

盐-冻融/干湿循环作用下纤维混凝土耐久性能

段明翰, 覃 源, 李 阳

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘 要: 为探究纤维混凝土在高寒盐渍土环境下的耐久性能, 对西藏地区某工程现场暴露养护后的聚丙烯、聚丙烯腈及聚酯等 3 种纤维混凝土进行复合盐-冻融/干湿循环加速试验, 通过测试试件超声波波速、劈拉强度及微观结构, 进一步分析耐久性能衰减规律及损伤机理。结果表明: 现场暴露养护下纤维混凝土均出现网状结构微裂纹, 与素混凝土有显著差异; 而表面裂纹与内部裂缝在盐-冻融/干湿循环作用下逐渐联通则会造成波速和劈拉强度下降; 纤维的桥联-阻裂-增韧作用以能量传递方式体现, 通过改善界面过渡区处的裂纹扩展能力, 延缓了劈拉过程中的荷载损伤; 波速损伤量与劈拉强度具有显著的相关性, 建立的预测模型在一定程度上具有适用性。

关键词: 纤维混凝土; 高寒盐渍土; 冻融/干湿循环; 超声波波速; 劈拉强度; 预测模型

中图分类号: TV431+.3 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)12-3703-15

网络出版时间: 2024-11-13



近年来, 中国西部地区重大基础工程建设发展迅猛, 规模宏伟。然而, 青藏高原高寒盐渍土地区混凝土服役过程中面临冻融循环、硫酸盐及氯盐腐蚀造成的冻融/干湿循环等因素耦合劣化作用^[1-3], 导致结构寿命严重下降, 且维修过程复杂, 经济损失巨大。

曾有报道, 这些因素耦合作用下, 使得许多新建混凝土结构在短短 5 到 10 年的服役期内就出现了损伤^[4], 特别是那些与水体、土体直接接触的结构, 其损伤发生的时间更早, 破坏程度也更为严重, 从而与内地相比, 结构寿命明显缩短^[4-6]。而相关研究则表明暴露于不同环境下的混凝土耐久性能存在显著差异^[6], 其中盐腐蚀-冻融耦合作用下混凝土后期劣化程度大于水-冻融作用下的结果^[7], 盐腐蚀-干湿循环耦合作用下后期劣化程度大于单一干湿循环^[8]。Long 等^[9]发现, 盐腐蚀-冻融导致混凝土产生更严重的损伤, 主要是由于盐溶液具有吸湿性, 提高了混凝土的饱水程度, 进而产生更大的结冰压^[10]。杨全兵^[11]研究发现盐腐蚀-冻融过程中盐的存在导致水向盐迁移, 随后盐混合物结冰产生冰塞作用, 混凝土受冰压力作用而破坏, 产生这一现象主要是因为盐的存在导致水的冰点和结冰量降低, 化学腐蚀

性和吸水性增加, 并且中低浓度盐引起破坏最严重; Puhninger 发现盐可改变溶液的可收缩性和达到最大密度的温度, 这种现象也最有可能发生在中低浓度的盐溶液中^[12]; 高志浩等^[13]基于数字图像处理技术定量分析了混凝土在盐腐蚀-冻融过程中的孔隙和微裂纹演变过程, 发现随试验次数增加, 混凝土表现出孔径扩张和微裂纹自孔壁萌生, 导致了相对动弹性模量的损失。通常来说, 硫酸盐对混凝土的腐蚀主要分为化学腐蚀与物理腐蚀, 化学腐蚀主要为硫酸根离子与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成石膏, 石膏又与铝相物质反应产生钙矾石, 这些生成产物在冻融/干湿循环前期可以起到一定的填充作用, 但随着循环次数增加, 其膨胀应力过大而造成混凝土开裂破坏^[14]; 物理腐蚀主要指硫酸盐晶体溶解、沉淀和沉淀物累积膨胀并导致混凝土的损伤破坏^[14]; 而氯盐的腐蚀作用主要是通过混凝土表面孔洞进入水泥基体与水化产物接触, 进行充分反应, 生成低溶性絮状 Friedel 盐晶体($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)以及大量针状钙矾石, 随着冻融/干湿循环试验周期的增加, 孔隙内结晶物积累到一定程度时, 其产生的压力和膨胀应力会使混凝土劣化损伤^[15]。

收稿日期: 2024-06-04。 修订日期: 2024-06-22。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279139)。

第一作者: 段明翰(1996—), 男, 博士研究生。

通信作者: 覃 源(1983—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-06-04. Revised date: 2024-06-22.

First author: DUAN Minghan (1996—), male, Doctoral candidate.

E-mail: duanminghan123xaut@163.com

Correspondent author: QIN Yuan (1983—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: qinyuan@xaut.edu.cn

此外, 相关研究表明纤维可有效提升混凝土韧性, 减少微裂缝的产生与扩展, 并提高其耐久性^[3, 5, 16–17]。目前国内外也修建了许多工程^[18], 积累了一定的工程经验。苏骏等^[19]发现掺钢渣粉聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料在 5%Na₂SO₄ 溶液中干湿循环时, 断裂韧度随侵蚀时间先增大后减小, 侵蚀 60 d 到达峰值, 并且失稳断裂韧度相对值符合两参数 Weibull 分布情形。Qin 等^[16]以青海纳子峡面板纤维素纤维混凝土为研究对象, 发现 Na₂SO₄ 溶液会降低基体内部应力和粘结性能, 从而导致其劈拉强度降低。甘磊等^[20]发现硫酸盐和干湿循环耦合作用下玄武岩纤维混凝土劣化受溶液浓度、试验次数和纤维掺量 3 个因素共同影响, 且腐蚀产物主要为石膏和钙矾石。张秉宗等^[21]则发现, 相较清水干湿循环, 聚丙烯纤维混凝土在复合盐–干湿循环侵蚀下的产物呈短棒平行排列分布, 且之间孔隙多不平整。郑挚等^[22]采用浓度为 3.5%NaCl+3.5%Na₂SO₄ 的混合盐溶液模拟了严寒盐渍土地区的盐冻侵害, 发现劈拉强度损失率低于抗压强度和抗折强度损失率。通过总结不难发现, 在盐腐蚀–冻融/干湿交替作用下, 会产生膨胀应力和渗透应力, 正是这些应力交替作用导致了混凝土发生耐久性损伤, 引起结构内部裂缝的持续扩展, 增加结构的开裂风险, 降低其抗拉性能^[23], 而抗拉强度在混凝土结构的裂缝宽度和刚度计算时为重要参数, 厘清高寒盐渍土环境下混凝土的抗拉性能衰减规律, 则对于认识耐久性破坏机理至关重要^[24]。

然而, 由于高寒地区日温差显著、紫外线辐射强烈、气候严寒干燥、大风天气频繁^[25], 使得混凝土尤其在冬季浇筑成型后表面容易出现收缩裂纹, 内部则由于早期受冻导致水化迟缓形成大量孔隙, 并且自由水分子会结晶并引起体积膨胀, 容易使混凝土受到冻害风险^[26], 产生初始损伤^[27], 对混凝土服役期间的耐久性产生显著影响。虽然以往针对纤维混凝土耐久性研究已有许多, 但试验环境不同使得结果差异性较大, 难以反映高寒盐渍土环境对纤维混凝土的影响。尤其对于考虑冬季施工浇筑带有初始损伤状态的纤维混凝土在该环境下的耐久性及其机理认识还略有不足, 尚需完善。

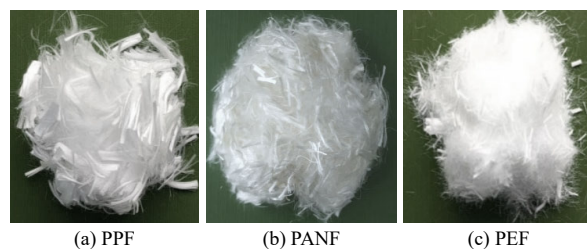
本研究以西藏高寒盐渍土地区(海拔 3 600 m)某工程纤维道面混凝土为例, 旨在探究冬季浇筑成型后带有微裂纹损伤情况时在复合盐–冻融/干湿循环作用下的耐久性性能。设计制作聚丙烯纤维(PPF), 聚丙烯腈纤维(PANF)和改性聚酯纤维(PEF) 3 种不同类

型的纤维混凝土试件, 纤维掺量分别控制为 0.9、1.2 kg/m³ 及 1.4 kg/m³, 以及 1 组素混凝土(PC)作为对照组, 均置于工程现场暴露养护。首先, 分析统计了各组试件的微裂纹损伤信息; 其次, 开展复合盐–冻融和复合盐–干湿循环 2 种加速劣化试验, 采用超声波波速和巴西圆饼试件劈拉强度研究耐久性损伤规律, 结合电镜扫描技术分析损伤机理; 并且在此基础上进一步探究波速损伤量与劈拉强度的相关性, 并建立预测模型。以期为高寒盐渍土地区纤维混凝土结构的抗拉设计及相关耐久性分析提供相关参考。

1 实验

1.1 原材料

选用西藏地区山南市某工程项目料场原材料开展试验: 水泥为高争牌 P·O 42.5 级水泥, 性能指标见表 1; 粉煤灰为拉萨当地 II 级粉煤灰, 性能指标见表 1; 细骨料为当地天然河砂(中砂), 细度模数为 2.7; 粗骨料为粒径约 4.75~31.50 mm 的碎石, 其中小石粒径 4.75~9.50 mm, 中石粒径 9.5~19.0 mm, 大石粒径 19.0~31.5 mm, 3 种粗骨料的质量分配比例为 1:5:4; 减水剂为标准型聚羧酸高效能减水剂; 拌和水采用当地自来水。试验中采用的 PPF、PANF 及 PEF 均为束状单丝型, 如图 1 所示, 性能指标见表 2, 根据对过去的一些研究成果分析统计^[16–17, 28–29], 设计纤维掺量分别为 0.9、1.2 kg/m³ 和 1.4 kg/m³。混凝土的设计强度等级为 C40, 水胶(质量)比为 0.32, 基准配合比见表 3。



(a) PPF (b) PANF (c) PEF

图 1 试验用纤维实物图

Fig. 1 Physical picture of fiber used for testing

1.2 试件制作及试验方法

1.2.1 试件制作及养护 如图 2a 中所示的拌和流程, 浇筑直径为 100 mm, 高度为 50 mm 的圆饼试件。室内固化 24 h 后脱模, 移至室外暴露养护。试验地区的室外海拔约 3 600 m, 气压约为 62~66 kPa, 养护期温度为 -15~20 °C, 相对湿度为 20%~40%。复合盐–冻融试件养护时间为 2020 年 10 月至 2021 年 3 月, 复合盐–干湿循环试件养护时间为 2020 年 11 月至 2021 年 4 月, 养护龄期均为 150 d。

表 1 水泥及粉煤灰性能指标

Table 1 Performance indicators of Gaozheng cement and fly ash

Material	Ignition loss rate/%	w(SO ₃)/%	w(MgO)/%	Normal consistency/%	w(Cl ⁻)/%	Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)
Cement	2.28	2.27	1.34	27.20	0.0132	368
Fly ash	3.63	1.74	1.67		0.015	

w is mass fraction. is mass fraction.

表 2 纤维基本性能指标

Table 2 Basic fiber performance indicators

Fiber type	Character	Density/(g·cm ⁻³)	Length/mm	Diameter/ μm	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/MPa	Breaking elongation/%	Melting point/°C
PPF		0.91	16	32.7	469	4236	28.4	169
PANF	Bundle shape	1.18	12	12	537	7200	22.0	240
PEF		1.36	12	20	≥500	6000	25.0	256

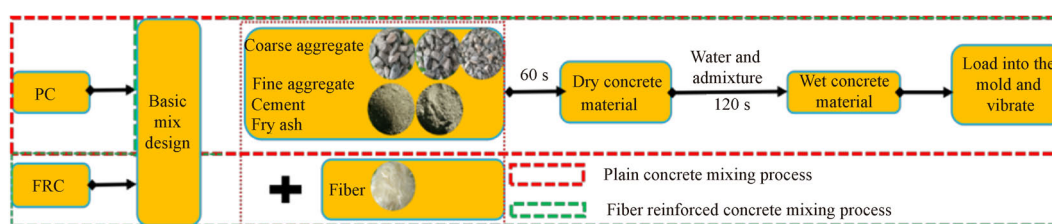
Note: PPF is polypropylene fiber; PANF is polyacrylonitrile fiber; PET is polyester fiber.

表 3 纤维混凝土基准配合比

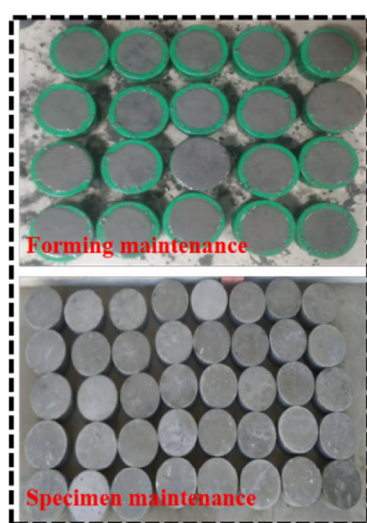
Table 3 Fiber concrete basic mix proportion

Specimen types	Cement/(kg·m ⁻³)	Fly ash/(kg·m ⁻³)	Water/(kg·m ⁻³)	Fine aggregate/(kg·m ⁻³)	Coarse aggregate/(kg·m ⁻³)	Water reducing admixture/(kg·m ⁻³)	Fiber/(kg·m ⁻³)
PC	487	97	185	587	1191	11.7	0
PPFRC	487	97	185	587	1191	11.7	0.9
PANFRC	487	97	185	587	1191	11.7	1.2
PEFRC	487	97	185	587	1191	11.7	1.4

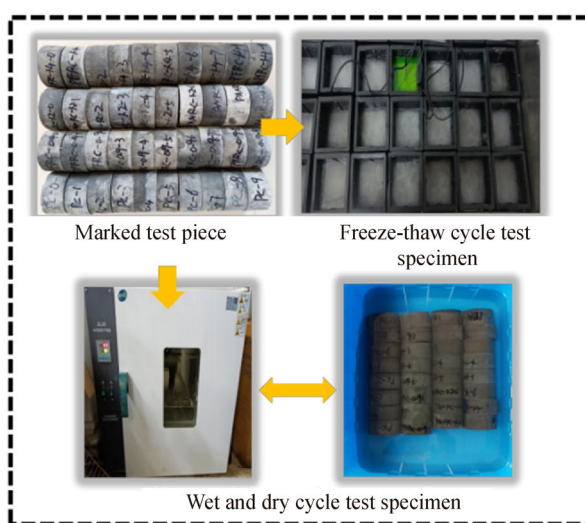
Note: PC is plain concrete; PPFRC is polyacrylonitrile fiber reinforced concrete; PANFRC is polyacrylonitrile fiber reinforced concrete; PEFRC is polyester fiber reinforced concrete.



(a) Mixing process



(b) Specimen curing



(c) Durability test

图 2 试件制作及实验

Fig. 2 Production and experiment of round cake specimen

1.2.2 复合盐-冻融/干湿循环试验方法

1) 复合盐-冻融试验：将养护至 150 d 的圆饼试件移至清水溶液中浸泡 4 d 后，清理干净试件，观察试件表面形态，测试试件微裂纹信息、超声波波速和劈拉强度。参考王家滨等^[30]的研究，配制 Na_2SO_4 浓度为 5%， MgSO_4 浓度为 5% 及 NaCl 浓度为 3.5% 的复合盐溶液作为冻融循环介质。复合盐-冻融循环试验总次数为 200 次，参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中相关规定^[31]，设置冻结时间为 2.5 h，融解时间为 1.5 h，每 4 h 为 1 个小循环，每 25 次为 1 个大循环，每次大循环结束时测试试件超声波波速和劈拉强度。

2) 复合盐-干湿循环试验：同盐冻试验方法略同，配置相关盐溶液，进行复合盐-干湿循环试验。参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中相关规定^[31]，将浸泡过后的圆饼试件放入收纳箱内，相邻试件间距保持 20 mm，然后倒入配置好的复合盐溶液并没过最上层试件 30 mm，持续浸泡，12 h 后取出试件，自然风干 2 h；风干结束后立即将试件移入烘干机中烘干 8 h，烘干温度设定为 65 °C，烘干结束后取出试件自然冷却 2 h，共计时间为 1 d，每 24 h 为 1 个小循环，每 24 d 为 1 次大循环，共计 216 次循环试验。每次大循环结束后，采集与复合盐-冻融试验相同的数据。试验方案如图 3 所示。

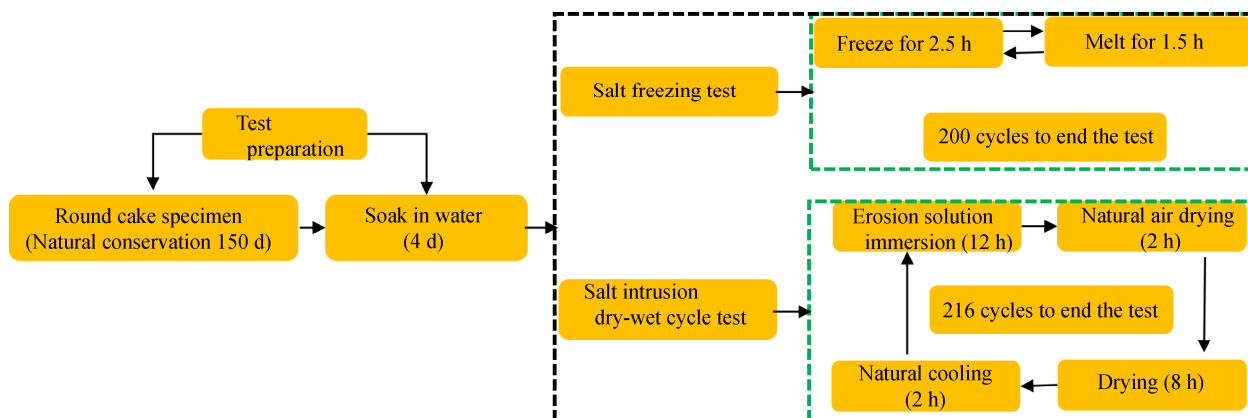


图 3 复合盐-冻融/干湿循环试验方案

Fig. 3 Composite salt freeze-thaw/dry-wet cycle test scheme

1.2.3 超声波速及劈拉强度计算方法 使用 HC-F800 混凝土裂缝缺陷综合测试仪，采用对测法，间距为 50 mm，测试超声波波速。

在 MTS-180-5T 液压伺服材料试验机上进行圆盘劈拉试验，为防止试件加载端附近产生应力集中导致端部首先发生失效(早期平台直接加载)，采用垫条加载方式。为获得完整的荷载-位移曲线，采用位移控制加载^[32]，加载速度为 0.15 mm/s(图 4)。

对于垫条加载方法，可近似假设为均布载荷加载情况，试样沿压缩直径上的拉伸应力分布不是均匀的，与垫条厚度 $2t$ 相关($t=6$ mm)，采用 Tang^[33] 基于平板直接加载的修正公式计算劈拉应力(σ)，如式 1 所示：

$$\sigma = \frac{-2P_c}{\pi DL} \left[1 - \left(\frac{2t}{D} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (1)$$

式中： D 为直径，取 100 mm； L 为厚度，取 50 mm； P_c 为峰值荷载，kN； t 为垫条厚度，mm。

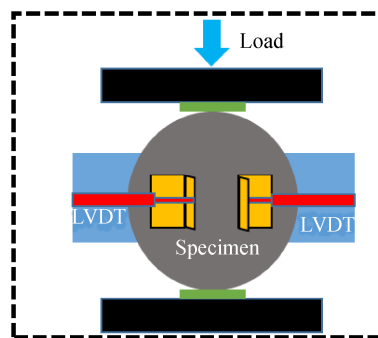


图 4 圆盘劈拉测试

Fig. 4 Disk splitting test

1.2.4 扫描电子显微镜 选取在不同实验条件下的试样破坏残渣，进一步切割打磨成尺寸约为 25 mm×25 mm×10 mm 的样品；确保样品干燥后，采用双面碳导电胶带将其粘在载物台上，进行除尘；随后采用 SBC-12 型离子溅射仪对待测样品进行喷金；最后采用德国生产的台式扫描电子显微镜 (Phenom-XL) 测试微观形态和产物。

2 结果及分析

2.1 室外养护损伤分析

现场试验发现, 露天暴露养护会在水泥浆体表面形成微观裂纹, 虽肉眼可见, 但无法用常规方法测量(图 5a)。根据工程经验, 这些微裂纹会对材料的宏观力学性能产生显著影响, 并且随着应力和环境的影响, 容易诱发宏观裂缝。而产生微裂纹是因为高寒地区温差效应导致试件养护初期内部温度和外表面温度之间差异较大, 当混凝土内部温度较高时, 由于热膨胀, 混凝土内部会产生压应力; 而在夜间温度较低时, 混凝土内部会产生拉应力, 这种反复的温差应力容易导致混凝土产生裂纹。另一方面由于气候干燥, 水分蒸发快, 没有及时补充水分, 导致混凝土表面和内部的水分蒸发不均匀, 容易引

起干燥收缩。本工作采用 MG1081-2 型读数显微镜(放大倍数为 150 倍)和钢尺对养护完成后试件微裂纹进行了观察统计, 以待测复合盐-冻融试件典型裂纹形态为例进行分析。

观察发现微裂纹的实际形貌并非直线或者简单的折线, 而是呈现非常复杂的反复迂回曲折。因此, 在统计裂纹或裂纹网络的特征中, 必须忽略裂纹在较小范围内的曲折度以简化分析, 参考钱鹏^[34]的研究方法, 采用分段直线段来等效替换计算裂纹长度, 具体而言如图 5b 所示, 处理时需要关注的微裂纹的走势“拐点”, 即 A、B 2 点。当拐点前后的裂纹直线段夹角大于 45° 时, 需要分段直线化替代实际裂纹, 而当夹角小于 45° 时, 只需按裂纹直线化走向至下个“拐点”即可。裂纹宽度每隔 5 mm, 使用所述显微镜测量 1 次。

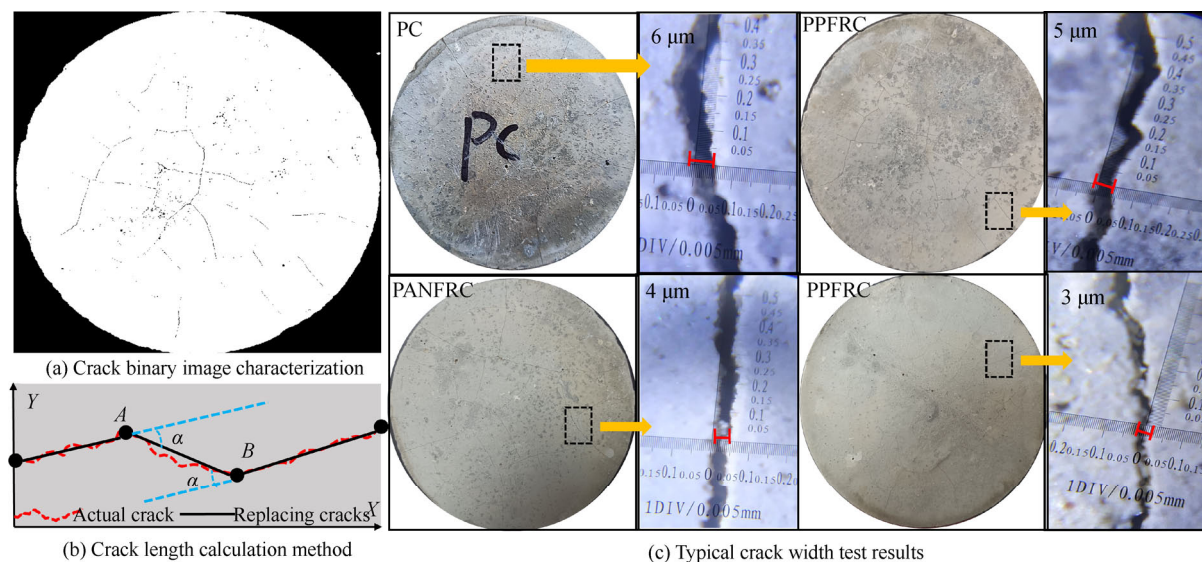


图 5 待测复合盐-冻融试件裂纹测量

Fig. 5 Crack measurement of composite salt-freeze-thaw specimens to be tested

对养护完成后的试件进行统计发现, 在所述 2 个时间段内养护 150 d 后, 试件表面均有微裂纹出现, 无论是待冻融还是干湿循环的试件, 素混凝土的裂纹宽度及长度情况均是最差的。从每组未进行复合盐-冻融的纤维混凝土试件中各取出 3 个试件进行研究分析, 发现素混凝土裂缝宽度在 $6\sim 15\ \mu\text{m}$ 之间, 长度最大可达到 20 mm, 且裂纹多以单条出现; PPFR 与 PANRC 相差不大, 裂缝宽度集中在 $5\sim 12\ \mu\text{m}$ 之间, 最大长度为 15 mm, 部分裂纹呈网状分布; PEFRC 的情况最好, 宽度小于 $10\ \mu\text{m}$, 最大长度在 10 mm 左右, 且各裂纹之间互相连通, 形成环形网状结构。本工作所采用的 3 种纤维均能提高混凝土早期抗裂作用, 其中 PEF 自身的弹性模

量和抗拉强度较优, 拌合过程中分散均匀, 因此在抵抗温度应力时产生较强优势, 抗裂效果好。

一般来说混凝土养护期主要发生收缩裂纹, 在平原地区这种裂纹受材料表面湿度和外界空气湿度影响会在一定程度上自然愈合, 因而相当于裂纹从未产生。但在高寒地区混凝土产生的裂纹损伤如不进行特殊处理, 不仅不会愈合而且会持续扩展。对测试得到的裂纹长度和裂纹宽度数据进一步处理得到有效裂纹宽度和有效裂纹长度, 其中有效裂纹宽度参考段明翰等^[35]提出的方法进行计算, 即对顺裂纹方向等间距测量后的结果求取平均值。有效裂纹长度获取通过上述方法将每条裂纹的长度进行累加得到。此外, 通过有效裂纹宽度和有效裂纹长度,

计算等效裂纹面积和裂缝面积降低系数, 计算方法如式(2)和式(3), 进而评价纤维对混凝土的环境损伤抑制作用。

$$S = W \times l \quad (2)$$

$$k = S_{\text{FRC}} / S_{\text{PC}} \quad (3)$$

式中: S 为等效裂纹面积, mm^2 ; S_{FRC} 为纤维混凝土的等效裂纹面积, mm^2 ; S_{PC} 为素混凝土的等效裂纹面积, mm^2 ; W 为等效裂纹宽度, μm ; l 为等效裂纹长度, mm ; k 为裂缝面积降低系数。

表 4 为各组试件平均化后每个试件的有效裂纹宽度、有效裂纹长度、有效裂纹面积和裂缝面积降低系数统计值。进一步可知纤维混凝土相较于素混凝土有较好的抵抗裂纹损伤能力, 其中 PEFRC 裂缝面积降低系数最小, 抗裂效果可提高 0.5 倍以上, PPFRC 和 PANFRC 抗裂效果效果可提升 0.3 倍左右。因而可以得知, 纤维的桥接作用对于减少混凝土在高寒环境下的收缩开裂情况也具有较大作用, 可减少服役期受到的冻害。

表 4 平均化后每个试件的裂纹信息统计

Table 4 Statistical information of crack statistics was collected after averaging

Samples	Equivalent crack width/ μm	Equivalent crack length/ mm	Equivalent crack area/ mm^2	Fracture area reduction coefficient
PC	10.8	110	1.118	1.000
PPFRC	8.7	95	0.827	0.740
PANFRC	8.5	92	0.782	0.699
PEFRC	6.4	79	0.506	0.453

2.2 复合盐-冻融/干湿循环下纤维混凝土劣化性能

2.2.1 初始损伤裂纹的演化与劈拉形态 图 6a 为复合盐冻融和干湿循环作用下纤维混凝土初始损伤裂纹的演化形态, 在盐冻循环中, 裂纹扩展形态明显, 由于受到侵蚀和冻融的双重作用, 纤维有裸露情况出现, 且相对于素混凝土的平直形状, 纤维混凝土裂缝曲折度较为明显。盐冻循环结束时, 素混凝土的最大裂缝可扩展至 $30 \mu\text{m}$ 左右, 而最优组 PEFRC 最大裂缝在 $18 \mu\text{m}$ 左右, 可见纤维混凝土在盐冻损伤过程中抑制表面裂纹扩展具有显著作用。而在复合盐-干湿循环作用下, 裂纹扩展速率较低一些, 且裂纹之间的纤维裸露也较少, 不管是素混凝土还是纤维混凝土的裂纹宽度都低于冻融循环损伤情况, 这是因为裂纹受到了自愈合的影响, 但混凝土的耐久性仍然是降低的。

图 6b 为复合盐-冻融/干湿循环作用下纤维混凝土在劈拉荷载作用下的损伤形态。由图 6b 可见, 素混凝土在这一过程中破坏形态相似, 极限荷载时, 裂缝出现在试件中部, 呈“1”字形贯穿形态^[36]。而纤维混凝土在干湿循环作用下除了中心处的主裂缝外, 其周围附带有部分竖向的微小裂缝, 基本和未受到耐久性损伤初始状况时的形态类似。复合盐-冻融作用下, 纤维混凝土试件破坏形态会随着试验次数的增加而逐渐向素混凝土破坏形态发展, 这说明纤维提升耐久性损伤是有一定限度的。总体来看, 掺入 PPF、PANF 及 PEF 纤维的混凝土试件破坏时表面平整, 碎块较少, 其中 PEF 的阻裂增韧效果更

显著, 对混凝土的劈拉破坏具有延缓作用, 试件表面裂缝间有较多的连接块体。与素混凝土相比, 纤维混凝土试件破坏断面主要为粗骨料切断状态, 砂浆基体与粗骨料的黏结界面出现小部分断裂, 而素混凝土则较多。

2.2.2 超声波波速 图 7a 为养护 150 d 的纤维混凝土超声波波速结果, 待测复合盐-冻融试件波速值均低于待测复合盐-干湿循环试件, 结合 2 批试件的养护时间, 可知当混凝土经历冻害时间更长且更早时, 气温回升之后, 并不能改善波速变化, 密实性相对会稍差一些, 受到的早期环境损伤更多一些, 且这种损伤不可逆。图 7b 为复合盐-冻融作用下纤维混凝土的超声波波速, 随循环次数增加, 超声波波速逐渐减小, 试件内部损伤增加, 内部孔隙率增加, 密实性在降低。4 组试件超声波波速均在 25 次循环后开始快速下降; 200 次循环后, PC、PPFRC、PANFRC 及 PEFRC 的超声波波速相对于初始时分别下降 36.50%、33.84%、34.85% 和 29.36%, 对于复合盐-冻融循环劣化, 纤维混凝土从早中期就开始发挥作用。PEFRC 总体上损伤最小, PANFRC 和 PPFRC 差距不大, 但损伤大于 PEFRC, 而 PC 的内部损伤最大。这是因为 PEF 相比于 PANF、PPF, 在拌合过程中易于分散, 结团效应较低, 可以更均匀的分布在混凝土中, 从而对于孔隙的发育和裂缝的发展抑制能力相对较强。图 7c 为复合盐-干湿循环作用下纤维混凝土的超声波波速。可以发现 48 次干湿循环前, 波速损失比较稳

定, 均在 4% 以内; 48~168 次干湿循环之间, 波速损失有所增加, 168 次干湿循环后, 纤维混凝土波速损失值在 13% 以内, 而素混凝土波速损失值大于 13%; 168 次干湿循环开始, 各组试件波速开始急剧下降, 表明这一阶段开始大量孔洞和裂缝扩展, 导致混凝土密实程度急剧下降, 216 次干湿循环

后, 超声波波速相对于初始时分别下降 32.08%、22.06%、16.70% 和 16.05%, 可见素混凝土在干湿循环后期劣化速率远大于纤维混凝土, 这也说明纤维混凝土抵抗干湿循环劣化作用也主要在大后期。因此, 综合 2 种劣化试验超声波结果来看, PEFRC 具有较为明显的延缓耐久性攻击作用。

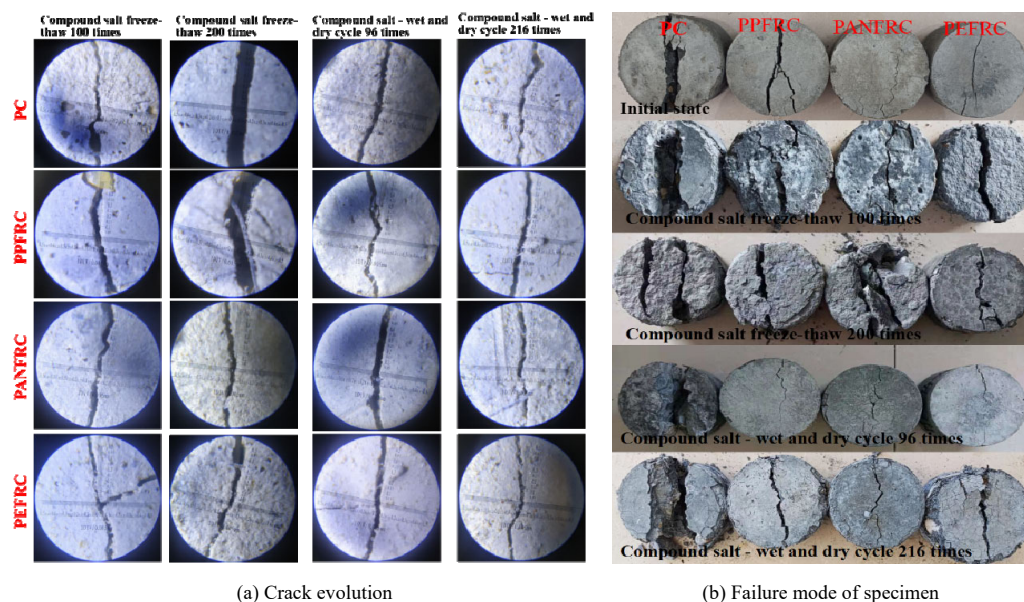


图 6 裂纹损伤的演化及劈拉形态

Fig. 6 Evolution of crack damage and splitting tensile morpholog

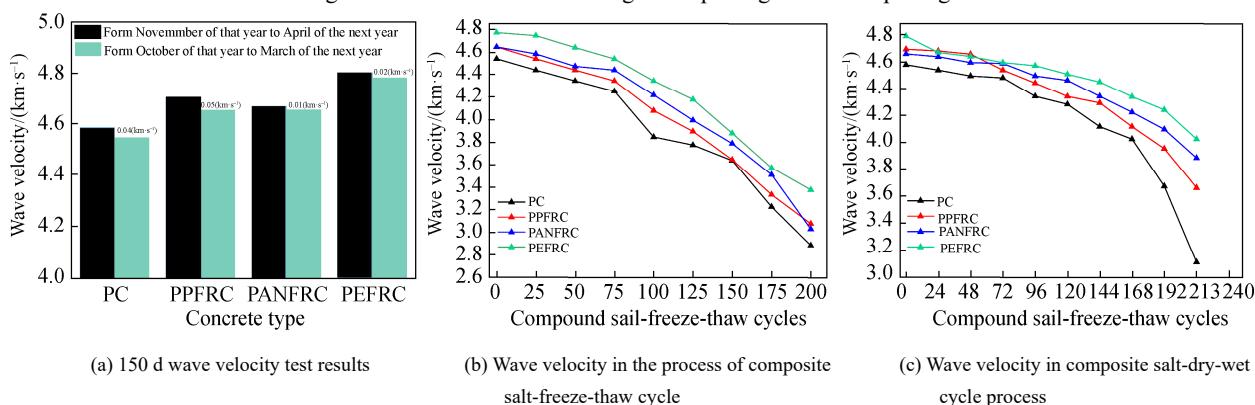


图 7 超声波波速结果分析图

Fig. 7 Analysis diagram of ultrasonic wave velocity results

2.2.3 劈拉强度 图 8a 为养护 150 d 的纤维混凝土劈拉强度, 和超声波波速的规律一致, 待测复合盐-冻融试件劈拉强度均低于待测复合盐-干湿循环试件结果, 除 PANFRC, 其余 2 组均达 0.51 MPa 以上, 素混凝土为 0.69 MPa。因此, 当试件经历的冻害时间更长且较早时, 受到的初始损伤更多。此外, 反映出纤维混凝土比素混凝土有更好的环境损伤抑制作用。

图 8b 为盐冻作用下不同类型纤维混凝土的劈

拉强度分布特征。结合图 8a 和图 8b, 虽然 150 d 时 PEFRC 的劈拉强度强度并不显著, 但在抵抗复合盐-冻融劣化速率却表现出了较强的优势。同样, 25 次循环后劈拉强度开始快速下降, 在 200 次循环后, PC、PPFRC、PANFRC 及 PEFRC 的劈拉强度分别损失 63.12%、54.55%、53.99% 和 43.80%, 和超声波波速的变化规律一致。图 8c 为干湿循环作用下不同类型纤维混凝土的劈拉强度分布特征, 可知基本与超声波波速变化规律一致, 在 0~48 次干湿循环

之间,劈拉强度损失较小,48~168次干湿循环时,劈拉强度损失率有所增大,168次干湿循环时,劈拉强度损失显著,216次干湿循环时,素混凝土劈拉强度损失接近58.08%,PPFRC与PANFRC值为

49.43%和46.70%,PEFRC劈拉强度损失值最小,为37.19%。总体来看,宏观力学变化规律与无损检测指标具有一致性,因此可通过超声波波速来选择适用的混凝土类型以及判断耐久性劣化程度。

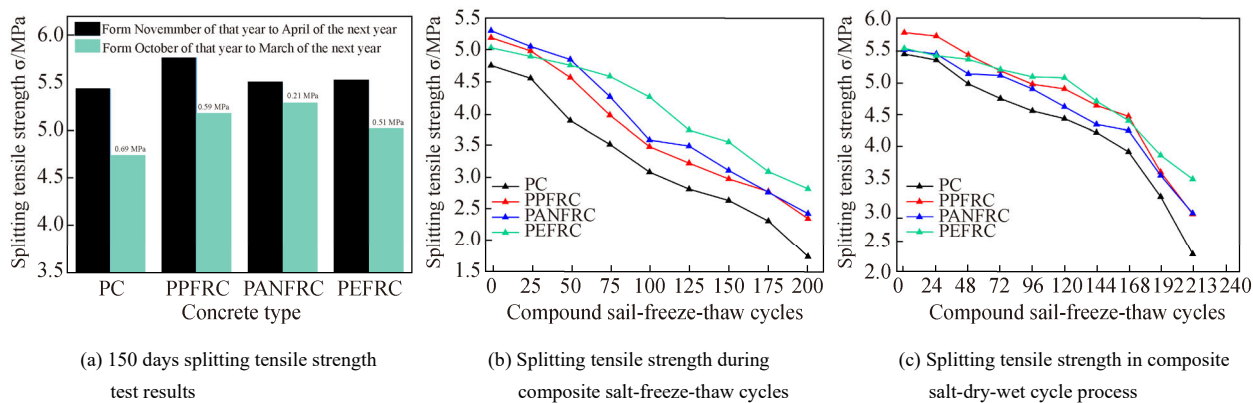


图8 劈拉强度结果分析图

Fig. 8 Analysis chart of splitting tensile strength results

2.3 混凝土劣化机理与纤维强化作用

通过对复合盐-冻融/干湿循环试验结束后的大量试件残渣进行扫描电子显微镜分析,发现主要存在以下几种类型的产物(图9):

1) 少量水化产物 C-S-H, 大量板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及片状水镁石 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 以及 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 晶体和 NaCl 晶体。

2) 膨胀型产物石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 膨胀开裂型

产物碳硫硅酸钙 $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、针状和片状产物钙矾石(Aft), 其中冻融循环下的片状 Aft 较少, 针状 Aft 较多, 这是因为干湿循环过程中高温导致导致针状 Aft 转化为片状 Aft 较为完全导致; 此外, 发现有镁橄榄石(Mg_2SiO_4)存在, 这是 MgSO_4 与水泥中的钙硅酸盐反应导致。

3) 大量絮状产物 Friedel 盐, 无水 CaCl_2 和 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 混合物, 均成晶体, 具有吸湿性。

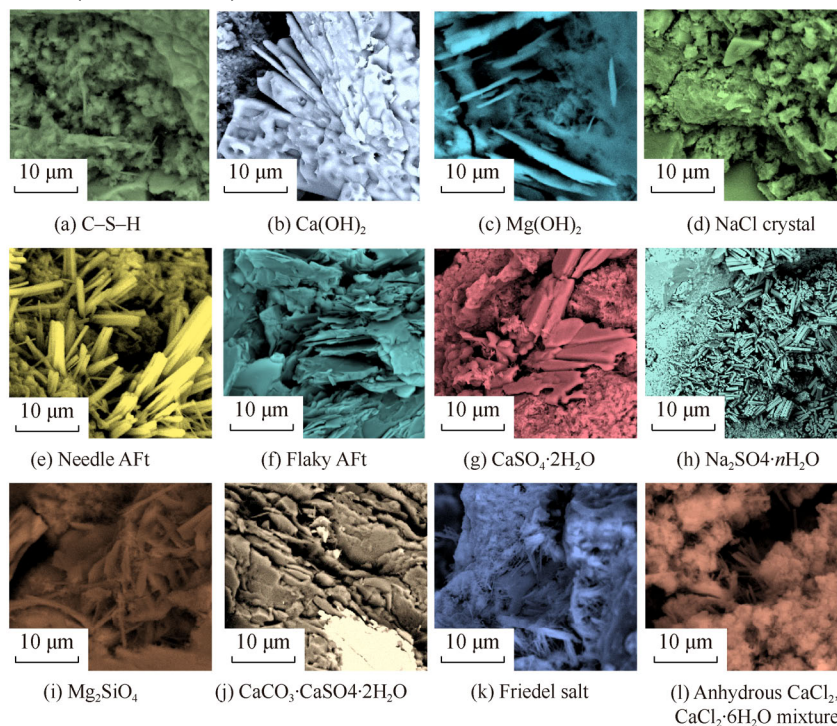


图9 复合盐-冻融/干湿循环下的微观形貌

Fig. 9 Micro-morphology of composite salt-freeze-thaw/dry-wet cycles

2.3.1 复合盐-冻融损伤机理 复合盐-冻融损伤过程复杂多变, 且随着时间推移, 其破坏力会显著加剧。

从化学角度来看: 在初期阶段, 硫酸盐的介入会降低混凝土孔隙中溶液的冰点, 而氯盐影响很小, 由于水泥的二次水化生成大量板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及片状水镁石 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 以及部分 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 晶体和 NaCl 晶体, 所以损伤很小^[37], 试件质量有可能增加, 因此试验初期混凝土的破坏应是冻融循环破坏为主。随着循环次数的增加, Cl^- 、 SO_4^{2-} 与水化产物反应, 形成的结晶产物和大量盐垢会增加混凝土孔隙的饱和水平, 开始对混凝土内部产生损害, 此时冻融循环加速了盐离子在混凝土内部孔隙及裂纹通道中的渗透速率, 虽然盐垢本身不会引起混凝土结构破坏, 但会促进有害物质的扩散, 复合盐开

始发生负面作用, 当盐溶液在混凝土表面冻结时, 形成的冰/混凝土复合材料会在温度低于盐溶液熔点时收缩。由于冰层的收缩率比底部混凝土的收缩率高约 5 倍^[38](应力差^[39]), 这种不均匀的收缩会在冰层中产生拉伸应力, 导致混凝土表面裂纹扩大和联通。在已有裂纹的基础上, 试件会出现表面剥落损伤和内部损伤, 具体损伤过程如图 10 所示。在中后期, 伴随混凝土内部孔隙和裂缝增加, SO_4^{2-} 和 Cl^- 的扩散途径越来越多, 使得膨胀型产物 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 及 AFt 越来越多, 这一阶段混凝土各成分之间发生大量化学反应; 由于 Cl^- 溶液具有吸湿性, 能够引导试件内部水分将向盐溶液迁移, 大量低溶性絮状 Friedel 盐、无水 CaCl_2 和 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 混合物大量聚合, 这些均属于晶体, 可引起裂缝持续扩张。

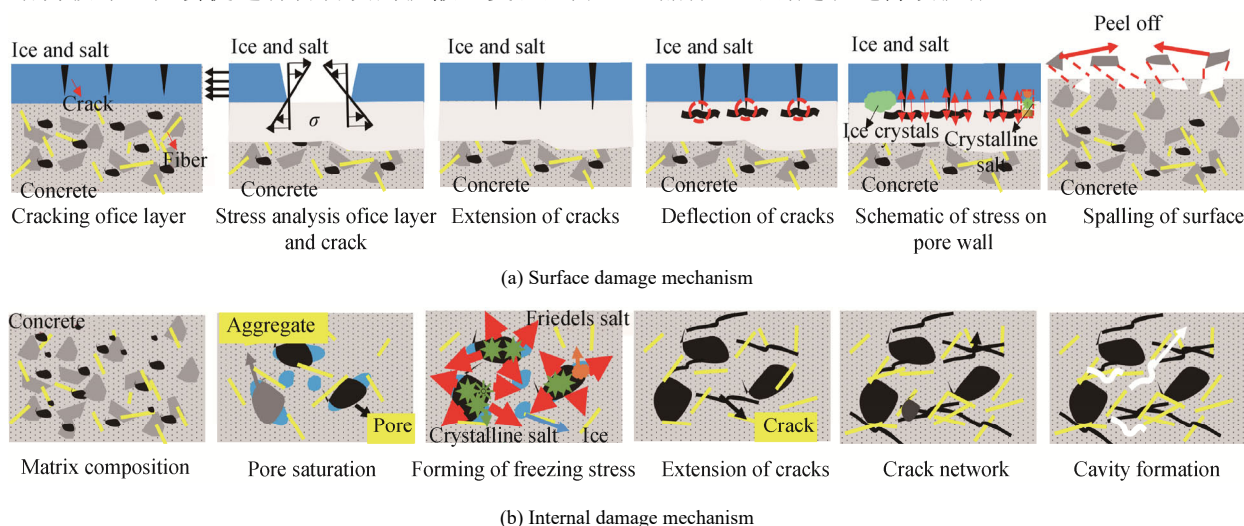


图 10 复合盐-冻融过程中纤维混凝土表面损伤和内部损伤作用机制

Fig. 10 Mechanism of surface damage and internal damage during salt freezing process

由物理角度来看: 复合盐-冻融循环过程中, 由于渗透压作用, 盐溶液中的 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 将持续向混凝土内部迁移, 以达到物质间的动态平衡, 且随着盐溶液质量分数增加, 这种迁移现象变得更加明显, 但无论物质如何迁移, 与盐溶液接触的混凝土表层的饱水度始终是最高的。在冻融循环条件下, 混凝土内部产生“泵吸作用”远大于盐溶液的吸湿、渗透压和毛细管吸水等作用^[40-41], 因而将驱使试件周围的盐溶液加速进入其内部, 导致其饱水度和随时间增长的速率远大于常温下的值^[42]。在整个冻融循环过程中, 以上现象均存在, 由于 SO_4^{2-} 与 Cl^- 对混凝土造成腐蚀的影响能力不同, 在试验初期, 较少一部分 SO_4^{2-} 渗透到混凝土中, 首先与水化产物 C-S-H 反应, 产生膨胀产物, 填充孔隙, 可起改善混

凝土的微观结构作用, 降低了混凝土孔隙溶液的冰点, 减少冻害^[43]。而随着盐冻循环周期增加, Cl^- 腐蚀作用也越来越明显, 大量的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 侵入混凝土, 容易产生结晶压力, 而过大的结晶压力则会导致混凝土的微观开裂, 从而增加大孔和连通孔, 且这一阶段的裂缝一般难以闭合, 使得混凝土应变不可逆, 会产生残余应变, 由于冻结过程结晶压造成的损伤量比融解过程溶解减压造成的损伤量大, 损伤不断累积、残余应变会越来越大, 残余应变的累积在宏观上表现为力学性能的下降。 SO_4^{2-} 侵蚀作用主要对混凝土基体, 尤其是界面处的混凝土基体产生破坏^[44]。

综上所述, 在冻融循环和复合盐侵蚀双因素作用下, 渗透压导致盐离子的侵入增大了混凝土孔隙溶液饱和度, 同时孔隙溶液饱和度的增大加快了冻

融循环的结晶压损伤,进而发生应力损伤引起了混凝土内部裂纹的萌生和扩展,以及伴随大量化学膨胀型产物的生成,最后造成混凝土发生表面剥落损伤和内部损伤。

2.3.2 复合盐–干湿循环损伤机理 复合盐–干湿循环作用下,主要发生盐的腐蚀损伤和干湿循环作用产生的膨胀收缩损伤,此过程所造成的湿度交替变化会对混凝土的水化行为、离子迁出、物相转变以及孔隙结构等产生综合影响^[14]。腐蚀损伤主要指硫酸盐和氯盐晶体溶解、沉淀和沉淀物累积膨胀并导致混凝土开裂损伤破坏,具体为:进入湿润阶段后,水压力会使盐溶液从混凝土试件表面向内部逐渐扩散,产生膨胀性产物 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 及 AFt 等;在干燥过程中,进入混凝土毛细孔的盐溶液中的水分不断蒸发而过饱和,膨胀型产物失水蒸发,并生成结晶产物等等,以及盐的结晶一并产生较大的结晶压力,使混凝土表层的孔隙粗化,并在反复的干燥过程中形成微裂缝;从而在这种干湿交替作用下产生叠加损伤^[45],腐蚀深度逐渐加深,混凝土的密实度和韧性降低,最终随循环累加发生疲劳破坏。复合盐–干湿循环作用下微观产物转化主要可分为 3 个阶段^[46]:1) 多形成石膏及钙矾石,晶粒细小且分布较为均匀,主要分布在层状 C–S–H 之间;2) C–S–H 分解阶段,腐蚀离子向混凝土内扩散,在反应前区消耗氢氧化钙、石膏及钙矾石,而新生成的石膏及钙矾石则较少,此外大量结晶盐及其与水化产物反应后的产物开始大量生成,这一阶段混凝土内部裂缝发展迅速;3) C–S–H 与 Mg^{2+} 反应生成 M–S–H 及镁橄榄石阶段,这一阶段混凝土内部缝会与原来养护造成的表面裂纹联通,总体形成龟裂。

2.3.3 劈拉损伤作用下纤维强化机制 高寒地区,低温季节混凝土浇筑后,水分结冰速率提高,导致水泥水化反应速率显著下降,而混凝土水化反应生成水化产物过程释放热量,本应促进混凝土硬化和强度增长。遇到低温环境,水泥颗粒与水混合结冰后,阻止了水泥颗粒的进一步水化,导致水化反应缓慢,影响混凝土的凝结与硬化过程。这一过程生成许多原始孔隙和微裂缝,形成所谓的初始损伤,会降低混凝土的力学性能和耐久性。当加入小直径且黏结效果良好的纤维时,水泥基体的孔洞会有所填充、孔径有所细化,优化孔隙结构,因此在盐冻过程中可以收缩盐离子的扩散通道,减少侵蚀产物,降低裂缝周边的膨胀应力。在劈拉载荷下,

纤维依靠自身较高的抗拉强度、应力–应变比和极限延伸率等特性,改善混凝土基体裂缝扩展能力,从而达到提升混凝土的长期服役性能目的。本工作所用纤维主要在混凝土中起到阻裂和增韧作用。

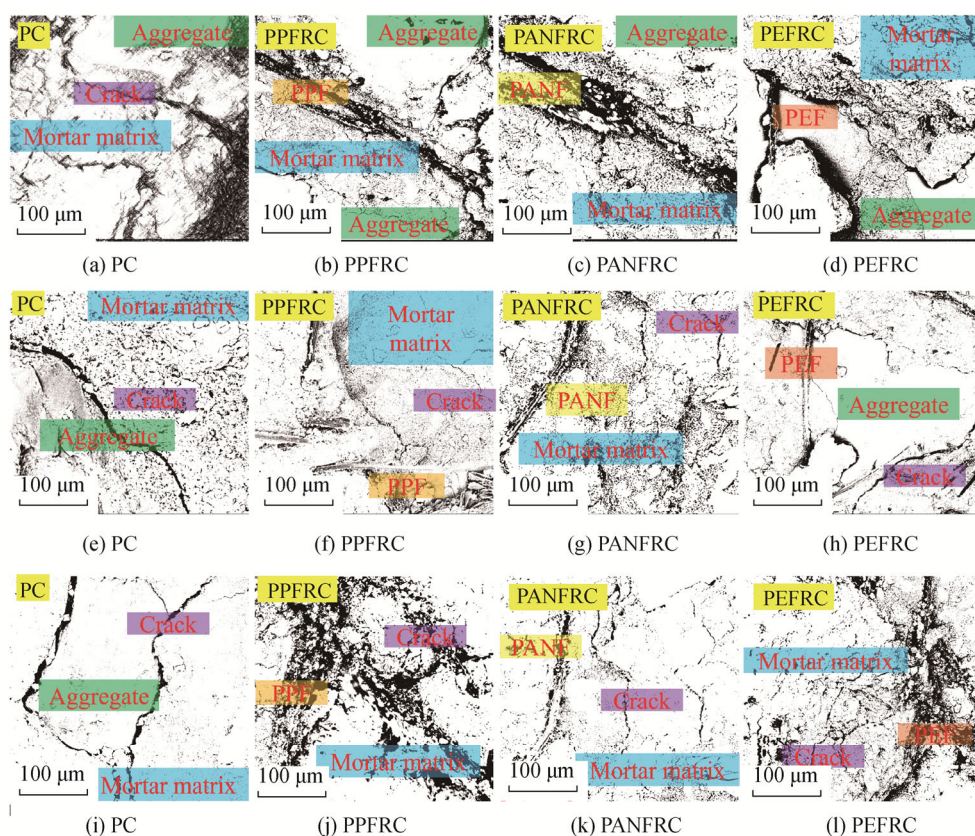
当混凝土受到耐久性损伤时,试件原有裂纹逐渐向试样中部和内部发育,最终部分会与试件内部的裂隙联通,纤维则锚固裂纹两边的砂浆基体,横跨裂纹的纤维则会承受拉应力,改变裂缝扩展方向,加强能量传递,改善混凝土内部抗拉强度,缓解裂缝扩展^[20]。在劈拉载荷作用下,裂缝扩展过程中,裂缝如遇纤维分布较多且均匀的部位,则扩展路径大体沿试件薄弱处扩展,因此形成的破坏裂缝具有较高的曲折度,但随复合盐–冻融/干湿循环试验周期的增加,裂缝曲折效应降低。PANF 和 PEF 混凝土的裂缝表现为弯曲状,由于 PPF 纤维由于抗拉强度和弹性模量稍小,能够吸收的能量相对较少,因此对裂缝扩展的抑制作用不如这二者,所以裂缝扩展形态略有差异(图 6)。

基于能量耗散原理分析,试件劈拉破坏做功分为基体开裂耗能、纤维与基体脱粘耗能及纤维断裂耗能 3 部分。由于纤维、砂浆基体和骨料弹性模量的差异性,当基体裂纹扩展至纤维处,砂浆基体中裂缝扩展的表面能(基体开初始开裂耗能)会通过基体与裂缝的接触部分传递至纤维,此时做功主要为二者之间的脱粘耗能。当砂浆基体即将发生断裂破坏时,裂缝横穿过纤维,基体承担耗能能力已经很小,能量绝大数转移至纤维,纤维以应变突变的方式消耗能量^[23],再次阻止裂缝扩展。在整个受力过程中,纤维被不断拉拔,最后拔出或拉断,其与水泥基体的黏附面积不断减小,纤维自身所能提供的抗拉强度与桥接作用不断衰减,主裂缝急剧扩展贯穿试件,表现裂缝开度迅速增大。因此,劈拉受力过程中纤维主要通过能量传递的方式在混凝土中起到阻裂增韧作用。

对破坏后的试件残渣进行扫描电子显微镜分析(图 11),可以清楚的发现未受到任何一种耐久性损伤时,素混凝土内部孔隙及微小裂隙明显较多,骨料与水泥基体之间的界面过渡区存在明显裂纹,加入纤维后这一情况明显改善,表明纤维可以改善高寒环境对混凝土的损伤,其中 PEFRC 较优,纤维在界面过渡区发挥较强的作用。素混凝土在受到 2 种耐久性损伤后,内部界面过渡区裂纹明显扩大,水化产物结构酥松,不同于远处的浆体微观结构,含有大量孔隙。而纤维混凝土在

复合盐-冻融情况下结构更差,在 2 种试验模式下均可明显的观察到纤维网络。当受到耐久性攻击时,混凝土原始孔隙为腐蚀产物提供贮存空间,随着试验次数增加,孔隙贯穿为微小裂缝,又为盐离子传输提供通道,并向浆体扩散,进一步发生腐蚀作用,而当孔隙增大至一定程度时,腐蚀离子与水化产物接触面积进一步增加,则会加快腐蚀反应速率,增加混凝土整体耐久性损伤。因

而,可以明确 3 种纤维 PPF、PANF 和 PEF 良好的抗拉强度和弹性模量,首先抑制了养护过程的微裂纹过量产生;其次在复合盐-冻融/干湿循环作用下,又能一定程度上抑制由于渗透压力和结晶压力导致的膨胀开裂;再次在劈拉载荷情况下可通过能量传递形式抑制宏观开裂,进而提高劈拉强度。其中,PEF 纤维可以进一步推广使用,PPF 和 PANF 效果差不多,可视具体情况而定。



Note: (a)~(d) are initial condition; (e)~(h) are dry-wet cycle of composite salt; (i)~(l) are freeze-thaw cycle of composite salt

图 11 纤维混凝土内部细观损伤

Fig. 11 Microscopic damage in fiber reinforced concrete

3 盐-冻融/干湿循环下纤维混凝土劈拉损伤衰减模型

3.1 基本方程

自然界一切物质均会不断的走向衰亡,对于混凝土结构性能的衰变,这一过程就是“老化”^[47]。当物质处于开放系统中,与外界发生能量和物质的交换,物质衰变将由于某种激发因子而加速衰变,复合盐-冻融循环、复合盐-干湿循环均是激发混凝土加速老化的不利因子。通过数学模型准确把控这一过程,对于了解结构的使用寿命具有重要意义。一般,对于在役的结构,当以不破坏结构为前提,优

先通过无损测试手段来推测其力学性能。本工作以复合盐-冻融/干湿循环两种特殊劣化环境下的超声波波速损伤量[式(4)和式(5)]为自变量,以劈拉强度的相对值为因变量,建立如下损伤衰减模型:

$$D_v = \frac{v_0 - v_N}{v_0} = 1 - \frac{v_N}{v_0} \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{1 + aD_v^b} \quad (5)$$

式中: R 为劈拉强度的相对值; D_v 为波速损伤量; v_N 为不同循环次数下的波速, km/s; v_0 为初始波速, km/s; a , b 为拟合参数,采用 Matlab 软件拟合得到。

3.2 模型结果分析

图 12 为不同类型纤维增强混凝土相对劈拉强度与波速损伤量的关系,表 5 为损伤衰减模型参数。由图 12 可知,在复合盐-冻融/干湿循环作用下,随波速损伤量的增加,相对劈拉强度均呈凹形下降趋势,但前者作用下趋势更为明显。在

复合盐-冻融中,所建立的模型可以准确预测损伤量在 0~0.35 范围内的劈拉性能衰减程度;在复合盐-干湿循环作用下,纤维混凝土在 0~0.25 范围内有良好的预测性能,对于损伤量更大的素混凝土试件,则可以预测到 0~0.35 范围的结果,以上模型的相关系数均大于 0.95。

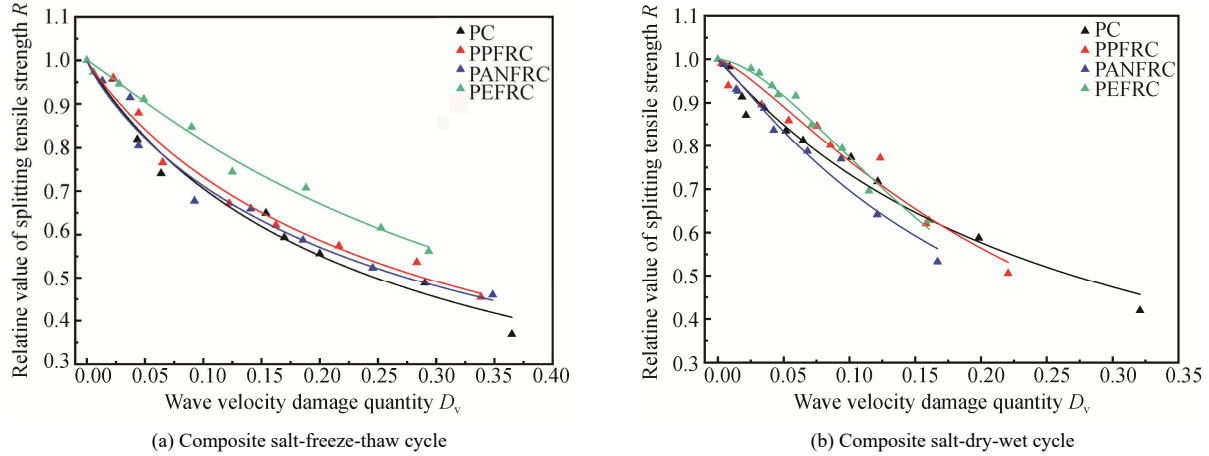


图 12 损伤衰减模型
Fig. 12 Damage attenuation model

3.3 模型适用验证

同时对标准养护条件下的 PANFRC 及 PEFRC 2 组进行了 200 次复合盐-冻融循环试验,不同的是验证试验采用的是 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,每组共计 6 个试件。整理得到波速和劈拉强度,通过式(6)计算得到的劈拉强度相对值和试验值如表 6 所示。

对比预测结果可以发现, PANFRC 组 200 次循环下的劈拉强度相对值预测结果误差在 1.74%~6.12%, PEFRC 组预测结果误差在 1.15%~3.12%之间,说明模型有一定的适用性。同时,由于标准养护可认为无初始损伤影响,从结果来看,验证试验中 200 次循环的波速损伤量接近自然养护下循环 175 次的波速损伤量。

表 5 拟合参数取值
Table 5 Fitting parameter values

Specimen types	Composite salt-freeze-thaw cycle			Composite salt-dry-wet cycle		
	a	b	Correlation coefficient	a	b	Correlation coefficient
PC	3.8365	0.9644	0.9731	3.8084	1.0225	0.9684
PPFRC	3.2451	0.9493	0.9788	6.5573	1.3283	0.9521
PANFRC	3.1727	0.8948	0.9726	5.8358	1.1271	0.9675
PETFRC	2.9090	1.1071	0.9887	13.6697	1.6697	0.9802

a and b are fitting parameters of formula (6).

表 6 模型适用性分析
Table 6 Model applicability analysis

Specimen types	Experimental value	Predictedvalue	Relative error/%
PANFRC	0.4914–0.5291	0.5199–0.5215	1.74–6.12
PEFRC	0.5017–0.5167	0.5174–0.5226	1.15–3.12

4 结论

在工程现场暴露养护情况下,研究了养护环境对纤维混凝土造成的微裂纹损伤,以及在复合盐-冻融/干湿循环 2 种试验模式下纤维混凝土的耐久

性能及微观损伤机理,主要结论如下:

1) 冬春交替养护 150 d 后,素混凝土出现较多单条裂纹,宽度多在 6~15 μm 之间,长度最大可达到 20 mm;早期抗裂性能最优的 PEFRC 组情况最好,宽度小于 10 μm,最大长度在 10 mm 左右,且

各裂纹之间互相连通, 形成环形网状结构。

2) 复合盐-冻融/干湿循环作用下, 混凝土表面裂纹与内部形成的裂缝逐渐联通造成波速和劈拉强度下降, 其中 PEFRC 抗劣化能力最强, 达到试验设定循环次数时波速分别损失 29.36%和 16.05%, 劈拉强度分别损失 43.80%和 37.19%。

3) 复合盐-冻融作用下, 混凝土孔隙溶液饱和度增大, 结晶压作用、应力作用及化学膨胀产物共同导致混凝土内部裂纹的萌生和扩展, 造成表面损伤和内部损伤; 复合盐-干湿循环过程中, 湿状态下水压力使盐溶液从混凝土表面向内部逐渐扩散, 产生膨胀性产物, 干状态下溶液受热蒸发, 温度作用使可溶性盐发生结晶压力, 干湿交替作用产生叠加损伤, 混凝土密实度、韧性降低。

4) 劈拉受力过程中纤维通过能量传递的方式在混凝土中发挥桥联-阻裂-增韧作用; 由于耐久性劣化导致界面过渡区裂纹扩大, 而纤维可以网络桥接形式减小拉应力, 改善界面过渡区处的裂纹扩展能力, 进而延缓整体损伤。

5) 基于物质衰变理论建立了以超声波波速损伤量为自变量, 劈拉强度相对值为因变量的损伤衰减模型, 相关系数均在 0.95 以上, 可以较好的反应复合盐-冻融/干湿循环状态下的纤维混凝土劈拉强度衰减规律, 对于预测混凝土结构的抗拉性能有较大意义。

参考文献:

- [1] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 在盐湖环境中高强与高性能混凝土的抗冻性[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(7): 842-848.
YU Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui, et al. J Chin Ceram Soc, 2004, 32(7): 842-848.
- [2] 朱绘美, 宋强, 张军. 盐卤-干湿循环耦合作用下纳米偏高岭土改性混凝土的性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(2): 237-245.
ZHU Huimei, SONG Qiang, ZHANG Jun. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(2): 237-245.
- [3] 覃源, 关科, 马颖彪, 等. 硫酸盐干湿循环下纤维混凝土的耐久性及其寿命[J]. 水力发电学报, 2021, 40(9): 141-150.
QIN Yuan, GUAN Ke, MA Yingbiao, et al. J Hydroelectr Eng, 2021, 40(9): 141-150.
- [4] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(4): 371-380.
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. J Zhejiang Univ Eng Sci, 2002, 36(4): 371-380.
- [5] 李曦彤. 复合盐侵蚀下玄武岩纤维混凝土耐久性研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
LI Xitong. Study on durability of basalt fiber reinforced concrete under compound salt erosion [D]. Ala'er: Tarim University, 2022.
- [6] 武海荣, 金伟良, 张锋剑, 等. 关注环境作用的混凝土冻融损伤特性研究进展[J]. 土木工程学报, 2018, 51(8): 37-46.
WU Hairong, JIN Weiliang, ZHANG Fengjian, et al. China Civ Eng J, 2018, 51(8): 37-46.
- [7] 姜磊, 牛荻涛. 硫酸盐与冻融环境下混凝土本构关系研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(3): 71-78.
JIANG Lei, NIU Ditao. J Sichuan Univ Eng Sci Ed, 2016, 48(3): 71-78.
- [8] 王成, 李曦彤, 葛广华, 等. 复合盐侵蚀-干湿耦合作用下玄武岩纤维混凝土腐蚀劣化试验[J]. 复合材料科学与工程, 2023(2): 75-83.
WANG Cheng, LI Xitong, GE Guanghua, et al. Compos Sci Eng, 2023(2): 75-83.
- [9] LONG X, TAN Y, WAN X M, et al. Effect of freeze-thaw cycles and chloride salt erosion coupling conditions on fatigue properties of PE-ECC[J]. Case Stud Constr Mater, 2024, 20: e02726.
- [10] 甘磊, 冯先伟, 沈振中, 等. 盐冻交替作用下混凝土强度与细观孔结构关系[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(12): 4860-4869.
GAN Lei, FENG Xianwei, SHEN Zhenzhong, et al. J Cent South Univ Sci Technol, 2023, 54(12): 4860-4869.
- [11] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏-机理、材料设计与防治措施[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [12] PUHRINGER J. Deterioration of materials by hydraulic pressure in salt water systems an outline model[C]//8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin, proceedings. 1996: 545-556.
- [13] 高志浩, 王玲, 王振地, 等. 基于数字图像处理的单面盐冻轻骨料混凝土孔隙和微裂纹定量分析[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 1908-1919.
GAO Zhihao, WANG Ling, WANG Zhendi, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(8): 1908-1919.
- [14] 王成, 田青, 张苗, 等. 干湿循环对混凝土性能的影响研究综述[J]. 材料导报, 2023, 37(增刊 2): 208-217.
WANG Cheng, TIAN Qing, ZHANG Miao, et al. Mater Rep, 2023, 37(Suppl 2): 208-217.
- [15] 张凯, 蔡海兵, 李晓芳, 等. 干湿循环机制下类岩-HDSC 组合体的氯盐单向侵蚀试验及机理研究[J]. 混凝土, 2024(1): 50-55.
ZHANG Kai, CAI Haibing, LI Xiaofang, et al. Concrete, 2024(1): 50-55.
- [16] QIN Y, LI Y, ZHANG X W, et al. Constitutive model of polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete under uniaxial compression and index conversion of mechanical properties[J]. Constr Build Mater, 2022, 347: 128508.
- [17] DUAN M H, QIN Y, LI Y, et al. Mechanical properties and multi-layer perceptron neural networks of polyacrylonitrile fiber reinforced concrete cured outdoors[J]. Structures, 2023, 56: 104954.
- [18] 张悦. 聚丙烯纤维混凝土力学性能及损伤破坏形态研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
ZHANG Yue. Study on mechanical properties and damage and failure morphology of polypropylene fiber concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [19] 苏骏, 范子康, 蔡新华. 硫酸盐侵蚀对掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基复合材料断裂性能影响[J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 3103-3114.
SU Jun, FAN Zikang, CAI Xinhua. Comp J, 2024, 41(6): 3103-3114.
- [20] 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.
- [21] 张秉宗, 贡力, 杜强业, 等. 西北盐渍干旱地区聚丙烯纤维混凝土耐久性损伤试验研究[J]. 材料导报, 2022, 36(17): 108-114.
ZHANG Bingzong, GONG Li, DU Qiangye, et al. Mater Rep, 2022, 36(17): 108-114.
- [22] 郑攀. 混合盐-冻融循环耦合作用下混杂纤维混凝土试验研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.

- ZHENG Zhi. Experimental study on hybrid fiber concrete under the coupling effect of mixed salt and freeze-thaw cycle[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.
- [23] CAO J C, WU F W, LEI S, et al. Experimental study on the bonding performance of engineered cementitious composites to normal concrete interface subjected to salt freeze-thaw cycles[J]. *Compos Struct*, 2024, 330: 117828.
- [24] 黄勇, 史才军, 欧阳雪, 等. 混凝土劈裂拉伸测试方法及性能研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(1): 1131–1140.
HUANG Yong, SHI Caijun, OUYANG Xue, et al. *Mater Rep*, 2021, 35(1): 1131–1140.
- [25] 邓祥辉, 张鹏, 王睿, 等. 青藏高原地区纤维混凝土抗冻耐久性试验与损伤模型研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(9): 3143–3153.
DENG Xianghui, ZHANG Peng, WANG Rui, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2023, 42(9): 3143–3153.
- [26] QIN L, GAO X J, ZHANG A L. Potential application of Portland cement-calcium sulfoaluminate cement blends to avoid early age frost damage[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 190: 363–372.
- [27] 连海东, 田青青, 徐存东, 等. 早期受冻损伤混凝土应力-应变试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(6): 2026–2033.
LIAN Haidong, TIAN Qingqing, XU Cundong, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2021, 40(6): 2026–2033.
- [28] 王志旺, 杨鼎宜, 王金辉, 等. 聚丙烯腈纤维混凝土耐久性能试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2019(11): 49–52.
WANG Zhiwang, YANG Dingyi, WANG Jinhui, et al. *China Concr Cem Prod*, 2019(11): 49–52.
- [29] 赵胜前, 游庆龙, 李京洲, 等. 改性聚酯纤维对机场水泥混凝土的增韧阻裂效果分析[J]. *材料导报*, 2024, 38(13): 306–313.
ZHAO Shengqian, YOU Qinglong, LI Jingzhou, et al. *Mat Rep*, 2024, 38(13): 306–313.
- [30] 王家滨, 张凯峰, 侯泽宇, 等. 西北复合盐侵蚀环境衬砌喷射混凝土离子扩散研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(11): 21–35.
WANG Jiabin, ZHANG Kaifeng, HOU Zeyu, et al. *China Civ Eng J*, 2020, 53(11): 21–35.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [32] ABRISHAMBAF A, BARROS J A O, CUNHA V M C F. Tensile stress-crack width law for steel fibre reinforced self-compacting concrete obtained from indirect (splitting) tensile tests[J]. *Cem Concr Compos*, 2015, 57: 153–165.
- [33] TANG T. Effects of load-distributed width on split tension of unnotched and notched cylindrical specimens[J]. *J Test Eval*, 1994, 22(5): 401–409.
- [34] 钱鹏. 混凝土的微观裂纹结构与宏观渗透性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
QIAN Peng. Study on micro-crack structure and macro-permeability of concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [35] 段明翰, 覃源, 许增光, 等. 聚丙烯纤维对混凝土损伤渗透特性的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10): 3474–3483.
DUAN Minghan, QIN Yuan, XU Zengguang, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2021, 38(10): 3474–3483.
- [36] 林桂武, 刘凯格, 陈宇良, 等. 纤维再生混凝土劈裂抗拉力学性能试验研究[J]. *实验力学*, 2022, 37(5): 711–721.
LIN Guiwu, LIU Kaige, CHEN Yuliang, et al. *J Exp Mech*, 2022, 37(5): 711–721.
- [37] QIU W L, TENG F, PAN S S. Damage constitutive model of concrete under repeated load after seawater freeze-thaw cycles[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 236: 117560.
- [38] M. Kosior-Kazberuk, P. Berkowski, Surface scaling resistance of concrete subjected to freeze-thaw cycles and sustained load[J]. *Proc Eng*, 2017, 172: 513–520.
- [39] 路承功. 西部严酷环境下钢筋砼耐久性试验研究及寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
LU Chenggong. Experimental study on durability and life prediction of reinforced concrete in harsh environment in Western China[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [40] LIU Z C, HANSEN W. Effect of hydrophobic surface treatment on freeze-thaw durability of concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2016, 69: 49–60.
- [41] LINDMARK S. Mechanisms of salt frost scaling of Portland cement-bound materials: Studies and hypothesis[D]. Lund, Sweden: Lund University, 1998.
- [42] 汪林萍, 杨全兵. NaCl-MgCl₂ 复合除冰盐对混凝土盐冻破坏的影响及其作用机理[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(2): 129–136.
WANG Linping, YANG Quanbing. *J Build Mater*, 2023, 26(2): 129–136.
- [43] LIU F, YOU Z P, YANG X, et al. Macro-micro degradation process of fly ash concrete under alternation of freeze-thaw cycles subjected to sulfate and carbonation[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 181: 369–380.
- [44] WANG R J, ZHANG Q J, LI Y. Deterioration of concrete under the coupling effects of freeze-thaw cycles and other actions: A review[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 319: 126045.
- [45] 高润东, 赵顺波, 李庆斌, 等. 干湿循环作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理试验研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(2): 48–54.
GAO Rundong, ZHAO Shunbo, LI Qingbin, et al. *China Civ Eng J*, 2010, 43(2): 48–54.
- [46] 王家滨, 牛荻涛, 何晖, 等. 复合盐侵蚀衬砌喷射混凝土耐久性退化研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(9): 79–90.
WANG Jiabin, NIU Ditao, HE Hui, et al. *China Civ Eng J*, 2019, 52(9): 79–90.
- [47] 刘崇熙, 汪在芹. 坝工混凝土耐久寿命的衰变规律[J]. *长江科学院院报*, 2000, 17(2): 18–21.
LIU Chongxi, WANG Zaiqin. *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2000, 17(2): 18–21.

Durability of Fiber Reinforced Concrete Under Salt-Freeze-Thaw / Dry-Wet Cycles

DUAN Minghan, QIN Yuan, LI Yang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Extended Abstract

Introduction In alpine saline soil environments, concrete has a multi-factor coupling degradation due to the freeze-thaw cycles, as

well as sulfate and chloride corrosion. This degradation results in a significant decline in structural lifespan primarily due to reduced material durability. The maintenance process is complex and incurs substantial economic losses, attracting considerable attentions. Under the influence of these coupled factors, the presence of salt facilitates the migration of water toward the salt. Upon reaching the critical freezing point, ice jams occur, leading to concrete damage from ice pressure. Also, the formation of numerous expansion products generates an expansion pressure during dry-wet cycles, further contributing to concrete deterioration. Although the use of fiber-reinforced concrete has a potential to mitigate these issues, tight construction timelines can result in an initial damage, such as cracks during winter construction, which are often unavoidable. The existing research on the durability and mechanisms of fiber-reinforced concrete in real crack states within this environment remains insufficient, indicating a need for a further research.

Methods This study examined the fiber-reinforced concrete used in a project located in the alpine saline soil region of Tibet, China. Three distinct types of fiber concrete specimens were designed and manufactured with polypropylene fiber (PPF), polyacrylonitrile fiber (PANF), and modified polyester fiber (PEF). After 150 d outdoor curing, the actual cracks were analyzed by a microscope. Two accelerated degradation tests were conducted, *i.e.*, composite salt-freeze-thaw and composite salt-dry-wet cycles. The durability damage mechanisms and patterns were investigated in detail through measurements of ultrasonic wave velocity and splitting tensile strength, as well as by scanning electron microscopy.

Results and discussion According to the crack information statistics of the specimens after outdoor exposure and curing, the cracks in plain concrete are straight and singular, whereas the cracks in fiber-reinforced concrete are interconnected, forming a ring network structure. The presence of these cracks accelerates the connection rate between surface and internal cracks during composite salt-freeze-thaw and dry-wet cycles, leading to a reduction in wave velocity and splitting tensile strength. The mechanistic analysis indicates that under the influence of salt-freeze-thaw, the saturation of the concrete pore solution increases, and the combined effects of crystallization pressure, stress, and chemical expansion products contribute to the initiation and propagation of internal cracks within the concrete. Damage can be categorized into surface damage and internal damage. During the composite salt-dry-wet cycle, the water pressure in the wet state gradually diffuses the salt solution from the concrete surface to its interior, resulting in the formation of expansive products. In the dry state, the solution is heated and evaporated, causing soluble salts to crystallize due to temperature effects. The alternating dry-wet conditions produce a compounded damage. The fibers exhibit a bridging-cracking-toughening effect, which enhances crack propagation resistance. Furthermore, an analysis model correlating the relative values of ultrasonic wave velocity damage with splitting tensile strength, which is proposed based on material decay theory, demonstrates a correlation coefficient of exceeding 0.95. This model effectively reflects the attenuation behavior of the splitting tensile strength of fiber concrete under conditions of composite salt-freeze-thaw and dry-wet cycles, highlighting its significance in predicting the tensile properties of concrete structures.

Conclusions The initial crack width of plain concrete ranged from 6 μm to 15 μm with a maximum length of 20 mm. In comparison, the early crack resistance of polyester fiber reinforced concrete was superior, exhibiting a width of less than 10 μm and a maximum length of approximately 10 mm, alongside the maximum anti-deterioration capability. Upon reaching the designated number of cycles in the durability test, the wave velocity was decreased by 29.36% and 16.05%, respectively, while the splitting tensile strength was diminished by 43.80% and 37.19%, respectively. This deterioration in durability resulted in the expansion of cracks within the interfacial transition zone of the concrete. However, the fibers could form a network that bridged these cracks, thereby reducing tensile stress, enhancing crack propagation resistance in the interfacial transition zone, ultimately delaying the overall damage.

Keywords fiber-reinforced concrete; alpine saline soil; freeze-thaw/dry-wet cycle; ultrasonic wave speed; split tensile strength; prediction mod