

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2025.01.008

疲劳混凝土硫酸盐侵蚀抗压强度演化规律及预测模型

严先萃, 陈文, 蔡镇羽, 高帅, 马天宇, 刘向阳

(常州大学 城市建设学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 为提前预测疲劳荷载和硫酸盐侵蚀作用下矿渣混凝土的性能, 研究了疲劳荷载作用下矿渣混凝土硫酸盐侵蚀抗压强度的演化规律, 并根据混凝土的疲劳损伤建立了矿渣混凝土抗压强度的预测模型。结果表明, 标准养护疲劳混凝土的硫酸盐侵蚀抗压强度随着应力水平的增加而降低, 压缩疲劳作用对蒸汽养护矿渣混凝土硫酸盐侵蚀强度损失的影响大于对标准养护矿渣混凝土的影响。文中建立的未经疲劳作用和经疲劳作用的矿渣混凝土的硫酸盐侵蚀抗压强度模型的预测值与试验值吻合良好, 模型准确性较高。

关键词: 疲劳荷载; 硫酸盐侵蚀; 矿渣混凝土; 抗压强度

中图分类号: TU 8

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2025)01-0068-08

Evolution law and prediction model of compressive strength of fatigued concrete under sulfate attack

YAN Xiancui, CHEN Wen, CAI Zhenyu, GAO Shuai, MA Tianyu, LIU Xiangyang

(School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: To predict the performance of slag concrete under fatigue load and sulfate attack in advance, the evolution law of compressive strength of slag concrete under sulfate attack after fatigue load was studied; according to fatigue damage, a compressive strength prediction model of slag concrete was established. Results showed that the compressive strength of standard-cured fatigued concrete under sulfate attack decreased with the increase of stress level. The influence of compressive fatigue on compressive strength loss of steam-cured slag concrete under sulfate attack was greater than that of standard-cured slag concrete. The predicted values of compressive strength prediction model of fatigued and unfatigued concrete under sulfate attack were in good agreement with the experimental values, indicating high accuracy of the model.

Key words: fatigue loading; sulfate attack; slag concrete; compressive strength

收稿日期: 2024-07-21。

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20220626); 常州市领军型创新人才引进培育资助项目(CQ20210085)。

作者简介: 严先萃(1993—), 男, 江西吉安人, 博士, 讲师。E-mail: yanxc@cczu.edu.cn

引用本文: 严先萃, 陈文, 蔡镇羽, 等. 疲劳混凝土硫酸盐侵蚀抗压强度演化规律及预测模型[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2025, 37(1): 68-75, 92.

“西部大开发”与“一带一路”倡议的提出,加速了中国混凝土工程的发展^[1-2]。但是,大规模使用水泥混凝土会给环境造成一定的影响。为节约成本、保护环境,以矿渣为代表的矿物外加剂已大规模应用^[3]。矿渣作为一种胶凝材料能减少建筑工程中水泥的用量,符合环境保护、绿色混凝土以及可持续发展的理念^[4-5]。

中国西北部地区和东部沿海地区的盐渍土含有大量硫酸根离子^[6],暴露其中的混凝土结构经常遭受硫酸盐侵蚀作用,导致混凝土过早劣化^[7]。此外,桥梁、隧道等混凝土结构工程常承受车辆、风力和水压等疲劳荷载^[8],循环往复的疲劳应力使混凝土原本存在的微小裂缝增大,导致混凝土结构工程在远小于设计强度的低应力水平下发生疲劳破坏^[9]。更危险的是,这种疲劳损伤破坏会加大混凝土结构的硫酸盐侵蚀破坏程度,产生 1+1>2 的叠加效应^[10]。因此研究疲劳荷载作用下矿渣混凝土硫酸盐侵蚀抗压强度及其预测模型,对提高疲劳荷载和硫酸盐侵蚀作用下矿渣混凝土结构的安全性和寿命有重要意义。

1 试验方法

1.1 原材料与试件的成型和养护

采用南京海螺水泥有限公司生产的 P.O 42.5 (普通硅酸盐)水泥以及河南郑州 S95 级磨细矿渣。水泥和矿渣主要化学成分的质量分数见表 1。采用南京谷渠建材有限公司生产的骨料,其中河砂细骨料的细度模数为 2.8,表观密度为 2 640 kg/m³,堆积密度为 1 580 kg/m³;碎石粗骨料的 最大粒径为 20 mm,表观密度为 2 820 kg/m³,堆积密度为 1 600 kg/m³。混凝土中矿渣质量分数为 0%,20%,50%,70%的试件,编号分别简写为 S₀,S₂₀,S₅₀和 S₇₀,混凝土配比见表 2。对于未掺矿渣的 S₀混凝土和掺 50%矿渣的 S₅₀混凝土,采用蒸汽养护和标准养护两种养护制度进行养护,对于掺 20%矿渣的 S₂₀混凝土和掺 70%矿渣的 S₇₀混凝土,只采用蒸汽养护制度。

表 1 水泥和矿渣主要化学成分的质量分数
Table 1 Mass fraction of main chemical components of cement and slag %

样品	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{SO}_3)$	$\omega(\text{K}_2\text{O})$	$\omega(\text{Na}_2\text{O})$	$\omega(\text{其他})$
水泥	5.48	20.94	2.83	62.08	2.39	2.18	0.91	0.09	3.10
矿渣	12.33	33.35	0.52	38.39	9.78	2.51	0.49	—	2.63

表 2 每立方米混凝土材料质量

Table 2 Mass of concrete material per cubic meter kg					
试件编号	水泥	矿渣	水	细骨料	粗骨料
S ₀	360	0			
S ₂₀	288	72			
S ₅₀	180	180	180	651	1 209
S ₇₀	108	252			

标准养护 (SD) 是将混凝土放入标准养护室中,浇筑 1 d 后拆模继续养护直至 28 d,标准养护室的养护条件为温度 $\theta=(20\pm2)$ °C,相对湿度 $\geq 95\%$ 。蒸汽养护 (ST) 是将混凝土放入 SBK-ZQTY400B 蒸汽养护箱中,调整温度为

20 °C 保持 2 h,随后在 3 h 内从 20 °C 上升到 60 °C 并在 60 °C 下恒温 8 h,最后在 3 h 内从 60 °C 下降到 20 °C 进行拆模。拆模后将混凝土放入标准养护室内养护直至 28 d,而后进行后续试验。蒸汽养护制度曲线如图 1 所示。

1.2 压缩疲劳试验

混凝土压缩疲劳试件的长 \times 宽 \times 高为 100 mm \times 100 mm \times 300 mm。疲劳加载过程中采用正弦波形曲线加载 (图 2), τ_{\max} 和 τ_{\min} 分别为加载过程中的最大应力和最小应力,加载频率为 5 Hz,疲劳加载次数为 10 000 次,循环特征值为 0.1。将应力水平为 0.5,0.6,0.7 的未掺矿渣标准养护混凝土 (S₀-SD) 记为 S₀-SD-0.5,

S_0 -SD-0.6, S_0 -SD-0.7; 掺 50% 矿渣的标准养护混凝土记为 S_{50} -SD; 掺 20%, 50%, 70% 矿渣的蒸汽养护混凝土记为 S_{20} -ST, S_{50} -ST, S_{70} -ST; 应力水平为 0.6 的掺 50% 矿渣的标准养护混凝土记为 S_{50} -SD-0.6; 应力水平为 0.6 的掺 20%, 50%, 70% 矿渣的蒸汽养护混凝土分别记为 S_{20} -ST-0.6, S_{50} -ST-0.6, S_{70} -ST-0.6。

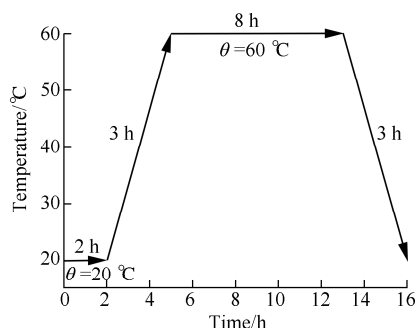


图 1 蒸汽养护制度曲线图

Fig.1 Steam curing profile

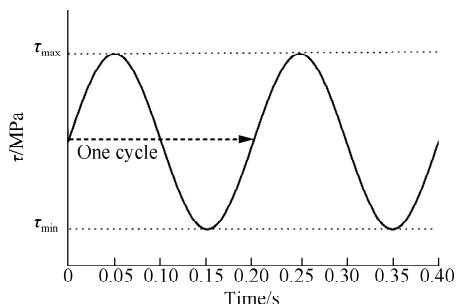


图 2 疲劳加载正弦波形图

Fig.2 Repeated stress profile

混凝土疲劳后的残余抗压强度与疲劳前的抗压强度的比值为残余强度比 D_F

$$D_F = \frac{f_p}{f_0} \quad (1)$$

式中: f_0 为混凝土 28 d 的抗压强度, 即疲劳前的抗压强度, MPa; f_p 为混凝土的残余抗压强度, MPa。

采用电化学阻抗谱 (EIS) 测量混凝土电化学 Nyquist 图, 并用图 3 的等效电路模拟得到连通孔溶液电阻 R_1 。图 3 中 C 为固相电容 (绝缘路径), R_2 和 Z 分别为非连通孔溶液的电阻和固-液界面的阻抗, R_e 为混凝土与铜电极之间的接触电阻。

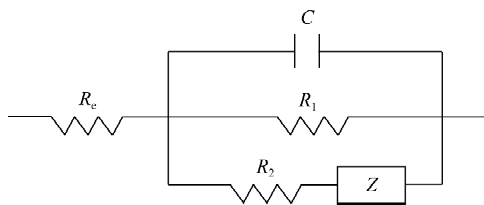


图 3 等效电路

Fig.3 Equivalent circuit

电阻 R_1 在疲劳前后的变化可间接反映混凝土的疲劳损伤 D_R

$$D_R = \left(1 - \frac{R''}{R'}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_R 为通过 EIS 得到的混凝土压缩疲劳损伤度; R' 为混凝土疲劳前用等效电路拟合得到的 R_1 值; R'' 为混凝土疲劳后用等效电路拟合得到的 R_1 值。

1.3 硫酸盐侵蚀试验

将养护 28 d 后 (未经疲劳荷载) 和经疲劳荷载作用的混凝土浸泡在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中, 设定侵蚀龄期为 30, 90, 180, 270, 360, 540 d, 对混凝土抗压强度进行测试。

2 试验结果与讨论

2.1 硫酸盐侵蚀抗压强度

2.1.1 标准养护混凝土抗压强度

浸泡在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中的标准养护疲劳混凝土与未经疲劳混凝土的抗压强度随浸泡时间的变化关系如图 4 所示。由图 4 可知, 标准养护疲劳混凝土浸泡在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中抗压强度的变化趋势与标准养护未经疲劳混凝土的抗压强度类似, 抗压强度随浸泡时间的增加呈现先增加后减小的趋势, 但标准养护疲劳混凝土浸泡在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中 540 d 后的抗压强度损失明显大于标准养护未经疲劳混凝土的抗压强度损失。混凝土硫酸盐侵蚀初期, 生成的钙矾石或石膏晶体一开始在大孔中沉淀, 填充混凝土孔隙, 对混凝土强度有积极作用, 但后续侵蚀产物膨胀对浆体造成损伤。掺 50% 矿渣的标准养护未经疲劳混凝土浸泡在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中

540 d 后的抗压强度几乎未有损失, 掺 50% 矿渣的标准养护疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀 540 d 内抗压强度从 28.4 MPa 降到 25.5 MPa, 压缩疲劳加大了混凝土在硫酸盐侵蚀过程中的强度损失。

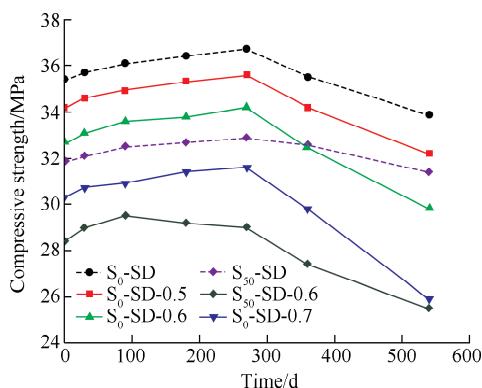


图4 标准养护疲劳混凝土与未经疲劳混凝土在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中的抗压强度随浸泡时间的变化关系

Fig.4 Compressive strength of standard-cured concretes with and without fatigue exposed to 5% Na_2SO_4 solution

对于未掺矿渣的标准养护未经疲劳混凝土, 硫酸盐侵蚀 540 d 后的抗压强度损失为 4.1%。对于未掺矿渣的标准养护疲劳混凝土, 当压缩疲劳应力水平为 0.7 时, 疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀 540 d 后的抗压强度降低了 14.8%, 大于疲劳应力水平为 0.6 和 0.5 时的强度损失; 当压缩疲劳应力水平为 0.6 时, 疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀 540 d 后的抗压强度降低了 8.9%; 当压缩疲劳应力水平为 0.5 时, 疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀 540 d 后的抗压强度降低了 5.6%。GAO 等^[11]研究发现当疲劳应力水平小于 0.4 时, 混凝土相对动弹性模量随侵蚀时间的增加几乎没有变化, 观察不到下降趋势, 然而当疲劳应力水平大于 0.6 时, 相对动弹性模量随侵蚀时间的增加大幅度降低, 这与文中研究结果类似。

2.1.2 蒸汽养护混凝土抗压强度

蒸汽养护疲劳混凝土与未经疲劳混凝土在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中的抗压强度随浸泡时间的变化关系如图 5 所示。由图 5 可知, 未经疲劳混凝土浸泡在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中的抗压强度随浸泡时间的增加呈现先增加后降低的趋势。未掺矿渣的蒸汽养护疲劳混凝土抗压强度的变化趋势

与未经疲劳混凝土类似, 不同的是, 疲劳混凝土抗压强度随时间增加而降低的时间点早于未经疲劳混凝土, 而且疲劳混凝土第二阶段的抗压强度降低趋势远大于未经疲劳混凝土。未掺矿渣的蒸汽养护未经疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀 270 d 开始出现抗压强度降低的现象; 当侵蚀 540 d 时, 抗压强度损失 11%; 未掺矿渣的蒸汽养护疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀 90 d 就开始出现抗压强度降低的现象; 到侵蚀 540 d 时, 其抗压强度损失达到 37%。另外, 掺 20%, 50%, 70% 矿渣的蒸汽养护疲劳混凝土的抗压强度随浸泡时间的增加直接降低。掺 20% 矿渣的蒸汽养护疲劳混凝土的抗压强度损失在侵蚀 270 d 时达到 36%, 混凝土破坏严重, 后续测试终止; 掺 50% 矿渣的蒸汽养护疲劳混凝土的抗压强度损失在侵蚀 270 d 时达到 33%; 掺 70% 矿渣的蒸汽养护疲劳混凝土的抗压强度损失在侵蚀 360 d 时达到 35%。导致这一现象的主要原因是掺入的矿渣导致浆体的孔径增加、多害孔占比增多^[12], 使混凝土在压缩疲劳过程中更容易遭受损伤。

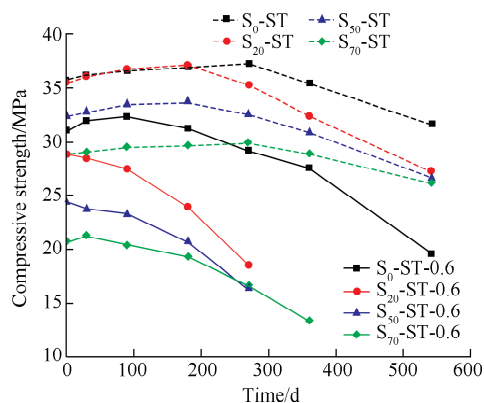


图5 蒸汽养护疲劳混凝土与未经疲劳混凝土在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中的抗压强度随浸泡时间的变化关系

Fig.5 Compressive strength of steam-cured concretes with and without fatigue exposed to 5% Na_2SO_4 solution

与图 4 相比可以发现, 蒸汽养护疲劳混凝土硫酸盐侵蚀前的抗压强度小于同配比的标准养护疲劳混凝土, 且蒸汽养护疲劳混凝土在侵蚀过程中抗压强度损失大于同配比的标准养护疲劳混凝土, 压缩疲劳对蒸汽养护混凝土硫酸盐侵蚀过程中抗压强度损失的影响大于标准养护混凝土。未掺矿渣的标准养护未经疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀

540 d 过程中的质量损失为 4%；未掺矿渣的标准养护疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀 540 d 过程中的质量损失为 9%；未掺矿渣的蒸汽养护未经疲劳混凝土在硫酸盐侵蚀 540 d 过程中的质量损失为 11%；未掺矿渣的标准养护疲劳混凝土在 540 d 硫酸盐侵蚀过程中的质量损失为 37%。蒸汽养护在加快胶凝材料水化速率的同时，导致水化产物扩散不及时、分布不均匀，浆体孔结构和基体相对粗糙，加大了矿渣混凝土在疲劳作用后的抗压强度损失^[13-14]。

2.2 硫酸盐侵蚀抗压强度预测模型

2.2.1 未经疲劳混凝土硫酸盐侵蚀抗压强度

混凝土硫酸盐侵蚀过程中，硫酸根离子由混凝土表面逐步扩散到混凝土内部，扩散到混凝土内部的硫酸根离子与混凝土发生化学反应导致混凝土发生膨胀破坏。在混凝土硫酸盐侵蚀过程中发现混凝土抗压强度经历初期增强和后期劣化两个过程。在侵蚀初期，侵入到混凝土内的硫酸根离子与混凝土内的水化产物发生反应，生成的膨胀性钙矾石和石膏对混凝土的孔隙进行填充，降低了混凝土的孔隙率，混凝土抗压强度增加；在侵蚀后期，混凝土孔隙被完全填充，继续生成的钙矾石和石膏对混凝土孔壁产生膨胀应力，当超过一定限度时就会产生微裂缝，微裂缝继续扩展成为宏观裂纹，对混凝土造成损伤，使得混凝土的抗压强度降低。

基于混凝土的硫酸盐侵蚀过程，以立方体试件为研究对象，将混凝土划分为劣化区、增强区和完好区，混凝土硫酸盐侵蚀后的区域划分示意图如图 6 所示。劣化区是指混凝土在硫酸盐侵蚀后的劣化区域，位于混凝土的最外层，该区域内混凝土强度记为 σ_c ；增强区位于劣化区和完好区之间，是混凝土内抗压强度增强的区域，该区域内混凝土强度记为 σ_s ；完好区为混凝土最内层，硫酸根离子未到达、混凝土未遭受硫酸盐侵蚀的区域，该区域内混凝土强度记为 σ_0 。

为方便建立混凝土硫酸盐侵蚀过程中抗压强度的预测模型，做出假设：① 混凝土内的硫酸根离子含量可以忽略不计，混凝土的劣化区和增

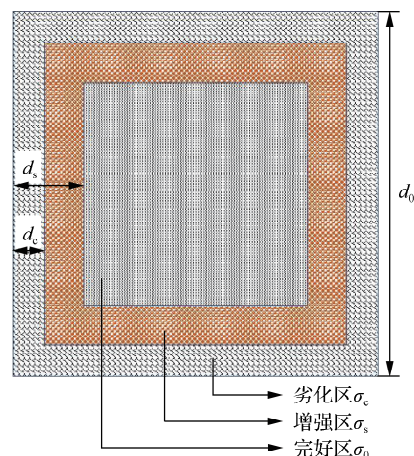


图 6 混凝土硫酸盐侵蚀后的区域划分示意图

Fig.6 Schematic diagram of the concrete after sulfate attack

强区完全是由从外界侵入的硫酸根离子与混凝土发生反应导致的；② 硫酸根离子从表面扩散到混凝土内部，混凝土是各向同性的，侵蚀后的各区域内部也为各向同性；③ 在混凝土各个区域内，相比完好区混凝土，劣化区混凝土几乎无法承受荷载，其抗压强度 σ_c 近似为零，完好区混凝土的抗压强度 σ_0 可视为未侵蚀前混凝土的抗压强度，混凝土增强区的抗压强度 σ_s 大于完好区混凝土的抗压强度，其相对完好区抗压强度的增强系数

$$f_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_0} \quad (3)$$

f_s 的值与混凝土类型、侵蚀环境有关。课题组前期对不同配比的水泥石在不同硫酸根离子溶度以及不同侵蚀溶液中的侵蚀行为进行研究，发现 Na_2SO_4 溶液侵蚀条件下 f_s 均在 1.1 左右^[15]，文中 f_s 按 1.1 进行计算。

基于上述假设，混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压极限承载荷载为

$$F_p(t) = A_s \cdot \sigma_s + A_0 \cdot \sigma_0 \quad (4)$$

式中： $F_p(t)$ 为混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压极限承载荷载，N； A_s 为混凝土硫酸盐侵蚀后的增强区面积， mm^2 ； A_0 为混凝土硫酸盐侵蚀后的完好区面积， mm^2 。

混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压强度可按式 (5) 计算

$$\sigma_p(t) = \frac{F_p(t)}{A_{\text{tot}}} = \frac{A_s \cdot \sigma_s + A_0 \cdot \sigma_0}{A_{\text{tot}}} \quad (5)$$

式中: t 为硫酸根离子在混凝土中的扩散时间, s; σ_p 为混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压强度, MPa; A_{tot} 为混凝土的截面面积, mm^2 , 在不考虑混凝土的边角脱落的情况下, A_{tot} 为 $10\,000\text{ mm}^2$ 。

将式 (5) 代入式 (4) 可得

$$\sigma_p(t) = \frac{f_s \cdot A_s \cdot \sigma_0 + A_0 \cdot \sigma_0}{A_{\text{tot}}} \quad (6)$$

$$\sigma_p(t) = \frac{f_s \cdot \sigma_0 \cdot [(d_0 - 2d_c)^2 - (d_0 - 2d_s)^2] + \sigma_0 \cdot (d_0 - 2d_s)^2}{A_{\text{tot}}} \quad (9)$$

另外, 混凝土劣化区深度和增强区深度存在一定的关系, 侵蚀初期, 混凝土未出现开裂区域, 劣化深度为 0; 侵蚀后期, 增强区深度和劣化区深度之间的差值设为 Δd 。劣化区深度 d_c 为

$$d_c = \begin{cases} 0 & (d_s < \Delta d) \\ d_s - \Delta d & (d_s \geq \Delta d) \end{cases} \quad (10)$$

$$\sigma_p(t) = \frac{f_s \cdot \sigma_0 \cdot [d_0^2 - (d_0 - 2d_s)^2] + \sigma_0 \cdot (d_0 - 2d_s)^2}{A_{\text{tot}}} \quad (12)$$

在侵蚀后期, 混凝土的抗压强度开始降低时, 混凝土出现开裂区域, A_s 为

$$A_s = (d_0 - 2d_s + 2\Delta d)^2 - (d_0 - 2d_s)^2 \quad (13)$$

$$\sigma_p(t) = \frac{f_s \cdot \sigma_0 \cdot [(d_0 - 2d_s + 2\Delta d)^2 - (d_0 - 2d_s)^2] + \sigma_0 \cdot (d_0 - 2d_s)^2}{A_{\text{tot}}} \quad (14)$$

总的来说, 混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压强度

$$\sigma_p(t) = \begin{cases} \frac{f_s \cdot \sigma_0 \cdot [d_0^2 - (d_0 - 2d_s)^2] + \sigma_0 \cdot (d_0 - 2d_s)^2}{A_{\text{tot}}} & (d_s \leq \Delta d) \\ \frac{f_s \cdot \sigma_0 \cdot [(d_0 - 2d_s + 2\Delta d)^2 - (d_0 - 2d_s)^2] + \sigma_0 \cdot (d_0 - 2d_s)^2}{A_{\text{tot}}} & (d_s > \Delta d) \end{cases} \quad (15)$$

2.2.2 疲劳混凝土硫酸盐侵蚀抗压强度

根据图 4 和图 5 中的试验数据, 可以得到混凝土在各个侵蚀时间内的增强区深度 d_s 。未经疲劳混凝土和疲劳混凝土增强区深度与侵蚀时间的关系分别如图 7 (a) 和图 7 (b) 所示。

Fick 扩散定律中, 离子在混凝土中的扩散深度与扩散时间 t 的平方根成正比关系^[16]

$$d = k \cdot \sqrt{t} \quad (16)$$

式中: d 为离子的扩散深度, mm; k 为与混凝土材料有关的比例参数, mm^2/s ; t 为硫酸根离子在混凝土中的扩散时间, s。该公式对于钾离子、钠离子和氯离子都有很好的适用性, 但由于

在图 6 中, 设混凝土劣化区深度为 d_c , mm; 增强区深度为 d_s , mm; 试件边长为 d_0 , mm。混凝土硫酸盐侵蚀后完好区面积 A_0 和增强区面积 A_s 可表示为:

$$A_0 = (d_0 - 2d_s)^2 \quad (7)$$

$$A_s = (d_0 - 2d_c)^2 - (d_0 - 2d_s)^2 \quad (8)$$

将式 (7) 和式 (8) 代入式 (6), 可得

即混凝土硫酸盐侵蚀过程中的强度可分为两部分计算, 在侵蚀初期, 增强区面积 A_s 可表示为

$$A_s = d_0^2 - (d_0 - 2d_s)^2 \quad (11)$$

相应的混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压强度为

式中 Δd 可根据混凝土抗压强度开始出现降低的时间点的 d_s 确定。

此时, 混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压强度为

预测公式为

硫酸根离子与混凝土发生化学反应, 导致混凝土的孔结构产生变化, 因此式 (16) 并不满足硫酸根离子在混凝土中的扩散。考虑到硫酸根离子对混凝土材料的影响, 采用式 (17) 来描述扩散深度与扩散时间的关系

$$d_s = k_p \cdot t^\alpha \quad (17)$$

式中 k_p 和 α 为与混凝土配比以及外界环境有关的比例参数。采用式 (18) 对图 7 中的数据进行拟合, 拟合参数见表 3, 相关系数均大于 0.95。表 3 还给出了混凝土在压缩疲劳作用后的残余强度比 D_F 以及基于电化学阻抗谱 (EIS) 的压缩疲劳损伤度 D_R 。

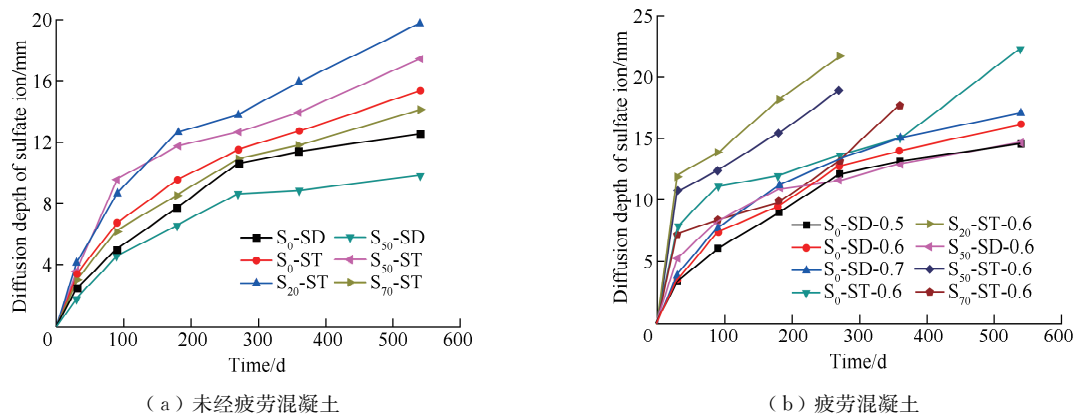


图 7 增强区深度与侵蚀时间的关系

Fig.7 Relationship between strengthen depth and the immersion time

表 3 不同混凝土硫酸盐侵蚀情况下的参数值

Table 3 Parameter value under different sulfate erosion conditions of concrete

	试件编号	k_p	α	D_F	D_R
未经 疲劳混 凝土	S ₀ -SD	0.552	0.507	—	—
	S ₀ -ST	0.744	0.484	—	—
	S ₂₀ -ST	0.965	0.479	—	—
	S ₅₀ -SD	0.563	0.466	—	—
	S ₅₀ -ST	1.243	0.419	—	—
	S ₇₀ -ST	0.691	0.483	—	—
疲劳 混凝土	S ₀ -SD-0.5	0.754	0.479	0.069	0.292
	S ₀ -SD-0.6	0.826	0.477	0.099	0.342
	S ₀ -SD-0.7	0.965	0.463	0.137	0.403
	S ₀ -ST-0.6	1.531	0.408	0.166	0.467
	S ₂₀ -ST-0.6	2.147	0.415	0.245	0.519
	S ₅₀ -SD-0.6	1.026	0.433	0.166	0.398
	S ₅₀ -ST-0.6	2.883	0.332	0.281	0.543
	S ₇₀ -ST-0.6	1.915	0.352	0.314	0.642

基于表 3 中的数据, 与疲劳混凝土配比以及外界环境有关的比例参数 k_{pf} 和 α_f 和未经疲劳混凝土配比以及外界环境有关的比例参数 k_{p0} 和 α_0 之间的关系可近似按式 (18) 和式 (19) 进行描述:

$$k_{pf} = \frac{k_{p0}}{(1-D_R)^{1.056}} \quad (18)$$

$$\alpha_f = \alpha_0 \cdot D_F^{0.851} \quad (19)$$

将式 (18) 和式 (19) 代入到式 (17) 中, 未经疲劳混凝土的扩散深度和疲劳混凝土的扩散深度可分别用式 (20) 和式 (21) 表示:

$$d_{s0} = k_{p0} \cdot t^{\alpha_0} \quad (20)$$

$$d_{sf} = \frac{k_{p0} \cdot t^{\alpha_0} \cdot D_F^{0.851}}{(1-D_R)^{1.056}} \quad (21)$$

式中: d_{s0} 为未经疲劳混凝土的扩散深度, mm; d_{sf} 为疲劳混凝土的扩散深度, mm; D_F 为混凝土在压缩疲劳作用后的残余强度比; D_R 为混凝土基于 EIS 得到的压缩疲劳损伤度。

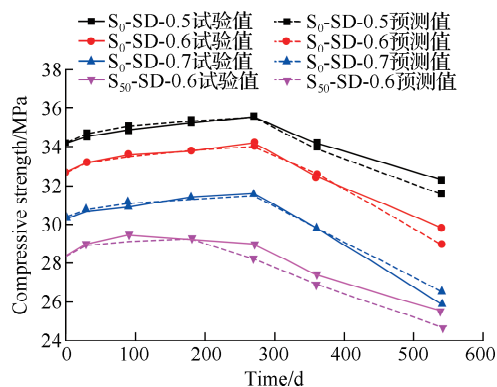
疲劳混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压强度 $\sigma_p(t)$ 预测公式为

$$\sigma_p(t) = \begin{cases} \frac{f_s \cdot \sigma_0 \cdot [d_0^2 - (d_0 - 2k_{pf} \cdot t^{\alpha_f})^2] + \sigma_0 \cdot (d_0 - 2k_{pf} \cdot t^{\alpha_f})^2}{A_{tot}} & (d_s \leq \Delta d) \\ \frac{f_s \cdot \sigma_0 \cdot [(d_0 - 2k_{pf} \cdot t^{\alpha_f} + 2\Delta d)^2 - (d_0 - 2k_{pf} \cdot t^{\alpha_f})^2] + \sigma_0 \cdot (d_0 - 2k_{pf} \cdot t^{\alpha_f})^2}{A_{tot}} & (d_s > \Delta d) \end{cases} \quad (22)$$

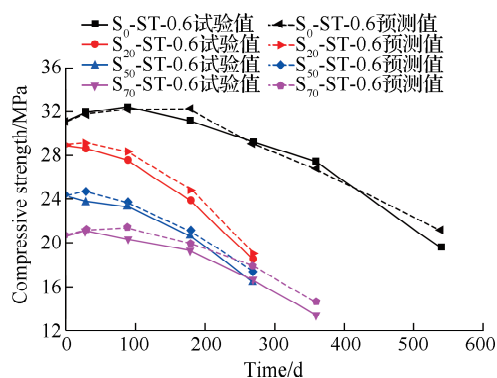
基于式 (22) 计算疲劳损伤混凝土硫酸盐侵蚀过程中的抗压强度预测值。标准养护疲劳混凝土和蒸汽养护疲劳混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压强度试验值与预测值之间的对比如图 8 所

示。在图 8 中, 试验值和预测值的相对误差最大为 8.2%, 试验值和预测值吻合良好, 模型准确性较高。式 (22) 的预测计算结果基本能反映疲劳混凝土在 5% 的 Na_2SO_4 中浸泡 540 d

的抗压强度变化规律。



(a) 标准养护混凝土



(b) 蒸汽养护混凝土

图8 不同养护条件下疲劳混凝土硫酸盐侵蚀后的抗压强度试验值与预测值

Fig.8 Experimental data and predicted results of compressive strength of fatigued concrete after sulfate attack under different curing conditions

3 结 论

1) 疲劳荷载作用下掺矿渣混凝土硫酸盐侵蚀中的抗压强度损失大于未掺矿渣混凝土。

2) 疲劳荷载作用对矿渣混凝土造成疲劳损伤, 加大了矿渣混凝土在硫酸盐侵蚀过程中的强度损失, 疲劳荷载对蒸汽养护矿渣混凝土硫酸盐侵蚀强度损失的影响大于标准养护矿渣混凝土。

3) 高应力水平加大了矿渣混凝土的疲劳损伤, 导致混凝土在疲劳作用下的硫酸盐侵蚀强度损失增加。

4) 基于矿渣混凝土疲劳后的残余强度比和疲劳损伤, 建立了未经疲劳混凝土和经疲劳作用混凝土的硫酸盐侵蚀抗压强度预测模型, 试验值与预测

值的相对误差最大为 8.2%, 模型准确性较高。

参考文献:

- [1] 封金财, 孙浩, 朱平华, 等. 气凝胶砂浆及其复合混凝土研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 70-78.
- [2] 陈春红, 朱平华, 陈世洲. 隧道火灾下气凝胶复合混凝土强度经时变化[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(3): 86-92.
- [3] ÖZBAY E, ERDEMİR M, DURMUŞ H I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties: a review[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 423-434.
- [4] 黄杰, 帅映勇, 杨斌. 不同掺量矿渣混凝土早期热膨胀系数试验研究及预测模型构建[J]. 混凝土, 2022 (12): 82-85.
- [5] COSTA L C B, NOGUEIRA M A, ANDRADE H D, et al. Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 126152.
- [6] 秦玲, 毛星泰, 高小建, 等. 碳化养护蒸压加气混凝土改性水泥的抗硫酸盐侵蚀性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(12): 1269-1276.
- [7] 刘云强, 左晓宝, 黎亮, 等. 硫酸盐侵蚀下硬化水泥浆体微结构演变及膨胀过程的数值模拟[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(12): 4128-4138.
- [8] SHEN D J, WEN C Y, ZHU P F, et al. Bond behavior between basalt fiber-reinforced polymer bars and concrete under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119518.
- [9] 吴笑梅, 高强, 丁浩, 等. 低热硅酸盐水泥混凝土疲劳性能研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 313-318.
- [10] 傅宇方, 张守祺, 牛获涛, 等. 桥梁混凝土疲劳损伤特征及对渗透性的影响[J]. 公路交通科技, 2016, 33(12): 88-92, 100.
- [11] GAO J M, YU Z X, SONG L G, et al. Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2013, 39: 33-38.

[下转第 92 页]

- jection[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2022, 29: 797-801.
- [20] WANG K Q, LI Y, KEMAO Q, et al. One-step robust deep learning phase unwrapping[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 15100-15115.
- [21] BRÍÑEZ-DE LEÓN J C, RICO-GARCÍA M, RESTREPO-MARTÍNEZ A. PhotoelastNet: a deep convolutional neural network for evaluating the stress field by using a single color photoelasticity image[J]. Applied Optics, 2022, 61(7): D50-D62.
- [22] LI H, ZHONG H P, NING M Q, et al. Using neural networks to create a reliable phase quality map for phase unwrapping[J]. Applied Optics, 2023, 62(5): 1206-1213.
- [23] PARK S, KIM Y, MOON I. Automated phase unwrapping in digital holography with deep learning[J]. Biomedical Optics Express, 2021, 12(11): 7064-7081.
- [24] WANG K Q, QIAN K M, DI J L, et al. Deep learning spatial phase unwrapping: a comparative review[J]. Advanced Photonics Nexus, 2022, 1(1): 014001.
- [25] 李国栋, 韦春龙, 于瀛洁, 等. 圆形域干涉图中的相位解包裹[J]. 光学精密工程, 2000, 8(5): 473-477.
- [26] NAIR V, HINTON G E. Rectified linear units improve Restricted Boltzmann machines[C]//ICML 2010-Proceedings, 27th International Conference on Machine Learning. Haifa: ICML, 2010: 807-814.
- [27] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[C]//32nd International Conference on Machine Learning. Lille: ICML, 2015: 448-456.
- [28] ITOH K. Analysis of the phase unwrapping algorithm[J]. Applied Optics, 1982, 21(14): 2470.
- [29] HERRÁEZ M A, BURTON D R, LALOR M J, et al. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following an-continuous path[J]. Applied Optics, 2002, 41(35): 7437-7444.

(责任编辑:谭晓荷)

[上接第 75 页]

- [12] YAN X C, JIANG L H, SONG Z J, et al. Using non-destructive testing tools to assess the pore structure of slag-blended cement paste under steam curing[J]. Magazine of Concrete Research, 2021, 73(2): 98-107.
- [13] SHI J Y, LIU B J, ZHOU F, et al. Effect of steam curing regimes on temperature and humidity gradient, permeability and micro-structure of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 281: 122562.
- [14] 张垚, 邹广强, 胡益彰, 等. 蒸养温度对单掺粉煤灰和矿渣蒸养混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2022(11): 32-35, 40.
- [15] 熊传胜. 硫酸盐侵蚀作用下水泥石的时变行为及预测模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- [16] 雷真, 陈敬男, 杨洋, 等. 涂层混凝土氯离子扩散的修正模型与数值模拟[J]. 混凝土, 2023(1): 35-40.

(责任编辑:周安迪)