

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.04.013

# 碳-玻璃混杂纤维混凝土抗盐冻性能试验研究

吴 杨, 黄慎江, 洪 丽

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:**为研究碳-玻璃混杂纤维混凝土抗盐冻性能,文章对不同纤维掺量的混凝土开展了力学性能试验及冻融循环与氯盐、硫酸盐耦合作用下的耐久性试验,测定了抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度,并探究质量损失率和相对动弹性模量的变化规律。结果表明:单掺或混掺纤维能小幅度提高抗压强度,显著提高劈裂抗拉强度和抗折强度;随着循环次数的增加,质量损失率增大,相对动弹性模量减小;2种纤维混杂能有效改善混凝土抗盐冻性,其中CF30GF30抗盐冻性能最佳。结合扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)表征结果分析了纤维改善混凝土抗盐冻性能机理,并基于相对动弹性模量建立了盐冻损伤模型来评价纤维混凝土的损伤程度,发现二次函数衰减模型拟合的相关系数较高,可准确反映盐冻循环作用下混凝土损伤变化规律。

**关键词:**碳-玻璃混杂纤维;盐冻;相对动弹性模量;机理分析;损伤程度;衰减模型

**中图分类号:**TU528.043 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)04-0523-07

## Experimental investigation on salt freezing resistance of carbon-glass hybrid fiber reinforced concrete

WU Yang, HUANG Shenjiang, HONG Li

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to study the salt freezing resistance of carbon-glass hybrid fiber reinforced concrete, this paper carried out mechanical performance test and durability test under freeze-thaw cycle coupled with chloride and sulfate on concrete with different fiber contents, determined the compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength, and explored the variation rules of mass loss rate and relative dynamic elastic modulus. The research results show that single or mixed fibers can increase the compressive strength to a small extent, and can significantly increase the splitting tensile strength and flexural strength; with the increase of the number of cycles, the mass loss rate increases and the relative dynamic elastic modulus decreases; the mixing of the two kinds of fibers can effectively improve the resistance to salt freezing of concrete, of which CF30GF30 has the best resistance to salt freezing. Combined with the scanning electron microscope (SEM) results, the mechanism of fiber to improve the salt freezing resistance of concrete was analyzed. A salt freezing damage model based on the relative dynamic elastic modulus was established to evaluate the damage degree of fiber concrete, and it is found that the correlation coefficient fitted by the quadratic function attenuation model is high, which can accurately reflect the variation rule of concrete damage under the action of salt freezing cycle.

**Key words:** carbon-glass hybrid fiber; salt freezing; relative dynamic elastic modulus; mechanism analysis; damage degree; attenuation model

收稿日期:2024-01-09;修回日期:2024-03-12

基金项目:教育部重点实验室开放课题资助项目(2019KF-4)

作者简介:吴 杨(1998—),男,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

黄慎江(1964—),男,江苏泰州人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:huangsj000@hotmail.com.

我国北方地区冬季使用除冰盐清除路面积雪,经过冬冻春融后,混凝土遭受冻融循环和氯盐、硫酸盐侵蚀的共同破坏,使结构大多不能达到预期的使用年限,对经济造成不可估量的损失,同时产生较大的安全隐患,因此深入开展混凝土抗盐冻耐久性研究非常重要<sup>[1-3]</sup>。

纤维可以提高混凝土力学性能和耐久性能,受到学者们的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。文献[6]通过分析碳纤维的掺入对混凝土力学性能的影响,发现掺入碳纤维可以细化混凝土内部的气孔结构,使其孔隙率明显降低;文献[7]研究表明在混凝土中掺入体积率 0.45%、0.90%、1.35% 的玻璃纤维可以提高混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度,掺量越多,强度提高越显著;文献[8]以最紧密堆积法设计配比,测试玻璃纤维混凝土的力学性能,发现玻璃纤维提升了混凝土的抗折、抗渗性;文献[9]通过冻融循环试验发现,混凝土抗冻性随碳纤维体积掺量增加而提升,碳纤维掺量为 1.6% 时混凝土相较于普通混凝土的相对动弹性模量损失、质量损失率均仅有 1/2;文献[10]进行了聚丙烯纤维混凝土冻融损伤试验,在冻融循环作用下,聚丙烯纤维混凝土损伤不断累加,质量损失率和劈拉强度不断降低,随着纤维掺量的增加,混凝土的劈拉强度不断提高。目前,关于单一纤维增强混凝土力学性能研究和纤维混凝土在单一因素作用下耐久性研究成果较多,而对多因素耦合作用下混杂纤维混凝土的耐久性研究相对较少,尤其是冻融循环和氯盐、硫酸盐耦合作用下的抗盐冻性能研究更为少见。

碳纤维具有高强度、高弹模,可提高混凝土强度<sup>[11]</sup>;玻璃纤维具有高延性、低弹模,能增强混凝土韧性<sup>[12]</sup>。用单一纤维难以同时提高混凝土的强度和韧性,若将这 2 种纤维混杂掺入混凝土中,使其在不同的受荷阶段与结构层次发挥增强增韧作用,可获得具有优异综合性能的混凝土。本文将碳纤维和玻璃纤维按不同掺量混合加入混凝土研究混凝土在冻融循环和氯盐、硫酸盐耦合作用下的耐久性,建立盐冻损伤寿命预测模型,对今后纤维混凝土抗盐冻耐久性的设计具有重要的借鉴意义。

## 1 试验设计

### 1.1 材料

试验采用巢湖海螺水泥有限责任公司生产的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料选用细度模

数为 2.65 的普通河砂(中砂);粗骨料采用粒径为 5~20 mm 连续级配的碎石。纤维采用碳纤维(carbon fiber, CF)和玻璃纤维(glass fiber, GF),主要性能指标见表 1 所列。水选用合肥市自来水。

表 1 纤维性能参数

纤维种类	纤维长度/ mm	直径/ μm	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa
CF	12	7	1.75	4 900	230
GF	12	13	2.73	1 450	75

### 1.2 配合比

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011),设计混凝土中水泥、砂、石子、水的质量配合比为 401:733:1 012:236,设计混凝土强度等级为 C40。本试验以普通混凝土(OC)为对照组,保持混凝土配合比不变,通过加入不同掺量的纤维形成各试验组,试验组名称及配合比参数见表 2 所列。

表 2 混凝土配合比参数 %

组别	名称	体积分数	
		CF	GF
1	OC	0	0
2	CF20	0.2	0
3	GF20	0	0.2
4	CF20GF20	0.2	0.2
5	CF20GF40	0.2	0.4
6	CF40GF20	0.4	0.2
7	CF30GF30	0.3	0.3

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 力学性能试验

根据《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009)进行力学性能试验,按照预先制定的配合比,采用 2 种纤维的不同掺入量制备混凝土试块,并在温度(20±2)℃、相对湿度 95% 以上的标准养护室中养护 28 d 后进行试验。抗压试验试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,劈裂抗拉试验试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,抗折试验试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。每组试件均为 3 个。

#### 1.3.2 抗盐冻性能试验

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)中的快冻法进行抗盐冻性能试验。试件在盐冻循环过程中中心温

度分别控制在 $(-18\pm 2)$ ℃、 $(5\pm 2)$ ℃,每次盐冻循环持续4 h。盐冻前测定试件初始质量和初始动弹性模量,之后每盐冻循环25次取出试件,用标准方法测定其质量损失率和相对动弹性模量,最高盐冻循环次数为200次。试件采用棱长为100 mm的立方体,每组3块。试验采用质量分数均为3.5%的NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>混合盐溶液。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 力学性能试验分析

抗压强度试验结果如图1所示。

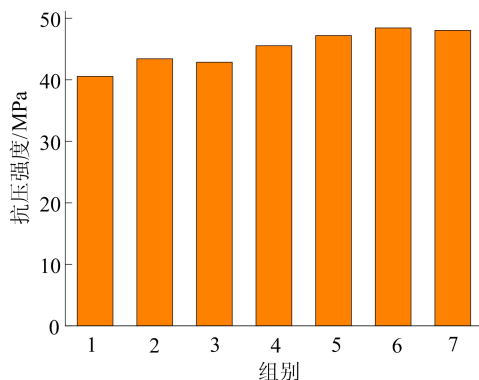


图1 抗压强度

由图1可知:CF40GF20的抗压强度最高,为48.43 MPa,较OC提高了19.37%;与OC相比,组别2、3、4、5、7抗压强度提高比例依次为7.02%、5.64%、12.30%、16.34%、18.41%,表明单掺或混掺纤维均能小幅度提高混凝土抗压强度。

CF在混凝土中无序分布,存在强烈的“空间约束”特性,随着混凝土的逐步硬化,能有效抑制粗细集料的离析,使得各类原材料的结合更加充分和可靠;CF具有一定的分隔作用,能够将混凝土内部较大孔隙分隔成小孔隙,细化了孔结构<sup>[13]</sup>。混凝土平均孔径的降低致使试件在承载时应力集中的路径减少,进而提高混凝土抗压强度。GF呈细丝状,乱向分布存在于基体中能形成不规则但较为稳定的网状结构,增加混凝土的紧密度和承载能力,增强材料的韧性和延展性,提升抗压性能。

CF与GF混掺后,在混凝土中均匀分布形成大量的支撑系统和约束系统,既可承担大部分应力,有效约束混凝土的横向变形<sup>[14]</sup>,又能减小混凝土的泌水和收缩,控制收缩裂缝的形成,并通过纤维与基体的黏结力阻碍裂缝的扩展,延缓了受

压破坏过程。CF20的抗压强度高于GF20,这是由于CF体积更小、强度更高,相同体积分数下可以更好地细化孔隙结构,增益效果更优。

劈裂抗拉和抗折强度试验结果如图2所示。

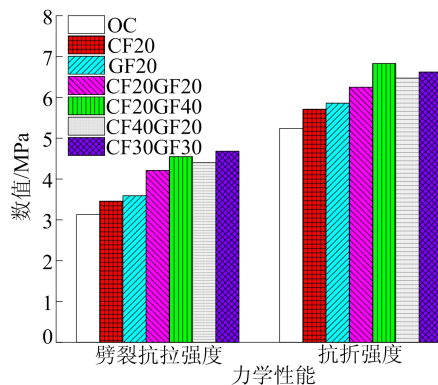


图2 劈裂抗拉和抗折强度

由图2可知:在劈裂抗拉强度方面,CF30GF30(组别7)的表现最突出,为4.68 MPa,较OC提高49.52%;组别2~组别7相比OC(组别1)依次分别提高10.54%、14.70%、34.50%、45.37%、40.58%,表明单掺或混掺纤维均可显著提高混凝土劈裂抗拉强度。

CF在混凝土中均匀分散,形成大量具有较高强度的纤维桥梁,并将其延伸至混凝土内部,施加荷载时,纤维将承担一部分混凝土的拉应力,提高混凝土在劈拉方向上的抗拉强度和韧性。此外,CF具有高弹性模量和高强度特性,能够有效阻止或减缓裂缝的扩展,当裂缝开始出现时,CF的高强度使得纤维本身吸收了一定的能量,降低了裂缝向混凝土基体内扩展的速度和程度,改善了混凝土的劈拉性能。GF在混凝土中乱象分布,阻止裂纹的发展,能与基体共同承担受拉荷载,直至纤维被拔出或拔断,纤维拉断时会抵抗部分外荷载,缓冲裂缝能量,提高材料延性。

CF与GF混掺后,2种纤维在混凝土受拉破坏时从不同尺度和不同阶段发挥阻裂作用,低弹性模量的GF在受拉损伤初期阶段抑制和延缓微裂缝的生成与扩展,而高弹性模量的CF在受拉损伤后期控制了裂纹生成,从而显著提高混凝土的劈裂抗拉强度,表现出正混杂效应<sup>[15]</sup>。GF20对劈拉强度的提高幅度高于CF20,主要原因是GF的抗拉强度高于CF,且耐碱性更好,能够抵抗水泥基的碱性侵蚀。

在抗折强度方面,CF20GF40性能最优,为6.83 MPa,较OC提高30.34%,组别2~组别7

较 OC(组别 1)依次分别提高了 8.97%、11.83%、19.27%、23.47%、26.34%，表明单掺或混掺纤维均可提高混凝土抗折强度。

CF 具有很好的阻裂效应，能够横跨在宏观裂缝两侧，有效缓解宏观裂缝端部应力集中现象，并且 CF 使得裂缝扩展路径更加复杂，阻碍了宏观裂缝的进一步扩展。混凝土中均匀分散的 GF 能够桥接和转移应力，缓解应力集中，防止裂缝的扩展和产生。CF 与 GF 混掺后，纤维数量更多，形成的三维网状框架更为致密，对周围混凝土基体的约束作用更强，当混凝土基体承受荷载时，将更多的应力传递给纤维，由纤维产生变形来承担，因此混凝土基体需要承担的应力相应减少，表现为强度提升。

### 2.2 质量损失率和相对动弹性模量

各组混凝土质量损失率与盐冻循环次数  $n$  的关系如图 3 所示。

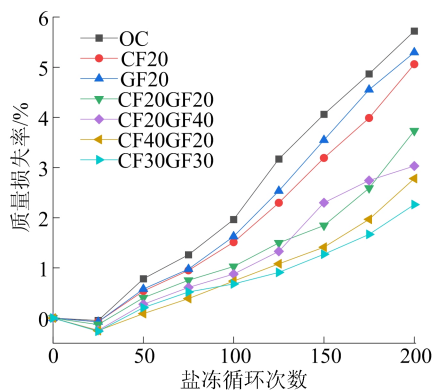


图 3 质量损失率

由图 3 可知，随着盐冻循环次数的增加，各组试件的质量损失率先降后升。 $n \leq 25$  时，质量损失出现负增长，这是由于孔隙与纤维吸收混合盐溶液到混凝土内部直至饱和，但此时试块损伤较轻，脱落的质量小于吸收混合盐溶液的质量，故混凝土质量有所增加。 $25 < n \leq 125$  时，试块表面裂缝逐渐扩大，表面砂浆层剥落，但剥蚀层下的混凝土基层依然保持坚硬完好，质量损失率增大。 $n > 125$  时，OC 表面变得疏松，粗骨料外露，而混杂纤维混凝土表面无贯穿裂缝，试件外部趋于完

整，各组质量损失率继续增长，但均未达到 5%。 $n = 200$  时 CF30GF30 质量损失率最小，较 OC 降低 60.46%。相比 OC，单掺或混掺纤维均能有效降低混凝土质量损失率。

各组混凝土相对动弹性模量与盐冻循环次数的关系如图 4 所示。

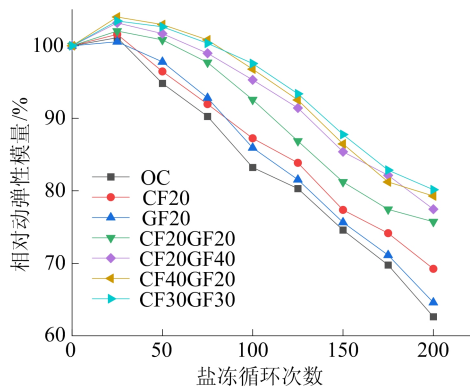


图 4 相对动弹性模量

由图 4 可知，随着盐冻循环次数的增加，各组试件的相对动弹性模量先增后减。 $n \leq 25$  时，各组试件的相对动弹性模量出现小幅增长，并达到最大值，试件损伤不明显，原因是硫酸盐渗透到混凝土内部与氢氧化钙发生反应生成具有膨胀性质的钙矾石填充了孔隙，进而加密了混凝土内部薄弱界面的结构。 $25 < n \leq 75$  时，各组试件的相对动弹性模量下降较为平缓，数值均在 90% 以上并且相差不大。 $75 < n \leq 150$  时，各组试件的相对动弹性模量下降速度明显增加，下降幅度也较大。 $n = 200$  时，各组试件的相对动弹性模量从小到大依次为：OC、GF20、CF20、CF20GF20、CF20GF40、CF40GF20、CF30GF30。其中 OC 破坏程度最大，动弹性模量为盐冻前的 62.62%；CF30GF30 相对动弹性模量最高，为 80.15%，较 OC 减少损失 27.99%。GF20 较 CF20 相对动弹性模量曲线下降速度更快，说明 CF 对混凝土抗盐冻性能改善效果优于 GF。

各组混凝土经 200 次盐冻循环后的外观如图 5 所示。

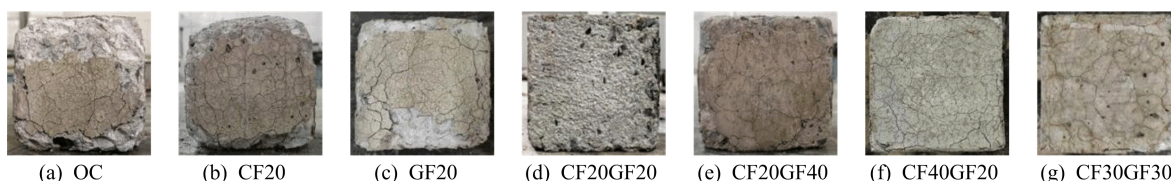


图 5 200 次盐冻循环后混凝土的外观

综上所述,单掺或混掺纤维能降低混凝土质量损失率并提高相对动弹性模量,且混掺纤维改善混凝土内部结构的效果较单掺纤维更优,更有利于提高抗盐冻性能,其中CF30GF30抗盐冻性最佳。

### 3 机理分析

#### 3.1 盐冻复合破坏机理

目前关于混凝土抗冻性的理论研究主要有静水压理论、渗透压理论、温度应力理论和临界饱水程度理论<sup>[16]</sup>。盐冻破坏本质上属于特殊形式的冻融侵蚀破坏,但在冻融破坏和混合盐侵蚀耦合作用下,混凝土破坏程度远大于单纯的冻融破坏。主要是由于:①盐具有很强的吸湿性,在盐溶液中的混凝土,毛细孔壁的水泥浆吸附了一部分盐,造成毛细孔内溶液浓度差,引起渗透压,使混凝土吸水饱和度增大,即混凝土具有更大的吸湿性;②混凝土中含盐,使毛细孔中空隙液达到饱和的时间缩短,具有快速性;③混凝土中含盐,使其更具有保水性,混凝土内部含有更多的可冻水,冻胀时会产生更大的破坏力;④当混凝土失水时,盐的结晶压又会使混凝土产生膨胀。此外,由于反复冻融造成混凝土损伤,微裂缝数量增多并不断延伸,方便了盐离子向混凝土内部迁移,加剧盐腐蚀的程度。盐冻循环前混凝土的微观结构如图6所示。

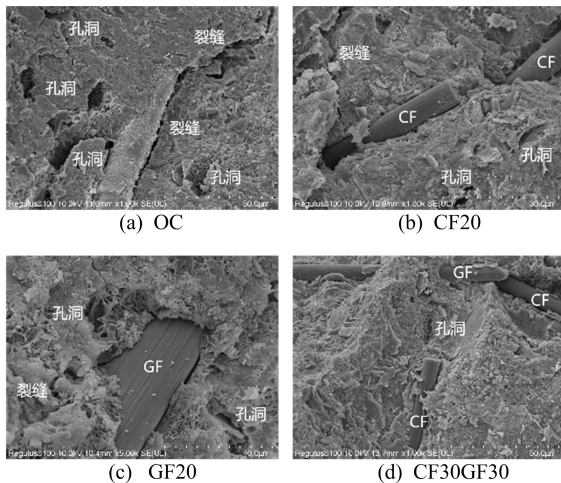


图6 盐冻循环前混凝土的微观结构

由图6可知:试验前OC水化产物随机分布,多为扁平状;界面中明显存在孔洞、微裂缝等缺陷,孔洞内壁多数比较光滑,裂缝数量较多,贯穿水化物及粗骨料;水化产物间联系不够紧密,界面

过渡区水泥浆体与骨料黏结处有明显裂缝。掺入纤维后,混凝土的微观结构变得较为致密,大量水化物凝胶C-S-H均匀覆盖在混凝土表面;孔隙中都填有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体及针状AFt,水化产物界面孔洞变小,无明显微裂缝;水泥砂浆与粗骨料及纤维根部均紧密结合,界面处轮廓分明,纤维表面光滑,周围无明显片状水化产物。200次盐冻循环后混凝土的微观结构如图7所示。

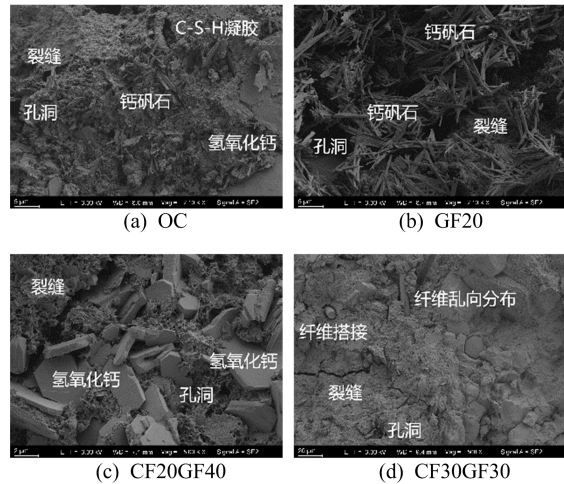


图7 200次盐冻循环后混凝土的微观结构

由图7可知:盐冻200次后,各组混凝土界面过渡区裂缝加宽,孔隙周围裂纹丛生,致密度大幅下降;骨料与C-S-H凝胶之间黏结减弱,界面中存在大量的板状氢氧化钙、针棒状的钙矾石以及点状或短柱状石膏晶体;水泥水化物结构变得疏松,且骨料之间的胶结物发生瓦解现象。纤维混凝土虽然也有孔洞增多、增大的现象,但可以看到纤维脱黏断裂拔出消耗了能量,纤维贯穿孔洞起到了隔断、桥接作用,纤维形成的三维网络可以承受并传递应力至基体其他区域,致使混凝土在一定程度上成为一个共同受力的整体。

#### 3.2 纤维改善混凝土抗盐冻性能的机理

影响混凝土冻融性能的主要因素有:①外部环境,包括温度、湿度、时间和冻融循环次数等;②混凝土本身的特征,包括韧性、含气量、纤维的掺量、抗拉极限应变等<sup>[17]</sup>。通常外部环境难以人为改变,而掺入纤维能改善混凝土内部结构,提高抗盐冻性能,其改善机理为:①掺入纤维可以提高混凝土抗渗性,阻碍水分进入混凝土内部,防止水分在结冰时体积膨胀,出现膨胀裂缝;②纤维能够有效抑制混凝土是由于温度变化而产生的温度应力,在应力较低时可约束早期原生裂缝的发

展;③ 纤维的掺入起到引气作用,增加了混凝土试块内部的含气量,减少了不利大孔的数量,一定程度地改善了混凝土孔隙结构,对混凝土抗盐冻性能起到良好作用;④ 2 种纤维之间以及纤维与水泥浆之间均能形成较大的黏结力抵消冰冻膨胀力,延缓试件破坏的时间;⑤ 混凝土开裂后,桥接在裂缝两侧的纤维起到承担荷载和阻裂的作用,缓解了应力集中现象。

#### 4 寿命预测

基于相对动弹性模量的数据变化,根据混凝土损伤力学<sup>[18-20]</sup>,混凝土的冻融损伤程度  $D$  及其二次函数衰减模型<sup>[21]</sup>可以表示为:

$$D = 1 - \frac{E_n}{E_0} = an^2 + bn + c \quad (1)$$

其中:  $E_n$  为试件盐冻循环  $n$  次后的动弹性模量;  $E_0$  为试件的初始动弹性模量;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合参数。

对试验数据按照式(1)进行拟合,关系曲线如图 8 所示,衰减模型系数见表 3 所列。

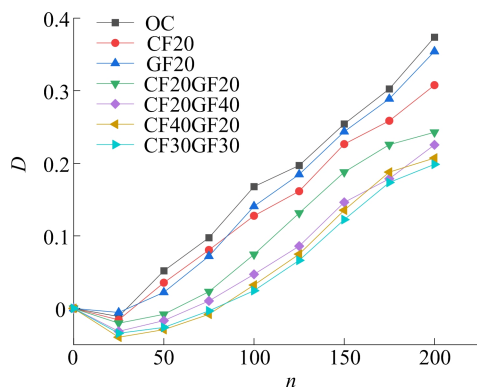


图 8 损伤程度与盐冻循环次数的关系曲线

由图 8 可知,单掺或混掺纤维均能不同程度地降低混凝土损伤程度。

由表 3 可知,拟合系数  $R^2$  都在 0.96 以上,表明建立的二次函数衰减模型精准度很高,与试验结果拟合较好。

通过该函数模型,可预测混凝土的抗盐冻耐久性寿命,计算冻融损伤程度为 0.4 时所对应的极限冻融次数,OC 和 CF30GF30 分别为 211 次和 261 次。混凝土抗盐冻预测寿命年限为:

$$t = kn_E/n_a \quad (2)$$

其中:  $k$  为比例系数,本次试验取平均值 12;  $n_E$  为混凝土的极限冻融次数;  $n_a$  为西北地区年均冻融次数,取 118 次/a;  $t$  为混凝土结构的实际使用寿命。

按照式(2)计算 OC、CF30GF30 的抗盐冻耐久性寿命分别为 21.4、26.5 a,说明混杂纤维显著延长了混凝土使用寿命。

表 3 盐冻损伤程度二次函数衰减模型系数

类型	$a/10^{-4}$	$b$	$c$	$R^2$
OC	3.635 5	0.123 6	-2.212 2	0.989 7
CF20	2.869 8	0.112 1	-2.288 2	0.983 6
GF20	3.190 8	0.110 9	-2.200 9	0.984 8
CF20GF20	4.646 4	0.054 4	-2.498 5	0.960 4
CF20GF40	8.473 3	-0.044 4	-1.238 6	0.988 9
CF40GF20	6.854 2	-0.013 1	-1.796 6	0.970 8
CF30GF30	6.915 3	-0.021 4	-1.652 7	0.975 1

#### 5 结 论

1) 碳-玻璃混杂纤维可使混凝土力学强度有不同程度的提高,其中以劈裂抗拉强度的增长最为显著,抗折强度次之,而抗压强度的增幅相对较小。混凝土力学性能随纤维掺量的增加而逐渐提高,且混掺纤维的提高效果要优于单掺纤维。CF40GF20 抗压性能最优,CF30GF30 劈裂抗拉性能最优,CF20GF40 抗折强度最高。

2) 随着盐冻循环次数的增加,混凝土质量损失率增大,相对动弹性模量减小。混杂纤维可以显著降低质量损失率并延缓动弹性模量降低速度,其中 CF30GF30 抗盐冻性能最好。

3) SEM 表征结果表明,纤维混凝土内部的孔洞、裂缝数量要少于普通混凝土,普通混凝土内部 C-S-H 凝胶明显多于纤维混凝土;盐冻后混凝土内部致密性变差。掺入纤维可以改善混凝土内部结构,延缓试件的破坏,提高抗盐冻性能。

4) 二次函数衰减模型的拟合系数均在 0.96 以上,可较好地反映纤维混凝土盐冻损伤变化规律。针对我国西北地区气候条件下的盐冻损伤进行寿命预测,结果表明碳-玻璃混杂纤维改善了混凝土的抗盐冻性能,并显著延长了其使用寿命。

#### [参 考 文 献]

- [1] 牛获涛,杨德柱,罗大明. 混凝土结构耐久性评定方法体系[J]. 建筑结构,2021,51(17):115-121,114.
- [2] 孙刚锋,蔡彦强. 冻融循环及硫酸盐侵蚀对混凝土耐久性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):140-144.
- [3] 贾晓光. 冻融循环作用下高强自密实混凝土抗冻耐久性研究[J]. 工程技术研究,2023,8(13):118-122.
- [4] NIU D T, HUANG D G, FU Q. Experimental investigation on compressive strength and chloride permeability of fiber-rein-

- forced concrete with basalt-polypropylene fibers[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(10): 2278-2288.
- [5] LI J C, QIAO H X, ZHU F F. Reliability analysis of freeze-thaw damage of fiber reinforced concrete based on Miner theory[J]. *Emerging Materials Research*, 2019, 8(3): 1-7.
- [6] 杨虹, 王海龙, 王红珊, 等. 碳纤维轻骨料混凝土力学性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(11): 108-112.
- [7] 吕志恒, 程铭, 蒋喜生. 玻璃纤维和聚丙烯纤维改善混凝土微观结构研究[J]. *中外公路*, 2020, 40(6): 267-270.
- [8] 黄艳. 耐碱玻璃纤维在道路混凝土中的应用[J]. *交通标准化*, 2014, 42(12): 68-70, 73.
- [9] 杜向琴, 刘志龙. 水工钢纤维混凝土抗渗性和抗冻性的研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2015, 41(2): 199-201.
- [10] 程红强, 高丹盈. 聚丙烯纤维混凝土冻融损伤试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(增刊2): 197-200.
- [11] 党军亮, 牛建刚, 唐好令, 等. 碳纤维掺量及长度对混凝土力学性能的影响[J]. *合成纤维工业*, 2021, 44(4): 55-58.
- [12] 王孟言. 玻璃纤维混凝土结构特性及抗震性能研究[J]. *造纸装备及材料*, 2023, 52(7): 78-80.
- [13] 杜向琴, 刘志龙. 碳纤维对混凝土力学性能的影响研究[J]. *混凝土*, 2018(4): 91-94.
- [14] 罗辉. 碳纤维轻骨料混凝土力学性能试验研究[J]. *四川建材*, 2022, 48(4): 22-23.
- [15] 李黎, 曹明莉, 冯嘉琪. 纤维增强水泥基复合材料的纤维混杂效应研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(4): 843-853.
- [16] 轩倩茹. 混凝土盐冻破坏机理分析[J]. *四川建材*, 2020, 46(5): 3-4.
- [17] 文可, 周珣. 玄武岩纤维混凝土抗冻性能试验研究[J]. *山西建筑*, 2017, 43(34): 102-104.
- [18] 赵燕茹, 范晓奇, 王利强, 等. 不同冻融介质作用下混凝土力学性能衰减模型[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(2): 463-470.
- [19] 朱晨飞, 刘晓军, 李文哲, 等. 混杂纤维混凝土冻融耐久性与损伤模型研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(2): 10-14.
- [20] 张广泰, 刘诗拓, 耿天娇, 等. 基于 Weibull 分布的冻融循环下纤维混凝土损伤模型[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(29): 12078-12084.
- [21] 王立久, 汪振双, 崔正龙. 基于冻融损伤抛物线模型的再生混凝土寿命预测[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(1): 29-35.

(责任编辑 吴亮)

## (上接第 510 页)

- [13] WANG N N, ZHAO X F, ZHAO P, et al. Automatic damage detection of historic masonry buildings based on mobile deep learning[J]. *Automation in Construction*, 2019, 103: 53-66.
- [14] XU Y, WEI S Y, BAO Y Q, et al. Automatic seismic damage identification of reinforced concrete columns from images by a region-based deep convolutional neural network[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(3): e2313.
- [15] 章世祥, 张汉成, 李西芝, 等. 基于机器视觉的路面裂缝病害多目标识别研究[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(3): 30-39.
- [16] 张婷婷, 章坚武, 郭春生, 等. 基于深度学习的图像目标检测算法综述[J]. *电信科学*, 2020, 36(7): 92-106.
- [17] 张庆贺, 陈晨, 袁亮, 等. 基于 DIC 和 YOLO 算法的复杂裂隙岩石破坏过程动态裂隙早期智能识别[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1208-1219.
- [18] 马泽栋, 马雷, 李科, 等. 基于岩石图像深度学习的多尺度岩性识别[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(6): 316-322.
- [19] LI S Y, ZHAO X F, ZHOU G Y. Automatic pixel-level multiple damage detection of concrete structure using fully convolutional network[J]. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019, 34(7): 616-634.
- [20] LIU J W, YANG X, LAU S, et al. Automated pavement crack detection and segmentation based on two-step convolutional neural network[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2020, 35(11): 1291-1305.
- [21] LAU S L H, CHONG E K P, YANG X, et al. Automated pavement crack segmentation using U-Net-based convolutional neural network[J]. *IEEE Access*, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003638.
- [22] 张靖, 俞锡光, 郑东旭, 等. 基于 GAN-UNet++ 的汽车铝铸件图像缺陷分割算法研究[J]. *模具工业*, 2023, 49(11): 6-11.
- [23] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). [S. l.]: IEEE, 2017: 6517-6525.
- [24] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement [PP/OL]. arXiv (2018-04-08) [2024-02-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>.
- [25] XIANG X, WANG Z, QIAO Y. An improved YOLOv5 crack detection method combined with transformer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(14): 14328-14335.

(责任编辑 张淑艳)