

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.005



# 硫酸盐侵蚀下轴心受压钢筋混凝土柱 应力时变过程的数值分析

王佳林, 左晓宝, 马强, 殷光吉, 汤玉娟

(南京理工大学 土木工程系, 南京 210094)

**摘要:** 针对荷载和硫酸盐耦合作用过程中钢筋混凝土柱的应力分析问题, 在已有混凝土内硫酸根离子扩散反应模型的基础上, 进一步给出了硫酸盐侵蚀引起的混凝土损伤程度与硫酸根离子浓度及腐蚀时间之间的关系, 建立了与损伤程度相关的混凝土腐蚀本构模型及轴压混凝土柱截面应力的计算方法, 并通过数值模拟分析了柱截面内硫酸根离子传输、腐蚀损伤程度变化、截面应变和应力分布规律。结果表明: 硫酸根离子浓度和混凝土损伤程度在柱截面内呈梯度分布, 且受二维交互效应的影响明显; 随腐蚀时间的增加, 截面损伤区逐渐向内移动且其宽度增加, 而混凝土应力在损伤区呈先增加后逐渐降低、在未损伤区基本呈线性增加的趋势。硫酸盐侵蚀过程中, 轴压混凝土柱截面应力发生了明显的重分布现象。

**关键词:** 混凝土; 硫酸盐侵蚀; 轴心受压; 损伤; 应力重分布

**中图分类号:** TU375.3   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1674-4764(2018)01-0030-09

## Numerical analysis on time-varying process of stress in reinforced concrete column subjected to axial compression and sulfate attack

Wang Jialin, Zuo Xiaobao, Ma Qiang, Yin Guangji, Tang Yujuan

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the stress responses of reinforced concrete column subjected to the couplings of axial compression and sulfate attack, this paper applied an existed diffusion-reaction equation of sulfation in concrete to obtain a relationship between the sulfate-induced damage degree and the ion concentration and the corrosion time. On the basis, a concrete-corroded constitutive model related to the damage degree and a calculating approach for stress responses of concrete under the couplings of axial compression and sulfate attack were proposed. Through numerical solution on these models, the changes of sulfate ion concentration, damage degree, strain and stress in concrete with the corrosion time were analyzed. Results show that the sulfate ion concentration and damage degree has a gradient distribution in concrete, and they are obviously influenced by the two-dimensional interactions in the cross section. With

**收稿日期:** 2017-05-25

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51378262, 51778297); 江苏省自然科学基金 (BK20141396)

**作者简介:** 王佳林 (1994-), 男, 主要从事混凝土材料与结构研究, E-mail: jialinwang1994@163.com.

左晓宝 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xbzuo@sina.com.

**Received:** 2017-05-25

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51378262, 51778297); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20141396)

**Author brief:** Wang Jialin (1994-), main research interests: concrete materials and concrete structures, E-mail: jialinwang1994@163.com.

Zuo Xiaobao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xbzuo@sina.com.

the increase of corrosion time, the damage zone gradually moves inward the cross section, and its width has a gradual increase, and the stress in the damage zone increases firstly and then has a gradual decrease, but in the no damage zone, the stress has a basically linear increase. In the process of sulfate attack, there produces the stress redistribution in concrete under axial compression.

**Keywords:** concrete; sulfate attack; axial compression; damage; stress redistribution

长期处于滨海、地下水及盐渍土等侵蚀环境下的混凝土结构不仅承受各种荷载作用,还遭受硫酸盐等环境介质的物理化学侵蚀,导致混凝土结构的安全性和耐久性降低<sup>[1-2]</sup>。硫酸盐侵蚀过程中,环境中的硫酸根离子经扩散而进入混凝土内部,与水泥水化产物发生化学反应,导致混凝土腐蚀损伤<sup>[3]</sup>,造成其弹性模量、强度等宏观力学性能降低。由于渗入的硫酸根离子浓度在混凝土内呈梯度分布<sup>[4]</sup>,其内部损伤程度和力学性能发生不均匀变化。因此,荷载作用下混凝土结构或构件在硫酸盐侵蚀过程中,其截面力学性能发生不同程度的损伤退化,造成截面应力在损伤区降低、非损伤区上升,从而形成应力重分布现象,这种应力重分布规律与硫酸盐侵蚀混凝土的损伤退化过程密切相关。

硫酸盐侵蚀下混凝土损伤退化过程涉及离子传输、微结构演变及宏观性能劣化等方面。目前,基于多孔介质传输理论或 Fick 定律,建立了硫酸根离子在混凝土中传输的模型,获得了硫酸根离子在混凝土中的扩散反应规律<sup>[5-6]</sup>;利用 XRD、ESEM、EDS 等微观测试方法,研究了硫酸盐侵蚀下混凝土等水泥基材料中侵蚀产物的生长特点及其微结构演变规律,揭示了硫酸盐侵蚀混凝土微结构损伤机理<sup>[7-8]</sup>;通过混凝土试件在硫酸盐溶液中的腐蚀试验,开展了试件在不同腐蚀时间的力学性能测试,获得了混凝土强度、动弹性模量和泊松比等宏观力学性能参数随硫酸盐浓度、腐蚀时间的变化规律<sup>[9-11]</sup>;此外,人们还开展了硫酸侵蚀后混凝土抗压实验研究,获得了不同腐蚀时间及应变速率等条件下混凝土本构模型<sup>[12-14]</sup>。上述研究主要揭示了硫酸盐侵蚀过程中混凝土的损伤劣化机理及其强度、刚度等宏观力学性能的退化规律,但对荷载和硫酸盐侵蚀耦合作用过程中混凝土结构构件截面应力重分布及其演变过程的相关研究涉及较少。

应力重分布问题是混凝土结构分析与设计所关注的重要问题之一<sup>[15]</sup>,笔者以硫酸盐环境下轴向受压混凝土为研究对象,针对混凝土试件在硫酸盐侵蚀过程中的截面应力重分布问题,建立硫酸根离子

在混凝土内的传输模型、混凝土损伤程度与硫酸根离子浓度和腐蚀时间之间的关系、考虑损伤程度影响的硫酸盐侵蚀混凝土腐蚀本构模型,在此基础上,建立硫酸盐侵蚀过程中轴心受压混凝土试件截面应力重分布过程的计算方法。

## 1 模型

### 1.1 扩散反应方程

为分析硫酸根离子( $\text{SO}_4^{2-}$ )在混凝土中的扩散反应规律,假设混凝土为均质各向同性多孔材料,且忽略压应力对混凝土传输性能的影响,根据 Fick 定律,可建立  $\text{SO}_4^{2-}$  在混凝土内的二维扩散反应方程。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial C_d}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $c(x, y, t)$  为  $t$  时混凝土截面  $(x, y)$  的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度; $t$  为腐蚀时间; $C_d = C_d(x, y, t)$  为混凝土内因化学反应而消耗的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度; $D_c$  为混凝土中考虑损伤的  $\text{SO}_4^{2-}$  扩散系数,按式(2)计算。

$$D_c = [\varphi + \omega(c, t)] D_{c0} \quad (2)$$

式中: $\varphi$  为侵蚀过程中混凝土的孔隙率<sup>[16]</sup>;  $D_{c0}$  为混凝土初始扩散系数; $\omega(c, t)$  为考虑混凝土损伤的  $\text{SO}_4^{2-}$  扩散系数修正值,与  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度及腐蚀时间有关,详见文献[4]。

对于扩散反应方程(1),其初始和边界条件为

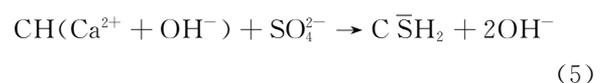
$$\begin{cases} \text{初始条件: } c(x, y, 0) = 0, (x, y) \in \Omega \\ \text{边界条件: } c(x, 0, t) = c_s, c(0, y, t) = c_s \\ c(L_1, y, t) = c_s, c(x, L_2, t) = c_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Omega$  为试件截面区域; $L_1$  和  $L_2$  分别为试件截面的长度和宽度; $c_s$  为混凝土试件表层  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度。

$$c_s = \varphi_s c_0 \quad (4)$$

式中: $c_0$  为环境  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度; $\varphi_s$  为表层混凝土孔隙率。

硫酸盐侵蚀下, $\text{SO}_4^{2-}$  因化学反应而消耗<sup>[17]</sup>,式(5)为  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成石膏的化学反应式,假定该反应为二级,则  $C_d$  可按式(6)计算。



$$\frac{\partial C_d}{\partial t} = -k_v \cdot c_{Ca} \cdot c \quad (6)$$

式中： $k_v$  为化学反应速率常数； $c_{Ca}$  为混凝土孔溶液中钙离子浓度。

### 1.2 腐蚀损伤程度

根据文献[18],  $SO_4^{2-}$  浓度和腐蚀时间是影响混凝土腐蚀损伤程度的主要因素, 因此认为, 在硫酸盐侵蚀混凝土过程中, 混凝土腐蚀损伤速率与渗入至混凝土内的  $SO_4^{2-}$  浓度成正比, 且忽略初始腐蚀时所生成的钙矾石等侵蚀产物对混凝土孔隙的填充作用, 混凝土未损伤和达到完全损伤时, 其腐蚀损伤程度分别为 0 和 1, 则有

$$\frac{\partial d(x, y, t)}{\partial t} = \begin{cases} q_c c(x, y, t) & t_0 \leq t \leq t_u \\ 0 & t \leq t_0, t \geq t_u \end{cases} \quad (7)$$

式中： $d$  为混凝土的腐蚀损伤程度,  $d \in [0, 1]$ ； $t$  为腐蚀时间； $(x, y)$  为混凝土试件截面位置； $q_c$  为混凝土蚀强率系数； $c$  为混凝土中的  $SO_4^{2-}$  浓度, 可按式(1)数值求解； $t_0$  为混凝土初始腐蚀时间； $t_u$  为混凝土完全损伤时间。

通过积分求解, 式(7)变为

$$d(x, y, t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_0 \\ \int_{t_0}^t q_c c(x, y, t) dt & t_0 < t < t_u \\ 1.0 & t \geq t_u \end{cases} \quad (8)$$

硫酸盐侵蚀过程中, 混凝土腐蚀损伤程度与  $SO_4^{2-}$  浓度及腐蚀时间之间的关系如图 1 所示。

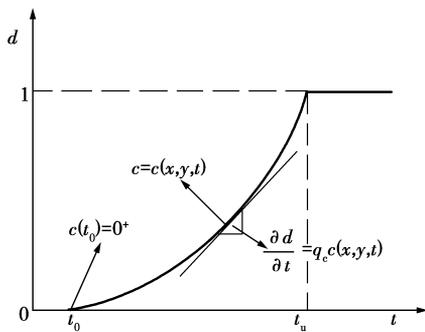
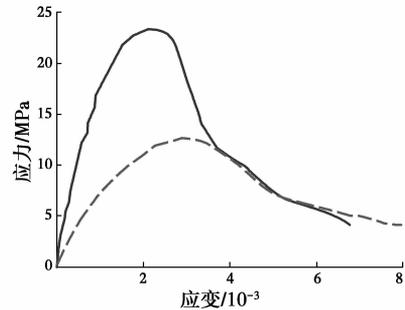


图 1 混凝土腐蚀损伤程度与  $SO_4^{2-}$  浓度及腐蚀时间的关系  
Fig. 1 Relationship of concrete damage degree with sulfate concentration and corrosion time

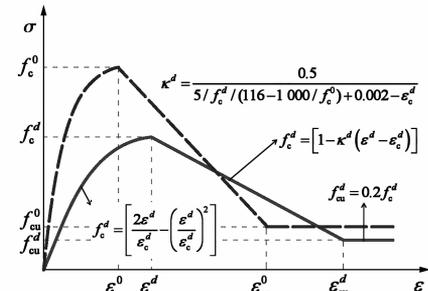
### 1.3 腐蚀本构模型

实验结果[12]表明, 硫酸盐腐蚀后, 混凝土弹性模量和峰值应力出现了明显降低, 而其峰值应变和极限应变却增加, 但腐蚀后的混凝土应力-应变曲线形状与未腐蚀混凝土应力-应变曲线形状基本一致, 如图 2(a) 所示; 此外, 箍筋对混凝土的约束作用随

着腐蚀时间的增加而降低, 这是由于受腐蚀混凝土的开裂和剥落[8], 使其在箍筋发生约束作用[15]前就已退出工作状态。因此, 以与混凝土峰值应力和峰值应变有关的 Kent-Park 本构模型[19]为基础, 引入硫酸盐侵蚀混凝土的损伤程度  $d$ , 并忽略箍筋对腐蚀混凝土的约束作用(箍筋固定纵向钢筋而形成钢筋骨架), 则基于 Kent-Park 的腐蚀损伤程度为  $d$  的混凝土本构模型如图 2(b) 所示, 其表达式为



注: — 腐蚀前 --- 腐蚀后  
(a) 腐蚀前后的混凝土实测应力-应变曲线



注: --- Kent-Park 本构( $d=0$ ) — Kent-Park 损伤本构( $d$ )  
(b) 考虑腐蚀影响的 Kent Park 本构模型

图 2 混凝土腐蚀损伤本构模型

Fig. 2 Damage constitutive model of the concrete due to sulfate attack

$$\sigma^d = \begin{cases} f_c^d \left[ \frac{2\epsilon_c^d}{\epsilon_c^d} - \left( \frac{\epsilon^d}{\epsilon_c^d} \right)^2 \right] & 0 \leq \epsilon^d \leq \epsilon_c^d \\ f_c^d [1 - \kappa^d (\epsilon^d - \epsilon_c^d)] & \epsilon_c^d < \epsilon^d < \epsilon_{cu}^d \\ f_{cu}^d & \epsilon_{cu}^d < \epsilon^d \end{cases} \quad (9)$$

式中： $d$  为腐蚀混凝土的损伤程度, 由式(8)确定； $\sigma^d$  表示腐蚀损伤程度为  $d$  的混凝土应力； $\epsilon^d$  表示腐蚀损伤程度为  $d$  的混凝土应变； $f_c^d$  为腐蚀损伤程度为  $d$  的混凝土峰值应力, 可按式(10)计算。

$$f_c^d = [1 - d(x, y, t)] f_c^0 \quad (10)$$

式中： $f_c^0$  为未腐蚀混凝土峰值应力； $f_{cu}^d$  为腐蚀损伤程度为  $d$  的混凝土极限应力, 可按其峰值应力的 20% 计算[15], 即

$$f_{cu}^d = 0.2 f_c^d \quad (11)$$

式中： $\epsilon_c^d$  为腐蚀损伤程度为  $d$  的混凝土峰值应变,

可按文献[12]实验数据的拟合公式确定,即

$$\epsilon_c^d = [2.18 - 1.18\sqrt{1 - d(x, y, t)}] \epsilon_c^0 \quad (12)$$

式中:  $\kappa^d$  为腐蚀损伤程度为  $d$  的混凝土应力-应变曲线软化段斜率<sup>[19]</sup>

$$\kappa^d = \frac{0.5}{5/f_c^d / (145 - 1\ 000/f_c^d) + 0.002 - \epsilon_c^d} \quad (13)$$

式中:  $\epsilon_{cu}^d$  为腐蚀损伤程度为  $d$  的混凝土极限应变, 利用式(10)~式(13), 可得

$$\epsilon_{cu}^d = \frac{0.8}{\kappa^d} + \epsilon_c^d \quad (14)$$

### 1.4 柱截面应力重分布

硫酸盐侵蚀过程中, 混凝土柱截面上的腐蚀损伤程度呈不均匀变化, 导致峰值应力、极限应力和峰值应变、极限应变等参数也分布不均, 因此, 在一定荷载作用下, 其截面应力分布随损伤程度的变化而改变。根据混凝土柱截面各点的损伤程度与  $SO_4^{2-}$  浓度及腐蚀时间之间的关系, 并认为硫酸盐侵蚀过程中混凝土柱截面仍符合平截面假定, 且硫酸盐仅侵蚀混凝土而对纵向钢筋无腐蚀作用, 则在轴压荷载  $N_0$  和硫酸盐耦合作用过程中, 钢筋混凝土柱截面应力分布应满足力学平衡条件

$$N_0 = \iint_{\Omega} \sigma^d(\epsilon^d) dx dy + \sigma_s(\epsilon^d) A_{ur} \quad (15)$$

式中:  $N_0$  为试件轴心受压荷载;  $dx$  和  $dy$  分别为试件截面尺寸微分;  $A_{ur}$  为纵向钢筋截面面积;  $\sigma_s$  为纵向钢筋应力, 按钢筋弹性强化本构模型确定<sup>[15]</sup>。

根据式(1)、式(6)、式(8)、式(9)和式(15), 通过数值迭代法求解, 可获得硫酸盐侵蚀过程中钢筋混凝土柱截面应力分布随损伤程度的变化规律。

## 2 数值求解

### 2.1 网格划分

利用式(15)计算获得硫酸盐侵蚀过程中钢筋混凝土柱截面应力分布的变化规律, 需要其截面  $SO_4^{2-}$  浓度的时空分布规律。为此, 利用纤维网格模型, 将柱截面纤维化, 并通过有限差分法, 建立混凝土柱截面  $SO_4^{2-}$  浓度和应力分布的计算方法。

以浸泡在硫酸钠溶液中的轴心受压钢筋混凝土矩形截面试件为研究对象, 如图 3 所示, 将截面区域  $\Omega(L_1 \times L_2)$  沿长度和宽度方向等分为间距为  $h$  的网格, 并取服役时间间隔为  $\Delta t$ , 因此,  $\Omega(L_1 \times L_2)$  网格节点坐标为  $(x_i, y_j, t_k)$ , 而点  $(x_i, y_j, t_k)$  处的  $SO_4^{2-}$  浓度可表示为  $c_{i,j}^k$ , 利用交替方向隐格式的有限差

分方法<sup>[20]</sup>, 可求解试件截面上点  $(x_i, y_j)$  在  $t_k$  时的  $SO_4^{2-}$  浓度  $c_{i,j}^k$ , 其数值求解过程可参考文献[21]。

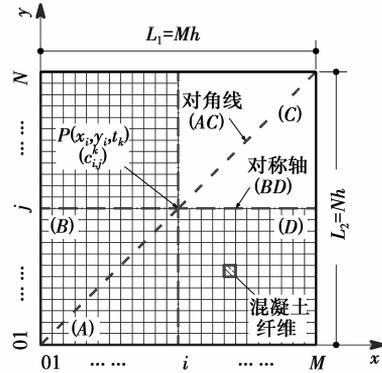


图 3 混凝土试件截面网格划分

Fig. 3 Mesh of cross section of concrete specimen

### 2.2 损伤程度计算

硫酸盐侵蚀过程中, 混凝土损伤程度  $d(x, y, t)$  的计算式(8)是一个与硫酸根离子浓度相关的积分公式, 需要按照图 3 所示的网格划分方法, 进一步对式(8)进行数值离散。

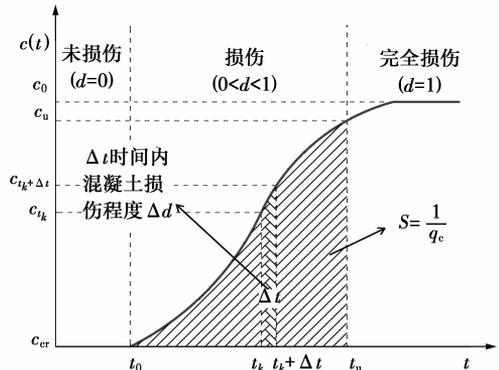


图 4 积分求解混凝土腐蚀损伤程度

Fig. 4 Integral calculation of concrete damage degree

$$d(x_i, y_j, t_k) = \int_{t_0}^{t_k} q_c c(x_i, y_j, t) dt = q_c \left[ \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} c(x_i, y_j, t) dt + \dots + \int_{t_0 + (k-1)\Delta t}^{t_0 + k\Delta t} c(x_i, y_j, t) dt \right] \approx q_c (0.5c_{i,j}^0 + c_{i,j}^1 + \dots + c_{i,j}^{k-1} + 0.5c_{i,j}^k) \Delta t \quad (16)$$

式(16)表明, 在腐蚀时间为  $t_k$  时, 混凝土试件截面位置  $(x_i, y_j)$  处的腐蚀损伤程度可通过图 4 中的阴影区面积  $S$  表征。

$$S = [0.5c_{i,j}^0 + c_{i,j}^1 + \dots + c_{i,j}^{k-1} + 0.5c_{i,j}^k] \Delta t \quad (17)$$

即, 试件截面  $(x_i, y_j)$  处的混凝土腐蚀损伤程度为

$$d_{i,j}^k = q_c S \quad (18)$$

因此,根据  $SO_4^{2-}$  浓度分布  $c_{i,j}^k$ , 利用式(17)和(18),可得硫酸盐侵蚀过程中混凝土损伤程度  $d_{i,j}^k$ 。

### 2.3 截面应力求解

为了获得轴压荷载作用下钢筋混凝土柱在硫酸盐侵蚀过程中的截面应力重分布规律,根据平截面假定,腐蚀过程中试件截面各位置处的应变均相同,且与混凝土损伤程度有关,即  $\epsilon_{i,j}^d = \epsilon^d$ , 而混凝土的损伤程度与腐蚀时间存在相关性。因此,式(15)可进一步离散为

$$N_0 = \sum_{e=1}^{M \times N} \sigma_{i,j}^k(\epsilon^k) A_{ce} + \sigma_s(\epsilon^k) A_{ur} \quad (19)$$

式中:  $e$  为试件截面纤维网格单元;  $M \times N$  为网格单元的数目;  $A_{ce}$  为网格单元面积。

对于轴压荷载  $N_0$  作用下的钢筋混凝土柱,取应变增量  $\Delta \epsilon$ , 并根据混凝土的腐蚀本构方程式(9)及平衡方程式(19)进行迭代计算,以获得不同腐蚀损伤程度下满足式(19)的混凝土试件截面应变  $\epsilon^k$  及相应的截面应力  $\sigma_{i,j}^k$ 。用 MATLAB 语言编制相应的计算机程序,其程序框图如图 5 所示。该程序可数

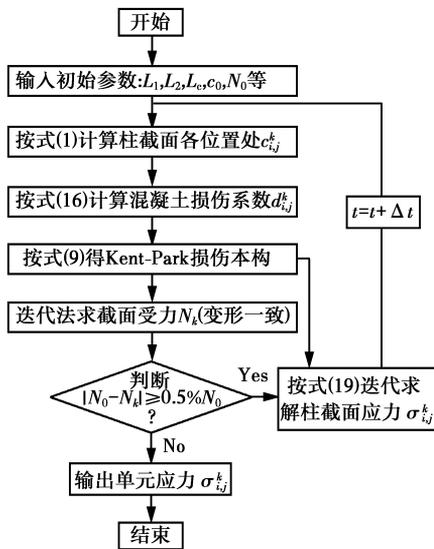


图 5 柱截面应力计算框图

Fig. 5 Calculating flowchart of column section's stress

值分析轴压荷载和硫酸盐耦合作用下钢筋混凝土柱截面应力分布随腐蚀时间的变化规律。

## 3 数值算例

### 3.1 初始参数

为了分析轴心受压荷载和硫酸盐侵蚀耦合作用过程中钢筋混凝土柱的截面应力重分布规律,利用建立的模型,对浸泡于硫酸钠溶液中的轴心受压混凝土柱截面应力变化过程进行数值模拟,分析混凝土柱截面内  $SO_4^{2-}$  浓度、腐蚀损伤程度、应变和应力分布的变化规律。图 6 为该钢筋混凝土柱截面配筋图(忽略箍筋的约束作用,故混凝土柱承载力较设计值低,相应的结构安全系数更高),其中,混凝土的强度等级为 C40,配合比为水泥:水:砂:石子 = 1:0.45:1.43:2.77,相应的力学性能参数如表 1 所示;纵向钢筋的弹性模量为 200 GPa,屈服强度为 400 MPa,屈服时的压应变为 0.002,应变硬化系数为 0.01。考虑到  $SO_4^{2-}$  扩散传输特点与柱截面的对称性,取柱截面 1/4 进行计算。模型中采用的计算参数如表 2 所示。

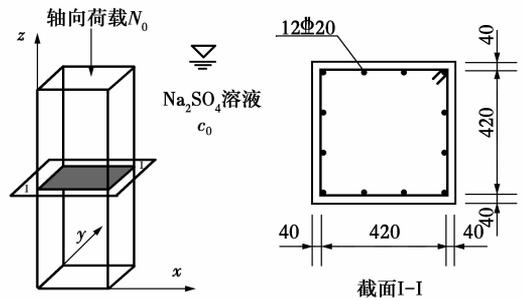


图 6 混凝土柱截面配筋

Fig. 6 Reinforced concrete column section

表 1 混凝土力学参数

Table 1 Mechanical parameters of concrete

强度等级	抗压强度 $f_c^0$ /MPa	峰值应变 $\epsilon_c^0$	极限强度 $f_{cu}^0$ /MPa	极限应变 $\epsilon_{cu}^0$
C40	26.8	0.0018	5.36	0.0056

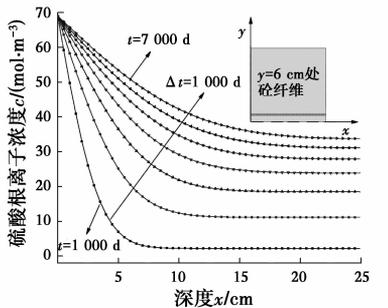
表 2 模型中的相关计算参数

Table 2 Calculation parameters in the model

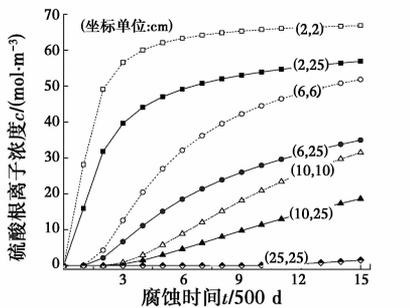
网格及计算参数			材料参数				环境参数					
1/4 柱截面尺寸 $L_1 \times L_2$	应变增量 $\Delta \epsilon$	空间增量 $h/cm$	时间增量 $\Delta t/d$	水灰比 $w/c$	初始孔隙率 $\varphi_s/\%$	蚀强率系数 $q_c/(m^3 \cdot (s \cdot mol)^{-1})$	化学反应速率 $kv/(m^3 \cdot (s \cdot mol)^{-1})$	初始扩散系数 $D_c^0/(m^2 \cdot s^{-1})$	环境温度 $T/^\circ C$	离子浓度 $c_0/(mol \cdot m^{-3})$	$Ca^{2+}$ 饱和浓度 $c_{ca}/(mol \cdot m^{-3})$	恒载 $N_0/kN$
25 cm × 25 cm	$1.0 \times 10^{-6}$	0.5	10	0.45	10	$1.21 \times 10^{-5}$	$3.05 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^{-10}$	25	69	21.25	3 000

### 3.2 结果及分析

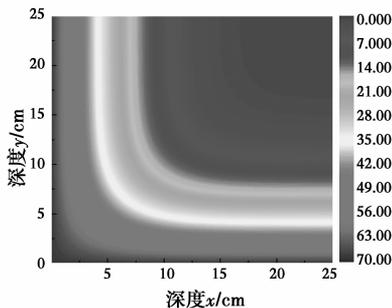
3.2.1 硫酸根离子浓度 图 7 给出了  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度随截面位置与腐蚀时间的变化。从图 6(a)可以看出,在柱截面  $y=6\text{ cm}$  位置处,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度随  $x$  方向深度的增加而降低,且其降低速率在柱表层为最大,并随深度的增加而趋于稳定,而在一定的深度内,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度随腐蚀时间的增加而增加。从图 7(b)给出的柱截面对角线(AC)及对称轴(BC)上 4 个深度( $x=2, 6, 10, 25\text{ cm}$ )处  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度随腐蚀时间的变化关系,可以看出,处于对角线 AC 上点的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度大于非对角线 BC 的点,其中,在  $x=6\text{ cm}$  处,腐蚀 4 000 d 时非对角线 BC 及对角线 AC 上的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度分别为  $23.87\text{ mol/m}^3$  和  $39.50\text{ mol/m}^3$ ,后者是前者的 1.65 倍左右,这说明二维交互作用对



(a)  $y=6\text{ cm}$  处  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度随位置的变化



(b) 不同位置点  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度随时间的变化



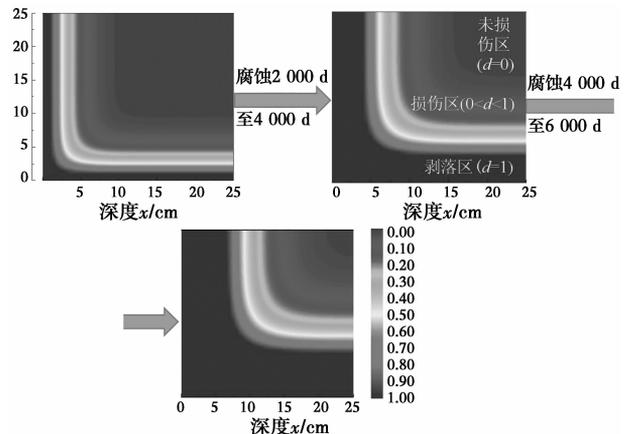
(c) 腐蚀 4 000 d 时  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度分布图

图 7 柱截面上硫酸根离子浓度随截面位置与腐蚀时间的变化

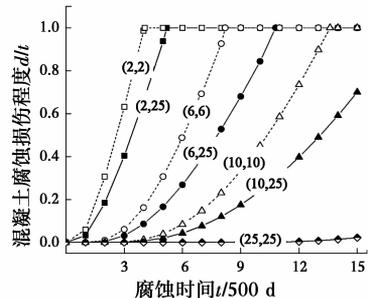
Fig. 7 Time- and spatial-varying sulfate ion concentration in concrete column section

$\text{SO}_4^{2-}$  扩散反应进程具有较大的影响。图 7(c) 给出了硫酸盐腐蚀 4 000 d 时混凝土柱截面  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的空间分布情况。

3.2.2 腐蚀损伤程度 硫酸盐侵蚀下柱截面的损伤状态含未损伤、损伤和剥落区,对应的混凝土损伤程度分别为  $d=0, 0 < d < 1$  和  $d=1$ 。图 8(a) 给出了腐蚀 2 000、4 000 及 6 000 d 时混凝土腐蚀损伤程度在柱截面上的分布规律,由图可知,截面损伤区内混凝土的腐蚀损伤程度呈梯度分布,且随着腐蚀时间的增加,损伤区向截面内部移动且宽度逐渐增加,导致剥落区增加、未损伤区减小。为了分析二维交互作用对混凝土腐蚀损伤程度的影响,图 8(b) 给出了柱截面对角线(AC)及非对角线(BC)上 4 个位置( $x=2, 6, 10, 25\text{ cm}$ )处混凝土腐蚀损伤程度随腐蚀时间的变化,由图可知,柱截面各位置处混凝土的腐蚀损伤程度随腐蚀时间的增加而增加,且在相同的腐蚀时间下,处于对角线 AC 上的混凝土腐蚀损伤程度明显高于非对角线 BC,其中,在柱截面  $x=6\text{ cm}$  处的 AC 和 BC 处点(6,6)和(6,25),在腐蚀 4 000 d 时的损伤程度分别为 0.93 和 0.53,因此,



(a) 不同腐蚀时间时柱截混凝土的腐蚀损伤程度分布



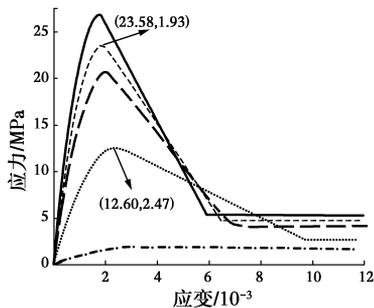
(b) 不同位置处损伤程度随腐蚀时间变化

图 8 混凝土腐蚀损伤程度随截面位置与腐蚀时间的变化关系

Fig. 8 Time- and spatial-varying damage degree in concrete column section

$\text{SO}_4^{2-}$  传输的二维交互作用明显地加剧了混凝土的腐蚀损伤进程。图 8(c) 给出了柱截面对角线 AC 上混凝土腐蚀损伤程度的时空分布情况。

3.2.3 应力应变曲线 图 9 给出了腐蚀 4 000 d 时钢筋混凝土柱截面不同位置处 ( $d$  为各位置点的损伤程度) 混凝土的应力应变曲线。从图中可以看出, 腐蚀 4 000 d 时, 各位置处混凝土的应力应变曲线形状基本一致, 但峰值应力、峰值应变等参数随  $d$  的变化而变化, 其中, 混凝土的峰值应力随着  $d$  的增加而不断减小, 而峰值应变随着  $d$  的增加而增大, 如非对角线 BC 上点 (10, 25) ( $d=0.12$ ) 的峰值应力和峰值应变分别为 23.58 MPa 及  $1.93 \times 10^{-3}$ , 而点 (6, 25) ( $d=0.53$ ) 的峰值应力和峰值应变分别为 12.60 MPa 及  $2.47 \times 10^{-3}$ , 二者对比发现, 前者混凝土的腐蚀损伤程度较小, 其峰值应力是后者 1.87 倍, 但峰值应变较后者小  $0.54 \times 10^{-3}$ 。此外, 从图 9 中还可知, 混凝土软化段斜率随  $d$  的增加而减小, 最后变为 0, 而极限应变增大。



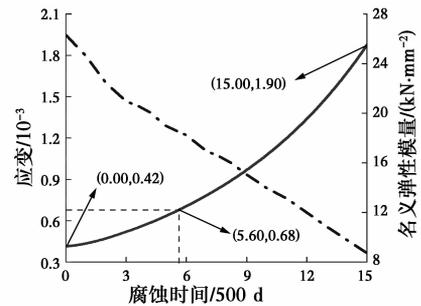
注: — (25, 25):  $d=0.00$  --- (10, 25):  $d=0.12$  ..... (6, 25):  $d=0.53$   
- · - (10, 10):  $d=0.23$  - - - (6, 6):  $d=0.93$

图 9 柱截面不同位置处的混凝土腐蚀损伤本构

Fig. 9 The concrete-corroded constitutive model at different positions of section

3.2.4 柱截面应变及名义弹性模量 在平截面假定的条件下, 轴压混凝土柱截面应变仅与腐蚀时间有关, 图 10 给出了硫酸盐侵蚀混凝土柱截面应变随腐蚀时间的变化规律。从图中可以看出, 在竖向荷载 3 000 kN 作用下, 从硫酸盐侵蚀前至腐蚀, 混凝土柱截面应变从腐蚀前的  $0.42 \times 10^{-3}$  增加至腐蚀 2 800 d 时  $0.68 \times 10^{-3}$ , 且其基本呈线性增加; 而当腐蚀时间从 2 800 d 增加到 7 500 d 时, 柱截面应变上升至  $1.90 \times 10^{-3}$ , 超过混凝土的初始峰值应变 ( $1.80 \times 10^{-3}$ ), 因此, 在硫酸盐侵蚀混凝土的后期, 其柱截面应变增加明显。此外, 根据截面应变随腐蚀时间的变化, 可计算硫酸盐侵蚀过程中混凝土名

义弹性模量 ( $E=N_0 A^{-1} \epsilon^{-1}$ ) 随腐蚀时间的变化情况, 图 10 表明, 硫酸盐侵蚀过程中, 混凝土的弹性模量随腐蚀时间的增加而降低。

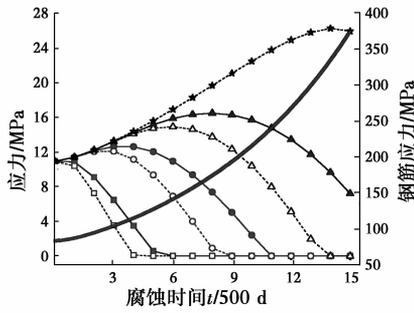


注: — 柱截面的应变 - - 名义弹性模量

图 10 柱截面应变及混凝土名义弹性模量随腐蚀时间的变化

Fig. 10 Change of the section strain and the elastic modulus of concrete with the corrosion time

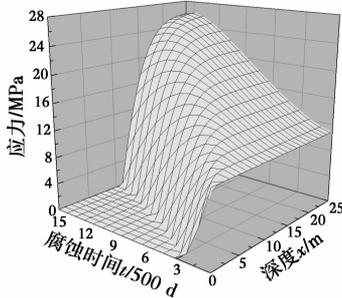
3.2.5 柱截面应力 图 11 给出了硫酸盐侵蚀过程中柱截面应力随截面位置及腐蚀时间的变化关系。从图 11(a) 中可以看出, 柱截面钢筋应力随腐蚀时间的增加而增加, 且增加速度不断增大, 而混凝土的应力变化与截面位置及腐蚀时间有关。结合图 8 (b) 可知, 柱截面内混凝土未损伤时 (如位置点 (25, 25)) 的应力随腐蚀时间的增加而增加, 但损伤区内的应力分布因混凝土腐蚀损伤程度的增加而呈现不同的变化特点, 其中, 柱表面混凝土应力随腐蚀时间的增加而降低, 并在较短的时间内降低至 0, 但柱截面内部的混凝土应力随腐蚀时间的增加而先增加后逐渐降低至 0, 且该应力峰值随截面深度的增加而增加, 如柱截面点 (6, 6) 和 (10, 10) 的应力峰值分别 12.07 MPa 及 14.91 MPa。此外, 在图 11(a) 中还可以看出, 处于柱截面对角线 (AC) 上的点均在非对角线 (BC) 之下, 这说明, 处于对角线位置的混凝土应力小于非对角线位置处的应力, 如在  $x=6$  cm 处, AC 及 BC 处混凝土在腐蚀时间为 2 500 d 时的应力分别为 9.34 MPa 与 12.03 MPa, 可见,  $\text{SO}_4^{2-}$  传输的二维交互作用对柱截面混凝土应力分布影响明显。图 11(b) 给出了柱截面对角线 AC 上混凝土应力的时空变化规律。由图可知, 在一定的腐蚀时间, 柱截面损伤区内混凝土应力随着深度的增加而增大, 而未损伤区内各点的混凝土应力基本相同。图 11(c) 给出了硫酸盐腐蚀 4 000 d 时柱截面上混凝土应力的分布情况。



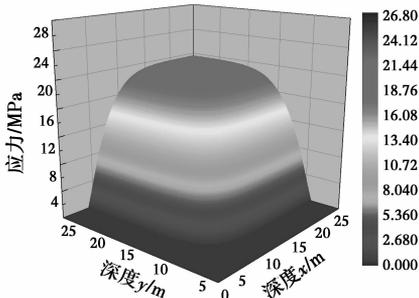
注: — (2,25) - - (2,2) — (6,25) - - (6,6) — (10,25)

- - (10,10) — (25,25) — 钢筋应力

(a) 截面各位置处应力随腐蚀时间变化



(b) 对角线AC上应力的时空分布



(c) 腐蚀4 000 d时柱截面的应力分布

图 11 混凝土柱截面应力随截面位置与腐蚀时间的变化

Fig. 11 Time-and spatial-varying stress in concrete column section

### 4 结论

通过数值模拟,研究了轴心受压荷载和硫酸盐侵蚀耦合作用下钢筋混凝土柱截面内离子传输、腐蚀损伤演变、截面应变和应力的变化规律,结果表明:

1)硫酸盐侵蚀过程中,混凝土柱截面内硫酸根离子浓度呈梯度分布,且除了随腐蚀时间的增加而增加外,还明显受柱截面二维交互效应的影响。

2)在混凝土柱截面内存在硫酸盐腐蚀损伤区,该腐蚀损伤区随腐蚀时间逐渐向截面内部移动,且其宽度也逐渐增加。

3)在一定轴心受压荷载作用下,混凝土柱截面应变随腐蚀时间的增加而增加,且其名义弹性模量降低。

4)轴心受压荷载作用下,柱截面钢筋应力随硫酸盐腐蚀时间的增加而增加,而柱截面混凝土应力在未损伤区内随腐蚀时间的增加而增加,但在损伤区内随腐蚀时间的增加而呈现先增加后逐渐降低,可见,在硫酸盐侵蚀过程中,钢筋混凝土柱截面发生了明显的应力重分布现象。

### 参考文献:

[ 1 ] JIANG L, NIU D T. Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles [J]. Construction and Building Materials, 2016, 117: 88-98.

[ 2 ] 姚明博, 李镜培. 混凝土灌注桩中混含硫酸盐的时变分布规律[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5): 95-100.

YAO M B, LI J P. Theoretical analysis of the time-varying distribution behavior of bored pile internal mixed sulfate [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(5): 95-100. (in Chinese)

[ 3 ] 殷光吉, 左晓宝, 孙伟, 等. 硫酸盐侵蚀下水泥净浆膨胀应变计算[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 119-125.

YIN G J, ZUO X B, SUN W, et al. Numerical simulation of the expansive strain in cement paste subjected to sulfate attack [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 119-125. (in Chinese)

[ 4 ] SUN C, CHEN J, ZHU J, et al. A new diffusion model of sulfate ions in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 39: 39-45.

[ 5 ] LORENTE S, YSSORCHE-CUBAYNES M P, AUGER J. Sulfate transfer through concrete: Migration and diffusion results [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(7): 735-741.

[ 6 ] TAI I, CAVALARO S H P, SEGURA I, et al. Alternative methodology to consider damage and expansions in external sulfate attack modeling [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 63: 105-116.

[ 7 ] LIU Z, DE SCHUTTER G, DENG D, et al. Micro-analysis of the role of interfacial transition zone in “salt weathering” on concrete [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11): 2052-2059.

[ 8 ] JIANG L, NIU D T, SUN Y Z, et al. Ultrasonic testing and microscopic analysis on concrete under sulfate attack and cyclic environment [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(12): 4723-4731.

[ 9 ] YANG D Y, LUO J J. The damage of concrete under flexural loading and salt solution [J]. Construction and

- Building Materials, 2012, 36(4): 129-134.
- [10] SONG H, CHEN J K. Effect of damage evolution on poisson's ratio of concrete under sulfate attack [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2011, 24(3): 209-215.
- [11] MIRVALAD S, NOKKEN M. Studying thaumasite sulfate attack using compressive strength and ultrasonic pulse velocity [J]. Materials and Structures, 2016, 49(10): 4131-4146.
- [12] 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, 40(4): 532-535.  
LIANG Y N, YUAN Y S. Constitutive relation of sulfate attacked concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(4), 532-535. (in Chinese)
- [13] 刘汉昆, 李杰. 受侵蚀混凝土本构关系[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(6): 736-741.  
LIU H K, LI J. Constitutive law of attacked concrete [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(6): 736-741. (in Chinese)
- [14] 邹笃建, 刘铁军, 滕军. 硫酸钠侵蚀混凝土柱动态抗压特性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(6): 742-745.  
ZOU D J, LIU T J, TENG J. Research on dynamics compressive behavior of plain concrete columns suffering from sulfate attack [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(6): 742-745. (in Chinese)
- [15] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
GUO Z H. Reinforced concrete principle [J]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [16] ZUO X B, SUN W, YU C. Numerical investigation on expansive volume strain in concrete subjected to sulfate attack [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36(4): 404-410.
- [17] 左晓宝, 孙伟. 硫酸盐侵蚀下的混凝土损伤破坏全过程[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(7): 1063-1067.  
ZUO X B, SUN W. Full process analysis of damage and failure of concrete subjected to external sulfate attack [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(7): 1063-1067. (in Chinese)
- [18] BONTEMPI F, BIONDINI F, DAN M F, et al. Cellular automata approach to durability analysis of concrete structures in aggressive environments [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1724-1737.
- [19] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, 79(2): 13-27.
- [20] 陆金甫. 偏微分方程数值解法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
LU J F. Numerical methods for partial differential equations [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [21] ZUO X B, SUN W, LI H, et al. Modeling of diffusion-reaction behavior of sulfate ion in concrete under sulfate environments [J]. Computers and Concrete, An International Journal, 2012, 10(1): 47-51.

(编辑 胡英奎)