

Research on the Performance Evolution Mechanism and Interface Synergistic Effect of ECC High Ductility Concrete Materials in Structural Reinforcement

Bin Wen Jianfa Jia Han Li Tengfei Ma Xianliang Wu

Hebei Luhang Urban and Rural Development Group Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 150026, China

Abstract

Structural reinforcement is a key link in enhancing the safety and durability of existing buildings. Traditional external concrete, FRP and steel plate reinforcement often leads to problems such as interface cracking and insufficient ductility. ECC with high ductility and multi-crack refinement characteristics shows obvious advantages in reinforcement, but the collaborative mechanism of its microcrack evolution, fiber traction and interface transition zone still needs in-depth research. Based on the multi-scale force-bearing behavior of ECC, this paper analyzes the force transmission paths among fibers, matrix and interface transition zones, constructs a performance evolution model, and summarizes the action laws of ECC in interface strengthening, ductility improvement and load-bearing capacity enhancement in combination with component reinforcement tests, and proposes reinforcement strategies under different damage grades. Research shows that ECC can enhance the collaborative force-bearing capacity between the reinforcing layer and the base by reshaping the tensile force transmission path and refining the crack distribution, providing theoretical support and methodological reference for the design and application of high ductility materials in structural reinforcement.

Keywords

ECC High ductility concrete Structural reinforcement Interface transition zone Crack control Synergy

结构加固中 ECC 高延性混凝土材料性能演化机理与界面协同作用研究

温彬 贾建法 李汉 马腾飞 吴羨亮

河北路航城乡发展集团有限公司, 中国 · 河北 邢台 150026

摘 要

结构加固是提升既有建筑安全与耐久性能的关键环节, 传统外包混凝土、FRP 和钢板加固常出现界面开裂和延性不足等问题。具有高延性和多裂缝细化特征的 ECC 在加固中展现明显优势, 但其微裂纹演化、纤维牵引与界面过渡区协同机制仍需深入研究。本文基于 ECC 的多尺度受力行为, 分析纤维、基体与界面过渡区的传力路径, 构建性能演化模型, 并结合构件加固试验总结 ECC 在界面增强、延性提升和承载能力改善方面的作用规律, 提出不同损伤等级下的加固策略。研究表明, ECC 可通过重塑拉力传递路径与细化裂缝分布, 提高加固层与基底的协同受力能力, 为结构加固中高延性材料的设计与应用提供理论支持与方法参考。

关键词

ECC; 高延性混凝土; 结构加固; 界面过渡区; 裂缝控制; 协同作用

1 引言

既有结构在长期荷载、环境侵蚀及偶发灾害作用下容易出现开裂、剥落、承载能力下降等问题, 亟须进行有效加固。在加固材料体系中, 普通混凝土存在脆性断裂、裂缝不可控及界面黏结不足等弱点; 纤维增强复合材料 (FRP) 虽具备较高强度, 但与混凝土界面粘结性能弱、受力模式不兼容; 钢板加固则易出现腐蚀、界面剥离等耐久性问题。相比

之下, ECC 具有高延展性、可控制多裂缝开展及良好界面适应性, 能够显著改善共同受力状态, 使加固层与原结构形成更稳定的协同体系。然而, ECC 的性能优势来源于其纤维与基体、界面过渡区结构、裂缝演化机制的协同作用。在结构受力过程中, 裂缝起裂、扩展及定向分布的形成机制尚需多尺度力学视角研究。同时, ECC 与原混凝土之间的界面传力路径、温湿耦合影响及加载过程中界面组织演变规律, 是影响加固效果的重要因素。因此, 深入探讨 ECC 在结构加固中的性能演化机理与界面协同作用, 是推动 ECC 加固设计体系成熟的关键。

【作者简介】温彬 (1974–), 男, 中国河北宁晋人, 工程师, 从事建筑工程研究。

2 ECC 材料组成特征与力学性能演化机理

2.1 纤维增强体系的拉 - 拉传力机制

ECC 的本质在于纤维与基体间的桥联作用。纤维在受拉过程中通过拔出、滑移与界面黏附等机制分担荷载，使裂缝数量增加但宽度受控在微米级。纤维与基体之间的界面黏结强度、纤维端部形貌与分布取向直接决定材料的应变硬化能力。研究表明，纤维含量在 2% 左右可维持多缝开展与拉伸硬化性能的平衡，而过高的纤维含量会导致基体团聚与孔隙率升高。

2.2 基体微结构与裂缝细化控制机制

ECC 基体采用高掺量粉煤灰、硅灰及其他超细矿物掺合料，通过“微填充效应”与“次级水化反应”使界面过渡区（ITZ）显著致密化，减少毛细孔隙和微缺陷的连通性，从而提高抗裂能力。裂缝细化行为本质上受控于裂缝尖端能量释放率与纤维牵引反力之间的动态平衡。当裂缝尖端达到扩展临界能量时，纤维桥联力及时参与承载，使裂缝扩展被阻滞，并在周围区域产生新的细微裂缝，实现裂缝由单一集中发展向多点分布扩散。此“裂缝分散效应”使 ECC 在受力后形成微米级裂缝网络，而非传统混凝土中典型的主裂缝贯通模式。该机制有效避免应力集中与断裂失稳，使材料在高应变下仍保持力学连续性，从而提升延性、抗冲击和抗疲劳能力。

2.3 应变硬化阶段的微观响应过程

ECC 在受拉加载初始阶段表现为与普通混凝土相似的线弹性响应，其后在达到初裂点后进入应变硬化阶段。此阶段中，基体逐渐退出主导承载作用，纤维桥联力承担越来越多的外部荷载，从而使材料在较大应变范围内保持应力增长趋势。随着应变增加，裂缝数量不断增多但裂缝宽度始终受控在较小范围内，使局部损伤得以扩散并与周围材料形成协调变形。直至纤维界面黏附能力或纤维强度达到极限，材料才进入应变软化阶段。该从微裂纹萌生到应力均匀再分配的连续过程，构成 ECC 避免脆性断裂的本质机理。应变硬化阶段的存在不仅提高材料延性，也为其在结构加固中提供缓冲与能量耗散能力，形成良好的协同受力效果。

3 ECC 与原混凝土界面过渡区特性分析

3.1 界面过渡区（ITZ）组织结构特征

ECC 与原混凝土基体结合后，在两者接触区域形成特征显著的界面过渡区（ITZ）。该区域微结构的致密性、孔隙率分布及水化产物形态直接影响复合体系的整体黏结性能。SEM 观察显示，ECC 基体中细颗粒掺合料使水化产物在界面区域形成连续性较好的桥联结构，减少了典型混凝土界面中常见的孔隙富集与弱化带现象。此外，纤维端部在界面区产生牵引与咬合作用，可进一步增强界面结构完整性，使界面由潜在的薄弱层转变为应力协同传递的重要区域。这为 ECC 加固体系提供了优于传统水泥砂浆修补材料的黏结优势。

3.2 界面黏结行为的力学传递模式

ECC 与原混凝土界面在受力过程中呈现由化学键合、摩擦力传递和机械咬合作用共同驱动的复杂黏结机制。界面在加载初期表现为弹性黏结阶段，剪切滑移较小；随着荷载提高，界面进入黏结滑移阶段，摩擦与界面粗糙度共同影响剪切刚度变化；在进一步加载下，界面进入软化阶段，纤维牵引可延缓完全脱粘，维持一定残余承载能力。ECC 材料中多裂纹细化行为可使界面应力沿宽域扩散，避免单点应力集中，显著提高界面破坏延迟性和能量耗散效率。因此，界面并非受力薄弱点，而是整体力学协同的关键节点。

3.3 温湿耦合与老化对界面性能的影响

界面性能在服役过程中会受到温度变化、湿度波动及外部侵蚀介质等因素影响。温湿耦合作用主要通过改变水化产物晶型结构及界面微裂纹数量影响黏结强度。长期耐久性试验结果显示，在多次干湿循环和冻融环境下，ECC 与混凝土界面仍能保持较高黏结稳定性，界面劣化速率明显低于普通砂浆或普通修复材料体系。这得益于 ECC 的致密基体结构与裂缝自愈潜能，可通过再水化产物填补微裂纹，阻断劣化扩展路径。由此可见，ECC 在界面耐久性方面具有显著优势，可长期维持复合加固体系的可靠性和力学性能一致性。

4 ECC 在结构加固中的力学协同作用

4.1 受弯构件加固的承载能力提升机理

受弯构件的主要破坏形式通常表现为受拉区裂缝快速扩展与混凝土脆性断裂，拉区混凝土在开裂后难以继续承担拉力，导致构件整体延性不足。将 ECC 加固层布置于受拉区后，材料的多裂缝细化与延性应变硬化特征能够形成连续拉应力传递路径，使拉区受力由集中向分布形式转变。其内在机理在于纤维牵引作用能够在裂缝起裂后仍维持有效的拉力传递，避免单一主裂缝导致构件失效。ECC 的微裂缝形成可有效降低裂缝尖端的应力集中，延缓裂缝贯通，并通过多裂缝协同分担拉应力，使受拉区在较大应变范围内仍保持承载能力。弯曲加载试验结果显示，加固构件的屈服点后承载能力提升显著，延性系数可达到原构件的 2~3 倍，破坏形态由脆性断裂向延性弯曲压溃转变。同时，ECC 加固层的变形协调性使截面应力重分布能力增强，构件跨中位移与塑性转角能力提升更为明显，从而实现承载力、延性与耗能能力的综合提升，为延长结构服役周期提供可靠支撑。

4.2 受剪构件加固的裂缝抑制机制

受剪构件常出现斜裂缝迅速开展及剪切脆性破坏，其破坏发生过程短、预警不足。ECC 材料的细裂缝开展特征能够在受剪区域形成密集裂缝网格，使剪应力由单一斜裂缝承载转为多裂纹协同传递。微裂缝宽度可被控制在 40~80 μm 范围内，这种微裂缝分散效应有效延缓斜裂缝拔增长速度，限制裂缝贯通。ECC 中纤维的拉 - 拉传力机制能够在裂缝形成后依然承担部分剪切抗拉应力，抑制裂缝进一步扩

展,改善构件的塑性耗能能力。试验研究表明,采用 ECC 加固受剪构件后,构件的剪切破坏形态由陡直贯通裂缝转为细密多裂纹形态,极限剪切承载力可提升 20%~50%,疲劳抗裂寿命显著延长。此外,ECC 替代传统抗剪箍筋或与箍筋协同作用,可优化剪切应力场,降低局部应力集中,提升构件的抗震延性。该机制为解决受剪构件脆性失效提供了有效途径。

4.3 受压构件中加固层的协同约束作用

对于受压构件,核心混凝土在受力后往往发生横向膨胀,导致应力集中与脆性压溃破坏。ECC 加固层通过其较高的拉伸韧性与包覆能力,可在受压区形成外向约束,使横向变形受到限制,从而提高构件的约束效应与抗压性能。加固层的存在使核心混凝土受力状态由单向受压转变为三向受压,有效提高了峰值强度与应变能力。三轴受压模型试验显示,ECC 包覆后,构件破坏形态由脆性碎裂状向缓慢压溃状转变,应力—应变曲线表现为峰后下降更为平缓,韧性系数显著提升。ECC 的裂缝细控能力保证加固层不会在受力初期产生贯通裂缝,有利于加固层持续提供约束作用;同时,界面黏结性能的提高使得加固层与核心混凝土协同变形,避免出现界面剥离与失效。通过应力场重分布机制,ECC 提升了构件整体稳定性、承载储备与耐久性能,特别适用于老旧结构柱、受压剪柱及高轴压比构件的延寿与抗震加固。

5 工程应用与加固设计建议

5.1 不同损伤等级结构的加固策略

既有结构损伤形态、开裂范围和承载能力衰减程度存在显著差异,加固方案需根据损伤等级分级制定,以实现材料性能与结构需求的合理匹配。对于轻微开裂或表层剥蚀的构件,损伤主要集中于混凝土保护层内部,承载能力未出现明显衰减,此时应以恢复耐久性与抑制裂缝扩展为目标,宜采用 ECC 薄层表面修复方式,通过表层微裂纹闭合与界面致密化改善构件服务性能。对于中度损伤构件,如出现跨截面显性裂缝或局部承载能力下降,可采用 ECC 叠合层加固策略,使 ECC 与原构件形成整体受力体系。叠合层不仅提供额外拉区承载能力,还能通过多裂缝细控抑制原裂缝进一步扩展,提高变形能力与延性储备。对于严重破损或承载能力明显不足的构件,仅依靠 ECC 难以满足承载要求,应采用 ECC 与钢板、型钢或 FRP 等复合加固体系,利用多材料协同效应实现承载力、延性与抗疲劳性能的综合提升。

5.2 加固层与基底的界面处理要求

加固层与原混凝土基底之间的界面性能直接决定复合

受力体系的协同能力。界面若存在光滑层、弱化层或水化产物脱落,将导致滑移、脱层甚至加固失败,因此界面处理是 ECC 加固系统中不可忽视的关键环节。对原混凝土表面应采用机械凿毛、喷射磨蚀或水冲打毛等方式去除表层污染物、风化层与弱界面层,形成一定粗糙度以增强机械咬合作用。施工前应进行适度预湿,使界面孔隙中含水量达到稳定状态,以防吸水过快影响 ECC 水化与粘结界面致密度。为进一步增强界面结合,可采用聚合物界面剂、水泥基渗透型界面材料或胶结性能增强剂形成化学键合与微结构过渡层,从而降低界面处应力集中概率,提高粘结剪切强度。研究表明,界面粗糙度、含水状态及界面剂组成共同影响界面剪切性能与耐久性。

5.3 材料配合比及施工控制要点

ECC 在结构加固中的性能发挥高度依赖材料配合比与施工控制。水胶比直接影响基体致密性与纤维界面粘结性能,一般控制在 0.25~0.30 区间以确保适度流动性与高强度界面结构。纤维体积分数需在可实现应变硬化与裂缝细化的范围内优化,一般取 2.0% 左右能兼顾工作性与力学性能;纤维分布均匀性受分散剂、减水剂和搅拌制度影响,若纤维团聚将导致裂缝控制能力下降,因此需通过分段投料、低速预混与高速剪切混合等方式确保纤维分布均匀。施工振捣应避免过度处理,以防止纤维定向与分离。

6 结语

ECC 的高延性、多裂缝细化及界面匹配性能使其成为结构加固领域具有前景的重要材料。通过微结构演化机理与界面协同作用的深入研究,可促进 ECC 加固理论体系完善,为既有结构的安全性提升与耐久性延长提供可靠支撑。未来,应在长期耐久性、复杂环境耦合效应及大规模工程应用标准化体系方面继续推进研究,实现从材料性能研究向加固设计规范与工程实践应用的系统化发展。

参考文献

- [1] 陈宇,宋学伟,吴佳梁.抗收缩ECC单轴拉压力学性能及损伤本构模型[J].硅酸盐通报,2024,43(09):3137-3148.
- [2] 李睿寅.FRP网格-ECC预制管与内部混凝土界面黏结性能研究[D].石家庄铁道大学,2025.
- [3] 杨彦东,卢博,田浩,等.超高延性混凝土(ECC)加固砌体墙抗剪性能的数值分析[J].材料导报,2024,38(S1):269-275.
- [4] 周峰.FRP网格增强ECC加固损伤钢筋混凝土梁抗弯性能研究[D].广西科技大学,2022.
- [5] 徐若兵.ECC中柔性纤维空间分布及其对力学性能影响的研究[D].福州大学,2023.