

硫酸盐侵蚀试验中混凝土粗骨料体积分数 对单轴压缩性能的影响

林力洲¹, 李沙罡^{2*}

(1. 宁德市交通运输综合执法支队, 福建 宁德 352199; 2. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212100)

摘要: 通过对混凝土进行硫酸盐侵蚀试验, 探究粗骨料体积分数对受侵蚀混凝土单轴压缩性能和硫酸根离子含量的影响。分析不同硫酸盐侵蚀时间和粗骨料体积分数下混凝土单轴压缩应力-应变曲线、离子浓度分布和抗压强度的变化规律; 基于菲克定律理论计算单位面积混凝土内硫酸根离子侵入量, 并分析不同粗骨料体积分数和侵蚀时间下混凝土抗压强度变化和硫酸根离子侵入量的关系。结果表明: 随着粗骨料体积分数的增加, 受硫酸盐侵蚀的混凝土表现出更高的抗压强度和弹性模量; 侵蚀时间的延长和粗骨料体积分数的减少会导致混凝土内部各深度的硫酸根离子含量显著增加; 粗骨料体积分数越小, 侵蚀早期的硫酸根离子侵入量和抗压强度增长越大, 侵蚀后期的硫酸根离子侵入量和抗压强度损失越大。

关键词: 硫酸盐侵蚀; 粗骨料; 单轴压缩性能; 离子含量

中图分类号: U654; TV432 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2025)07-0017-06

doi: 10.7640/zggwjs202507003

Effect of coarse aggregate volume fraction on the uniaxial compressive properties of concrete in sulfate attack tests

LIN Li-zhou¹, LI Sha-gang^{2*}

(1. Ningde Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment, Ningde, Fujian 352199, China;

2. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212100, China)

Abstract: Through sulfate attack tests on concrete, the effect of coarse aggregate volume fraction on the uniaxial compressive properties and sulfate ion content of corroded concrete was investigated. The alterations in uniaxial compressive stress-strain curves, ion distribution patterns, and compressive strength concerning varying sulfate erosion durations and coarse aggregate volume fractions was analyzed. Employing Fick's law theory, the intrusion of sulfate ions per unit area into the concrete was quantified, followed by an analysis of the correlation between strength variations and sulfate ion ingress across different coarse aggregate volume fractions and sulfate erosion durations. The results show that the compressive strength and elastic modulus of sulfate-affected concrete exhibit an upward trend with increasing coarse aggregate volume fractions. Longer erosion periods and reduced aggregate volumes result in elevated sulfate ion concentrations at various depths within the concrete. Moreover, a reduced coarse aggregate volume fraction is associated with augmented sulfate ion intrusion and compressive strength development during the initial erosion stages, transitioning to increased sulfate ion intrusion and compressive strength degradation in the later phases of erosion.

Key words: sulfate attack; coarse aggregate; uniaxial compressive properties; ion content

收稿日期: 2024-12-10 修回日期: 2025-02-01

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_0604)

作者简介: 林力洲 (1989—), 男, 福建宁德人, 工程师, 港口航道与海岸工程专业, 主要从事混凝土结构耐久性研究。

* 通讯作者: 李沙罡, E-mail: lishagagjust@163.com

0 引言

海港码头、防波堤、人工岛、桥梁以及风电基础等大型混凝土结构,在海洋和盐湖的长期服役过程中,面临着严峻的耐久性挑战。这些恶劣环境极易导致结构物遭受硫酸盐侵蚀、氯盐侵蚀、干湿循环以及碳化等多种形式的损害^[1-2]。其中,硫酸盐侵蚀会直接对混凝土材料造成破坏^[3]。环境中的硫酸根离子通过孔隙扩散进入混凝土内部后,会与水泥水化产物发生反应,生成膨胀性产物钙矾石。随着反应产物的不断累积,当其体积超过孔隙所能容纳的极限时,便会产生膨胀应力,进而引发混凝土开裂。一旦混凝土出现裂缝,海水将直接渗透至内部材料,这不仅加剧了混凝土的进一步损伤,还可能导致钢筋锈蚀,严重威胁结构的安全。

混凝土单轴压缩性能是混凝土结构设计和分析中最重要的参数^[4]。已有研究证实硫酸盐侵蚀会对混凝土单轴压缩性能产生较大影响。Zhao等^[5]发现硫酸盐侵蚀下混凝土抗压强度在侵蚀早期随侵蚀时间而增加,在侵蚀后期随侵蚀时间而减小。Liao等^[6]的研究进一步揭示了受硫酸盐侵蚀混凝土弹性模量的变化规律,发现弹性模量同样经历了先增后减的过程,且相较于抗压强度,其变化幅度更为显著。沈亦云等^[7]研究了硫酸盐侵蚀对水泥砂浆应力-应变关系的影响,发现硫酸盐侵蚀不会改变水泥砂浆应力-应变曲线的基本形状,但会导致其力学性能出现明显退化。Li等^[8]基于硫酸盐侵蚀试验和非克定律理论,分析了不同侵蚀时间下混凝土抗压强度损失与混凝土内部侵入硫酸根离子量的关系,发现抗压强度损失与侵入硫酸根离子总量呈现出正相关关系。

粗骨料作为混凝土的关键组成部分,其体积分数对混凝土的整体性能具有显著影响。Jin等^[9]对粗骨料体积分数在15%~45%的3组混凝土进行了研究,结果表明混凝土的抗压强度和弹性模量均随着粗骨料体积分数的增加而呈现上升趋势。蔡栋兴等^[10]研究发现粗骨料体积分数的增加会使得稀释效应占主导地位,导致离子在混凝土中传输的阻碍效应增强。在粗骨料对受硫酸盐侵蚀混凝土的影响研究方面,Chen等^[11]发现,当混凝土遭受外部硫酸盐侵蚀时,石膏和钙矾石等侵蚀产物首先在粗骨料与砂浆之间的界面过渡区沉淀。Zhang等^[12]通过不同粗骨料体积分数下受硫酸盐侵蚀混凝土动弹性模量和离子侵蚀深度的试验研究,发现增大粗骨料的体积分数能够提高混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力。然而,尽管已有诸多研究成果,但关于粗骨料体积分数对单轴压缩性能等具体性能方面的影响机制,仍有待进一步深入研究。

本文通过对硫酸盐侵蚀下不同粗骨料体积分数的混凝土试样开展单轴压缩试验和离子浓度测试,分析了硫酸盐侵蚀时间和粗骨料体积分数对混凝土单轴压缩应力-应变曲线,离子浓度分布和抗压强度的影响。同时,基于非克定律理论,探究了硫酸盐侵蚀引起的抗压强度变化与单位面积混凝土硫酸根离子侵入量的关系,为硫酸盐侵蚀下混凝土结构的耐久性评估和修复提供参考。

1 试验设计

1.1 原材料

1) 水泥

本试验采用的海螺牌P·O42.5水泥为工程、研究中常用的普通硅酸盐水泥,安定性合格,其物理力学性能见表1。

表1 水泥物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of cement

标准稠度用水量/%	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	凝结时间/min		密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
27.1	368	190	262	3 110	6.1	8.7	28.3	53.1

2) 骨料

细骨料选用江苏当地天然河沙,表观密度为 $2\,620\text{ kg/m}^3$,细度模数为2.63,根据GB/T 14684—2022《建设用砂》^[13]检验为Ⅱ区中砂。粗骨料为5~16 mm连续级配碎石,表观密度为 $2\,710\text{ kg/m}^3$ 。

3) 化学试剂

配制侵蚀溶液所用无水硫酸钠为上海久亿化

学试剂有限公司生产的AR分析纯试剂。

1.2 配合比和试件制备

1.2.1 配合比

为了研究粗骨料体积分数的影响,参考JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》^[14]设计3组不同材料组成的混凝土,每组混凝土中砂浆的组分不变,混凝土的配合比见表2。

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of concrete

编号	材料用量/(kg·m ⁻³)				粗骨料体积分数/%
	水	水泥	砂	碎石	
A30	245	445	787	813	30
A40	210	382	674	1 084	40
A50	175	318	560	1 355	50

1.2.2 试件制备

依据 JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试验检测技术规范》^[15]采用单卧轴混凝土搅拌机制备试件。先将搅拌锅润湿, 之后将粗骨料和细骨料投入搅拌机中搅拌 30 s, 然后加入水泥继续搅拌 30 s。随后, 加入水继续搅拌 3 min, 以确保水泥浆体充分包裹骨料。搅拌完成后, 将混凝土浆体倒入 100 mm×100 mm×100 mm 模具中浇筑成型, 置于振动台上振动 60 s。振动结束, 在混凝土表面覆盖薄膜养护 24 h 后拆模编号。

1.2.3 试件侵蚀

为了进行一维侵蚀试验, 将试件的端面 and 一组侧面用石蜡密封, 仅留一组侧面与侵蚀溶液接触。石蜡固化 24 h 后首先将试件在饱和石灰水中养护 28 d, 之后完全浸泡在 5% Na₂SO₄ 溶液中侵蚀。为了保证侵蚀溶液的浓度和 pH 值稳定, 每隔 1 个月更换 1 次侵蚀溶液。待侵蚀时间达到 180 d 和 360 d, 从溶液中取出试件, 擦干表面后进行测试。

1.3 试验方法

1.3.1 单轴压缩试验

采用电液伺服万能机进行试件的加载, 在试件的两侧对称布置 2 个位移计测量应变。在预加载阶段, 施加 25 kN 的载荷。在正式加载阶段, 参考已有研究^[6]采用应变控制, 上升段采用 0.15 mm/min 的应变速率, 峰值附近采用 0.05 mm/min 的应变速率, 下降段采用 0.03 mm/min 的应变速率。

1.3.2 离子浓度测试

到达拟定侵蚀龄期后采用台式钻床以 0~5 mm、5~10 mm、10~15 mm、15~20 mm、20~25 mm 的取样深度自外层向内层逐层钻粉, 粉末过 0.075 mm 方孔筛后以 60 ℃ 烘干 24 h 并冷却至室温。

用感量为 0.000 1 g 的分析天平称取 0.5 g 粉末, 加入 20 mL 稀硝酸进行溶解。溶液过滤后采

用分光光度计测定溶液中的硫酸根离子浓度 c_{ss} 。混凝土中硫酸根离子含量按式(1)计算:

$$c_s = \frac{10^{-6} \times c_{ss} \times V_{ss}}{m_{cs}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: c_s 为混凝土中硫酸根离子含量, %; c_{ss} 为滤液中硫酸根离子的浓度, mg/L; V_{ss} 为滤液的体积, mL; m_{cs} 为硫酸根离子含量测定所用粉末的重量, g。

2 结果与讨论

2.1 盐侵蚀对单轴压缩性能的影响

在清水和 5% Na₂SO₄ 溶液中浸泡 360 d 后混凝土的单轴压缩应力-应变曲线如图 1 所示。受硫酸盐侵蚀试样和未受侵蚀试样的应力-应变曲线形状相似, 均为单峰曲线, 具备明显的上升段和下降段。加载初期, 随着应变的发展, 应力逐渐增大, 应力与应变基本保持弹性关系。随着荷载的继续增大, 应力的发展速度减慢, 曲线斜率逐渐减小, 直至应力达到极限值。在峰值附近平稳过渡后, 应力随着压应变的进一步增加而减小。由于硫酸盐对混凝土的侵蚀作用, 混凝土的抗压强度由 34.67 MPa 下降到 28.88 MPa, 降幅达到 16.70%; 同时, 弹性模量也由 21.70 MPa 下降到 13.12 MPa, 降幅高达 39.54%。此外, 与同龄期未受侵蚀的混凝土相比, 受侵蚀混凝土的下降段坡度显著变缓。

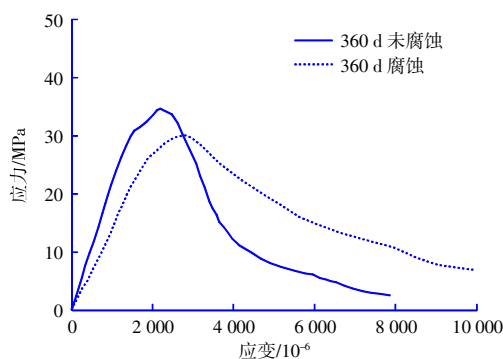


图 1 受硫酸盐侵蚀前后混凝土应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of concrete with and without sulfate attack

2.2 粗骨料体积分数对单轴压缩性能的影响

图 2 为不同粗骨料体积分数的混凝土在 5% Na₂SO₄ 溶液中浸泡 360 d 后混凝土的单轴压缩应力-应变曲线。3 组混凝土受侵蚀后的应力-应变曲线的形状较为相似, 同样为单峰曲线, 有着明显的上升段和下降段。

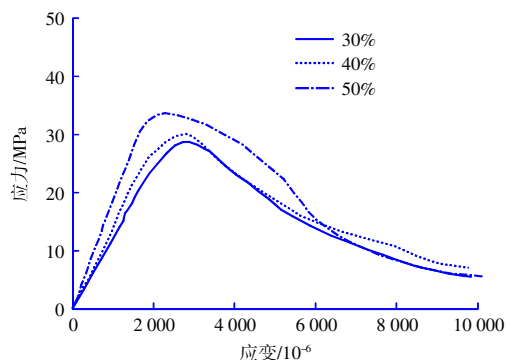


图2 不同粗骨料体积分数混凝土应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of concrete with different volume fraction of coarse aggregate

表3展示了根据图2数据计算得出的不同粗骨料体积分数下受硫酸盐侵蚀混凝土的抗压强度和弹性模量。当粗骨料体积分数为50%时,混凝土的抗压强度和弹性模量均达到最大值;而当粗骨料体积分数降至40%时,其抗压强度和弹性模量分别下降了10.62%和26.99%,位居其次;体积分数进一步降低至30%时,这2项指标分别下降了14.33%和33.56%,表现为最小。这一趋势表明,随着混凝土中粗骨料体积分数的增加,其抵抗硫酸盐侵蚀的能力也随之增强。

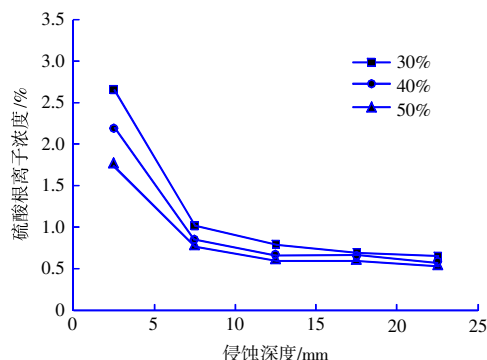
表3 不同粗骨料体积分数混凝土抗压强度和弹性模量

Table 3 Compressive strength and elastic modulus of concrete with different volume fraction of coarse aggregate

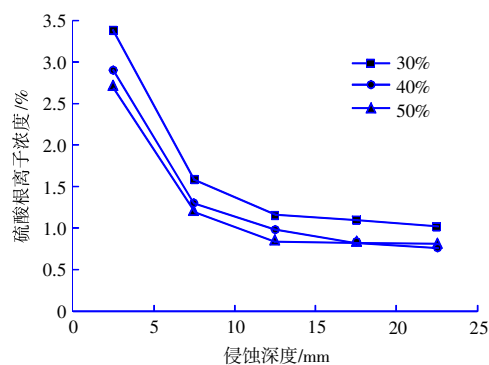
体积分数/%	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
30	28.88	11.94
40	30.13	13.12
50	33.71	17.97

2.3 粗骨料体积分数对离子浓度分布的影响

不同粗骨料体积分数的混凝土在5% Na_2SO_4 溶液中浸泡180 d和360 d后混凝土内的硫酸根离子浓度分布如图3所示。在硫酸盐溶液中侵蚀180 d和360 d后3组混凝土内硫酸根离子浓度的分布规律较为相似,均在0~5 mm时有着较高浓度,之后随着深度的增加浓度显著下降。对比图3(a)和图3(b)可知,随着侵蚀时间的增加,各侵蚀深度硫酸根离子浓度均显著增加。此外,在图3(a)和图3(b)中,各侵蚀深度硫酸根离子含量均随着混凝土中粗骨料体积分数的减小而增大。这是因为粗骨料体积分数较小的混凝土往往具备更大的孔隙率,因而离子扩散速率更快^[6]。



(a) 180 d



(b) 360 d

图3 不同粗骨料体积分数混凝土硫酸根离子含量分布

Fig. 3 Distribution of sulfate ions content in concrete with different volume fraction of coarse aggregate

表4为不同粗骨料体积分数下混凝土表层硫酸根离子含量。从表4可以看出,侵蚀时间从180 d增加到360 d,粗骨料体积分数为40%的混凝土表层硫酸根离子含量增加了32.42%。此外,在180 d时粗骨料体积分数从50%减小到30%,表层硫酸根离子含量增加了52.00%;在360 d时粗骨料体积分数从50%减小到30%,表层硫酸根离子含量增加了25.19%。

表4 不同粗骨料体积分数混凝土表层硫酸根离子含量

Table 4 Surface sulfate ion content of concrete with different volume fraction of coarse aggregate

体积分数/%	表层硫酸根离子含量/%	
	180 d	360 d
30	2.66	3.38
40	2.19	2.90
50	1.75	2.70

2.4 粗骨料体积分数对抗压强度的影响

在清水和5% Na_2SO_4 溶液中浸泡180 d和360 d后,不同粗骨料体积分数的混凝土抗压强度如

图 4 所示。在 2 个龄期受侵蚀前后混凝土的抗压强度均随着粗骨料体积分数的增加而增大。此外, 在 180 d 时由于硫酸盐侵蚀产物的填充作用, 受侵蚀后各组混凝土的抗压强度均略有增加; 而在 360 d 时由于大量侵蚀产物的生成导致混凝土开裂, 受侵蚀后各组混凝土的抗压强度均显著减小。

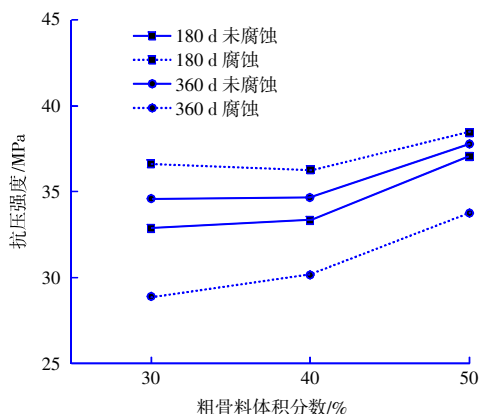


图 4 不同粗骨料体积分数混凝土受侵蚀前后抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of concrete with different volume fraction with and without sulfate attack

表 5 为根据图 4 数据计算得出的不同粗骨料体积分数下, 硫酸盐侵蚀导致的混凝土抗压强度损失情况。该损失值是通过计算相同龄期下受侵蚀混凝土与未受侵蚀混凝土的抗压强度之差, 再除以未受侵蚀混凝土的抗压强度所得。从表 5 可以观察到, 180 d 时粗骨料体积分数越大的混凝土在硫酸盐侵蚀下出现的抗压强度增长越小, 而 360 d 时粗骨料体积分数越大的混凝土在硫酸盐侵蚀下出现的抗压强度损失越小。这一现象可归因于粗骨料体积分数较大的混凝土中侵入的硫酸根离子含量较小, 从而生成的膨胀性侵蚀产物钙矾石的量也较少, 对混凝土抗压强度的影响相应减小。

表 5 硫酸盐侵蚀下不同粗骨料体积分数混凝土抗压强度损失

Table 5 Compressive strength loss of concrete with different volume fraction of coarse aggregate under sulfate attack

体积分数/%	抗压强度损失/%	
	180 d	360 d
30	-11.42	16.48
40	-8.85	13.09
50	-3.76	10.77

2.5 抗压强度变化与离子含量的关系

采用菲克定律的一维非稳态解对硫酸根离子

含量分布进行拟合:

$$c(x, t) = c_b - (c_b - c_0) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_a t}}\right) \quad (2)$$

式中: $c(x, t)$ 为时间 t 、深度 x 处的硫酸根离子含量, %; c_b 为相关分析确定的侵蚀溶液与试样边界处的离子含量, %; $\operatorname{erf}()$ 为误差函数; c_0 为混凝土受侵蚀前的硫酸根离子含量, 根据试验结果取为 0.50%; D_a 为表观扩散系数, m^2/s 。

拟合结果如表 6 所示。由于较大粗骨料体积分数的混凝土有着更小的孔隙率, 因而边界离子含量和表观扩散系数更小。此外, 随着侵蚀时间的增加, 侵入混凝土内部的离子量逐渐增多, 导致边界离子含量不断增大。同时, 过量硫酸根离子与混凝土成分反应生成的侵蚀产物钙矾石, 会造成混凝土开裂, 进而使得表观扩散系数增大。

表 6 离子含量分布拟合结果

Table 6 Fitting results of ion content distribution

体积分数/%	边界离子含量/%		表观扩散系数/($\text{pm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	180 d	360 d	180 d	360 d
30	3.74	3.89	1.04	1.52
40	3.20	3.61	0.84	0.96
50	2.49	3.49	0.84	0.78

对不同深度的硫酸根离子含量进行积分, 得到时间 t 时单位面积混凝土硫酸根离子侵入量:

$$c_{\text{st}} = \int_0^{x_c} c(x, t) dx \quad (3)$$

式中: c_{st} 为单位面积混凝土硫酸根离子侵入量, $\text{mm}\%$; x_c 为硫酸根离子扩散深度, 考虑测量误差取为混凝土中硫酸根离子超过初始值 5% 的深度, mm 。

表 7 为抗压强度变化与单位面积混凝土硫酸根离子侵入量的关系。在 180 d 时, 随着粗骨料体积分数的减小, 混凝土内硫酸根离子侵入量和抗压强度增长量增大。这是因为在侵蚀早期, 硫

表 7 抗压强度损失与硫酸根离子侵入量的关系

Table 7 Relationship between compressive strength loss and sulfate intrusion

体积分数/%	180 d		360 d	
	侵入量/($\text{mm}\%$)	抗压强度损失/%	侵入量/($\text{mm}\%$)	抗压强度损失/%
30	0.025	-11.42	0.044	16.48
40	0.020	-8.85	0.033	13.09
50	0.017	-3.76	0.029	10.77

酸盐侵蚀产物主要起填充孔隙作用,因而抗压强度随硫酸根离子侵入量的增加而增加。在 360 d 时,随着粗骨料体积分数的减小,混凝土内硫酸根离子侵入量和抗压强度损失增加。这是因为在侵蚀后期,过量硫酸盐侵蚀产物的生成造成混凝土膨胀开裂,因而抗压强度随硫酸根离子侵入量的增加而减小。

3 结语

1) 硫酸盐侵蚀作用会导致混凝土抗压强度和弹性模量减小,单轴压缩应力-应变曲线下降段坡度变缓;粗骨料体积分数的增加会导致受硫酸盐侵蚀混凝土抗压强度和弹性模量增加。

2) 随着侵蚀时间的增加,混凝土内部各深度硫酸根离子含量显著增加,且 0~5 mm 深度离子含量一直都远高于内部各深度;随着粗骨料体积分数的增加,混凝土内部各深度硫酸根离子含量均显著降低。

3) 粗骨料体积分数越小,180 d 时硫酸根离子侵入量和侵蚀造成的抗压强度增长越大,360 d 时硫酸根离子侵入量和侵蚀造成的抗压强度损失越大。

参考文献:

- [1] 高明爽,潘慧敏,赵庆新.喷射混凝土孔结构及其对耐久性影响的研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(11):3895-3910.
GAO Ming-shuang, PAN Hui-min, ZHAO Qing-xin. Research progress on pore structure of shotcrete and its influence on durability[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(11): 3895-3910.
- [2] GRAZZINI A, LACIDOGNA G, ZERBINATTI M, et al. Digital image correlation applied to lime-based mortars: Shrinkage tests for durability evaluations in restoration works[J]. Developments in the Built Environment, 2022, 10: 100070.
- [3] 俞小彤,常西栋,周文涛,等.氯盐与硫酸盐复合侵蚀下钢筋混凝土锈裂行为[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(2):151-160.
YU Xiao-tong, CHANG Xi-dong, ZHOU Wen-tao, et al. Corrosion-induced cover cracking of reinforced concrete under combined chloride and sulfate attack[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(2): 151-160.
- [4] NAZAR S, YANG J, AMIN M N, et al. Formulation of estimation models for the compressive strength of concrete mixed with nanosilica and carbon nanotubes[J]. Developments in the Built Environment, 2023, 13: 100113.
- [5] ZHAO G, LI J, SHI M, et al. Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal-external combined sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118683.
- [6] LIAO K, ZHANG Y, ZHANG W, et al. Modeling constitutive relationship of sulfate-attacked concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260(4): 119902.
- [7] 沈亦云,殷光吉,温小栋,等.硫酸盐侵蚀下水泥砂浆应力应变曲线及性能劣化研究[J].宁波工程学院学报,2022,34(2):13-19.
SHEN Yi-yun, YIN Guang-ji, WEN Xiao-dong, et al. Stress-strain curve and property deterioration of cement mortar under sulfate attack[J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2022, 34(2): 13-19.
- [8] LI S, YU X, ZHOU W, et al. Strength assessment of cement-based materials under marine conditions subjected to sulfate and chloride attack based on ion distributions[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(6): 1210.
- [9] JIN L, LIU K, ZHANG R, et al. Effects of content and size of aggregate on the mechanical responses of concrete at cryogenic temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 273: 108737.
- [10] 蔡栋兴,毕文彦,管学茂.粗骨料对混凝土氯离子扩散影响的模拟与试验[J].建筑材料学报,2023,26(4):383-388.
CAI Dong-xing, BI Wen-yan, GUAN Xue-mao. Simulation and experiment of the effect of coarse aggregate on chloride diffusion in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4): 383-388.
- [11] CHEN H, ZHU Z, LIN J, et al. Numerical modeling on the influence of particle shape on ITZ's microstructure and macro-properties of cementitious composites: A critical review[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2018, 7(3/4): 248-269.
- [12] ZHANG H, LIU W, ZHANG J, et al. A new look at the resistance of recycled aggregate concrete(RAC) to the external sulfate attacks: The influence of the multiple mesoscopic material phases[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64: 105653.
- [13] GB/T 14684—2022,建设用砂[S].
GB/T 14684—2022, Sand for construction[S].
- [14] JGJ 55—2011,普通混凝土配合比设计规程[S].
JGJ 55—2011, Specification for mix proportion design of ordinary concrete[S].
- [15] JTS/T 236—2019,水运工程混凝土试验检测技术规范[S].
JTS/T 236—2019, Technical specification for concrete testing of port and waterway engineering[S].
- [16] LI L, XIA J, LIN S. A multi-phase model for predicting the effective diffusion coefficient of chlorides in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 295-301.