

DOI:10.11918/202504073

砂浆在冻融早期的空间损伤演化机理

陈思远¹, 林宝臣^{1,2}, 张春良², 肖会刚¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 黑龙江省黑建一建筑工程有限责任公司, 哈尔滨 150090)

摘要: 受温度与水分传递方向的影响, 砂浆在冻融早期的损伤发展呈现出空间特征。然而, 现有冻融损伤监测方法多聚焦于试件整体的平均性能, 忽略了局部损伤演化的差异性。为定量评估空间位置对砂浆冻融早期损伤的影响, 并深入揭示其演化机制, 本文提出一种基于布拉格光纤光栅传感器的实时、原位应变监测方法, 并测试了冻融早期砂浆内部不同空间位置的应变。结果表明, 在冻融早期阶段, 砂浆上层区域应变幅值高于中层; 随着冻融循环次数的增加, 峰值应变持续上升, 残余应变出现; 微观形貌分析结果验证了以残余应变判断冻融损伤空间差异的可靠性。基于此, 本文进一步构建了考虑空间位置的早期冻融损伤发展模型。由宏观性能测试与局部应变对比分析结果可知, 砂浆在冻融早期的损伤以表层开裂为主, 虽然该现象对宏观性能弱化的影响较小, 但能够为环境水分进入砂浆内部提供新的传输通道, 进一步加剧冻融损伤的演化。

关键词: 冻融早期; 空间特征; FBG 测试; 局部应变; 损伤发展

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)05-0045-09

Evolution mechanism of spatial damage of mortar in the early freeze-thaw stage

CHEN Siyuan¹, LIN Baochen^{1,2}, ZHANG Chunliang², XIAO Huigang¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Heilongjiang Province Construction Engineering Group Co., Ltd., Harbin 150090, China)

Abstract: Affected by the direction of temperature and moisture transfer, the damage development of mortar in the early freeze-thaw (F-T) stage exhibits spatial characteristics. However, existing F-T damage monitoring methods mostly focus on the overall average performance of specimens, ignoring the differences in local damage evolution. To quantitatively evaluate the influence of spatial position on the early F-T damage of mortar and further reveal its evolution mechanism, this paper proposed a real-time and in-situ strain monitoring method based on fiber bragg grating sensors and tested the strain at different spatial positions inside mortar during the early F-T stage. Results show that the strain amplitude in the upper layer of mortar is higher than that in the middle layer during the early F-T stage; with the increase of F-T cycles, the peak strain continues to rise, and residual strain appears; micro-morphology analysis results verify the reliability of using residual strain to judge the spatial difference of F-T damage. Based on this, this paper further established an early F-T damage evolution model considering spatial position. The comparative analysis results of macroscopic performance tests and local strain show that the damage of mortar in the early F-T stage is dominated by surface cracking. Although this phenomenon has little effect on the degradation of macroscopic performance, it can provide new transmission channels for environmental moisture to enter the interior of mortar, further aggravating the evolution of F-T damage.

Keywords: early freeze-thaw stage; spatial characteristic; FBG test; local strain; damage development

我国东北、华北、西北及青藏高原与川西等地区地域辽阔, 负温季节漫长, 水泥基材料的冻融损伤是基础设施面临的主要耐久性问题之一。自 1945 年 Powers^[1-3] 提出静水压、渗透压等冻融损伤理论后, 关于水泥基材料冻融损伤的研究日渐深入, 并形成了较为成熟的抗冻性能检测方法及判别依据。例如, Bumanis 等^[4-6] 使用抗压强度损失率作为冻融

损伤评估参数, 其研究表明随着冻融循环次数的增加, 试件的抗压强度下降。与之相似, Alrashed 等^[7-9] 使用动弹性模量作为冻融损伤评估参数, 并基于相对动弹模建立了水泥基材料在冻融过程中的损伤演化模型。此外, Hassan 等^[10-11] 根据试件表层剥落特征, 使用质量损失率来表征混凝土冻融损伤程度。

收稿日期: 2025-04-26; 录用日期: 2025-06-12; 网络首发日期: 2025-06-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250617.1240.005>

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U24A20165)

作者简介: 陈思远(1995—), 女, 博士研究生; 肖会刚(1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 肖会刚, xiaohg@hit.edu.cn

上述研究从宏观层面探究了水泥基材料冻融损伤的演化过程,并在一定程度上解决了寒区工程的选材和应用问题,但这些方法聚焦于试件的整体性能变化。由热传导及水分传输路径可知,空间位置对冻融损伤存在影响,如试件表层与环境之间的热交换最直接。此外,由于负温抽吸作用^[12-13],环境水最先抵达试件表层并对其进行水分补给,使其率先达到局部临界饱和度并发生冻融损伤。因此,以试件“平均性能”表征冻融损伤的方法,在一定程度上忽视了损伤演化的空间差异性。尤其是在冻融早期,试件表层损伤的出现,对其整体性能丧失的影响并不显著,但表层的冻融损伤可为后续冻融过程中的水分传输提供新通道。因此,定量表征不同空间位置的冻融损伤,对深入探究寒区水泥基材料的抗冻耐久性具有重要意义。

应变是一个无量纲参数,可用于描述载荷作用下的局部相对变形,进而反映材料的局部损伤情况^[14]。由于温度可以被视作一种环境载荷,因此,可以使用应变评估砂浆在冻融循环过程中的空间损伤演变过程。目前,在冻融过程中,多数研究采用应变片进行应变监测^[15-17],但该方法存在一定的局限性:一方面,应变片本身因温度变化引起的误差无法避免;另一方面,应变片易发生漂移,在长期测试过程中不稳定。为了保证冻融过程中应变测试数据的可靠性,迫切需要一种高稳定性、高精度的应变测试方法。布拉格光纤光栅测试(fiber bragg grating, FBG)作为一种新型无损监测技术^[18],其依靠光信号传递来监测应变和温度^[19-20],具有高分辨率、高灵敏度、高稳定性和高精度^[21-22]。因此,适用于长期耐久性问题的监测。

然而,由于 FBG 尺寸较小且脆弱,在浇筑过程中,嵌入的 FBG 极易损坏^[23]。目前,关于 FBG 传感器在水泥基材料中的应用大多需要进行特殊处理。例如:李建新等^[24]通过外部固定 FBG 传感器的方式监测了混凝土三点弯曲开裂;Kesavan 等^[25]采用封装 FBG 的方式测试了混凝土在压缩荷载下的应变响应;Paul 等^[26]在小尺寸试件(横截面 25 mm × 25 mm)内部嵌入 FBG 传感器,并对高强砂浆的热膨胀系数进行了测试。值得注意的是,以上测试方法均限制了 FBG 的应用场景。利用小尺寸 FBG 对砂浆内部进行多点应变测试,在应用层面上仍存在困难。为此,本文提出一种先理后拨的传感器安装方法,通过预埋空心钢管对 FBG 传感器进行防护,待灌注成型后将钢管拔出,从而实现 FBG 传感器在砂浆内部的精准埋设。在此基础上,对冻融早期砂浆试件开展基于空间位置的损伤演化机理研究;同

时,结合强度试验、质量测试与微观形貌观测,分析冻融早期砂浆局部损伤与整体性能演化之间的联系,以期深入揭示砂浆冻融损伤机制提供参考与支撑。

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

本研究使用亚太水泥厂生产的 P. O 42.5 水泥作为胶凝材料,选择标准砂作为细骨料。水泥、水和细骨料的质量比为 1:0.4:1.08,使用聚羧酸复合型引气减水剂(PCE)提高砂浆的流动度,使砂浆能够全方位、紧密地包裹 FBG 传感器,以保证测试数据的准确性。其中,PCE 的用量为水泥质量的 0.31%。

1.2 FBG 传感器原理及构造

FBG 传感器的光栅能够从宽带光源中选择满足栅区布拉格波长(如式(1))的光信号进行反射^[27-29]。由于光栅选择的反射波长会随温度及应变的变化而发生改变。因此,FBG 既可以被用作温度传感器,也可以被用作应变传感器。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为光栅的特定布拉格波长; n_{eff} 为光栅的有效折射率; Λ 为光栅周期。

本研究使用的 FBG 传感器运用了波分复用技术^[30],即在同一传感器内设计两个布拉格光栅。光栅长度为 10 mm,两栅区中心间隔 50 mm。由于传感器的外包软管与水泥基材料之间的黏结性较差,因此,为提高 FBG 传感器与测点位置之间的协同变形,传感器嵌入试件内的部分选用裸栅形式,FBG 传感器的详细构造如图 1 所示。

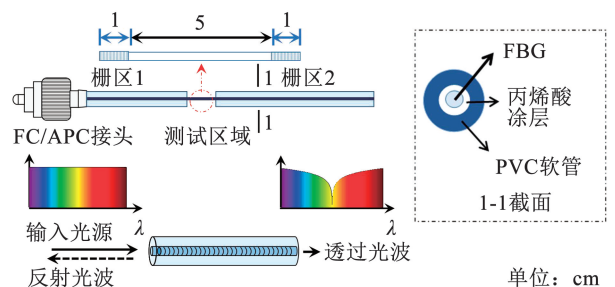


图 1 FBG 传感器工作原理及构造

Fig. 1 Working principle and structure of FBG sensor

1.3 FBG 安装方法及试件制备

根据试验需要将试件分为两种,边长 70.7 mm 的立方体试件用于测试砂浆强度、质量以及形貌变化,直径 150 mm,高 150 mm 的圆柱体试件用于监测冻融早期的局部应变。需要说明的是,选用圆柱体可以减少冻融过程中水分和温度传递的边角效应。所有试件固化 24 h 后脱模放入(20 ± 2) °C 的标准养护室中养护 24 d,随后放入水中浸泡 4 d。

FBG传感器的定位如图2所示。根据测点所在高度将截面分为Up-layer和Mid-layer,其中Up-layer距离试件顶面15 mm, Mid-layer距离试件顶面75 mm。每个测试截面内分布两个测点,1[#]位于截面圆心,2[#]位于截面内的任一直径上且距离圆周5 mm。为便于后续表述,将Up-layer内的1[#]测点命名为1[#]up,2[#]测点命名为2[#]up;将Mid-layer内的1[#]测点命名为1[#]mid,2[#]测点命名为2[#]mid。

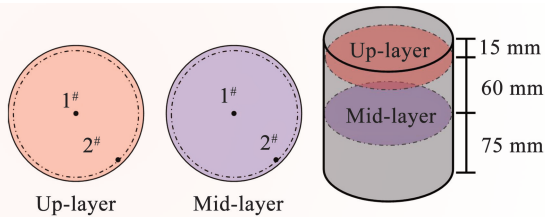


图2 FBG传感器位置设计

Fig. 2 Position design of FBG sensors

FBG在直接嵌入的过程中极易受损,因此,为了保证FBG传感器在试件内部的成活率,本研究提出了一种“先埋后拔”的安装方式,具体如图3所示。首先,按照FBG传感器的投影定位对模具进行钻孔加工,然后预先埋置空心钢管。当试件浇筑、振捣完成后,将FBG传感器插入空心钢管。最后,固定FBG的FC/APC接头后拔出空心钢管。试验证明,在7次安装测试中(每次FBG安装数量不少于12个),该安装方式可保证FBG存活率高达88.9%。

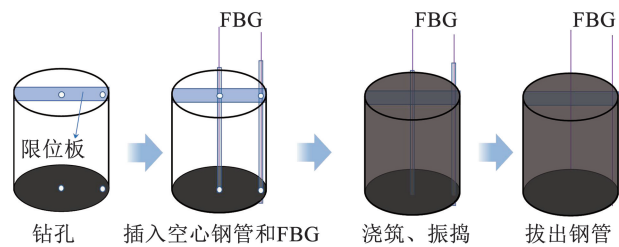


图3 FBG传感器在砂浆内部的安装

Fig. 3 Installation of FBG sensors inside mortar

1.4 试验方法

本研究的测试类型分为冻融测试、强度测试、质量测试、形貌测试以及应变测试5个类型。

1)冻融测试。冻融介质的温度设置参考了漠河市(我国最北的城市)1981~2010年最冷月以及最热月累年月平均气温数据;而单循环时长的确定参照国标GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[31]中快冻法的冻融时间。使用高低温试验箱进行15次冻融测试,测试过程中的环境介质温度以及试件温度如图4所示。为了保证试件在测试过程中始终存在环境水分补给,定制了直径为160 mm、高度为170 mm的不锈钢桶用于盛装试件和水。

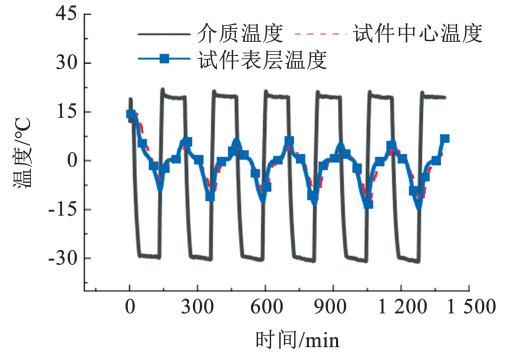


图4 冻融过程中的温度制度及试件温度

Fig. 4 Temperature regime and specimen temperature during freeze-thaw process

2)应变测试。本研究采用FBG传感器进行砂浆冻融过程中的局部应变监测。为了保证测试数据的准确性,同步采集了FBG测点位置处的温度数据,并按照式(2)对FBG波长变化进行温度补偿。其中,温度测试及应变测试的采集时间间隔均采用0.5 s。

$$\Delta \varepsilon_{\text{FBG}} = (\Delta \lambda - K_T \cdot \Delta T_{\text{FBG}} \cdot \lambda_B) / K_S \quad (2)$$

式中: $\Delta \varepsilon_{\text{FBG}}$ 为光栅轴向的应变; $\Delta \lambda$ 为光栅波长变化; K_T 为光栅的温度敏感系数; ΔT_{FBG} 为测点位置的温度改变量; K_S 为应变敏感系数。

3)宏观性能测试。该测试类型包括抗压强度测试以及质量测试,测试每隔5次冻融循环进行1次,每次测试以3个试件为1组。其中,抗压强度测试使用立方体试件的非成型面作为加载面进行加载,加载速率为1.5 kN/s;质量测试使用量程为1 kg,精度为0.01 g的电子秤进行称量,每次称量前使用纸巾擦去试件表面的多余水分。抗压强度测试及质量测试是为了监测冻融早期砂浆试件的整体性能退化。

4)形貌测试。本研究中的形貌测试分为宏观观测和微观SEM测试。其中,宏观观测每隔5个冻融循环观测1次,旨在监测砂浆试件的表层剥落状态。

采用型号VEGA3 XMU的扫描电子显微镜(SEM),对试件表层及中心区域微裂缝的开展状态进行观测。选择冻融前以及经过5次冻融循环的砂浆试件进行该试验,循环次数确定的理由如下:当试件进行足够多次冻融循环后,试件表层及中心位置的微观损伤将趋于一致,这可能会减弱冻融损伤发展过程的空间差异性。

SEM测试前的准备工作及观测的具体流程如下:首先,随机取3个试件,使用虎口钳将距离试件外表面5 mm深度范围内(尽量取面中心位置的样本)的样品以及试件中心20 mm范围内的样品剪成

黄豆粒大小,并尽可能保留两个平行面;然后,将相同位置的待测样品混合,并随机挑选 8 块放入冻干机进行干燥处理;而后,使用双面导电胶带将干燥后的样品粘在方形铝片上,并放入 60 °C 的鼓风干燥箱继续干燥 12 h;最后,对观测的样品进行喷金处理,并在 30 kV 的加速电压下观察拍照。

2 冻融早期的宏观性能变化

2.1 质量变化及表层剥落状态

快冻法规定^[31],当试件质量下降超过 5% 时,抗冻能力丧失。按照式(3)计算可知,经过 15 次冻融循环后,砂浆试件的质量损失率小于 1%。因此可以认为,此时砂浆试件处于冻融损伤的早期阶段。此外,如图 5 所示,砂浆试件在 15 次冻融循环内的质量变化呈现出分段现象。阶段 1 中试件的质量增加,平均质量增量为 1.12 g。根据图 6 可知,该阶段试件表层以点状剥落为主,剥落量极小。此外,该阶段试件的质量变化还受到吸水作用的影响,该作用将导致试件质量增加。基于质量增量为正值这一测试结果可知,阶段 1 中试件的吸水质量大于表层剥落质量。阶段 2 中试件质量几乎维持恒定。根据图 6 的表层形貌变化可知,该现象是由于吸水作用减缓及剥落现象增强导致的。阶段 3 表现为试件的质量下降,这表明表层剥落质量大于试件吸水质量。此时,试件表层的点状剥落逐渐连接成小区域的块状剥落。从试件的质量变化过程可以看出,受吸水作用的影响,冻融早期的质量变化无法准确反映砂浆冻融损伤的发展过程。需要注意的是,环境对自然浸泡饱和和试件的水分补给作用会增大试件内的饱和度,进而增大冻融损伤出现的风险。

$$\Delta m_{ci} = \frac{m_{c0} - m_{ci}}{m_{c0}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Δm_{ci} 为砂浆试件的质量损失率; m_{c0} 为冻融前砂浆的质量; m_{ci} 为经过 i 次冻融循环后的质量。

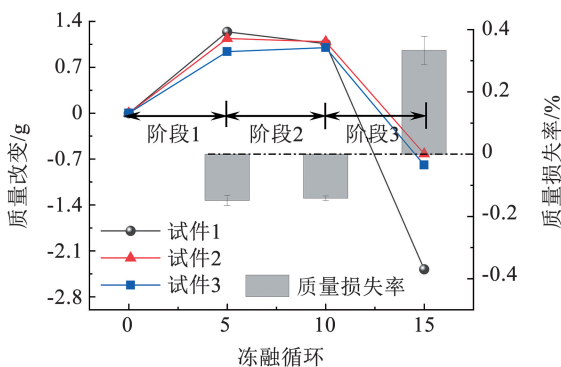


图 5 冻融早期砂浆的质量变化

Fig. 5 Mass change of mortar in early freeze-thaw stage

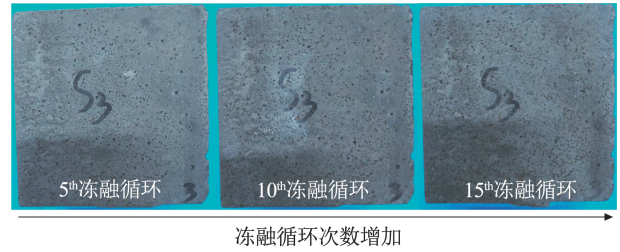


图 6 冻融早期砂浆的表层剥落情况

Fig. 6 Surface spalling of mortar in early freeze-thaw stage

2.2 抗压强度变化

如图 7 所示,砂浆的抗压强度随着冻融循环次数增加而逐渐下降。根据式(4)计算获得的抗压强度损失率可知:经 5 次冻融循环后,试件抗压强度平均下降 1.94%;经 10 次冻融循环后,抗压强度平均下降 5.63%;经 15 次冻融循环后,试件抗压强度平均下降 12.97%。由于试件的吸水过程对砂浆抗压强度的影响较小,因此,以该参数为指标能够较为准确地反映冻融过程中试件整体的损伤演化。根据 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[31]的规定可知,当抗压强度下降达到 25% 时,可以认为该试件已经冻融破坏。因此,该测试结果表明,遭受 15 次冻融循环后的砂浆试件处于冻融损伤的早期阶段。

$$\Delta f_{ci} = \frac{f_{c0} - f_{ci}}{f_{c0}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Δf_{ci} 为抗压强度损失率; f_{c0} 为冻融前砂浆的抗压强度; f_{ci} 为经过 i 次冻融循环后的抗压强度。

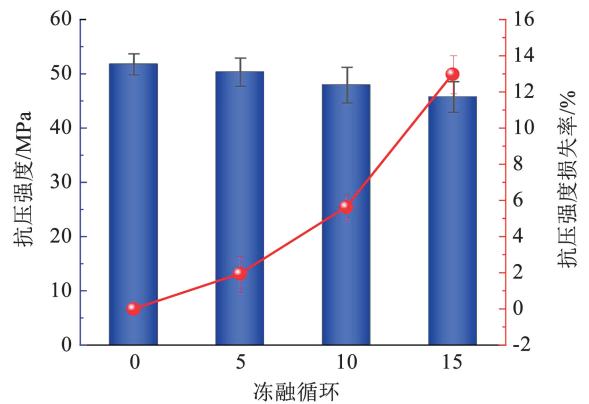


图 7 冻融早期试件的抗压强度及其损失率变化

Fig. 7 Variations of compressive strength and its loss rate of specimens in early freeze-thaw stage

2.1 节与 2.2 节的内容反映了以整体平均性能作为评价指标的损伤参数,在冻融早期的退化并不明显。这可能是由于砂浆表层损伤对整体性能降低的影响权重较小。但是,表层损伤能够增加冻融过程中的水分传输路径。因此,在冻融早期对砂浆试件进行不同空间位置的损伤监测,有助于及时发现

表层损伤并通过修补的方式减缓冻融损伤发展。

3 冻融早期的应变空间演化特征

冻融过程的主要环境特征是正负温交替往复,因此砂浆试件内的应变也随之出现往复现象,且该现象随着冻融循环次数的增加逐渐发生变化。

3.1 单次冻融循环中应变的空间发展特征

以第5次循环为例绘制了冻融过程中试件内部不同空间位置的应变-温度曲线,结果如图8所示。图8曲线中的应变方向与FBG传感器一致,且正值代表拉应变、负值代表压应变。由于温度传递具有方向性,因此,为了形成准确的温度-应变关系,曲

线中的横坐标使用测点位置的实测温度值绘制。

从曲线形貌可知:图8(a)与(b)的曲线较为相似,且形状饱满;图8(c)与(d)的曲线较为相像,曲线形状较为扁平。其中,1#up测点应变-温度曲线围成的面积是1#mid测点的22.17倍;2#up测点应变-温度曲线围成的面积为是2#mid测点的13.52倍。这说明在同一次冻融循环中,测点沿应变方向向表层移动,单次冻融过程的应变幅值显著增大。此外,从图8可以看出,温度降低至0℃与升温至0℃之间存在应变差异,且该差异也随测点位置向上表层的移动而增加。

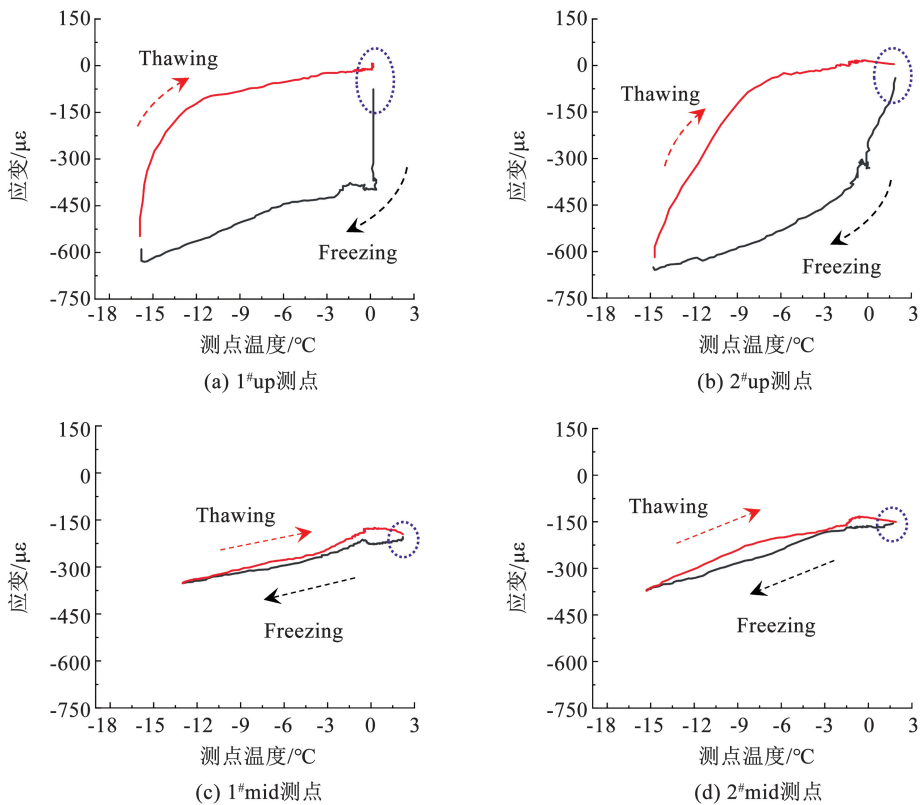


图8 应变-温度曲线(5th cycle)

Fig. 8 Strain-temperature curves (5th cycle)

从图8曲线随温度的变化过程可以看出,降温过程中测点位置的压应变逐渐增大,而升温过程中压应变减小。对压应变的产生机理进行分析(图9):单次冻融循环内应变的发展主要与试件内的温度变化、孔溶液迁移以及结冰过程相关。降温过程中基体冷缩表现为压应变。此外,由于试件浸泡饱和,气孔内处于水-气平衡状态。该状态下,孔内溶液体积占比小于91.7%,这意味着结晶压对孔壁产生的拉应力有限,且结冰膨胀促使溶液外排产生的静水压力相对较小,因此形成的拉应变较小。

此外,在渗透压的作用下,小孔内的溶液向较大的气孔中迁移,该过程不仅造成部分基体失水收缩,也减轻了小孔内液体结冰膨胀对基体冷缩的抵消作用。最终,当孔内溶液结冰膨胀在降温过程中无法完全抵消冷缩及失水收缩作用时,测点位置表现出收缩状态,且该收缩会随着温度的降低而增大。需要注意的是,该收缩受到冷缩、水分迁移以及孔溶液结冰膨胀的综合作用,不能将压应变的出现简单归因于测点位置基体的冷缩。

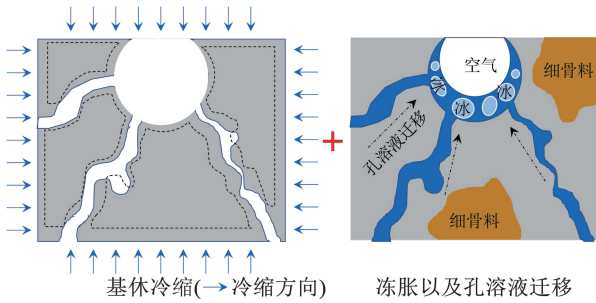


图 9 压应变产生的机理

Fig. 9 Generation mechanism of compressive strain

3.2 峰值应变的时空演化特征

冻融过程中环境温度条件分为升温 and 降温两个阶段,在升温过程中测点的峰值应变为正温峰值应变,在降温过程中测点位置出现的峰值应变为负温

峰值应变。图 10 统计了不同测点位置在冻融早期的正、负温峰值应变随冻融循环的发展,其中正、负号的定义与 3.1 节一致。

根据图 10 中应变形式可知,1[#]up 测点和 2[#]up 测点位置的正温峰值应变在 5 次冻融循环后由压转拉,在遭受 10 次冻融循环后,1[#]up 测点的拉应变甚至超过 100 $\mu\epsilon$;而 1[#]mid 测点和 2[#]mid 测点位置的正温峰值应变,在测试阶段内始终表现为压应变。根据水泥基材料抗压不抗拉的特点可知,测点位置出现拉应变后,微观结构更容易出现开裂。因此,沿应变方向越靠近表层的位置,在冻融早期越容易开裂。此外,所有测点位置的负温峰值应变均为压应变,表明在冷冻过程中测点位置的冻胀作用对 FBG 栅区范围内的变形影响较小。

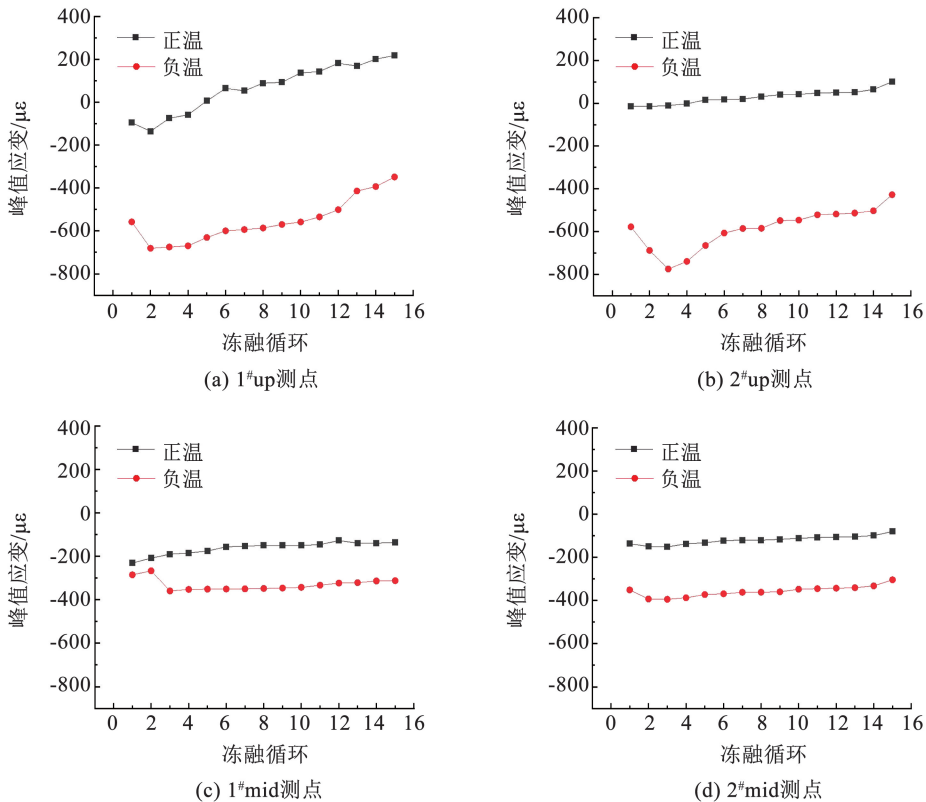


图 10 峰值应变演化

Fig. 10 Evolution of peak strain

分析图 10 中的曲线发展趋势可知,正、负温峰值应变曲线均随着冻融循环次数的增加而逐渐上升,但不同测点的曲线上升趋势有所不同。这表明应变的时域演化具有空间性。其中,1[#]up 测点和 2[#]up 测点的峰值应变曲线上升趋势显著大于 1[#]mid 以及 2[#]mid 测点。以正温峰值为判断依据可知:15 次冻融循环后,1[#]up 的峰值应变增量是 1[#]mid 的 3.33 倍;2[#]up 的峰值应变增量是 2[#]mid 的 2.04 倍。以负温峰值为判断依据可知:15 次冻融循环后 1[#]up 的峰值应变增量是 1[#]mid 的 6.98 倍;2[#]up 的峰值应

变增量是 2[#]mid 的 4.01 倍。可以看出,以正、负温峰值为应变演化判断依据的结果表现出一致性。综上分析可知,越靠近表层的位置,在冻融早期应变发展越快速,而靠近中心位置的测点应变发展相对较为缓慢。

3.3 基于空间位置的冻融损伤发展

残余应变是已经进入塑性阶段的材料在卸载至初始状态后,其变形无法回到初始状态而保留下来的应变。材料力学中通常使用残余应变表征损伤。在冻融过程中,试件内的升降温过程可以被认为是

温度作用的加载以及卸载阶段。将第1次降温至0℃的测点应变作为初始状态,计算各个测点的残余应变,并绘制了冻融前期的残余应变演化过程,结果如图11所示。根据式(5)可知,图11中的纵坐标代表经过*i*次冻融循环后残余应变累计增长量,可以看出,随着冻融循环次数的增加,测点位置的残余应变累计量逐渐增大且表现出与3.2节一致的空间分布特征。经15次冻融循环后,1[#]up测点位置的残余应变是1[#]mid位置的5.51倍;2[#]up测点位置的残余应变是2[#]mid位置的2.82倍。

$$\varepsilon_{rei} = \varepsilon_{ci} - \varepsilon_{c1} \quad (5)$$

式中: ε_{rei} 为经过*i*次冻融循环后的残余应变; ε_{ci} 为第*i*次冻融循环过程中温度降低至0℃时的应变值; ε_{c1} 为第1次冻融循环过程中温度降低至0℃时的应变值。

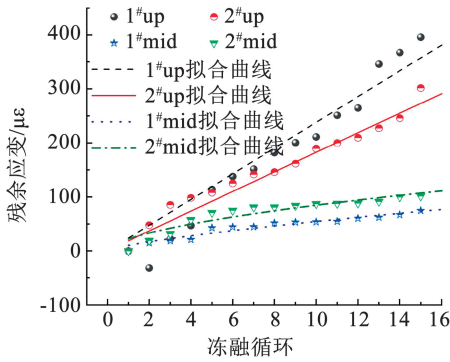


图11 残余应变发展

Fig. 11 Development of residual strain

既有研究^[32-33]通常使用试件整体的平均性能作为冻融损伤评估参数,并根据损伤力学理论计算损伤度,最后建立损伤度与冻融循环次数之间的数学关系。这种方法能够较好地反映试件整体冻融损伤的发展规律。值得注意的是,砂浆的冻融损伤受水分传输通道的影响显著,这意味着试件在冻融过程中的损伤演化受制于微裂纹的延伸与联通。因此,研究不同空间位置的冻融损伤发展,对精准预防砂浆进一步冻融劣化具有促进作用。由于整体平均

性能无法反映局部冻融损伤,因此,建立基于残余应变的冻融损伤劣化模型,在精准预测冻融损伤路径发展方面具有重要作用。根据残余应变的增长趋势,使用幂函数的形式($y = Ax^B$)建立了冻融早期不同测点位置处的损伤演化模型。其中,“残余应变增长趋势”的幂函数形式如图11中拟合线所示,拟合参数*A*与*B*如表1所示。根据拟合参数可知,1[#]up测点以及2[#]up测点的拟合线幂指数近似为1,这表明up层在冻融早期的损伤以线性模式发展。随着测点位置向试件中层移动,拟合曲线的幂指数降低,损伤发展趋势减缓。

表1 基于残余应变的冻融早期损伤演化模型

Tab.1 Early freeze-thaw damage evolution model based on residual strain

拟合曲线	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R</i> ² /%
1 [#] up	23.83	1.00	94.13
2 [#] up	18.71	0.99	95.86
1 [#] mid	10.24	0.73	93.72
2 [#] mid	22.29	0.58	87.81

4 冻融早期砂浆微观形貌变化

图12和图13分别展示了经过5次冻融循环后,试件中心以及表层范围内的典型微观形貌(典型微观形貌出自4个样品)。对比可知,冻融早期微观结构开裂主要发生在试件表层,而试件中心几乎无微裂缝发展。3.2小节及3.3小节中,1[#]up以及2[#]up位置处拉应变的出现,以及残余应变的快速发展均能够与SEM图像中微裂纹的开展形成良好对照。基于该对比结果可知,应变测试结果能够反映砂浆的开裂情况。为了从SEM图像中获取更多细节,进一步定量描述冻融早期试件微裂纹的开展状态,本文对所有表层测试样品的微裂纹图像进行了统计分析,结果如图14所示,可以看到:在观测视野内,表层微裂纹数量(图14(a))处于2~5条;裂纹的典型宽度(图14(b))为1.5 μm,典型长度(图14(c))介于50~200 μm。

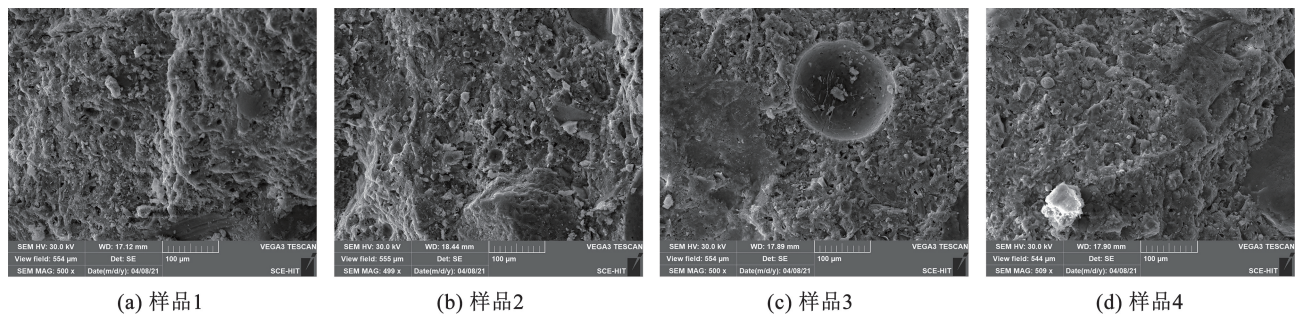


图12 5次冻融循环后试件中心的微观形貌

Fig. 12 Microscopic morphology of specimen center after five freeze-thaw cycles

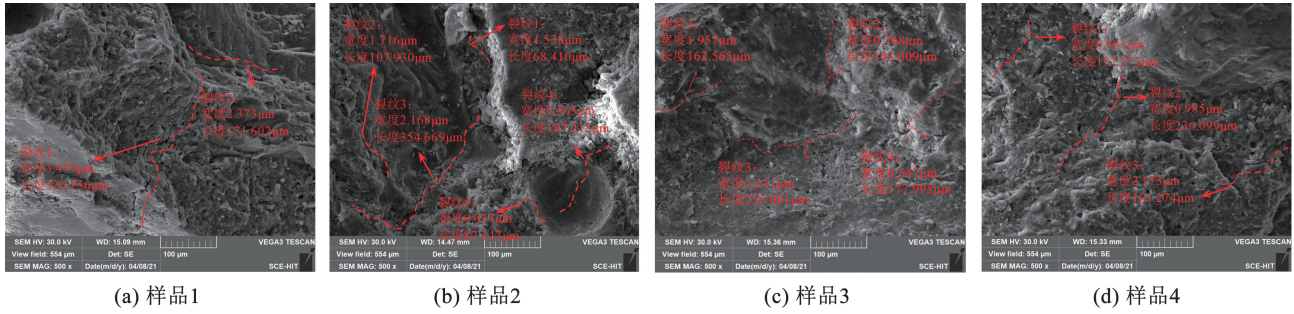


图 13 5 次冻融循环后试件表层的微观形貌

Fig. 13 Microscopic morphology of specimen surface layer after five freeze-thaw cycles

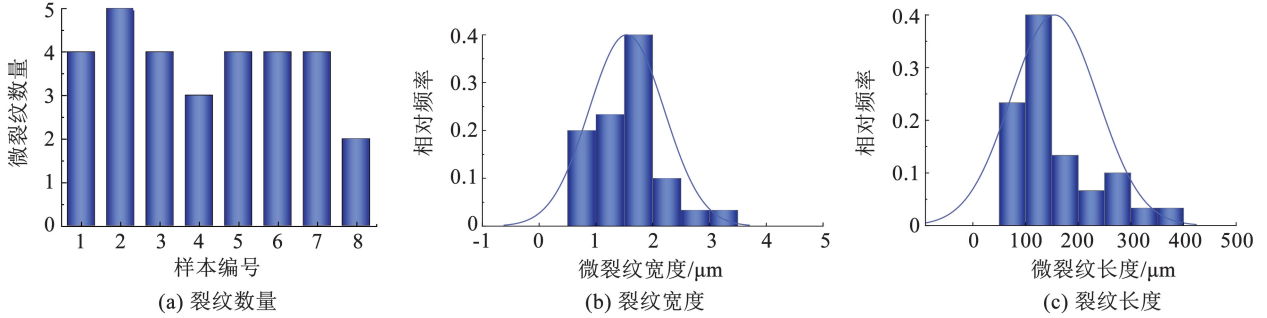


图 14 微裂纹信息统计

Fig. 14 Statistics of micro-crack information

结合 2.1 小节与 2.2 小节可知,当试件表层出现明显微裂纹时,试件的宏观性能演化并不显著。这意味着在冻融早期,砂浆的损伤主要体现在表层微裂纹的开展。该现象虽然对试件的整体性能变化影响较弱,但微裂纹的扩展连通能够促进复杂水分传输网络的形成,为环境水分进入试件内部提供更多通路,并有效提高试件饱和度。根据冻融损伤与试件饱和度的关系可知,表层微观开裂对后续冻融过程中宏观性能的衰减具有促进作用。

5 结 论

本研究发明了一种“先埋后拔”的安装方式,提高了 FBG 在水泥基材料中的安装成活率。运用 FBG 传感技术,对砂浆冻融早期损伤的空间演化过程展开研究,并在微观层面对应变的评估结果进行了证明。通过对比局部损伤与宏观性能之间的关系可知,早期冻融损伤以表层开裂为主,虽不足以产生严重的宏观性能变化,但可为环境水分向试件内部传输提供有效的新路径。

1) 在冻融早期,经浸泡饱和的砂浆试件,其孔溶液体体积占比小于 91.7%,测点在冷冻过程中主要表现为受压变形。此外,应变分布呈现显著的空间差异性,随着测点位置向表层移动,单次循环内的应变幅值增大。

2) 随着冻融循环次数的增加,各测点的峰值应

变呈上升趋势。该趋势随着测点位置向表层靠近而更加明显。随着应变曲线的上升,试件中心层始终表现为压应变,而表层区域内的应变形式由压转拉,拉应变的出现对试件表层的开裂具有促进作用。

3) 在冻融早期,试件内部出现了残余应变。根据残余应变的演化特征建立了冻融早期损伤的空间发展模型。其中,表层范围内的冻融损伤以线性模式发展;随着测点位置向试件内部移动,冻融损伤演化减缓。

参考文献

[1] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1945, 16(4) : 245

[2] POWERS T C. Air requirement of frost-resistant concrete [J]. Highway Research Board Proceedings, 1949, 29:184

[3] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume change in hardened portland cement pastes during freezing[J]. Proceedings of the Highway Research Board, 1953, 32: 285

[4] BUMANIS G, DEMBOVSKA L, KORJAKINS A, et al. Applicability of freeze-thaw resistance testing methods for high strength concrete at extreme - 52.5 °C and standard - 18 °C testing conditions [J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 8: 139. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.01.003

[5] 洪锦祥, 缪昌文, 刘加平, 等. 冻融损伤混凝土力学性能衰减规律 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2) : 173

HONG Jinxiang, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Degradation law of mechanical properties of concrete subject to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2) : 173

[6] 吴泽媚, 崔鑫淼, 郑新颜, 等. 早期受冻混凝土及其防冻技术研究

- 究进展[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(2): 471
WU Zemei, CUI Xinwei, ZHENG Xinyan, et al. Research progress on early frost-affected concrete and anti-freeze technologies [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(2): 471. DOI: 10.14062/j. issn.0454-5648.20240563
- [7] ALRASHED R, ALJABARI M. Concrete protection by combined hygroscopic and hydrophilic crystallization waterproofing applied to fresh concrete[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00635. DOI:10.1016/j. cscm.2021. e00635
- [8] 高矗, 申向东, 王萧萧, 等. 应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(10): 1247
GAO Chu, SHEN Xiangdong, WANG Xiaoxiao, et al. Freeze-thaw resistance of lightweight aggregate concrete with stress damage[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(10): 1247. DOI:10.7521/j. issn.0454-5648.2014.10.06
- [9] 孙科科. 冻融循环条件下地聚合物混凝土劣化规律及机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021
SUN Keke. Research on the deterioration regularity and damage mechanism of geopolymer concrete under freeze-thaw cycles [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021
- [10] HASSAN A A A, LACHEMI M, HOSSAIN K M A. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(6): 801. DOI:10.1016/j. cemconcomp.2012.02.013
- [11] 关斌, 龙行, 丁莎, 等. 冻融作用下活化煤矸石粉混凝土损伤劣化规律[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(1): 144
GUAN Xiao, LONG Hang, DING Sha, et al. Damage and deterioration law of activated coal gangue powder concrete under freeze-thaw[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(1): 144. DOI:10.16552/j. cnki. issn1001-1625.20221223.001
- [12] GONG F, JACOBSEN S. Modeling of water transport in highly saturated concrete with wet surface during freeze/thaw[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 115: 294. DOI: 10.1016/j. cemconres.2018.08.013
- [13] JACOBSEN S. Calculating liquid transport into high-performance concrete during wet freeze/thaw [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(2): 213. DOI:10.1016/j. cemconres.2004.04.029
- [14] BAZANT Z P, PRAT P C. Microplane model for brittle-plastic material[J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1989, 114: 1672
- [15] BISHNOI S, UOMOTO T, Strain-temperature hysteresis in concrete under cyclic freeze-thaw conditions [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30: 374. DOI:10.1016/j. cemconcomp.2008.01.005
- [16] 王阵地, 姚燕, 王玲. 冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土变形和损伤分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1133
WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. Deformation and deterioration analysis of concrete exposed to freeze-thaw cycles and chloride salt attack[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8): 1133. DOI: 10.14062/j. issn.0454-5648.2012.08.007
- [17] 高金麟. 基于变形的混凝土受冻损伤评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019
GAO Jinlin. Research on the evaluation of frozen damage of concrete based on deformation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019
- [18] MAASKANT R, ALAVIE T, MEASUTES R M, et al. Fiber-optic bragg grating sensors for bridge monitoring [J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19: 21. DOI:10.1016/s0958-9465(96)00040-6
- [19] MELTZ G, MOOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibres by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823. DOI:10.1364/OL.14.000823
- [20] CZARNEK R, GUO Y F, BENNETT K D, et al. Interferometric measurements of strain concentrations induced by optical fiber embedded in a fiber reinforced composite[J]. Optical Engineering 1989, 16: 43
- [21] MAJUMDER M, GANGOPADHYAY T K, CHAKRABORTY A K, et al. Fibre bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications [J]. Sensors and Actuators A Physical, 2008, 147: 150. DOI:10.1016/j. sna.2008.04.008
- [22] HABEL W R, KREBBER K, Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering[J]. Photonic Sensors, 2011, 1: 268. DOI:10.1007/s13320-011-0011-x
- [23] MEASURES R M. Structural monitoring with fiber optic technology[J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 55(9): 1609
- [24] 李建新, 朱伟, 任建乔, 等. 基于FBG传感技术的混凝土开裂损伤研究[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(4): 17
LI Jianxin, ZHU Wei, REN Jianqiao, et al. Research on concrete cracks damage based on FBG sensing technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025, 44(4): 17. DOI: 10.13873/j.1000-9787(2025)04-0017-04
- [25] KESAVAN K, RAVISANKAR K, PARIVALLAL S, et al. Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete[J]. Measurement, 2010, 43(2): 157. DOI:10.1016/j. measurement.2009.08.010
- [26] CHILDS P, WONG A C L, GOWRIPALAN N, et al. Measurement of the coefficient of thermal expansion of ultra-high strength cementitious composites using fibre optic sensors[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5): 789. DOI: 10.1016/j. cemconres.2007.02.015
- [27] PARK S, PARK T, HAN K. Real-time monitoring of composite wind turbine blades using fiber bragg grating sensors[J]. Advanced Composite Materials, 2011, 20(1): 39. DOI: 10.1163/092430410X504198
- [28] DAVIS M A, BELLEMORE D G, KERSEY A D. Distributed fiber bragg grating strain sensing in reinforced concrete structural components[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(1): 45. DOI:10.1016/S0958-9465(96)00042-X
- [29] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication [J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647
- [30] LIANG Z, LIU D, WANG X, et al. FBG-based strain monitoring and temperature compensation for composite tank [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 127: 107724. DOI: 10.1016/j. ast.2022.107724
- [31] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2024[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2024 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024
- [32] 刘卫东, 苏文梯, 王依民. 冻融循环作用下纤维混凝土的损伤模型研究[J]. 建筑结构学报, 2008(1): 124
LIU Weidong, SU Wenti, WANG Weimin. Research on damage model of fibre concrete under action of freeze-thaw cycle [J]. Journal of Building Structures, 2008(1): 124. DOI: 10.14006/j. jzgb.2008.01.018
- [33] 商怀帅, 宋玉普, 覃丽坤. 普通混凝土冻融循环后性能的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2005(2): 9
SHANG Huaishuai, SONG Yupu, TAN Likun. Experimental study on the properties of ordinary concrete after freeze-thaw cycles[J]. China Concrete and Cement Products, 2005(2): 9. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2005.02.003