

西部盐渍土地区玄武岩纤维混凝土冻融试验及数值分析

朱飞飞¹, 乔宏霞¹, 付 勇¹, 王新科²

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃省先进土木工程材料工程研究中心, 兰州 730050;

2. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 高性能土木工程材料国家重点实验室, 南京 211103)

摘 要: 西部盐渍土地区中的腐蚀离子严重影响了混凝土的耐久性, 在混凝土中加入玄武岩纤维(BF)可减少初始缺陷, 延缓腐蚀离子进入混凝土内部的速度, 从而改善混凝土的耐久性。基于西部盐渍土环境, 对不同 BF 掺量的玄武岩纤维混凝土(BFRC)在 Na_2SO_4 侵蚀和冻融循环耦合作用下的宏观性能和微观变化进行研究, 并采用有限元软件 ABAQUS 对试验进行模拟, 分析试验过程中 BFRC 内部应力场、应变场的变化规律。结果表明: BF 的加入明显降低了混凝土在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环过程中质量、相对动弹性模量、抗压强度、劈裂抗拉强度的损失率。在冻融过程中 BF 起到传递和分散应力的作用, 使混凝土内部应力重分布提高了混凝土的抗盐冻性能, 掺量 0.3%(体积分数)时 BFRC 抗盐冻性能最佳。该有限元模型直观有效地反映出 BF 在混凝土冻融损伤演化过程中的重要作用。

关键词: 玄武岩纤维混凝土; 冻融循环; 硫酸盐; 有限元模拟

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)11-3431-13

网络出版时间: 2024-08-22



在中国的青海、宁夏、甘肃、新疆, 古丝绸之路沿线的黄土高原上, 存在着大量的盐渍土, 其中大多是混合盐, 以硫酸盐、氯盐成分最为突出^[1]。在这些地区, 通年的温差较大, 而盐渍土中的硫酸盐对温度变化十分敏感, 通常低温下会发生盐结晶膨胀和冻胀, 使建筑物的基础、道路、沟渠等混凝土结构发生破坏^[2-4]。在上述地区, 盐渍土中的硫酸盐经扩散侵蚀到混凝土内部, 一部分在孔隙中结晶产生膨胀; 一部分与混凝土中水化产物反应生成石膏、钙矾石等膨胀产物, 对周围混凝土产生膨胀应力, 使混凝土发生开裂破坏^[5-6]。与此同时, 由于温差而产生的冻融作用使得混凝土表面裂缝及内部孔隙中的水冻结导致混凝土发生胀裂损伤, 直至破坏。盐渍土及冻融环境导致混凝土同时受硫酸盐侵蚀与冻胀的耦合作用^[7-8], 进一步加大了混凝土的劣化程度, 使该地区混凝土耐久性受到严重威胁。

在混凝土中加入纤维可以有效抑制混凝土的塑性收缩开裂, 改善混凝土抗磨、抗渗和抗冻

等耐久性能。玄武岩纤维(BF)是一种绿色环保、无污染材料, 是世界高技术纤维中被认为最具竞争力、可持续发展的新材料。BF 与其他纤维相比具有高强质轻、耐高温、弹性模量高、抗断裂、耐腐蚀等优异性能, 而且 BF 与混凝土密度相近, 组成成分类似, 相容性好^[9-11]。同时 BF 在混凝土中易分散, 不结团, 包裹性好, 与混凝土协同工作性能优异^[12]。这些优势对玄武岩纤维混凝土(BFRC)在建筑工程领域的推广和应用具有重要意义。

目前, 对 BFRC 耐久性研究多集中于盐侵蚀或冻融等单一因素, 也有部分学者开始关注多因素共同作用。Wang 等^[13]研究了 BFRC 在硫酸盐侵蚀作用下裂缝发展和吸水率变化规律, 指出适量的 BF 可以明显降低混凝土孔隙率增加的速度, BF 体积掺量 0.1%时, 效果最佳且最为经济合理。甘磊等^[14]通过研究不同硫酸盐浓度、不同 BF 长度和掺量对 BFRC 抗硫酸盐性能的影响, 揭示了 BFRC 抗硫酸盐侵蚀机理, 进一步得出 BF 的加入

收稿日期: 2024-04-01。 修订日期: 2024-04-26。

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20150、52178216); 青海省基础研究计划项目(2022-ZJ-921)。

第一作者: 朱飞飞(1983), 女, 博士研究生。

通信作者: 乔宏霞(1977—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2024-04-01. Revised date: 2024-04-26.

First author: ZHU Feifei (1983-), female, Doctoral candidate.

E-mail: zff8386@163.com

Correspondent author: QIAO Hongxia (1977-), female, Ph.D., Professor.

E-mail: Hongxia_Qiao@163.com

明显提高了混凝土抗硫酸盐侵蚀能力,且 BF 长度 6 mm, 掺量 0.2% 时效果最佳。Ren 等^[15]对比分析了 BF 增强地聚物混凝土在浓度 5%~20% 的 Na_2SO_4 溶液和 NaCl 溶液中的耐久性, 结果表明: 与 NaCl 相比, Na_2SO_4 侵蚀后地聚物混凝土出现了更明显的裂缝和高孔隙率, 且随着处理时间的延长, 其劣化程度增大。Sinica 等^[16]发现 BF 增强了混凝土的抗拉强度, 抵抗了内部水冻结膨胀产生的冻胀力, 从而抑制了裂缝的产生, 延缓了水在混凝土内部孔隙中的迁移。Li 等^[17]通过冻融循环试验, 分析了 BFRC 的质量、微观结构、孔隙的变化规律, 得出 BF 细化混凝土内部孔径, 使材料内部更加致密, 从而提高了混凝土的抗冻性能。赵燕茹等^[18]通过灰熵法, 研究了冻融过程中 BFRC 孔结构的变化规律, 指出气泡平均弦长和间距系数直接影响 BFRC 冻融损伤程度, BF-水泥界面在冻融循环中的破坏程度远低于混凝土材料。金生吉等^[19]测试了 BFRC 在水中、5%NaCl(质量分数)溶液、5%MgSO₄ 溶液和 5%MgSO₄+5%Na₂SO₄ 复合溶液中抗冻性能, 指出 BF 提高了混凝土的抗冻性能, 延长了混凝土在腐蚀环境下的使用寿命。然而, 对硫酸盐侵蚀与冻融耦合作用下 BFRC 的劣化性能研究相对较少, 而且通过试验很难测试冻融过程中 BFRC 内部应力、应变场变化情况。有学者已经开始尝试用有限元方法研究冻融时混凝土的演化损伤过程。周禹辛等^[20]对比分析了混凝土冻融后的力学试验结果和数值模拟结果, 吻合度较高验证了 ABAQUS 模拟分析冻融循环试验的可行性和可靠性。Zhang 等^[21]研究了 BFRC 冻融循环损伤变化规律, 并对 BFRC 内部热应力进行数值模拟, 分析了其冻融损伤机

理。但这些工作大多是将 BFRC 看作一个整体, 对纤维和混凝土独立分析的成果较少。

因此, 在保证 BFRC 工作性能不聚集、不结团的基础上, 本工作选择 BF 体积掺量为 0.0%、0.1%、0.2%、0.3% 的 BFRC 进行 Na_2SO_4 溶液-冻融循环试验, 分析试验过程中相对动弹性模量、质量损失、抗压强度、劈裂抗拉强度的变化规律及微观结构和腐蚀产物, 并采用有限元软件 ABAQUS 对 BFRC 冻融试验进行模拟, 分析试验过程中 BFRC 内部应力场、应变场的变化规律, 弥补试验无法对 BFRC 内部劣化过程分析的不足, 为深入认识 BFRC 的盐冻破坏提供新的思路, 同时为 BFRC 在西北盐渍土地区的应用提供理论支持。

1 实验

1.1 材料

所用水泥为甘肃祁连山牌 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥。粉煤灰为兰州某公司提供的 II 级粉煤灰。粗骨料为兰州某石料厂提供的 5~20 mm 连续级配碎石, 表观密度为 2 770 kg/m³。细骨料选用兰州洮河天然河砂, 细度模数 2.83, 为级配良好的中砂。试验采用兰州地区市政自来水。减水剂由兰州某化工公司提供的 JW-IV 萘系高效减水剂, 减水率 20%。玄武岩纤维由浙江某公司提供, 相关性能见表 1。

1.2 配合比

BFRC 作为一种高性能混凝土, 配合比的设计尤为重要, 考虑西部地区的原材料、特殊环境因素及实际工程情况, 最终试验设计基准混凝土强度等级为 C40。BF 掺量为 0.1%、0.2%、0.3% 且均为体积掺量, 配合比见表 2。

表 1 玄武岩纤维物理性能
Table 1 Physical properties of basalt fiber (BF)

Length/mm	Diameter/ μm	Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Breaking elongation/%	Density/(kg·m ⁻³)	Shape
12	20	100	4 500	3.2	2 700	Monofilament dispersion

表 2 混凝土配合比
Table 2 Concrete mixture ratio

Sample	Mix proportion/(kg·m ⁻³)					w(Water reducer)/%	Water/binder ratio	ϕ (Basalt fiber)/%
	Cement	Sand	Gravel	Water	Fly ash			
BFRC-0	380	751	1 037	170	67	0.13	0.38	
BFRC-1	380	751	1 037	170	67	0.13	0.38	0.10
BFRC-2	380	751	1 037	170	67	0.13	0.38	0.20
BFRC-3	380	751	1 037	170	67	0.13	0.38	0.30

w is mass fraction. ϕ is volume fraction.

1.3 方法

中国西部盐渍土和盐湖中存在多种对混凝土有害的侵蚀性离子,如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 等,其中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量最高,破坏性也最强。为更准确分析西部地区 Na_2SO_4 侵蚀-冻融循环共同作用对 BFRC 的

影响,需要剔除其他离子的相互作用和影响。本工作根据格尔木地区盐渍土中离子浓度的实际情况,选择浓度为 23 g/L 的 Na_2SO_4 盐溶液进行耐久性试验,其中钠离子与混凝土凝胶材料几乎不发生相互作用,从而确保侵蚀主要或完全由于 SO_4^{2-} 引起(见表 3)。

表 3 格尔木地区盐渍土中易溶盐离子含量

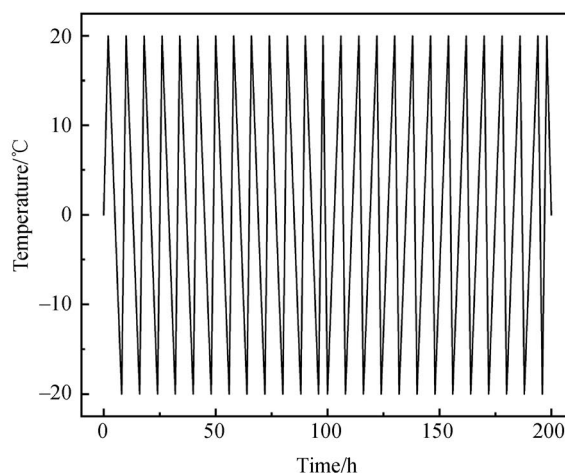
Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Total
81 016	181	15 648	59	5 840	397	22 887	126 028

试验参考 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》中快冻法进行,冻融循环设备为 HC-HDK9/Y 型快速冻融循环试验机,内部结构如图 1a 所示。在盐溶液-冻融试验中,由于 Na_2SO_4 的加入会使溶液的结冰点和结冰量降低,为确保试验能反映 BFRC 在实际环境中的真实状态,经过前期多次试验反复确认,最终确定试验每 8 h 进行 1 次冻融循环,其中冻结 6 h,融化 2 h,试件冻结和融化温度设置为 $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,冻融

循环加载制度如图 1b 所示。试验过程中每 15 次冻融循环取检 1 次,采集试件超声波速、质量数据;每 30 次循环进行抗压和劈裂抗拉试验。当满足质量损失率超过 5%、相对动弹性模量损失超过 40%、抗压或劈裂抗拉强度损失超过 25%、冻融循环 200 次中任一工况时结束该组试验。微观试验分析在耐久性试验结束后,将 BFRC 试块破碎,取薄片状小样烘干,喷金备用,再取一小部分烘干研磨、过筛后备用。



(a) Salt-freeze-thaw cycle test equipment



(b) Salt-freeze-thaw cycle test loading system

图 1 盐-冻融循环试验设备及加载制度

Fig. 1 Salt-freeze-thaw cycle test equipment and loading system

2 结果与讨论

2.1 质量损失率

不同 BF 掺量 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用时,质量整体上均呈现先增大后减小的变化趋势,如图 2 所示。试验初期,在经历 15 次 Na_2SO_4 溶液-冻融循环后, BFRC-0 增长最多,增长了 0.449%, BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 各自质量分别增长了 0.358%、0.248%、0.093%;试验中期, Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用后 BFRC 质量均缓慢减小;试验末期,各掺量 BFRC 质量进入快速下降阶段,冻融

循环第 135 次时 BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 质量损失率分别为 4.511%、3.678%、2.975%、1.245%,其中 BFRC-3 的质量损失率最小。

分析表明:试验初期,侵蚀溶液与 BFRC 表面的水泥砂浆发生反应,使 BFRC 表面产生了一些孔洞,通过这些孔洞,更多的 SO_4^{2-} 进入 BFRC 内部,在融化过程中 BFRC 内部水分发生迁移,硫酸盐则留在 BFRC 孔隙内部形成硫酸盐晶体,从而使 BFRC 质量增加。试验中期,随着冻融循环次数的增加, SO_4^{2-} 更多的进入到 BFRC 试件内部,并与水化产物反应生成钙矾石,这些侵蚀产物使混凝土体积膨胀,

产生细小的裂纹。此时 BFRC 中的 BF 发挥作用, 消耗了部分膨胀性产物产生的应力, 使 BFRC 的劣化得到减缓。试验后期, 随着反应频繁地长时间进行, 侵蚀产物不断在缝隙内沉淀、聚集, 使裂纹进一步扩大。当膨胀物产生的应力大于 BFRC 内极限抗拉强度时, BFRC 裂缝继续增大并相互连通, 出现贯穿裂缝, 导致表面砂浆剥落, BFRC 质量减少^[22]。在整个试验过程中, 与 BFRC-0 相比, BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 具有更好的抗盐冻效果, 这是由于一方面 BF 的加入使混凝土内部更加密实, BFRC 具有良好的抗盐冻性能; 另一方面 BF 的加入犹如在混凝土中添加了很多细小的微型钢筋, 这些微筋在其内部形成网状, 牢牢抓住周围的混凝土, 阻碍其脱落, 使冻融过程中质量损失率降低。

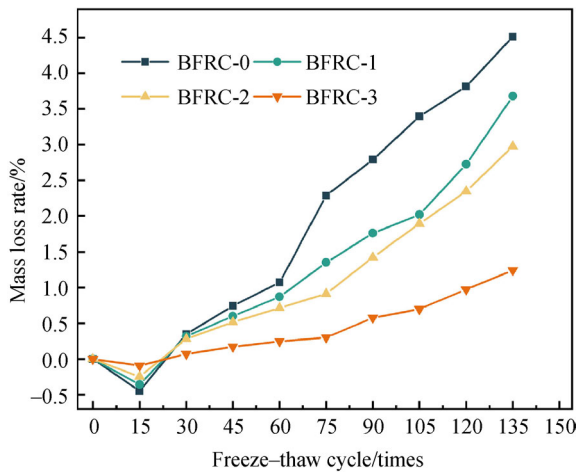


图2 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下的 BFRC 质量损失率曲线
Fig. 2 Mass loss rate curves of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) under Na_2SO_4 -solution freeze-thaw cycle

2.2 相对动弹性模量损失率

不同 BF 掺量 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液和冻融循环作用时, 相对动弹性模量整体上也都呈现先增大后减小的变化趋势, 如图 3 所示。 Na_2SO_4 溶液-冻融循环试验初期, 各掺量 BFRC 相对动弹性模量均有少量增大。进行 30 次 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用时, 试件 BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2 的相对动弹性模量有少量增大, 分别增长 5.715%、4.127%、1.597%, 此时 BFRC-3 才开始少量下降, 降至 99.179%; 经历 45 次 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用后 BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2 的相对动弹性模量也开始下降, 分别下降到 94.968%、96.495%、98.596%、BFRC-3 下降到 97.576%; 试验末期, 各掺量 BFRC 的相对动弹性模量快速下降, 在经历 120 次 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用后 BFRC-0 的相对动弹性模量首先下降到 56.799%(低于 60% 试件失效), 此时 BFRC-1、

BFRC-2、BFRC-3 分别下降到 65.626%、69.347%、77.696%; 在经历 135 次 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用后 BFRC-1 的相对动弹性模量降到 58.753%(低于 60% 试件失效), 此时 BFRC-2、BFRC-3 试件相对动弹性模量分别为 63.475% 和 72.613%, BFRC-3 损失率最小。

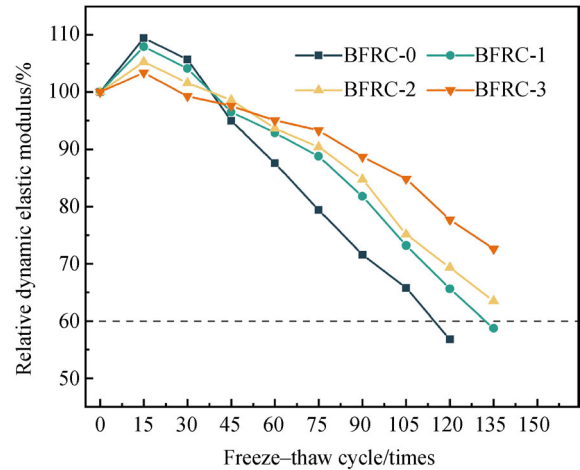


图3 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下 BFRC 相对动弹性模量损失率曲线
Fig. 3 Relative dynamic elastic modulus loss rate curves of BFRC under Na_2SO_4 -solution freeze-thaw cycle

分析表明: 在硫酸盐侵蚀-冻融循环共同作用初期, BFRC 水化作用仍在继续, 长时间的浸泡为水泥进一步水化提供了有利条件, 进而增加了 BFRC 相对动弹性模量; 适量 BF 的加入细化了混凝土内部孔隙, BFRC 密实度增加, 提高 BFRC 相对动弹性模量; 随着冻融循环次数的增加, BFRC-0 内部会产生微裂纹, 而 BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 因为 BF 的存在, 抑制了微裂纹的产生和扩展; 循环继续 BFRC 均出现微裂纹, 其为腐蚀产物提供了新的生长空间, 腐蚀产物在此处堆积, 导致微裂纹进一步扩大, 直至相互贯通, BFRC 相对动弹性模量降低, 此过程中 BF 可以阻止裂缝进一步扩大, 表现为 BFRC-3 的相对动弹性模量损失率最小。在硫酸盐侵蚀-冻融循环共同作用后期, BFRC 内部逐渐形成过饱和溶液, SO_4^{2-} 向晶核移动并在其表面有序堆积, 使晶核不断长大形成晶体, 晶体在有限空间中生长, 最终导致 BFRC 内部发生破坏^[6]。

2.3 抗压强度劣化规律

由图 4 可见, 不同 BF 掺量 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液中冻融作用下抗压强度变化规律均呈下降趋势。在经历 30 次 Na_2SO_4 溶液-冻融作用后, BFRC 的抗压强度都出现了不同程度的降低, BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 分别降低了 7.487%、6.712%、

4.921%、2.862%；在经历 120 次 Na_2SO_4 溶液-冻融作用后，各掺量 BFRC 抗压强度均在减少，其中 BFRC-0 抗压强度损失率为 35.361%，大于 25% 试件已失效，BFRC-1 的抗压强度损失率为 24.267% 也即将失效，BFRC-2、BFRC-3 的抗压强度损失率分别 17.601%、12.721%，BFRC-3 的抗压强度损失最小。由此可见，BF 的加入整体上减缓了盐冻过程中 BFRC 抗压强度的损伤速度，且在 0.1%~0.3% 掺量内，盐冻后抗压强度随 BF 掺量增加逐渐提高，BF 掺量 0.3% 时，盐冻后抗压强度最高。

随着硫酸盐侵蚀-冻融循环次数的增加，BFRC 的抗压强度在不断降低，这主要是因为 SO_4^{2-} 从 BFRC 外部逐渐转移到 BFRC 内部并产生浓度梯度， SO_4^{2-} 通过扩散、渗透和毛细作用进入 BFRC 内部，与水泥水化产物反应生成膨胀性腐蚀产物，导致 BFRC 抗压性能开始下降。BFRC 在硫酸盐侵蚀-冻融循环后期，BFRC 抗压强度下降速率加快。这是由于随着侵蚀的加重、冻融循环次数的增加。过量的膨胀产物使 BFRC 试件表面出现贯通裂缝。同时由于冻融作用引起水结成冰体积膨胀作用循环进行，裂缝不断被填充后继续扩展，成为侵蚀性离子传输的快速通道，使试验后期 BFRC 试件抗压强度快速降低^[23-24]。此过程中 BF 的加入消耗了部分膨胀应力，延缓 BFRC 裂缝的产生，合理范围内 BF 掺量越高延缓效果越好，降低硫酸盐侵蚀-冻融循环作用下 BFRC 抗压强度劣化程度越佳^[25]。

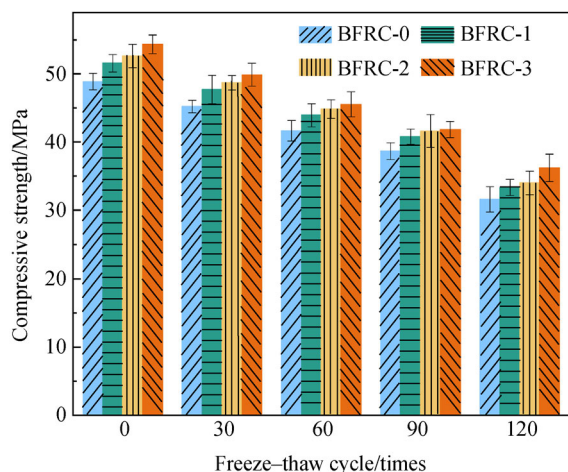


图 4 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下的 BFRC 抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of BFRC during Na_2SO_4 -solution freeze-thaw cycle

2.4 劈裂抗拉强度劣化规律

由图 5 可见，与抗压强度类似，不同 BF 掺量 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液中冻融作用下劈裂抗拉强度也呈现出快速下降的总体趋势。在经历 30 次

Na_2SO_4 -冻融作用后，BFRC 的抗拉强度出现了不同程度的降低，BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 分别降低了 10.024%、9.058%、7.06%、3.934%；在经历 120 次 Na_2SO_4 -冻融作用后 BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 的抗拉强度均比基准组 BFRC-0 高，分别高出 0.826%、3.386%、12.742%。可见，BF 的加入整体上提高了盐冻后 BFRC 劈裂抗拉强度，且在 0.1%~0.3% 掺量内，盐冻后劈裂抗拉强度随 BF 掺量增加而增大，掺量 0.3% 时，BFRC 盐冻后劈裂抗拉性能最优。

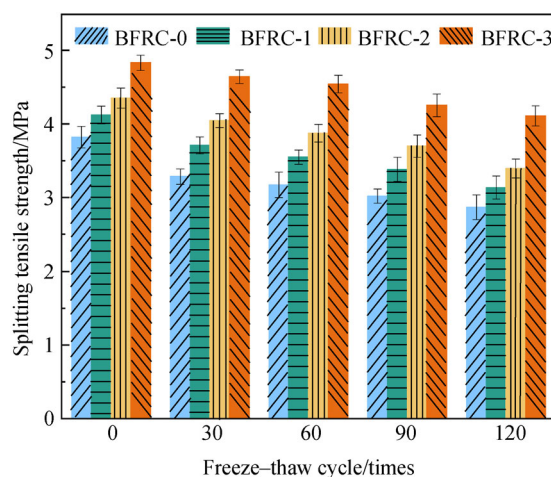


图 5 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下的 BFRC 劈裂抗拉强度
Fig. 5 Splitting tensile strength of BFRC during Na_2SO_4 -solution freeze-thaw cycle

随着硫酸盐侵蚀-冻融循环次数的增加，BFRC 劈裂抗拉强度在不断降低，这主要是因为硫酸盐侵蚀-冻融循环共同作用下 BFRC 的破坏是由表及里进行的。在冻融循环初期， SO_4^{2-} 进入 BFRC 后，会发生一系列化学物理反应，并生成抗拉性能较低的膨胀性产物石膏、钙矾石，从而使 BFRC 劈裂抗拉强度逐步降低，BFRC-0 下降速度最快。BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 劈裂抗拉强度在试验后期也大幅下降，但明显较 BFRC-0 速度缓慢。可见 BF 的加入提高了混凝土整体的抗拉强度，消耗了硫酸盐侵蚀-冻融循环过程中产生的膨胀应力，减缓了 BFRC 劈裂抗拉性能劣化程度，其中 BFRC-3 减缓效果最佳。

2.5 BFRC 微观形貌及产物分析

BF 嵌入混凝土中形成 BFRC，BF 不改变其产物的类型，因此选取具有代表性的 BFRC-3 进行相应的微观形貌及腐蚀产物分析。

图 6 为 BFRC-3 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环试验中微观形貌变化。图 6a 为 Na_2SO_4 溶液-冻融循环前 BFRC 内部的微观形态，从图中可以看到大量絮状的水化产物水化硅酸钙(C-S-H)填充在其他

颗粒间隙, 为内部结构的相互粘结做出较大的贡献, 但 BFRC 内部存在一些孔隙和初始微裂缝。图 6b~图 6e 分别为 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环 30、60、90 次及 120 次后其内部的微观形态。由图 6b~图 6e 可见, 随着冻融循环次数的增加, BFRC 内部孔隙数量变多, 孔径变大, 裂缝变多变大。由图 6e 可以清晰的看到 BF 阻挡了裂缝的

进一步扩展。由图 6d~图 6f 可以看到 Na_2SO_4 溶液-冻融循环的产物, 其中包括大量的针状产物(钙矾石), 少量的短柱状产物石膏及硫酸盐结晶体^[26]。这些侵蚀产物在空间较大的孔隙及裂缝处聚集, 并产生膨胀应力, 导致 BFRC 中微裂纹增多, 浆体和骨料的粘结性降低, 产生剥落, 导致 BFRC 强度和耐久性降低。

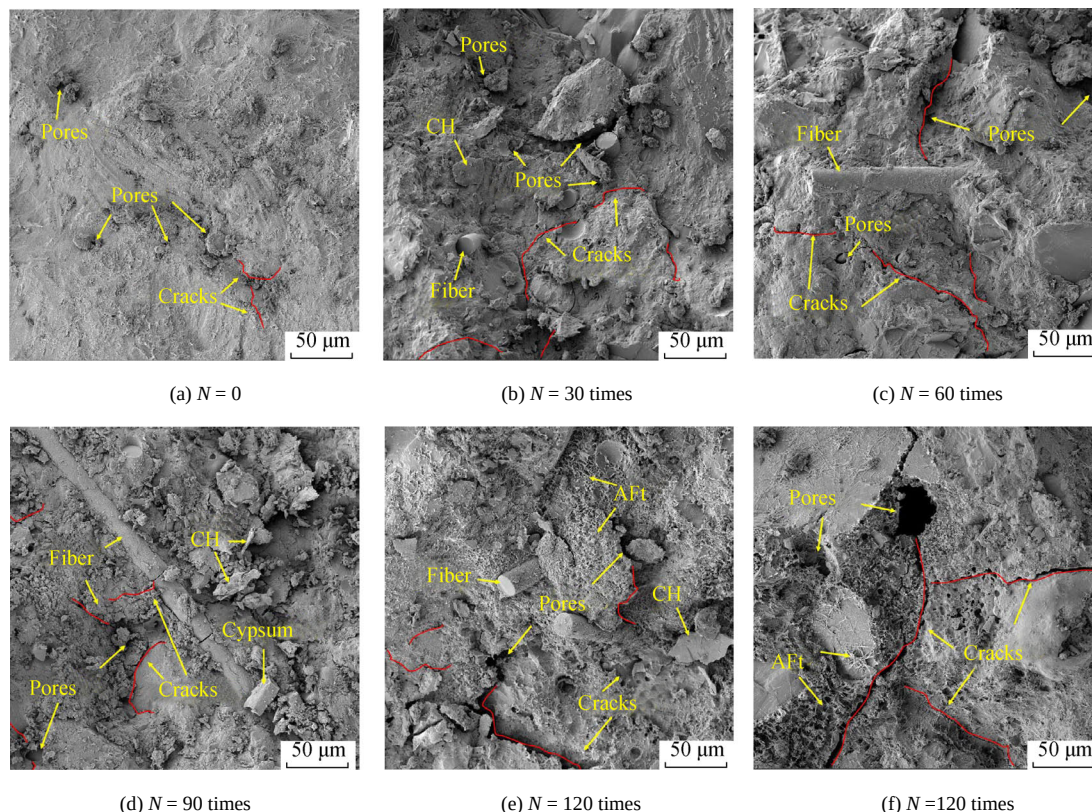
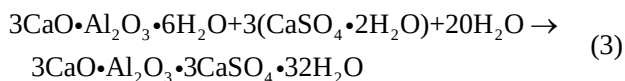
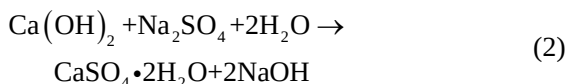


图 6 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用过程中 BFRC-3 的微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of BFRC-3 during Na_2SO_4 solution-freeze-thaw cycle

为进一步了解不同 BF 掺量 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环($N=120$ 次)作用下形成的腐蚀产物, 采用 X 射线衍射方法(XRD)进行分析。由图 7 可见, 不同 BF 掺量 BFRC 中生成的产物大致相同, 侵蚀产物主要有结晶后硫酸盐、石膏及钙矾石(Aft)^[27], 化学反应如下:



由图 7 可见, 不同 BF 掺量腐蚀产物的衍射峰高度不同, AFt (衍射峰 9.3° 、 32.2°)、 CaCO_3 (衍射峰 29.1° 、 47.5°)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (衍射峰 18.1° 、 34.1° 、 47.6°)、

石膏(衍射峰 11.63° 、 23.2°)附近^[28], 随着 BF 掺量的增加, 混凝土中的 Na_2SO_4 结晶的衍射峰降低, CaCO_3 、AFt、石膏的衍射峰也在降低。其主要原因是 BF 的加入一定程度上减缓了腐蚀产物和膨胀产物的生成, 提高了混凝土的抗盐冻性能。

由图 6~图 7 可见, BF 的加入减少了混凝土微裂缝产生, 阻止了宏观裂缝扩展, 当 BFRC 内部与外界有较大温差时 BFRC 内部产生较大的压应力, BFRC 表面产生拉应力。当温度梯度继续增大, BFRC 表面拉应力大于 BFRC 的极限抗拉强度时, 会产生裂缝^[29]。在冻胀过程中, BFRC 内部也会受到水分结冰过程中产生的结冰压, 孔隙内盐结晶产生的结晶应力, BF 的存在可以抵消部分应力, 合理范围内 BF 越多提供可抵消的应力越多, BFRC-3 抗冻性最佳。

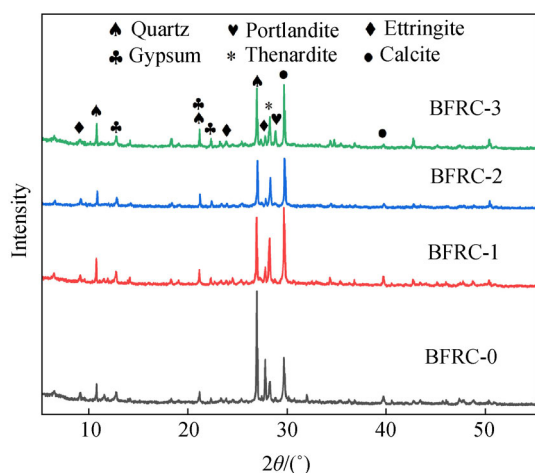


图 7 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下 BFRC 的损伤后 X 射线衍射谱

Fig. 7 Post-injury X-ray diffraction spectra of BFRC under Na_2SO_4 solution-freeze-thaw cycle

3 有限元模型建立与分析

3.1 冻融循环作用下混凝土破坏经典理论

目前, 关于冻融破坏机理的认识和理论还存在争议, 其中静水压理论、临界水饱和度理论及渗透压理论比较经典。随着有限元的发展, 将静水压理论、渗透压理论、临界水饱和理论相融合, 进行混凝土冻融循环作用下损伤机理的研究。

3.1.1 静水压理论 美国的 T. C. Powers 于 1945 年, 提出静水压理论^[30-32], 该理论的提出解释了混凝土在冻胀过程中的机理: 混凝土不可避免的存在初始缺陷如气孔、气泡及裂缝等, 在冻融循环作用下混凝土内部的上述缺陷会吸水饱和, 然后冻结成冰体积膨胀约 9%, 这种现象会使孔隙中的水被体积膨胀的冰挤压, 导致水向着其他毛细孔迁移和流动, 因此会对孔隙周围混凝土产生拉应力。当拉应力大于混凝土抗拉强度时, 混凝土内部及表面就会产生微小的裂缝, 加大混凝土因冻融循环造成的损伤。

3.1.2 渗透压理论 在 1974 年, T. C. Powers 等提出渗透压理论^[33], 混凝土因孔隙中冰膨胀作用产生拉应力, 其会导致未结冰的较大孔隙内离子浓度上升, 包括 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等。孔隙中溶液浓度上升会导致微小毛细孔中的水因浓度差而向大的孔隙进行移动, 这会对孔隙形成渗透压。这种迁移会使孔隙中的水增多, 冻融循环又会导致混凝土裂缝的进一步扩大, 混凝土内部及表面损伤加剧。该理论与静水压理论不同, 认为水未结冰时从小孔向大孔迁移。

3.1.3 临界水饱和度理论 Fagerlund 于 1977 年在静水压及渗透压理论基础上提出了临界水饱和度理论^[34-35], 指出冻融作用下混凝土的劣化损伤与水泥浆体含水量的多少及孔隙水冻胀过程中产生应力有关。混凝土中的裂隙吸水饱和, 气泡孔壁也吸附大量的水。混凝土中饱和水达到极限时, 冻胀导致混凝土发生冻胀破坏, 此时极限值称为混凝土的临界水饱和度。

3.2 边界条件及计算原理

1) 边界条件

利用 ABAQUS 实现冻融循环需要了解温度场的变化和工作原理, ABAQUS 中微观单元表达式为 dxdydz , 其中与微观单元相对应的热量微单元为 qdx dydz , 则热量流动为:

$$\phi = - \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \frac{\partial Q_z}{\partial z} \right) \text{dxdydz} \quad (4)$$

由于热量的储存使物体内能增加, 即:

$$U = c \rho \text{dxdydz} T \quad (5)$$

式中: q 代表热量微单元; U 代表热量。

2) 计算原理

有限元软件 ABAQUS 在计算 BFRC 温度场-热应力时, 首先假定 BFRC 是均质的、连续的、弹性的整体结构。其利用弹性理论来求 BFRC 内部及表面温度-热应力耦合分析过程的解, 并计算 BFRC 的温度场 $T(x, y, z)$ 。 T 代表试件的温度变化值。 α 为 BFRC 的膨胀系数, BFRC 各单元节点的应变为:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \alpha T \quad (6)$$

$$\gamma_{xy} + \gamma_{yz} + \gamma_{zx} = 0 \quad (7)$$

BFRC 的每个节点都被其他单元束缚及约束, 当温度变化对其节点发生作用时, 微观单元节点会引起膨胀应力的变化, 对 BFRC 总变形量的计算为:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z) \right] + \alpha T \quad (8)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x) \right] + \alpha T \quad (9)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x) \right] + \alpha T \quad (10)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \quad (11)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx} \quad (12)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \quad (13)$$

对应力求解, 可推导出应变分量与变化温度 T 的关系, 其应力-应变方程为:

$$\sigma_x = \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_x - \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_y - \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_z + \frac{E\alpha T}{2\mu - 1} \quad (14)$$

$$\sigma_y = \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_y - \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_x - \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_z + \frac{E\alpha T}{2\mu - 1} \quad (15)$$

$$\sigma_z = \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_z - \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_x - \frac{E(\mu-1)}{2\mu^2 + \mu - 1} \varepsilon_y + \frac{E\alpha T}{2\mu - 1} \quad (16)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (17)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (18)$$

$$\tau_{zx} = \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (19)$$

3.3 有限元模型的建立

为更好的研究 BFRC 中 BF 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下性能变化规律, 本工作通过大型有限元软件 ABAQUS 对 BF 掺量 0%、0.1%、0.2%、0.3% 的 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液中冻融循环试验进行了数值模拟。利用 Python 脚本对 ABAQUS 软件进行二次开发将 Na_2SO_4 溶液-冻融循环过程中引起的体积膨胀等效为温度荷载进行模拟, 利用这种“等效温度荷载”方法, 采用自定义子程序实现 Na_2SO_4 溶液-冻融循环 BFRC 劣化过程的模拟。“等效温度法”是根据热胀冷缩的基本原理将 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液侵蚀-冻融循环试验中混凝土受硫酸盐侵蚀产生的钙矾石体积膨胀及水结冰引起的冻胀作用通过温度场与应力场的关联转化来等效实现的。“等效”本质是依据试验对盐侵蚀-冻融循环作用后 BFRC 成分分析, 得出钙矾石在混凝土中体积占比, 并采用“与试验对比分析”的方法及赵燕茹等^[36]的研究得到冻融循环下相关材料膨胀系数: 混凝土膨胀系数为 $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 玄武岩纤维膨胀系数为 $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 钙矾石膨胀系数约为 $2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

建模过程中, 混凝土基体采用八节点积分格式的三维实体单元(C3D8), BF 采用 T3D2 桁架单元。BF 嵌入混凝土中的作用与细短钢筋类似, 因此参考 ABAQUS 软件中提供的钢筋与混凝土耦合模型, 将 BF 嵌入混凝土中: 分数外容差 0.05, 权重因子

容差 10^{-6} 。混凝土与 BF 间粘结滑移作用采用软件中拉伸硬化模块(Tension Behavior)来模拟, 并通过软件中混凝土材料的断裂能(Fracture Energy=1 N·mm)来考虑 BF 与混凝土接触面粘结滑移所需要的能量。由于 BF 具有良好的抗冻性能及化学稳定性, 且其弹性模量为 100 GPa 及抗拉强度为 4 500 MPa, 抗劣化性能远远高于混凝土。因此, 本工作中 BF 按照弹性材料模拟, 不考虑其劣化损伤。混凝土基体的网格划分, 如图 8a 所示, 离散随机分布的 BF 如图 8b 所示。

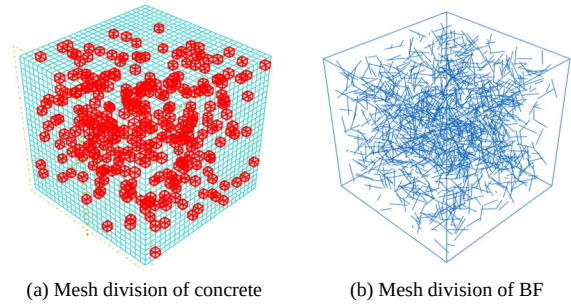


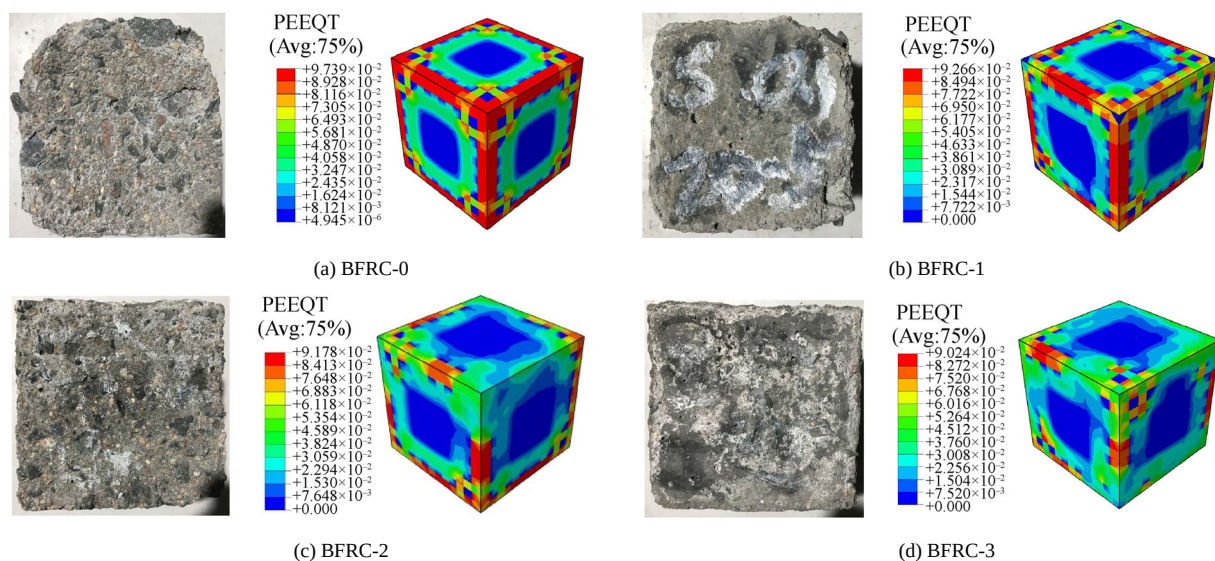
图 8 BFRC 模型的网格划分图
Fig. 8 Meshing diagram of a BFRC model

3.4 计算结果与试验结果对比

为验证模拟效果的正确性和可行性, 对 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下 BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 塑性损伤及抗压性能进行试验与有限元模拟结果的对比分析及验证。

3.4.1 盐溶液-冻融循环作用下塑性损伤对比分析 由图 9 可见, 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环 120 次后 BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2 及 BFRC-3 外观形貌与有限元模拟塑性损伤结果相似度很高, 其破坏区域均是从棱边、角部开始, 逐渐向中部进行扩散。BF 的增加, 减缓了盐冻对混凝土的损伤破坏, 有限元模拟结果与试验结果规律一致, 可以利用有限元模型进行 Na_2SO_4 溶液-冻融循环试验的模拟分析。

3.4.2 盐溶液-冻融循环作用下 BFRC 力学性能 为进一步验证模拟效果的正确性和可行性, 选取具有代表性试件 BFRC-3 进行在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下抗压试验并与有限元抗压模拟进行对比分析。由图 10 可见, 模拟值比试验值略高, 这主要是因为模拟只考虑了 Na_2SO_4 溶液侵蚀 BFRC 生成物钙矾石的膨胀作用, 没有考虑石膏及其他微膨胀产物对 BFRC 抗压强度的影响。试验结果与模拟结果对比, 误差在 10% 以内, 符合误差范围的要求, 吻合良好。因此, 采用有限元进行 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下 BFRC 性能研究是可行的。



PEEQT is equivalent plastic tensile strain.

图 9 Na_2SO_4 溶液-冻融循环 120 次 BFRC 的外观损伤试验与有限元模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of appearance damage test and finite element simulation of BFRC after 120 Na_2SO_4 solution-freeze-thaw cycles

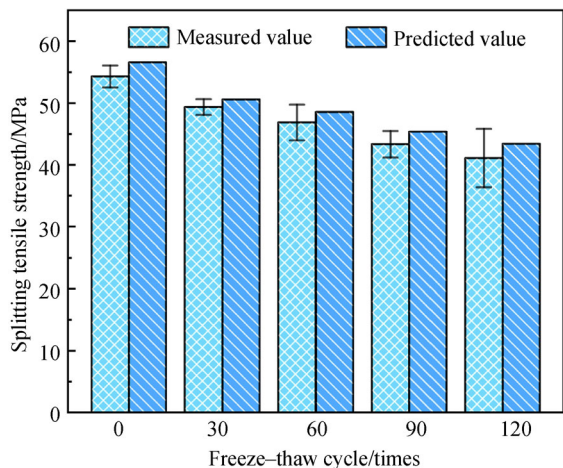


图 10 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下抗压强度试验值与模拟值的对比图

Fig. 10 Comparison of the measured and predicted values of the compressive strength of BFRC under Na_2SO_4 solution-freeze-thaw cycle

3.5 模拟结果分析

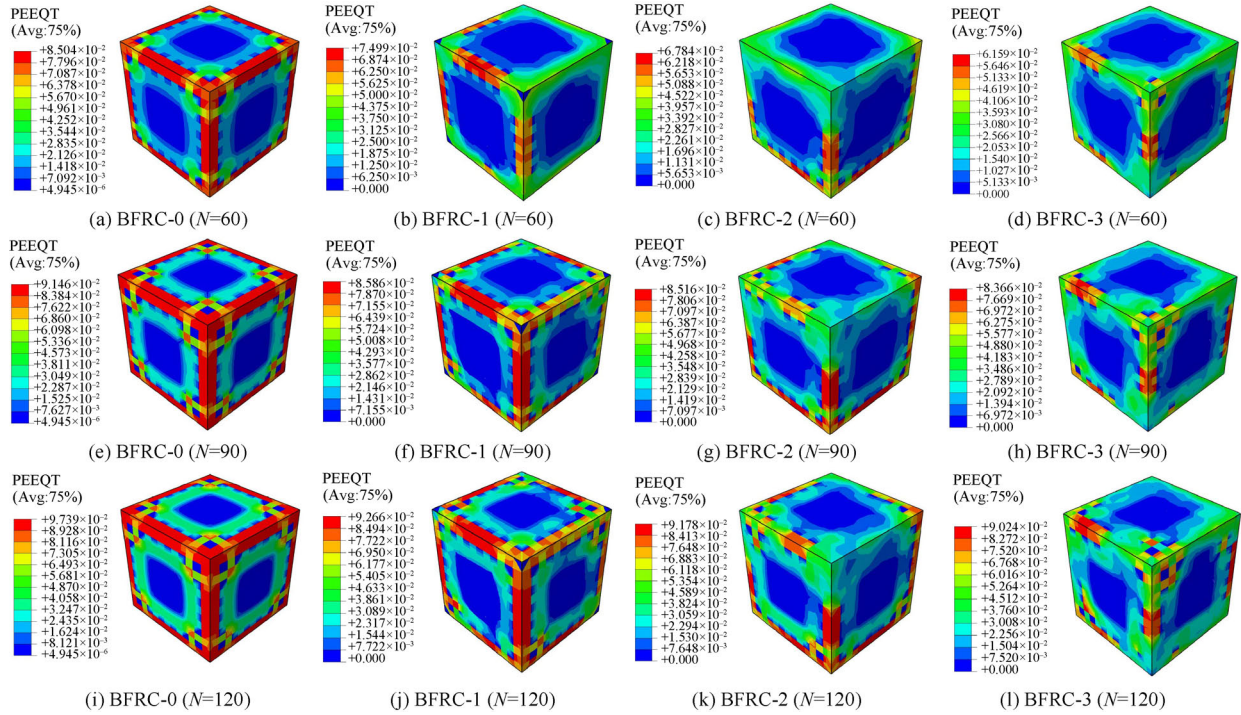
3.5.1 塑性应变 与试验部分相对应, 对 BF 掺量为 0.0%、0.1%、0.2%及 0.3%的 BFRC 进行了 Na_2SO_4 溶液-冻融循环的模拟分析。从图 11 可以看出不同 Na_2SO_4 溶液-冻融循环次数下 BFRC 的塑性应变。BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 对应最大应变在冻融循环进行至第 60 次时, 分别为: 8.50×10^{-2} 、 7.50×10^{-2} 、 6.78×10^{-2} 、 6.16×10^{-2} ; 循环进行至第 90 次时, 分别为: 9.15×10^{-2} 、 8.59×10^{-2} 、 8.52×10^{-2} 、 8.37×10^{-2} ; 循环进行至第 120 次时, 分别为: 9.74×10^{-2} 、 9.27×10^{-2} 、 9.18×10^{-2} 、 9.02×10^{-2} 。

由以上数据可知: 首先, 随着 Na_2SO_4 溶液-冻融循环次数的增加, 塑性应变值在不断增加, 塑性变形发生的部位不断向试件中心扩散, 所有试件的棱、角等边缘部位都出现了较大的塑性应变, 这说明试件局部已经发生破坏; 其次, 在冻融循环次数相同的情况下, 随着 BF 掺量的增加, 塑性应变的峰值在逐渐降低, 这说明 BF 的掺入缓解了 Na_2SO_4 溶液-冻融循环的破坏作用, BF 抑制了塑性变形的开展, 提高了混凝土的抗冻性。BFRC 的塑性应变为累积应变且为不可恢复应变, 间接反映了 BF 嵌入混凝土中对抵抗 Na_2SO_4 溶液侵蚀及冻融循环的作用结果。随着 BF 掺量的增加, BFRC 塑性累积应变在减小, BFRC 在 Na_2SO_4 溶液侵蚀及冻融循环下破坏程度在减小。

3.5.2 盐冻作用下 BFRP 冻结应力场对比分析 图 12 为 Na_2SO_4 溶液-冻融循环过程中冻结阶段 BFRC 应力变化云图。图 12 中 BFRC-0、BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 表面最大拉应力, 在循环进行至第 60 次时分别为 3.674 、 3.674 、 3.515 N/mm^2 及 3.253 N/mm^2 ; 循环进行至第 90 次时分别为 3.638 、 3.512 、 3.312 、 2.905 N/mm^2 ; 冻融循环到第 120 次时分别为 3.362 、 3.137 、 2.971 、 2.849 N/mm^2 。从以上数据可以看出, 随着 Na_2SO_4 溶液-冻融循环次数的增加, BF 掺量 0%、0.1%、0.2%、0.3%的 BFRC 表面拉应力在降低, 循环进行至第 60 次时各掺量 BFRC 表面拉应力基本达到混凝土极限, 说明 BFRC 边缘混凝土已出现局部塑性损伤破坏, 这时混凝土表面发生

冻胀引起拉应力, 而 BFRC 内部混凝土基本处于受压状态; 随着 Na_2SO_4 溶液-冻融循环次数的增加, 表面及内部核心区的混凝土应力也在降低, 这是因为随着 BFRC 表面破坏, 冻胀及盐胀作用向 BFRC

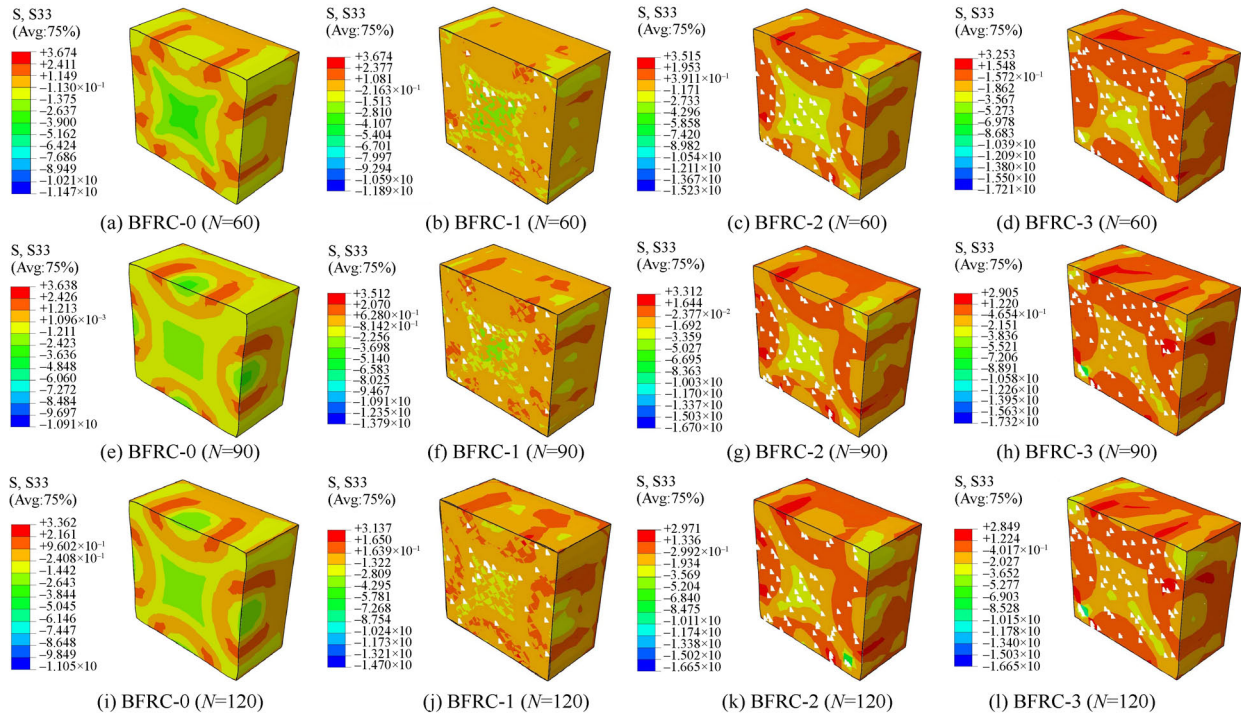
内部传导, BF 承担了更多由混凝土卸载下来的拉应力; BFRC-0 的表面一直维持较高的拉应力水平, 而随着 BF 掺量增加 BFRC 应力水平逐渐降低, 其中 BFRC-3 应力峰值较小, 且应力分布相对均匀。



N is number of cycles.

图 11 不同 BF 掺量的 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下塑性应变云图

Fig. 11 Elastoplastic strain contours of concrete under Na_2SO_4 solution-freeze-thaw cycle of BFRC with different BF contents



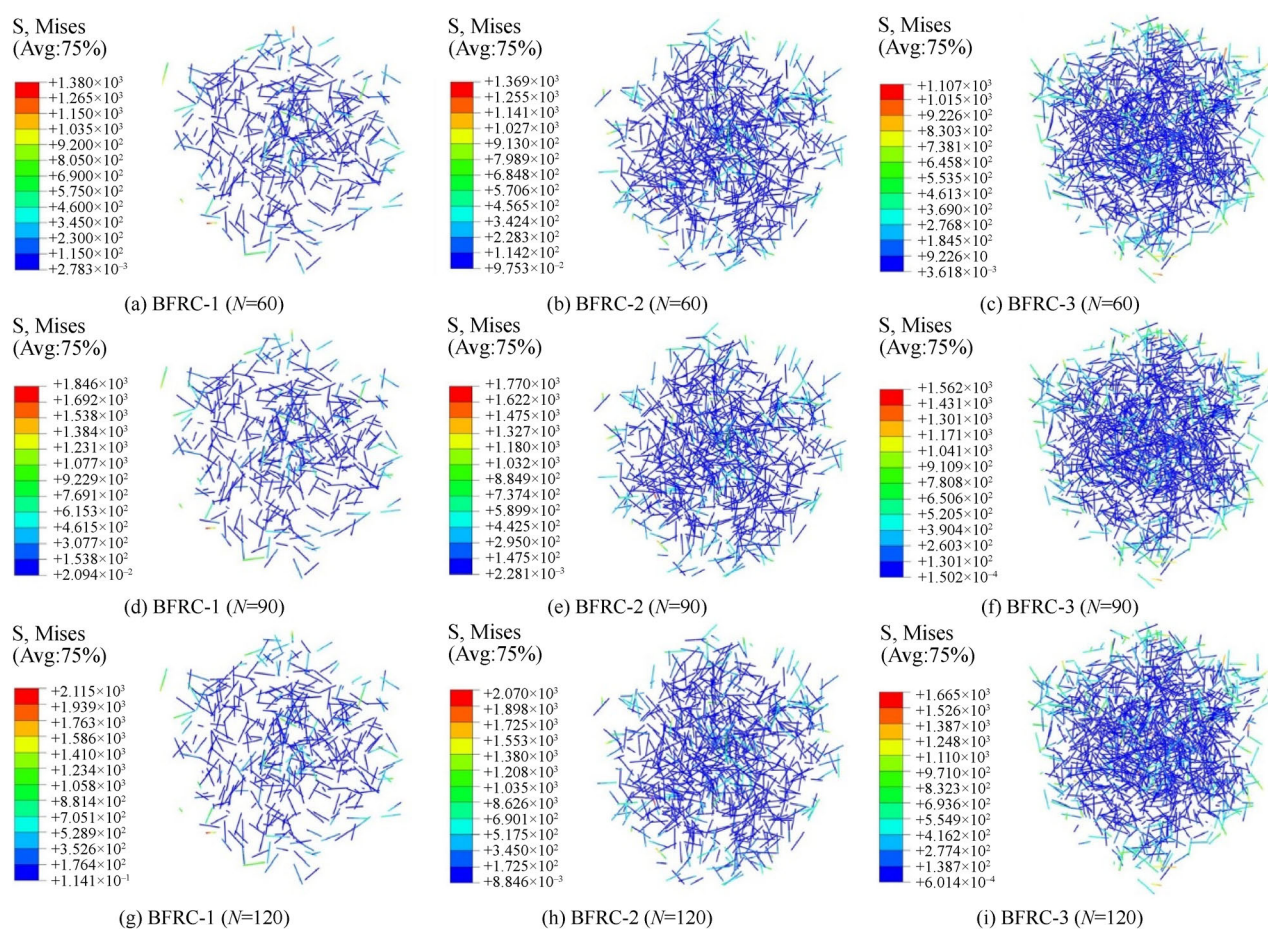
S, S_{33} is Z-axis stress.

图 12 Na_2SO_4 溶液-冻循环作用下 BFRC 冻结阶段应力云图

Fig. 12 Stress contour of BFRC during the freezing phase of Na_2SO_4 solution-freeze-thaw cycle

3.5.3 Na_2SO_4 溶液-冻融作用下 BFRC 中 BF 冻结应力场对比分析 从图 13 可以看出 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下冻结状态时 BF 最大应力, 图中 BFRC-1、BFRC-2、BFRC-3 中 BF 最大拉应力在冻融循环 60 次时分别为 1.380×10^3 、 1.369×10^3 N/mm^2 及 1.107×10^3 N/mm^2 。冻融循环 90 次时, 分别为 1.846×10^3 、 1.77×10^3 N/mm^2 及 1.562×10^3 N/mm^2 。冻融循环 120 次时, 分别为 2.115×10^3 、 2.07×10^3 N/mm^2 及 1.665×10^3 N/mm^2 。从以上数据可以看出, 随着 Na_2SO_4 溶液-冻融循环次数的

增加, BFRC 试件的外边缘及角部的 BF 拉应力在逐渐的加大, 这说明冻结阶段 BF 承担了更多由混凝土盐胀及冻胀产生的拉应力, 冻融循环作用是从外部侵入并渗透到 BFRC 内部, 因此 BF 受应力较大部位集中在外边缘及角部, 这与试验结果吻合。在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环次数一定的情况下, 随着 BF 掺量的增加, BFRC 中外部边缘及角部的 BF 拉应力在降低, 这主要是因为有更多的 BF 投入工作, 分担了混凝土因盐胀及冻胀卸载下的应力。



S, Mises is Mises stress.

图 13 Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下 BFRC 中 BF 的冻结阶段应力变化云图

Fig. 13 Stress contour of BF in BFRC during the freezing phase of Na_2SO_4 solution-freeze-thaw cycle

4 结论

1) Na_2SO_4 溶液-冻融循环作用下 BFRC 的质量及相对动弹性模量随着 Na_2SO_4 溶液-冻融循环次数的增加先增大后减小; 抗压强度、劈裂抗拉强度随着冻融循环次数的增加不断降低, BF 的加入整体上提高 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液中抗冻融性能, 且在 0.1%~0.3% 范围内随着 BF 体积掺量的增加, 抗冻性能逐渐提高, BF 掺量为 0.3% 时, Na_2SO_4 溶液中抗冻性能表现最佳。

2) 不同 BF 掺量的 BFRC 在 Na_2SO_4 溶液-冻融循环试验过程中内部应力场和应变场, 随着 BF 掺量的增加应力峰值和应变在减小; 同一 BF 掺量时, 随着 Na_2SO_4 溶液-冻融循环次数的增加, 应力和应变在增大, 动态数值模拟与试验结果吻合。采用“等效温度荷载”方法, 利用 ABAQUS 有限元软件可以有效模拟盐溶液-冻融循环试验过程。

3) 利用 ABAQUS 分析了试验过程中混凝土和 BF 的应力场及 BFRC 应变场的变化规律。在冻融循

环过程中 BF 起到传递和分散应力的作用, 使混凝土内部应力重分布提高了混凝土的抗盐冻性能。BF 的加入可以提高 BFRC 的抗盐冻性能, 且 BF 掺量 0.3% 时 BFRC 抗盐冻性能最佳。

参考文献:

- [1] GAN L, XU W C, SHEN Z Z, et al. Experimental and numerical investigations on damage evolution of concrete under sulfate attack and freeze-thaw cycles[J]. *J Build Eng*, 2023, 71: 106469.
- [2] 甘磊, 刘源, 沈振中, 等. 硫酸盐侵蚀和冻融循环作用下混凝土损伤演化规律[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(11): 134–141. GAN Lei, LIU Yuan, SHEN Zhenzhong, et al. *J Huazhong Univ Sci Technol Nat Sci Ed*, 2023, 51(11): 134–141.
- [3] 乔宏霞, 何忠茂, 刘翠兰, 等. 高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀的研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2004, 30(1): 101–105. QIAO Hongxia, HE Zhongmao, LIU Cuilan, et al. *J Lanzhou Univ Technol*, 2004, 30(1): 101–105.
- [4] 李林洁, 刘清风. 冻融循环下混凝土内部结冰及氯离子传输规律的数值研究[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(8): 2245–2256. LI Linjie, LIU Qingfeng. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(8): 2245–2256.
- [5] THAULOW N, SAHU S. Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization[J]. *Mater Charact*, 2004, 53(2–4): 123–127.
- [6] RODRIGUEZ-NAVARRO C, DOEHNE E, SEBASTIAN E. How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials[J]. *Cem Concr Res*, 2000, 30(10): 1527–1534.
- [7] 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): 1133–1138. WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. *J Chin Ceram Soc*, 2012, 40(8): 1133–1138.
- [8] CHEN S J, REN J X, LIU L, et al. Investigation of the dynamic compressive mechanical properties of concrete under the combined effects of freeze-thaw and salt erosion[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 407: 133548.
- [9] ZHANG H, WANG B, XIE A Y, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 152: 154–167.
- [10] LI Y, ZHANG J P, HE Y Z, et al. A review on durability of basalt fiber reinforced concrete[J]. *Compos Sci Technol*, 2022, 225: 109519.
- [11] ÖZKAN Ş, DEMİR F. The hybrid effects of PVA fiber and basalt fiber on mechanical performance of cost effective hybrid cementitious composites[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 263: 120564.
- [12] CHOI J I, LEE B Y. Bonding properties of basalt fiber and strength reduction according to fiber orientation[J]. *Materials*, 2015, 8(10): 6719–6727.
- [13] WANG Z S, LI Y K, LU J L, et al. Research on corrosion characteristics and performance degradation of basalt fiber concrete under sodium magnesium sulfate corrosion environment[J]. *J Coast Res*, 2020, 111(S1): 56–62.
- [14] 甘磊, 吴健, 沈振中, 等. 硫酸盐和干湿循环作用下玄武岩纤维混凝土劣化规律[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(11): 37–46. GAN Lei, WU Jian, SHEN Zhenzhong, et al. *China Civ Eng J*, 2021, 54(11): 37–46.
- [15] REN D M, YAN C J, DUAN P, et al. Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 134: 56–66.
- [16] SINICA M, LAUKAITIS A, SEZEMAN G A, et al. The influence of binding materials composition and fibrous additives on the properties of porous concrete[J]. *Engineering Structures Technologies*, 2004, 10(01): 131–136.
- [17] LI Z X, GUO T T, CHEN Y Z, et al. Influence of basalt fiber and polypropylene fiber on the mechanical and durability properties of cement-based composite materials[J]. *J Build Eng*, 2024, 90: 109335.
- [18] 赵燕茹, 王志慧, 王磊, 等. 冻融循环作用后 BFRC 宏观性能的灰碱法分析[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(1): 45–53. ZHAO Yanru, WANG Zhihui, WANG Lei, et al. *J Build Mater*, 2019, 22(1): 45–53.
- [19] 金生吉, 李忠良, 张健, 等. 玄武岩纤维混凝土腐蚀条件下抗冻融性能试验研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(5): 178–183. JIN Shengji, LI Zhongliang, ZHANG Jian, et al. *Eng Mech*, 2015, 32(5): 178–183.
- [20] 周禹辛, 周晶. 冻融循环下混凝土的动态数值模拟分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(5): 181–184. ZHOU Yuxin, ZHOU Jing. *J Water Resour Archit Eng*, 2018, 16(5): 181–184.
- [21] ZHANG J G, GUAN Y H, FAN C Q, et al. Experimental and theoretical investigations on the damage evolution of the basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 422: 135703.
- [22] XU G, GONG C, LIU J, et al. Correlation between water freeze-thaw resistance and salt freeze-thaw resistance of concrete[J]. *Build. Mater*, 2020, 23: 552–556.
- [23] MÜLLAUER W, BEDDOE R E, HEINZ D. Sulfate attack expansion mechanisms[J]. *Cem Concr Res*, 2013, 52: 208–215.
- [24] YANG H Q, SHEN X M, RAO M J, et al. Influence of alternation of sulfate attack and freeze-thaw on microstructure of concrete[J]. *Adv Mater Sci Eng*, 2015, 2015: 859069.
- [25] REN J G, LAI Y M. Study on the durability and failure mechanism of concrete modified with nanoparticles and polypropylene fiber under freeze-thaw cycles and sulfate attack[J]. *Cold Reg Sci Technol*, 2021, 188: 103301.
- [26] JIANG X, MU S, LIU J P. Influence of chlorides and salt concentration on salt crystallization damage of cement-based materials[J]. *J Build Eng*, 2022, 61: 105260.
- [27] NIU D T, JIANG L, FEI Q N. Deterioration mechanism of sulfate attack on concrete under freeze-thaw cycles[J]. *J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed*, 2013, 28(6): 1172–1176.
- [28] DUAN M H, QIN Y, LI Y, et al. Durability and damage model of polyacrylonitrile fiber reinforced concrete under freeze-thaw and erosion[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 394: 132238.
- [29] 王鹏刚, 莫芮, 隋晓萌, 等. 混凝土中氯盐-硫酸盐耦合侵蚀的化学-损伤-传输模型研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(2): 512–521. WANG Penggang, MO Rui, SUI Xiaomeng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(2): 512–521.
- [30] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. *ACI J Proc*, 1945, 16(4): 245–273.
- [31] POWERS T C. The air requirement of frost-resistance concrete[J]. *Proc High Res Board*, 1949, 29: 184–202.
- [32] POWERS T C. Void space as a basis for producing air-entrained concrete[J]. *ACI J Proc*, 1954, 50(5): 741–760.
- [33] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing[J]. *Proc High Res Board*, 1953, 32: 285–297.
- [34] FAGERLUND G. The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete[J]. *Matériaux Constr*, 1977, 10(4): 231–253.
- [35] FAGERLUND G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete[J]. *Matériaux Constr*, 1977, 10(4): 217–229.
- [36] 赵燕茹, 白建文. 玄武岩纤维混凝土: 抗冻性及冻融环境下力学性能研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021.

Freeze–Thaw Test and Numerical Analysis of Basalt Reinforced Fiber Concrete in Western Saline Soil Area

ZHU Feifei¹, QIAO Hongxia¹, FU Yong¹, WANG Xinke²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Gansu Advanced Civil Engineering Materials Engineering Research Center, Lanzhou 730050;

2. State Key Laboratory of High-Performance Civil Engineering Materials of Jiangsu Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing 211103)

Extended Abstract

Introduction On the Loess Plateau in western China, there exists a large number of saline soils, most of which contain salts, typically of sulfate and chloride salts. Since the sulfates in saline soils are sensitive to temperature changes, they are susceptible to salt crystallization expansion and frost heave at low temperatures, which can lead to destruction of concrete structures. Salty soils and freeze–thaw environments cause concrete to be subjected to the coupled effects of simultaneous sulfate attack and freezing and expansion, which further increases the deterioration degree of concrete and seriously threatens the durability of concrete in this area. Adding fibers to concrete can effectively inhibit the plastic shrinkage cracking and improve the durability of concrete such as wear resistance, impermeability and frost resistance. Basalt fiber (BF) has excellent properties such as high strength, light weight, high temperature resistance, high elastic modulus, fracture resistance and corrosion resistance, and it is easy to disperse in concrete and has excellent cooperative work performance with concrete. Therefore, in this paper, the durability of concrete is improved by incorporating an appropriate amount of BF into the concrete to reduce the initial defects and slow down the rate of corrosive ions into the interior of the concrete. Furthermore, the effect of different BF admixtures on the relative dynamic modulus of elasticity, mass loss, compressive strength, and splitting tensile strength of concrete during salt freezing were investigated. The effect of the included BF is also clarified.

Methods The concrete was prepared by P·O 42.5 ordinary Portland cement, II grade fly ash, 5–20 mm continuous graded gravel and natural river sand fineness modulus of 2.83. The volume content of basalt fiber was 0%, 0.1%, 0.2% and 0.3%. The test was carried out with reference to the quick-freezing method in GB/T 50082—2009 ‘Test method for long-term performance and durability of ordinary concrete’, using HC-HDK9/Y type fast freeze–thaw cycle tester. According to the content of corrosive ions in saline soil in western China, Na₂SO₄ salt solution with a concentration of 23 g/L was selected for freeze–thaw cycle test. The loss rates of mass, relative dynamic elastic modulus, the compressive strength and splitting tensile strength during the test were tested. At the same time, Numerical simulation tests were carried out using finite element software ABAQUS to analyze the changes of internal stress and strain fields of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) during the tests.

Results and discussion The mass and relative dynamic elastic modulus of BFRC under the action of Na₂SO₄ solution-freeze–thaw cycle raised first and then decrease with growth of the number of freeze–thaw cycles. The compressive strength and split tensile strength decrease with the increase of the number of freeze–thaw cycles. The addition of BF slows down the formation of corrosion products and expansion products. Under the same number of freeze–thaw cycles, the addition of BF reduces the generation of microcracks in concrete and prevents crack propagation. The addition of BF improves the freeze–thaw resistance of concrete in Na₂SO₄ solution. And the freeze–thaw resistance performance gradually improves with the increase of the BF volumetric doping within the range of 0.1% to 0.3%. Moreover, the best performance of freeze resistance in Na₂SO₄ solution is achieved when BF doping is 0.3%.

The internal stress and strain fields of BFRC with different BF dosage during Na₂SO₄ solution-freeze–thaw cycle test decrease with increasing the BF dosage. At the same BF dosage, the stress and strain increase with increasing the number of freeze–thaw cycles, and the dynamic numerical simulation was in good agreement with the experimental results. Using the ‘equivalent temperature load’ method, the salt solution-freeze–thaw cycles test process can be effectively simulated by ABAQUS finite element software. The numerical simulation results also show that the stress field of concrete and BF as well as the strain field of BFRC have changed, and that BF plays the role of transferring and dispersing the stresses during the freeze–thaw cycling process, which leads to the phenomenon of stress redistribution inside the concrete, and improves the salt-freezing resistance of concrete.

Conclusions In this work, the macroscopic properties and microscopic changes of BFRC with different amounts of BF were studied under the combined effect of Na₂SO₄ erosion and freeze–thaw. The main conclusions are that the addition of BF significantly reduces the loss rate of concrete mass, relative dynamic elastic modulus, compressive strength and splitting tensile strength during the freeze–thaw cycle of Na₂SO₄ solution. BF can transfer and disperse the stress, so that the stresses are redistributed inside the concrete during the freeze–thaw process, thus improving the salt-freeze resistance of concrete. In addition, when the BF content is 0.3%, BFRC has the best resistance to Na₂SO₄ salt erosion-freezing performance. Meanwhile, BF shows an important effect in the evolution of freeze–thaw damage evolution of concrete, which can be visualized effectively by finite element model.

Keywords basalt fiber reinforced concrete; freeze–thaw cycle; sulfate; finite element simulation