

文章编号:1007-9629(2023)10-1047-07

硫酸盐侵蚀混凝土的数值模拟

蒋金洋^{1,*}, 郑皓睿², 孙国文², 王凤娟¹, 刘志勇¹

(1. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189;

2. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为了客观评价硫酸盐侵蚀下混凝土传输-反应-损伤的全过程,基于结晶压理论、体积膨胀理论及 Fick 第二定律,建立了考虑孔隙率、曲折度和临界损伤程度的传输模型,并通过交替隐式差分法实现了硫酸盐传输变系数求解.结果表明:预测模型结果与试验结果基本吻合,最大误差为 26.7%,可较好地预测混凝土中 SO_4^{2-} 的扩散规律;硫酸盐质量分数和临界损伤程度对混凝土剥落具有较大的影响,相同临界损伤程度下 5% 硫酸钠溶液中混凝土的剥落速率比其在 3% 硫酸钠溶液中快 51.8%;相同硫酸盐质量分数下临界损伤程度从 0.80 增大至 0.95 时,混凝土的剥落厚度减小了 42.9%.

关键词:混凝土;硫酸盐;传输-反应;临界损伤程度;孔结构;数值模拟

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.10.001

Numerical Simulation of Sulfate Attack in Concrete

JIANG Jinyang^{1,*}, ZHENG Haorui², SUN Guowen², WANG Fengjuan¹, LIU Zhiyong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: To objectively evaluate the whole process of transport-reaction-damage of concrete under sulfate attack, a transport model considering porosity, tortuosity and critical damage degree was established based on the theory of crystallization pressure, volume expansion theory and Fick's second law. The variable coefficient of sulfate transport was solved by alternating implicit difference method. The results show that the prediction model results are basically consistent with the experimental results, with the maximum error of 26.7%, it can effectively predict the diffusion law of sulfate ions in concrete. Analysis of influencing factors shows that the concentration of sulfate attack and the critical damage degree have a significant impact on the spalling thickness of concrete cover. Under the same critical damage degree, the spalling speed in 5% sodium sulfate solution is 51.8% higher than that in 3% sodium sulfate solution. At the same concentration of sodium sulfate solution, the critical damage degree increases from 0.80 to 0.95, and the spalling thickness decreases by 42.9%.

Key words: concrete; sulfate; transport-reaction; critical damage degree; pore structure; numerical simulation

盐渍土或滨海盐土地区的普通混凝土结构往往 1~2 a 就发生损伤^[1],致使许多基础设施提前失效,其劣化的主要原因是硫酸盐通过混凝土孔/缝进入混凝土后的传输-反应-损伤所致.对混凝土的传输过程和损伤程度进行量化,是提高结构混凝土耐久性和寿命预测的关键所在.为此,国内外学者致力

于研究硫酸盐在混凝土中的传输-反应-损伤劣化模型.

关博文等^[2]、刘超等^[3]建立了混凝土内部受硫酸盐侵蚀的损伤劣化模型;左晓宝等^[4]将 Fick 第二定律与硫酸盐反应机理相结合,建立了硫酸盐在混凝土内部传输的化学-力学分析模型,由此来判断

收稿日期:2022-12-01; 修订日期:2023-02-07

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51925903);国家自然科学基金资助项目(51878155)

第一作者(通讯作者):蒋金洋(1974—),男,山东青岛人,东南大学教授,博士生导师,博士. E-mail: jiangjinyang16@163.com

混凝土的开裂状态;Zuo等^[5]、Bary等^[6]还建立了不同的化学-力学模型.上述模型均能较好地模拟混凝土内离子传输、侵蚀产物生长和试件膨胀变形等过程,但并未反映出硫酸盐侵蚀损伤混凝土的全过程.

本文基于结晶压理论、体积膨胀理论及Fick第二定律,建立了考虑孔隙率、曲折度和临界损伤程度的传输模型,并通过剥落厚度来表征混凝土的损伤劣化,以期能更精准地对混凝土在硫酸盐中侵蚀性能进行评估.

1 试验方法

1.1 原材料与试件制备

选用P·I 42.5基准水泥,成型3组水胶比 m_w/m_b (质量比)为0.5的C30混凝土,其水泥、水、砂子、石子的用量分别为370、185、640、1 205 kg,试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm.试件成型24 h后,将其脱模并置于恒温养护箱养护28 d;将试件两侧蜡封以控制 SO_4^{2-} 的扩散方向,再将其置于硫酸钠质量分数 $w(Na_2SO_4)$ 为1%、3%、5%的溶液中浸泡.

1.2 测试方法

根据GB/T 2899—2017《工业沉淀硫酸钡》,采用硫酸钡沉淀法测试混凝土中 SO_4^{2-} 的浓度 c .

2 硫酸盐侵蚀混凝土模型的建立与求解

2.1 硫酸盐侵蚀过程及其机理

硫酸盐对混凝土的侵蚀损伤理论有体积膨胀理论、结晶压理论、吸水膨胀理论和拓扑反应理论^[7-8].Ikumi等^[9]、Yin等^[10]通过大量试验和理论模拟证明,

体积膨胀和盐结晶相结合,能更客观地反映硫酸盐传输-反应-损伤的全过程.

全侵蚀过程中硫酸盐侵蚀下,硫酸盐与其混凝土孔溶液中的铝酸盐反应形成钙矾石(Aft)或者石膏膨胀产物^[11].当这些膨胀产物达到过饱和时,形成晶体,并填充于不同尺度孔隙,主要是毛细孔隙^[4-5],达到某临界点后产物继续膨胀,当混凝土自身的抗压强度不足以抵抗产物所产生的体积膨胀应力时,发生开裂、逐层破坏剥落.侵蚀反应过程中发生的化学反应为^[12]:



2.2 侵蚀模型

硫酸盐侵蚀混凝土的初始和边界条件见图1.侵蚀模型的边界条件为:

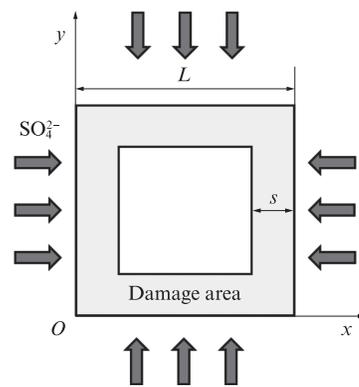


图1 硫酸盐侵蚀混凝土的初始和边界条件
Fig. 1 Initial and boundary conditions for sulfate attack concrete

$$\begin{cases} c(x, y, 0) = 0, (x, y) \in L \\ c(x, 0, t) = c_s, (0, y, t) \in c_s, (L, y, t) \in c_s, (x, L, t) \in c_s \\ c_s = \varphi_0 c_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为侵蚀时间; L 为模型长度; s 为损伤区域长度; c_s 为混凝土边界处 SO_4^{2-} 的初始浓度; c_0 为溶液中

SO_4^{2-} 的初始浓度; φ_0 为混凝土的初始孔隙率.建立的硫酸盐传输模型为:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(x, y) \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D(x, y) \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial c_r}{\partial t} \\ D(x, y) = \frac{\varphi(t)}{\tau(t)} D_c, s < x < L \cup s < y < L \\ D(x, y) = D_s = (1-d) \frac{\varphi(t)}{\tau(t)} D_c, 0 \leq x \leq s \cap 0 \leq y \leq s \\ \frac{\partial c_r}{\partial t} = -kcu \left[1 - \alpha(t) + \frac{1}{2} \beta \alpha(t) + \beta \alpha(t) \cdot e^{-\frac{1}{6}kct} \right] e^{-\frac{1}{3}kct} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $D(x, y)$ 为 SO_4^{2-} 在不同扩散区域的扩散系数; c_r 为 SO_4^{2-} 消耗浓度; $\varphi(t)$ 为混凝土侵蚀过程中可传

输的时变孔隙率; $\tau(t)$ 为混凝土侵蚀过程中的时变曲折度; D_c 为溶液中 SO_4^{2-} 扩散系数; D_s 为损伤区域中

SO₄²⁻扩散系数;*d*为混凝土的损伤程度;*k*为硫酸盐侵蚀混凝土的化学反应速率;*u*为混凝土中C₃A的浓度;*α*(*t*)为*t*时刻水泥的水化程度;*β*为水泥中石膏的掺量(质量分数)。

2.2.1 可传输的时变孔隙率

侵蚀前期反应产物主要在混凝土毛细孔内生

$$\epsilon = \left[\frac{(m_V^{C_6A\bar{S}_3H_{32}})^{-1}}{(m_V^1)^{-1} + 2(m_V^{CSH_2})^{-1}} - 1 \right] f_1 + \left[\frac{(m_V^{C_4A\bar{S}H_{12}})^{-1}}{(m_V^2)^{-1} + 3(m_V^{CSH_2})^{-1}} - 1 \right] f_2 \quad (6)$$

式中:*p*为混凝土内毛细孔的有效填充分数,其取值范围为0.3~0.4,本文取值为0.4;*m*_V^{C₆A \bar{S} ₃H₃₂}、*m*_V^{C \bar{S} H₂}、*m*_V¹、*m*_V²分别为C₆A \bar{S} ₃H₃₂、C \bar{S} H₂、C₄A \bar{S} H₁₂和C₃A的摩尔体积,其取值分别为0.14×10⁴、1.349×10⁴、0.314×10⁴、1.126×10⁴ mol/m³; *f*₁和*f*₂分别为C₄A \bar{S} H₁₂和C₃A反应后的体积变化率,分别取0.55和1.31。

混凝土毛细孔孔隙率会因硫酸盐侵蚀产物不断填充和水泥水化作用而随着侵蚀时间的改变不断变化,毛细孔是硫酸盐传输的主要通道^[13-15],其时变孔隙率*φ*(*t*)为:

$$\varphi(t) = f_c \frac{m_w/m_B - 0.36\alpha(t)}{m_w/m_B + 0.32} + \varphi_a \quad (7)$$

$$f_c = \left(\frac{\rho_c m_t}{\rho_t m_c} + \frac{\rho_c m_s}{\rho_s m_c} + \frac{\rho_c}{\rho_w} m_w/m_B \right)^{-1} \quad (8)$$

$$\tau_{cp}(t) = \omega_{m_w/m_B} \eta_r \alpha(t) \frac{\sqrt{[1 - \sqrt{1 - \varphi(t)}] + \frac{1}{4}[1 - \varphi(t)]}}{1 - \sqrt{1 - \varphi(t)}} \quad (11)$$

$$\omega_{m_w/m_B} = [1 + 7\alpha(t)]^{m_w/m_B - 0.35} \quad (12)$$

式中:*η*_{sa}、*η*_{st}分别为砂、石的形状系数,通过对不同粒径砂、石骨料形貌统计,*η*_{sa}取值范围为1.02~1.15,*η*_{st}取值范围为1.10~1.42,本文*η*_{sa}、*η*_{st}取值分别为1.06、1.28;*f*_{sa}、*f*_{st}分别为砂、石的体积分数,分别取26%和52%;*τ*_{cp}(*t*)为硬化水泥浆体的曲折度;*ω*_{m_w/m_B}为水胶比对硬化水泥浆体曲折度的影响修正系数;*η*_r为水泥颗粒水化后堆积体的形状系数,考虑到不同水灰比硬化

长,导致混凝土毛细孔被填充,引起混凝土孔隙率降低.当产物生长到一定程度时造成混凝土膨胀开裂,最终可反映在混凝土的体积应变*ε*上^[4].受侵蚀产物填充导致的孔隙率变化量*φ*_a及*ε*为:

$$\varphi_a = \min(\epsilon, p\varphi_0) \quad (5)$$

式中:*f*_c为水泥的体积分数;*ρ*_c、*ρ*_t、*ρ*_s、*ρ*_w分别为水泥、石、砂和水的密度,其值分别为1 300、2 600、2 650、1 000 kg/m³; *m*_t、*m*_s、*m*_c分别为石、砂和水泥的质量。

经系统研究,不同水灰比、不同龄期下的硅酸盐水泥水化程度*α*(*t*)可表示为^[16]:

$$\alpha(t) = 0.697t^{0.097} \exp\left(\frac{-0.133t^{0.026}}{m_w/m_B}\right) \quad (9)$$

2.2.2 时变曲折度

混凝土作为一种多孔介质材料,侵蚀介质在混凝土中传输的速率主要取决于曲折度的大小,在Zuo等^[15]研究的基础上,经修正后的时变曲折度*τ*(*t*)为:

$$\tau(t) = \eta_{sa} \eta_{st} (1 + 0.35\sqrt{f_{sa}}) (1 + 0.35\sqrt{f_{st}}) \tau_{cp}(t) \quad (10)$$

浆体产物的形貌特征以及对传输路径的显著影响,对大量硬化水泥浆体的BSE和SEM图像结果进行统计,*η*_r取值范围一般为1.02~1.42,本文取值为1.20。

2.2.3 损伤程度函数

混凝土受硫酸盐侵蚀时,混凝土的损伤速率与传入混凝土内部的SO₄²⁻浓度成正比.设混凝土未损伤时损伤程度为0,完全损伤时的损伤程度为临界损伤程度*d*_c,则损伤程度*d*为:

$$\frac{\partial d(x, y, t)}{\partial t} = \begin{cases} q_c c(x, y, t) = (c_c \Delta t_c)^{-1} c(x, y, t), & t_0 \leq t \leq t_c \\ 0, & t < t_0, t > t_c \end{cases} \quad (13)$$

式中:*q*_c为混凝土腐蚀系数,取0.55^[16]; *t*₀和*t*_c分别为初始侵蚀时间、完全损伤时间;*c*_c为完全损伤后SO₄²⁻恒定浓度。

2.3 求解方法

式(3)、(4)为变系数求解.取传输时间间隔为*Δt*,将传输总时间划分为*k*(*k*=*t*/*Δt*)等份.各个节点坐

标(*x*_{*i*}, *y*_{*j*}, *t*_{*k*})处的SO₄²⁻浓度用*c*_{*i,j*}^{*k*}表示,利用隐格式交替方向的有限差分法^[17]求解偏微分方程,求解过程为:

(1)根据硫酸盐溶液的初始浓度*c*₀,由式(4)计算SO₄²⁻在混凝土中的浓度分布;

(2)将SO₄²⁻的浓度分布代入式(3),得到由化学

反应所消耗的 SO_4^{2-} 浓度;

(3) 根据化学反应所消耗的 SO_4^{2-} 浓度, 通过式(1)、(2) 得到化学反应所消耗的 $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$ 体积和 C_3A 体积;

(4) 通过式(6) 计算侵蚀产物生成引起的混凝土体积应变;

(5) 通过式(5)、(7) 计算混凝土的孔隙率变化量及时变孔隙率, 并结合时变曲折度来计算硫酸盐溶液在混凝土中的有效扩散系数;

(6) 通过式(4)、(13) 计算不同时刻混凝土的损伤程度与损伤后混凝土的有效扩散系数, 并通过损

伤程度来判断混凝土是否完全损伤。

2.4 结果验证

模型参数为: $u=673 \text{ mol/m}^3$; $f_c=0.3$; $\alpha=0.74$; $\beta=4.8\%$; $k=3.05 \times 10^{-8} \text{ m}^3/(\text{mol}\cdot\text{s})$; $d_c=0.90$; $D_c=3.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[4]. 将上述参数代入方程中, 通过 Matlab 迭代求解。

将不同质量分数硫酸钠溶液中混凝土深度 $x=2 \text{ mm}$ 处 SO_4^{2-} 浓度的模拟结果与试验测试结果进行对比, 结果见图2. 由图2可见, 模拟结果和试验结果基本吻合, 最大误差为20.6%. 因混凝土组成复杂, 其结构也是非均质的, 误差在30.0%以内均可认为结果合理^[18].

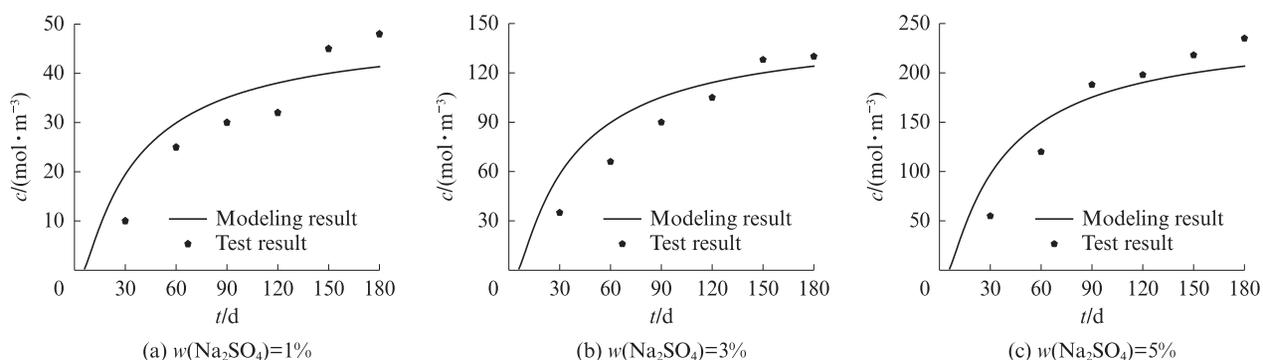


图2 混凝土中 SO_4^{2-} 的浓度

Fig. 2 Concentration of SO_4^{2-} in concrete

采用 Qin 等^[19] 的试验结果来进一步验证模型的可靠性. 其试验中使用 P·O 42.5R 硅酸盐水泥制备了 $m_w/m_b=0.46$ 的混凝土, 试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$. 在养护 28 d 后, 将试件浸泡在 $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=5\%$ 的溶液中, 获得了 $x=1 \text{ mm}$ 处 SO_4^{2-} 在侵蚀时间为 60、90、120、150 d 的质量分数 $w(\text{SO}_4^{2-})$. 将试验参数代入到本文模型中, 结果见图3(a). 由图3(a)可见, 模拟结果与试验结果基本吻合, 最大误差为18.6%.

Min 等^[20] 使用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥制备了 $m_w/m_b=0.57$ 的混凝土, 试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 在 $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=5\%$ 的溶液浸泡 300 d 后对 $x=1 \text{ mm}$ 处的 SO_4^{2-} 质量分数进行测试. 将试验参数代入本文模型中, 结果见图3(b). 由图3(b)可见, 试验数据趋势与本文的数值模拟结果较为接近, 且相关参数的取值也符合客观规律, 最大误差为26.7%, 进一步证明了本模型预测结果可靠。

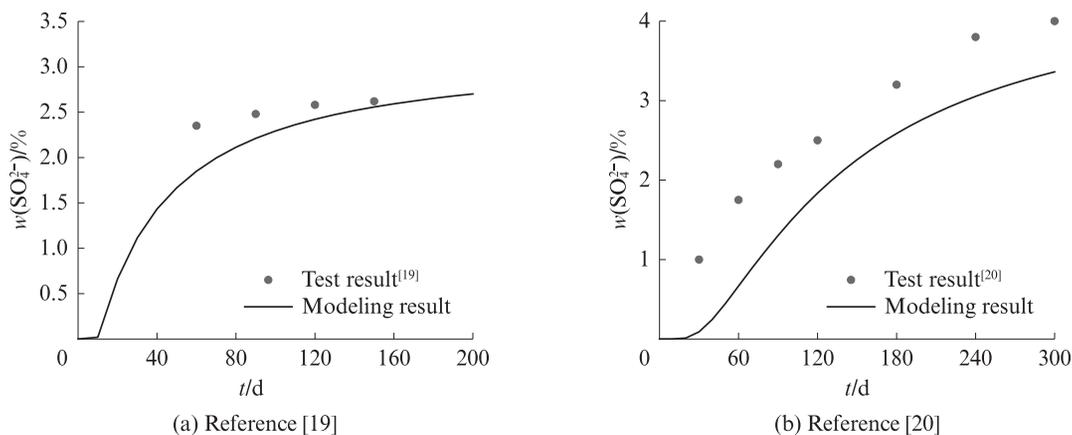


图3 硫酸根离子质量分数模拟与试验结果对比

Fig. 3 Comparison between modeling and test results of mass fraction of SO_4^{2-}

3 影响因素分析

3.1 侵蚀溶液质量分数与侵蚀时间的影响

模拟了 $m_w/m_b=0.50$ 的 C30 混凝土在 $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ 为 1%、3%、5% 的溶液中侵蚀 90、180、3600 d 下 SO_4^{2-} 的浓度. 模型中相关参数为: 试件标准养护 28 d; $L=100$ mm; 厚度增量 $\Delta x=0.5$ mm; $d_c=0.90$. 模拟结果见图 4. 由图 4 可见: 在相同龄期下, 随着

$w(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ 的增加, 混凝土中相同深度处的 SO_4^{2-} 浓度增加; 在相同浓度下, 随着侵蚀龄期的增加, 混凝土中相同深度处的 SO_4^{2-} 浓度增加, 且离子扩散深度增加的速率随着侵蚀时间的增加而变缓. 侵蚀 180 d, $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ 由 1% 增加到 5% 时, SO_4^{2-} 扩散深度增加了 11.1%; 当 $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=5\%$ 时, 侵蚀 180 d 比 90 d 的 SO_4^{2-} 扩散深度增加了 33.3%.

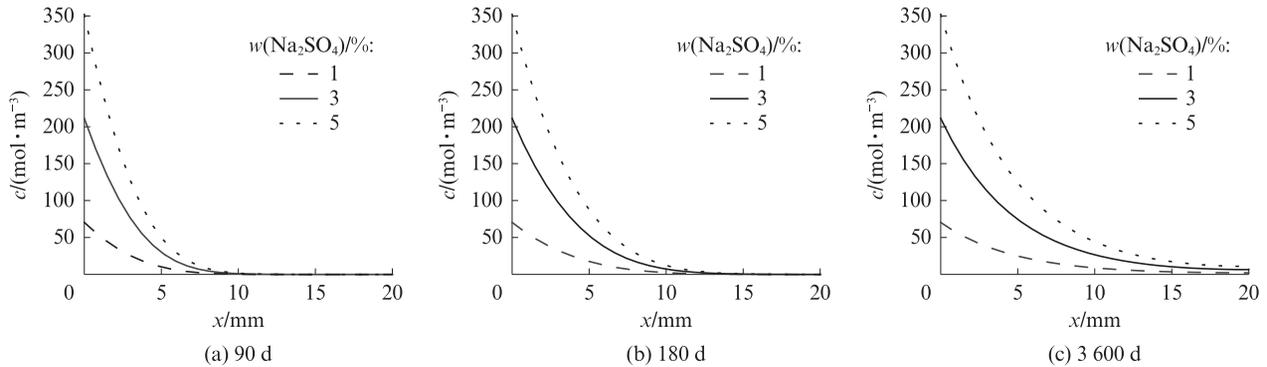


图 4 不同侵蚀时间下 SO_4^{2-} 浓度
Fig. 4 Concentration of SO_4^{2-} at different attack time

3.2 临界损伤程度的影响

模拟了 $m_w/m_b=0.50$ 的 C30 混凝土在不同临界损伤程度下的硫酸盐传输-反应-损伤过程. 相关参数为: 标准养护 28 d; $L=100$ mm; $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ 为 1%、3%、5%; $\Delta x=0.5$ mm; $\Delta t=1$ d; d_c 为 0.80、0.90 和 0.95. 不同质量分数 Na_2SO_4 侵蚀下混凝土的剥落厚度见图 5. 由图 5 可见: 在临界损伤程度相同的条件下, 混凝土的剥落厚度变化呈锯齿形状; 当 Na_2SO_4 溶液质量分数较低时, 侵蚀早期未出现损伤剥落, 这些规律刚好反映了硫酸盐在混凝土中的传输-反应-填充过程; 在临界损伤程度相同的条件下,

$w(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ 越高, 剥落出现得越早, 剥落速率也越快, 如当 $d_c=0.95$ 时, 混凝土受到 $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=5\%$ 的溶液侵蚀时出现损伤剥落的时间比其在 $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=3\%$ 的溶液中提早 51.8%.

侵蚀时间、剥落厚度与损伤程度的关系见图 6. 由图 6 可见, 随着临界损伤程度的增大, 相同深度处混凝土的损伤程度增大, 而相同侵蚀时间的剥落厚度减小; 当临界损伤程度从 0.80 增大至 0.95 时, 混凝土 3 600 d 的剥落厚度减小了 42.9%, 这表明临界损伤程度的大小对评价混凝土的剥落厚度至关重要.

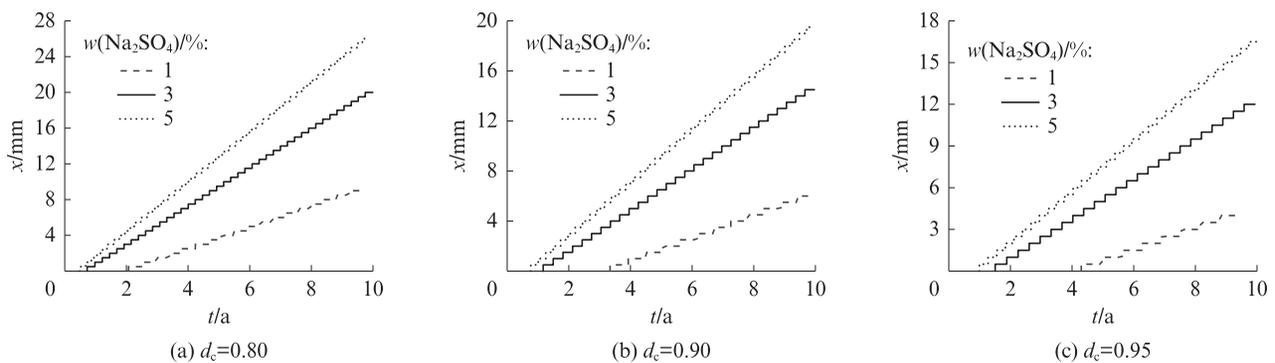


图 5 不同质量分数硫酸钠侵蚀下混凝土的剥落厚度
Fig. 5 Spalling thickness of concrete under the attack of different $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)$

3.3 水胶比的影响

模拟了 $m_w/m_b=0.20\sim 0.60$ 的混凝土相应孔隙

率和曲折度变化对硫酸盐传输的影响. 相关参数为: 混凝土标养 28 d; $L=100$ mm; $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=3\%$;

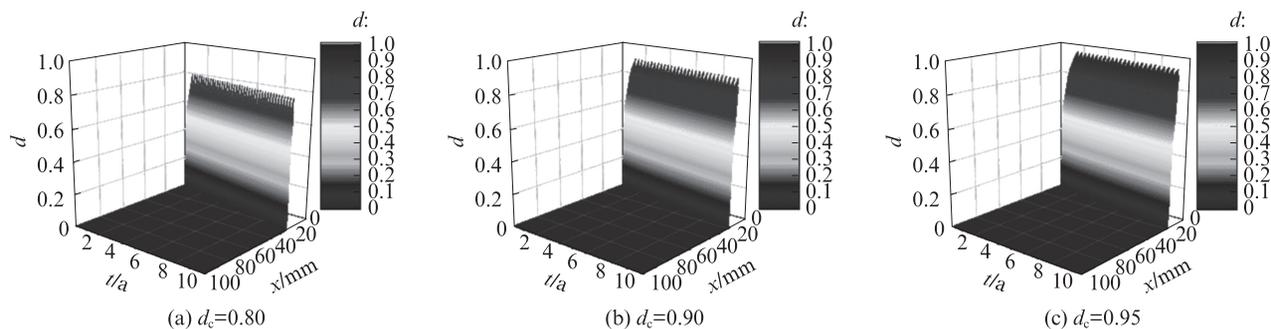


图6 侵蚀时间、剥落厚度与损伤程度的关系

Fig. 6 Relationship between attack time, spalling thickness and damage degree

$\Delta x=0.5$ mm; $\Delta t=1$ d; $d_c=0.90$. 混凝土试件水胶比与初始孔隙率、曲折度的关系见图7. 由图7可见: 混凝土的初始孔隙率随着水胶比的增大而增大, 且孔隙率增长速率逐渐减小; 曲折度与砂石的形状系数和体积率有关(见式(10)~(12)), 当砂石的形状系数和体积分数一定时, 曲折度随着水胶比的增大而减小, 当 $m_w/m_b < 0.30$ 时, 水胶比对曲折度的影响较为显著, 反之, 水胶比对曲折度的影响较小; 砂石对曲折度影响显著, 如水胶比由0.20增长至0.60时, 硬化水泥浆体的曲折度由13.5降低至4.7, 而混凝土的曲折度由25.4降低至9.2.

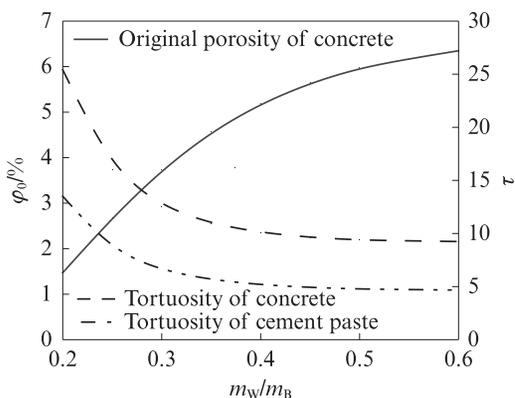


图7 混凝土水胶比与初始孔隙率、曲折度的关系

Fig. 7 Relationship between m_w/m_b and initial porosity, tortuosity evolution of concrete

混凝土初始孔隙率与剥落时间的关系见图8. 由图8可见, 初始孔隙率越大, 剥落现象出现得越早, 且在相同初始孔隙率条件下, $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)$ 越高出现剥落的时间越早; 当初始孔隙率为2.0%时, 浸泡在 $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=5\%$ 溶液中的混凝土出现剥落现象的时间比在 $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=1\%$ 的溶液中提早了约30 a.

4 结论

(1) 基于结晶压理论、体积膨胀理论及Fick第二定

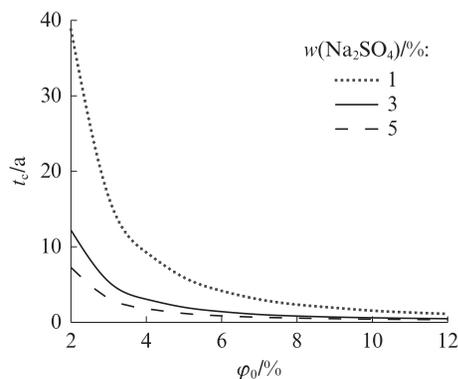


图8 混凝土初始孔隙率与剥落时间的关系

Fig. 8 Relationship between original porosity and spalling time of concretes

律建立了硫酸盐侵蚀下混凝土的传输-反应-损伤剥落模型, 在模型中充分考虑了混凝土的孔隙率、曲折度以及混凝土的临界损伤程度等因素, 通过试验和文献结果, 验证了模型的可靠性, 其最大误差为26.7%.

(2) 定量分析了不同侵蚀时间和 Na_2SO_4 侵蚀溶液质量分数下 SO_4^{2-} 的浓度. 随着侵蚀溶液质量分数和侵蚀时间的增加, SO_4^{2-} 的扩散深度增加. 180 d 时 Na_2SO_4 溶液质量分数由1%增加到5%时, SO_4^{2-} 的扩散深度增加了11.1%.

(3) 定量分析了不同临界损伤程度下, 混凝土的剥落厚度与 Na_2SO_4 溶液质量分数的关系. 在临界损伤程度一定的条件下, Na_2SO_4 溶液质量分数越大, 混凝土出现剥落的时间越早, 剥落厚度也越大, 其在5% Na_2SO_4 溶液中出现剥落现象的时间比在3% Na_2SO_4 溶液中提早了51.8%.

(4) 定量分析了水胶比、初始孔隙率、曲折度与混凝土剥落时间的关系. 初始孔隙率随着水胶比的增大而增大, 而曲折度随着水胶比的增大而减小. 随着初始孔隙率的不断增大, 剥落时间会出现得更早.

参考文献:

[1] LI J P, XIE F, ZHAO G W, et al. Experimental and numerical

- investigation of cast-in-situ concrete under external sulfate attack and drying-wetting cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249:118789.
- [2] 关博文, 陈拴发, 李华平, 等. 疲劳荷载作用下混凝土硫酸盐腐蚀寿命预测[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(3):395-398.
GUAN Bowen, CHEN Shuanfa, LI Huaping, et al. Sulfate corrosion life of cement concrete under fatigue load[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(3):395-398. (in Chinese)
- [3] 刘超, 姚羿舟, 刘化威, 等. 硫酸盐干湿循环下再生复合微粉混凝土的劣化机理[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(11):1128-1135.
LIU Chao, YAO Yizhou, LIU Huawei, et al. Deterioration mechanism of recycled composite powder concrete under dry-wet cycles of sulfate[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(11):1128-1135. (in Chinese)
- [4] 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 Xiaobao, SUN Wei. 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)
- [5] 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, 36:404-410.
- [6] BARY B, LETERRIER N, DEVILLE E, et al. Coupled chemo-transport-mechanical modelling and numerical simulation of external sulfate attack in mortar [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 49:70-83.
- [7] THAULOW N, SAHU S. Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization [J]. *Materials Characterization*, 2004, 53(2-4):123-127.
- [8] FLATT R J, SCHERER G W. Thermodynamics of crystallization stresses in DEF [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(3):325-336.
- [9] IKUMI T, 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.
- [10] YIN G J, ZUO X B, SUN X H, et al. Macro-microscopically numerical analysis on expansion response of hardened cement paste under external sulfate attack [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 207:600-615.
- [11] YIN G J, ZUO X B, TANG Y J, et al. Numerical simulation on time-dependent mechanical behavior of concrete under coupled axial loading and sulfate attack [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 142:115-124.
- [12] BELLMANN F, MÖSER B, STARK J. Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(2):358-363.
- [13] CLIFTON J R, BENTZ D P, PONNERSHEIM J M. Sulfate diffusion in concrete [M]. Gaithersbury: National Institute of Standards and Technology, 1994:9-13.
- [14] HUANG X F, ZHENG J J, ZHOU X Z. Simple analytical solution for the chloride diffusivity of cement paste [J]. *Science and Technology of Overseas Building Materials*, 2010, 31(2):4-6.
- [15] ZUO X B, SUN W, LIU Z Y, et al. Numerical investigation on tortuosity of transport paths in cement-based materials [J]. *Computers and Concrete*, 2014, 13(3):309-323.
- [16] 中国工程建设标准化协会. 严酷环境混凝土结构耐久性设计标准: T/CECS 1203—2022 [S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2022.
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for design of concrete structure durability in severe environments: T/CECS 1203—2022 [S]. Beijing: China Association for Engineering Construction Standardization, 2022. (in Chinese)
- [17] AMES W F. Numerical methods for partial differential equations [M]. New York: Academic Press, 2014:2-27.
- [18] SUN G W, SUN W, ZHANG Y S, et al. Multi-scale prediction of the effective chloride diffusion coefficient of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(10):3820-3831.
- [19] QIN S, ZOU D, LIU T, et al. A chemo-transport-damage model for concrete under external sulfate attack [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 132:106048.
- [20] MIN H G, SUI L L, XING F, et al. An effective transport model of sulfate attack in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 216:365-378.