DOI:10.11918/202506056

工程水泥基复合材料与钢筋黏结性能试验

赵卫平[1,2],陈嘉龙[1],徐 旸[3],张龙泉[1],李雅琦[1]

(1.中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院,北京 100083;2.市政基础设施大模型与韧性提升技术北京市重点实验室,北京 100083;3.中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所,北京 100081)

摘 要:工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite,ECC)是一种在拉伸荷载下具有应变硬化和多缝开裂特性的高性能材料,为提供ECC应用于受力构件的界面黏结理论依据,对21个钢筋ECC试件进行两端对拉试验,考察ECC强度等级、黏结长度及聚乙烯醇(polyvinyl alcohol,PVA)纤维体积掺量对黏结性能的影响。试验过程中,采用数字图像相关(digital image correlation,DIC)技术对ECC表面的应变分布进行非接触式全场监测。同时,通过钢筋铣槽贴应变片和分布式光纤的方法,获取钢筋应变和黏结应力沿锚固长度的分布曲线。结果表明:纤维的桥联作用有效抑制了钢筋ECC试件中微裂缝的扩展,试件最终破坏时仅出现1~2条平整的横向裂缝;两端对拉试件的受力过程可分为弹性阶段、裂缝形成阶段和稳态开裂阶段;在其他参数相同的情况下,钢筋ECC试件中基体材料的抗拉贡献显著高于钢筋混凝土试件;在相同的应变水平下,ECC承担的荷载随其强度等级的提高而增大,随黏结长度的增大而减小,提高PVA纤维体积掺量对ECC抗拉贡献的提升有限,掺量达2.5%时才有明显改善。相较于传统的钢筋混凝土构件,钢筋ECC构件表现出更优异的裂缝控制能力和界面黏结性能,具有良好的应用前景。

关键词:工程水泥基复合材料;两端对拉试验;分布式光纤传感器;数字图像相关技术;黏结性能

中图分类号:TU391 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)10-0027-12

Experiment on bond performance between engineered cementitious composite and steel bars

Zhao Weiping[1,2], Chen Jialong[1], Xu Yang[3], Zhang Longquan[1], Li Yaqi[1]

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Beijing Key Laboratory of Municipal Infrastructure Modelling and Resilience Enhancement, Beijing 100083, China;
3. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Engineered cementitious composite (ECC) is a high-performance material with strain-hardening and multiple-cracking properties under tensile loading. To provide a theoretical basis for the interfacial bond of ECC applied to force-bearing members, 21 reinforced ECC specimens were subjected to double pull-out tests, and the effects of ECC strength grade, bond length, and polyvinyl alcohol (PVA) fiber volume fraction on bond performance were investigated. During the test, the digital image correlation (DIC) technique was employed for non-contact full-field monitoring of the strain distribution on the ECC surface. Simultaneously, through the method of attaching strain gauges in rebar grooving and distributed optical fibers, the distribution curves of rebar strain and bond stress along the anchorage length were obtained. The results indicate that the fiber bridging effect effectively inhibits the propagation of microcracks in reinforced ECC specimens, and only one or two flat transverse cracks appear at the final failure of the specimens; the mechanical process of double pull-out specimens can be divided into elastic stage, crack formation stage, and stabilized cracking stage; under the same other parameters, the tensile contribution of the matrix material in reinforced ECC specimens is significantly higher than that in reinforced concrete specimens; at the same strain level, the load sustained by ECC increases with the increase in its strength grade and decreases with the increase in bond length; increasing the PVA fiber volume fraction provides a limited enhancement to the tensile contribution of ECC, and significant improvement is achieved only when the fraction reaches 2.5%. Compared with traditional reinforced concrete members, reinforced ECC members exhibit superior crack control ability and interfacial bond performance, showing good application prospects.

Keywords: engineered cementitious composite; double pull-out test; distributed optical fiber sensor; digital image correlation technique; bond performance

收稿日期:2025-06-23;**录用日期**:2025-09-16;**网络首发日期**:2025-10-17
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251016.1702.006
基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A20244);国家自然科学基金(52278467)
作者简介:赵卫平(1981—),男,副教授,博士生导师
通信作者:徐 旸,xuyangcars@qq.com

钢筋和混凝土的界面黏结性能是保证二者协同工作的关键，影响着钢筋混凝土（reinforced concrete，RC）构件的变形、承载力及破坏模式等[1-5]。为合理地设计钢筋混凝土结构，有必要对钢筋和混凝土的黏结性能进行全面的研究。钢筋与周围混凝土之间的黏结力主要由胶结力、机械咬合力和摩阻力组成[1,6]。目前，常用的黏结性能测试方法包括中心拔出试验[7]、两端对拉试验[8]和梁式试验[9]，分别用于评估梁端纵筋、纯弯段处裂缝间及剪弯段的黏结锚固性能（图 1）。

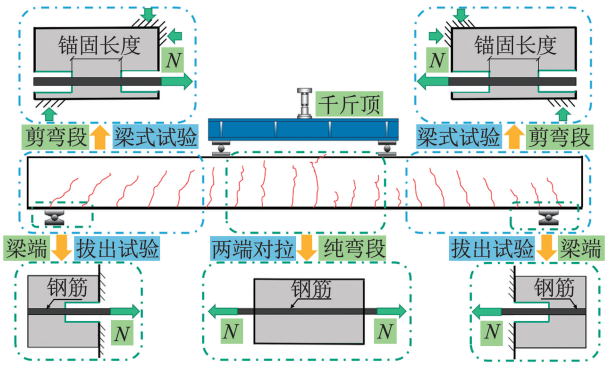


图 1　钢筋混凝土构件黏结性能测试方法

Fig. 1　Test method for bond performance of reinforced concrete member

工程水泥基复合材料（engineered cementitious composite，ECC）是一种由纤维、细骨料、水泥和外加剂组成的新型土木工程材料，具有优异的耐久性和延展性，其极限拉伸应变可达 3%[10-12]。相较于传统钢筋混凝土构件，钢筋 ECC 构件的延性、抗弯性能、抗剪性能及耗能能力显著提升，且具备优异的裂缝控制能力[13-18]。Bandelt 和 Billington[19] 研究了纵筋配筋率和加载方式对钢筋 ECC 梁变形能力的影响。结果表明：随着纵筋配筋率的增加，传统 RC 梁的延性降低，而钢筋 ECC 梁的延性增强；当配筋率超过 0.70% 时，钢筋 ECC 构件可满足大多数工程对变形能力的需求。Zhang 等[20] 采用 ECC 材料替换 RC 梁和梁柱节点中的混凝土，并分别进行了四点弯曲试验和低周往复荷载试验。结果表明，ECC 的掺入显著提高了 RC 构件的抗剪承载力，降低配箍率的 ECC 节点比配置密集箍筋的混凝土节点表现出更优异的耗能能力。张富文等[21] 提出采用 ECC 加固修复震损 RC 框架的方法。结果表明，ECC 加固震损框架具有优异的抗震性能和刚度退化性能，可以使构件的耗能能力恢复至原有水平。

关于钢筋在 ECC 中的黏结性能，现有研究通过中心拔出试验系统探讨了试件尺寸、锚固长度、保护层厚度、钢筋直径、钢筋形状、ECC 强度和纤维体积掺量对黏结性能的影响机制[22-25]。在此基础上，提出了许多黏结 - 滑移本构模型[22,26-27]。然而，中心拔出试验主要模拟梁柱节点或梁端纵筋的受力状态，其分析通常基于黏结应力沿锚固长度均匀分布的假设。现有研究[28-29]表明，随着试件锚固长度的减小，黏结应力分布更均匀，但较短的锚固长度会导致测得的黏结强度显著高于实际结构。另一方面，在中心拔出试验中使用较长的锚固长度会使最大和最小黏结应力之间产生较大的变化，取这些试件的平均黏结应力难以反映真实分布规律。因此，对 21 个长锚固（500 mm 和 700 mm）钢筋 ECC 试件进行了两端对拉试验，以模拟研究梁跨中裂缝间或轴心受拉构件中 ECC 和钢筋的黏结机制。由于两端对拉试验中黏结应力难以直接测定，通过钢筋铣槽后内贴应变片和分布式光纤的方法，研究了钢筋应变和黏结应力沿锚固长度的分布规律。同时，结合数字图像相关（digital image correlation，DIC）技术监测 ECC 表面的应变分布，以揭示钢筋和 ECC 间的界面黏结机制。

1　试　验

1.1　试验材料

1.1.1　钢筋

本研究所用钢筋为 HRB400E 热轧带肋钢筋。从与两端对拉试件相同的钢筋上切取拉伸试样，并根据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》[30] 规定的方法和要求进行拉伸试验，测得的拉伸应力 - 应变曲线如图 2 所示。

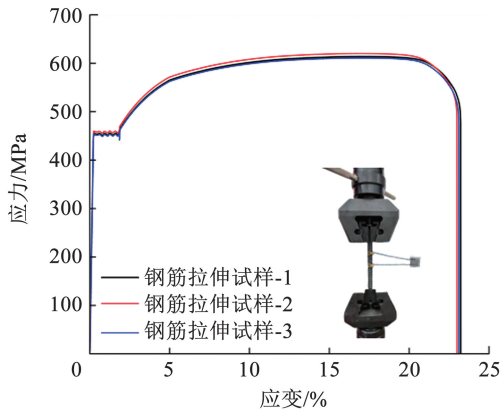


图 2　钢筋拉伸应力 - 应变曲线

Fig. 2　Tensile stress-strain curves of steel bar

1.1.2　混凝土

制备了混凝土和 ECC 两种胶凝材料。混凝土的配合比见表 1，使用的原材料包括强度等级为 42.5R的普通硅酸盐水泥、细度模数为 2.60 的天然河砂、粒径为 5 ~ 20 mm 的天然碎石以及减水率为

30% 的聚羧酸高性能减水剂。根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》[31] 规定的方法对边长为 150 mm 的混凝土立方体试件进行抗压试验，测得 28 d 标准抗压强度为 46.14 MPa。

表 1　混凝土配合比

Tab. 1　Mix proportion of concrete

材料强度等级	水胶比	水泥/(kg·m^{-3})	砂/(kg·m^{-3})	碎石/(kg·m^{-3})	减水剂/(kg·m^{-3})	抗压强度/MPa
C40	0.47	383	753	1 084	5.75	46.14

1.1.3　ECC 材料

ECC 的原材料包括强度等级为 42.5R 的普通硅酸盐水泥、粒径为 94 ~ 136 μm 的石英砂、抗拉强度为 1 620 MPa 的聚乙烯醇(polyvinyl alcohol，PVA)纤维(纤维长度 12 mm、直径 40 μm、密度 1.3 g/cm^3)、Ⅰ级粉煤灰及减水率为 30% 的聚羧酸高性能减水剂。基于以往的研究[32]，设计了 5 种 ECC 配合比(表 2)。依据 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》[33]，采用边长为 70.7 mm 的立方体试件测试 ECC 的 28 d 标准抗压强度，结果列于表 2。

表 2　ECC 配合比

Tab. 2　Mix proportion of ECC

材料强度等级	水胶比	水泥/(kg·m^{-3})	粉煤灰/(kg·m^{-3})	石英砂/(kg·m^{-3})	减水剂/(kg·m^{-3})	PVA 纤维体积掺量/%	抗压强度/MPa
E30	0.49	680.0	167.3	680.0	8.02	2.0	37.51
E40	0.39	727.0	189.6	727.0	9.67	1.5	47.66
					10.48	2.0	46.88
					11.22	2.5	44.75
E50	0.33	785.0	204.5	785.0	14.54	2.0	54.32

根据 JSCE[34] 的建议，采用狗骨状试件测试 ECC 的单轴拉伸性能，测得的拉伸应力 – 应变曲线如图 3 所示。可以看出，所有 ECC 试件均表现出显著的应变硬化行为，极限拉伸应变高达 3%。在 PVA 纤维体积掺量相同的情况下，随着 ECC 强度等级的提高，其单轴抗拉强度显著增大，而极限拉伸应变无明显变化。在水胶比相同的情况下，随着 PVA 纤维体积掺量的增加，ECC 的抗拉强度和极限拉伸应变增大，而抗压强度降低。

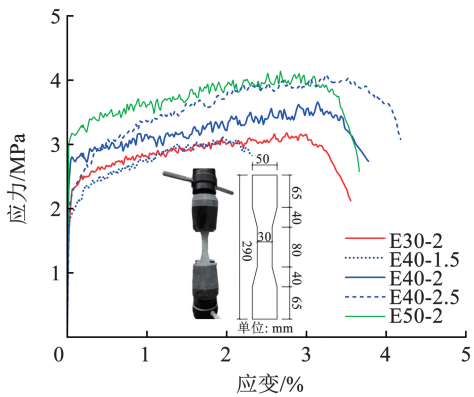


图 3　ECC 拉伸应力 – 应变曲线

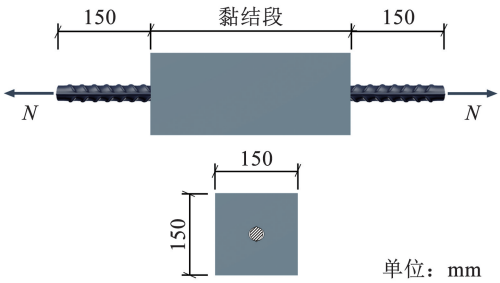
Fig. 3　Tensile stress-strain curves of ECC

1.2　试件设计与制作

如图 4(a)所示，共制备了 21 个两端对拉试件，根据 ECC 强度等级(E30、E40 和 E50)、黏结长度(500 mm 和 700 mm)和 PVA 纤维体积掺量(0、1.5% 和 2.0%)将其分为 8 组，每组 3 个名义上相同的试件。所有试件的截面尺寸均为 150 mm × 150 mm，两端钢筋外伸 150 mm 用于试验机夹持(图 4(b))。



(a) 试件编号



(b) 试件尺寸

图 4　两端对拉试件

Fig. 4　Double pull-out specimens

所有对拉试件的详细信息如表 3 所示。采用以下命名方式：编号中的“E”和“C”代表基体材料分别为 ECC 和普通混凝土；“30”、“40”和“50”代表 ECC/混凝土的强度等级；“500”和“700”代表试件的黏结长度；“0”、“1.5”和“2”代表 PVA 纤维体积掺量。如 E40-500-2 代表 ECC 强度等级为 E40、黏结长度为 500 mm、PVA 纤维体积掺量为 2.0% 的两端对拉试件。

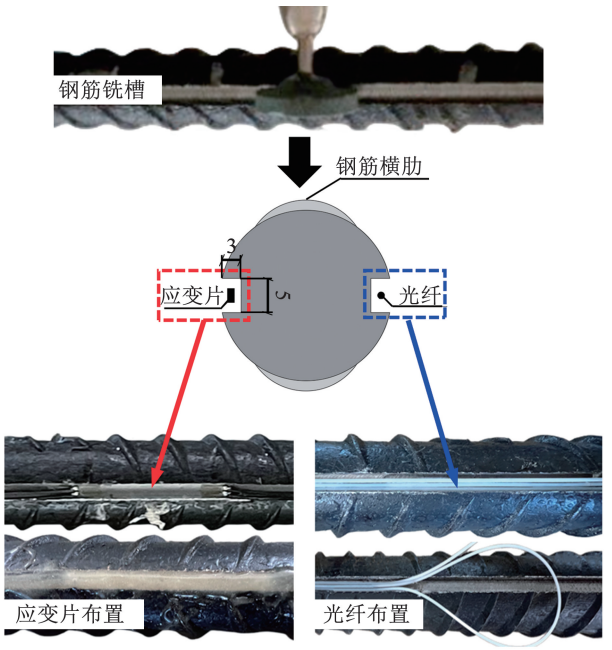
表 3 试件基本参数

Tab. 3 Basic parameters of specimens

试件编号	基体材料	钢筋直径/mm	黏结长度/mm	PVA 纤维体积掺量/%	材料强度等级
C40-500-0	混凝土	25	500	0	C40
E30-500-2	ECC	25	500	2.0	E30
E40-500-2	ECC	25	500	2.0	E40
E50-500-2	ECC	25	500	2.0	E50
E40-700-1.5	ECC	25	700	1.5	E40
E40-700-2	ECC	25	700	2.0	E40
E40-700-2.5	ECC	25	700	2.5	E40

1.3 应变片和光纤布置

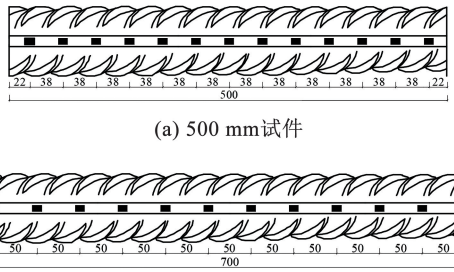
为研究钢筋应变沿锚固长度的分布规律，用铣床在钢筋两侧纵肋处加工出 3 mm × 5 mm 的凹槽，分别布置应变片和分布式光纤（图 5）。每个试件在凹槽中布置 3 根分布式光纤，取其测试结果的均值作为试验结果。图 6 为钢筋应变片的布置方案，对于锚固长度为 500 mm 的试件，相邻应变片之间的距离为 38 mm，两端应变片距端面的距离为 22 mm；对于锚固长度为 700 mm 的试件，相邻应变片之间的距离为 50 mm，两端应变片距端面的距离为 25 mm。



单位：mm

图 5 应变片与光纤布置

Fig. 5 Arrangement of strain gauges and optical fibers



(a) 500 mm试件

(b) 700 mm试件

单位：mm

图 6 应变片沿锚固长度的分布

Fig. 6 Distribution of strain gauges along anchorage length

1.4 测试装置和加载制度

如图 7 所示，两端对拉试验在 2 000 kN 液压伺服试验机上进行，加载速度为 6 kN/min。试验过程中，通过静态数据采集仪（图 8(a)）和光纤应变测试仪（图 8(b)）记录钢筋的应变。同时，采用 DIC 技术监测试件破坏过程中的裂缝损伤，具体步骤如下：1）试验前先用白色哑光漆在试件表面进行喷涂，等到白漆晾干后使用黑色哑光漆在试件表面喷涂均匀的散斑；2）利用最大分辨率为 4 096 × 3 000 的 CCD 相机（图 8(c)）采集变形前后的散斑图像；3）基于千眼狼牌 RDIC（1.31.6R 版本）软件（图 8(d)），

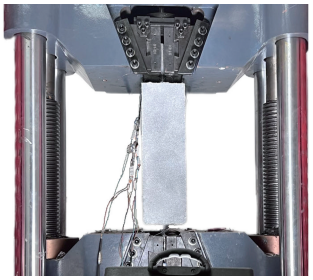


图 7 试验加载装置

Fig. 7 Test loading device



(a) 静态数据采集仪 (b) 光纤应变测试仪

(c) CCD相机 (d) 图像相关软件

图 8 数据采集装置

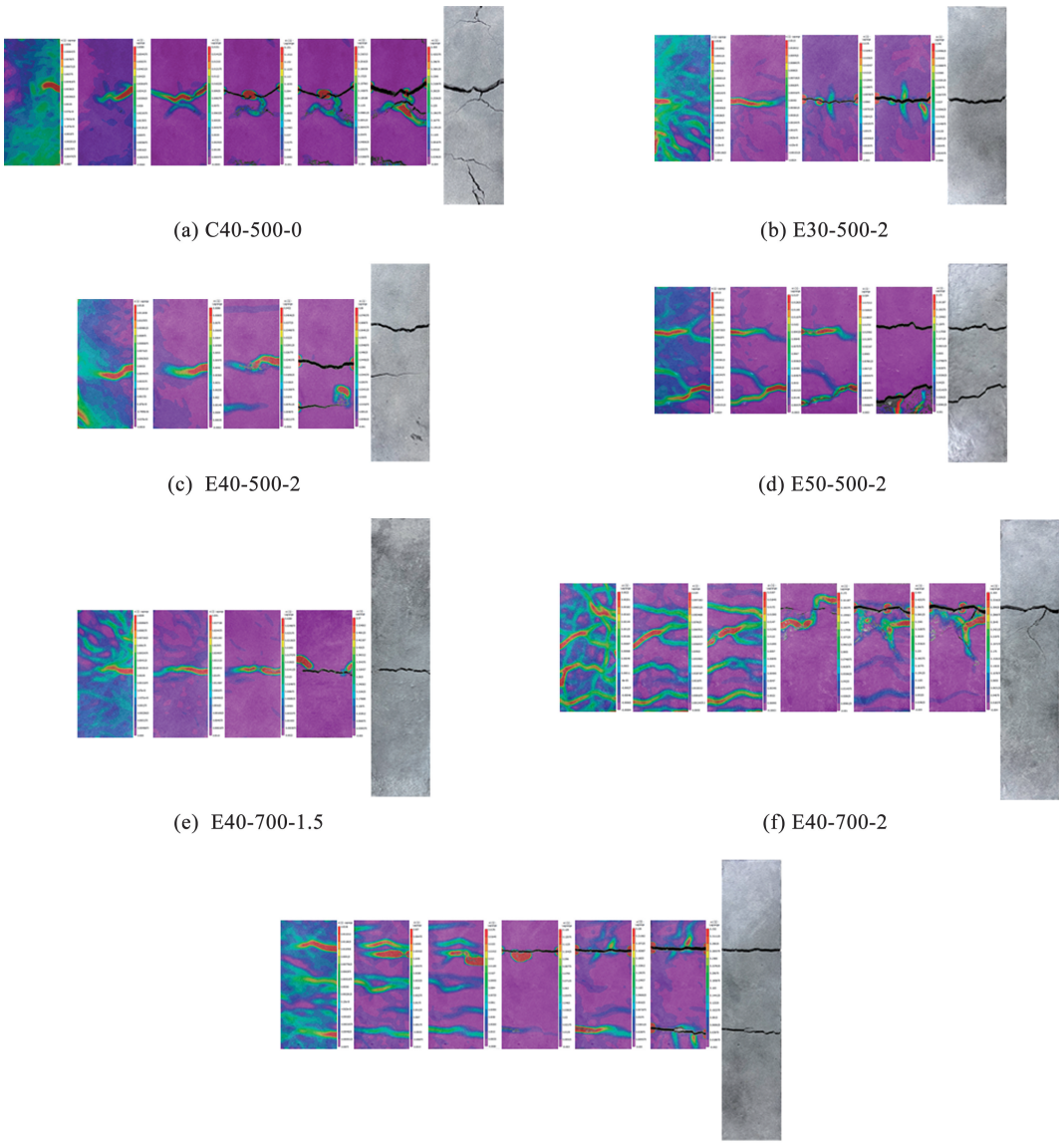
Fig. 8 Data acquisition device

将散斑图像解析为灰度图像，得到试件表面的应变场。在 DIC 分析中，针对 500 mm × 150 mm 和 700 mm × 150 mm 两种尺寸的试件，采用的有效分辨率分别为 2 750 × 825 和 3 850 × 825；子区大小设置为 9 像素 × 9 像素；子区间距设置为 3 像素；相关系数阈值设置为 0.98。

2　结果及讨论

2.1　应变云图及破坏模式

图 9 显示了所有两端对拉试件在加载过程中的应变云图及最终破坏模式。对于钢筋混凝土试件，在加载初期，混凝土仅在主裂缝形成位置出现应变集中现象，其他区域的应变水平较低。在最终破坏时，混凝土中部形成了一条较宽的横向主裂缝，顶部和底部出现许多弯曲的斜裂缝（图 9（a））。裂缝形状的不规则性归因于较硬的粗骨料阻碍了混凝土中裂缝的扩展[35-36]。对于钢筋 ECC 试件，在加载初期，ECC 表面出现多处应变集中区域（图 9（d）、（f）和（g）），意味着出现了多条微裂缝。然而，得益于 PVA 纤维的桥联作用，这些微裂缝没有进一步扩展为宏观裂缝。随着横向主裂缝的形成，原受拉张紧的 ECC 突然断裂回缩，应变能瞬时释放，试件表面的微裂缝实现了“自愈”。在最终破坏时，ECC 表面仅出现 1 ~ 2 条平整的横向裂缝，整体性较好（图 9（b）~（g））。



(a) C40-500-0　(b) E30-500-2

(c) E40-500-2　(d) E50-500-2

(e) E40-700-1.5　(f) E40-700-2

(g) E40-700-2.5

图 9　两端对拉试件的应变云图及破坏模式

Fig. 9　Strain contours and failure modes of double pull-out specimens

2.2 钢筋应变的分布规律

如图 10 所示，钢筋混凝土两端对拉试件的受力过程通常分为 3 个阶段，即弹性阶段、裂缝形成阶段和稳态开裂阶段。在弹性阶段，黏结滑移行为主要发生在试件两端的局部区段（定义为黏结应力传递长度 l_t）内，其余区段则保持钢筋与混凝土的变形协调状态，不产生黏结应力。如图 10(a)所示，钢筋应变（ε_s）在加载端达到最大值 ε_{s1}（式(1)）。受混凝土拉伸刚化（tension stiffening）效应的影响，钢筋的应变随其埋置深度的增加而减小，并在距加载端 l_t 处降至最小值 ε_{s2}（式(2)）。

$$\varepsilon_{s1}=\frac{\sigma_s}{E_s}=\frac{N}{A_sE_s} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{s2}=\varepsilon_c=\frac{N}{A_cE_c+A_sE_s} \tag{2}$$

式中：N 为两端施加的拉拔力；σ_s 为钢筋应力；E_s 为钢材弹性模量；A_s 为钢筋横截面积；A_c 为混凝土/ECC 的横截面积；E_c 为混凝土/ECC 的弹性模量；ε_c 为混凝土/ECC 的平均应变，可以通过试件的平衡方程计算：

$$N=A_c\sigma_c+A_s\sigma_s \tag{3}$$

假定钢筋和 ECC 在拉伸方向的应力 - 应变关系是线性的[28]，即

$$\sigma_s=E_s\varepsilon_s \tag{4}$$

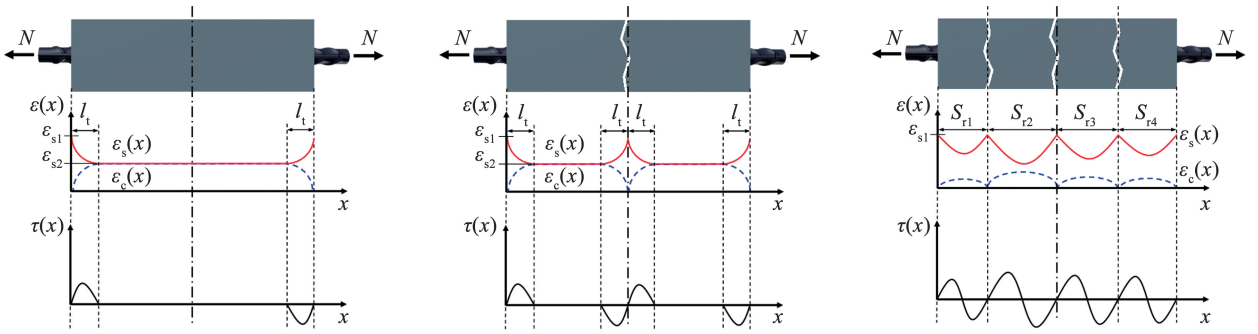
$$\sigma_c=E_c\varepsilon_c \tag{5}$$

将式(4)、(5)代入式(3)得

$$\varepsilon_c=\frac{N-E_sA_s\varepsilon_s}{E_cA_c} \tag{6}$$

随着拉拔荷载的增大，传递到混凝土上的应力最终超过其抗拉强度，导致混凝土在其最薄弱截面上形成第一条裂缝，两端对拉试件进入裂缝形成阶段。如图 10(b)所示，在裂缝截面处，钢筋无法通过黏结应力将荷载传递给混凝土，必须单独承担其全部，导致钢筋应变由 ε_{s2} 激增至 ε_{s1}。远离裂缝处，钢筋周围又出现混凝土，钢筋可以再次通过黏结应力将部分荷载传递给混凝土，这种情况一直持续到一个点（距开裂截面 l_t 处）。超过这个点，钢筋和混凝土重新达到变形协调状态。

随着荷载进一步增大，在第一条裂缝两侧的应变协调区中出现第二条裂缝；同理，第三、四条裂缝依次出现，各裂缝之间的距离为 S_r。如图 10(c)所示，当裂缝间距满足 $l_t<S_r<2l_t$ 时，试件进入稳态开裂阶段[37-38]。在此阶段，尽管拉拔荷载持续增加，试件裂缝数量没有进一步增加，这是由于裂缝间距不足以使混凝土中的应力超过其抗拉强度。



(a) 弹性阶段　(b) 裂缝形成阶段　(c) 稳态开裂阶段

图 10　两端对拉试件的应变及黏结应力分布

Fig. 10　Distribution of strain and bond stress of double pull-out specimens

图 11 为本研究两端对拉试件在加载过程中钢筋应变沿锚固长度的分布规律，其中，实线和虚线分别为应变片和分布式光纤的测试结果。可以看出，应变片和分布式光纤测得的钢筋应变整体分布趋势一致，但应变片结果仅能反应钢筋部分位置的应变，相邻测点间存在大量盲区，无法准确测量开裂截面处的钢筋应变。分布式光纤的结果表明，在加载初期，钢筋应变曲线在加载端附近较为陡峭，而在其余区域相对平缓。随着两端拉拔荷载的增大，ECC 在其最薄弱截面处出现第一批横向裂缝，开裂位置原本由这部分基体承担的荷载逐渐向钢筋转移，导致钢筋应变激增。图 12 对比了两端对拉试件在裂缝截面处的钢筋应变（ε_1）与裸钢筋在相同荷载水平下的应变（ε_2）。结果表明，3 种荷载水平下的 ε_1 均低于 ε_2，说明即使在开裂截面处，也有一定的应力从钢筋向周围仍然完整的 ECC 部分传递。

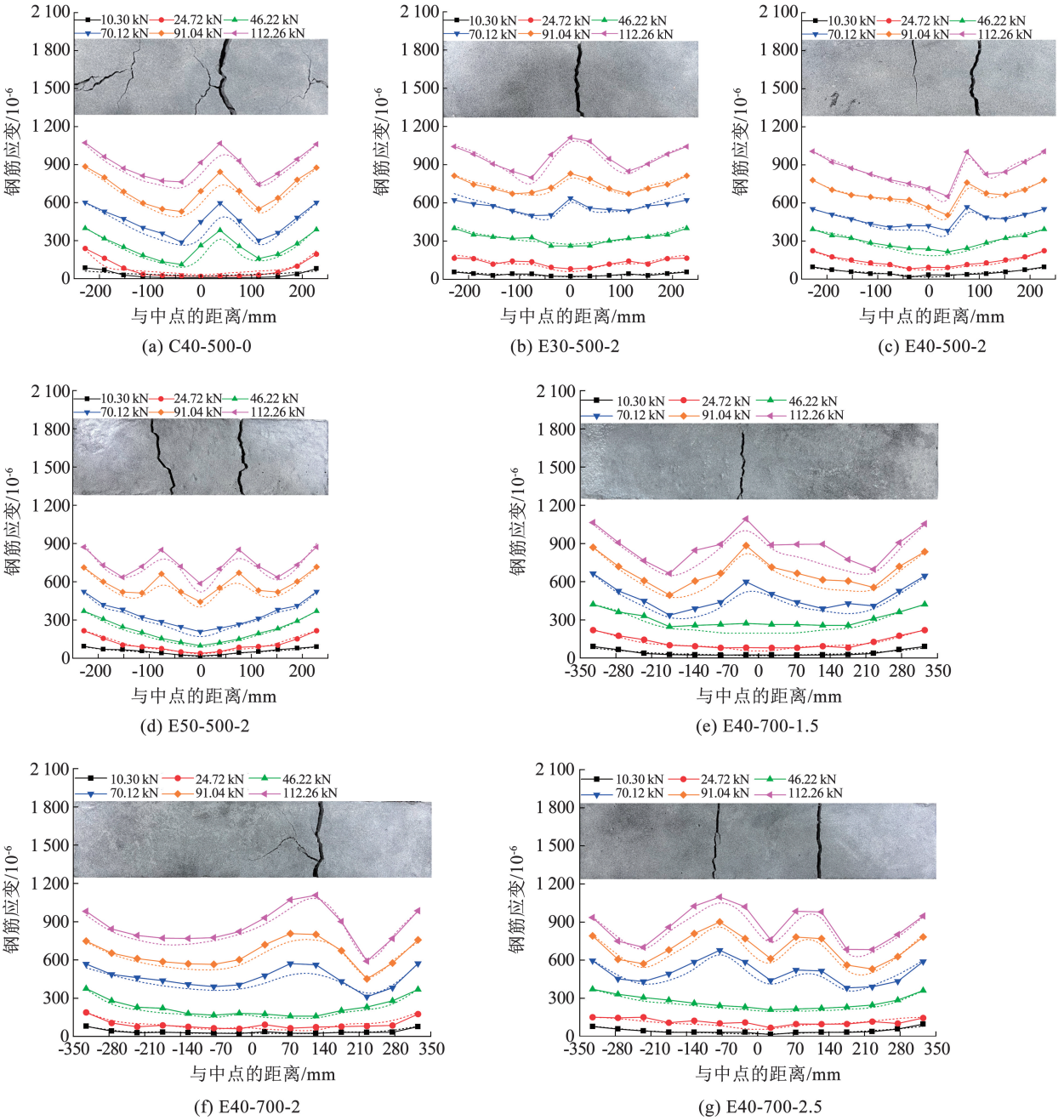


图 11　钢筋应变沿锚固长度的分布

Fig. 11　Distribution of rebar strain along anchorage length

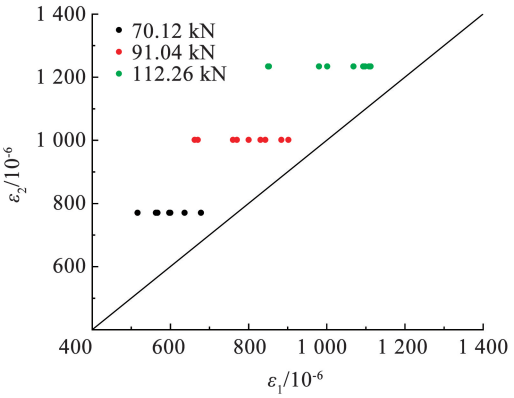


图 12　不同荷载水平下 ε_1 和 ε_2 的对比

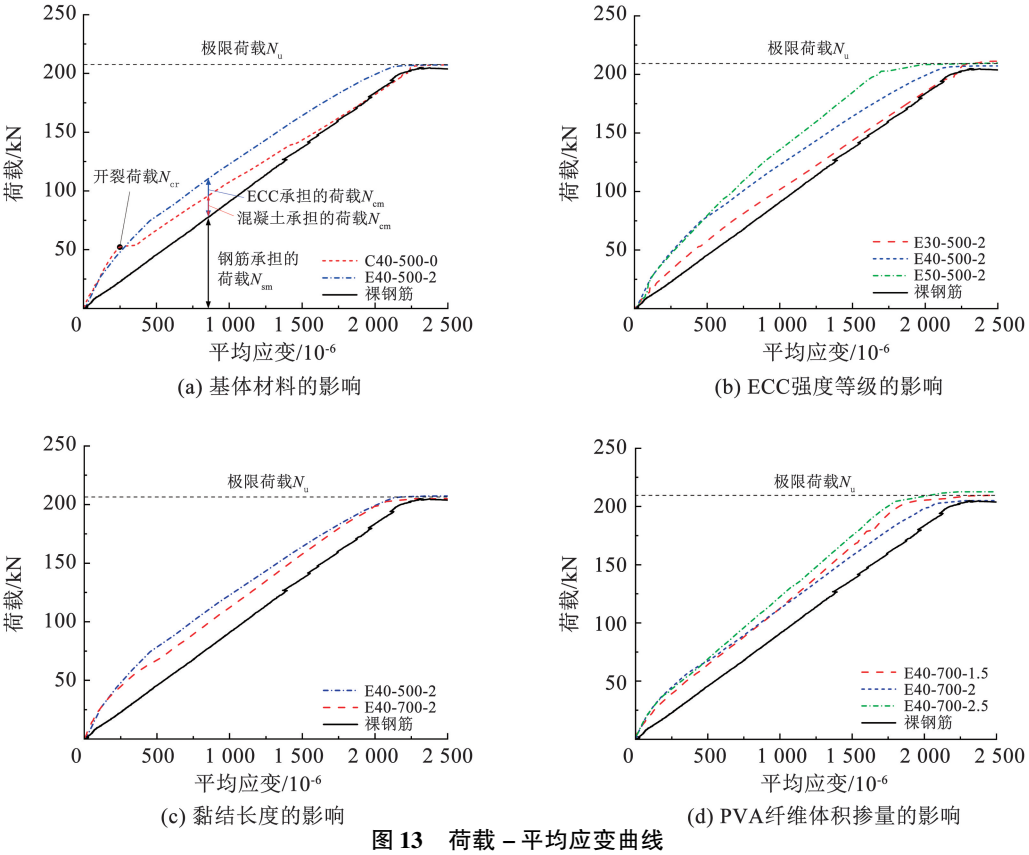
Fig. 12　Comparison of ε_1 and ε_2 under different load levels

2.3　荷载 – 平均应变关系

图 13 为本研究两端对拉试件的荷载（N）– 平均应变（σ_{sm}）曲线。可以看出，在初始加载阶段，钢筋混凝土试件的 $N-\sigma_{sm}$ 曲线几乎为线弹性。当荷载增至开裂荷载（N_{cr}）时，曲线呈现近似水平段，标志着试件进入裂缝形成阶段。此后，钢筋混凝土试件裂成许多不同长度的混凝土块，并进入稳态开裂阶段，此时，$N-\sigma_{sm}$ 曲线恢复线性增长直至钢筋屈服，达到极限荷载（N_u）。与普通混凝土不同，ECC 的多缝开裂和应变硬化特性导致其与钢筋的协同受力机制存在显著差异。具体表现为钢筋 ECC 试件的 $N-\sigma_{sm}$ 曲线在达到极限荷载之前未出现明显的

水平段,且曲线的斜率随荷载的增大而逐渐降低,直至达到极限荷载。

为了衡量两端对拉试件中基体材料的抗拉贡献,通过从试件总荷载中扣除相同应变下裸钢筋的承载力,得到混凝土/ECC 承担的荷载(N_{cm})与平均应变间的关系(图 14)。

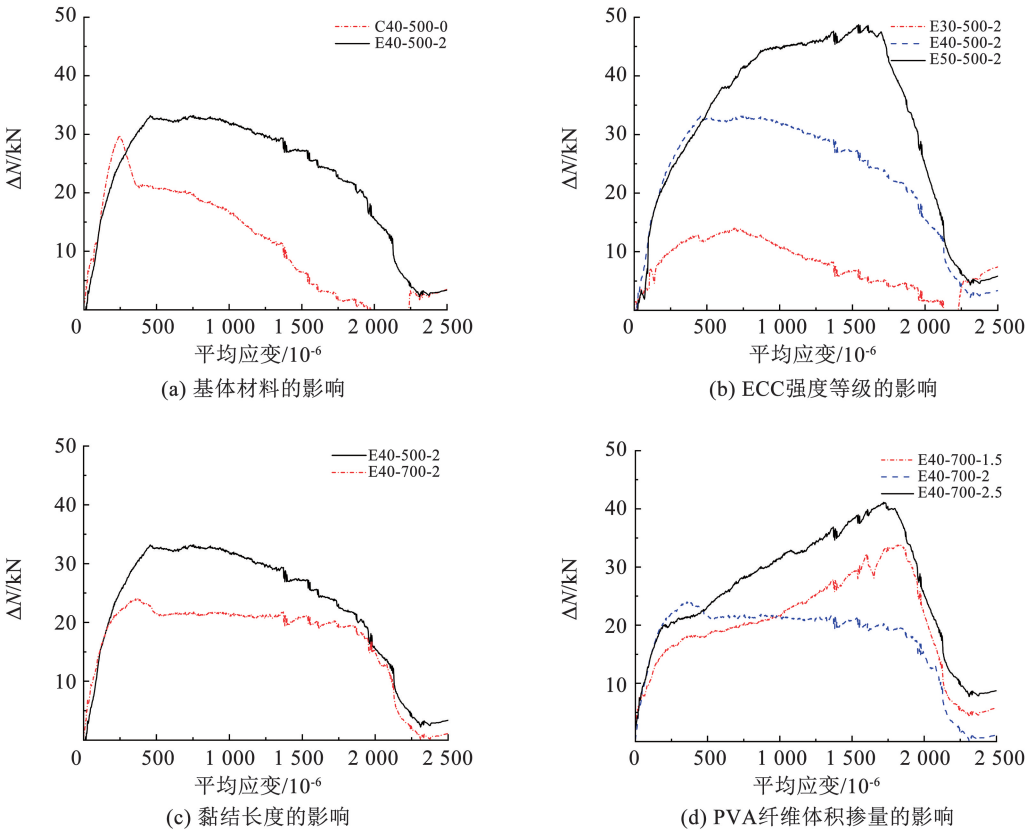


(a) 基体材料的影响 (b) ECC强度等级的影响

(c) 黏结长度的影响 (d) PVA纤维体积掺量的影响

图 13 荷载 – 平均应变曲线

Fig. 13 Load-average strain curves



(a) 基体材料的影响 (b) ECC强度等级的影响

(c) 黏结长度的影响 (d) PVA纤维体积掺量的影响

图 14 基体材料承担的荷载 – 平均应变曲线

Fig. 14 Load-average strain curves of matrix material

从图 14(a)可以看出，对于抗压强度和黏结长度相同的 ECC 试件和普通混凝土试件，在弹性阶段，二者的 N_{cm} 差异不大；在裂缝形成阶段和稳态开裂阶段，ECC 试件在给定应变下的 N_{cm} 显著高于普通混凝土试件，说明 ECC 参与工作的程度更高，与钢筋有更优异的黏结性能。如图 14(b)和 14(c)所示，两端对拉试件在给定应变下的 N_{cm} 随 ECC 抗压强度的增大而增大，随试件黏结长度的增大而减小，说明可以通过提高 ECC 的强度等级或降低试件的黏结长度改善钢筋 – ECC 的界面黏结性能。如图 14(d)所示，当 PVA 纤维体积掺量由 1.5% 增至 2.0% 时，ECC 的抗拉贡献增幅有限，并在加载后期趋于弱化；而当 PVA 掺量提升至 2.5% 时，试件在给定应变下的 N_{cm} 出现了较大的提升。

2.4　黏结应力分布规律

为研究钢筋与 ECC 之间的黏结应力沿锚固长度的分布规律，选取长度为 dx 的钢筋微段进行受力分析，如图 15 所示。假设黏结应力在微段内均匀分布[39-40]，可建立以下平衡方程：

$$\tau \mathrm{d}x \times \pi d_s + A_s\sigma_s = A_s(\sigma_s + \mathrm{d}\sigma_s) \tag{7}$$

式中：τ 为黏结应力，dσ_s 为钢筋微段两端的应力差。

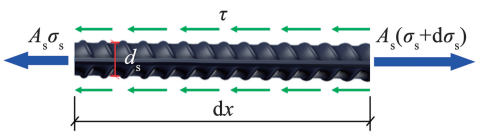


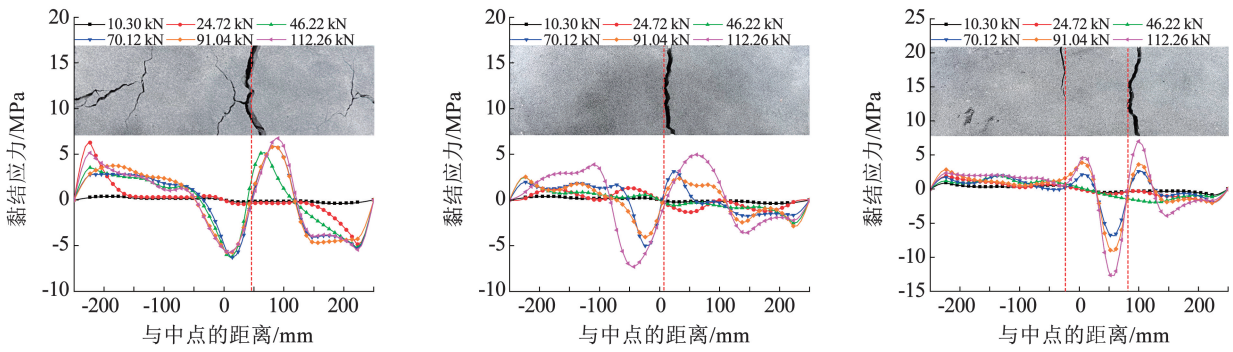
图 15　钢筋微段平衡条件

Fig. 15　Equilibrium conditions of rebar micro-segment

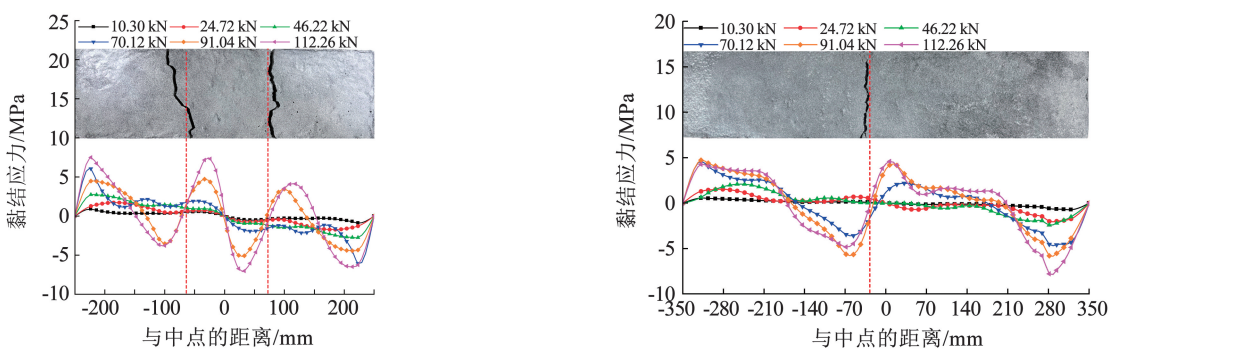
在微段中，钢筋可以假设为线弹性材料[28]。dσ_s 可由钢筋微段两端的应变差 dε 与钢材弹性模量 E_s 的乘积求得。由此，可得微段平均黏结应力计算公式：

$$\tau = \frac{A_s}{\pi d_s}\frac{\mathrm{d}\sigma_s}{\mathrm{d}x} = \frac{d_s}{4}\frac{\mathrm{d}\sigma_s}{\mathrm{d}x} = \frac{d_s E_s \mathrm{d}\varepsilon}{4\mathrm{d}x} \tag{8}$$

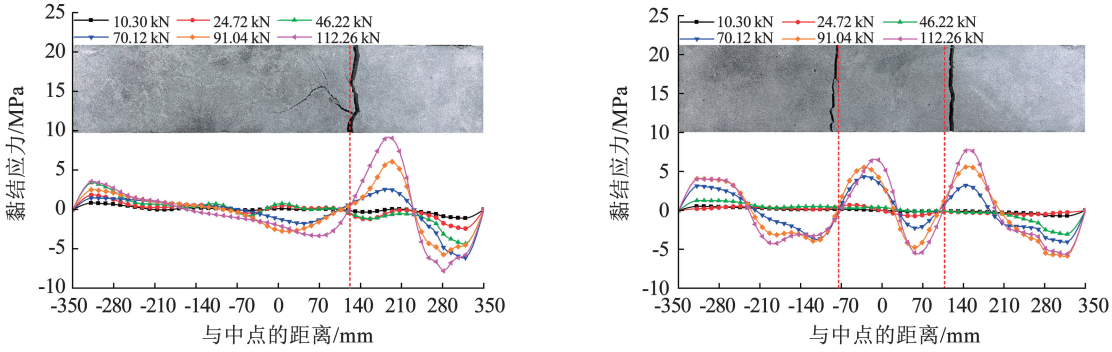
分布式光纤可以实现钢筋应变的连续采集，更适用于黏结应力的计算。基于测点两端的应变差，可以使用式(8)计算该区段的平均黏结应力；使用平滑的曲线连接各位置的黏结应力，可以得到两端对拉试件的黏结应力沿锚固长度的分布曲线，如图 16所示。可以看出，在荷载水平较低时(0 ~ 24.72 kN)，钢筋混凝土试件的黏结应力仅分布于加载端附近区域，其余部分的黏结应力值为 0，呈现出典型的弹性阶段分布特征(图 16(a))；相比之下，钢筋 ECC 试件在黏结较深的位置也出现了黏结应力分布，这一现象主要归因于 ECC 在加载初期即形成了较多的微裂缝(图 9(d)、(f)和(g))。随着荷载的增大，所有试件表面均出现宽度较大的横向主裂缝，且裂缝截面处的黏结应力为 0。在相邻裂缝截面之间(或加载端至裂缝截面之间)，黏结应力从 0 开始，先攀升至一个局部峰值，随后逐渐减小至 0，继而反向发展，增至另一个局部峰值，最后再逐渐减小至 0。



(a) C40-500-0　(b) E30-500-2　(c) E40-500-2



(d) E50-500-2　(e) E40-700-1.5



(f) E40-700-2　　(g) E40-700-2.5

图 16　黏结应力沿锚固长度的分布

Fig. 16　Distribution of bond stress along anchorage length

对比图 16(a)和 16(c)可知,在抗压强度相近的条件下,ECC 试件的黏结应力变化范围(-12.63 ~ 7.02 MPa)高于普通混凝土试件(-6.30 ~ 6.74 MPa),表明 ECC 与带肋钢筋间的黏结性能优于普通混凝土。如图 16(b) ~ (d)所示,在相同的荷载等级下,随着 ECC 抗压强度由 37.51 MPa 提高到 46.88 MPa,试件表面裂缝数量由一条增至两条;当抗压强度进一步提升至 54.32 MPa 时,第二条裂缝的宽度更大,且加载端至该裂缝截面间的黏结应力分布曲线更陡峭。这主要是因为较高的基体强度通常伴随更显著的拉伸刚化效应[41],从而增强了钢筋 - ECC 界面的应力传递能力,使 ECC 中的拉应力更容易超过其开裂强度。如图 16(c)和 16(f)所示,在相同的荷载等级下,随着锚固长度从 500 mm 增至 700 mm,试件中部的黏结应力显著下降,而加载端附近的黏结应力增大。说明锚固长度越大,黏结应力在试件中的传递效果越差,应力越难传递到黏结较深的部位,这与 Bai 等[39]的研究结果一致。

3　结　论

1)ECC 在拉伸荷载下呈现应变硬化与多缝开裂特性,其与钢筋的黏结性能明显区别于普通混凝土。DIC 结果表明:加载初期,ECC 试件表面出现较多的微裂缝,而混凝土试件仅在主裂缝形成位置出现应变集中;随着横向主裂缝的形成,原受拉张紧的 ECC 突然断裂回缩,应变能瞬时释放,最终 ECC 表面仅形成 1 ~ 2 条宏观裂缝,表现出优异的裂缝控制能力。

2)加载初期,钢筋混凝土试件的黏结应力集中分布于加载端附近的传递长度内;相比之下,ECC 的多缝开裂机制使其在黏结较深的位置也产生黏结应力;随着荷载的增大,混凝土试件和 ECC 试件均形成宽度较大的横向主裂缝,裂缝截面处的钢筋应变显著高于周围区域,且黏结应力为 0。

3)钢筋混凝土试件的拉伸荷载 - 平均应变曲线呈现典型的 3 阶段特征:首先呈线弹性增长;达到开裂荷载后,曲线出现短暂的水平段;随后恢复线性增长直至钢筋屈服。相比之下,钢筋 ECC 试件的荷载 - 平均应变曲线在达到极限荷载前未出现明显的水平段,曲线的斜率没有明显的突降,而是随着荷载的增大而逐渐减小。

4)在强度等级和黏结长度相同的情况下,钢筋 ECC 试件中基体材料参与工作的程度显著高于钢筋混凝土试件。在相同的应变水平下,试件中 ECC 承担的荷载随 ECC 强度等级的提高而增大,随黏结长度的增大而减小,表明可通过提高 ECC 强度等级或降低试件黏结长度来改善钢筋 - ECC 界面黏结性能。提高 PVA 纤维体积掺量对 ECC 抗拉贡献的提升有限,掺量达 2.5% 时才有明显改善。

5)本研究可为实际工程中变形钢筋在 ECC 中的黏结锚固设计提供一定的参考价值和理论依据,但受限于试件尺寸,未涉及裂缝间距的影响分析。后续将针对尺寸更大的钢筋 ECC 构件开展受弯试验,系统研究 ECC 的多缝开裂及应变硬化特性对构件平均裂缝间距的影响;同时结合有限元方法,深入揭示 ECC 和钢筋间的黏结破坏机制和开裂机制。

参考文献

[1] Fahmy M F M, Ahmed S E A S, Wu Z. Bar surface treatment effect on the bond-slip behavior and mechanism of basalt FRP bars embedded in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 122844. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122844

[2] Liu Hongtao, Chen Wenxiao, Guo Ruojiao, et al. Theoretical and numerical study on the bond behavior between reinforcing steel and concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 90: 109398. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109398

[3] 赵卫平, 李雪菡, 龙彬, 等. 钢筋混凝土梁柱边节点滞回性能数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(2): 37
Zhao Weiping, Li Xuehan, Long Bin, et al. Numerical simulation of the hysteretic performance of exterior reinforced concrete beam-

column joints[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(2): 37. DOI: 10.11918/202211015

[4]赵卫平，钟琳，张珂，等. 钢筋煤矸石混凝土黏结性能试验研究与数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报，2026，58(5)：192
Zhao Weiping, Zhong Lin, Zhang Ke, et al. Experimental study and numerical simulation on bond performance of reinforced coal gangue concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2026, 58(5): 192. DOI: 10.11918/202503024

[5]Desnerck P, Lees J M, Morley C T. Bond behaviour of reinforcing bars in cracked concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 126. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.043

[6]赵卫平. 横向压力对钢筋与混凝土黏结性能的影响[J]. 工程力学，2012，29(4)：168
Zhao Weiping. Impacts of transverse pressure on bond capability of bars in concrete[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 168

[7]Bai Yinghua, Zhang Deyue, Shen Kang, et al. Experimental study and numerical simulation on the bonding properties of rubber concrete and deformed steel bar[J]. Construction and Building Materials, 2023, 383: 131416. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131416

[8]高向玲，李杰. 钢筋与钢－碳纤维混杂纤维增韧混凝土黏结性能试验[J]. 建筑结构，2008(6)：102
Gao Xiangling, Li Jie. Experimental study of bond performance between deformed bar and steel carbon hybrid fiber reinforced concrete[J]. Building Structure, 2008(6): 102. DOI: 10.19701/j.jzjg.2008.06.030

[9]Yu Xiaotong, Robuschi S, Fernandez I, et al. Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams[J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112309. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112309

[10]Li V C, Wu H C, ChanYinwen. Effect of plasma treatment of polyethylene fibers on interface and cementitious composite properties[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(3): 700. DOI: 10.1111/j.1151－2916.1996.tb07932.x

[11]Li V C, Wang Shuxin, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)[J]. Materials Journal, 2001, 98(6): 483. DOI: 10.14359/10851

[12]Li V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报，2007，35(4)：531
Li V C. Research progress and application of high ductility fiber reinforced cement-based composites[J]. Journal of Silicate, 2007, 35(4): 531. DOI: 10.14062/j.issn.0454－5648.2007.04.026

[13]Meng Dan, Lee C, Zhang Y. Flexural and shear behaviours of plain and reinforced polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite beams[J]. Engineering Structures, 2017, 151: 261. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.036

[14]陈全胜，侯圣均，蒋晨晨，等. 钢－混凝土－ECC 组合梁受弯性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报，2022，43(增刊 1)：136
Chen Quansheng, Hou Shengjun, Jiang Chenchen, et al. Experimental research and FEA on bearing capacity under negative moment of steel-concrete-ECC composite beams[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(S1): 136. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0015

[15]Zhu Jixiang, Weng Kefan, Huang Botao, et al. Ultra-high-strength engineered cementitious composites (UHS-ECC) panel reinforced with FRP bar/grid: development and flexural performance[J]. Engineering Structures, 2024, 302: 117193. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117193

[16]Xu Lingyu, Huang Botao, Lao Jiancong, et al. Tensile over-saturated cracking of ultra-high-strength engineered cementitious composites (UHS-ECC) with artificial geopolymer aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 136: 104896. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104896

[17]Huang Botao, Wu Jiaqi, Yu Jing, et al. Seawater sea-sand engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): assessment and modeling of crack characteristics[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 140: 106292. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106292

[18]钱辉，王玉敬，康莉萍. 复合配筋增强工程水泥基复合材料梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2021，42(增刊 1)：277
Qian Hui, Wang Yujing, Kang Liping. Experimental study on flexural behaviors of engineered cementitious composites beams reinforced with hybrid bars[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(S1): 277. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S1.0031

[19]Bandelt M, Billington S. Impact of reinforcement ratio and loading type on the deformation capacity of high-performance fiber-reinforced cementitious composites reinforced with mild steel[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(10): 04016084. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943－541X.0001562

[20]Zhang R, Matsumoto K, Hirata T, et al. Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements[J]. Engineering Structures, 2015, 86: 146. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.01.005

[21]张富文，李向民，王卓琳，等. 纤维增强水泥基复合材料加固震损 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2017，38(6)：61
Zhang Fuwen, Li Xiangmin, Wang Zhuolin, et al. Experimental study on seismic behavior of earthquake-damaged RC frame strengthened by ECC[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 61. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.06.007

[22]Lee W S, Kang S, Tan H K, et al. Experimental and analytical investigation on bond-slip behaviour of deformed bars embedded in engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 494. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.036

[23]Deng Mingke, Pan Jiaojiao, Sun Hongzhe. Bond behavior of steel bar embedded in engineered cementitious composites under pullout load[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 705. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.165

[24]Cai Jingming, Pan Jinlong, Tan Jiawei, et al. Bond behaviours of deformed steel rebars in engineered cementitious composites (ECC) and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119082. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119082

[25]Wang Hailong, Sun Xiaoyan, Peng Guangyu, et al. Experimental study on bond behaviour between BFRP bar and engineered cementitious composite[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 448. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.135

[26]崔双双，孟瑶，陈伟宏，等. 高应变率荷载作用下钢筋与 ECC 的黏结滑移关系研究[J]. 振动与冲击，2024，43(1)：71

Cui Shuangshuang, Meng Yao, Chen Weihong, et al. Bond-slip relation between rebars and ECC under high strain rate load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(1): 71. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.01.009

[27] Zheng Yue, Kang Xi, Zhang Zongyu, et al. Study on bond-slip behavior of ribbed steel bars in engineered cementitious composites concrete: experimental analysis, constitutive model and refined finite element model[J]. Construction and Building Materials, 2025, 463: 140100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140100

[28] Abrishami H H, Mitchell D. Analysis of bond stress distributions in pullout specimens[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(3): 255. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(255)

[29] 高向玲. 高性能混凝土与钢筋黏结性能的试验研究及数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2003
Gao Xiangling. Experimental study and numerical simulation on bond behavior between high performance concrete and steel bar[D]. Shanghai: Tongji University, 2003

[30] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]
GB/T 228.1—2021 Metallic materials-tensile testing-Part 1: method of test at room temperature[S]

[31] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]
GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S]

[32] 赵卫平, 王磊, 项荣军, 等. ECC-混凝土叠合梁弯曲试验及裂缝发展的分形表征[J]. 桥梁建设, 2024, 54(4): 37
Zhao Weiping, Wang Lei, Xiang Rongjun, et al. Fractal characterization of flexural performance and crack propagation of ECC-concrete composite girder[J]. Bridge Construction, 2024, 54(4): 37. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2024.04.006

[33] JGJ/T 70—2009 建筑砂浆基本性能试验方法标准[S]
JGJ/T 70—2009 Standard for test method of basic properties of construction mortar[S]

[34] Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures (draft) Japan Society of Civil Engineers (2004)[S]

[35] Wang Jinli, Chen Jialong, Liu Min. Theoretical model for spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete filled steel tube stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 213: 108353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108353

[36] Wang Jinli, Chen Jialong, Liu Min. Theoretical model for CFRP-confined spontaneous combustion gangue coarse aggregate concrete-filled steel tube stub columns under axial compression[J]. Construction and Building Materials, 2024, 415: 135113. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135113

[37] Bado M F, Casas J R, Kaklauskas G. Distributed sensing (DOFS) in reinforced concrete members for reinforcement strain monitoring, crack detection and bond-slip calculation[J]. Engineering Structures, 2021, 226: 111385. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111385

[38] Kaklauskas G, Ramanauskas R, Jakubovskis R. Mean crack spacing modelling for RC tension elements[J]. Engineering Structures, 2017, 150: 843. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.090

[39] Bai Yinghua, Zhang Deyue, Shen Kang, et al. Experimental study and numerical simulation on the bonding properties of rubber concrete and deformed steel bar[J]. Construction and Building Materials, 2023, 383: 131416. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131416

[40] 王博, 白国良, 李坚, 等. 钢筋与再生混凝土黏结应力分布的试验研究及理论分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(4): 10
Wang Bo, Bai Guoliang, Li Jian, et al. Experimental and theoretical analysis of bond stress distribution between the rebar and the recycled concrete[J]. Industrial Construction, 2012, 42(4): 10. DOI: 10.13204/j.gyjz2012.04.012

[41] 陈国雄, 安茹, 符师桦. FRP 筋混凝土梁拉伸刚化效应模型研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(2): 11
Chen Guoxiong, An Ru, Fu Shihua. Modeling investigation of tension stiffening effect in FRP reinforced concrete beams[J]. Composites Science and Engineering, 2022(2): 11. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20220228.002

(编辑 刘 彤)