

## 高强钢绞线网/ECC加固RC梁二次受力试验

李可 陈翔 范家俊 牛自立 张哲

**Experiment on RC beams strengthened with high-strength steel strand meshes and ECC under secondary load**

LI Ke, CHEN Xiang, FAN Jiajun, NIU Zili, ZHANG Zhe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221102.003>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 新型复合材料“高强钢绞线网/ECC约束素混凝土”受压性能试验研究

Experimental study on compressive performance of new composite material “concrete confined with high-strength steel stranded wire meshes/ECC”

复合材料学报. 2021, 38(11): 3904–3911 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201225.002>

#### 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>

#### 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>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20221102.003

# 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁 二次受力试验



分享本文

李可<sup>1</sup>, 陈翔<sup>1</sup>, 范家俊<sup>\*1</sup>, 牛自立<sup>2</sup>, 张哲<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司, 郑州 450001)

**摘要:** 高强钢绞线网/工程水泥基复合材料 (Engineered cementitious composites, ECC) 作为新型高性能复合材料, 充分利用了高强钢绞线网及 ECC 优良的力学性能, 具有超高延性、韧性、优异的裂缝控制能力及强度高等优点。为探究二次受力对该新型复合材料加固钢筋混凝土 (Reinforced concrete, RC) 梁受弯性能的影响, 本文考虑是否持载加固、原梁损伤程度、纵向高强钢绞线配筋率的影响, 进行了高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁受弯试验, 分析了二次受力对加固梁受弯性能的影响机制, 探明了各影响因素对持载加固 RC 梁受弯性能的影响规律。结果表明: 采用高强钢绞线网/ECC 持载加固 RC 梁, 使原梁承载力、刚度、延性、韧性分别提升了 38%~65%、20%~81%、0%~18%、33%~116%, 且能很好约束 RC 梁裂缝而减小裂缝宽度; 相比于卸载加固梁, 持载加固梁的加固层由于存在明显应变滞后, 对原梁混凝土裂缝约束效果变差, 其受弯承载力、刚度、韧性有所降低, 但其延性有所提高; 持载加固梁的受弯承载力、刚度、延性、韧性随原梁损伤程度增加而降低, 而随钢绞线配筋率的适当提高而增大。

**关键词:** 高强钢绞线网/ECC; 二次受力; 持载加固; 损伤程度; 钢筋混凝土梁

中图分类号: TU528.57; TB333 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2023)08-4670-12

## Experiment on RC beams strengthened with high-strength steel strand meshes and ECC under secondary load

LI Ke<sup>1</sup>, CHEN Xiang<sup>1</sup>, FAN Jiajun<sup>\*1</sup>, NIU Zili<sup>2</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>

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

2. He'nan Country &amp; Town Layout Design Research Institute, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** As a new type of high performance composite material, high-strength steel wire strand (HSWS) meshes reinforced engineered cementitious composites (ECC), which makes full use of the excellent mechanical properties of HSWS meshes and ECC, has the advantages of ultra-high ductility and toughness, excellent crack-control ability and high strength. In order to explore the effect of secondary load on the flexural behavior of reinforced concrete (RC) beam strengthened with this new composite material, the bending test of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC was conducted, considering the effects of strengthening in load-carrying state, damage degree of the original beam, and reinforcement ratio of longitudinal HSWS. The influence mechanism of secondary load on the flexural performance of strengthened RC beams was analyzed, and the influence laws of these factors on the flexural behavior of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC in load-carrying state were explored. The results show that the flexural capacity, stiffness, ductility and toughness of RC beams strengthened with high-strength steel wire meshes reinforced ECC in load-carrying state are increased by 38%~65%, 20%~81%, 0%~18% and 33%~116%, respectively, and the crack development of RC beam can be well restrained, and the crack width can

收稿日期: 2022-08-26; 修回日期: 2022-10-10; 录用日期: 2022-10-22; 网络首发时间: 2022-11-02 17:10:15

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221102.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (U1804137; 51879243; 52108183); 中国博士后基金 (2020 M672236; 2021 TQ0302); 河南省交通运输厅科技项目 (2021 J3)

National Natural Science Foundation of China (U1804137; 51879243; 52108183); China Postdoctoral Science Foundation (2020 M672236; 2021 TQ0302); Science and Technology Project of Henan Provincial Department of Transportation (2021 J3)

通信作者: 范家俊, 博士, 副教授, 研究方向为新型复合材料性能及结构加固 E-mail: [jiajun.fan@zzu.edu.cn](mailto:jiajun.fan@zzu.edu.cn)

引用格式: 李可, 陈翔, 范家俊, 等. 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁二次受力试验 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4670-4681.

LI Ke, CHEN Xiang, FAN Jiajun, et al. Experiment on RC beams strengthened with high-strength steel strand meshes and ECC under secondary load [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4670-4681 (in Chinese).

be reduced. Compared with the RC beams strengthened in unloading state, the beams strengthened in load-carrying state exhibit obvious strain hysteresis in the reinforcement layer, resulting in the worse constraint effect on the crack of the original beam, and its flexural capacity, stiffness and toughness decrease, but its ductility is improved. The flexural capacity, stiffness, ductility and toughness of the beams strengthened in load-carrying state decrease as the original beam damage degree increases, but grow as the reinforcement ratio of HSWS increases properly.

**Keywords:** high-strength steel wire strand meshes reinforced ECC; secondary load; strengthening in load-carrying state; degree of damage; reinforced concrete beam

工程水泥基复合材料 (Engineered cementitious composites, ECC) 具有耐久性好、变形性能强、超高韧性及应变硬化等优良的力学性能<sup>[1-3]</sup>。此外, ECC 与混凝土有良好的粘结性能, 采用 ECC 加固混凝土构件可显著提高构件的变形能力和控裂能力, 还可抑制氯离子的渗入, 并有效抑制受拉钢筋的锈蚀<sup>[4-6]</sup>。鉴于此, ECC 成为具有广阔应用前景的新型复合材料, ECC 加固结构的力学性能也逐渐成为土木工程界的研究热点。

乔治等<sup>[7]</sup>提出将 ECC 作为 U 型永久性模板外包于钢筋混凝土梁构成 ECC/加固钢筋混凝土 (Reinforced concrete, RC) 组合梁, 对其进行受弯性能试验研究。发现 U 型模板提高了 ECC 与混凝土界面间的粘结力, 使试件出现多裂缝开裂, 承载力得到大幅度提升, 延性也有所提高。袁微微等<sup>[8]</sup>对聚乙烯醇纤维增强钢丝网水泥基复合材料 (PVA-RFCC) 加固的 RC 梁进行了四点弯曲试验, 探讨了二次受力情况下损伤程度对 PVA-RFCC 受弯性能的影响规律。结果表明: 与加固无损梁相比, 随着原梁损伤程度的增大, 加固梁的控裂能力降低, 对原梁的延性和刚度的提高幅度随之降低。卜良桃等<sup>[9]</sup>考虑二次受力影响, 对 PVA-ECC 钢筋网加固足尺 RC 梁进行受弯性能试验研究。结果表明, 随着加固前 RC 梁损伤程度的提高, 持载加固梁极限承载力无明显变化, 但截面刚度小幅减小, 屈服荷载也降低。林于东等<sup>[10]</sup>对高强钢绞线网-聚合物砂浆加固 RC 梁进行受弯试验, 探究不同损伤程度和加载方式对其受弯性能的影响, 结果表明: 采用高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术能有效减缓裂缝开展, 极限荷载及抗弯刚度也都有所提高; 增加原梁初始损伤程度并不影响构限抗弯承载力, 但刚度降低。但是, 采用 PVA-ECC 钢筋网加固 RC 梁因钢筋强度较低, 屈服应变小, 不能充分发挥 ECC 变形性能; 而采用高强钢绞线网-聚合物砂浆加固方法虽可以提高梁的刚度和承载力, 但由于聚合物砂浆的限制, 加固梁抗裂及控裂性能、延性、韧性提高有限, 不

利于充分发挥钢绞线高强的力学性能。

综上所述, 本课题组对“高强钢绞线网/ECC”这一新型复合材料进行了系统的试验和理论研究<sup>[11-15]</sup>, 结果表明: 高强钢绞线网/ECC 在整个试验过程中具有良好的裂缝分散能力, 二者均能较充分地发挥其材料性能; 经高强钢绞线网/ECC 约束的混凝土柱破坏模式由脆性破坏转变为延性破坏, 构件开裂荷载、峰值荷载、峰值位移均得到明显提高; 采用其抗弯加固 RC 梁可显著提升受弯承载力、延性、抗裂性, 但并未考虑二次受力对加固梁受弯性能的影响。因此, 本文考虑二次受力影响, 进行持载状态下高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁受弯性能研究, 探究 RC 梁损伤程度、纵向高强钢绞线配筋率、是否持载加固对高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁受弯性能的影响规律及影响机制。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

设计 A(原梁损伤程度)、B(纵向高强钢绞线配筋率)、C(是否持载加固)三组共 7 个加固试件, 以不同 RC 梁预加载水平(原梁损伤程度, 分别取极限承载力的 0%、50%、65%、80%)、纵向高强钢绞线配筋率、是否持载加固为影响参数。并设计 1 根未加固的 RC 对比梁 (L0)。试件编号中 C 表示持载状态, U 表示卸载状态, S 表示加固, L 表示 RC 梁。各试件参数设计如表 1 所示。ECC 以普通硅酸盐水泥 (P·O42.5)、细砂、一级粉煤灰、微硅粉(最大粒径不大于 74 μm)、水、聚乙烯醇 (Polyvinyl alcohol, PVA) 纤维、聚羧酸高效减水剂和增稠剂为原材料通过搅拌机搅拌而成, 其配合比见表 2。

各 RC 梁截面尺寸和配筋均一致, 如图 1 所示, 设计尺寸为  $l \times h \times b = 2400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 钢筋均为 HRB400, 混凝土强度等级 C35, 保护层厚度为 25 mm。课题组前期研究成果表明<sup>[16]</sup>, 使用钢绞线网增强 ECC 时其 ECC 保护层厚度不应小于 3.7 天, 本次试验在进行设计时, 偏于安全考

虑, 同时参考文献 [17], 加固层厚度取 25 mm, 长度取 1 800 mm, 如图 1(c) 所示。并对加固层采用端部四周环包的方式进行加固以增强加固层中

钢绞线的锚固, 宽度为 200 mm; 为增强加固层与既有混凝土界面粘结, 防止剥离现象发生, 采用梅花状布置剪切销钉如图 2 所示。

表 1 试件设计参数

Table 1 Specimen design parameters

Group	Specimen number	$d/\text{mm}$	Preload level/%	$\rho/\%$	$s/\text{mm}(n)$	Load reinforcement
A	CSLA0	2.4	0	0.413	30(5)	Y
	CSLA1	2.4	50	0.413	30(5)	Y
	CSLA2	2.4	65	0.413	30(5)	Y
	CSLA3	2.4	80	0.413	30(5)	Y
B	CSLB1	2.4	65	0.248	50(5)	Y
	CSLB3	2.4	65	0.579	21(5)	Y
C	USLC1	2.4	65	0.413	30(5)	N

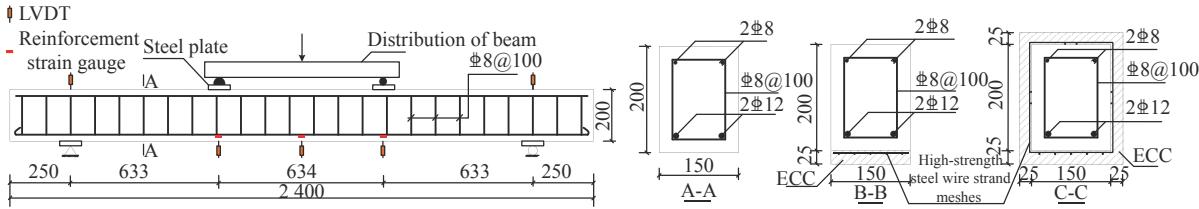
Notes: Specimen number (C—Loading status; U—Unloading Status; S—Strengthening; L—RC beam);  $d$ —Diameter of steel strand;  $\rho$ —Reinforcement ratio of longitudinal high-strength steel wire strand (HSWS);  $s$ —Spacing of longitudinal steel strands;  $n$ —Number of longitudinal steel strands; N—Not load reinforcement; Y—Load reinforcement.

表 2 工程水泥基复合材料 (ECC) 配合比

Table 2 Mix proportions of engineered cementitious composites (ECC)

Cement	Sand	Fly ash	Silica powder	Water	PVA fiber	Water reducer	Thickening agent
1	0.4	2.5	0.073	0.893	0.072	0.0407	0.00182

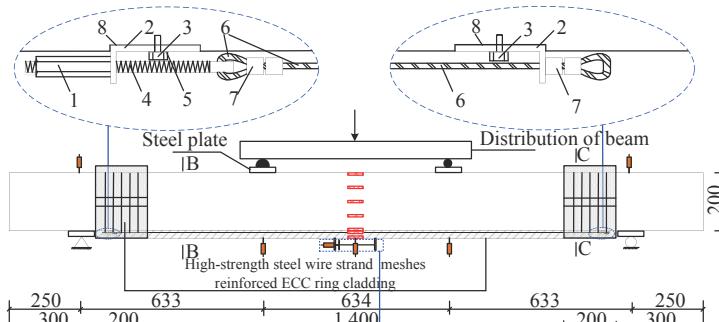
Note: PVA—Polyvinyl alcohol.



(a) Unstrengthened RC beam (b) Reinforcement details of the cross-section

1—Elongated hexagon nut; 2—Angle iron; 3—Expansion bolt;  
4—Screw; 5—Gasket; 6—High strength steel strand;  
7—Double hole aluminum sleeve; 8—Thin layer of adhesive steel

LVDT  
Reinforcement  
strain gauge



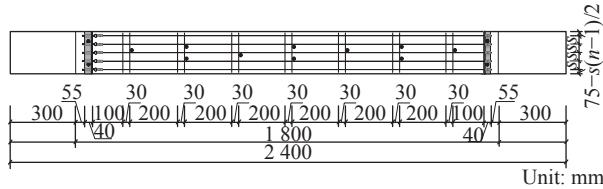
Unit: mm

(c) Strengthened beam

LVDT—Linear variable differential transformer; RC—Reinforced concrete

图 1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Specimen size and reinforcement



n—Number of HSWS; s—Distance between adjacent HSWS

图 2 高强钢绞线 (HSWS) 网及剪切销钉布置

Fig. 2 Arrangement of high-strength steel wire strand (HSWS) meshes and shear pins

## 1.2 材料性能试验

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  $2.23 \times 10^5$  MPa、 $2.20 \times 10^5$  MPa, 屈服强度分别为

513.7 MPa、454.0 MPa, 极限强度分别为 642.2 MPa、579.8 MPa。将预留混凝土试块(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, 得到混凝土立方体抗压强度平均值为 45.7 MPa, 得到的 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  $\varepsilon_{tc}$ 、抗拉强度  $f_{et}$  及极限拉应变  $\varepsilon_u$  列于表 3。图 3 为典型 ECC 受拉应力-应变曲线。所采用高强钢绞线公称直径为 2.4 mm, 对其进行拉伸试验, 得到平均极限抗拉强度为 1 925.8 MPa, 平均极限拉应变为 2.60%。

表 3 ECC 材料性能

Table 3 Material properties of ECC

$f_{cu}$ /MPa	$f_{tc}$ /MPa	$\varepsilon_{tc}$ /%	$E_s$ /GPa	$f_{et}$ /MPa	$\varepsilon_u$ /%
45.8	2.97	0.046	18.1	4.55	2.13

Notes:  $f_{cu}$ —ECC compressive strength;  $f_{tc}$ —ECC cracking strength;  $\varepsilon_{tc}$ —ECC cracking strain;  $E_s$ —ECC elastic modulus;  $f_{et}$ —ECC tensile strength;  $\varepsilon_u$ —ECC ultimate tensile strain.

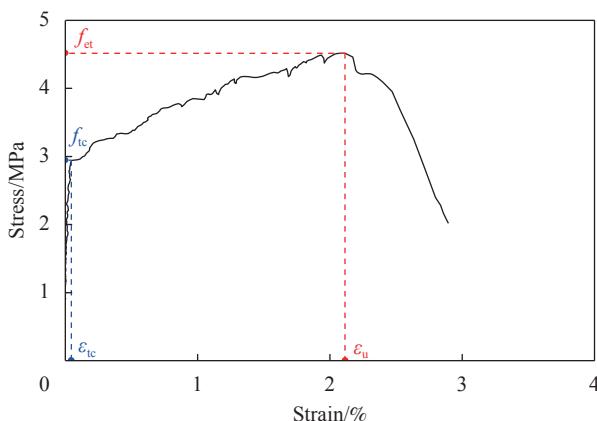


图 3 典型 ECC 受拉应力-应变曲线

Fig. 3 Typical tensile stress-strain curves of ECC

## 1.3 试验装置及测试方法

采用三分点加载方法、液压千斤顶反向加载的加载方式, 即高强钢绞线网/ECC 加固层位于 RC 梁上表面, 千斤顶位于 RC 梁下表面, 见图 4。试验根据混凝土结构试验方法标准<sup>[18]</sup>, 采用力控制分级加载, 加载速率为 0.1 kN/s。对于持载加固梁, 首先进行预损伤加载阶段, 即对 RC 梁分级加载至预损伤荷载, 并在两个加载点下方放置机械千斤顶, 加载到持载值后自锁千斤顶以实现持载; 然后, 进行高强钢绞线网/ECC 加固, 待养护 28 天后再对加固梁进行分级加载至破坏。

图 1 所示在试件受拉区跨中、两加载点和两支座处各安放一个位移计测量位移; 原梁在梁侧、受压区、受拉区表面共对称设置 14 个应变片; 加固梁在梁侧、跨中 ECC 表面和梁受压区表面共对称设置 18 个应变片; 在梁内两根受拉纵筋的跨中和两个加载点处分别对称设置 12 个应变片。为测量钢绞线应变, 如图 1(b) 所示, 在跨中每根钢绞线上固定两个 T 型导杆(间距即测量标距取 150 mm), 并在导杆上固定位移计量测标距长度内钢绞线的伸长量, 除以标距即可得到高强钢绞线平均应变。利用 DJCK-2 裂缝测宽仪(北京大地华龙科技有限责任公司)观测混凝土和 ECC 层的裂缝宽度。

## 2 持载状态下高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁受弯试验结果与分析

### 2.1 试验现象

本次进行受弯试验的 8 根构件梁, 从试验现象和破坏特征来看, 主要分为以下 3 种裂缝发展和破坏模式, 如图 5 所示: (1) 未加固梁 L0: 表现出典型的适筋梁破坏特征, 即加载初期, 跨中纯弯段率先出现弯曲裂缝, 且宽度及数量均逐渐增加; 受拉纵筋屈服后, 裂缝数量不再增加, 而挠度和裂缝宽度迅速增长; 最后受压区混凝土压碎而破坏, 其破坏模式如图 5(a) 所示; (2) 无损加固

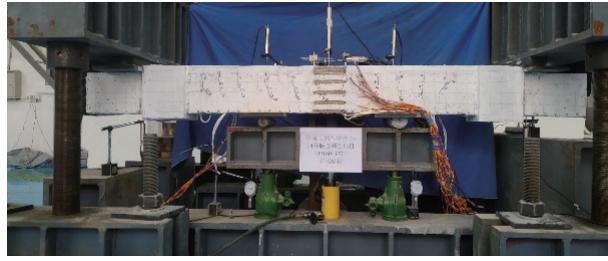


图 4 试验加载装置

Fig. 4 Loading device



(a) CSLA0



(b) CSLA0



(c) CSLA1



(d) USLC1

图 5 高强钢绞线 (HSWS) 网/ECC 加固 RC 梁典型破坏模式

Fig. 5 Typical failure modes of RC beams strengthened with high-strength steel wire strand (HSWS) meshes reinforced ECC

梁 CSLA0: 加载初期纯弯段受拉区边缘 ECC 率先开裂, 而后 ECC 裂缝数量不断增加, 之后跨中受拉区混凝土在 ECC 加固层裂缝贯通处产生第一条裂缝; 继续加载, 由于加固层良好的裂缝约束作用, 混凝土裂缝数量逐渐增多。纵向受拉钢筋屈服后, 混凝土不再出现新裂缝, 但挠度和混凝土裂缝宽度快速增大, 裂缝向受压区延伸, 而 ECC 裂缝数量仍以较快的速度增加, 表现出裂缝分散能力强的优势。最后, 受压区混凝土压碎而达到承载力极限状态, 紧接着钢绞线被拉断加固层断裂, 同时断裂处加固层界面出现局部剥离, 其破坏模式如图 5(b) 所示; (3) 持载加固梁及卸载加固梁: 持载及卸载加固梁在加固后加载阶段的现象相似, 即在加载初期, 加固层首先在原混凝土裂缝截面处开裂, 之后由于 ECC 优异的控裂能力,

ECC 裂缝数量逐渐增加且逐渐与原混凝土裂缝相连, 但宽度基本不变, 同时加固梁混凝土裂缝数量有所增加; 受拉纵筋屈服后, 挠度和 ECC 裂缝数量迅速增加, ECC 裂缝呈现出细而密的特点, 混凝土裂缝向受压区发展, 数量不再增多, 宽度明显增大。最后, 受压区混凝土被压碎, 紧接着加固层在主裂缝处断裂而破坏, 同时断裂处加固层界面出现局部剥离。持载和卸载加固梁典型破坏模式分别如图 5(c) 和图 5(d) 所示。

综上所述, 所有加固梁均以混凝土压碎而达到极限承载力, 紧接着加固层拉断, 且在此之前均未发生加固层剥离现象, 说明既有混凝土与高强钢绞线网/ECC 加固层粘结效果很好, 高强钢绞线网和 ECC 的材料性能充分发挥, 体现了该加固方法的优越性。

## 2.2 试验结果

主要试验结果如表 4 所示。其中,  $M_c$  表示混凝土开裂弯矩;  $M_{ec-d}$  表示 ECC 开裂弯矩与预损伤弯矩的差值;  $M_y$  表示屈服弯矩;  $M_{swy}$  表示钢绞线名义屈服弯矩(高强钢绞线的名义屈服强度为极限抗拉强度的 85%);  $M_u$  表示极限弯矩;  $\Delta_y$  与  $\Delta_u$  分别表示  $M_y$  和  $M_u$  对应的跨中挠度;  $\mu_A$  为试件延性系数,  $\mu_A = \Delta_u / \Delta_y$ ;  $D_{max}$  为试件弯曲韧性系数,  $D_{max} = \int Pd\Delta$ , 其值等于荷载-挠度曲线在峰值荷载前的曲线包络面积<sup>[19]</sup>;  $\omega_{c,0.8y}$ 、 $\omega_{c,0.9y}$ 、 $\omega_{c,y}$  分别表示在 80% $M_y$ 、90% $M_y$  和  $M_y$  下的混凝土裂缝宽度。

由表 4 可见, 加固梁屈服弯矩、极限弯矩、延性、韧性较原梁均有显著提升, 表明了该加固方法的有效性。

## 2.3 试验曲线分析

### 2.3.1 弯矩-跨中挠度曲线

各试件的弯矩-跨中挠度曲线如图 6 所示。其中, A 为混凝土开裂点, B 为达到预损伤弯矩点, C 为 ECC 加固层开裂点, D 为纵向受拉钢筋屈服点, E 为极限弯矩点。可看出, 持载加固 RC 梁弯矩-跨中挠度曲线分为 4 个阶段: (1) 加载初期, 试件处于弹性阶段, 挠度变化小, 曲线呈线性关系; (2) 加载初期带裂缝工作阶段 (AB 段): RC 梁受弯开裂 (A 点) 至达到预损伤荷载 (B 点) 的阶段, 曲线出现第一次转折, 斜率降低, 挠度增速变快; (3) 加载后带裂缝工作阶段 (BD 段): 加载后, 加固层与原梁协同工作,

表 4 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁受弯试验结果

Table 4 Bending test results of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC

Specimen number	$M_c/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{\text{ec-d}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{\text{swy}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\Delta_y/\text{mm}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\mu_\Delta$	$D_{\text{max}}$	$\omega_{c,0.8y}/\text{mm}$	$\omega_{c,0.9y}/\text{mm}$	$\omega_{c,y}/\text{mm}$
L0	2.86	—	12.78	—	14.98	7.46	23.30	3.12	876.03	0.20	0.27	0.36
CSLA0	6.60	2.62	19.97	22.06	24.30	9.04	30.29	3.35	1 894.15	0.14	0.19	0.29
CSLA1	3.72	0.98	18.91	21.79	23.50	9.02	29.92	3.32	1 744.05	0.18	0.21	0.29
CSLA2	3.39	0.93	17.08	21.12	22.77	8.82	28.50	3.23	1 509.68	0.21	0.23	0.30
CSLA3	3.43	0.66	16.19	20.25	21.85	8.85	27.67	3.13	1 384.42	0.30	0.31	0.34
CSLB1	3.31	0.68	15.17	19.56	20.70	7.74	24.53	3.17	1 169.79	0.21	0.23	0.32
CSLB3	3.35	1.06	17.70	22.31	24.66	8.08	29.71	3.68	1 710.61	0.21	0.22	0.29
USLC1	—	2.47	19.20	19.96	23.30	8.80	27.50	3.13	1 519.75	0.21	0.22	0.29

Notes:  $M_c$ —Cracking moment of concrete;  $M_{\text{ec-d}}$ —Absolute value of ECC cracking moment minus pre-damage moment;  $M_y$ —Yielding moment of the specimen;  $M_{\text{swy}}$ —Nominal yield moment of steel strand;  $M_u$ —Ultimate bending moment of the specimen;  $\Delta_y$ —Deflection of the specimen at  $M_y$ ;  $\Delta_u$ —Deflection of the specimen at  $M_u$ ;  $\mu_\Delta$ —Ductility coefficient of the specimen;  $D_{\text{max}}$ —Flexural toughness coefficient of the specimen;  $\omega_{c,0.8y}$ —Concrete crack width at 80%  $M_y$ ;  $\omega_{c,0.9y}$ —Concrete crack width at 90%  $M_y$ ;  $\omega_{c,y}$ —Concrete crack width at  $M_y$ .

使试件刚度突增, 使曲线出现第二次转折点(B点), 之后ECC开裂(C点), 由于ECC应变硬化特性, 开裂后仍能承担荷载, 因此刚度降低不明显, 曲线斜率仅略微降低, 该阶段混凝土裂缝开展缓慢; (4)破坏阶段(DE段): 纵向受拉钢筋屈服(D点)后, 进入破坏阶段, 裂缝和挠度发展加快, 出现第三次转折点, 曲线斜率显著降低, 但加固层由于PVA纤维桥联作用仍可承受较大荷载, 曲线斜率明显大于未加固梁; 之后, 受压区混凝土压碎达到极限弯矩(E点), 随后钢绞线拉断且加固层断裂而破坏, 承载力骤降。

(C点), 但由于PVA纤维的桥联作用并未退出工作, 因此曲线斜率变化很小且略大于未加固梁。混凝土开裂后进入AD段, 曲线斜率在转折点(A点)后明显下降, 刚度降低, 挠度快速增长, 直至受拉钢筋屈服; 该阶段, 曲线斜率与持载加固梁相差不大, 明显大于未加固梁。钢筋屈服后进入DE段, 因PVA纤维的桥联作用, 刚度下降幅度较未加固梁小, 曲线仍有较大斜率, 之后, 受压区混凝土压碎(E点), 高强钢绞线随即拉断且加固层断裂, 荷载骤降。

试件USLC1为卸载加固梁, 将其弯矩-挠度曲线分为3个阶段: (1)ECC开裂前的阶段(OC段); (2)带裂缝工作阶段(CD段); (3)破坏阶段(DE段)。在OC段, 受拉区混凝土处于带裂缝工作阶段, 但由于加固层约束作用, 曲线几乎呈线性增长。ECC开裂(C点)后进入CD段, 刚度和曲线斜率略有减小, 挠度增长加快, 因PVA的桥联作用曲线斜率大于未加固梁, 但略小于对应的持载加固梁, 这是由于持载加固梁加固层存在应力滞后, 其ECC开裂程度较小, 使其刚度较大。受拉纵筋屈服后进入DE段, 曲线斜率明显降低, 因ECC仍能与高强钢绞线协同工作, 斜率仍明显大于未加固梁, 但略小于持载加固梁(由于持载加固层应力滞后), 最终受压区混凝土压碎达到极限承载力, 随后钢绞线被拉断, 荷载骤降。

加固梁弯矩在加固层断裂而骤降之后, 基本保持不变且大于未加固梁。由此表明, 加固层断裂后, 加固梁仍具有一定的承载能力和变形能力, 表现出较好的延性破坏特征。

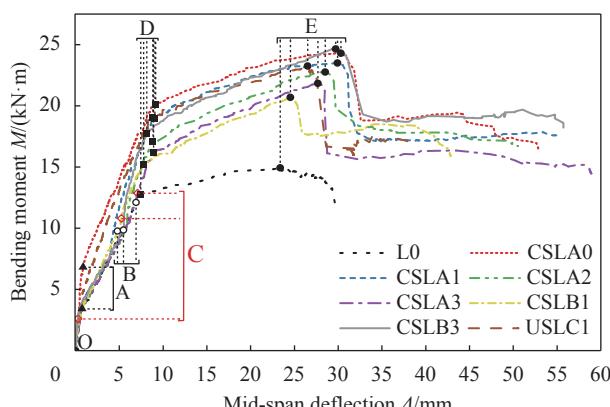


图 6 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁弯矩-跨中挠度曲线

Fig. 6 Bending moment versus mid-span deflection curves of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC

试件CSLA0为无损加固梁, 不存在预损伤阶段, 其弯矩-挠度曲线主要分为3个阶段: (1)混凝土开裂前的阶段(OA段); (2)带裂缝工作阶段(AD段); (3)破坏阶段(DE段)。在OA段, 曲线接近线性, ECC虽然在混凝土开裂前先开裂

### 2.3.2 弯矩-受拉纵筋拉应变曲线

各试件的弯矩-受拉纵筋拉应变曲线如图7所示, 其中各点意义同图6。由图7可见, 对于未加固对比梁: 在加载初期, 曲线呈线性, 受拉区混凝土及钢筋均参与承担拉力, 钢筋应变增长缓慢; 混凝土开裂(A点)之后, 受拉区混凝土退出工作, 中和轴上移, 开裂处荷载主要由钢筋承担, 应变增加速度加快, 曲线斜率明显下降, 大致呈线性关系; 纵向受拉钢筋屈服(D点)后, 钢筋应变迅速增长, 应变片失真。持载加固梁在加固之前的预损伤加载阶段的曲线与未加固梁相似, 加固层参与工作(B点)后, 与未加固梁相比, 曲线斜率明显提升, 应变增长变慢说明加固层承担了部分弯矩, 减缓了受拉纵筋应力增长速度。无损加固梁CSLA0加固层在受荷初期便参与工作, 与受拉纵筋共同承担弯矩, 因此受拉纵筋应变增长缓慢, 相同弯矩下CSLA0跨中受拉纵筋的应变明显滞后于其他梁。卸载加固梁加固前虽存在一定的损伤, 但相较于持载加固梁, 加固时裂隙宽度较小, 加固效果更好, 更好的约束了混凝土裂隙的开展, 降低了钢筋应变的增长速度, 故卸载加固梁的钢筋应变发展滞后于对应的持载加固梁。

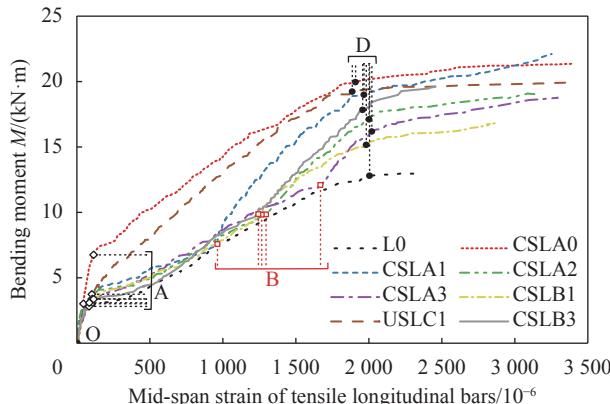


图7 高强钢绞线网/ECC加固RC梁跨中弯矩-钢筋拉应变曲线

Fig. 7 Bending moment versus tensile strain curves of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC

### 2.3.3 弯矩-高强钢绞线应变曲线

图8为各试件的弯矩-高强钢绞线应变曲线。其中, A点为纵向受拉钢筋屈服点, B点为高强钢绞线名义屈服点(即达到抗拉强度的85%), C点为极限弯矩点, D点为高强钢绞线断裂点。可以看出, 加固后梁在加载初期, 高强钢绞线承担部分拉力(主要拉力由钢筋承担), 其应变增长速度较慢。受拉纵筋屈服(A点)后, 高强钢绞线承

担弯矩比例增大, 曲线斜率明显下降, 钢绞线应变增速迅速提升, 直至受压区混凝土压碎(C点)。受压区混凝土被压碎后, 荷载略微降低, 紧接着钢绞线被拉断(D点), 之后位移计偏移幅度较大, 测得数据失真。持载梁的钢绞线应变发展明显滞后于相应的卸载加固梁, 这是由于持载加固时加固层存在应变滞后。

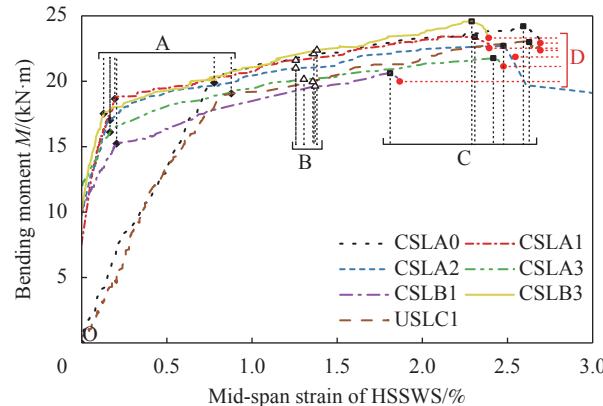


图8 高强钢绞线网/ECC加固RC梁跨中弯矩-高强钢绞线应变曲线

Fig. 8 Bending moment versus HSWS strain curves of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC

大部分加固梁在极限状态时测得的钢绞线跨中应变接近其极限拉应变, 说明钢绞线材料强度发挥较充分, 能有效提高试件极限弯矩。试件CSLB1在极限弯矩下跨中钢绞线应变变明显低于其极限拉应变, 这是由于主裂隙未经过钢绞线应变测量标距范围, 使测得应变偏小。

### 2.3.4 弯矩-混凝土压应变曲线

由图9弯矩-混凝土压应变关系曲线(其中各点意义同图6)可见, 未加固梁开裂(A点)前混凝土压应变随荷载增加而线性增长, 应变增长缓慢; 试件开裂后, 中和轴上移, 曲线斜率降低, 出现第一次转折, 应变增加速度加快; 纵向受拉钢筋屈服(D点)后, 弯曲裂隙快速发展, 中和轴上移速度和应变增加速度加快, 曲线斜率显著下降, 直至混凝土被压碎。持载加固梁的曲线表明: B点前预损伤阶段与未加固梁相似; 加固层参与工作(B点)后, 截面刚度提高, 使曲线斜率较AB段有明显的提高, 混凝土应变增长速度变缓, 混凝土裂隙发展速度和中和轴上移速度均降低; 受拉纵筋屈服(D点)后进入破坏阶段, 曲线再次出现拐点, 斜率显著下降, 这是由于该阶段裂隙开展明显, 中和轴迅速上升, 使受压区混凝土压应变大幅度增加, 直至受压区混凝土被压碎(E点),

但DE段相较于未加固梁仍然有明显上升, 说明纵筋屈服后, 加固层继续发挥作用, 延缓了中和轴上移速度。卸载加固梁的混凝土压应变增长速率明显低于相应的持载加固梁, 这是由于卸载加固梁的加固层不存在明显的应变滞后, 能够更好地约束原梁裂缝发展, 中和轴上移速度相对缓慢, 使混凝土应变增加速度较慢。

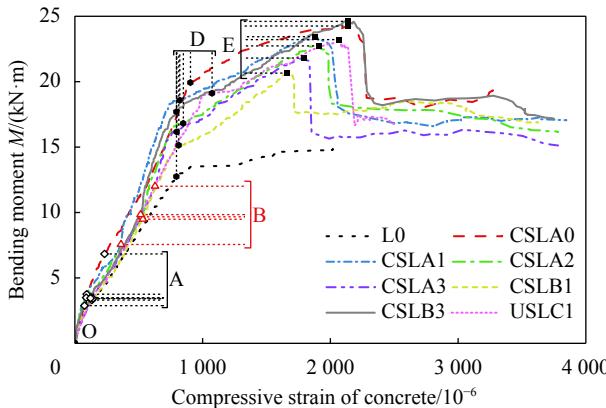


图 9 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁弯矩-混凝土压应变曲线

Fig. 9 Bending moment versus concrete compressive strain curves of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC

### 3 持载状态下高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁受弯性能影响因素

#### 3.1 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁开裂荷载及受弯承载力

根据表 4, 对比持载加固梁 CSLA0、CSLA1、CSLA2、CSLA3 的 ECC 开裂弯矩可以看出, 随原梁损伤程度的增加, 持载加固梁 ECC 开裂越早, 这是由于原梁损伤程度越大, 其开裂程度和中和轴上移越严重, 则加固后受拉区拉应变增长越快, 使 ECC 越早开裂。对比持载加固梁 CSLB1、CSLA2、CSLB3 的 ECC 开裂弯矩可以看出, 随高强钢绞线配筋率增加, ECC 开裂越晚, 这是由于增加钢绞线配筋率会增加梁截面受弯抵抗矩, 使配筋率高的试件在达到 ECC 开裂应变时对应弯矩更大。对比持载加固梁 CSLA2 和相应卸载加固梁 USLC1 的 ECC 开裂弯矩可以看出, 卸载加固梁 ECC 开裂弯矩要大于持载加固梁, 这是由于持载加固梁加固时的混凝土裂缝宽度及挠度均大于卸载加固梁; 故增加相同弯矩, 持载加固梁曲率增加更大, 而使受拉区应变增长更快。

试件 CSLA0、CSLA1、CSLA2、CSLA3 的极限弯矩相较于未加固梁分别提高了 62.22%、56.88%、52.00%、45.86%, 说明原梁损伤程度越高, 持载

加固梁的承载力提升越小。分析原因: 原梁损伤程度越高, 加固层相对于原梁的应力滞后越明显, 因此极限荷载时应力发挥程度越小, 从而承载力提高幅度越小。试件 CSLB1、CSLA2、CSLB3 的极限弯矩相较于未加固梁分别提高了 38.18%、52.00%、64.62%, 说明增加钢绞线配筋率, 可以提高持载加固梁承载力的提升幅度。分析原因: 增加高强钢绞线配筋率, 会提高加固层对裂缝的约束能力, 减小钢筋应力不均匀系数, 增加钢绞线的强度利用率; 故持载加固梁的极限弯矩提高幅度越大。试件 CSLA2、USLC1 的极限弯矩相较于未加固梁分别提高了 52.00%、55.54%, 说明卸载加固梁对极限承载力的提升效果优于持载加固梁, 但相差不大。分析原因: 相较于持载加固梁, 卸载加固梁卸载后裂缝有所回缩, 加固后混凝土裂缝发展相对较慢, 加固层对混凝土裂缝的约束效果更好, 使受拉纵筋及高强钢绞线的应力更加均匀, 提高了加固层强度利用率, 因此卸载加固梁对极限承载力的提升效果优于持载加固梁。

#### 3.2 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁裂缝

由图 10(a) 及表 4 可知, 相比于未加固梁, 各加固梁在加固后的混凝土裂缝发展速率明显降低。损伤程度不同的试件混凝土裂缝宽度发展速度、各特征弯矩下最大裂缝宽度大小为 CSLA0 < CSLA1 < CSLA2 < CSLA3, 表明原梁损伤程度越大, 持载加固梁受力各阶段的裂缝发展越快。分析原因: ECC 内的 PVA 纤维在加固层开裂后能起到桥联作用限制裂缝开展, 使加固层即使在开裂后也能够约束混凝土裂缝的发展, 因此加固梁裂缝宽度发展均比未加固梁慢。另外, 在持载状态下, 预加固层相比于原 RC 梁有应力滞后现象, 原梁损伤程度越高, 滞后越多, 使对混凝土裂缝发展的约束效果越差, 因此损伤程度越高, 裂缝宽度发展越快。

由图 10(b) 和表 4 可知, 钢绞线配筋率不同的持载加固梁混凝土裂缝宽度增长速率、各特征弯矩下最大裂缝宽度为 CSLB1 > CSLA2 > CSLB3, 说明增加钢绞线配筋率可减缓持载加固梁裂缝发展速率。分析原因: 增加钢绞线配筋率会提高加固层对混凝土裂缝的约束能力, 故裂缝宽度增长速度减慢。

由图 10(c) 和表 4 可知, 考虑是否持载加固这一影响因素的试件加固后混凝土裂缝宽度在各特征弯矩下的最大裂缝宽度大小为 CSLA2 > USLC1。

分析原因：卸载加固梁卸载后混凝土裂缝宽度及挠度均有明显回缩，使加固层对混凝土裂缝约束效果优于持载加固梁，因此持载加固梁裂缝发展要缓于卸载加固梁。

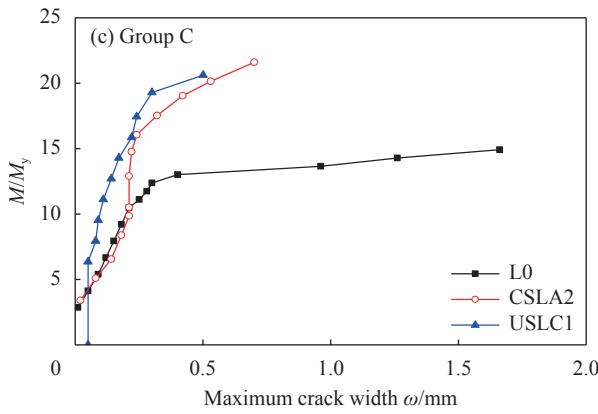
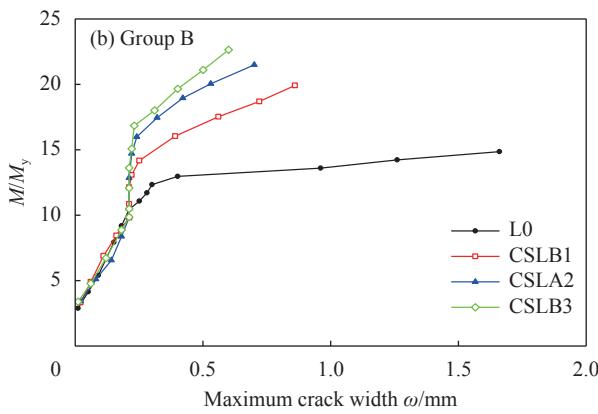
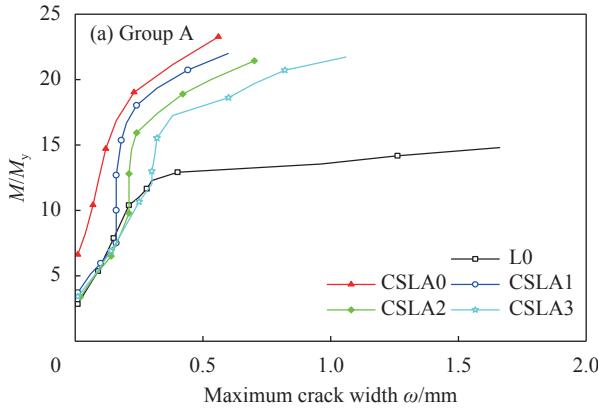


图 10 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁弯矩-混凝土裂缝宽度曲线

Fig. 10 Bending moment versus maximum crack width curves of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC

### 3.3 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁刚度

参考黄华<sup>[20]</sup>对截面刚度的定义(即将跨中弯矩与挠度的比值定义为截面刚度)，绘制试件截面刚度-挠度曲线如图 11 所示。可得，相比于未加

固梁，原梁加固后，截面刚度在受力各阶段均得到显著提升，说明持载情况下采用该加固方法加固 RC 梁同样可以起到显著提升刚度的效果。

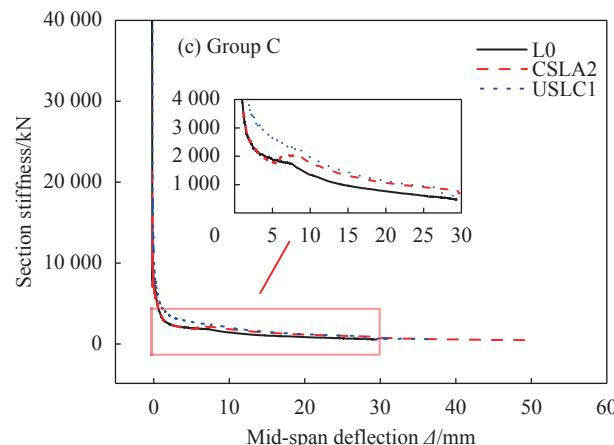
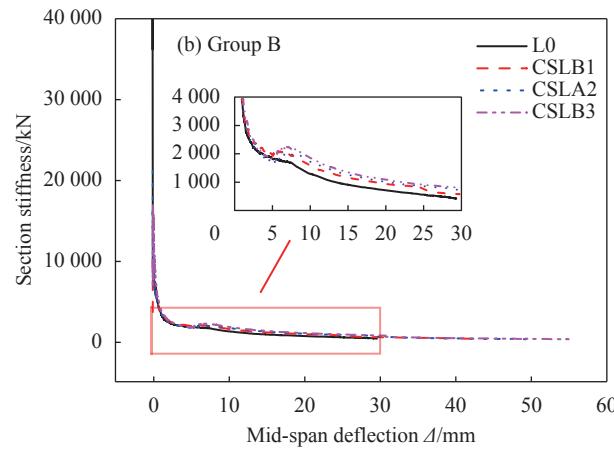
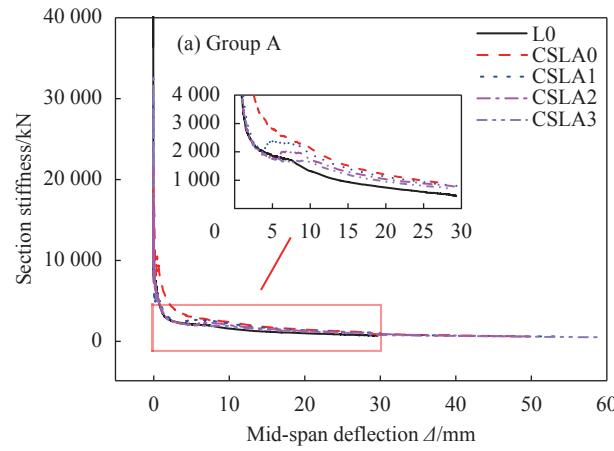


图 11 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁截面刚度-挠度曲线

Fig. 11 Stiffness-deflection curves of RC beams strengthened with HSWS meshes reinforced ECC

由图 11(a) 得，损伤程度不同试件的截面刚度大小为  $CSLA0 > CSLA1 > CSLA2 > CSLA3$ ，表明高

强钢绞线配筋率相同的情况下, 随损伤程度增加, 截面刚度下降。这是由于随着原梁损伤程度增加, 加固前 RC 梁裂缝开展越充分, 刚度降低越明显, 加固层对裂缝约束效果越差, 故对刚度提升效果越差。

由图 11(b) 得, 高强钢绞线配筋率不同试件 CSLB1、CSLA2、CSLB3 截面刚度依次增大, 表明钢绞线配筋率增加, 截面刚度随之增加。这是由于增加钢绞线配筋率相当于增加原梁的受拉钢筋量, 使在相同荷载下截面曲率变小, 即截面刚度增大。

由图 11(c) 得, 试件 USLC1 截面刚度大于 CSLA2, 表明持载加固试件截面刚度低于卸载加固试件。这是由于相比于卸载加固梁, 持载加固梁的加固层应变滞后更明显, 对裂缝发展的约束效果更差, 挠度增长较快, 因此持载加固梁刚度高于卸载加固梁。

### 3.4 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁延性

由表 4 可知, 加固梁延性均高于未加固梁, 说明持载情况下采用该加固方法加固 RC 梁可有效提高原梁延性。

相较于未加固梁, 试件 CSLA0、CSLA1、CSLA2、CSLA3 的延性系数提高值分别为 7.37%、6.41%、3.53%、0.32%, 说明随着损伤程度的增加, 持载加固梁的延性有所降低。分析原因: 损伤程度高的加固梁因原有裂缝发展更充分致使加固后裂缝发展速率更快, 加固层对裂缝发展的约束效果更差, 使钢筋和钢绞线的应力不均匀系数增大, 钢绞线更容易因应力集中而断裂, 导致梁的变形能力变差, 因此损伤程度的增加降低了试件延性。

试件 CSLB1、CSLA2、CSLB3 的延性系数较未加固梁分别提高了 1.60%、3.53%、17.95%, 说明增加钢绞线配筋率可以提高持载加固梁延性。分析原因: 原梁损伤程度一定时, 钢绞线配筋率增加使加固层裂缝控制能力增强, 钢绞线应力分布更均匀, 应力集中更小, 故加固梁变形能力增强, 延性提高。

相较于未加固对比梁, 试件 CSLA2、USLC1 的延性系数提高值分别为 3.53%、0.32%, 说明其他条件相同时, 持载加固梁的延性高于卸载加固梁。分析原因: 持载加固梁加固层参与工作时间较晚, 应变滞后更加明显, 高强钢绞线拉断时间更晚些, 故加固梁变形能力更强, 延性更高。

### 3.5 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁韧性

韧性指梁在破坏前吸收能量的能力。由表 4 可知, 加固梁弯曲韧性均显著高于未加固梁, 说明加固层优异的控裂、变形能力和高强特性可大幅度提升原梁韧性。

与未加固梁相比, 加固梁 CSLA0、CSLA1、CSLA2、CSLA3 的最大弯曲韧性提高值分别为 116.22%、99.09%、72.33%、58.03%, 说明原梁损伤程度的增加会降低持载加固梁的韧性。分析原因: 损伤程度越大, 混凝土裂缝开展越充分, 加固层对 RC 梁约束效果越低, 试件变形能力越弱; 同时梁的韧性的强弱取决于承载力、刚度和延性的高低, 由上文分析可知加固梁承载力、刚度和延性随损伤程度的提高而降低; 因此损伤程度增加, 加固梁韧性降低。

试件 CSLB1、CSLA2、CSLB3 的最大弯曲韧性较未加固梁分别提高了 33.53%、72.33%、95.27%, 说明增加钢绞线配筋率可提高持载加固梁的韧性。分析原因: 高绞线配筋率增加可提高加固梁承载力、刚度和延性, 增强加固层对裂缝约束能力, 提高变形能力, 从而增强加固梁韧性。

试件 CSLA2、USLC1 的最大弯曲韧性较未加固梁分别提高了 72.33%、73.48%, 说明持载加固梁的韧性相对于卸载加固梁有所降低。但相较于其他影响因素, 是否持载加固对韧性的影响效果较小。分析原因: 由上文分析可知, 相较于卸载加固梁, 持载加固梁的延性虽然有所升高, 但承载力降低更多, 因此综合来讲韧性提高相对较小。

## 4 结论

为研究二次受力对高强钢绞线网/工程水泥基复合材料(ECC) 加固钢筋混凝土(RC) 梁受弯性能的影响, 本文对持载状态下高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁进行四点受弯试验, 分析了二次受力情况下损伤程度、高强钢绞线配筋率和是否持载加固对受弯性能的影响规律, 主要研究成果如下:

(1) 相较于未加固对比 RC 梁, 采用高强钢绞线网/ECC 持载加固 RC 梁, 可以使其正截面受弯承载力、刚度、延性、弯曲韧性等整体受弯性能得到有效的提升, 且能够较好约束 RC 梁裂缝的发展, 减小裂缝宽度。相比原梁, 加固梁的整体性能均得到了提升, 承载力、刚度、延性、韧性分别提升了 38%~65%、20%~81%、0%~18%、33%~116%;

(2) 高强钢绞线网/ECC 持载加固梁破坏模式

均为原梁钢筋首先屈服，之后受压区混凝土被压碎而达到极限承载力，紧接着加固层被拉断而破坏；

(3) 其他工况相同时，原梁损伤程度越高，加固层相对于原梁的应力滞后越明显，对混凝土裂缝发展的约束效果越差，使钢筋和钢绞线的应力不均匀系数增大，钢绞线更容易因应力集中而断裂，导致梁的变形能力变差，因此损伤程度的增加对持载加固 RC 梁的受弯承载力、截面刚度、延性、韧性、控裂能力均有不同程度的削弱；

(4) 其他工况相同时，在合理范围内提高高强钢绞线配筋率，会使加固层裂缝控制能力增强，钢绞线应力分布更均匀，应力集中更小，增加梁的变形能力，而且在相同荷载下截面曲率变小，从而大幅提高持载加固 RC 梁的受弯承载力、刚度、延性、韧性，减小裂缝宽度；

(5) 其他工况相同时，与卸载加固 RC 梁相比，持载加固 RC 梁加固层应变滞后更明显，对裂缝发展的约束效果更差，挠度增长较快，故其正截面承载力、刚度、韧性及加固层对混凝土裂缝约束效果不如卸载加固梁，但延性因应变滞后钢绞线断裂推迟而提高。

## 参考文献：

- [1] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC)[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 215-230.
- [2] LEE B Y, CHO C G, LIM H J, et al. Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar-A feasibility study[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37: 15-20.
- [3] KAN L L, SHI H S, SAKULICH A R, et al. Self-healing characterization of engineered cementitious composite materials[J]. *ACI Materials Journal*, 2010, 107(6): 617-624.
- [4] 余江滔, 许万里, 张远森. ECC-混凝土黏结界面断裂试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(6): 958-963, 970.
- [5] YU Jiangtao, XU Wanli, ZHANG Yuanmiao. Experiment study on fracture property of ECC-concrete interface[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(6): 958-963, 970(in Chinese).
- [6] 朱方之, 王鹏刚, 赵铁军, 等. SHCC修复试件黏结滑移性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1): 72-77.
- [7] ZHU Fangzhi, WANG Penggang, ZHAO Tiejun, et al. Studies on bond slippage properties of concrete specimen repaired with strain hardening cementitious composites (SHCC)[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1): 72-77(in Chinese).
- [8] ZHENG A H, LIU Z Z, LI F P, et al. Experimental investiga-
- [9] tion of corrosion-damaged RC beams strengthened in flexure with FRP grid-reinforced ECC matrix composites[J]. *Engineering Structures*, 2021, 244: 112779.
- [10] 乔治, 潘钻峰, 梁坚凝, 等. ECC/RC组合梁受弯性能试验研究与分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(4): 724-731.
- [11] QIAO Zhi, PAN Zuanfeng, LIANG Jianning, et al. Experimental study and analysis of flexural behavior of ECC/RC composite beams[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(4): 724-731(in Chinese).
- [12] 袁微微, 杜文平, 杨才千, 等. 二次受力下PVA-RFCC加固RC梁抗弯性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(15): 15-19, 41.
- [13] YUAN Weiwei, DU Wenping, YANG Caiqian, et al. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with PVA-RFCC under secondary load[J]. *Building Structure*, 2020, 50(15): 15-19, 41(in Chinese).
- [14] 卜良桃, 陈军, 鲁晨. PVA-ECC加固RC足尺梁二次受力试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(1): 1-7.
- [15] BU Liangtao, CHEN Jun, LU Chen. Experiment on full-scale RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite mortar in flexure subjected to secondary load[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2011, 38(1): 1-7(in Chinese).
- [16] 林于东, 宗周红, 林秋峰. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土及预应力混凝土梁的抗弯性能试验研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(9): 141-149.
- [17] LIN Yudong, ZONG Zhouhong, LIN Qiufeng. Experiment study on flexural behavior of RC/PRC beams strengthened with high strength steel wire mesh and permeable polymer mortar[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(9): 141-149(in Chinese).
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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).
- [21] WANG X L, YANG G H, QIAN W W, et al. Tensile behavior of high-strength stainless steel wire rope (HSSWR)-reinforced ECC[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021, 15(1): 1-15.
- [22] 李可, 卫垚鑫, 金蕾蕾, 等. 高强不锈钢绞线网/ECC约束混凝土抗压强度[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(12): 126-132.
- [23] LI Ke, WEI Yaoxing, JIN Leilei, et al. Compressive strength

- of concrete confined by high-strength stainless steel stranded wire meshes and engineered cementitious composites[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(12): 126-132(in Chinese).
- [15] 李苗浩夫. 高强不锈钢绞线网/ECC加固钢筋混凝土柱受压性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- LIMIAO Haofu. Research on compressive performance of reinforced concrete columns strengthened by high-strength stainless steel wire mesh/ECC[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019(in Chinese).
- [16] 周擎威. 高强不锈钢绞线与ECC黏结性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- ZHOU Qingwei. Experimental study on the bonding performance between high-strength stainless steel strand and EEC[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018(in Chinese).
- [17] NAPOLI A, REALFONZO R. Reinforced concrete beams strengthened with SRP/SRG systems: Experimental investigation[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93(2): 654-677.
- [18] 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).
- [19] DONG S F, ZHOU D C, ASHRAF A, et al. 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, 2008(in Chinese).