

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901031

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*

许骋昱, 左晓宝, 殷光吉

(南京理工大学理学院土木工程系, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对氯盐-硫酸盐环境中钢筋混凝土构件抗震性能的劣化问题, 利用 Fick 定律、离子浓度与材料损伤的拟合关系, 确定了硫酸盐侵蚀下混凝土的损伤本构模型, 根据氯盐环境下钢筋锈蚀特征及法拉第定律建立了钢筋截面损失时变模型, 并通过 OpenSees 软件分析了柱构件在侵蚀环境中抗震性能的退化情况。结果表明: 随着服役时间的增加, 柱的受压、受弯承载力及刚度逐渐退化, 构件的延性、滞回耗能能力先增大后减小; 服役初期, 增大轴向力能够提高构件受弯承载力, 但服役超过一定时间后, 该作用不明显; 整个服役周期内, 轴向力的增大都将造成构件弹塑性变形能力降低, 故高轴向力作用下, 构件的延性、滞回耗能能力均降低。

关键词: 抗震性能; 氯离子; 硫酸根离子; 数值模拟; 轴压比

中图分类号: TU375.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0376-09

Numerical Simulation on Seismic Performance Deterioration of Reinforced Concrete Columns Subjected to Chloride and Sulfate Attack

XU Chengyu, ZUO Xiaobao, YIN Guangji

(Department of Civil Engineering, School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at seismic behavior of the concrete members in an aggressive environment, models of materials subjected to coupling of chloride and sulfate attack were established. Based on Fick's law and the relationship between ion concentration and deterioration degree of concrete obtained from the experimental data, a constitutive model of the corroded concrete was introduced. Faraday's law and characteristics of the steel bars under chloride attack were combined to determine the area loss of steel bar. With these damage models, the degradation of reinforced concrete columns in aggressive environment was analyzed as an example by numerical simulation with OpenSees. The results show that the bearing capacity and stiffness of the investigated reinforced concrete columns deteriorate with the increase of service time. For components serving for a comparative short time, they tend to have higher ductility and better performance in resisting low-cycle loading than they do at the beginning of service, which will degrade if they serve for a relatively long period. Axial force plays a significant role in columns' performance to resist lateral loads. To be specific, when columns merely serve for a short peri-

* 收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778296; 51378262)资助

作者简介: 许骋昱(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事混凝土材料与结构方面的研究。E-mail: tomiiiiixu@gmail.com

od, they will be strengthened with their bearing capacity to resist moment or lateral force if carrying a larger axial load, which will not be observed when columns serve for more than 30 years. But however long service time of the column is, a larger axial load will reduce its capacity to deform and consume energy, which has great influence in seismic performance.

Keywords: seismic performance; chlorine ion; sulfate ion; numerical simulation; axial compression ratio

引 言

长期处于海洋、盐湖、盐渍土等侵蚀环境中的钢筋混凝土结构,不仅受到风、地震等各种荷载作用,还遭受氯盐、硫酸盐等多种化学侵蚀作用^[1]。环境因素对混凝土的化学侵蚀,将直接导致混凝土结构的性能退化、寿命缩短,是目前土木工程界研究的热点问题^[2]。氯盐-硫酸盐环境下,硫酸根离子通过扩散传输而渗入混凝土中,与水泥水化产物反应而生成钙矾石或石膏,引起混凝土膨胀开裂,造成混凝土强度等力学性能降低;氯离子扩散并在钢筋表面聚集,引起其脱钝、逐渐锈蚀,导致钢筋截面积减少,造成结构构件承载力降低、延性下降^[3]。可见,氯盐-硫酸盐侵蚀下钢筋和混凝土及其结构的服役性能将呈现一个逐渐退化的过程,最终导致地震、风载作用下混凝土结构或构件的安全性难以满足预期^[4]。定量地描述氯盐-硫酸盐等侵蚀环境下混凝土结构的抗震性能退化过程,对合理地评估长期服役过程中混凝土结构地震安全性具有重要意义。

采用合理的钢筋、混凝土材料损伤失效模型,并结合有限元分析方法,是定量描述氯盐-硫酸盐侵蚀环境下混凝土结构或构件抗震性能退化过程的有效途径之一^[5]。目前,针对硫酸盐侵蚀下混凝土力学性能退化问题,已有大量的腐蚀试验与测试分析研究^[6-7],建立了硫酸盐环境下混凝土的时变本构模型^[8],并在此基础上,对硫酸盐腐蚀后混凝土构件的静力性能进行了分析^[9];针对氯盐环境下钢筋的锈蚀问题,利用 Fick 定律建立了混凝土中氯离子的扩散模型^[10],并据此确定了钢筋锈蚀量及其引起的截面积损失率计算方法^[11];D. E. Afsar 等^[2]考虑了钢筋锈蚀引起的混凝土开裂损伤情况,对锈蚀后纵筋的非线性屈曲行为及滞回模型进行了修正,在此基础上,进行了混凝土柱的地震易损性分析;F. Biondini 等^[12]基于环境氯离子浓度和钢筋锈蚀程度

之间的关系,建立了混凝土柱的损伤退化模型,分析了氯盐环境下混凝土框架结构耗能能力和延性的演化规律;M. S. Asghshahr 等^[13]建立了锈蚀后钢筋的力学损伤模型,并考虑了钢筋锈蚀体积膨胀引起的混凝土保护层开裂、箍筋约束作用下降对结构力学性能的影响,通过 pushover 方法,分析了环境腐蚀过程中混凝土桥梁结构抗震性能的退化规律。然而,上述关于侵蚀环境下混凝土结构性能演化规律的研究中,硫酸盐侵蚀的相关研究仍停留在静力分析层次,且鲜有考虑氯盐及硫酸盐等多环境因素的耦合作用。

针对海洋、盐湖、盐渍土等氯盐-硫酸盐环境下混凝土结构抗震性能的退化问题,本文根据硫酸盐侵蚀下混凝土损伤演化过程和氯盐环境下钢筋锈蚀机理,给出了由离子扩散控制的混凝土力学损伤本构模型和钢筋锈蚀后截面面积的计算公式,在此基础上,根据地震作用下混凝土柱的受力特点,应用 OpenSees 有限元软件,建立了基于钢筋和混凝土纤维的混凝土柱有限元分析模型,数值模拟了混凝土柱承载力、滞回性能及骨架曲线等抗震性能随服役年限的变化规律。

1 材料腐蚀本构模型

1.1 混凝土模型

已有研究表明^[8],在硫酸盐腐蚀损伤过程中,混凝土应力-应变曲线的基本形状变化较小,但曲线中的峰值应力及应变、极限应力及应变等特征参数变化明显。为简化计算,假设腐蚀损伤后的混凝土应力-应变曲线形状与无损伤混凝土相同,并采用 Kent-Park 模型来描述,如图 1 所示。同时,引入损伤程度 $\beta = \beta(x, y, t)$,表征硫酸盐侵蚀过程中混凝土应力-应变曲线特征参数的变化规律^[9]。硫酸盐环境下混凝土腐蚀损伤本构模型可表示为:

$$\sigma^\beta = \begin{cases} f_c^\beta \left[\frac{2\epsilon^\beta}{\epsilon_c^\beta} - \left(\frac{\epsilon^\beta}{\epsilon_c^\beta} \right)^2 \right] & \epsilon^\beta \leq \epsilon_c^\beta \\ f_c^\beta [1 + Z^\beta (\epsilon^\beta - \epsilon_c^\beta)] & \epsilon_c^\beta < \epsilon^\beta \leq \epsilon_{cu}^\beta \\ f_{cu}^\beta & \epsilon^\beta > \epsilon_{cu}^\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ^β 和 ϵ^β 分别为混凝土的应力和应变; f_c^β 和 ϵ_c^β 分别为混凝土的峰值应力和应变; f_{cu}^β 和 ϵ_{cu}^β 为混凝土的极限应力和应变; Z^β 为混凝土应力-应变曲线软化段斜率, 其值由峰值应力、极限应力和相应的应变共同确定:

$$Z^\beta = \frac{f_c^\beta - f_{cu}^\beta}{\epsilon_c^\beta - \epsilon_{cu}^\beta} \quad (2)$$

式中, 各特征参数可表示为损伤程度 β 的函数^[8]:

$$\left. \begin{aligned} f_c^\beta &= (1 - \beta) f_{c0} \\ f_{cu}^\beta &= (1 - \beta) f_{cu0} \\ \epsilon_c^\beta &= [2.18 - 1.18\sqrt{1 - \beta}] \epsilon_{c0} \\ \epsilon_{cu}^\beta &= [2.18 - 1.18\sqrt{1 - \beta}] \epsilon_{cu0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, f_{c0} 和 ϵ_{c0} 为未腐蚀混凝土的峰值应力和应变; f_{cu0} 和 ϵ_{cu0} 为未腐蚀混凝土的极限应力和应变。

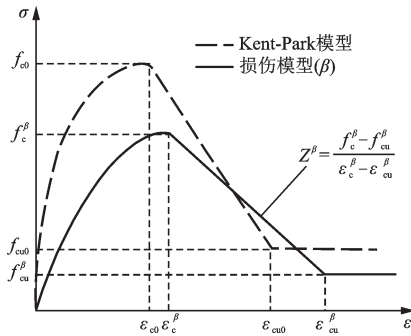


图1 腐蚀混凝土本构模型

Fig.1 Constitutive model of the corroded concrete

硫酸盐侵蚀下, 环境硫酸根离子渗入混凝土内, 与水泥水化产物反应生成钙矾石等侵蚀产物, 混凝土发生体积膨胀而导致腐蚀损伤, 一般来说, 其腐蚀损伤程度主要与渗入到混凝土内的硫酸根离子浓度有关, 文献[14]基于腐蚀试验数据的线性回归, 给出了混凝土损伤程度 β 与硫酸根离子浓度之间的关系:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = \begin{cases} q_c c_s & t_0 \leq t \leq t_e \\ 0 & t \leq t_0, t \geq t_e \end{cases} \quad (4)$$

式中, q_c 为混凝土蚀强率系数; t_0 和 t_e 分别为混凝土开始腐蚀和完全腐蚀所对应的时间, t 为腐蚀时间; $c_s = c_s(x, y, t)$ 为混凝土柱截面 (x, y) 处的硫酸根离

子浓度, 基于 Fick 定律和化学反应动力学, 混凝土柱中硫酸根离子浓度可通过扩散反应方程获得^[5]:

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_s \frac{\partial c_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_s \frac{\partial c_s}{\partial y} \right) + k_v \cdot c_s \cdot c_{ca} \quad (5)$$

式中, k_v 为硫酸根离子化学反应速率常数; c_{ca} 为混凝土孔溶液中钙离子浓度; D_s 为硫酸根离子扩散系数, 按文献[15]确定。

利用交替方向隐格式的有限差分法, 可求解式(4), 得到混凝土柱截面中硫酸根离子浓度的时空分布规律, 再结合式(3)及(1)、(2), 可获得硫酸盐侵蚀下柱截面中不同损伤程度的混凝土腐蚀本构模型。

1.2 钢筋模型

长期处于氯盐-硫酸盐环境中混凝土柱等结构构件, 环境中的氯离子渗入混凝土内部, 并在钢筋表面累积至氯离子阈值时, 钢筋表面钝化膜遭到破坏, 引起钢筋锈蚀、截面积减小, 造成结构的承载力降低。一般来说, 由氯盐引起混凝土内钢筋的锈蚀以点蚀为主, 其锈蚀形态为钢筋截面局部出现形状多样的蚀坑。为简化计算, 本文采用文献[16]建议的蚀坑模型, 如图2所示。根据 Faraday 定律^[2], 因氯盐腐蚀导致的钢筋质量损失 m 可表示为:

$$m = \frac{M \int_{t_{corr}}^t I_{corr} dt}{nF} \quad (6)$$

式中, m 为钢筋质量损失量; M 为铁的摩尔质量; I_{corr} 为腐蚀电流强度; t 为混凝土结构在氯盐-硫酸盐环境中的服役时间; t_{corr} 为混凝土中钢筋锈蚀开始时间; F 为法拉第常数; n 为电化学反应中迁移的电子数, 考虑到锈蚀的铁为二价态, $n=2$ 。

对(6)式左右两端同时除以铁的密度及电极面积, 则可计算出等效为均匀锈蚀时的锈蚀深度:

$$u = \frac{M \int_{t_{corr}}^t i_{corr} dt}{nF \cdot \rho_{Fe}}, \text{ 即 } u = \kappa \int_{t_{corr}}^t i_{corr} dt \quad (7)$$

式中, u 为等效均匀锈蚀深度; ρ_{Fe} 为铁的密度; κ 为单位电流密度作用时钢筋锈蚀速率; i_{corr} 为钢筋的腐蚀电流密度, 按照文献[17], 它可表示为:

$$i_{corr} = \begin{cases} 0 & t \leq t_{corr} \\ 0.85 i_{corr0} (t - t_{corr})^{-0.29} & t > t_{corr} \end{cases} \quad (8)$$

式中, i_{corr0} 为钢筋开始锈蚀时的腐蚀电流密度^[17], 它与保护层厚度及其混凝土的水灰比有关:

$$i_{corr0} = \frac{37.8(1 - wc)^{-1.64}}{d_c} \quad (9)$$

式中, w_c 为混凝土水灰比; d_c 为混凝土保护层厚度。

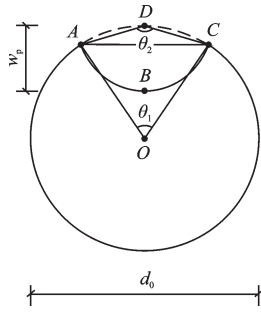


图2 锈蚀钢筋几何模型

Fig.2 Geometric model of corroded steel bar

已有研究表明^[18], 氯盐侵蚀引起的钢筋点蚀深度 w_p 与其等效均匀锈蚀深度 u 存在一定的比例关系:

$$w_p = 6u \quad (10)$$

式中, w_p 为钢筋的点蚀深度。根据图2所示的锈蚀后钢筋截面形状, 可计算因锈蚀引起的点蚀面积为:

$$A_p = \frac{d_0^2}{8} (\theta_1 - \sin\theta_1) + \frac{w_p^2}{2} (\theta_2 - \sin\theta_2) \quad (11)$$

式中, A_p 为氯盐侵蚀引起的钢筋截面点蚀面积; d_0 为钢筋的初始直径; θ_1 和 θ_2 分别为钢筋表面点蚀坑形成的弧 ADC 和弧 ABC 所对应的圆心角:

$$\theta_1 = 2\arcsin\left[\frac{a}{d_0}\right], \theta_2 = 2\arcsin\left[\frac{a}{2w_p}\right] \quad (12)$$

式中, a 为图2中弧形蚀坑所对应的弦 AC 长度:

$$a = 2w_p \sqrt{1 - \left(\frac{w_p}{d_0}\right)^2} \quad (13)$$

因此, 根据图2及式(4), 氯盐侵蚀引起钢筋点蚀后的剩余有效面积可表示为:

$$A_e = A_0 - A_p \quad (14)$$

式中, A_e 为钢筋的有效截面积; A_0 为钢筋的初始截面积, $A_0 = 0.25\pi d_0^2$ 。

在式(6)~(8)中, 混凝土柱内钢筋锈蚀开始时间 t_{corr} , 即环境氯离子扩散至钢筋表面并达到氯离子阈值的时间, 根据混凝土柱截面中氯离子的扩散方程及钢筋表面氯离子阈值确定^[5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial c_{\text{cl}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\text{cl}} \frac{\partial c_{\text{cl}}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{\text{cl}} \frac{\partial c_{\text{cl}}}{\partial y} \right] \\ t_{\text{corr}} = t \Big|_{x=d_c, c_{\text{cl}}=[c_{\text{cl}}]} \end{cases} \quad (15)$$

式中, c_{cl} 为混凝土中氯离子浓度; $[c_{\text{cl}}]$ 为钢筋表面钝时的氯离子阈值; D_{cl} 为混凝土中氯离子有效扩散系数, 按文献[15]确定。

2 混凝土柱腐蚀的有限元建模

2.1 基本假定

(1) 假设硫酸盐和氯盐侵蚀过程中, 混凝土柱截面仍符合平截面假定;

(2) 混凝土柱截面可划分为尺寸相同的纤维, 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) 忽略硫酸盐侵蚀产物对离子传输进程的影响和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 0.95, 同时, 为了考虑箍筋对混凝土的约束效应, 柱核心混凝土强度提高 15%^[2]。

2.2 柱截面网格划分

根据上述基本假定及混凝土柱截面尺寸, 将柱截面区域 Ω (截面宽度 $b \times$ 高度 h) 沿宽度、高度方向等距分割成边长为 s 的正方形纤维网格 ($s \times s$), 则柱截面被离散成 $m \times n$ ($m = b/s$, $n = h/s$) 个混凝土和钢筋纤维, 如图3(a)所示。在腐蚀损伤和各种荷载作用过程中, 柱截面中各纤维的变形一直符合平截面假定, 且在氯离子和硫酸根离子传输过程中, 各纤维的离子浓度、应力、应变及损伤程度在该纤维上均匀分布, 并取该纤维中心位置处的计算值。

2.3 OpenSees 计算模型建立

根据上述混凝土柱截面所划分的混凝土和钢筋纤维, 利用所建立的硫酸盐侵蚀混凝土损伤本构模型, 定义柱截面混凝土纤维性能, 各混凝土纤维的损伤程度根据其所在的柱截面位置由式(3)和(4)确定, 再利用式(1)和(2)进一步确定柱截面上任一混凝土纤维在硫酸盐侵蚀过程中的腐蚀本构关系; 而柱截面中的钢筋纤维性能, 由于氯盐引起的钢筋锈蚀从表及里逐层剥蚀, 钢筋内部未出现损伤, 其力学性能基本不变, 仅发生了钢筋的有效面积降低, 因此, 氯盐腐蚀过程中, 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, 可按式(10)和式(13)计算。柱截面混凝土纤维和钢筋纤维及其所采用的本构模型如图3(b)所示。

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

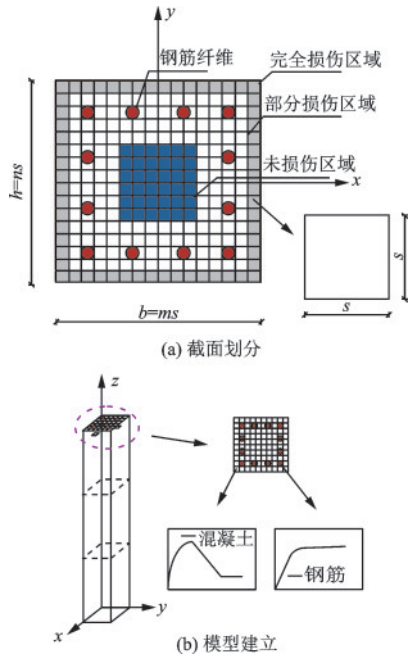


图3 构件截面纤维划分及模型建立示意图

Fig.3 Mesh of column cross-section and diagram of constitutive model

关。为了进一步利用 OpenSees 软件分析硫酸盐-氯盐耦合作用过程中混凝土柱力学性能的退化规律,本文对软件内嵌的 Concrete02 模型进行拓展,用以建立腐蚀混凝土本构模型;而钢筋纤维的材料本构模型采用 Steel02 模型,但腐蚀过程中的纤维面积变化则由所给出的锈蚀钢筋有效截面积公式确定。混凝土柱力学性能分析时,首先,利用有限差分法,数值求解硫酸根离子和氯离子在混凝土中的传输过程,获得柱截面各混凝土纤维处的硫酸根离子浓度和钢筋纤维表面氯离子浓度,其次,计算柱截面中各混凝土纤维的损伤程度和钢筋锈蚀的开始时间及其截面的有效截面积;最后,利用 TCL 语言编制相应的计算程序,实现与 OpenSees 软件的对接,并采用 OpenSees 软件中基于柔度法的梁柱单元,建立氯盐-硫酸盐耦合作用过程中混凝土柱抗震性能退化过程的分析方法,相应的分析过程如图 4 所示。

3 数值算例

3.1 模型参数

为了获得硫酸盐-氯盐腐蚀环境下混凝土柱性能退化规律,利用所建立的材料腐蚀本构关系和

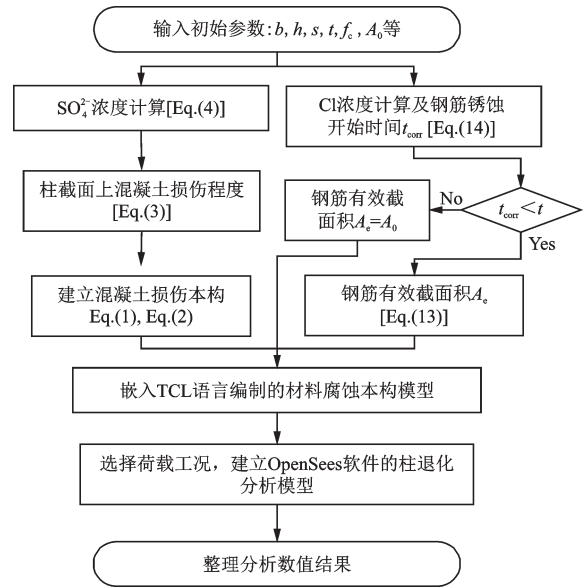


图4 构件分析流程

Fig.4 Analysis flow of members

OpenSees 有限元模型,分析混凝土柱的轴心受压承载力、受弯承载力,滞回特性及骨架曲线等抗震性能随服役时间的变化规律,其受力模型如图 5(b)所示,其中,荷载工况分别为轴向加载、轴向一柱顶水平加载和轴向一柱顶水平低周反复加载。模型计算时,相关的主要参数选取为:

(1)材料参数:混凝土强度等级为 C40,其水灰比 w/c 为 0.45,峰值强度 f_{c0} 和极限强度 f_{cu0} 分别为 26.8 和 5.36 MPa^[2],峰值应变 ϵ_{c0} 和极限应变 ϵ_{cu0} 分别为 0.001 6 和 0.003 3,弹性模量为 32.5 GPa;纵筋采用 HRB400,屈服强度为 400 MPa,箍筋采用 HRB335,屈服强度为 335 MPa,钢筋弹性模量为 200 GPa;蚀强率系数 q_c 为 $1.21 \times 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{mol})$ ^[14],化学反应速率常数 k_v 为 $3.05 \times 10^{-8} \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{mol})$ ^[19],混凝土孔溶液中钙离子浓度 c_{Ca} 为 21.25 mol/m^3 ^[19],氯离子浓度阈值 $[c_{cl}]$ 为 45.07 mol/m^3 ^[20],硫酸根离子和氯离子的扩散系数 D_s 和 D_{cl} 取值参考文献[15],单位电流密度作用时钢筋锈蚀速率 κ 为 $0.011 6 (\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$ ^[2]。

(2)构件参数:混凝土柱高 3 000 mm,全没于硫酸盐-氯盐溶液中,截面尺寸为 600 mm×600 mm,混凝土保护层厚 45 mm,柱截面配筋如图 5(a)所示。

(3)环境参数:环境温度 T 为 25℃,环境中硫酸根离子浓度为 158.62 mol/m^3 ,氯离子浓度为 422.53 mol/m^3 。

(4)计算参数:截面上各纤维网格边长 s 取 20 mm,时间步长 Δt 取 10 d。

(5)加载制度:不同荷载工况下,轴向力和水平力均作用在柱顶。低周反复加载时,水平荷载加载采用位移控制,按 Δ_y (Δ_y 为屈服位移)细分控制位移等级,每级循环3次,加载制度如图5(c)所示。

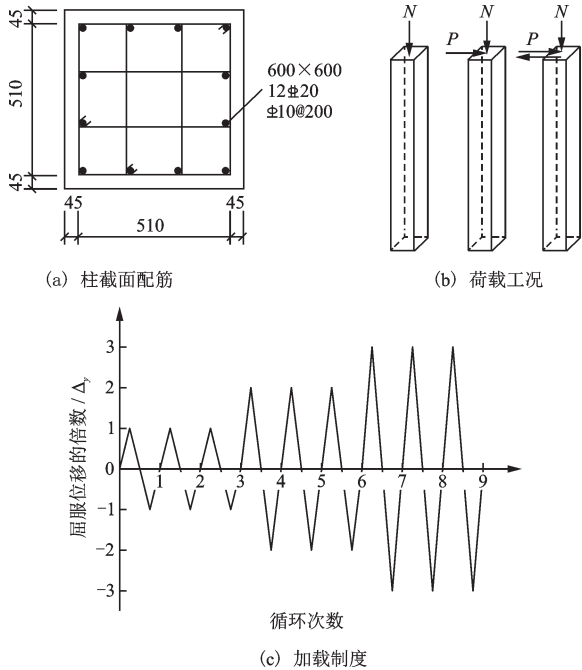


图5 柱截面配筋和加载图示

Fig.5 Reinforced concrete column section and load diagram

3.2 数值结果与分析

3.2.1 轴心受压承载力

为了描述氯盐-硫酸盐侵蚀和轴向压力耦合作用过程中钢筋、混凝土材料性能及结构柱受压承载力的退化规律,以钢筋截面损失率 δ 和混凝土平均损伤程度 $\bar{\beta}$ 分别表征其性能退化规律,同时以轴向受压承载力损失率 γ 反映柱的受压性能退化过程:

$$\delta = \frac{A_p}{A_0}, \bar{\beta} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{mn} \beta_i, \gamma = \frac{N_{u0} - N_u}{N_{u0}}$$

式中, β_i 为截面上任一纤维的损伤程度; m, n 为柱截面沿 x, y 方向划分的纤维数(图3(a)); N_{u0} 为未腐蚀柱的轴心受压承载力; N_u 为服役中混凝土柱的轴心受压承载力,本文中,轴心受压承载力取,利用OpenSees数值分析得到的,轴心受压工况下,柱的荷载-位移曲线上的荷载最大值。

图6给出了氯盐-硫酸盐侵蚀过程中钢筋、混凝土及柱轴向受压性能的时变曲线,从图中可以看出,柱初始受压承载力 N_{u0} 为13 500 kN,服役50年时,混凝土平均损伤程度和钢筋截面面积损失率分别

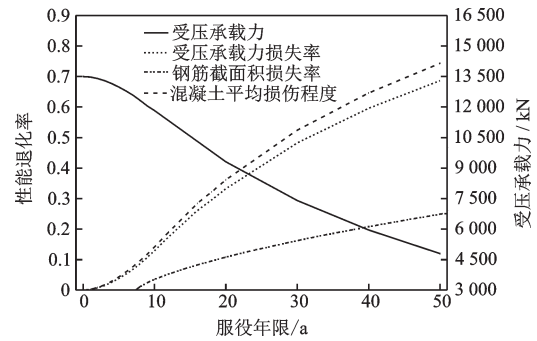


图6 腐蚀条件下柱的性能演化规律

Fig.6 Time-variant compressive bearing capacity of the column under corrosive conditions

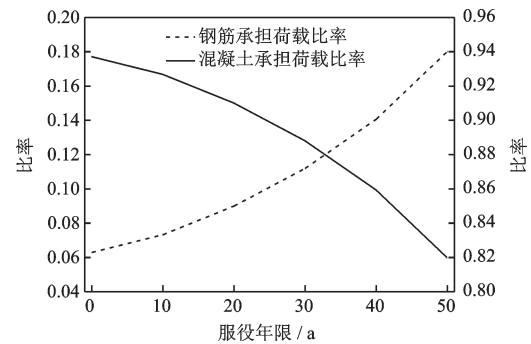


图7 材料承担荷载比率的演化规律

Fig.7 Contribution of different materials in column's compressive bearing capacity

为74.3%和24.9%,柱构件受压承载力仅为4 794.8 kN,相比服役初期下降了65%。服役初期承载力退化较慢,之后承载力下降呈先快后慢的趋势,这与材料性能退化规律有关:钢筋锈蚀起始时间为7.4年,且服役初期混凝土内硫酸根离子浓度较低,混凝土平均损伤程度上升缓慢,因而初期柱受压承载力退化慢;随着扩散反应的进行,混凝土内硫酸根离子浓度增加,呈梯度分布,故外部混凝土损伤程度将快速增长,而内部混凝土损伤发展相对缓慢,其后,外部混凝土趋近完全损伤,混凝土平均损伤程度发展速率主要由内部混凝土损伤速率控制,导致混凝土平均损伤程度的增长速度由快到慢变化,脱钝后,钢筋表面腐蚀电流密度随时间降低,其锈蚀速率也逐渐减慢。

根据截面上钢筋和混凝土的应力分布,可以确定二者承担荷载的比率,轴向力为3 000 kN时,钢筋和混凝土承担荷载比率随时间的演化规律如图7所示,由图可知,构件服役50年时,钢筋承担荷载比率由最初的6.3%上升至18.0%,而混凝土承担荷载比率由93.7%下降至82.0%,其主要原因是:氯

盐-硫酸盐侵蚀下,截面外部混凝土逐渐退出工作,且损伤后混凝土弹性模量降低,而钢筋弹性模量基本不变,故截面将产生应力重分布,混凝土与钢筋的应力比随服役时间降低,导致钢筋承担的荷载上升,而混凝土承担的荷载下降。

3.2.2 受弯承载力

图8为不同服役年限的混凝土柱进行轴向-水平力加载时的截面弯矩-曲率图线(图中各构件的具体工况在表1中说明),控制截面取距柱底0.5 m的截面,表1给出了构件加载过程中控制截面弯矩、曲率的特征值以及延性系数 μ , μ 为极限曲率和屈服曲率之比,取混凝土达到极限压应变或钢筋达到极限应变时的截面曲率为极限曲率,相应弯矩值为极限弯矩。

结合图8和表1可知,随着服役时间的增长,柱的受弯承载力逐年下降,由于侵蚀环境下柱内部材料性能不断劣化,柱的刚度随时间降低,构件服役较长时间后,轴力的增加会降低构件屈服后的刚度。

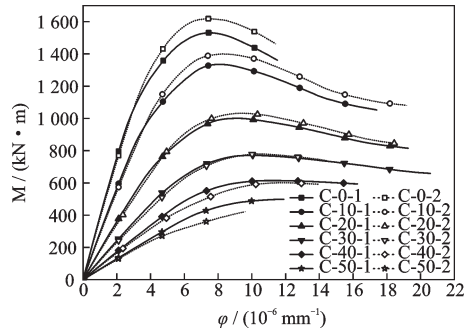


图8 水平力加载时控制截面的弯矩-曲率曲线

Fig.8 Moment-curvature curves of the control section

服役时间不超过30年时,轴向力的增加小幅提高了构件的受弯承载力,但随着服役年限的增长,轴力增大使得构件受弯承载力降低。造成上述现象的原因是,服役时间较短时,材料损伤程度轻,故实际轴压比较小,此时增大轴压比能够提高构件的受弯承载力,但由于柱构件处于侵蚀环境中,混凝土力学性能随服役时间降低,轴力不变的情况下,柱的实际轴压比随时间增大,当轴压比达到一定程度时,增大轴力对受弯承载力的加强不明显。

表1 控制截面的弯矩-曲率数值模拟结果

Table 1 Moment-curvature simulation results of the control section

构件编号	服役时间/ a	轴压力/ kN	屈服弯矩/ (kN·m)	屈服曲率/ (10 ⁻⁶ mm ⁻¹)	极限弯矩/ (kN·m)	极限曲率/ (10 ⁻⁶ mm ⁻¹)	延性系数 μ
C-0-1	0	1 000	1 128	3.31	1 361	11.51	3.46
C-10-1	10	1 000	972	3.78	1 052	17.40	4.71
C-20-1	20	1 000	757	4.65	814	19.63	4.21
C-30-1	30	1 000	600	5.42	654	21.2	3.90
C-40-1	40	1 000	506	6.35	591	16.64	2.61
C-50-1	50	1 000	415	6.89	499	12.21	1.77
C-0-2	0	2 500	1 226	3.62	1 442	11.70	3.23
C-10-2	10	2 500	1 080	4.28	1 080	19.68	4.59
C-20-2	20	2 500	838	5.32	838	18.90	3.55
C-30-2	30	2 500	638	6.14	728	15.06	2.45
C-40-2	40	2 500	441	5.98	587	14.45	2.42
C-50-2	50	2 500	300	5.52	428	9.67	1.75

分析表中各构件的曲率延性系数可知:对于任意服役时间的构件,轴向力增大将减小其延性,该规律与常规未腐蚀构件的实验规律一致;轴向力不变时,构件的延性系数均随着服役时间先增大后减小,主要是由于服役初期柱的腐蚀程度较小,腐蚀反应生成的膨胀性物质增强了柱的受弯能力,且硫酸盐的腐蚀提高了混凝土的极限压应变,此时构件

的破坏由混凝土压碎控制,故柱屈服后仍能承受较大变形,但随着服役时间的增长,柱的腐蚀程度加深,构件破坏将由钢筋达到极限应变控制,此时构件弹塑性变形能力变差,延性下降。

3.2.3 抗震性能

为了研究氯盐-硫酸盐环境下混凝土柱在地震作用下的强度和刚度演变、变形特征和耗能能力变

化情况,现模拟其在低周反复荷载下的位移-荷载曲线,由于计算结果较多,图9给出部分服役时间点荷载-变形曲线,图10给出了相应骨架曲线。

从图9可以看出,加载初始阶段,不同服役时间的混凝土柱构件均处于弹性阶段,加卸载线趋于直

线,滞回环狭窄,其后,加载目标位移增大,构件进入屈服阶段,滞回环面积扩大,各滞回曲线均存在一定程度的捏缩,加载至峰值点后,随着加卸载循环次数增多,每次加载中,水平位移最大值对应的荷载值有所下降。

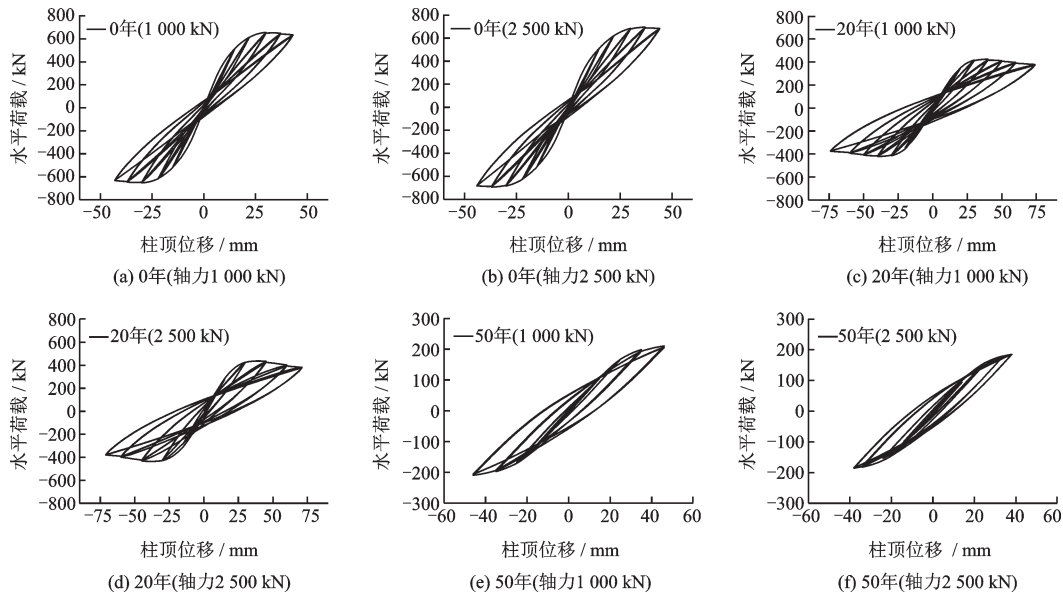


图9 不同服役时间下柱构件的滞回曲线

Fig.9 Hysteretic loops of columns with different service time

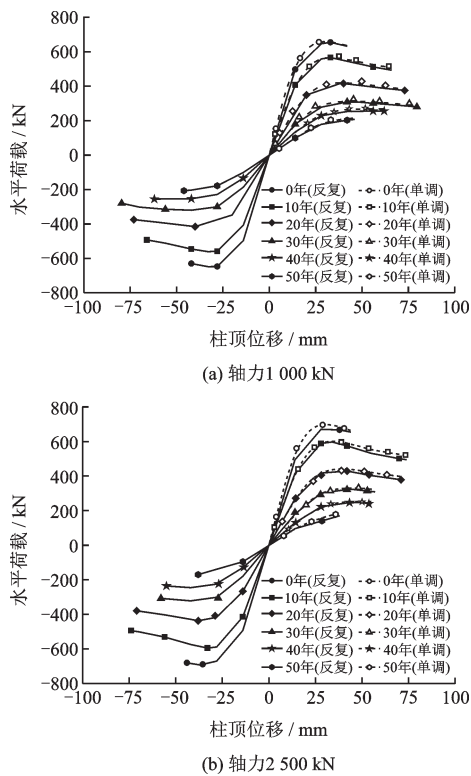


图10 不同服役时间构件的骨架曲线

Fig.10 Skeleton curves of columns with different service time

对比不同服役时间的各组构件,可以观察到,服役初期,柱的滞回曲线较饱满,呈“弓形”,构件具有良好的耗能能力,尽管化学侵蚀降低了柱的承载力,但由于腐蚀程度较小时构件的变形能力得到加强,其利用弹塑性变形消耗能量的能力提高,相应滞回曲线也较为丰满,但服役时间进一步增长时,随着构件的弹塑性变形能力逐渐降低,其滞回曲线包围的面积减小,构件耗能能力减弱。对比相同服役时间,不同轴向力的构件,在服役时间较短时,轴向力的增大能够加强柱承担水平荷载的能力,但随着服役时间增长,构件腐蚀程度加深,轴向力的增加降低了构件抵御水平荷载的能力;对于构件服役期间的任意时刻,轴力增加均会降低构件延性,故相较于低轴向力构件,高轴向力构件的滞回曲线显得更为“狭长”,其耗能能力弱于相同服役时间下的低轴力构件。轴向力的构件滞回曲线对角线的斜度反映了构件的抗侧刚度,随着侵蚀损伤的不断积累,图中柱构件的滞回曲线逐渐向横轴倾斜,表明构件刚度随服役时间降低。

分析图10的骨架曲线(虚线部分为单调加载时的荷载-位移曲线),可以观察到:骨架曲线与单调

加载曲线基本一致,具有明显的屈服点、极限点。构件处于弹性阶段时,骨架曲线和单调加载曲线基本重合,构件进入屈服阶段后,由于循环加卸载的影响,相同水平位移下,骨架曲线上的水平荷载值略低于单调加载曲线上的水平荷载值。轴向力大小对于反复荷载作用下的柱构件变形能力影响较大:总体而言,高轴向力作用下,构件的极限位移低于低轴力作用下构件的极限位移,构件的弹塑性变形能力下降,延性有所降低。

4 结 论

根据人们针对氯盐-硫酸盐环境中钢筋混凝土材料损伤演化的研究工作,给出了混凝土损伤本构模型和钢筋锈蚀后有效截面面积的计算公式,利用OpenSees软件建立了柱退化分析模型,研究了侵蚀环境下的钢筋混凝土柱的抗震性能演化,得到结论如下:

(1) 腐蚀环境中混凝土柱受压承载力的衰减先快后慢,在服役时间达到50年时,柱的受压承载力下降了65%。随着时间的推移,钢筋对受压承载力的贡献有所上升,而混凝土对承载力的贡献下降。

(2) 随着服役时间的增长,柱的受弯承载力和刚度逐年下降,而延性先上升后下降。服役时间较短时,轴向力的增加一定程度上提高了构件的受弯承载力,服役时间较长时,增大轴力将使受弯承载力降低。

(3) 服役初期,构件弹塑性变形能力有所提高,滞回曲线较丰满,但服役时间进一步增长时,由于构件的变形能力变差,其滞回曲线包围的面积减小,构件耗能能力减弱。构件的骨架曲线与单调加载曲线相近,但由于反复加卸载的影响,相同水平位移下,骨架曲线上的水平荷载值略低于单调加载曲线上的荷载值。

参考文献:

[1] 姜磊,牛获涛. 硫酸盐与冻融环境下混凝土损伤破坏准则研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 148-153.
Jiang L, Niu D T. Study on damage failure criterion of concrete under sulfate attack and freeze-thaw environment[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 148-153. (in Chinese)

[2] Afsar D E, Madandoust R, Kashani M M. Exploring the impact of chloride-induced corrosion on seismic damage limit states and residual capacity of reinforced concrete structures [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 14(6): 714-729.

[3] 邢国华,张亚兰,牛获涛. 锈蚀钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力计算[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(6): 1008-1015.
Xing G H, Zhang Y L, Niu D T. Prediction of shear bearing capacity of corroded reinforced concrete beams. [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(6): 1008-1015. (in Chinese)

[4] Biondini F, Camnasio E, Titi A. Seismic resilience of concrete structures under corrosion [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(14): 2445-2466.

[5] 孙香花,王佳林,左晓宝,等. 荷载-环境耦合作用下钢筋混凝土柱退化过程分析[J]. 南京理工大学学报, 2018, 42(2): 133-141.
Sun X H, Wang J L, Zuo X B, et al. Numerical investigation on degradation of reinforced concrete column subjected to coupling of loading and environment [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2018, 42(2): 133-141. (in Chinese)

[6] Yang D, Luo J. The damage of concrete under flexural loading and salt solution [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 129-134.

[7] Mirvalad S, Nokken M. Studying thaumasite sulfate attack using compressive strength and ultrasonic pulse velocity [J]. Materials and Structures, 2016, 49(10): 4131-4146.

[8] 梁咏宁,袁迎曙. 硫酸盐腐蚀后混凝土单轴受压本构关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008(4): 532-535.
Liang Y N, Yuan Y Sh. Constitutive relation of sulfate attacked concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008(4): 532-535. (in Chinese)

[9] Zhang J, Sun M, Hou D, et al. External sulfate attack to reinforced concrete under drying-wetting cycles and loading condition: Numerical simulation and experimental validation by ultrasonic array method [J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 365-373.

[10] Samson E, Marchand J. Modeling the transport of ions in unsaturated cement-based materials [J]. Computers and Structures, 2007, 85(23): 1740-1756.

(本文责编:周小潭)

(下转第402页)