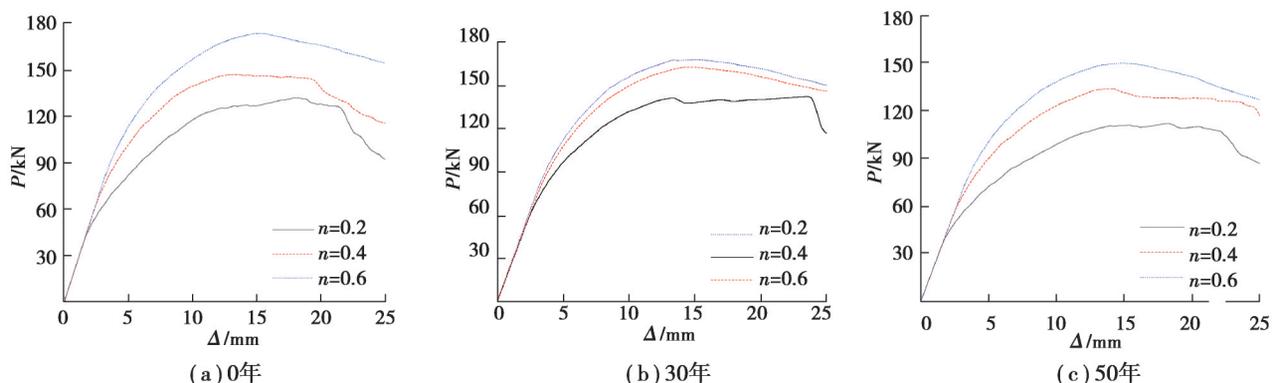


图10 不同服役龄期构件P-Δ曲线

Fig. 10 P-Δ curve of member with varying service ages

4 结论

1) 近海大气环境下RC结构钢筋锈蚀受到混凝土碳化与氯离子侵蚀双重影响作用,碳化对氯离子扩散具有加速作用,但钢筋锈蚀速率未见明显变化。

2) RC框架柱P-Δ骨架曲线表明,轴压比较小时,框架柱水平承载力随服役龄期(钢筋锈蚀程度)增大衰减相对较小;当轴压比较大时,框架柱的水平承载力随不同服役龄期(钢筋锈蚀程度)的增加而显著降低,服役龄期为50 a时,钢筋混凝土框架柱水平承载力降低了12%。

3) RC框架柱P-Δ骨架曲线表明,随着轴压比的增大,锈蚀钢筋混凝土框架柱弹性受力阶段增长,水平承载力明显增大。当服役龄期为30 a时,轴压比从0.2增加到0.6,RC柱水平极限承载能力增加了31%。

参考文献

[1] 牛荻涛,孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1094-1099.

Niu D T, Sun C T. Study on interaction of concrete carbonation and chloride corrosion[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(8): 1094-1099.(in Chinese)

- [2] 李士彬, 孙伟. 疲劳、碳化和氯盐作用下混凝土劣化的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(11): 1459-1464.
Li S B, Sun W. Review on deterioration of concrete subjected to coupling effect of fatigue load, carbonation and chlorides[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(11): 1459-1464.(in Chinese)
- [3] Tumidajski P J, Chan G W. Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(4): 551-556.
- [4] Chindaprasirt P, Rukzon S, Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(8): 1701-1707.
- [5] Matsumura T, Shirai K, Saegusa T. Verification method for durability of reinforced concrete structures subjected to salt attack under high temperature conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(5): 1181-1188.
- [6] Li D W, Li L Y, Wang X F. Chloride diffusion model for concrete in marine environment with considering binding effect[J]. Marine Structures, 2019, 66: 44-51.
- [7] Wong H S, Zhao Y X, Karimi A R, et al. On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride-induced corrosion[J]. Corrosion Science, 2010, 52(7): 2469-2480.
- [8] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Niu D T. Durability and life forecast of reinforced concrete structure[M]. Beijing: Science Press, 2003.(in Chinese)
- [9] Anstice D J, Page C L, Page M M. The pore solution phase of carbonated cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(2): 377-383.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [11] 黄可信. 钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
Huang C X. Rebar corrosion and protection in reinforced concrete structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983.(in Chinese)
- [12] Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(4): 363-373.
- [13] 张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, 28(1): 16-19, 47.
Zhang Y, Jiang L X. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism[J]. Industrial Construction, 1998, 28(1): 16-19, 47.(in Chinese)
- [14] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑结构检测技术标准: GB/T 50344—2004[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical standard for inspection of building structure: GB/T 50344—2004[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)
- [15] Andrade C, Alonso C, Molina F J. Cover cracking as a function of bar corrosion: part I-Experimental test[J]. Materials and Structures, 1993, 26(8): 453-464.
- [16] Rodriguez J, Ortega L M, Casal J, et al. Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures[M]//Durability of Building Materials & Components 7 vol.1. London: Routledge, 2018: 117-126.
- [17] Vidal T, Castel A, François R. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1): 165-174.
- [18] 吴锋, 张章, 龚景海. 基于锈胀裂缝的锈蚀梁钢筋锈蚀率计算[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 144-150.
Wu F, Zhang Z, Gong J H. Calculation of steel corrosion rate based on corrosive crack of beams[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 144-150.(in Chinese)
- [19] 郑山锁, 董立国, 张艺欣, 等. 多龄期钢筋混凝土结构地震易损性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Zheng S S, Dong L G, Zhang Y X, et al. Research on seismic vulnerability of multi-age reinforced concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2017.(in Chinese)
- [20] 徐港, 张懂, 刘德富, 等. 氯盐环境下混凝土中锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 452-459.
Xu G, Zhang D, Liu D F, et al. Research on mechanical properties of corroded steel bar in concrete under chloride environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 452-459.(in Chinese)
- [21] 张劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.
Zhang J, Wang Q Y, Hu S Y, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS[J]. Building Structure, 2008, 38(8): 127-130.(in Chinese)