

# PE-ECC 构件冻融循环后承载性能试验研究

张志强<sup>1,2</sup>, 张康健<sup>1,2</sup>, 刘 征<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学极端环境岩土与隧道工程智能建养全国重点实验室, 成都 610031;

2. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:**为研究冻融循环作用对聚乙烯纤维工程水泥基复合材料(PE-ECC)构件承载力的影响,通过室内冻融循环试验和冻后四点弯曲试验,研究冻融循环作用下 PE-ECC 梁的破坏演化特征,并通过刚度、延性指数、能量吸收能力(EAC)等性能指标分析其承载性能劣化规律。结果表明:(1)试验梁在破坏时保持较好的完整性,冻融作用使 PE 纤维与基体的协同效应减弱,随着冻融循环次数增加,主裂缝数量减少,裂缝密度降低,分布更加分散;(2)试验梁的荷载-跨中挠度曲线呈现明显的弹性、屈服和破坏段,加载过程可分为弹性阶段、受拉区局部开裂阶段和屈服破坏阶段;(3)提高 PE 纤维含量可使基体结构更为紧密,降低冻融作用后的 EAC 损失并提升承载能力;(4)冻融循环后,PE-ECC 试验梁跨中截面应变分布仍符合平截面假定,提出 PE-ECC 梁在弯曲荷载作用下各阶段承载力计算方法。研究成果可为 PE-ECC 梁的承载力设计和在寒区工程中的应用提供依据。

**关键词:**PE-ECC; 冻融循环; 承载性能; 破坏特征; 受弯构件

**中图分类号:**U25; TU375 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202501210004

## Experimental Study on Load-Bearing Capacity of PE-ECC Members after Freeze-Thaw Cycles

ZHANG Zhiqiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Kangjian<sup>1,2</sup>, LIU Zheng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** This study aims to investigate the effects of freeze-thaw cycles on load-bearing capacity of polyethylene fiber-reinforced engineered cementitious composites (PE-ECC) members. Through laboratory freeze-thaw cycle tests and post-freeze four-point bending tests, the failure evolution characteristics of PE-ECC beams under freeze-thaw action were investigated. The degradation patterns of their load-bearing capacity were analyzed using performance indicators such as stiffness, ductility index, and energy absorption capacity (EAC). The experimental results showed that: (1) the test beams maintained good structural integrity upon failure. Freeze-thaw cycles weakened the synergy between PE fibers and the matrix. With increasing freeze-thaw cycles, both the number of primary cracks and crack density decreased, and the cracks became more widely distributed. (2) The load-midspan deflection curves showed distinct elastic, yielding, and failure segments, which could be categorized into three loading stages: elastic stage, localized cracking stage in the tensile zone, and yielding failure stage. (3) Increasing PE fiber content resulted in a denser matrix structure, reduced the EAC loss, and enhanced load-bearing capacity after freeze-thaw cycles. (4) The strain distribution at the midspan cross-section of PE-ECC test beams after freeze-thaw cycles remained consistent with the plane section assumption. A calculation method for the load-bearing capacity of PE-ECC beams at each stage under bending load was

proposed. These findings can provide a basis for the load-bearing capacity design of PE-ECC beams and their engineering applications in cold regions.

**Key words:** PE-ECC; freeze-thaw cycles; load-bearing capacity; failure characteristics; flexural member

引言

传统混凝土结构长期服役过程中,冻融作用会改变混凝土内部孔隙结构而使基体逐渐松散,导致材料强度降低,最终发生结构失效破坏<sup>[1-3]</sup>。工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)具有出色的韧性和变形能力,单轴受压条件下其峰值应变约为普通混凝土的 2 倍;单轴拉伸作用下表现出应变硬化特征,拉伸应变可超过 3%,比素混凝土高数百倍<sup>[4]</sup>。ECC 可以在保持轻质、高强度和应变能力的同时不发生脆性开裂。作为 ECC 材料的重要组成部分,纤维通过与基体的界面黏结和协同作用改变 ECC 的桥接性能,进而影响荷载作用下的应变硬化特征和多重开裂行为<sup>[5]</sup>。

为满足冻融环境对结构承载能力和耐久性需求,国内外学者通过改变纤维掺和料的种类(如钢纤维、聚丙烯合成纤维、聚酯纤维和聚乙烯纤维等)得到一系列纤维 ECC 材料。由于大体积纤维的桥接效应,纤维 ECC 在冻融、碳化、渗透和高温条件下具有比普通混凝土更好的耐久性。相较于应用最为广泛的聚乙烯醇纤维工程水泥基复合材料(PVA-ECC),冻融作用下聚乙烯纤维工程水泥基复合材料(PE-ECC)拉伸应变能力的退化更小,表现出更优的抗冻性能<sup>[6]</sup>。因此,PE-ECC 材料在寒区结构建设中具有良好的应用前景。

针对 PE-ECC 材料的力学性能,LU 等<sup>[7]</sup>对比掺入 PE 纤维和 PVA 纤维的粗硅砂 ECC 抗拉性能和抗弯承载力。YU 等<sup>[8]</sup>采用纤维增强指数综合表征体积率和长径比的影响,探究 PE-ECC 的破坏特征和能量耗散规律。考虑到硫酸铝水泥早期强度优异和普通硅酸盐水泥经济性高,ZHANG 等<sup>[9]</sup>研究硫酸铝水泥替代率对 PE-ECC 材料力学性能的改善作用。张峰等<sup>[10]</sup>开展力学性能试验研究不同类型纤维对 ECC 力学性能的影响规律。LIU 等<sup>[11]</sup>对不同纤维含量的 PE-ECC 试件的静态及动态力学性能展开试验研究。这些研究为明确 PE-ECC 材料的基本力学性能和合理配比奠定了基础。

目前对 PE-ECC 材料抗冻性能的研究十分有限:大多数研究仅关注 PE-ECC 材料的基本力学性能,而忽略冻融循环对其性能的影响;研究对象多为小尺寸试块,难以反映实际构件物理力学性能的退化规律;ECC 材料的本构关系、破坏准则和应力-应变关系等

方面与传统混凝土存在显著差异,现有抗弯承载力计算模型已无法适用。鉴于此,本文设计并开展试验梁室内快速冻融试验和冻融循环后抗弯承载力试验,以破坏形态、荷载-变形特征、刚度、延性指数、能量吸收能力、跨中截面应变分布等关键参数作为评价指标,探究冻融循环作用对 PE-ECC 梁承载性能劣化的影响规律,明确 PE-ECC 用于寒区结构的可行性。

1 试验原材料及配合比设计

1.1 试验原材料

PE-ECC 基质组成材料如图 1 所示,包括普通波特兰水泥 PO 42.5R、I 级粉煤灰(FA)、硅灰(SF)、精制石英砂和短切 PE 纤维。

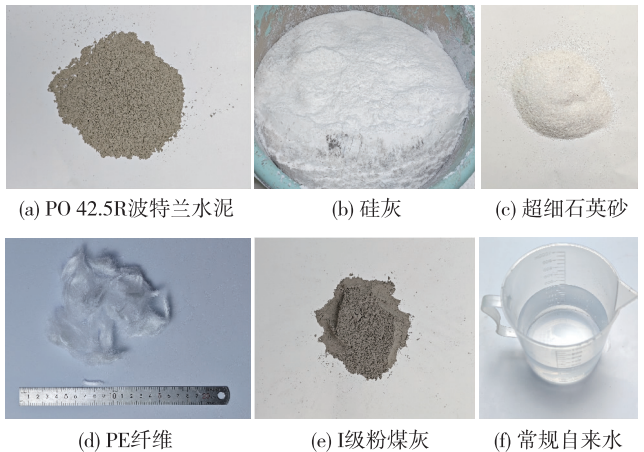


图 1 PE-ECC 原材料  
Fig. 1 PE-ECC raw materials

(1) 水泥

水泥为 PO 42.5R 普通硅酸盐水泥,主要性能参数见表 1,化学组分及体积分数见表 2。

表 1 水泥主要性能指标

Tab. 1 Main performance indicators of cement

| 比表面积<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 初凝时<br>间/min | 终凝时<br>间/min | 抗折强度/MPa   |            | 抗压强度/MPa    |             |
|-----------------------------------------------|--------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|
|                                               |              |              | 3 d        | 28 d       | 3 d         | 28 d        |
| 330                                           | $\geq 100$   | $\leq 300$   | $\geq 4.5$ | $\geq 8.0$ | $\geq 25.0$ | $\geq 48.0$ |

表 2 水泥化学组分及体积分数

Tab. 2 Chemical composition and volume fractions of cement

| SiO <sub>2</sub> | CaO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | 其他   |
|------------------|-------|--------------------------------|------|--------------------------------|-----------------|------|
| 20.59            | 63.78 | 6.12                           | 1.20 | 3.10                           | 2.13            | 3.08 |

(2) 矿物掺和料

粉煤灰等级为 I 级,硅灰中 SiO<sub>2</sub> 含量为 90%。矿物掺和料的化学组分及体积分数见表 3。

表 3 SF 和 FA 化学组分及体积分数 %

Tab.3 Chemical composition and volume fractions of SF and FA

| 类别  | SiO <sub>2</sub> | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | 其他   |
|-----|------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|------------------|------|
| 粉煤灰 | 55.68            | 2.35 | 29.01                          | 0.79 | 3.96                           | —                | 9.21 |
| 硅灰  | 91.90            | 0.87 | 0.86                           | 0.29 | —                              | 1.59             | 4.49 |

(3)细骨料

选用精制石英砂作为细骨料,规格为 80~120 目 (0.125~0.180 mm),密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>。

(4)PE 纤维

所用纤维为江苏仪征化纤纺织有限公司生产的超高分子量聚乙烯 (PE) 短切纤维,其物理力学参数见表 4。

表 4 纤维物理力学参数

Tab.4 Physical and mechanical parameters of fibers

| 纤维种类 | 密度<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 直径<br>/μm | 长度<br>/mm | 长径比 | 抗拉强度<br>/MPa | 弹性模量<br>/GPa |
|------|------------------------------|-----------|-----------|-----|--------------|--------------|
| PE   | 0.97                         | 25        | 18        | 720 | 3 100        | 122          |

(5)外加剂

外加剂采用聚羧酸高效减水剂,其主要性能参数见表 5。

表 5 HPWR 主要性能参数

Tab.5 Main performance parameters of HPWR

| 类型        | 外观    | pH 值    | 泌水率比/% | 减水率/% |
|-----------|-------|---------|--------|-------|
| ZY-HPWR-S | 淡黄色液体 | 5.0~8.0 | ≤60    | ≥25   |

1.2 配合比及试验梁设计

PE-ECC 的配合比如表 6 所示。考虑到纤维含量过高、长径比过大均会造成 PE 纤维在水泥基体中成团而导致材料抗压强度降低,ECC 基体中 PE 纤维体积率控制在 2%以内,ECC-1 和 ECC-2 试件的 PE 纤维体积率分别为 1.8%、2.0%。选取 FA 和 SF 复掺方式,设计并制备 10 个 PE-ECC 试验梁用于冻融循环试验和冻后抗弯承载力试验。考虑冻融试验箱空间有限 (940 mm×540 mm),试验梁尺寸设计为 750 mm×150 mm×100 mm,混凝土保护层厚度为 20 mm。

表 6 试件配合比设计 (与水泥的质量比)

Tab.6 Mix ratio design of specimens (mass ratio to cement)

| 编号   | 水泥 | 粉煤灰 | 硅灰  | 石英砂  | 细/粗骨料 | 水胶比  | 减水剂   |
|------|----|-----|-----|------|-------|------|-------|
| ECC1 | 1  | 1   | 0.2 | 0.83 | —     | 0.24 | 0.026 |
| ECC2 | 1  | 1   | 0.2 | 0.83 | —     | 0.24 | 0.026 |

考虑 ECC 基质的高抗剪切变形能力和抗剥落性能,ECC 构件可减少箍筋用量。为保证试验梁发生抗弯破坏,试验梁纯弯段不设架立钢筋和箍筋,梁截面为

单筋截面<sup>[12]</sup>。箍筋设置在弯剪段,以 50 mm 间距等距排列。PE-ECC 梁的详细尺寸及配筋如图 2 所示。钢筋型号及物理力学性能见表 7。

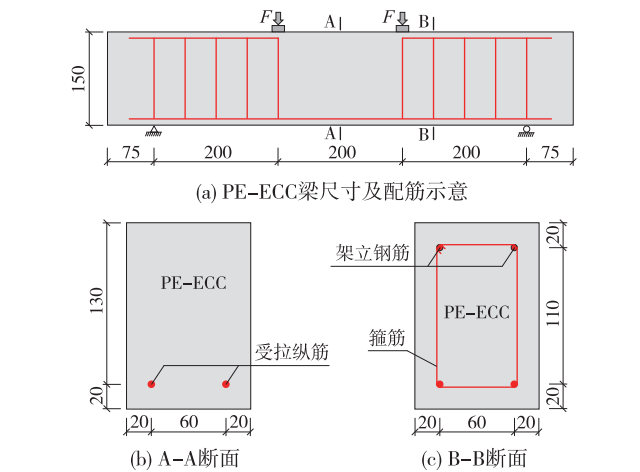


图 2 试验梁尺寸及配筋 (单位:mm)

Fig.2 Dimensions and reinforcement of test beams (unit:mm)

表 7 钢筋参数

Tab.7 Parameters of steel reinforcement

| 钢筋类别 | 型号     | 直径<br>/mm | 截面面积<br>/mm <sup>2</sup> | 屈服强度<br>/MPa | 极限强度<br>/MPa | 弹性模量<br>/GPa |
|------|--------|-----------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 箍筋   | HPB300 | 6         | 28.27                    | 236          | 390          | 109          |
| 架立钢筋 | HRB400 | 8         | 50.27                    | 406          | 576          | 197          |
| 受拉纵筋 | HRB400 | 10        | 78.54                    | 411          | 535          | 203          |

1.3 试验梁制作

PE-ECC 试验梁的制作流程如图 3 所示。选用 HJW-60 型混凝土搅拌机拌和水泥基材料。为减少拌合物内部气泡,采用分层浇筑方式进行梁体的浇筑入模;浇筑前将绑扎好的钢骨架放入木模板中;浇筑混凝土至模具设定高度;振捣密实,直至不出现气泡。试件成型后移至标准环境 (温度 20℃±2℃,相对湿度 95%±5%) 中养护 24 h 后拆模,并继续养护 28 d。

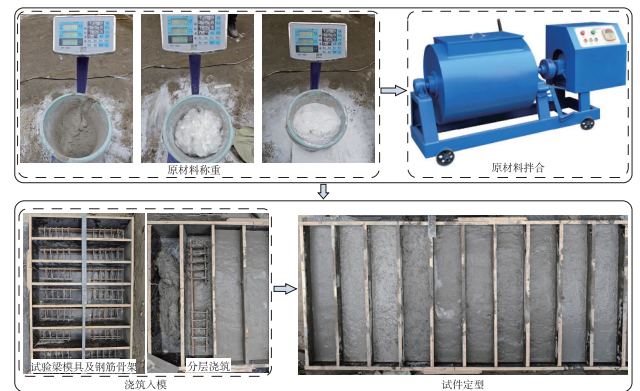


图 3 试验梁制作流程

Fig.3 Preparation process of test beams

## 2 试验方法

### 2.1 冻融循环试验

根据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》开展冻融循环试验。冻融试验设备为混凝土快速冻融试验机,每个冻融周期为 4 h,试件中心的最低和最高温度分别为  $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$  和  $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。设计冻融循环次数分别为 50, 100, 150, 200 次。

### 2.2 PE-ECC 梁抗弯承载力试验

当试验梁达到设计冻融循环次数后,将其从试验机取出擦干,于梁表面喷涂白漆并绘制  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  的网格(图 4),以便于观察试验梁的裂缝拓展情况。

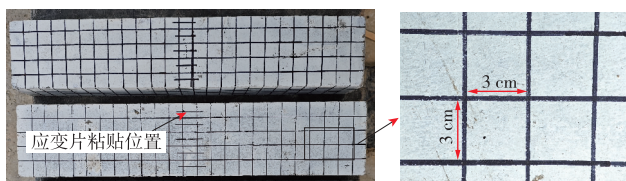


图 4 试验梁网格划分

Fig. 4 Mesh division of test beams

采用微机控制电子万能试验机加载试验梁,加载过程分为预加载和正式加载两阶段。预加载阶段以  $2\text{ kN/min}$  的速率加载至  $10\text{ kN}$ ,以检查加载设备及采集系统是否正常工作。正式加载阶段采用力和位移组合控制方式进行加载。极限荷载前采用力控制,加载速率为  $5\text{ kN/min}$ ;极限荷载后采用位移控制,加载速率为  $2\text{ mm/min}$ ;当外荷载低于极限荷载 80%时终止试验。为保证裂缝充分发展,每级加载完成后稳载  $10\text{ min}$ ,观察和记录裂缝扩展路径。

抗弯承载力试验中采用应变片获取试验梁应变,应变测点布置如图 5 所示。试验梁跨中侧面沿梁高等间距布置 5 个测点,跨中顶部(受压区)和底部(受拉区)沿宽度方向等间距布置 2 个测点。梁的垂直变形由 LVDT 位移传感器测得,支座处梁顶面各布置一个变形测点,以排除支座沉降对位移测试结果的影响。

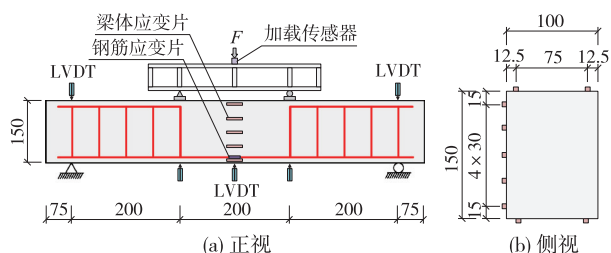


图 5 试验梁测点(单位:mm)

Fig. 5 Measurement points of test beams (unit: mm)

## 3 试验结果与分析

### 3.1 破坏形态及裂缝分布特征

冻融 50 次和 150 次的 ECC 试件典型破坏模式如图 6 所示。由图 6 可见,试件受压区出现部分裂缝,但仍保持较好的完整性,PE 纤维在 ECC 基体中起到增强结构韧性和抗破坏性能的作用,其破坏模式表现为受拉区开裂屈服导致的构件失效。试验梁底部密集分布宽度较小的纵向微裂缝,部分位置裂缝贯通,原因在于冻融作用使试验梁该部位基体损伤累积,当荷载超过开裂阈值后裂缝开始发展。随着荷载进一步增加,裂缝宽度持续增大并超过纤维长度,纤维被拔出从而出现明显的贯通裂缝。

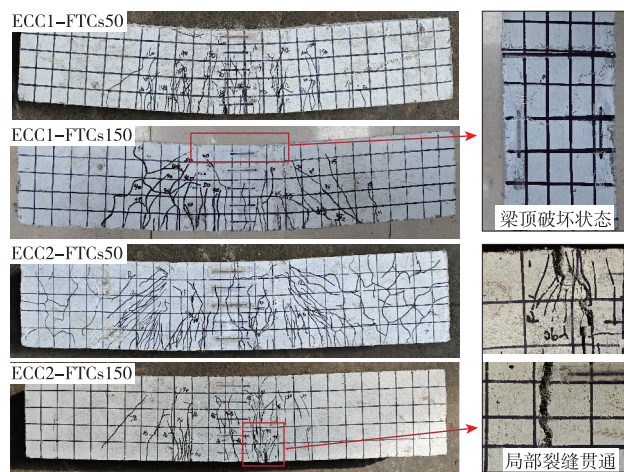


图 6 试验梁典型破坏模式

Fig. 6 Typical failure patterns of test beams

图 7 为试验梁破坏时表面裂缝分布情况。可以看出,两组配比的试验梁均呈现多裂缝破坏模式,以纯弯段竖向裂缝为主,伴随部分弯剪区斜裂缝。相同配比试验梁由于受冻融循环作用的影响不同,其裂缝分布特征存在一定差异:随冻融次数增加,主裂缝减少,裂缝密集程度降低,分布更分散。原因在于冻融过程导致原本的较大裂缝进一步扩展为更细小的裂缝,原本有较大裂缝的区域可能因材料性能退化而导致裂缝发展较为缓慢,甚至停止。随着冻融作用的持续,裂缝可能会沿着不同的方向和位置扩展,导致裂缝不再集中在某一个特定区域,裂缝趋向于均匀分布。这可以看作是材料结构渐进失稳的一种表现。

以 ECC-2 为例,相较于未冻融试件,冻融 50, 100, 150 次和 200 次后,其破坏时主裂缝数量分别降低 16.7%、20.4%、29.6%和 40.7%。表明冻融作用影响基体内部密实度,PE 纤维与基体协同效应受到冻融循环的破坏,导致纤维的分散性降低或者纤维与基体的黏结性减弱,传递荷载和控制裂缝发展能力降低,不

利于基体以多裂缝开裂形式释放荷载。冻融损伤积累可能导致试件局部位置存在薄弱区域,在持续荷载作用下出现贯通裂缝而影响构件承载(如 ECC2-FTCs150)。

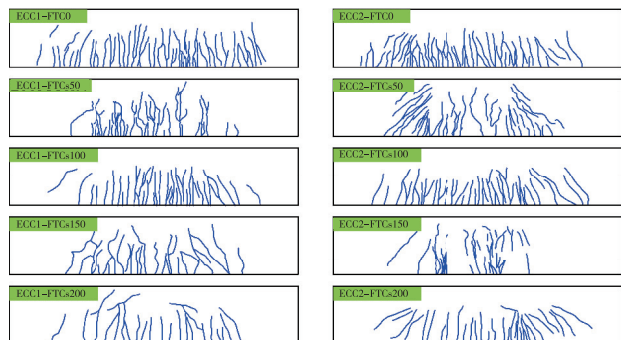


图7 试验梁裂缝分布形态

Fig. 7 Crack distribution patterns of test beams

PE-ECC 梁破坏时的表面裂缝分为竖向裂缝、斜裂缝、多分支裂缝和交叉裂缝。其中,竖向裂缝和斜向裂缝的形成机理与普通混凝土梁相似,分别由纯弯区弯矩作用和弯剪区弯矩、剪力共同作用产生。与普通混凝土梁不同的是,PE-ECC 梁表面还分布着较为明显的多分支裂缝和交叉裂缝。基体内部分布的 PE 纤维桥接作用使得开裂后基体仍能继续承载,但主裂缝的出现使该区域应力集中效应增强,而在原有裂缝的基础上产生新的细小裂缝,从而形成多分支裂缝。由于 PE 纤维在试件内部呈无序分布,不同区域的力学性能存在差异,当两条独立发展的裂缝相交时,交接区外围会由于该区域附近基体材料强度降低而迅速开裂,因而两条相交的裂缝无法发展为单一裂缝,而是形成交叉裂缝。

### 3.2 荷载-变形分析

由于 PE 纤维的桥接作用,PE-ECC 梁在加载过程中逐渐从线弹性阶段转变为塑性阶段,其荷载-位移曲线没有明显屈服点。本文采用“最远点”法确定屈服点<sup>[13]</sup>,如图 8 所示。不同冻融循环次数下各试验梁跨中荷载-位移曲线如图 9 所示。

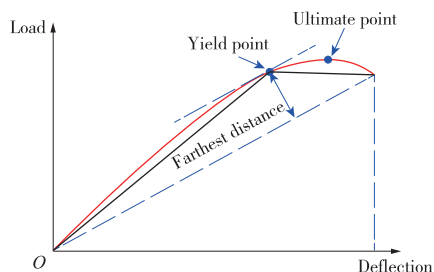
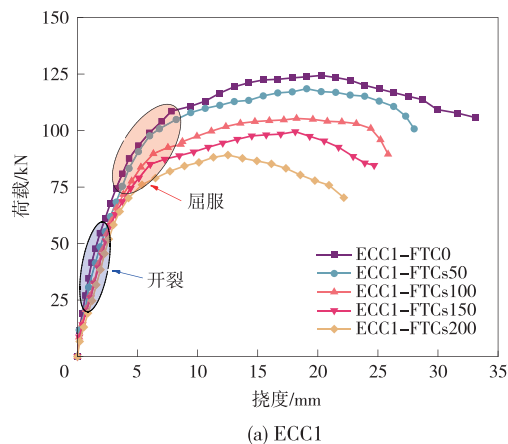


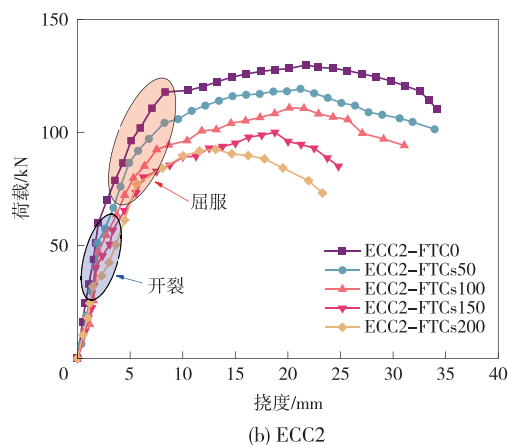
图8 试件屈服点确定方法

Fig. 8 Method for determining yield point of specimens

可以看出,荷载-跨中挠度曲线具有明显的弹性、屈服和下降破坏段,达到屈服荷载和峰值荷载后曲线变化较为平缓,各组试验梁均表现出延性破坏特征。随冻融次数增加,试验梁劣化程度加重,承载力退化,表现为曲线包络面积减小,呈往左下方收缩的趋势;峰值点和屈服点处荷载降低,开裂阶段和屈服阶段提前,峰后曲线斜率变大,表明试验梁弹性模量和吸能变形能力下降,峰后破坏加快,且这种退化程度在 100 次冻融循环后加剧。对比两种配比试验梁可知,相同冻融次数下,ECC2 试件具有更高的屈服阈值和极限承载力,且破坏时变形更大,表明适当提高 PE 纤维含量可以改善构件在冻融作用后的承载能力和变形能力,有利于结构在寒区环境和冻融-荷载耦合作用下的长期服役。



(a) ECC1



(b) ECC2

图9 各冻融周期下 PE-ECC 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 9 Load-midspan deflection curves of PE-ECC under different freeze-thaw cycles

不同冻融次数下试件承载力特征值和跨中挠度分别如图 10、图 11 所示。冻融循环后试验梁承载力特征值均低于未冻融试件,且该差异在 100 次冻融后更明显,表明冻融环境引起基体内部损伤,且这种损伤作用在冻融后期加剧。ECC2 荷载特征值略高

于 ECC1,这是由于基体内部分布的 PE 纤维具有较强的抗拉性能,可通过桥接作用保持基体的整体承载状态,且其自身也可为试验梁提供承载力。在合理的体积掺量范围内( $<2\%$ ),纤维含量越高,提升作用越明显。

相较于未冻融试件,冻融循环 50,100,150,200 次 ECC1 试件极限荷载分别降低 4.7%、15.3%、20.0%、28.3%,极限状态下的挠度分别降低 5.9%、10.1%、10.7%、38.3%;ECC2 试件极限荷载分别降低 8.2%、14.7%、23.0%、28.8%,极限状态下的挠度分别降低 2.5%、7.4%、13.7%、39.6%。可见,当冻融次数小于 100 时提高 PE 纤维含量可降低冻融作用下 ECC 梁劣化程度,而当冻融次数超过 100 时,这种改善作用较为有限。对比相同冻融次数下两种配比试验梁的挠度可知,仅提高 PE 纤维含量来改善构件在四点弯曲荷载作用下的变形能力效果不显著。因此,实际工程应用时若承载能力满足要求,可适当降低纤维含量来提高工程经济性。

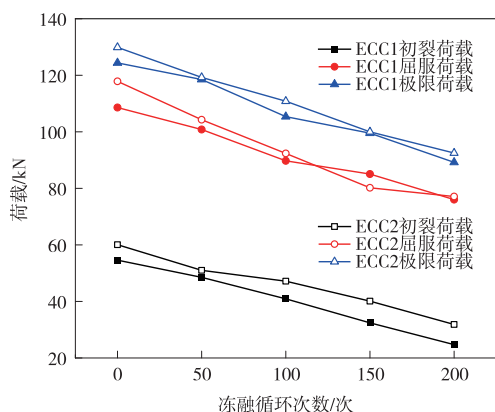


图 10 PE-ECC 试验梁的承载力特征值

Fig. 10 Characteristic values of load-bearing capacity of PE-ECC test beams

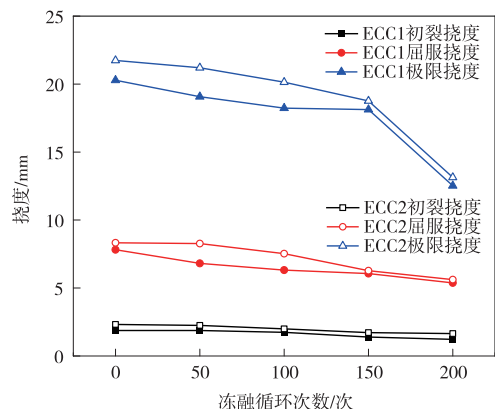


图 11 PE-ECC 试验梁的跨中挠度

Fig. 11 Midspan deflection of PE-ECC test beams

### 3.3 刚度

试验梁刚度定义为初裂荷载与对应挠度的比值,反映钢筋混凝土结构抵抗变形的能力<sup>[14-15]</sup>。根据荷载-挠度曲线计算得到各试验梁刚度,如图 12 所示。由图 12 可见,由于 ECC2 的 PE 纤维含量更高,在相同冻融循环次数下 ECC2 试验梁的刚度略高于 ECC1,但这种差距在达到 100 次冻融循环后逐渐减小。未冻融时 ECC2 刚度比 ECC1 高 4.0%;冻融 100 次后 ECC2 刚度仅比 ECC1 高 0.7%。提高 PE 纤维含量可以使基体内部结构更为紧密,从而有效提升冻融循环早期的构件刚度,但这种改善作用随冻融循环次数增加逐渐减弱。

相较于未冻融试件,冻融循环 50,100,150,200 次 ECC1 试验梁刚度分别下降 11.1%、19.3%、20.3%、30.5%,ECC2 试验梁刚度分别下降 10.4%、21.9%、23.0%、28.7%。可以看出,两组配比试验梁的刚度劣化过程比较相似,劣化程度较为接近,均表现为随冻融循环次数增加逐渐增大。

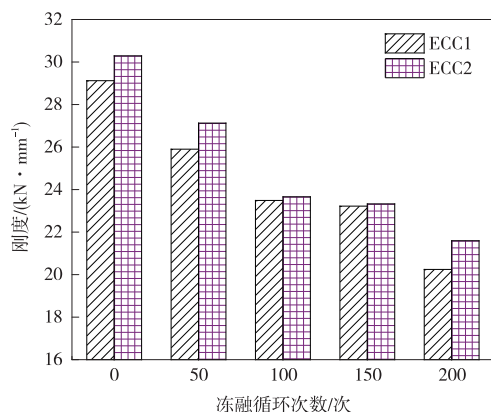


图 12 PE-ECC 试验梁刚度变化

Fig. 12 Stiffness variation of PE-ECC test beams

### 3.4 延性指数

延性反映结构在不显著降低承载能力情况下承受非弹性变形的能力<sup>[16]</sup>。延性结构有利于提高结构的整体性能,在结构失效前提供预警<sup>[17]</sup>。通常采用延性系数评估结构单元的延性<sup>[18]</sup>。

试验梁延性指数随冻融循环次数的变化情况如图 13 所示。由图 13 可发现,PE-ECC 梁延性指数随冻融循环次数增加而减小,但冻融作用延性影响有限,在试验中所有试验梁均表现出典型的延性破坏特征,保持较高的非弹性变形能力。当冻融循环小于 150 次时,相同配比的试验梁延性指数较为接近,且均保持在 4 以上。当冻融循环达到 200 次后,其延性指数降至最低。

采用延性指数比评价冻融循环作用对 PE-ECC 梁

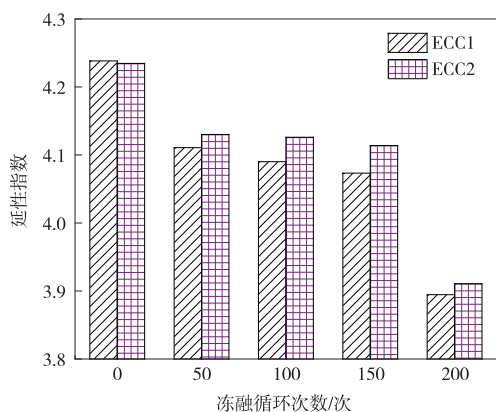


图 13 PE-ECC 试验梁延性指数

Fig. 13 Ductility index of PE-ECC test beams

延性的影响。延性指数比为冻融循环作用试验梁的延性指数与相应控制梁的延性指数之比。

$$\eta = \frac{\mu_N}{\mu_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为延性指数比;  $\mu_N$  为经  $N$  次冻融循环作用的试验梁延性指数;  $\mu_0$  为未冻融试验梁的延性指数。

PE-ECC 试验梁归一化延性指数计算结果如表 8 所示。可以看出, 冻融循环作用导致试验梁延性指数的降低, 但得益于 ECC 材料密实的基体及 PE 纤维的阻裂作用, 冻融作用导致的延性劣化程度有限。在经历 200 次冻融循环后, ECC1 和 ECC2 的延性指数比分别为 91.9% 和 92.4%, 仍高于 90%, 体现了 PE-ECC 材料出色的抗冻性能, 这也与加载试验中观察到的延性破坏特征一致。

表 8 PE-ECC 试验梁延性指数比 %

Tab. 8 Ductility index ratio of PE-ECC test beams

| 编号   | 冻融循环次数/次 |      |      |      |      |
|------|----------|------|------|------|------|
|      | 0        | 50   | 100  | 150  | 200  |
| ECC1 | 100      | 97.0 | 96.5 | 96.1 | 91.9 |
| ECC2 | 100      | 97.5 | 97.4 | 97.1 | 92.4 |

### 3.5 能量吸收能力

能量吸收能力 (EAC) 反映试件在任意位移极限点上单位截面面积所消耗的能量<sup>[19]</sup>。EAC 定义为从零点到直至失效点的荷载—挠度曲线下的面积<sup>[20]</sup>。不同冻融循环下试验梁的 EAC 如图 14 所示。由图 14 可发现, 冻融循环作用导致试验梁能量吸收能力减弱, 200 次冻融循环后 ECC1 和 ECC2 试验梁的 EAC 分别降低至 1 645.1, 1 753.9 kN · mm。相同冻融循环下 ECC2 试验梁 EAC 高于 ECC1, 这主要是因为更高的 PE 纤维含量可以一定程度减弱试件因冻融作用导致的损伤。同时在弯曲荷载作用下, PE 纤维可以很好地

承担试验梁受拉区拉应力, 使基体在开裂后仍可继续承载, 而更高的纤维含量可以更好地发挥该作用。值得注意的是, 冻融 150 次时 ECC2 的 EAC 略低于 ECC1, 这可能源于冻融损伤的随机性, 构件内部存在劣化程度较高的部位, 在荷载作用下该部位成为构件薄弱部位, 从而影响承载和变形能力。

相较于未冻融试件, 冻融循环 50, 100, 150, 200 次 ECC1 试验梁 EAC 分别下降 14.9%、34.2%、41.8%、53.7%; ECC2 试验梁 EAC 分别下降 10.6%、25.9%、47.8%、54.4%。在冻融早期相同冻融循环次数下 ECC2 的 EAC 退化程度低于 ECC1, 而当冻融循环达到 150 次后, 两组试件的退化程度接近。这表明提高 PE 纤维含量可增强 PE-ECC 构件能量吸收能力, 但这种增益效果在大于 150 次冻融循环时减弱。

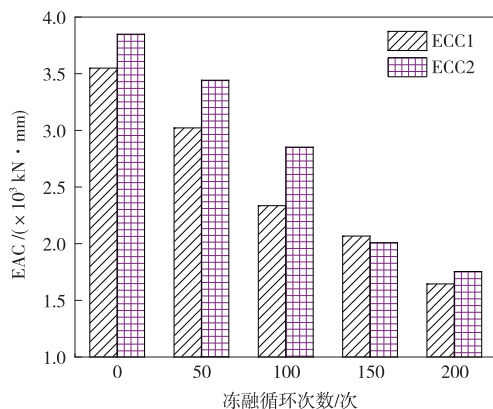


图 14 PE-ECC 试验梁能量吸收能力

Fig. 14 Energy absorption capacity of PE-ECC test beams

### 3.6 跨中截面应变分布特征

试验梁跨中截面应变分布分别如图 15 和图 16 所示。图中横轴代表混凝土应变, 纵轴代表应变测点到梁底部的距离, 每条曲线对应一个荷载级别, 压缩应变为负, 拉伸应变为正。由图 15、图 16 可知, 试验梁中性轴随冻融循环次数的增加不断上移。分析其原因为冻融作用产生的孔隙水压力使 ECC 基体内部产生微裂缝, 进而导致基体密实度减小。同时, PE 纤维为疏水性纤维, 冻融后其与基体粘结受到影响, 桥联作用降低。

观察各试验梁荷载分布特征可知, 加载初始材料处于弹性阶段, 中性轴位置稳定。试验梁底部的 ECC 材料开裂, 但由于 PE 纤维的桥接作用, 开裂后的基体并未退出承载工作, 受拉区屈曲和开裂受到一定程度限制。随着荷载持续增加, 梁底主裂缝逐渐扩展, 跨裂缝纤维断裂, 中性轴开始上升, 受压区应力持续增加。在相同荷载下所有试验梁高度方向的应变基本呈线性分布, 表明仍满足平面截面假定。

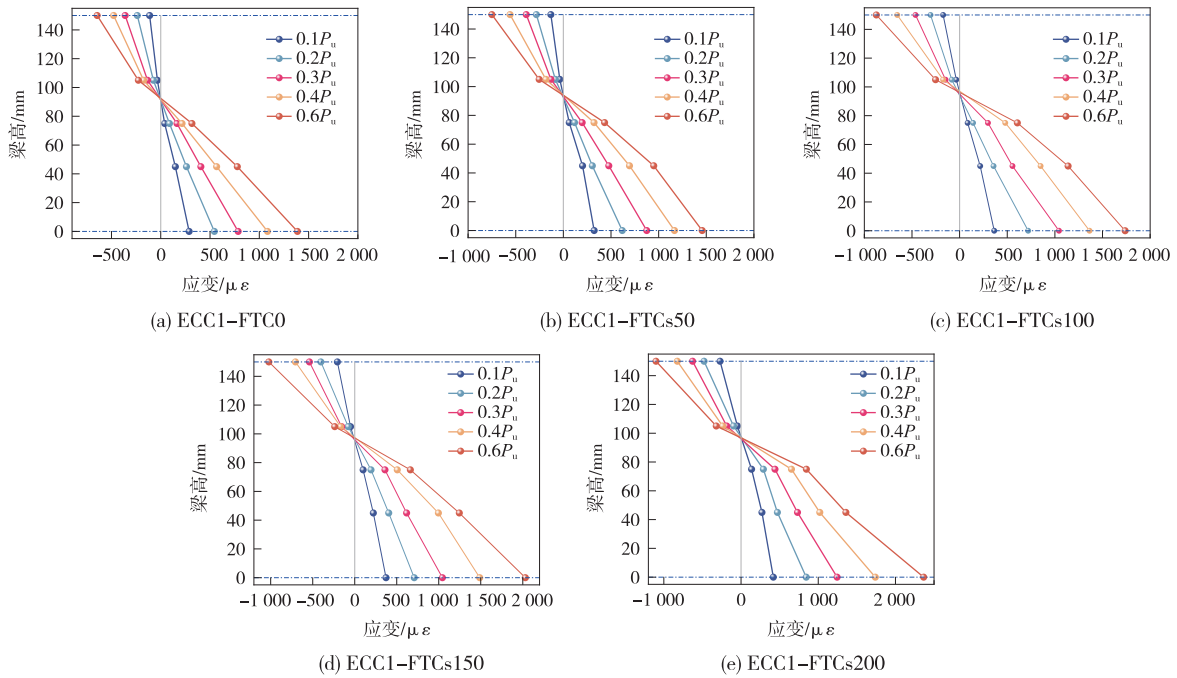


图 15 ECC1 试验梁跨中应变特征

Fig. 15 Midspan strain characteristics of ECC1 test beams

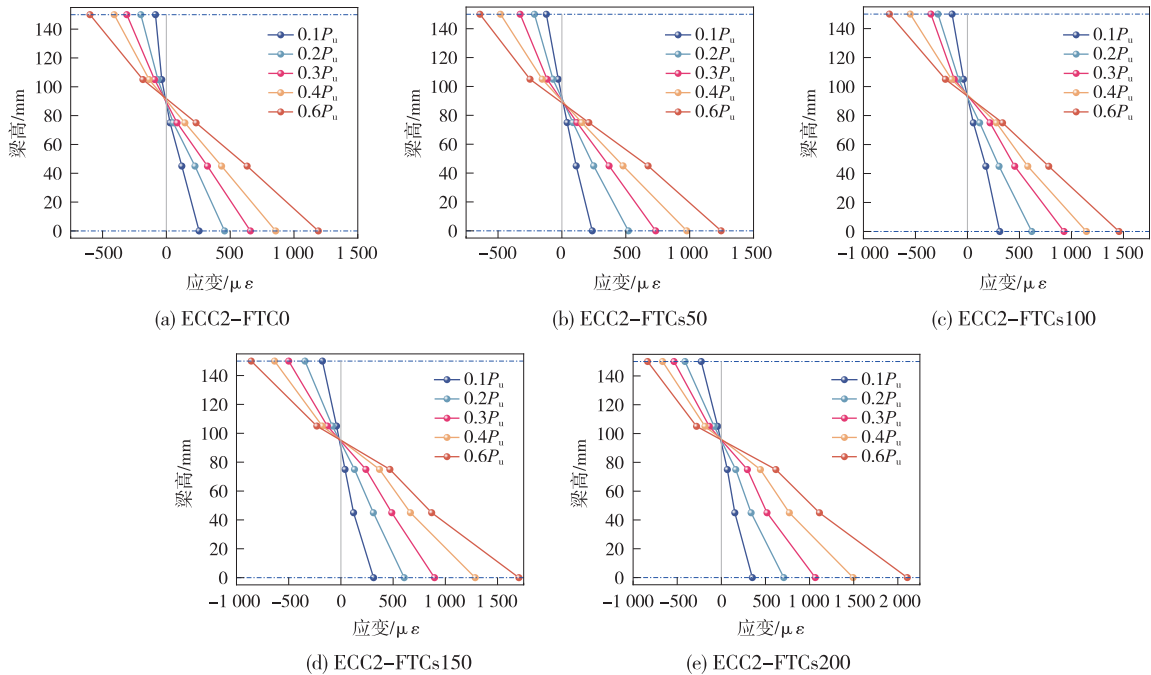


图 16 ECC2 试验梁跨中应变特征

Fig. 16 Midspan strain characteristics of ECC2 test beams

#### 4 PE-ECC 构件抗弯承载力计算模型

##### 4.1 基本假定

不同于普通混凝土梁,得益于 PE-ECC 材料较高应变特性和纤维桥接作用,试验梁受拉区在开裂后可继续承载。分析 PE-ECC 梁抗弯承载力时作以下基本假定<sup>[21-22]</sup>:(1)冻融循环后 PE-ECC 梁截面仍服从平

截面假定;(2)钢筋与 ECC 基体在加载过程中无相对滑移;(3)加载全过程(包含受拉区开裂后)受拉区荷载始终由试验梁受拉区与钢筋共同承担;(4)忽略胶凝材料收缩徐变;(5)基于试验结果,冻融循环后 PE-ECC 材料初裂应力与应变、极限应力与应变均发生改变,但抗拉和抗压应力-应变曲线形状相似,故采用与正常环境下 PE-ECC 梁相同的简化本构模型。

## 4.2 材料本构模型

### (1) PE-ECC 材料应力-应变关系

ECC 材料在单轴拉伸条件下的应力-应变关系可简化为双线性形式,在单轴压缩条件下的应力-应变关系可以简化为直线模型,如图 17 所示。

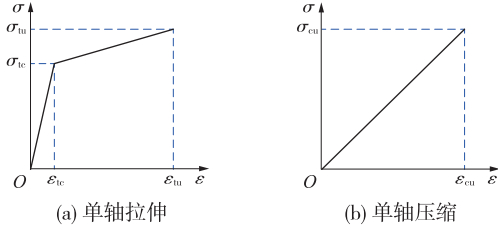


图 17 PE-ECC 本构关系

Fig. 17 Constitutive relationship of PE-ECC

ECC 材料的抗拉应力-应变关系可表示为

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{\sigma_{tc}}{\varepsilon_{tc}} \varepsilon_t & 0 \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tc} \\ \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc}} (\varepsilon_t - \varepsilon_{tc}) & \varepsilon_{tc} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{tc}$  和  $\varepsilon_{tc}$  分别为初裂拉应力和拉应变;  $\sigma_{tu}$  和  $\varepsilon_{tu}$  分别为极限拉应力和极限拉应变。

ECC 材料的抗压应力-应变关系可表示为

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{cu}}{\varepsilon_{cu}} \quad (0 < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu}) \quad (3)$$

式中,  $\sigma_c$  和  $\varepsilon_c$  分别为压缩刚度变化点对应的压应力和压应变;  $\sigma_{cu}$  和  $\varepsilon_{cu}$  分别为极限抗压应力和极限抗压应变。

### (2) 钢筋应力-应变关系

不考虑钢筋应变硬化导致的应力增加,将拉伸应力-应变关系简化为完全弹塑性的双线性模型,如图 18 所示。钢筋拉伸应力-应变关系可表示为

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_e \\ f_y & \varepsilon_e \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $E_s$  为钢筋弹性模量;  $f_y$  和  $\varepsilon_e$  分别为钢筋屈服强度和屈服点应变;  $\varepsilon_{s,u}$  为钢筋极限应变。

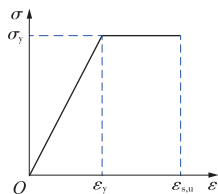


图 18 钢筋本构关系

Fig. 18 Constitutive relationship of steel reinforcement

## 4.3 PE-ECC 梁抗弯承载力计算模型

### (1) 阶段 I : 弹性工作

该阶段 PE-ECC 试验梁截面应力分布呈线性;随荷载增加,试验梁受拉区边缘的拉应力达到开裂值,标志着弹性阶段的结束。该阶段应力-应变分布特征如图 19 所示,其中  $\sigma_c$  为受压区应力,  $\varepsilon_c$  为受压区边缘压应变,  $\sigma_s$  为受拉区钢筋应力,  $\varepsilon_s$  为受拉区钢筋应变,  $x_n$  为受压区高度,  $a_s$  为保护层厚度,  $h$  为截面高度。

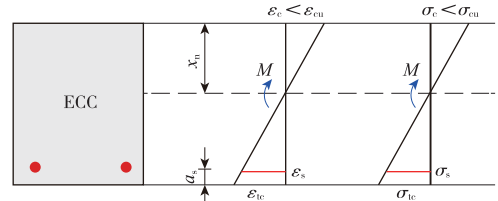


图 19 阶段 I 正截面应力-应变分布

Fig. 19 Stress-strain distribution of normal cross-section in stage I

基于平截面假定可计算得到试验梁受压、受拉区边缘和受拉纵筋的应变分别为

$$\begin{cases} \varepsilon_t = \varepsilon_{tc} \\ \varepsilon_s = \frac{h - a_s - x_n}{h - x_n} \varepsilon_{tc} \\ \varepsilon_c = x_n \varepsilon_{tc} / (h - x_n) \end{cases} \quad (5)$$

则试验梁受拉区 ECC、受压区 ECC 及受拉区钢筋的合力可表示为

$$\begin{cases} F_{t,ecc} = \frac{1}{2} \sigma_{tc} b (h - x_n) \\ F_{c,ecc} = \frac{1}{2} \sigma_c b x_n = \frac{1}{2} \alpha_3 \frac{x_n}{h - x_n} \varepsilon_{tc} b x_n \\ F_s = \sigma_s A_s = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} \frac{h - a_s - x_n}{h - x_n} \varepsilon_{tc} A_s \end{cases} \quad (6)$$

根据截面合力为 0 可解得受压区高度  $x_n$ 。

在 ECC 梁受压区合力点,根据截面合弯矩为 0 可得

$$M_{cr} = F_s (h - a_s - \frac{1}{3} x_n) + \frac{2}{3} F_{t,ecc} h \quad (7)$$

### (2) 阶段 II : 受拉区局部开裂

荷载继续增加,截面受拉区边缘发生开裂并不断扩展,ECC 材料拉伸应变达到极限应变  $\varepsilon_{tu}$ ,受拉区钢筋发生屈服,受压区 ECC 仍满足  $0 < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$ ,受拉区 ECC 仍可继续承受荷载。该阶段正截面应力和应变分布特征如图 20 所示。其中,  $x_{cr}$  为 ECC 材料受拉开裂区高度。

根据平截面假定有

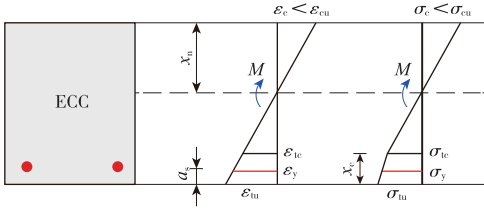


图 20 阶段 II 正截面应力-应变分布

Fig. 20 Stress-strain distribution of normal cross-section in stage II

$$\begin{cases} \varepsilon_t = \varepsilon_{tu}, \\ \varepsilon_s = \varepsilon_y, \\ \varepsilon_c = x_n \varepsilon_{tc} / (h - x_n - x_c) = x_n \varepsilon_{tu} / (h - x_n) \end{cases} \quad (8)$$

由此可计算得到开裂区高度为

$$x_c = (h - x_n) \left(1 - \frac{\varepsilon_{tc}}{\varepsilon_{tu}}\right) \quad (9)$$

此时, ECC 与受拉纵筋的合力可分别表示为

$$\begin{cases} F_{t,ecc} = \frac{b}{2} \sigma_{tc} (x_c + h - x_n) + \frac{b}{2} x_c (\sigma_{tu} - \sigma_{tc}) \\ F_{c,ecc} = \frac{b}{2} \sigma_c x_n = \frac{b}{2} x_n \alpha_3 \frac{x_n}{h - x_n} \varepsilon_{tu} \\ F_s = \sigma_y A_s \end{cases} \quad (10)$$

同理, 根据截面合力为 0 可解得受压区高度  $x_n$ 。

在梁受压区合力点, 根据截面合弯矩为 0 可得

$$M_y = F_s (h - a_s - \frac{1}{3} x_n) + \frac{2}{3} f_1 (h - x_c) + f_2 (h - \frac{1}{2} x_c - \frac{1}{3} x_n) + f_3 (h - \frac{1}{3} x_c - \frac{1}{3} x_n) \quad (11)$$

$$\text{其中 } f_1 = \frac{b}{2} \sigma_{tc} (h - x_n - x_c); f_2 = \sigma_{tc} b x_c; f_3 = \frac{b}{2} (\sigma_{tu} -$$

$$\sigma_{tc}) x_c; F_{t,ecc} = f_1 + f_2 + f_3。$$

(3) 阶段 III: 构件破坏

随着荷载进一步增加, 截面受拉区和受压区边缘 ECC 材料分别达到极限应变  $\varepsilon_{tu}$  和  $\varepsilon_{cu}$ , 构件发生破坏。该阶段受拉区 ECC 材料为弹塑性状态, 其中弹性区边缘 (即应变突变点) 受拉应变达到开裂应变  $\varepsilon_{tc}$ ; 受拉纵筋仍为屈服应变  $\varepsilon_y$ 。该阶段截面应力应变分布特征如图 21 所示。

根据平截面假定有

$$\begin{cases} \varepsilon_t = \varepsilon_{tu} \\ \varepsilon_s = \varepsilon_y \\ \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (12)$$

基于受拉区 ECC 应力突变点 ( $\varepsilon_{tc}$ ) 和截面边缘 ( $\varepsilon_{tu}$ ) 应变的相似关系可解得开裂区高度

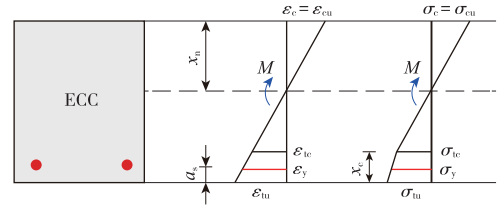


图 21 阶段 III 正截面应力-应变分布

Fig. 21 Stress-strain distribution of normal cross-section in stage III

$$x_c = h - x_n - \frac{\varepsilon_{tc}}{\varepsilon_{tu}} (h - x_n) \quad (13)$$

则各部分合力分别为

$$\begin{cases} F_{t,ecc} = \frac{b}{2} \sigma_{tc} (x_c + h - x_n) + \frac{b}{2} x_c (\sigma_{tu} - \sigma_{tc}) \\ F_{c,ecc} = \frac{b}{2} \sigma_{cu} x_n \\ F_s = \sigma_y A_s \end{cases} \quad (14)$$

同理, 根据截面合力为 0 可解得受压区高度  $x_n$ 。

在 ECC 受压区合力点, 根据截面合弯矩为 0 可得

$$M_u = F_s (h - a_s - \frac{1}{3} x_n) + \frac{2}{3} f_1 (h - x_c) + f_2 (h - \frac{1}{2} x_c - \frac{1}{3} x_n) + f_3 (h - \frac{1}{3} x_c - \frac{1}{3} x_n) \quad (15)$$

## 5 结论

本文设计并开展 PE-ECC 构件冻融循环试验和冻后抗弯承载力试验, 以破坏特征、裂缝分布形态、荷载-变形关系、刚度、延性指数为关键指标分析冻融循环作用对构件承载性能的影响规律。主要结论如下。

(1) 试验梁破坏时保持了较好的完整性, 呈现出明显的多裂缝开裂特征。冻融作用使得 PE 纤维与基体的协同效应减弱, 传递荷载和控制裂缝发展的能力降低, 不利于基体以多裂缝开裂形式释放荷载。随冻融次数的增加, 主裂缝数量减少, 裂缝密集程度降低, 分布更为分散。

(2) 试验梁荷载-跨中挠度曲线具有明显的弹性、屈服和下降破坏段, 其将加载破坏进程可分为弹性工作、受拉区局部开裂和屈服破坏 3 个阶段。冻融作用将导致试验梁承载力出现不同程度的退化, 且峰后破坏演化过程加快。

(3) 劣化程度随冻融周期的延长而增加, 提高 PE 纤维含量可以使基体内部结构更为紧密, 从而一定程度上提升冻融早期的构件刚度, 但这种改善作用随冻融周期的增加逐渐减弱。冻融作用对 PE-ECC 梁延性

的影响作用较为有限,所有试验梁均保持了较高的非线性变形能力。冻融循环作用会导致试验梁 EAC 减弱,且 EAC 损失程度随冻融周期增加而加剧。

(4)中性轴随冻融周期的延长而不断上移。冻融循环作用后,PE-ECC 试验梁的跨中截面应变分布仍符合平截面假定,推导了各阶段承载力计算公式。

(5)基于 PE-ECC 试验梁渐进破坏特征,将弯曲荷载作用下的构件承载过程分为弹性工作、受拉区局部开裂和构件破坏三阶段,提出弯曲荷载作用下 PE-ECC 梁各阶段承载力计算方法。

#### 参考文献:

- [1] 方永浩,陈焱,肖婷. 冻融作用下硬化水泥浆体和混凝土结构的变化[J]. 材料导报,2007,21(4):157-159.  
FANG Yonghao, CHEN Ye, XIAO Ting. Effect of Freeze-thaw on the Structure of Hardened Cement Paste and Concrete[J]. Materials Review, 2007, 21(4): 157-159.
- [2] 秦晓川,孟少平,涂永明. 高强混凝土材料细观冻融损伤与抗压强度的关系[J]. 材料导报,2017,31(2):117-120.  
QIN Xiaochuan, MENG Shaoping, TU Yongming. Relationship between Mesoscopic Freeze-thaw Damage and Compressive Strength of High-strength Concrete Material [J]. Materials Review, 2017, 31(2):117-120.
- [3] 屈锋,牛荻涛,杨宇曦. 盐冻环境下钢筋混凝土构件性能研究[J]. 材料导报,2015,29(24):87-91.  
QU Feng, NIU Ditao, YANG Yuxi. Study on the Performance of Reinforced Concrete Members under Salt Freezing Environment[J]. Materials Review, 2015,29(24):87-91.
- [4] LI V C, WANG S, WU C. Tensile Strain-hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC)[J]. ACI Materials Journal, 2001,98(6):483-492.
- [5] MA H Q, YI C, WU C. Review and Outlook on Durability of Engineered Cementitious Composite (ECC)[J]. Construction and Building Materials, 2021,287:122719.
- [6] YUN H D, KIM S W, LEE Y O, et al. Tensile Behavior of Synthetic Fiber-reinforced Strain-hardening Cement-based Composite (SHCC) after Freezing and Thawing Exposure[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011,67(1/2):49-57.
- [7] LU C, YUAN Z, YANG C, et al. Tensile Properties of PVA and PE Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites Containing Coarse Silica Sand [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 75:106913.
- [8] YU K Q, DING Y, LIU J P, et al. Energy Dissipation Characteristics of All-grade Polyethylene Fiber-reinforced Engineered Cementitious Composites (PE-ECC) [J]. Cement and Concrete Composites, 2020,106:103459.
- [9] ZHANG Q, MA Y, CHENG M, et al. Study on Mechanical Properties of SAC Modified ECC Material and Insufficient Reinforcement of Lining[J]. Construction and Building Materials, 2023,406:133450.
- [10] 张峰. 纤维对 ECC 抗压和抗拉性能的影响研究[J]. 山西交通科技,2024(4):17-21.
- [11] LIU L F, XIAO J, WU Z J. The Effect of Fiber Content on the Static and Dynamic Performance of PE-ECC[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024,20:e03041.
- [12] ZHANG P, SU Y L, SHANG J Q, et al. Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with CFRP Sheets and ECC Material[J]. Structures, 2024,61:106015.
- [13] 冯鹏,强翰霖,叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学,2017,34(3):36-46.  
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and Definition on Yield Points of Materials, Members and Structures[J]. Engineering Mechanics, 2017,34(3):36-46.
- [14] HOSEN M A, JUMAAT M Z, ALENGARAM U J, et al. CFRP Strips for Enhancing Flexural Performance of RC beams by SNSM Strengthening Technique [J]. Construction and Building Materials, 2018,165:28-44.
- [15] ZHANG C C, GUAN X C, CHEN X, et al. Effect of Self-healing Behavior and Self-healing Technologies on the Structural Characteristics of Cracked RC/ECC Composite Beams[J]. Construction and Building Materials, 2024,411:134575.
- [16] MENG D, LEE C K, ZHANG Y X. Flexural and Shear Behaviours of Plain and Reinforced Polyvinyl Alcohol - engineered Cementitious Composite Beams[J]. Engineering Structures, 2017,151:261-272.
- [17] HOSEN M A, JUMAAT M Z, ALENGARAM U J, et al. Sustainable Palm Oil Fuel Ash Mortar Used as Partial Adhesive Replacement in Flexurally Strengthened RC Beams [J]. Construction and Building Materials, 2019,226:507-523.
- [18] LIU L, YU S S, MA X P. Flexural Capacity of RC Beams Reinforced with ECC Layer and Steel Plate[J]. Journal of Building Engineering, 2023,65:105781.
- [19] GOPALARATNAM V S, GETTU R. On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes[J]. Cement and Concrete Composites, 1995,17(3):239-254.
- [20] QIN F J, ZHANG Z G, YIN Z W, et al. Use of High Strength, High Ductility Engineered Cementitious Composites (ECC) to Enhance the Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Building Engineering, 2020,32:101746.
- [21] QIN F J, WEI X Y, LU Y F, et al. Flexural Behaviour of High Strength Engineered Cementitious Composites (ECC)-reinforced Concrete Composite Beams[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023,18:e02002.
- [22] 徐港,李运攀,潘琪,等. 盐冻环境下钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2014,36(3):86-91.  
XU Gang, LI Yunpan, PAN Qi, et al. Experimental Analysis on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beam in Salt-frost Environment[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2014,36(3):86-91.

(编辑:王婷)