



高强钢绞线网增强ECC抗弯加固无损RC梁试验

李可 赵佳丽 李志强 朱俊涛

Experiment on non-damaged RC beams strengthened by high-strength steel wire strand meshes reinforced ECC in bending

LI Ke, ZHAO Jiali, LI Zhiqiang, ZHU Juntao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210816.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料弯曲性能试验

Experiment on bending performance of engineered cementitious composites reinforced by high-strength stainless steel wire strand mesh

复合材料学报. 2021, 38(4): 1292–1301 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200805.001>

高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料受拉应力-应变关系

Tensile stress-strain relationship of engineered cementitious composites reinforced by high-strength stainless steel wire mesh

复合材料学报. 2020, 37(12): 3220–3228 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200428.002>

高强不锈钢绞线网与工程水泥基复合材料黏结锚固性能试验

Experiment on bonding and anchoring performance between high-strength stainless steel wire mesh and engineered cementitious composites

复合材料学报. 2020, 37(7): 1731–1742 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191010.001>

BFRP筋钢纤维高强混凝土梁受弯承载力试验与理论

Experimental and theoretical study on the flexural capacity of high-strength concrete beams reinforced with BFRP bars and steel fiber

复合材料学报. 2018, 35(12): 3313–3323 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.004>

全玻璃纤维增强树脂筋混凝土电缆排管的抗弯试验

Experimental study on flexural performance of concrete cable duct reinforced with glass fiber reinforced polymer bars

复合材料学报. 2018, 35(1): 70–80 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170322.001>

U形CFRP条带混锚加固混凝土梁抗剪试验

Shear tests on reinforced concrete beams strengthened with hybrid-anchored CFRP U-sheets

复合材料学报. 2018, 35(3): 714–721 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170613.002>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210816.004

高强钢绞线网增强 ECC 抗弯加固无损 RC 梁试验



分享本文

李可¹, 赵佳丽¹, 李志强², 朱俊涛^{*1}

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 中建壹品投资发展有限公司, 武汉 430070)

摘要: 为研究高强钢绞线网增强工程水泥基复合材料(Engineered cementitious composites, ECC)加固钢筋混凝土(Reinforced concrete, RC)梁的受弯性能, 考虑钢绞线直径、纵向钢绞线配筋率、ECC 配方及端部锚固 4 个影响因素, 对 7 个加固无损 RC 梁试件进行受弯试验。结果表明, 在采用合理加固层端部锚固措施的情况下, 通过高强钢绞线网增强 ECC 抗弯加固 RC 梁可显著提升其受弯承载力、延性、抗裂性, 有效约束原 RC 梁的裂缝发展并减小裂缝宽度; 纵向高强钢绞线配筋率的增大会提高加固梁的受弯开裂荷载、承载力、控裂能力、刚度, 但试件配置过量的纵向高强钢绞线会降低加固梁的延性、韧性; 在纵向高强钢绞线配筋率接近的情况下, 采用直径较大的高强钢绞线, 会在一定程度上降低加固梁的延性、韧性、控裂能力; 加固梁的受弯开裂荷载、承载力、刚度随着 ECC 的弹性模量及抗拉强度的提高而增大; 加固梁的控裂能力、延性、韧性随 ECC 极限拉应变提高而增大。

关键词: 高强钢绞线网增强 ECC; 结构加固; RC 梁; 受弯性能; 试验研究

中图分类号: TU528.58 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2022)07-3428-13

Experiment on non-damaged RC beams strengthened by high-strength steel wire strand meshes reinforced ECC in bending

LI Ke¹, ZHAO Jiali¹, LI Zhiqiang², ZHU Juntao^{*1}

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. China Construction Yipin Investment & Development Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to study the flexural performance of reinforced concrete (RC) beams strengthened by high-strength steel wire strand (HSSWS) meshes reinforced engineered cementitious composites (ECC), the bending tests were performed on seven non-damaged RC beams considering the influence factors such as the steel strand diameter, the longitudinal steel strand reinforcement rate, formula of ECC and end anchorage. The results show that under the condition of using reasonable anchorage measures at the end of the reinforcement layer, the bearing capacity, ductility and crack-control capacity of RC beams strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC in bending can be significantly improved, and the crack development of the original RC beam can be effectively delayed, which results in reducing crack width. The increase of longitudinal HSSWS reinforcement rate will improve the cracking load, bearing capacity, crack-control capacity and stiffness of the strengthened beams in bending, but excessive HSSWS reinforcement rate of the strengthened beams would reduce the ductility and toughness. When the reinforcement ratio of longitudinal HSSWS is close, the ductility, toughness and crack-control ability of strengthened beams would be reduced to some extent by using the HSSWS with relative large diameter. The cracking load, bearing capacity and stiffness of strengthened beams in bending increase with the increases of elastic modulus and tensile strength of ECC. The crack-control ability, ductility and toughness of strengthened beams increase with the increase of ultimate tensile strain of ECC.

收稿日期: 2021-06-18; 修回日期: 2021-07-23; 录用日期: 2021-07-28; 网络首发时间: 2021-08-17 10:25:25

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210816.004>

基金项目: 国家自然科学基金(U1804137; 51879243); 中国博士后基金(2020M672236); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2020GGJS003)

通信作者: 朱俊涛, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新型复合材料性能及结构加固 E-mail: juntaozhu@zzu.edu.cn

引用格式: 李可, 赵佳丽, 李志强, 等. 高强钢绞线网增强 ECC 抗弯加固无损 RC 梁试验 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3428-3440.

LI Ke, ZHAO Jiali, LI Zhiqiang, et al. Experiment on non-damaged RC beams strengthened by high-strength steel wire strand meshes reinforced ECC in bending[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3428-3440(in Chinese).

Keywords: high-strength steel wire strand (HSSWS) meshes reinforced ECC; structural reinforcement; reinforced concrete beam; flexural performance; experimental study

工程用水泥基复合材料 (Engineered cementitious composites, ECC) 具有优异的延性、韧性及裂缝控制能力, 在受拉后期荷载较大情况下仍保持良好的应变硬化和裂缝无害化分散特性^[1-2]。此外, ECC 亦具有优良的受压韧性、与混凝土的黏结、抗疲劳、耐磨等性能^[3-4]。鉴于此, ECC 在加固领域的应用是近年来国内外土木工程研究的一大热点^[5]。然而, ECC 自身抗拉强度有限, 用于结构加固时, 虽能提升加固构件的延性、韧性及控裂性能, 但难以显著提升构件的承载能力。为此, 国内外学者采用高强筋材增强 ECC 形成复合材料(如钢筋网增强 ECC、纤维格栅增强 ECC 等), 并对其力学性能和加固钢筋混凝土 (RC) 受弯构件性能展开大量研究。

卜良桃等^[6] 和马益标^[7] 进行了钢筋网/ECC 复合抗弯增强混凝土梁试验研究, 结果表明: 采用 ECC 钢丝(筋)网加固梁, 较大提升 RC 梁的裂缝控制能力、刚度、承载力及延性, 但加固层和原梁仍会存在不能完全协调工作的问题。郑宇宙等^[8-9] 对纤维增强树脂复合材料 (Fiber reinforced polymer, FRP) 格栅增强 ECC 抗弯加固 RC 梁性能进行了试验和理论研究, 结果表明: 采用 FRP 格栅增强 ECC 加固梁的受弯开裂荷载、屈服荷载、极限荷载、刚度及延性均得到了有效提升; 应配置加固界面机械锚固或 U 型箍锚固以防止界面提早剥离; 建立了 FRP-ECC 加固钢筋混凝土梁受弯承载力的计算模型。综上所述, 采用钢筋网或 FRP 格栅与 ECC 复合加固 RC 受弯构件, 可有效提升其承载力、刚度和延性。但是, 普通钢筋强度低, 且屈服应变远小于 ECC 极限应变, 使 ECC 高延性无法充分利用, 对构件承载力及延性提升有限^[6-7]; 而 FRP 格栅经济性相对较差, 不利于在加固普通结

构中推广应用。

综上所述, 本课题组提出了“高强钢绞线网 (HSSWS) 增强 ECC”新型复合材料, 并对其力学性能进行了试验和理论研究^[10-11], 结果表明: 高强钢绞线网增强 ECC 具有优异的裂缝分散和变形能力, 受拉和受弯裂缝饱和状态的最大缝宽小于 0.3 mm(对应于极限荷载的 90%), 极限拉应变在 2.7%~4.2% 之间, 受弯挠度超过了跨度的 1/15。因此, 本文将高强钢绞线网增强 ECC 这一新型高性能复合材料用于 RC 梁的抗弯加固, 进行高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁受弯性能试验研究, 探究钢绞线公称直径、纵向钢绞线配筋率、ECC 配方及有无加固层端部锚固等因素对加固梁抗弯性能的影响规律, 为高强钢绞线网增强 ECC 的加固应用提供理论支撑。

1 试验方案

1.1 试件设计

本试验考虑钢绞线公称直径 d 、加固层内纵向钢绞线配筋率 ρ 、ECC 配方及有无加固层端部锚固 4 个因素对加固梁抗弯性能的影响, 设计并制作了 7 个试件, 其中包括 1 个未加固 RC 梁、6 个加固 RC 梁, 试验方案设计如表 1 所示。ECC 的原材料包括: 普通硅酸盐水泥 (P.O42.5)、一级粉煤灰、微硅粉、细沙(最大粒径不大于 74 μm)、聚乙烯醇 (PVA) 纤维(日本可丽株式会社生产)、高效减水剂、郑州市普通可饮用自来水及增稠剂(纤维素醚 H735)等。本试验考虑三种不同 ECC 配合比, 各原料组分配比(质量比)如表 2 所示。

本试验试件按照现行规范^[12] 的构造要求进行设计。7 根 RC 梁的尺寸及配筋完全相同, 设计尺寸为 2400 mm×200 mm×150 mm, 钢筋均采用 HRB400 钢筋, 受拉区纵筋为 2C12, 架立钢筋 2C8, 箍筋

表 1 受弯加固试件设计

Table 1 Design of the flexural strengthened specimens

Group	Specimen number	d/mm	Formula of ECC	$\rho/\%(n)$	End anchorage
A	HSSWS3/3-ECC1-RC	3.0	Formula 1	0.348(3)	N
	HSSWS3/5-ECC1-RC	3.0	Formula 1	0.580(5)	Y
	HSSWS3/7-ECC1-RC	3.0	Formula 1	0.812(7)	Y
B	HSSWS3/5-ECC2-RC	3.0	Formula 2	0.580(5)	Y
	HSSWS3/5-ECC3-RC	3.0	Formula 3	0.580(5)	Y
C	HSSWS4.5/2-ECC1-RC	4.5	Formula 1	0.535(2)	Y

Notes: d —Diameter of steel strand; ρ —Reinforcement ratio of longitudinal HSSWSs (High-strength steel wire strands); n —Number of longitudinal steel strands; N—The ends of the reinforcement layer are not anchored; Y—The ends of the reinforcement layer are anchored.

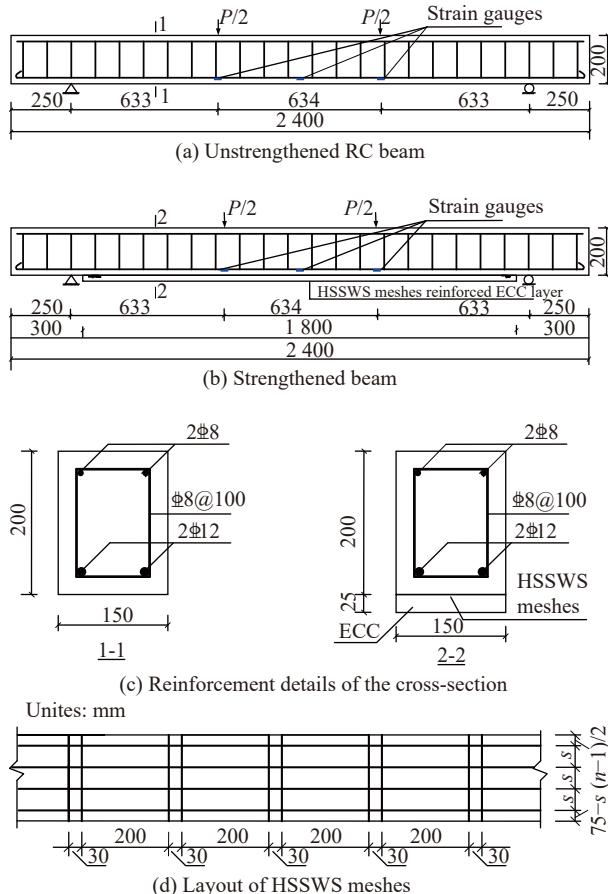
表 2 工程用水泥基复合材料(ECC)配合比

Table 2 Mix proportions of engineered cementitious composite (ECC)

Ingredient	Formula 1	Formula 2	Formula 3
Cement	1	1	1
Sand	0.4	0.4	0.4
Fly ash	2.5	2.5	2.5
Silica powder	0.073	0.073	0.073
Water	0.893	0.858	1.008
PVA fiber	0.072	0.072	0.074
Water reducing	0.0407	0.0407	0.0407
Thickening agent	0.00182	0.00182	0

Notes: PVA—Polyvinyl alcohol.

为 C8@100 通长布置，混凝土保护层为 25 mm。在 RC 梁底进行高强钢绞线网增强 ECC 加固，加固层厚度参考相关文献^[13] 取 25 mm，长度取 1800 mm，高强钢绞线端部锚固参考钢绞线网片聚合物砂浆加固技术规程^[14]，试件构造及配筋如图 1 所示。



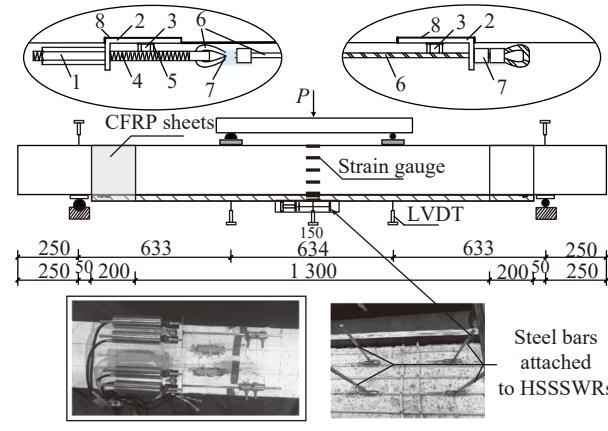
n—The number of HSSWSs; s—The distance between adjacent HSSWSs

图 1 高强钢绞线网(HSSWS)增强ECC加固无损钢筋混凝土(RC)梁试件几何尺寸及配筋

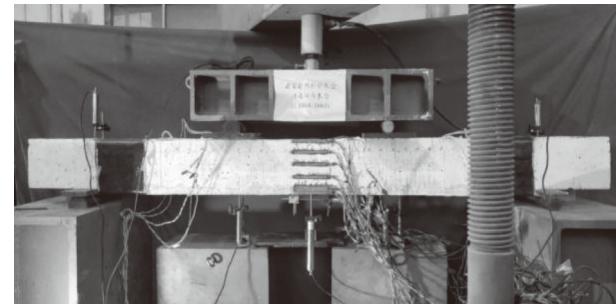
Fig. 1 Geometric dimensions and reinforcements of non-damaged reinforced concrete (RC) beam specimens strengthened by high-strength steel wire strand (HSSWS) meshes reinforced ECC

完成原 RC 梁浇筑并养护 28 天之后，进行高强钢绞线网增强 ECC 加固层的绑扎安装和浇筑工作。首先，在 RC 梁底两端，将用于高强钢绞线网端部锚固的角钢安装处打磨出 5 mm 深凹槽，用粘钢胶及膨胀螺栓将角钢固定在凹槽内；纵向高强钢绞线通过螺栓及 8 字铝扣^[15]等固定于角钢上，见图 2(a)。横向高强钢绞线使用扎丝与纵向高强钢绞线绑扎连接，具体布置如图 1(d) 所示。钢绞线网安装完成之后，安装 ECC 模板，并浇筑 ECC。为了使高强钢绞线网增强 ECC 加固层在受力全过程中不发生端部提早剥离破坏，使用碳纤维布对其端部进行环包加固。ECC 养护满 28 天之后即可进行试验。

1—Extended hexagonal nut 2—Steel angle 3—Expansion bolt
4—Bolt 5—Washer 6—HSSWR 7, 8—Character-pattern aluminum buckle 8—Epoxy resin adhesive layer



(a) Schematics of end anchorages of longitudinal HSSWS and test setup
Units: mm



HSSWR—High-strength stainless steel wire rope; CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; LVDT—Linear variable differential transformer

图 2 纵向 HSSWS 端部锚固及试验装置

Fig. 2 End anchorages of longitudinal HSSWS and test setup

1.2 材料性能试验

试验前，将预留的混凝土试块(受压试块：150 mm×150 mm×150 mm，与 RC 梁试件同条件养护 28 天)及 ECC 试块(受压试块：70.7 mm×70.7 mm×

70.7 mm；受拉试块：16 mm×40 mm×280 mm，与 RC 梁试件同条件养护 28 天)进行力学性能试验。试验用混凝土立方体抗压强度平均值为 41.8 MPa。将直径分别为 8 mm、12 mm 的钢筋进行拉伸试验，测得 8 mm、12 mm 钢筋弹性模量分别为 2.56×10^5 MPa、 2.14×10^5 MPa，屈服强度分别为

513 MPa、413.3 MPa，极限强度分别为 678.2 MPa、585.1 MPa。通过 ECC 单轴受压和单轴受拉试验，确定 ECC 抗压强度 f_{cu} 、弹性模量 E_s 、受拉开裂强度 f_{tc} 、开裂应变 ε_{tc} 、抗拉强度 f_{et} 以及极限拉应变 ε_u 和峰值荷载对应的裂缝宽度 ω ，试验结果见表 3。图 3 为典型 ECC 受拉应力-应变曲线。

表 3 ECC 材料性能

Table 3 Material properties of ECC

Formula of ECC	f_{cu}/MPa	E_s/GPa	f_{tc}/MPa	$\varepsilon_{tc}/\%$	f_{et}/MPa	$\varepsilon_u/\%$	ω/mm
Formula 1	37.3	14.12	1.370	0.025	2.180	1.88	0.30
Formula 2	46.5	14.63	1.915	0.035	2.815	0.75	0.35
Formula 3	36.6	14.36	1.865	0.032	2.305	2.48	0.24

Notes: f_{cu} —ECC compressive strength; E_s —ECC elastic modulus; f_{tc} —ECC cracking strength; ε_{tc} —ECC cracking strain; f_{et} —ECC tensile strength; ε_u —ECC ultimate tensile strain; ω —Crack width corresponding to peak load of ECC.

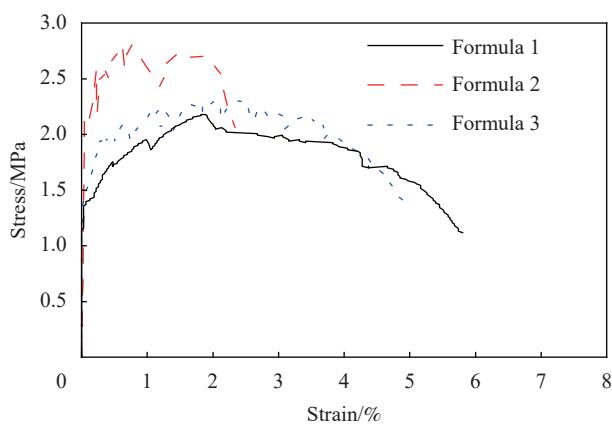


图 3 典型 ECC 受拉应力-应变曲线

Fig. 3 Typical tensile stress-strain curves of ECC

加固采用两种不同公称直径高强钢绞线，将直径分别为 3 mm、4.5 mm 的高强不锈钢绞线试样进行拉伸试验，得到平均极限拉应力分别为 1919 MPa、1706 MPa，平均极限拉应变分别为 2.96%、3.37%。所采用的碳纤维布的名义厚度为 0.111 mm，其实测抗拉强度和弹性模量分别为 4 185 MPa 和 230 GPa。粘贴碳纤维布所用环氧树脂浸渍胶的抗拉强度和弹性模量分别为 38 MPa 和 2 400 MPa。

1.3 试验装置及测试方法

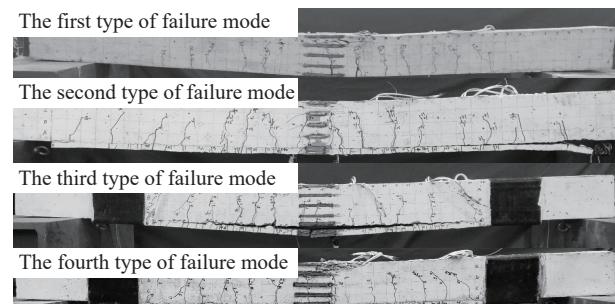
本试验研究采用在梁三分点处对称加载方法(图 2)，参考混凝土结构试验方法标准^[16]进行分级加载。为测量加载过程中试件梁的应变变化，在梁跨中混凝土侧面沿梁截面高度方向均匀布置应变片，在加固层侧面上下边缘布置应变片(图 2(a))，

并在跨中及两加载点处的纵向受拉钢筋表面粘贴应变片(图 1(a) 和 1(b))。为测量试验梁的挠曲变形，在跨中、两加载点及支座处共布置 5 个位移计，见图 2(a)。本试验参考已有钢绞线应变测量方法^[17]，将自制 T 型导杆固定于跨中高强钢绞线上，取导杆间距(即标距)为 15 cm，通过位移计测量跨中标距内纵向钢绞线伸长量，见图 2(a)，将伸长量除以标距长度即可得到钢绞线应变。借助 DJCK-2 裂缝测宽仪(北京大地华龙科技有限责任公司生产)观察记录裂缝发展情况。

2 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁受弯试验现象及结果分析

2.1 试验现象

根据试验现象，本试验的 7 根梁可分为四类破坏模式如图 4 所示。

图 4 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁试件典型破坏模式图
Fig. 4 Typical failure modes of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

第一类为未加固 RC 梁的典型适筋梁破坏模式：首先试件处于弹性工作阶段；随着荷载增加，

当达到极限荷载 17% 时，跨中纯弯区集中荷载附近受拉区首先开裂，试件进入带裂缝工作阶段；荷载继续增加至极限荷载 85%，受拉纵筋屈服，而后挠度及裂缝宽度随荷载增速加快，最终以混凝土压碎而达到极限状态。

第二类为 HSSWS3/3-ECC1-RC 试件的加固层端部剥离破坏模式：首先试件处于弹性工作阶段；在加载至约极限荷载的 9%，试件加固层端部与原 RC 梁间出现界面微裂缝；当荷载升至极限荷载 18% 时，试件跨中截面受拉区混凝土首先竖向开裂；之后加固层出现弯曲裂缝，且裂缝数量增加，并向受压区扩展，同时界面裂缝不断发展，端部出现局部剥离；在荷载升至极限荷载 70% 时，受拉纵筋屈服，挠度和裂缝快速发展；在荷载升至约极限荷载 89% 时，加固层一侧端部界面裂缝宽度突然增加，加固层端部完全剥离；由于钢绞线端部锚固装置的存在，加固层并未完全失效，持续加载至受压区混凝土被压碎，梁达到极限状态。

第三类为试件 HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS3/5-ECC2-RC、HSSWS3/5-ECC3-RC、HSSWS4.5/2-ECC1-RC 的加固层断裂破坏模式：首先试件处于弹性阶段；随着荷载增加到约极限荷载的 18% 时，跨中纯弯区受拉混凝土首先竖向开裂，之后加固层出现弯曲裂缝，同时该处加固层与原 RC 梁出现界面微裂缝；随荷载持续增加，混凝土及加固层的弯曲裂缝不断增多，且向受压区稳定扩展，同时界面裂缝向支座方向缓慢延伸；当荷载升至极限荷载的 75% 时，受拉纵筋率先屈服；之后梁挠度及混凝土裂缝宽度增速加快，加固层的裂缝多且细，并稳定发展，同时界面裂纹缓慢发展，但未形成界面通缝，端部锚固完好，加固层持续受力；在受拉钢筋屈服后的阶段，相比于未加固梁和端部未锚固的加固梁，这些具有端部锚固的加固梁的混凝土裂缝宽度增速和向上扩展速度以及挠度增速明显减缓，且混凝土裂缝数量相对较多，这是由于在加固层有效锚固情况下，加固层中钢绞线拉结和纤维桥联的耦合作用，能够较好地约束混凝土裂缝的发展；荷载增至极限荷载时，受压区混凝土被压碎，此时加固梁的挠度明显大于未加固梁及端部未锚固的加固梁，表明该加固方法可以显著提升 RC 梁的变形能力，这是由于高强钢绞线网增强 ECC 加固层能有效约束 RC 梁裂缝发展，使其受拉钢筋受力更均匀，从而提高其变形能力；之后荷载下降，界面裂缝加速发展，

纯弯区出现局部剥离，当荷载降至极限荷载的 90% 时，加固层突然断裂，试件破坏。

第四类为 HSSWS3/7-ECC1-RC 试件的加固层未断裂破坏模式：首先试件处于弹性阶段；当荷载升至极限荷载 19% 时，跨中纯弯区截面受拉区混凝土边缘率先开裂，之后加固层出现弯曲裂缝；随荷载增加，混凝土和加固层的弯曲裂缝数量增多，且向受压区稳定扩展，同时加固层与混凝土界面出现微裂缝，并缓慢发展；当荷载升至极限荷载 71% 时，受拉纵筋屈服；之后梁挠度及弯曲裂缝宽度增速加快，裂缝进一步向上开展，界面裂纹发展缓慢，未形成界面通缝，端部锚固完好；最后以混凝土被压碎而达到极限状态，加固层未发生断裂。在受拉钢筋屈服后，相比于未加固梁和端部未锚固的加固梁，具有端部锚固的加固梁 HSSWS3/7-ECC1-RC 的混凝土裂缝宽度增速和向上扩展速度以及挠度增速明显减慢，且混凝土裂缝数量相对较多，达到极限荷载时的挠度明显增大，其原因分析同第三类破坏模式梁。

综上所述，加固梁的首条竖向受弯裂缝总是出现在混凝土中，而加固层的首条竖向裂缝均在混凝土开裂后产生。分析原因：ECC 开裂应变远高于混凝土，使得混凝土先于 ECC 开裂。此外，各加固梁均因混凝土被压碎而达到承载力极限状态，即各加固梁的极限状态是由受压区混凝土破坏所控制。第三类破坏模式试件发生了加固层断裂，而第四类试件未发生，这是由于相比于第三类试件，第四类试件具有较大的加固层纵向钢绞线配筋率，使得达到极限状态时，其钢绞线未达到拉断应力。HSSWS3/3-ECC1-RC 试件由于未采用端部碳纤维布环包锚固，发生了端部加固层提早剥离，而其余采用端部锚固的试件均未发生端部剥离，说明采用高强钢绞线网增强 ECC 抗弯加固 RC 梁时，须使用有效的加固端锚固措施（如碳纤维布环包锚固），以避免发生端部提早剥离破坏。

2.2 试验结果

本文各试件的主要试验结果如表 4 所示。其中 M_{cr} 表示开裂弯矩； M_y 为屈服弯矩； M_u 为极限弯矩； Δ_y 与 Δ_u 分别表示 M_y 和 M_u 时对应的挠度； $\omega_{max,y}$ 表示纵向钢筋屈服时试件上混凝土的最大裂缝宽度； S 为试件梁纯弯段的平均裂缝间距； μ_Δ 为试件延性系数， $\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$ ^[18]； D_{max} 为试件弯曲韧性系数，其值等于荷载-挠度曲线在峰值荷载前的曲线包络面积^[19]。

表 4 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁受弯试验结果

Table 4 Bending test results of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

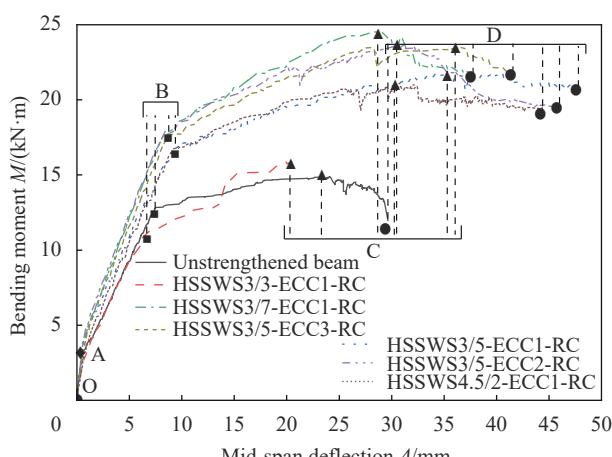
Specimen number	$M_{cr}/(kN\cdot m)$	$M_y/(kN\cdot m)$	$M_u/(kN\cdot m)$	Δ_y/mm	Δ_u/mm	$\omega_{max,y}/mm$	S/mm	μ_d	$D_{max}/(kN\cdot mm)$
Unstrengthened RC beam	2.7	12.7	15.0	6	23.3	0.5	158.5	3.15	277.41
HSSWS3/3-ECC1-RC	2.9	11.1	15.9	6.5	20.2	0.43	126.8	3.11	229.19
HSSWS3/5-ECC1-RC	3.8	16.5	21.9	9.3	35.2	0.35	126.8	3.78	602.33
HSSWS3/7-ECC1-RC	4.6	17.5	24.5	8.2	29.0	0.24	126.8	3.54	538.03
HSSWS3/5-ECC2-RC	4.4	17.7	23.7	8.3	31.2	0.4	105.7	3.76	576.40
HSSWS3/5-ECC3-RC	4.1	17.4	23.5	8.6	36.8	0.31	126.8	4.28	695.12
HSSWS4.5/2-ECC1-RC	3.8	16.7	21.1	8.5	30.4	0.38	126.8	3.58	506.48

Notes: M_{cr} —Cracking moment of the specimen; M_y —Yielding moment of the specimen; M_u —Ultimate bending moment of the specimen; Δ_y —Deflection of the specimen at M_y ; Δ_u —Deflection of the specimen at M_u ; $\omega_{max,y}$ —The maximum crack width of concrete of the specimen when the longitudinal reinforcement yielded; S —Average crack spacing in pure bending segment of the specimen; μ_d —Ductility coefficient of the specimen; D_{max} —Flexural toughness coefficient of the specimen.

2.3 试验曲线分析

2.3.1 受弯试件弯矩-挠度曲线

图 5 为高强钢绞线网增强 ECC 加固受弯试件的弯矩 (M)-跨中挠度 (Δ) 曲线。由表 4 和图 5 可知, 除加固层未能充分参与工作的 HSSWS3/3-ECC1-RC 试件外, 其余加固梁开裂弯矩、屈服弯矩、极限弯矩、刚度均有大幅度提升, 表明该加固方法具有较好加固效果。高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁弯矩-挠度曲线可划分为三个阶段:



A—Cracking point of concrete; B—Yielding point of longitudinal steel bar; C—Ultimate moment point; D—Concrete crushing point (for unreinforced beam) or reinforcement layer rupture point (for strengthened beams)

图 5 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁试件弯矩-挠度曲线

Fig. 5 Bending moment versus mid-span deflection curves of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

(1) 弹性工作阶段 (OA段): 为加载至试件初次弯曲开裂 (A点) 之前, 试件的弯矩-挠度曲线处于线弹性阶段, 试件整体发生弹性变形, 且加固

试件曲线斜率均大于未加固试件, 表明高强钢绞线网增强 ECC 加固可有效提升弹性阶段刚度。

(2) 带裂缝工作阶段 (AB段): 自混凝土受弯开裂 (A点) 至受拉钢筋屈服 (B点); 混凝土开裂后, 导致中性轴上移、截面刚度降低, 表现为曲线斜率降低, 即挠度增速加快; 加固层 ECC 由于 PVA 纤维的桥连作用, 使得在整个过程中高强钢绞线和 ECC 能共同承受拉力。此阶段除加固层未能充分参与工作的 HSSWS3/3-ECC1-RC 试件外, 相同荷载水平下, 加固梁曲线斜率均大于未加固梁, 表明在端部有效锚固情况下, 加固梁带裂缝工作阶段的刚度可得到有效提升。

(3) 破坏阶段 (BC段): 自受拉纵筋屈服 (B点) 至试件达到极限弯矩 (C点); 此阶段弯矩-挠度曲线斜率显著下降, 挠度增速加快; 其中, 未加固梁曲线接近水平, 而除 HSSWS3/3-ECC1-RC 试件外的加固梁由于加固层的协同受力, 试件曲线斜率下降幅度相比未加固梁较小, 所承受荷载仍继续增加, 表明具有有效端部锚固的加固梁破坏阶段刚度也得到有效提升 (而 HSSWS3/3-ECC1-RC 试件因加固层未能充分参与工作, 导致在受拉钢筋屈服后, 弯矩-挠度曲线呈不规律发展); 受压区混凝土被压碎时, 试件达到极限承载力。之后荷载下降, 挠度持续增加, 最终在 D点处, 试件混凝土被充分压碎 (未加固梁、试件 HSSWS3/3-ECC1-RC 和 HSSWS3/7-ECC1-RC) 或加固层拉断 (试件 HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS3/5-ECC2-RC、HSSWS3/5-ECC3-RC、HSSWS4.5/2-ECC1-RC)。

2.3.2 混凝土应变曲线

图 6 为各试件弯矩-混凝土上表面压应变曲线, 分析曲线关系, 曲线可以分为三个阶段。第一阶

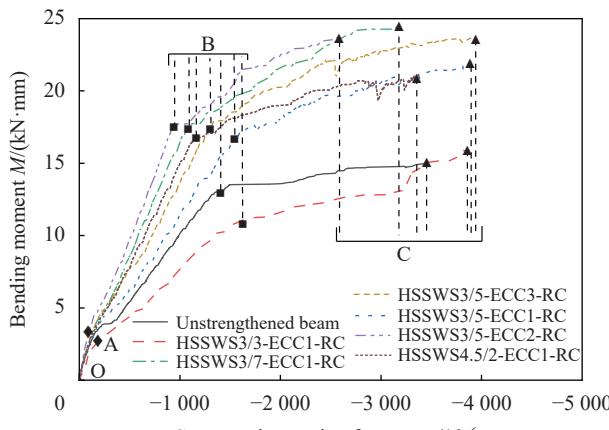


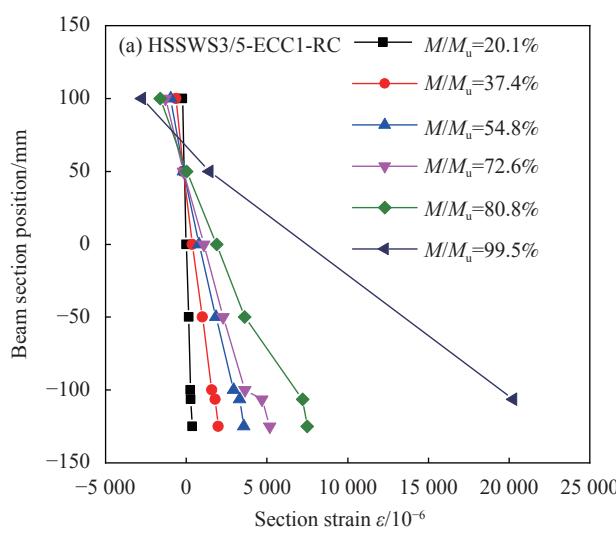
图 6 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损
RC 梁试件弯矩-混凝土压应变曲线图

Fig. 6 Bending moment versus concrete compressive strain curves of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

段(OA段): 试件开裂前阶段, 此时弯矩-混凝土压应变曲线为一条直线, 混凝土应变很小。第二阶段(AB段): 试件开裂(A点)后, 曲线出现拐点, 随着外部荷载的增加, 混凝土应变快速增加, 曲线斜率降低。第三阶段(BC段): 试件达到屈服荷载(B点)时, 曲线再次出现拐点, 随着荷载的增加, 混凝土应变迅速增加, 曲线斜率明显降低, 直至达到极限压应变(C点), 混凝土压碎破坏。由图6可知, 未加固梁在其纵向受拉钢筋屈服后, 弯矩-混凝土压应变曲线接近水平, 这意味着截面中性轴快速上移, 混凝土压应变急剧增加; 而采用端部锚固的加固梁该阶段曲线虽相较第一阶段

斜率减小, 但仍保持一定的上扬姿态, 这说明截面中性轴上移速度相对较缓, 混凝土压应变增加速度相对较慢。这表明高强钢绞线网增强 ECC 加固层在钢筋屈服后仍能有效协同工作, 从而约束弯曲裂缝扩展, 减缓中性轴上移和混凝土压应变增加的速度。

基于试验数据, 绘制典型试件的跨中截面应变沿高度分布图如图7所示。其中, 高强钢绞线应变亦加入到应变分布图中。图7中竖轴0点表示截面中间高度。由图7可知, 加固梁开裂前, 截面符合平截面假定; 开裂后, 原RC梁混凝土及钢绞线应变沿梁跨中截面高度的变化规律符合平截面假定, 而加固层下缘ECC应变却略有滞后。分析原因: ①高强钢绞线网增强 ECC 加固层中的纵向高强钢绞线距离原RC梁底较近, 高强钢绞线端部通过角钢锚固件牢牢锚固在原RC梁上, 故变形可以与原RC梁协调; ②与钢绞线相比, 加固层ECC下缘距原RC梁底相对较远, 加载过程中出现ECC与混凝土界面裂缝, 使得ECC层与混凝土不能完全变形协调, 且界面相对滑移随荷载增加而增大, 同时由于ECC自身开裂的发展, 使得高强钢绞线与ECC间的相对滑移亦随荷载增加而增大, 所以引起ECC下缘的应变滞后, 而滞后程度随荷载增加而增大。针对ECC加固层变形滞后于原RC梁的问题, 本文建议在加固层端部采用有效锚固措施, 如碳纤维布环包锚固, 本文试验也证明了该措施可有效改善加固层与原梁的



M—The applied bending moment; M_u —Ultimate bending moment

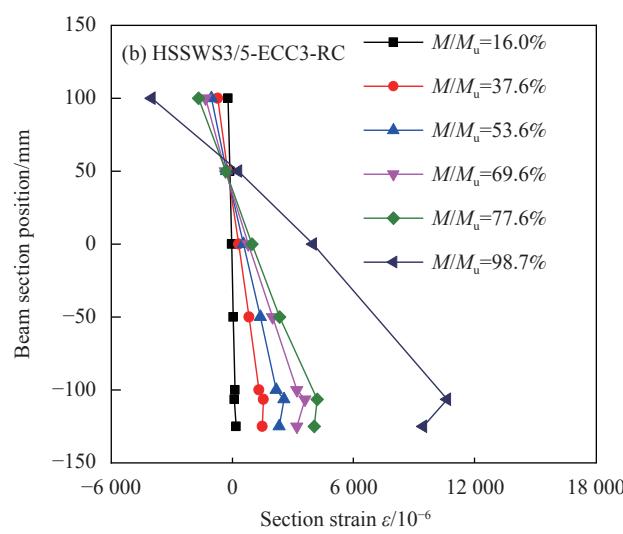


图 7 典型高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁试件跨中截面应变分布图

Fig. 7 Typical strain distribution along the height of mid-span sections of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

协同工作能力, 避免端部提早剥离。另外, 作者计划在下一步研究中, 通过在加固界面增加锚固件(如销钉锚固等措施), 以增加 ECC 加固层与混凝土的界面抗剪刚度, 从而减小 ECC 层相对于原梁的应变滞后。

2.3.3 弯矩-受拉纵筋应变曲线

图 8 为试件弯矩-跨中受拉纵筋应变曲线, 可以看出, 该曲线也可分为三个阶段, 即 OA 段、AB 段和 BC 段。第一阶段(OA 段): 为试件开裂(A 点)前阶段, 钢筋处于弹性变形阶段, 其应变随荷载线性增加, 该阶段的加固梁的钢筋应变滞后于未加固梁, 这是由于加固层充分参与工作, 承担部分拉应力。第二阶段(AB 段): 自试件开裂(A 点)至钢筋屈服(B 点), 曲线出现拐点, 应变增速加快, 且该阶段中 HSSWS3/7-ECC1-RC、HSSWS3/5-ECC2-RC、HSSWS3/5-ECC3-RC、HSSWS4.5/2-ECC1-RC 试件的钢筋应变均明显滞后于未加固梁, 这是由于加固层仍能参与受力, 承担了部分拉应力; 而 HSSWS3/3-ECC1-RC 试件由于加固层端部提早剥离, 未能充分参与受力, 钢筋应变发展较快; 而 HSSWS3/5-ECC1-RC 试件受拉纵筋跨中应变测点刚好被一条混凝土主裂缝穿过, 才导致钢筋局部应变较高。第三阶段(BC 段): 钢筋屈服(B 点)后, 应变随荷载快速增加。

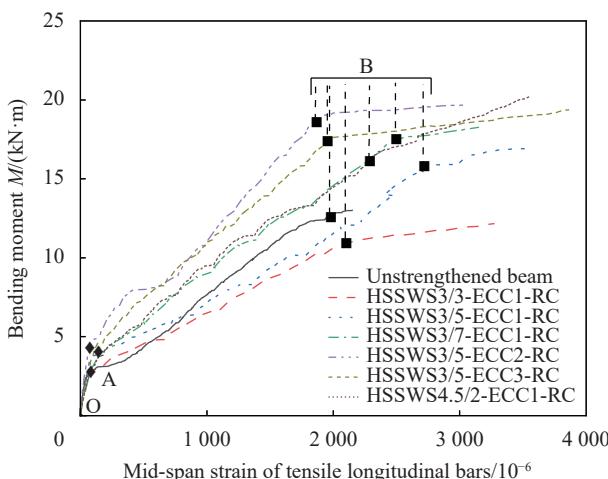


图 8 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁试件
弯矩-跨中受拉纵筋应变曲线图

Fig. 8 Bending moment versus tensile strain curves of longitudinal bars at mid-span of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

2.3.4 弯矩-钢绞线应变曲线

图 9 为高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁的弯矩-钢绞线跨中应变曲线。图 9 中: A 点为

混凝土开裂点、B 点为受拉纵筋屈服点、C 点为极限荷载点、D 点为加固层断裂点或混凝土充分压碎点。其中 HSSWS3/3-ECC1-RC 试件加固层与混凝土剥离时, 使测量钢绞线变形的位移计发生错动, 导致数据失真, 故其不含 C、D 点。由图 9 可见, 自初始加载至 A 点(弹性工作阶段), 钢绞线应变随弯矩增大而线性增加。各加固梁弯矩-跨中钢绞线应变曲线的 OA 段和 AB 段变化相似。达到 B 点时, 弯矩-钢绞线应变曲线出现拐点, 之后斜率显著降低, 直至达到极限弯矩点 C, 再次出现拐点, 随后弯矩降低, 而钢绞线应变持续快速增加, 直至钢绞线拉断或者混凝土被充分压碎破坏。试件 HSSWS3/3-ECC1-RC 由于加固层端部提早剥离, 其钢绞线应变在界面出现剥离后始终滞后于其余加固梁试件。由于试件 HSSWS3/5-ECC1-RC 与 HSSWS4.5/2-ECC1-RC 钢绞线的测量标距范围内刚好有混凝土主裂缝出现, 所以试件开裂后的钢绞线应变增大较快, 即 BC 段曲线斜率相对于其他加固梁(HSSWS3/3-ECC1-RC 除外)明显偏小。

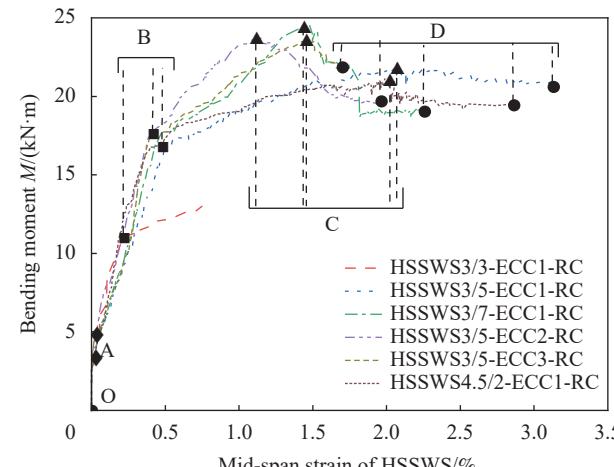


图 9 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁试件
弯矩-钢绞线跨中应变曲线图

Fig. 9 Bending moment versus steel wire strand strain curves at mid-span of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

3 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁受弯性能影响因素

3.1 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁开裂荷载及受弯承载力

由表 4 可知, 在采用端部锚固措施下, 加固梁的开裂荷载以及极限弯矩(受弯承载力)均较对比梁有明显提高。HSSWS3/3-ECC1-RC 试件由于

未采用端部锚固，使得混凝土与加固层的界面裂纹先于混凝土开裂出现，所以加固层对混凝土开裂的约束作用相对于其余加固梁较小，且二者无法良好地协同工作，导致其开裂荷载和受弯承载力提升较小。

相对于未加固梁，仅高强钢绞线配筋率不同的试件 HSSWS3/5-ECC1-RC ($\rho=0.580\%$) 和 HSSWS3/7-ECC1-RC ($\rho=0.812\%$) 的开裂荷载分别提高了 41%、70%，极限弯矩分别提高了 46%、63%。这表明纵向高强钢绞线配筋率越高，开裂荷载以及受弯承载力提升越大。分析原因：增加高强钢绞线用量，相当于增加了受拉钢筋面积，从而提升原梁开裂荷载及极限弯矩。

相对于未加固梁，仅 ECC 配方不同的试件 HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS3/5-ECC2-RC、HSSWS3/5-ECC3-RC 的开裂荷载分别提高了 41%、63%、51%，极限弯矩分别提高了 50%、58%、57%。结果表明：不同 ECC 配方对试件开裂荷载和受弯承载力的提高排序为配方 2 > 配方 3 > 配方 1。分析原因：由表 3 可知，不同配方的 ECC 弹性模量比较为配方 2 > 配方 3 > 配方 1。在混凝土开裂之前，ECC 弹性模量越高，加固梁截面抵抗矩越大，从而开裂弯矩越大；在试件达到极限承载力状态时，加固层尚未拉断，ECC 仍处于应变硬化阶段，而弹性模量越大的 ECC，其在极限弯矩下的应力越大，从而使得试件受弯承载力提高。

相对于未加固梁，考虑不同高强钢绞线直径且配筋率接近的 HSSWS3/5-ECC1-RC ($d=3.0\text{ mm}$)、HSSWS4.5/2-ECC1-RC ($d=4.5\text{ mm}$) 试件的开裂荷载均提高了 41%，极限弯矩分别提高了 46%、41%。这表明在纵向高强钢绞线配筋率相近的情况下，改变高强钢绞线直径对加固梁的开裂荷载以及极限承载力影响不大。

3.2 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁裂缝

图 10 为各试件受力全过程中最大裂缝宽度变化曲线。各试件宽度最大的裂缝均出现在梁的纯弯段区域，但在每级荷载下宽度最大的裂缝并不一定是同一条裂缝，而图 10 中最大裂缝宽度取的是每级荷载下宽度最大的裂缝的宽度。由表 4 和图 10 可知，除无端部锚固的 HSSWS3/3-ECC1-RC 试件外，其余试件的最大裂缝宽度速度相对于未加固梁均有大幅下降。说明在端部有效锚固情况下，采用高强钢绞线网增强 ECC 加固方法可有效约束裂缝发展和减小裂缝宽度。

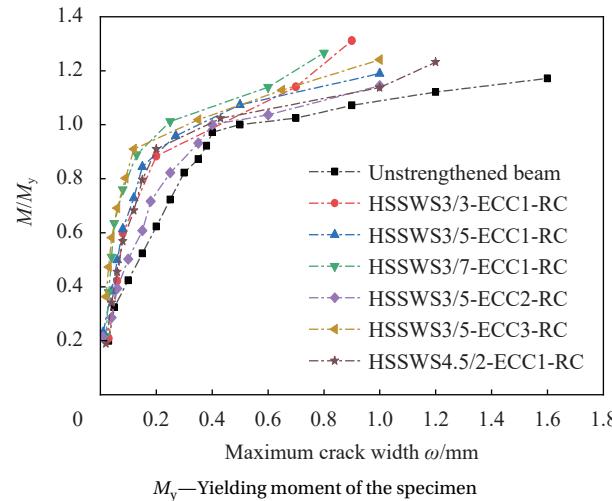


图 10 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁
试件的弯矩-最大裂缝宽度曲线

Fig. 10 Bending moment versus maximum crack width curves of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

由表 4 及图 10 可知，HSSWS3/7-ECC1-RC 试件的裂缝宽度发展速度缓于 HSSWS3/5-ECC1-RC 试件。这表明：提高纵向钢绞线配筋率可以减缓加固梁的裂缝宽度发展。分析原因：相同荷载水平下，纵向钢绞线配筋率越高，钢绞线增强 ECC 加固层的裂缝约束能力越好，从而能更好地约束 RC 梁裂缝发展和减小裂缝宽度。此外，使用三种不同 ECC 配方的试件，其最大裂缝宽度发展速度为：HSSWS3/5-ECC3-RC < HSSWS3/5-ECC1-RC < HSSWS3/5-ECC2-RC。这表明三种 ECC 配方对裂缝宽度的控制能力由强到弱排列顺序为：配方 3 > 配方 1 > 配方 2。分析原因：由 ECC 材性试验结果可知，配方 3 的 ECC 极限拉应变最大，其峰值应力对应的裂缝宽度最小，表明其控裂能力、变形能力和韧性最好，所以其对加固梁的裂缝约束能力提升效果最好，配方 1 次之，配方 2 最差。另外，HSSWS4.5/2-ECC1-RC 试件的裂缝发展速度快于 HSSWS3/5-ECC1-RC 试件。这表明：纵向高强钢绞线配筋率接近的情况下，钢绞线公称直径越大，试件裂缝宽度发展越快。分析原因：纵向高强钢绞线配筋率接近的情况下，钢绞线公称直径越大，其和 ECC 的接触面就越小，高强钢绞线和 ECC 协同工作能力越差，从而导致钢绞线增强 ECC 加固层对试件的裂缝控制能力减弱。

3.3 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁刚度

参照黄华^[20]提出以跨中截面弯矩与挠度的比值定义截面刚度的方法，得到试件受力全过程的

截面刚度，绘制出各试件刚度-挠度曲线，如图 11 所示。由图 11 可以看出：试件刚度随着纵向钢绞线配筋率的增大而提高。ECC 配方对试件刚度的提升能力：配方 2>配方 3>配方 1。但钢绞线配筋率对刚度的影响明显大于 ECC 的配方。纵向钢绞

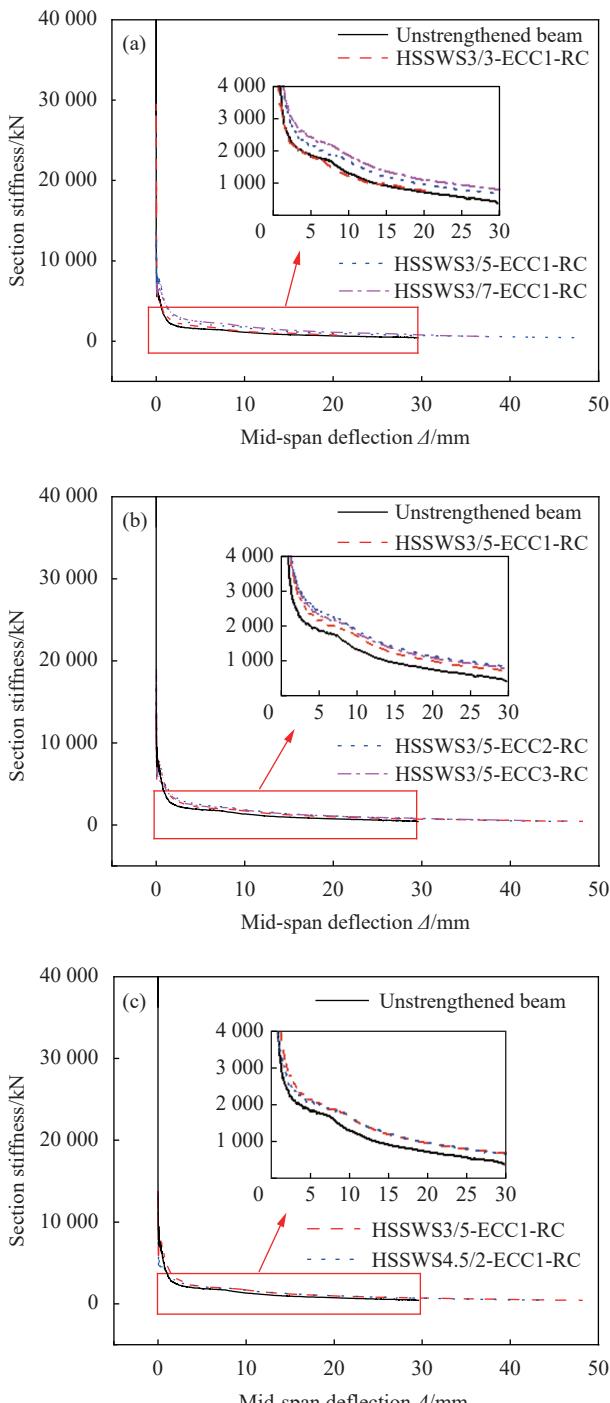


图 11 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁
试件截面刚度-挠度曲线对比

Fig. 11 Comparison of section stiffness-deflection curves of RC beam specimens strengthened by HSSWS meshes reinforced ECC

线配筋率相近的情况下，钢绞线公称直径对试件刚度影响较小。分析原因：在加固梁端部有效锚固的情况下，增加纵向高强钢绞线配筋率，相当于提高了纵向受拉钢筋的面积，使得在相同荷载水平下梁的纵向受拉钢筋应变减小，即梁的弯曲曲率减小，从而抗弯刚度增大。同理，采用弹性模量较高的 ECC 配方，可使加固层分担更多拉力，从而降低加固梁纵向受拉钢筋应力和应变，提高试件刚度。另外，纵向钢绞线配筋率相近的情况下，改变钢绞线公称直径对梁纵向受拉钢筋承担拉力影响不大，所以对试件抗弯刚度影响亦较小。

3.4 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁延性

分析表 4 中的延性系数 μ_d 可知：HSSWS3/3-ECC1-RC 试件与对比梁延性系数接近，这是由于该试件无端部锚固措施所致。HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS3/7-ECC1-RC 试件相较未加固梁延性系数分别提升了 20.0%、12.4%。这表明合理提高纵向钢绞线配筋率会大幅度提高构件延性，但过高的钢绞线配筋率会降低构件延性。分析原因：高强钢绞线网增强 ECC 加固层对 RC 梁裂缝具有优良的分散和控制能力，使其变形能力增强，从而提高加固梁延性；但加固梁极限状态均为受压区混凝土压碎，所以随着钢绞线配筋率增大，极限状态下试验梁的截面受压区高度越高，使得此时梁的弯曲曲率越小，变形能力越差，从而导致延性降低。

HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS3/5-ECC2-RC、HSSWS3/5-ECC3-RC 试件相较未加固梁延性系数分别提升了 20.0%、19.4%、35.9%。这表明 ECC 配方对加固梁延性提升能力为：配方 3>配方 1>配方 2。分析原因：由 ECC 材性试验结果可知，配方 3 的 ECC 变形能力和裂缝控制能力最好，配方 1 次之，配方 2 最差，而 ECC 控裂能力和变形能力越强，其对加固梁的裂缝约束及变形能力提升效果越好。

HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS4.5/2-ECC1-RC 试件相较于未加固梁延性系数分别提升了 20.0%、13.7%。这表明：纵向高强钢绞线配筋率接近的情况下，较大的高强钢绞线公称直径，会降低试件的延性。分析原因：纵向高强钢绞线配筋率接近的情况下，钢绞线公称直径越大其表面积越小，和 ECC 的接触面就越小，高强钢绞线和 ECC 协同工作能力越差，从而对加固梁延性提升效果越差。

3.5 高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁韧性

分析表 4 中的最大弯曲韧性系数 D_{max} 可知, HSSWS3/3-ECC1-RC 试件由于缺少端部锚固措施的原因, 导致其弯曲韧性较低。试件 HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS3/7-ECC1-RC、HSSWS3/5-ECC2-RC、HSSWS3/5-ECC3-RC、HSSWS4.5/2-ECC1-RC 相对于未加固梁试件, 其弯曲韧性有显著的提高, 这表明采用加固层端部锚固的高强钢绞线网增强 ECC 抗弯加固可大幅提高 RC 梁的弯曲韧性。

相对于未加固梁, HSSWS3/5-ECC1-RC 试件和 HSSWS3/7-ECC1-RC 试件弯曲韧性分别提高了 117% 和 93%, 这表明过高的纵向钢绞线配筋率会导致试件弯曲韧性降低, 这与加固梁受弯延性随钢绞线配筋率的变化规律相同。这是由于加固梁极限状态均为受压区混凝土压碎, 则提高钢绞线配筋率, 极限荷载下试验梁截面受压区高度增大, 而弯曲曲率变小, 变形能力和耗能能力变差, 从而导致韧性降低。

相对于未加固梁试件, HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS3/5-ECC2-RC、HSSWS3/5-ECC3-RC 试件弯曲韧性分别提高 117%、108%、151%。即 ECC 配方对构件弯曲韧性的提高程度为: 配方 3>配方 1>配方 2, 这与 ECC 配方对加固梁受弯延性的影响规律相同。分析原因: 三种配方中, 配方 3 的 ECC 控裂能力、变形能力和韧性最好, 所以其对加固梁的裂缝约束、变形能力及耗能能力提升效果最好, 配方 1 次之, 配方 2 最差。

相较未加固梁试件, HSSWS3/5-ECC1-RC、HSSWS4.5/2-ECC1-RC 试件弯曲韧性分别提高了 117%、83%。这表明, 在纵向高强钢绞线配筋率相近的情况下, 高强钢绞线公称直径越大, 弯曲韧性越差。这与钢绞线直径对加固梁延性的影响规律相同。分析原因: 纵向高强钢绞线配筋率接近的情况下, 钢绞线公称直径越大, 其与 ECC 的接触面就越小, 则其和 ECC 协同工作能力越差, 从而对加固梁延性和韧性提升效果越差。

4 结论

对高强钢绞线网增强工程水泥基复合材料 (Engineered cementitious composites, ECC) 加固无损钢筋混凝土 (Reinforced concrete, RC) 梁受弯性能进行了试验研究, 揭示了加固梁破坏机理, 探明了不同纵向钢绞线配筋率、ECC 配方、钢绞线公称直径及有无加固层端部锚固对加固梁受弯

性能的影响规律。得出以下结论:

(1) 加固梁破坏模式共有三种: 第一种是未采用端部锚固措施的加固梁端部提早剥离破坏, 加固效果有限; 第二种是采用端部锚固且纵向钢绞线配筋率合适情况下, 加固梁发生受压区混凝土压碎, 而后高强钢绞线增强 ECC 加固层拉断的破坏; 第三种是采用端部锚固且纵向钢绞线配筋率过高情况下, 加固梁发生受压区混凝土压碎、而加固层未拉断的破坏。建议对加固层端部进行有效锚固 (如碳纤维布环包锚固), 并采取合理纵向钢绞线配筋率。

(2) 在采用有效端部锚固措施的情况下, 采用高强钢绞线网增强 ECC 抗弯加固无损 RC 梁可大幅提升其开裂弯矩、屈服弯矩、极限弯矩、刚度、延性和韧性, 且能够有效限制其裂缝的发展, 减小裂缝宽度。对于高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁, 原 RC 梁变形与高强钢绞线变形协调, 符合平截面假定, 而 ECC 层变形略滞后于原 RC 梁。

(3) 增加加固层的纵向高强钢绞线配筋率可以提高加固梁的开裂荷载、受弯承载力、裂缝控制能力和刚度, 但配置过量的纵向高强钢绞线会降低试件的延性和韧性。

(4) 纵向高强钢绞线配筋率接近的情况下, 减小高强钢绞线的公称直径可提高加固梁的延性、弯曲韧性和裂缝控制能力, 但改变钢绞线直径对加固梁的开裂荷载、受弯承载力、截面刚度影响较小。建议在相同配筋率的情况下, 选用直径小根数多的钢绞线, 以增大钢绞线与 ECC 的接触面积, 提高二者的协同工作能力, 使加固层受力更均匀, 进而提升加固效果。

(5) 不同 ECC 配方对加固梁开裂荷载、受弯承载力、刚度的提升效果为: 配方 2>配方 3>配方 1; 对裂缝控制能力、延性、韧性的提升效果为: 配方 3>配方 1>配方 2。由此表明, 加固梁的受弯开裂荷载、承载力、刚度随着 ECC 的弹性模量及抗拉强度的提高而增大; 而加固梁的控裂能力、延性、韧性随 ECC 极限拉应变的提高而增大。

参考文献:

- [1] LIN Z, LI V C. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1997, 45(5): 763-787.
- [2] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研

- 究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(9): 32-41.
- XU Shilang, LI Hedong. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(9): 32-41(in Chinese).
- [3] MENG D, HUANG T, ZHANG Y X. Mechanical behaviour of a polyvinyl alcohol fibre reinforced engineered cementitious composite (PVA-ECC) using local ingredients[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 141: 259-270.
- [4] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. *土木工程学报*, 2008(6): 45-60.
- XU Shilang, LI Hedong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008(6): 45-60(in Chinese).
- [5] 王勃, 鲁文清, 周柏成, 等. 聚乙烯醇纤维水泥砂浆加固技术的研究[J]. *四川建筑*, 2016, 36(4): 181-182.
- WANG Bo, LU Wenqing, ZHOU Bocheng, et al. Study on reinforcement technology of polyvinyl alcohol fiber cement mortar[J]. *Sichuan Architecture*, 2016, 36(4): 181-182(in Chinese).
- [6] 卜良桃, 万长胜, 尹鹏. PVA-ECC加固RC足尺梁受弯性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 5-10.
- BU Liangtao, WAN Changsheng, YIN Peng. Experimental study of full-scale RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite mortar in flexure[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2010, 37(1): 5-10(in Chinese).
- [7] 马益标. 聚乙烯醇纤维砂浆钢筋网加固梁受力性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- MA Yibiao. Research on RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite steel mesh[D]. Changsha: Hunan University, 2018 (in Chinese).
- [8] ZHENG Y Z, WANG W W, BRIGHAM J C. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with a composite reinforcement layer: BFRP grid and ECC[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 115: 424-437.
- [9] 郑宇宙. FRP格栅增强ECC复合加固混凝土梁试验与计算方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- ZHENG Yuzhou. Experiment and calculation method research on reinforced concrete (RC) beams strengthened with the composite of FRP grid and ECC[D]. Nanjing: Southeast University, 2018 (in Chinese).
- [10] 王新玲, 陈永杰, 钱文文, 等. 高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料弯曲性能试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(4): 1292-1301.
- WANG Xinling, CHEN Yongjie, QIAN Wenwen, et al. Experimental on bending performance of engineered cementitious composites reinforced by high-strength stainless steel wire strand mesh[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(4): 1292-1301(in Chinese).
- [11] 王新玲, 罗鹏程, 钱文文, 等. 高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料薄板受弯承载力研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(1): 164-172.
- WANG Xinling, LUO Pengcheng, QIAN Wenwen, et al. Study on flexural bearing capacity of high strength stainless steel wire strand mesh reinforced ECC thin plate[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(1): 164-172(in Chinese).
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建筑部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese).
- [13] LI K, LIU W K, ZHANG K, et al. Bond behavior of stainless-steel wire ropes embedded in engineered cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 281: 122622.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢绞线网片聚合物砂浆加固技术规程: JGJ 337—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for strengthening of building structures with steel stranded wire mesh and polymer mortar: JGJ 337—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015(in Chinese).
- [15] 程佳佳, 何明胜, 李玉成, 等. 不同锚具锚固高强钢绞线性能的分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2020, 38(2): 199-205.
- CHENG Jiajia, HE Mingsheng, LI Yucheng, et al. Analysis on the performance of steel strand with different anchorage device[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2020, 38(2): 199-205(in Chinese).
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012 (in Chinese).
- [17] 林加惠. 钢绞线网片-聚合物砂浆加固RC梁受弯性能试验研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2014.

- LIN Jiahui. Experimental study on the flexural behavior of RC beams strengthened with stranded wire mesh and polymer mortar[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2014(in Chinese).
- [18] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- ZHAO Guofan. Higher reinforced concrete structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2005(in Chinese).
- [19] DONG S F, ZHOU D C, ASHRAF A. Flexural toughness and calculation model of super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103367.
- [20] 黄华. 高强不锈钢绞线网-聚合物砂浆加固钢筋混凝土梁式桥试验研究与机理分析[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- HUANG Hua. Experimental study and theoretical analysis on strengthening RC girder bridge with steel wire mesh and polymer mortar[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018 (in Chinese).