

轴拉疲劳荷载下损伤混凝土氧气传输性能

蒋志律, 付传清, 严文杰

(浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 氧气作为侵蚀介质参与钢筋混凝土结构的锈蚀破坏过程, 因此, 氧气扩散系数是结构耐久性预测模型的必要参数。针对实际服役中的混凝土结构, 研究疲劳损伤混凝土氧气扩散系数与损伤变量的关系。研究表明: 随着混凝土疲劳损伤度增加, 小孔径孔隙比例先增后减; 混凝土氧气扩散系数随着损伤度增大而增大, 损伤度较大时增长速率较快; 结合多孔材料气体扩散理论, 建立了混凝土氧气扩散系数与损伤度、初始孔隙率的关系式, 为海洋环境下混凝土结构耐久性预测提供理论基础。

关键词: 疲劳损伤; 氧气扩散; 核磁共振; 混凝土

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0540-06

Oxygen diffusion property of damaged concrete under axial tension fatigue loads

JIANG Zhilü, FU Chuanqing, YAN wenjie

(School of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Oxygen is involved in the corrosion failure process of reinforced concrete structures as an erosion medium, so the oxygen diffusion coefficient is a necessary parameter for the prediction model of structural durability. In this paper, the relationship between oxygen diffusion coefficient and damage variable of fatigue damage concrete is studied for concrete structure in actual service. The results show that with the increase of fatigue damage degree of concrete, the proportion of small pore size increases first and then decreases. The oxygen diffusivity of concrete increases with the increase of damage degree, and the growth rate is larger at a greater damage degree. Based on the gas diffusion theory of porous materials, the function for oxygen diffusivity is established using damage degree and initial porosity, which provides a theoretical basis for predicting the durability of concrete structures in marine environment.

Key words: fatigue damage; oxygen diffusion; nuclear magnetic resonance; concrete

氧气在混凝土内的传输将影响钢筋锈蚀速率, 是引起混凝土结构耐久性退化的因素之一^[1]。混凝土是一种多孔介质材料, 其内部孔隙结构对氧气传输有着重要影响^[2-3]。另外, 实际服役混凝土结构承受各种荷载作用, 使得混凝土结构产生不同程度的损伤。因此, 在研究混凝土介质传输性能时应同时考虑荷载因素的影响^[4]。

已有研究^[5-8]表明相对于未损伤混凝土, 损伤混凝土的离子传输能力将会大幅提高。Kurumata 等^[5]指出损伤后混凝土的离子扩散系数可以达到未损伤时的 20 倍。Fu 等^[6-7]研究了不同程度轴拉疲劳损伤混凝土的水分和氯离子传输性能, 发现当最大荷载超过 30% 极限荷载时, 混凝土内水

分干燥速率和氯离子侵蚀速率均将明显加快。牛荻涛等^[8]开展了盐雾环境下疲劳损伤混凝土的氯离子扩散试验, 结果表明随着疲劳损伤变量增大, 氯离子扩散系数明显增大; 与弯曲疲劳受压区相比, 受拉区的扩散系数较大。

国内外混凝土介质传输研究主要集中在水分和离子传输上, 而对氧气在混凝土中的传输机理研究较少。Villani 等的研究结果^[9]表明相对于混凝土氧气渗透系数, 氧气扩散系数的实验结果离散性较小; 边界条件和试件处理将很大程度影响实验的可重复性。He 等^[10]研究了干湿循环与碳化引起的混凝土孔结构变化对混凝土氧气扩散系数的影响。Fu 等^[11]开展了骨料与砂浆之间界面过渡

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-07-18

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LZ20E080003, LR21E080002); 国家自然科学基金(51978620, 52178232)

第一作者: 蒋志律(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail: zljia@zjut.edu.cn

区氧气扩散性能的试验研究, 确定了不同水灰比下界面过渡区孔隙率对氧气扩散的影响. 汤玉娟等^[12]在简化毛细管束几何模型的基础上, 引入孔隙率、孔隙迂曲度等微观结构参数, 建立了考虑饱和度影响的混凝土气体扩散模型.

以上混凝土氧气扩散性能研究是针对未损伤混凝土. 但是在实际工程中, 荷载作用下混凝土一般都会具有一定的损伤度. 针对实际情况, 须进一步研究损伤混凝土内的氧气扩散机理. 因此, 本文设计了 6 种不同损伤程度的混凝土试件, 采用核磁共振法测定损伤后混凝土的孔隙变化, 研究疲劳损伤对混凝土试件内部结构的影响; 研究了不同疲劳损伤程度混凝土的氧气扩散系数, 并基于试验结果和理论分析建立了氧气扩散系数与损伤度的经验公式.

1 试验概况

1.1 混凝土材料及试件制作

试验采用山东鲁城水泥有限公司生产的 P · I 42.5 硅酸盐水泥; 细骨料采用级配良好的河砂; 粗骨料采用天然碎石, 粒径为 5~20 mm; 试验用水为去离子水. 混凝土配合比如表 1 所示.

表 1 混凝土配合比/kg · m⁻³
Tab. 1 Mix proportion of concrete/kg · m⁻³

水泥	水	河砂	花岗岩碎石
360	191	720	1 081

轴拉疲劳试验采用 130 mm×130 mm×1 200 mm 的混凝土试件. 在试件角部分别设置 4 根直径为 12 mm 的螺杆, 并在两端各伸出 100 mm, 以便后期疲劳荷载加载. 混凝土试件浇筑成型拆模后放入 20±2 ℃、95% 相对湿度的环境养护 28 d.

1.2 轴拉疲劳试验

试验在多通道 MTS 电液伺服万能疲劳试验机上进行, 采用 MTS 500 kN 的作动头施加疲劳荷载, 如图 1 所示. 将试件对准上部作动头的位置, 试件两端伸出的螺杆插入上下部预留孔中, 安装螺丝固定, 再用红外线水准仪保证试件垂直. 试验采用正弦波形疲劳荷载, 加载频率统一为 5 Hz, 加载次数统一为 50 000 次. 为了获得不同损伤的混凝土试件, 采用五种不同加载水平的试件(表 2), 另外设置未加载试件 D1 作为对照组. 在试件侧面布置应变片, 其中试件浇筑面以及其对称面上, 在中间位置布置两个应变片; 在另外两个侧面上各布置 4 个间隔 200 mm 的应变片.

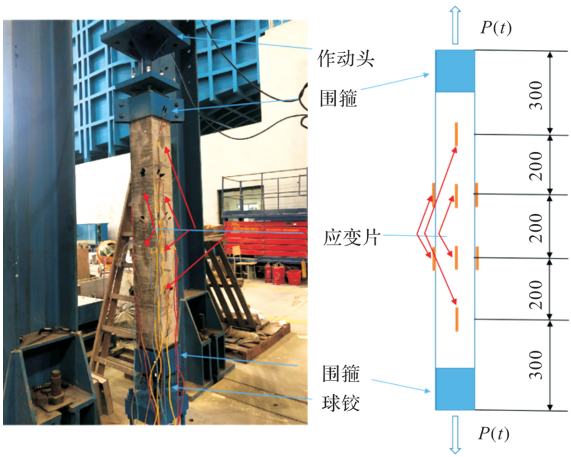


图 1 疲劳试验装置

Fig. 1 Device for fatigue experiment

采用基于最大疲劳应变的损伤指标^[13]来表征轴拉疲劳损伤混凝土的损伤程度. 文献[14-16]中表明混凝土的损伤发展规律与疲劳变形规律基本一致, 且与加载的过程无关, 疲劳破坏时混凝土试件的极限疲劳应变基本为定值. 因此, 采用最大疲劳应变定义材料损伤变量可以表示为

d = (ε_r - ε₀) / (ε_{re} - ε₀) (1)

式中: ε_r 为混凝土试件疲劳循环 n 次以后的疲劳应变; ε₀ 为未经过疲劳损伤的混凝土试件的疲劳应变(ε₀ = 0); ε_{re} 为混凝土试件疲劳损伤破坏时的累计疲劳应变, 本文取为 1.6×10⁻⁴.

表 2 不同试件疲劳荷载

Tab. 2 Fatigue load for different specimens

编号	荷载水平/%	P _{min} /kN	P _{max} /kN
D1	0	-	-
Y1	24~36	12	18
Y2	30~42	15	21
Y3	36~48	18	24
Y4	42~54	21	27
Y5	48~60	24	30

1.3 氧气扩散试验

对疲劳加载后及未加载试件进行取芯, 取出直径 75 mm、高 130 mm 的圆柱体. 为了达到一维氧气传输, 采用环氧树脂对圆柱体侧面进行密封. 切出 20 mm 厚圆片作为氧气扩散试件, 每组 3 个试件. 扩散试验前, 为了尽量减少干燥引起的混凝土微结构破坏, 将试件在真空干燥箱中 45 ℃烘干至恒重, 即间隔 24 h 试件质量变化小于 0.1%.

氧气扩散装置由两个独立腔室、氧气传感监测系统、输气系统、数据自动化采集系统组成, 如图 2 所示. 首先将待测试件放入两个腔室之间,

保证密封连接且具有绝对气密性,再将其中一侧腔室的进气阀门连接氧气钢瓶,使腔室充满氧气;同时将另一侧腔室进气口同氮气钢瓶连接,使其充满氮气。这时,两个腔室之间形成初始氧气浓度梯度,使氧气在浓度梯度作用下通过试件进行一维扩散。

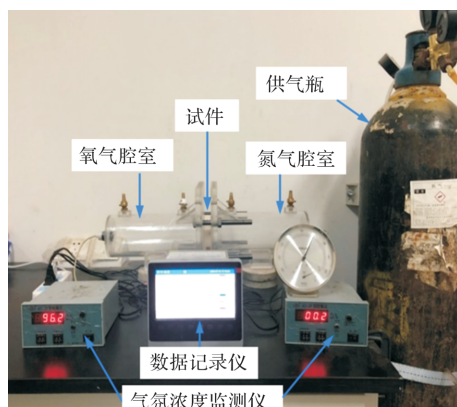


图2 氧气扩散试验装置

Fig. 2 Test device for oxygen diffusion

假定混凝土内的氧气扩散符合 Fick 气体扩散第一定律,则可推导得到氧气扩散系数 D_{fe} 的表达式为

$$D_{fe} = N / \left[\left(\int_0^t \partial [C] / \partial [L] \cdot dt \right) \cdot S \right] \quad (2)$$

式中: $\partial [C] / \partial [L]$ 为氧气在待测试件两侧的腔室内浓度梯度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-4}$); N 为待测试件在 t 时间后通过的氧气量 (mol); S 为氧气的有效扩散面积 (m^2)。

假定试验过程中试件内部的氧气浓度梯度为线性分布,可得在某一时刻时氧气浓度梯度的公式为

$$\partial [C] / \partial L = (C_2 - C_1) / L = \Delta C / L \quad (3)$$

式中, L 为待测试件厚度 (m); C_1 为某一个时间低浓度氧气侧的腔室中氧气浓度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$); C_2 为同一时间下高浓度氧气一侧腔室中的氧气浓度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)。

根据采集记录的腔室氧气浓度数据,利用式(3)获得不同时间点的浓度梯度,再通过数据拟合得到浓度梯度与时间的函数关系式,最后代入式(2)可以计算得到待测试件的氧气扩散系数。

1.4 低场核磁共振试验

为表征损伤混凝土孔隙结构,在氧气扩散实验后试件的中心区域切割出 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的样品,进行低场核磁共振试验。核磁共振法具有非侵入性和非破坏性,可以让测试样品更加接近试件的真实情况。采用的设备是苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产的核磁共振仪器,型号

为 MesoMR12-110H-I。试验前须将样品进行真空饱水处理,再放入核磁线圈中进行测试。

2 试验结果分析

2.1 不同损伤度下的孔隙结构

疲劳试验后, Y1-Y5 测得的疲劳应变分别为 2.400×10^{-5} 、 4.482×10^{-5} 、 5.072×10^{-5} 、 5.728×10^{-5} 和 6.720×10^{-5} 。式(1)的疲劳损伤变量计算公式可简化为

$$d = \epsilon_r / \epsilon_n \quad (4)$$

根据式(4), Y1~Y5 试件的损伤变量分别为 0.150、0.249、0.317、0.358 和 0.420。采用核磁共振法测得的 D1、Y1~Y5 组的孔隙率分别为 12.59%、13.21%、13.02%、12.57%、13.49% 和 13.90%。不同损伤度混凝土试件孔径分布,即相应孔径对应所占孔隙的百分比,如图 3 所示。

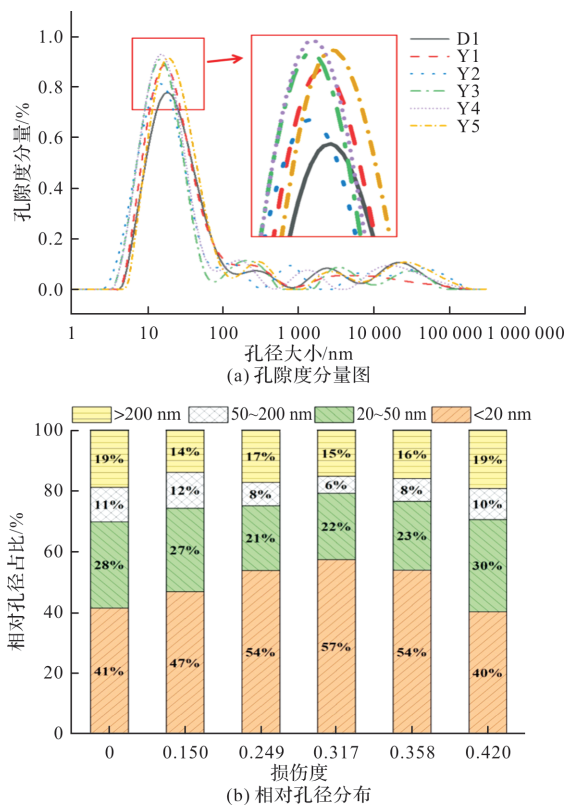


图3 核磁共振孔径分布图

Fig. 3 Pore size distribution measured by NMR

图 3(a)结果表明,与未损伤混凝土相比,损伤混凝土的临界孔径较接近,但对应的孔隙度分量较大,且其孔隙度分量基本随着损伤度增大而增大;在 20~100 nm 区间内, Y2、Y3 和 Y4 试件孔隙度分量反而比未损伤试件小。在经过轴向疲劳损伤之后,混凝土内大于 $1 \mu\text{m}$ 孔未明显增多,说明本次疲劳荷载损伤程度较小,混凝土内未出现明显裂缝。图 3(b)结果表明,损伤与未损

伤混凝土孔隙均集中在孔径小于 50 nm 的毛细孔。当损伤度小于 0.317 时, 随着损伤度增大, 混凝土内 <20 nm 孔隙增多, 而 20~50 nm 区间内孔隙减少, 说明此时损伤主要体现在较小毛细孔的生成与扩展; 当损伤度大于 0.317 时, 混凝土内 >20 nm 随着损伤度增大而明显增多, 表明损伤度较大时混凝土内较粗毛细孔数量增多。

2.2 损伤度对氧气扩散系数影响

基于实测腔室内氧气浓度, 根据式(2)和式(3)得到 6 组不同损伤程度混凝土试件氧气扩散系数, 每组 3 个试件, 取其平均值作为最终扩散系数试验值, 具体见表 3。测试结果与文献[17]中气体扩散系数数量级一致。

氧气扩散系数随混凝土损伤度变化曲线见图 4。结果表明, 混凝土氧气扩散系数随损伤度的增大而增大。随损伤度的变化趋势可以分为两个阶段: 当损伤度小于 0.317 时, 氧气扩散系数随着损伤度增大基本呈线性增大; 当损伤度大于 0.317 时, 扩散系数与损伤度仍基本呈线性关系, 但是增长速度明显增大。该结果可用实测孔径分布结果解释。由图 3(b)可知, 当损伤度大于 0.317 时, 随着损伤度增大, 孔隙逐渐粗化, 从而显著增大了氧气扩散系数。

表 3 混凝土试件氧气扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

Tab. 3 Oxygen diffusivity of concrete specimens/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

试件编号	氧气扩散系数 D_{O_2}	平均值	标准差
D1-1	3.95×10^{-8}	3.75×10^{-8}	1.98×10^{-9}
D1-2	3.66×10^{-8}		
D1-3	3.64×10^{-8}		
Y1-1	3.98×10^{-8}	4.20×10^{-8}	5.5×10^{-9}
Y1-2	3.66×10^{-8}		
Y1-3	4.97×10^{-8}		
Y2-1	5.26×10^{-8}	4.54×10^{-8}	6.3×10^{-9}
Y2-2	4.26×10^{-8}		
Y2-3	4.00×10^{-8}		
Y3-1	4.07×10^{-8}	4.66×10^{-8}	5.8×10^{-9}
Y3-2	4.46×10^{-8}		
Y3-3	5.46×10^{-8}		
Y4-1	4.95×10^{-8}	5.04×10^{-8}	5.8×10^{-9}
Y4-2	4.37×10^{-8}		
Y4-3	5.79×10^{-8}		
Y5-1	5.13×10^{-8}	5.57×10^{-8}	4.0×10^{-9}
Y5-2	6.09×10^{-8}		
Y5-3	5.48×10^{-8}		

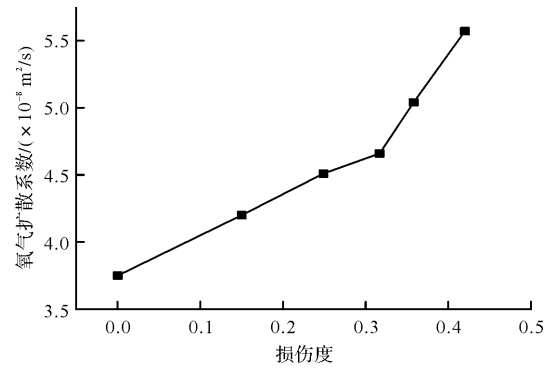


图 4 不同损伤度下的混凝土氧气传输系数

Fig. 4 Oxygen transfer coefficients under different degrees of damage

2.3 氧气扩散系数与损伤度的关系式

根据多孔材料中气体扩散理论^[18], 气体扩散系数可表示为

$$D = nD_f \quad (4)$$

式中, D 为混凝土氧气扩散系数(cm^2/s), n 表征孔隙率、孔迂曲度、孔连通度等因素影响, D_f 为气体在直毛细孔中的扩散系数(cm^2/s)。

当不存在压力梯度时, Houst 等^[19] 在气体动力学理论基础上提出了气体在直毛细孔的扩散系数 D_f 公式为

$$D_f = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8R^3 T^3}{N^2 \pi^3 M a p^2}} \quad (5)$$

式中: R 为气体常数, 取 $8.314 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; p 为气体压力, 取 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$; T 为绝对温度, 取 293.15 K ; N 为阿伏伽德罗常数, 取 6.02×10^{23} ; a 为氧气分子直径, 取 $0.346 \times 10^{-9} \text{ m}$; M 是氧气分子量, 取 32 g/mol 。

根据式(4)和式(5), 得到 D1、Y1~Y5 试件的 n 值分别为 0.750、0.840、0.908、0.932、1.008 和 1.144。混凝土扩散系数与未损伤混凝土初始孔隙率 ϵ 及损伤度 d 有关。当损伤度 d 趋近 0 时, 混凝土孔隙率为初始孔隙率, 因此将通过拟合 n 值与 ϵ^{d+1} 关系建立混凝土氧气扩散系数模型。对不同损伤度下混凝土 n 值拟合情况如图 5 所示。因此, 损伤混凝土氧气扩散系数可表示为

$$D = \frac{1}{3} (81\epsilon^{2d+2} - 19\epsilon^{d+1} + 1.89) \sqrt{\frac{8R^3 T^3}{N^2 \pi^3 M a p^2}} \quad (6)$$

根据式(6)计算的混凝土氧气扩散系数见表 4。结果表明, 提出的经验公式能较好地拟合实测混凝土氧气扩散系数。根据混凝土初始孔隙率与损伤变量, 可利用式(6)估算服役期间混凝土氧气扩散系数。值得注意的是本次研究针对损伤度较低混凝土扩散性能, 在未来将进一步研究更高损伤

度情况下的混凝土氧气扩散机理。

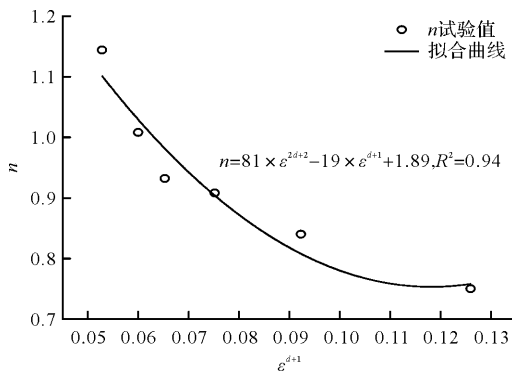


图5 不同损伤度下 n 值拟合

Fig. 5 Oxygen transfer coefficients under different degrees of damage

表4 混凝土氧气扩散系数试验值与计算值比较 ($10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)

Tab. 4 Comparison of tested and calculated oxygen diffusivity of concrete ($10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)

试件编号	试验值	计算值	误差绝对值
D1	3.75	3.76	0.0087
YQ-1	4.20	4.07	0.1318
YQ-2	4.54	4.40	0.1354
YQ-3	4.66	4.73	0.0741
YQ-4	5.04	4.99	0.0533
YQ-5	5.57	5.47	0.0983

3 结论

(1)不同疲劳荷载水平使混凝土获得不同程度的损伤,混凝土损伤程度随着荷载水平的增大而增大且接近线性增长;

(2)轴拉疲劳荷载造成混凝土内部损伤,从而使混凝土氧气扩散系数增大。结果表明,混凝土氧气扩散系数随损伤度增大而增大;

(3)当损伤度较小时,混凝土劣化主要体现在较小毛细孔数量的增多;当损伤度较大时,孔径粗化,加快氧气扩散系数随损伤度增大速率;

(4)结合多孔材料的气体扩散理论,建立了考虑初始孔隙率与损伤度的混凝土氧气扩散系数经验公式,较好地反映了损伤对混凝土氧气扩散的影响。

参考文献 References

[1] 周露泉,金南国,付传清,等. 干燥条件下水泥基材料中氧气扩散预测模型[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1133-1140.
ZHOU Luquan, JIN Nanguo, FU Chuanqing, et al. Prediction model of oxygen diffusion in cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,

2018, 46(8): 1133-1140.

- [2] ZHOU R Z, LI Q, WANG J D, et al. Assessment of electrical resistivity and oxygen diffusion coefficient of cementitious materials from microstructure features [J]. Materials, 2021, 14(12): 31-41.
- [3] 罗大明,牛荻涛. 不同湿度环境下内养护混凝土气体传输性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 193-203.
LUO Daming, NIU Ditao. Gas transportation properties of internal cured concrete under different moisture conditions[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8): 193-203.
- [4] 罗大明,牛荻涛,苏丽. 荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 1-14, 43.
LUO Daming, NIU Ditao, SU Li. Research progress on durability of stressed concrete under environmental actions[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 1-14, 43.
- [5] KURUMATANI M, ANZO H, KOBAYASHI K, et al. Damage model for simulating chloride concentration in reinforced concrete with internal cracks[J]. Cement and Concrete Composites, 2017: 62-73.
- [6] FU C Q, YE H L, JIN X Y, et al. Chloride penetration into concrete damaged by uniaxial tensile fatigue loading [J]. Construction and Building Materials, 2016, 125(84): 714-723.
- [7] HUANG Y X, YE H L, FU C Q, et al. Modeling moisture transport at the surface layer of fatigue-damaged concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 196-207.
- [8] 牛荻涛,陆炫毅,苗元耀,等. 盐雾环境下疲劳损伤混凝土氯离子扩散性能[J]. 西安建筑科技大学(自然科学版), 2015, 47(5): 617-621.
NIU Ditao, LU Xuanyi, MIAO Yuanyao, et al. Diffusion of chloride ions into fatigue-damaged concrete in salt spray environment[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(5): 617-621.
- [9] VILLANI C, LOSE R, WEST M, et al. An inter lab comparison of gas transport testing procedures: Oxygen permeability and oxygen diffusivity [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 53: 357-366.
- [10] HE R, LI S Y, FU C Q, et al. Influence of cyclic drying-wetting and carbonation on oxygen diffusivity of cementitious materials: interpretation from the perspective of microstructure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(10): 04022256.
- [11] FU C Q, LING Y F, WANG K J. An innovation study on chloride and oxygen diffusions in simulated

- interfacial transition zone of cementitious material[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 110: 103585.
- [12] 汤玉娟,左晓宝,殷光吉. 基于孔结构参数的混凝土气体扩散模型[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 976-981.
- TANG Yujuan, ZUO Xiaobao, YIN Guangji. Gas diffusion model in concrete based on pore structural parameters[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 976-981.
- [13] 朱劲松. 混凝土双轴疲劳试验与破坏预测理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- ZHU Jingsong. Study on biaxial fatigue test and failure prediction theory of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [14] 卫军,李松林,董荣珍,等. 考虑残余变形影响的混凝土疲劳损伤本构模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 57-61.
- WEI Jun, LI Songlin, DONG Rongzhen, et al. Fatigue damage constitutive model of concrete considering the effect of residual deformation[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2016, 43(7): 57-61.
- [15] YADAV I N, THAPA K B. Fatigue damage model of concrete materials[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 108: 102578.
- [16] WEI Jun, LI Songlin, D Rongzhen, et al. Fatigue damage constitutive model of concrete considering the effect of residual deformation[J]. Journal of Hunan University Natural Sciences, 2016, 43(7): 57-61.
- [17] ANDRADE C. Types of models of service life of reinforcement: the case of the resistivity[J]. Concrete Research Letters, 2010, 1(2): 73-80.
- [18] 弗兰克, P. 英克鲁佩勒, 大卫. 传热和传质基本原理(原著第六版)[M]. 化学工业出版社, 2007.
- INCROPERIS F P, De Will D P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. Chemical Industry Press, 2007.
- [19] HOUST Y F, WITTMANN F H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6): 1165-1176.

(编辑 郑晓龙 沈 波)

(上接第 519 页)

- [14] 徐善华,王友德,李安邦,等. 冻融损伤混凝土重复受压本构关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(4): 104-110.
- XU Shanhua, WANG Youde, LI Anbang, et al. Constitutive relationship of freeze-thaw damaged concrete under repeated compression[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(4): 104-110.
- [15] ZENG Qiang, LI Le, PANG Xiaoyun, et al. Freeze-thaw behavior of air entrained cement paste saturated with 10 wt. % NaCl solution[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 102: 21-31.
- [16] 高志浩. 约束应力调控及其对混凝土单面盐冻行为的影响[D]. 北京:中国建筑材料科学研究总院, 2020.
- GAO Zhihao. Regulation of confining stress and its effect on single side salt freezing behavior of concrete [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2020.
- [17] LV, Zhitao, XIA Caichu, WANG Yuesong, et al. Frost heave and freezing processes of saturated rock with an open crack under different freezing conditions [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(4): 947-960.

(编辑 郑晓龙 沈 波)