

纤维织物增强高延性混凝土加固受损RC梁受剪性能试验

张敏 邓明科 智奥龙 马向琨

Experimental on the shear behavior of pre-damaged RC beams strengthened by textile reinforced highly ductile concrete

ZHANG Min, DENG Mingke, ZHI Aolong, MA Xiangkun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220428.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

混合配筋钢纤维增强混凝土梁受弯承载力试验及理论计算

Experimental and theoretical calculation on the flexural capacity of steel fiber reinforced concrete beams with hybrid reinforcing bars

复合材料学报. 2020, 37(9): 2348–2357 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.003>

聚丙烯纤维增强混凝土干接缝的抗剪性能

Shear strength of polypropylene fiber reinforced concrete dry joints

复合材料学报. 2018, 35(7): 1963–1974 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.003>

聚乙烯醇纤维改性高延性混凝土双面剪切试验及剪切韧性评价方法

Double shear experiment of highly ductile concrete modified by polyvinyl alcohol and shear toughness evaluation method

复合材料学报. 2020, 37(2): 461–471 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190528.002>

全GFRP筋混凝土电缆排管的抗剪承载力

Shear bearing capacity of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

复合材料学报. 2018, 35(12): 3331–3341 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180206.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220428.003

纤维织物增强高延性混凝土加固受损 RC 梁受剪性能试验



分享本文

张敏¹, 邓明科^{*1}, 智奥龙¹, 马向琨^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 华夏幸福基金股份有限公司, 西安 710055)

摘要: 为研究二次受力对纤维织物增强高延性混凝土 (TRHDC) 加固钢筋混凝土 (RC) 梁受剪性能的影响, 对 8 根 TRHDC 加固梁和 1 根对比梁进行了静载试验, 分析了纤维织物层数、损伤程度及持载水平对梁破坏形态、荷载-挠度曲线、荷载-箍筋应变曲线及荷载-织物应变曲线的影响。试验结果表明: 所有梁均发生了剪压破坏, 仅一根梁出现剥离现象; TRHDC 可有效限制斜裂缝的发展, 延缓箍筋屈服和刚度退化; TRHDC 加固显著地提高了梁的受剪承载力和变形能力, 最高分别达 67% 和 54%; 加固效果未完全随纤维织物层数的增大而提高, 与 TRHDC 面层利用率有关; 原梁箍筋屈服之前, 损伤程度对加固梁受剪性能的影响不明显, 原梁箍筋屈服之后, 加固梁受剪承载力随损伤程度的增大而降低; 加固效果随持载水平的提高而降低; 两层纤维织物的 TRHDC 可有效修复完全受损 RC 梁的受剪性能; 建立了考虑二次受力的 TRHDC 加固 RC 梁受剪承载力的计算公式, 且计算值与试验结果吻合较好。

关键词: 纤维织物增强高延性混凝土; 受损 RC 梁; 受剪加固; 二次受力; 受剪承载力

中图分类号: TU375 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2023)03-1624-13

Experimental on the shear behavior of pre-damaged RC beams strengthened by textile reinforced highly ductile concrete

ZHANG Min¹, DENG Mingke^{*1}, ZHI Aolong¹, MA Xiangkun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. China Fortune Land Development CO., LTD., Xi'an 710055, China)

Abstract: Static load tests were conducted on eight reinforced concrete (RC) beams strengthened by textile reinforced high ductile concrete (TRHDC) and one control beam to study the effect of secondary loading on the shear behavior of TRHDC-strengthened beams. The influence of the number of the textile layer, damage degree of beams, and different sustained loads on the failure mode, load-deflection curves, load-strain curves of stirrups, and load-strain curves of textile were analyzed. The results indicate that all beams fail in shear compression mode, and the debonding phenomenon is only observed in one beam. TRHDC can effectively restrain the development of shear cracks, delay the yielding of stirrups and the stiffness degradation. This strengthening method can significantly improve the shear strength and deformation capacity of RC beams by up to 67% and 54%, respectively. The strengthening effectiveness does not completely increase with the number of the textile layer increase, which is related to the utilization rate of the TRHDC layer. When the stirrup of the original beam does not reach its yielding strength, the damage degree has no obvious influence on the shear behavior of strengthened beams. On the contrary, the shear strength of strengthened beams decreases with the increase of the damage degree. The strengthening effectiveness

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-04-04; 录用日期: 2022-04-19; 网络首发时间: 2022-04-29 18:00:24

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220428.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (51578445); 西安市科技创新计划项目 (20191522415 KYPT015 JC017)

National Natural Science Foundation of PR China (51578445); Xi'an Science and Technology Innovation Project (20191522415 KYPT015 JC017)

通信作者: 邓明科, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高性能土木工程材料与新型结构 E-mail: dengmingke@126.com

引用格式: 张敏, 邓明科, 智奥龙, 等. 纤维织物增强高延性混凝土加固受损 RC 梁受剪性能试验 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1624-1636.

ZHANG Min, DENG Mingke, ZHI Aolong, et al. Experimental on the shear behavior of pre-damaged RC beams strengthened by textile reinforced highly ductile concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1624-1636(in Chinese).

decreases with the sustained load increasing. The completely damaged RC beams can be restored by the TRHDC with two numbers of the textile layer. A calculation formula for the shear strength of TRHDC-strengthened beams considering the secondary loading was proposed. The calculation values are in good agreement with the test results.

Keywords: textile reinforced high ductile concrete; pre-damaged RC beam; shear strengthening; secondary loading; shear strength

纤维织物增强砂浆 (TRM) 是一种将纤维织物嵌入无机基体的新型复合材料^[1-2], 具有轻质、高强和耐腐蚀特征^[3-5]。织物的耐腐蚀性使其所需保护层厚度较小, 故 TRM 能以轻质薄壁的形式应用于结构中^[6-7]; 无机基体的使用可以解决纤维增强树脂复合材料 (FRP) 加固中有机胶引起的耐火性差、潮湿环境使用受限和有毒性等问题, 已成为一种替代 FRP 且被广泛应用于混凝土结构的加固方式^[8-9]。但 TRM 也存在织物利用率偏低、基体开裂后不再传递荷载和正常使用极限状态下裂缝宽度较大等缺点^[10-12]。

高延性混凝土 (HDC) 是一种具有高韧性、高抗裂性能和应变硬化特性的水泥基复合材料^[13-14]。为了改善 TRM 的以上缺点, 本课题组提出纤维织物增强高延性混凝土 (TRHDC), 即采用 HDC 作为 TRM 的基体, 将一层或多层纤维织物按一定间距布置于 HDC 中。TRHDC 单轴拉伸试验研究^[12,15-16]表明聚乙烯醇 (PVA) 纤维有效地改善了织物-基体的界面性能; 同时减小了裂缝宽度, 使试件呈现多裂缝开裂特性; 并显著地提高了纤维织物的利用率。TRHDC 加固钢筋混凝土 (RC) 梁受弯性能研究^[17-18]表明 TRHDC 显著地提高了 RC 梁的受弯承载力, 是一种有效的加固混凝土结构的方式。

由于材料性能退化、使用功能改变和荷载增加等造成 RC 梁的受剪承载力不足, 或受弯加固后梁的受剪承载力小于受弯承载力, 需要对梁进行受剪加固^[19]。郑宇宙等^[20]采用 FRP 增强超高韧性纤维水泥基复合材料对 RC 梁进行受剪加固, 结果表明该材料与混凝土黏结良好, 且可以有效抑制斜裂缝的发展, 显著提高梁的受剪承载力。Guo 等^[21]研究了剪跨比、配网率和网格尺寸对 FRP 增强水泥基复合材料加固 RC 梁受剪性能的影响。目前, 大部分受剪加固的试验研究主要集中在加固无初始损伤梁, 关于二次受力对加固效果影响的研究开展较少。在实际工程中, 梁通常带裂缝工作, 而且对梁进行加固时很难实现对荷载的完全卸载, 因此加固后加固层往往存在应变(应力)滞后现象, 这对加固效果起不利作用。可见, 考虑二次受力, 即研究损伤程度和持载水平

对加固梁受剪性能的影响是非常必要和亟需的。

为研究 TRHDC 加固受损 RC 梁受剪性能, 设计了 9 个梁试件, 分析了纤维织物层数、损伤程度和持载水平对破坏形态、荷载-挠度曲线、荷载-箍筋应变曲线及荷载-织物应变曲线的影响, 并提出了考虑二次受力的加固梁受剪承载力的计算公式, 为实际工程提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

为研究纤维织物层数、损伤程度、持载水平对 TRHDC 加固 RC 梁受剪性能的影响, 共设计并制作了 9 个梁试件, 其中 1 个对比试件, 8 个 TRHDC 加固试件。对比试件的截面尺寸为 200 mm×300 mm, 跨度为 1 500 mm, 剪跨比为 2。为防止试件发生弯曲破坏, 受压纵筋和受拉纵筋分别设为 2 根 18 mm 和 3 根 25 mm 直径的 HRB400 级钢筋, 其对应的纵筋配筋率分别为 0.96% 和 2.82%。混凝土强度等级为 C35, 混凝土保护层厚度为 20 mm。箍筋采用双肢箍, 直径为 6 mm 的 HPB300 级光圆钢筋, 其间距为 200 mm。TRHDC 加固试件均采用三面 U 型加固方式, 即在梁的底面和两个侧面进行薄层加固, 加固层厚度均为 15 mm。试件加固参数见表 1, 其中 L 表示对比试件, CL 表示无初始受力加固试件, SCL 表示不同损伤程度加固试件, XCL 表示持载加固试件。将原梁斜裂缝出现 ($47\%P_{u,0}$, $P_{u,0}$ 为原梁的峰值荷载) 作为持载加固试件的初始状态, 选取了三种持载水平, 包括 $47\%P_{u,0}$ 、 $23.5\%P_{u,0}$ 和 0, 以研究持载水平对加固效果的影响。试件 XCL-1 和 XCL-2 的区别在于持载水平不同, 持载水平分别为 $23.5\%P_{u,0}$ 和 $47\%P_{u,0}$ 。试件截面尺寸及配筋情况见图 1。

在原 RC 梁养护 28 天后, 对梁的两个侧面和底面进行凿毛、冲刷; 对碳纤维织物按相应尺寸进行 U 型倒角处理。对于无初始受力加固试件, 直接进行 TRHDC 三面 U 型加固; 对于不同损伤程度加固试件, 首先加载至相应荷载, 然后完全卸载后进行 TRHDC 三面 U 型加固; 对于持载加固试件, 首先加载至相应荷载, 然后根据设计方案进行部分卸载, 最终在二次受力装置上完成

TRHDC 三面 U 型加固，并持载养护。TRHDC 三面 U 型加固的施工步骤如下：(1) 按压式涂抹第一层 HDC；(2) 将碳纤维织物按入第一层 HDC 中；(3) 按压式涂抹第二层 HDC，并收光抹平。当采用二层或三层织物时，重复(2)和(3)即可。为得到力学性能最佳的 TRHDC，织物的保护层厚度和织物之间的间距分别不小于 4 mm 和 2 mm^[4,12,15-16]。

表 1 钢筋混凝土 (RC) 梁试件加固参数

Table 1 Strengthening parameters of reinforced concrete (RC) beam specimens

Specimen	Damage degree	Unloading level	Number of the textile layer in TRHDC
L-0	-	-	-
CL-1	-	-	1
CL-2	-	-	2
CL-3	-	-	3
SCL-1	Shear cracks occurred (47% $P_{u,0}$)	Unloading completely	2
SCL-2	Stirrups yielded (56% $P_{u,0}$)	Unloading completely	2
SCL-3	Failure (the load drops to 85% $P_{u,0}$)	Unloading completely	2
XCL-1	Shear cracks occurred (47% $P_{u,0}$)	Unloading 23.5% $P_{u,0}$	2
XCL-2	Shear cracks occurred (47% $P_{u,0}$)	Not unloading	2

Notes: $P_{u,0}$ —Peak load of the control beam; L—Control beam; CL—Strengthened beams without initial stress; SCL—Strengthened beams with different damage degrees; XCL—Strengthened beams under sustained loads; TRHDC—Fiber reinforced high ductility concrete.

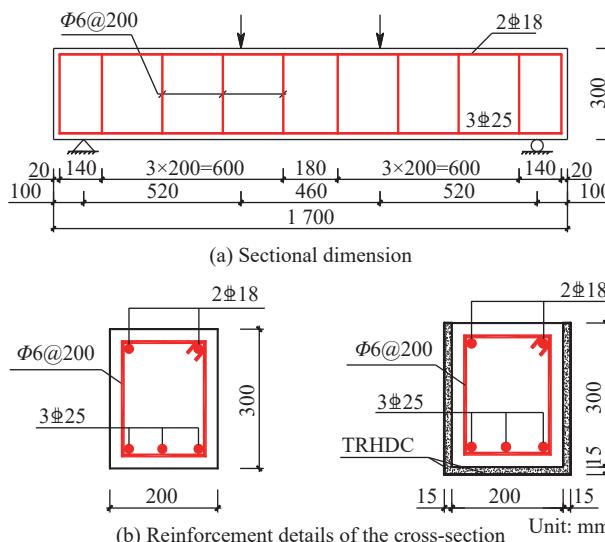


图 1 RC 梁试件截面尺寸及配筋

Fig. 1 Dimensions and rebar of RC beam specimens

1.2 材料性能

1.2.1 混凝土及钢筋

混凝土强度等级为 C35, 根据边长为 150 mm 的立方体抗压试验, 混凝土立方体抗压强度平均值为 44.5 MPa; 根据尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体抗压试验, 混凝土轴心抗压强度平均值为 30.6 MPa。按 $f_t = 0.395 f_{cu,m}^{0.55}$ ^[22] 计算可得, 混凝土抗拉强度为 3.2 MPa。钢筋的力学性能见表 2。

表 2 钢筋力学性能

Table 2 Mechanical properties of reinforcement

Type	Diameter/mm	Yielding strength/MPa	Ultimate strength/MPa
HPB300	6	343	508
HRB400	18	438	610
HRB400	25	450	620

1.2.2 TRHDC

(1) 纤维织物

试验采用的纤维织物为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的双向碳纤维编织网, 其表面涂环氧树脂, 以提高纤维束的整体受力性能, 织物形式及力学性能分别见图 2 和表 3。

(2) HDC

试验采用的 HDC 由水泥、粉煤灰、矿粉、河砂、PVA 纤维、水和减水剂组成, 其配合比见表 4。PVA 纤维的体积掺量为 1.5vol%, 其力学性能指标

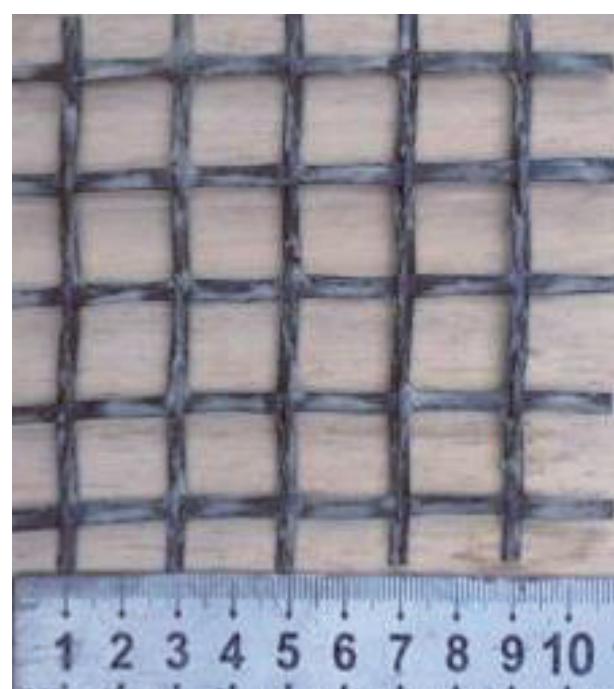


图2 织物形式

Fig. 2 Form of textile

表 3 织物力学性能

Table 3 Mechanical properties of textile

Type of textile	f_t/MPa	E_t/GPa	$\varepsilon_t/\%$	$\rho_f/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$A/(\text{mm}^2\cdot\text{bundle}^{-1})$
Carbon	3 600	230	1.5	1.74	0.88

Notes: f_t —Tensile strength; E_t —Elastic modulus; ε_t —Tensile elongation; ρ_f —Density; A —Cross-sectional area of each bundle of yarns.

见表 5。由尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的棱柱体试块的轴心受压试验测得, HDC 的轴心抗压强度为 45.2 MPa 。采用图 3 所示为狗骨形试件对 HDC 进行单轴拉伸试验, 测得 HDC 的抗拉强度为 3.5 MPa ^[23]。

表 4 高延性混凝土 (HDC) 的基体配合比

Table 4 Mixed proportions of matrices in high ductile concrete (HDC)

(kg/m³)

Cement	Flyash	Mineral powder	River sand	Water	Water reducer
235	764	177	424	376	8

表 5 聚乙烯醇 (PVA) 纤维的力学性能指标

Table 5 Mechanical properties of polyvinyl alcohol (PVA) fibers

Fiber type	L/mm	$D/\mu\text{m}$	E/GPa	f/MPa	$\varepsilon/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
PVA	12	39	40	1 600	7	1.3

Notes: L —Length; D —Diameter; E —Elastic modulus; f —Tensile strength; ε —Tensile elongation; ρ —Density.

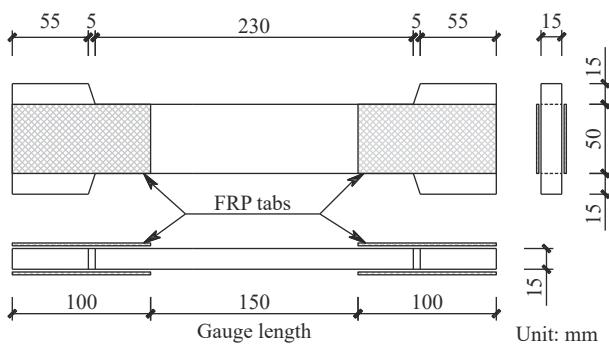


Fig. 3 Dimensions of dog bone specimens

(3) TRHDC

为测得 TRHDC 单轴拉伸力学性能参数, 采用图 3 所示的狗骨形试件在 10 t 万能试验机上按位移控制方式加载, 加载速率为 0.2 mm/min 。每种 TRHDC 共制作一组试件, 测得具有一层 (C1)、两层 (C2) 和三层纤维织物 (C3) 的 TRHDC 的抗拉强度平均值分别为 5.14 MPa 、 7.88 MPa 和 10.38 MPa ,

极限拉应变分别为 1.061% 、 1.569% 和 1.630% 。在单轴拉伸荷载作用下, TRHDC 破坏呈现多细密裂缝开展模式。不同纤维织物层数的 TRHDC 的应力-应变曲线和破坏形态见图 4。

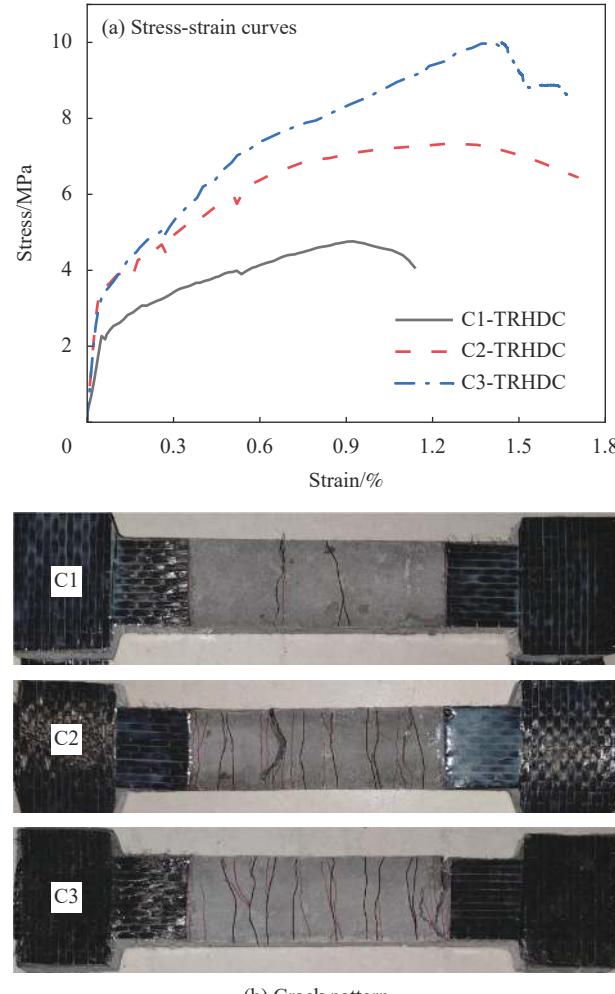


图 4 纤维织物增强高延性混凝土 (TRHDC) 的应力-应变曲线和开裂模式
Fig. 4 Stress-strain curves and crack pattern of textile reinforced high ductile concrete (TRHDC)

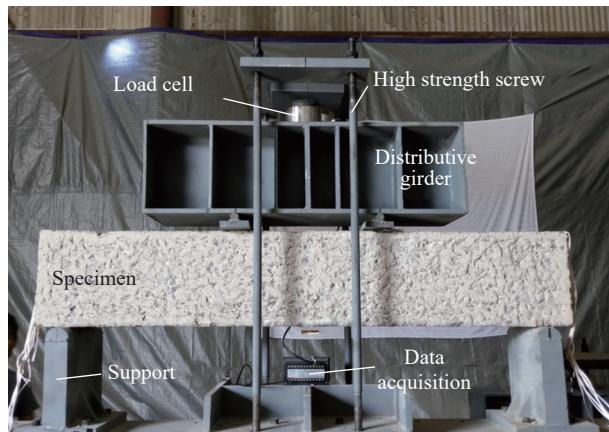
1.3 试验装置及量测

1.3.1 试验装置

试验采用两点对称加载方式, 在吉林冠腾自动化技术有限公司生产的 10 t 电液伺服压力试验机上完成, 按位移控制加载, 加载速率为 0.6 mm/min 。采用人工观察的方式确定试件的开裂荷载, 并记录裂缝的出现与发展情况。试验加载装置见图 5。

1.3.2 测点布置

为得到箍筋和 TRHDC 在弯剪区段的应变分布, 按图 6 所示的设计在箍筋、织物及 TRHDC 表面布



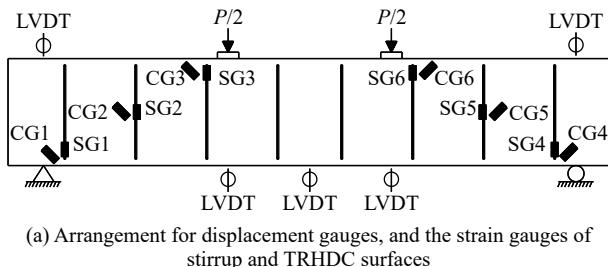
(a) Secondary loading device



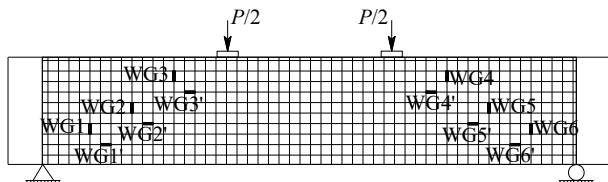
(b) Loading device

图 5 试验装置

Fig. 5 Test setup



(a) Arrangement for displacement gauges, and the strain gauges of stirrup and TRHDC surfaces



(b) Arrangement for the strain gauges of textile

LVDT—Linear displacement transducer; SG1-SG6—Stirrup strain gauge number; CG1-CG6—Strain gauge number on the surface of TRHDC; WG1-WG6—Strain gauge number of longitudinal mesh; WG1'-WG6'—Strain gauge number of transverse mesh; P—Vertical concentrated load

图 6 测点布置

Fig. 6 Measuring points

置了电阻应变片。箍筋和 TRHDC 表面的应变片编号分别为 SG1~SG6 和 CG1~CG6，织物的纵向和横向网格的应变片编号分别为 WG1~WG6 和 WG1'~WG6'。在试件的跨中、加载点和支座位置架设线性位移传感器 (LVDT) 以量测梁的挠度。

2 试验结果及分析

2.1 RC 梁试验现象和破坏形态

2.1.1 试验现象

为便于描述，采用 $P_{u,0}$ 和 P_u 分别表示对比试件和加固试件的峰值荷载，各试件的破坏形态如图 7 所示。

(1) 对比试件 L-0

当加载至 $42 \text{ kN}(11.4\%P_{u,0})$ 时，受拉区混凝土出现竖向裂缝；随着荷载的增大，剪跨区段不断出现新的竖向裂缝和腹剪斜裂缝，原有竖向裂缝延伸成斜裂缝；当加载至 $205 \text{ kN}(56\%P_{u,0})$ 时，箍筋开始屈服；继续加载，右侧弯剪区段形成主斜裂缝；加载至 $354 \text{ kN}(96.3\%P_{u,0})$ 时，右加载点处混凝土被压碎；当加载至峰值荷载时，右侧弯剪区段腹部及右加载点处混凝土剥落；纵筋均未屈服，试件 L-0 发生典型的剪压破坏。

(2) 无初始受力加固试件

无初始受力加固试件在加载初期和中期的试验现象与对比试件 L-0 类似。

对于试件 CL-1，当主斜裂缝形成时，右支座处 TRHDC 面层被压碎；继续加载，箍筋开始屈服；当加载至峰值荷载时，梁右端侧面观察到 X 形裂缝，并伴有“嗞嗞”声；原梁混凝土损坏严重，纵筋未屈服，试件发生剪压破坏。

对于试件 CL-2，在主斜裂缝形成后，继续加载，箍筋开始屈服；加载至峰值荷载时，右加载点处 TRHDC 面层被压碎；纵筋未屈服，试件发生剪压破坏。

对于试件 CL-3，当加载至 $580 \text{ kN}(94.2\%P_u)$ 时，右支座处 TRHDC 面层被压碎；继续加载，主斜裂缝在右弯剪区段形成；随后，箍筋开始屈服；加载至峰值荷载以后，右弯剪区段加固层出现单侧剥离，荷载迅速下降至峰值荷载的 85% 以下；纵筋未屈服，试件发生剪压破坏，并伴随加固层的剥离破坏。

(3) 不同损伤程度加固试件

对于试件 SCL-1、SCL-2 和 SCL-3，原梁分别加载至斜裂缝出现、箍筋屈服和破坏状态后，完

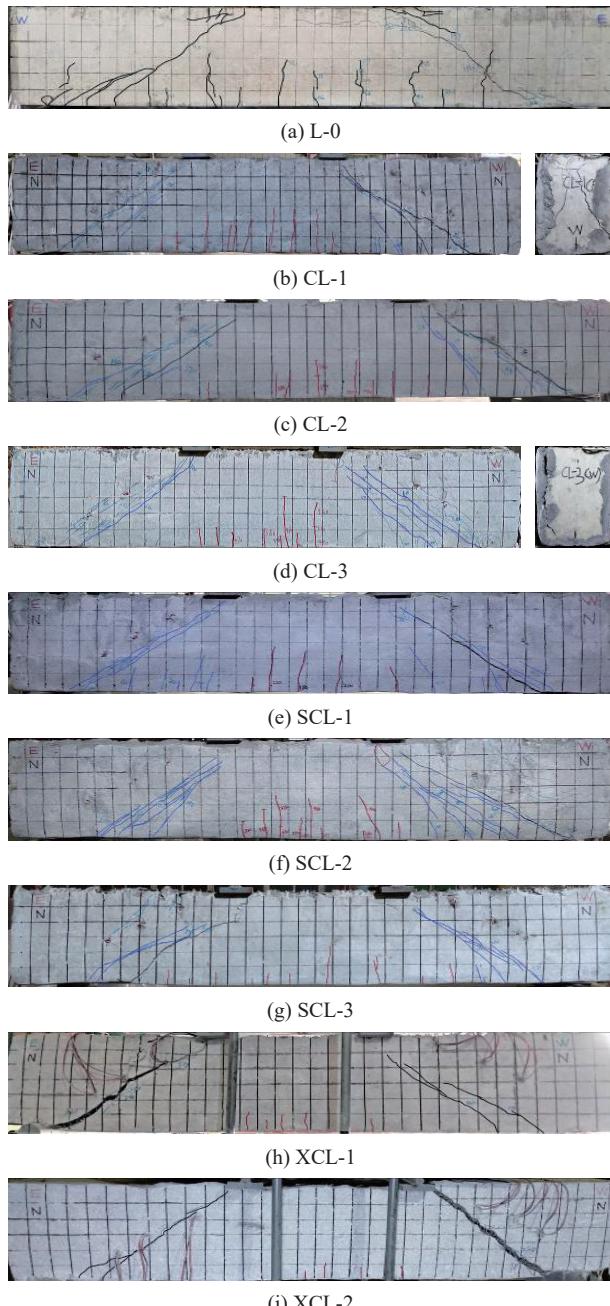


图 7 各 RC 梁试件的破坏形态

Fig. 7 Failure modes of RC beam specimens

全卸载, 此时试件跨中的残余挠度分别为 0.63 mm、0.61 mm 和 2.59 mm。不同损伤程度加固试件在加载初期和中期的试验现象与对比试件 L-0 类似; 在主斜裂缝形成后, 继续加载, 箍筋开始屈服; 加载至峰值荷载时, TRHDC 面层被压碎; 纵筋未屈服, 试件均发生剪压破坏。试件 SCL-3 破坏时的主斜裂缝与加固前原梁的主斜裂缝在相同剪跨区段。

(4) 持载加固试件

持载加固试件 XCL-1 和 XCL-2 在加载初期和

中期的试验现象与对比试件 L-0 类似; 在主斜裂缝形成后, 继续加载, 箍筋开始屈服; 加载至峰值荷载时, 主斜裂缝处织物与 HDC 界面开始滑移, 主斜裂缝变宽; 继续加载, 左加载点处加固层被压碎; 纵筋未屈服, 试件发生剪压破坏。

2.1.2 破坏形态

对比试件和所有加固试件均发生了剪压破坏。无初始受力加固试件 CL-1 破坏时侧面形成 X 形裂缝, 内部混凝土损坏严重; 这主要是由于 TRHDC 面层提供了较好的约束作用, 且在加载过程中试件可能发生了一定程度的扭转, 从而导致内部混凝土出现严重破损。无初始受力加固试件 CL-3 破坏时 TRHDC 面层出现剥离现象; 可见, 当纤维织物层数较多时, 需植入抗剪栓钉等锚固措施以充分发挥加固层的作用。

与对比试件 L-0 相比, 加固试件斜裂缝的数量较多且开展较细密, 主要原因是 TRHDC 具有多裂缝开展的特性。随着纤维织物层数的增大, 加固试件斜裂缝的数量增多, 裂缝宽度减小。试件 SCL-3 破坏时的主斜裂缝与加固前原梁的主斜裂缝在相同剪跨区段, 表明 TRHDC 面层加固未改变完全受损 RC 梁的裂缝开展路径。这主要是由于试件 SCL-3 加固前原梁已发生剪压破坏, 即与主斜裂缝相交的箍筋应力达到屈服强度, 且剪压区混凝土被压碎; 采用 TRHDC 面层对其加固后, 加固梁的控制截面仍在原梁的主斜裂缝处, 故加固前后梁破坏时的主斜裂缝在相同剪跨区段。随着持载水平的提高, 加固试件的裂缝数量减小、裂缝宽度增大, 主要原因是 TRHDC 面层的滞后应变(应力)增大, 即 TRHDC 面层发挥的作用减小。

2.2 RC 梁荷载-挠度曲线

表 6 为各 RC 梁试验结果, 其中 P_{cr} 和 $P_{cr,0}$ 分别为加固试件和对比试件的开裂荷载, P_r 和 $P_{r,0}$ 分别为加固试件和对比试件斜裂缝出现时的荷载, Δ_u 和 $\Delta_{u,0}$ 分别为加固试件和对比试件的荷载下降至 85% 峰值荷载时对应的跨中挠度。图 8 为各试件的荷载-跨中挠度曲线, 加载初期, 试件处于弹性阶段, 荷载-跨中挠度曲线呈直线。随着荷载的增大, 混凝土或 TRHDC 开裂, 荷载-跨中挠度曲线出现转折; 加固试件的开裂荷载均较对比试件 L-0 高, 主要原因是 TRHDC 的初裂强度高于混凝土; 在该阶段裂缝不断发展, 曲线斜率逐渐减小, 刚度不断退化。接近峰值荷载时, 由于主斜裂缝的延伸与变宽, 在相同荷载增量下, 跨中挠度增

量显著增大。在达到峰值荷载后，剪跨区段混凝土或TRHDC被压碎，试件破坏。

2.2.1 无初始受力加固试件

由图8(a)和表6可知：

(1) 无初始受力加固试件的初始刚度均较对比试件L-0高；随着纤维织物层数的增大，初始刚度的增加不明显。加固试件的刚度退化均较对比试件慢，主要原因是TRHDC的高初裂强度和纤维桥联作用抑制了斜裂缝的出现和发展。随着纤

维织物层数的增大，加固试件的刚度退化不断减缓。

(2) 与对比试件相比，试件CL-1、CL-2和CL-3的峰值荷载分别提高了59%、53%和67%，其极限位移分别提高了54%、18%和36%。可见，TRHDC面层加固RC梁可显著提高其受剪承载力和变形能力；加固试件的提高幅度并未完全随纤维织物层数的提高而增大，主要与TRHDC面层利用率有关；采用一层纤维织物的TRHDC对梁进行加固时，TRHDC面层利用率最高。

表6 各RC梁试验结果

Table 6 Test results of RC beams

Specimen number	P_{cr}/kN	$\frac{P_{cr}}{P_{cr,0}}$	P_r/kN	$\frac{P_r}{P_{r,0}}$	P_u/kN	$\frac{P_u}{P_{u,0}}$	Δ_u/mm	$\frac{\Delta_u}{\Delta_{u,0}}$	Failure mode
L-0	42	—	172	—	367.56	—	5.88	—	S
CL-1	250	5.95	335	1.95	585.54	1.59	9.05	1.54	S
CL-2	190	4.52	330	1.92	563.90	1.53	6.96	1.18	S
CL-3	300	7.14	410	2.38	615.49	1.67	7.97	1.36	S+PD
SCL-1	180	4.29	300	1.74	528.38	1.44	6.71(0.63)	1.14	S
SCL-2	165	3.93	280	1.63	565.22	1.54	6.60(0.61)	1.12	S
SCL-3	160	3.81	223	1.30	434.91	1.18	6.71(2.59)	1.14	S
XCL-1	210	5.00	320	1.86	498.76	1.36	5.62(1.29)	0.96	S
XCL-2	200	4.76	280	1.63	485.03	1.32	5.24(1.86)	0.89	S

Notes: P_{cr} and $P_{cr,0}$ —Cracking load of the strengthened beam and control beam, respectively; P_r and $P_{r,0}$ —Loads corresponding to the yielding of stirrups of the strengthened beam and control beam, respectively; P_u and $P_{u,0}$ —Peak load of the strengthened beam and control beam, respectively; Δ_u and $\Delta_{u,0}$ —Ultimate deflection corresponding to the load dropping to 85% of the peak load of the strengthened beam and control beam, respectively; Δ_u of specimens SCL-1, SCL-2, SCL-3, XCL-1, and XCL-2 is the midspan deflection under secondary loading, while the values in parentheses are the residual midspan deflection before secondary loading; S—Shear-compression failure; PD—Debonding failure between the concrete and the TRHDC layer.

2.2.2 不同损伤程度加固试件

由图8(b)、图8(c)和表6可知：

(1) 不同损伤程度加固试件在加固前的初始刚度与对比试件L-0基本一致，加固后的初始刚度均高于L-0。由图7(b)可知，加固试件的初始刚度随原梁损伤程度的增大而降低，其中损伤程度最高(荷载下降至85% $P_{u,0}$)的加固试件SCL-3的初始刚度略低于L-0。加固试件的刚度退化均慢于对比试件L-0，其中试件SCL-3在加载中后期的刚度已高于L-0，可见，TRHDC可有效抑制斜裂缝的出现和发展。

(2) 与对比试件L-0相比，试件SCL-1、SCL-2和SCL-3的峰值荷载分别提高了44%、54%和18%，其极限挠度分别提高了14%、12%和14%。可见，原梁箍筋屈服以前，原梁损伤程度对TRHDC面层利用率的影响较小，不同损伤程度加固试件的受剪性能差别不大，即损伤程度对加固试件受剪

性能的影响不明显；原梁箍筋屈服以后，随着原梁损伤程度的增大，加固试件的受剪承载力不断降低。

(3) 对比无初始受力加固试件CL-2，不同损伤程度加固试件的峰值荷载和极限位移均较小，即原梁的损伤不利于TRHDC加固梁受剪性能的提高。

(4) 将原梁加载至破坏(荷载下降至85% $P_{u,0}$)后完全卸载，然后采用两层纤维织物的TRHDC进行加固，得到试件SCL-3。与对比试件L-0相比，试件SCL-3的峰值荷载和极限挠度(不含第二次加载前的残余挠度)分别提高了18.3%和14.1%。可见，两层纤维织物的TRHDC可有效修复完全受损RC梁的受剪承载力和变形能力。

2.2.3 持载加固试件

由图8(d)和表6可知：

(1) 对于持载加固试件XCL-1和XCL-2，加固前的初始刚度与对比试件L-0相同，持载加固后

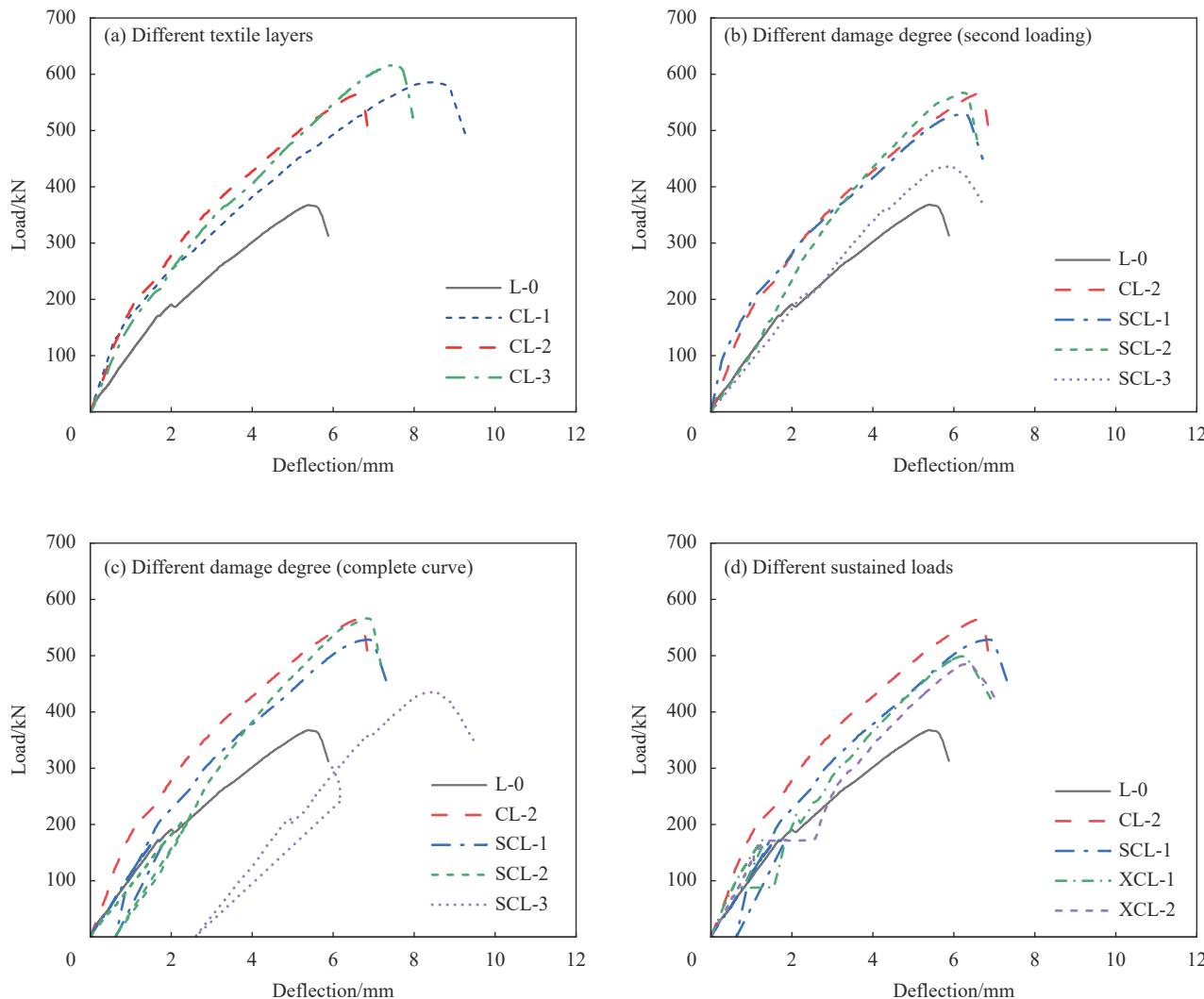


图 8 各 RC 梁荷载-跨中挠度曲线

Fig. 8 Load-midspan deflection curves of RC beams

刚度明显高于 L-0。试件 XCL-1 和 XCL-2 的刚度退化速率基本相同, 且均较 L-0 慢, 主要原因是 TRHDC 的高初裂强度和纤维桥联作用抑制了斜裂缝的出现和发展。

(2) 与对比试件 L-0 相比, 不同损伤程度加固试件 SCL-1、持载加固试件 XCL-1 和 XCL-2 的峰值荷载分别提高了 43.8%、35.7% 和 32.0%; 前者极限挠度(不含残余挠度)提高了 14.1%, 后两者分别降低了 4.4% 和 10.9%。可见, 持载加固不利于得到较好的加固效果; 即持载水平越高, 峰值荷载的提高幅度越小, 极限挠度的降低幅度越大。这主要是由于随着持载水平的提高, 加固层的滞后应变(应力)不断提高, 即加固层发挥的作用逐渐减小。

(3) 对比无初始受力加固试件 CL-2, 不同损伤

程度加固试件 SCL-1、持载加固试件 XCL-1 和 XCL-2 的峰值荷载分别降低了 6.3%、11.6% 和 14.0%; 前者极限挠度(不含残余挠度)提高了 3.6%, 后两者分别降低了 19.3% 和 24.7%。可见, 持载水平越高, 持载加固试件较无初始受力加固试件的峰值荷载和极限挠度的降低幅度越大; 即随着加固层滞后应变(应力)的增大, TRHDC 面层利用率和加固效果逐渐降低。

2.3 RC 梁荷载-箍筋应变曲线

图 9 为各试件的荷载-箍筋应变曲线。其中不同损伤加固试件和持载加固试件为第二次加载时的荷载-箍筋应变曲线, 试件 SCL-3 由于初次加载至原梁破坏时箍筋测点处应变片损坏, 故未给出相应曲线。斜裂缝出现之前, 箍筋应变较小, 荷

载-箍筋应变曲线呈直线分布，此时的截面剪力主要由混凝土或 TRHDC 承担；在该阶段各加固试件的箍筋应变与对比试件基本相同。随着荷载的增大，斜裂缝出现，并不断向加载点和支座扩展，箍筋应变的增长速率逐渐增大，此阶段裂缝截面的剪力主要由箍筋和 TRHDC 承担。与对比试件相比，在相同荷载下，加固试件的箍筋应变较小，且箍筋应变增长速率较慢；这主要是由于 TRHDC 的纤维桥联作用抑制了斜裂缝的开展，同时 TRHDC 与箍筋共同承担抗剪作用，可延缓箍筋的屈服。在主斜裂缝形成后，跨越裂缝的箍筋达到屈服，箍筋应变迅速增大，此时裂缝截面增长的剪力主要由 TRHDC 承担。随后，箍筋应变增长速率逐渐增大，最终试件发生剪压破坏。

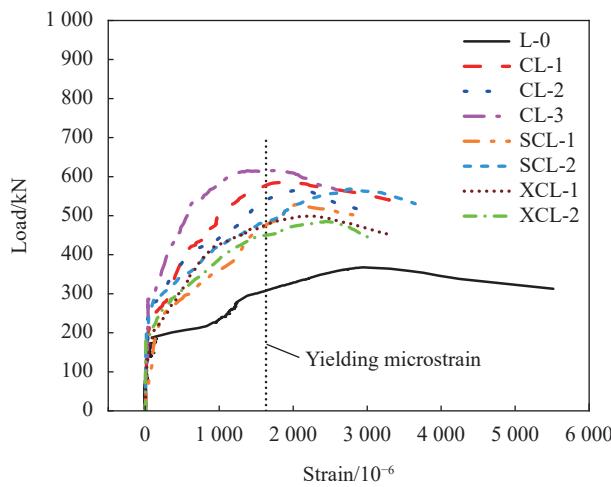


图 9 各 RC 梁荷载-箍筋应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of stirrups of RC beams

2.4 TRHDC 加固 RC 梁荷载-织物应变曲线

各试件的织物应变随荷载的变化曲线类似，故以试件 CL-3 为例进行说明，试件 CL-3 的荷载-织物应变曲线见图 10。斜裂缝出现之前，织物的应变较小，截面剪力大部分由混凝土或 HDC 面层承担。斜裂缝出现后，试件 CL-3 发生内力重分布，荷载-织物应变曲线出现拐点，织物应变快速增长，且不同位置处的织物应变增长速度不同，裂缝截面剪力主要由箍筋和 TRHDC 承担。随着荷载的增大，主斜裂缝出现和不断变宽，其附近的织物应变迅速增大，直至试件破坏。

3 TRHDC 加固受损 RC 梁受剪承载力计算

TRHDC 加固试件的受剪承载力由 RC 梁和 TRHDC 面层共同提供。TRHDC 面层相当于箍筋

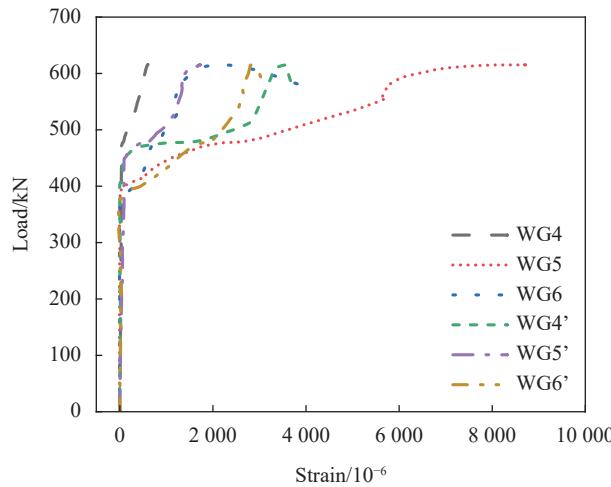


图 10 试件 CL-3 的荷载-织物应变曲线

Fig. 10 Load-textile strain curves of specimen CL-3

的作用，直接参与受剪，同时对内部混凝土有一定约束作用，其抗剪贡献可参考箍筋进行计算。为了考虑二次受力的影响，本文采用叠加法进行计算加固梁的受剪承载力，并引入与损伤程度和持载水平有关的系数，对 RC 梁和加固层的受剪贡献进行折减，表达式如下：

$$V_{\text{cal}} = k_{\alpha} V_{\text{RC}} + k_{\beta} V_{\text{TRHDC}} \quad (1)$$

式中， k_{α} 为损伤程度系数，主要反映了损伤程度对加固梁受剪承载力的影响；由试验结果可知，原梁箍筋屈服 ($56\%P_{u,0}$) 之前，原梁损伤程度对加固梁受剪性能的影响不明显，原梁箍筋屈服之后，加固梁受剪承载力随原梁损伤程度的增大而降低；通过对不同损伤程度加固试件的承载力进行回归分析，并假定损伤程度系数与损伤程度成线性关系，可得：当 $a_1 \leq \alpha \leq 1$ 时， $k_{\alpha} = -0.668\alpha + 1.374$ ；否则， $k_{\alpha} = 1$ ， α 为损伤程度， a_1 是原梁箍筋开始屈服时的荷载与原梁峰值荷载的比值，在本文中 $a_1 = 0.56$ ； $\alpha = 1$ 对应的是达到峰值荷载或峰值荷载以后的状态； k_{β} 为持载系数，反映了持载水平对加固梁受剪承载力的折减，通过对持载试件 XCL-1 和 XCL-2 的受剪承载力进行回归分析，得到 k_{β} 分别为 0.494 和 0.386，为偏于安全，故 k_{β} 取 0.386，非持载试件取 1.0； V_{RC} 为原梁受剪承载力； V_{TRHDC} 为 TRHDC 面层提供的剪力。

3.1 原梁受剪承载力计算

本文原梁的剪跨比为 2，其简化的修正拉-压杆模型见图 11，A 节点混凝土处于双向受压状态，B 节点为双向拉压状态，因此 B 节点为控制节点。Tan 等^[24] 和 Tang 等^[25] 提出适用于节点区的莫尔-

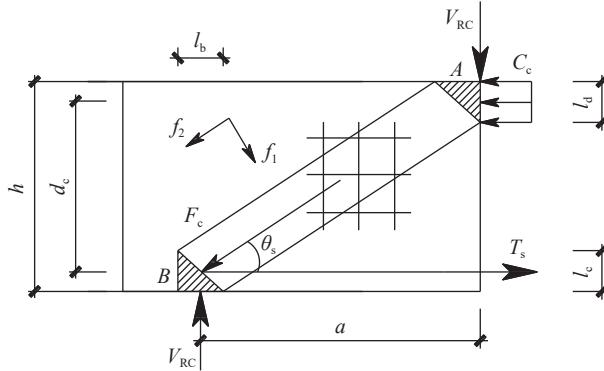
库仑破坏准则^[26]为

$$\frac{f_1}{f_t} + \frac{f_2}{f'_c} = 1 \quad (2)$$

式中, f_1 和 f_2 分别为 B 节点的主拉应力和主压应力; Zhang 和 Tan^[27]分别考虑了弯矩平衡和纵向受拉钢筋拉力的影响, 对 f_1 和 f_2 进行了修正; f'_c 为混凝土的圆柱体抗压强度, $f'_c = 0.8f_{cu}$, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_t 为 f_1 方向的最大抗拉强度, 其表达式为:

$$f_t = f_{ct} + f_{sv} + f_{ss} \quad (3)$$

式中, f_{ct} 为 B 节点区混凝土抗拉强度, $f_{ct} = 0.5\sqrt{f'_c}$ ^[25,27]; f_{sv} 和 f_{ss} 分别为纵向受拉钢筋和箍筋抗拉作用在主拉应力方向的分量。



f_1 and f_2 —Principal tensile and compressive stresses at the node B zone, respectively; θ_s —Angle between the longitudinal tension reinforcement and the diagonal strut; h —Depth of RC beams; d_c —Distance from the centroid of the nodal A zone to the centroid of the nodal B zone; l_a and l_b —Depths of the nodal A and B zones, respectively; a —Distance from loading point to support; l_b —Width of the nodal B zone; V_{RC} —Shear strength of RC beams; C_c —Compressive force of the concrete in the shear compression zone; T_s —Tensile force of longitudinal reinforcements; F_c —Compressive force of the concrete diagonal struts

图 11 RC 梁拉-压杆模型

Fig. 11 Strut-and-tie model of RC beams

参考文献 [28-29], f_{sv} 和 f_{ss} 的表达式分别为

$$f_{sv} = f_{yv}A_{sv} \sin \theta_s \cos \theta_s / A_c \quad (4)$$

$$f_{ss} = \frac{4\mu f_y A_s \sin \theta_s}{A_c / \sin \theta_s} \quad (5)$$

式中: f_{yv} 为箍筋的屈服强度; A_{sv} 为箍筋的截面面积; A_c 为梁的有效截面面积, $A_c = bd_c$, b 为截面宽度, d_c 见图 11, θ_s 为混凝土拉杆与压杆的夹角; f_y 为纵向受拉钢筋的屈服强度; A_s 为纵向受拉钢筋的截面面积; μ 为纵筋受剪贡献的修正系数, $\mu = 0.16 / \sqrt{\lambda \rho_s f_y / 335}$ ^[29], λ 为剪跨比。

根据图 11 的几何关系, 混凝土拉杆倾角 θ_s 应

按下式确定:

$$\tan \theta_s = \frac{h - \frac{l_c}{2} - \frac{l_d}{2}}{a} \quad (6)$$

式中: h 为梁的截面高度; l_c 和 l_d 为 A 节点和 B 节点区高度, 均取 $2a_s$ ^[28]; a_s 为纵向受拉钢筋合力点到受拉边缘的距离; a 是剪跨, 支座中心线与集中荷载作用点之间的距离。

RC 深梁的受剪承载力为

$$V_{RC} = \frac{1}{\frac{4 \sin \theta_s \cos \theta_s}{f_t A_c} + \frac{\sin \theta_s}{f'_c A_{str}}} \quad (7)$$

式中, A_{str} 为混凝土压杆的横截面面积, $A_{str} = b(l_c \cos \theta_s + l_b \sin \theta_s)$ 。

为避免 A 节点的局部破坏, A 节点区应满足下式:

$$V_{RC} / \sin \theta_s \leq f'_c A_{str} \quad (8)$$

3.2 TRHDC 面层提供剪力计算

在剪切-拉伸荷载作用下, 织物产生的横向力会引起局部损伤和脱黏, 从而导致织物强度的下降^[30], 下降程度与织物的倾斜率有关, 因此引入系数 k_θ 对 TRHDC 抗拉强度进行折减。TRHDC 面层的作用与箍筋类似, 故 TRHDC 面层的抗剪作用采用 45°桁架模型进行计算, 其表达式如下:

$$V_{TRHDC} = k_\theta f_{tr} \frac{A_{tr}}{s} h_0 \quad (9)$$

式中: k_θ 是与织物倾斜率有关的系数; θ 为斜裂缝与梁轴线方向的夹角, $\theta = 45^\circ$ 时 k_θ 取 0.62^[30]; f_{tr} 为 TRHDC 的抗拉强度; A_{tr} 为 TRHDC 面层的截面面积; s 为箍筋间距; h_0 为加固试件截面的有效高度。

3.3 计算值与试验值比较

由上述方法计算得到的受剪承载力见表 7, 由于本文采用两点对称加载, 故各试件受剪承载力为 0.5 倍的峰值荷载。持载加固对 TRHDC 受剪加固 RC 梁起不利作用, 因此在受剪承载力计算中考虑了折减系数, 即损伤程度系数 k_α 和持载系数 k_β 。由于 TRHDC 加固受损 RC 梁的受剪性能研究较少, 且 k_α 和 k_β 的有效性需得到进一步的验证, 因此选取了 FRP 加固受损 RC 梁^[31-32]的受剪承载力计算值与试验值进行比较。其中, FRP 加固层的剪力值为相应文献中提供的计算值。文献 [32] 的计算值与试验值之间误差相对较大的原因是持载加固对端锚无黏结预应力受剪加固 RC 梁有

表 7 各 RC 梁受剪承载力计算值与试验值比较

Table 7 Comparison for the calculation values and test results of shear strength of RC beams

Resource	Strengthening method	Specimen number	$P_{u,t}/kN$	$P_{u,cal}/kN$	$P_{u,cal}/P_{u,t}$
This study	Non-damaged strengthened beams	L-0	183.78	218.02	1.19
		CL-1	292.77	259.43	0.89
		CL-2	281.95	281.50	1.00
	Pre-damaged strengthened beams	CL-3	307.74	301.64	0.98
		SCL-1	264.19	281.50	1.06
		SCL-2	282.61	281.50	1.00
		SCL-3	217.45	217.40	1.00
	Pre-damaged strengthened beams under sustained load	XCL-1	249.38	242.53	0.97
		XCL-2	242.52	242.53	1.00
Literature [31]	Pre-damaged strengthened beams	J3 B	212	200.89	0.95
		J3 C	200	189.78	0.95
		J3 D	178	178.86	1.00
	Pre-damaged strengthened beams under sustained load	J6 C	166	175.64	1.06
		J6 D	160	171.20	1.07
Literature [32]	Pre-damaged strengthened beams under sustained load	$L_1Rd_2P_2A_{212}-70$	342.00	288.200	0.84
		$L_1Rd_2P_2A_{211}-70$	410.50	332.950	0.81
		$L_2Rd_2P_2A_{212}-70$	344.50	275.033	0.80
		$L_2Rd_2P_2A_{211}-70$	440.50	323.608	0.74

Notes: $P_{u,t}$ —Experimental value of the specimen; $P_{u,cal}$ —Calculated value of the specimen.

利作用, 而本计算模型中考虑的是持载加固的不利作用。各试件受剪承载力计算值与试验值之比的平均值为 0.954, 标准差为 0.106, 变异系数为 0.111。综上可知, 本模型的计算值与试验值吻合较好, 可为实际工程提供理论依据。

4 结论

(1) 对比试件和纤维织物增强高延性混凝土 (TRHDC) 加固试件均发生了剪压破坏, 仅有一根梁破坏时加固面层出现剥离现象。TRHDC 可有效限制斜裂缝的发展, 延缓箍筋屈服和刚度退化。

(2) 对于无初始受力钢筋混凝土 (RC) 梁, 采用 TRHDC 面层加固后梁的受剪承载力提高了 53%~67%, 其变形能力提高了 18%~54%, 且加固效果未完全随纤维织物层数的增大而提高, 与 TRHDC 面层的利用率有关。

(3) 对于受损 RC 梁, 采用 TRHDC 面层加固使其受剪承载力提高了 18%~54%, 变形能力提高了 12%~14%。原梁箍筋屈服以前, 原梁损伤程度对加固梁受剪性能的影响不明显; 原梁箍筋屈服之后, 加固梁的受剪承载力随原梁损伤程度的增大而降低。对于完全受损 (承载力下降至峰值荷载的 85% 以下) RC 梁, 采用两层纤维织物的 TRHDC 面层加固可有效修复其受剪承载力和变形能力。

(4) 在持续荷载作用下, 对受损 RC 梁进行

TRHDC 面层加固可使其受剪承载力提高 35.7% 和 32.0%, 变形能力降低 4.4% 和 10.9%, 且加固效果随持载水平的提高而降低。随着加固层滞后应变(应力)的增大, TRHDC 面层利用率和加固效果逐渐降低。

(5) 建立了考虑二次受力的 TRHDC 加固 RC 梁受剪承载力的计算公式, 计算值与试验结果吻合较好, 可为实际工程的加固与修复提供参考。

参考文献:

- [1] AWANI O, EL-MAADDAWY T, ISMAIL M. Fabric-reinforced matrix: A promising strengthening technique for concrete structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 132: 94-111.
- [2] BOURNAS D A. Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites with insulation materials: A new concept [J]. *Composite Part B: Engineering*, 2018, 148: 166-179.
- [3] 李赫, 徐世娘. 纤维编织网增强混凝土薄板力学性能的研究 [J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(4): 117-122.
- [4] LI He, XU Shilang. A study on thin concrete plate reinforced with textile [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(4): 117-122(in Chinese).
- [5] 徐世娘, 阎铁群. 低配网率纤维编织网增强混凝土轴拉力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2011, 28(5): 206-213.
- [6] XU Shilang, YAN Yiqun. Mechanical properties of textile

- reinforced concrete plate at low textile ratios [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(5): 206-213(in Chinese).
- [5] D'ANTINO T, PAPANICOLAOU C. Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites [J]. *Composite Part B: Engineering*, 2017, 127(15): 78-91.
- [6] KOUTAS L N, TETTA Z, BOURNAS D A, et al. Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: State-of-the-art review [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(1): 03118001.
- [7] TRIANTAFILLOU T C. Innovative textile-based composites for strengthening and seismic retrofitting of concrete and masonry structures [C]. 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Beijing: 2010.
- [8] ELSANADEDY H, ABBAS H, ALMUSALLAM T, et al. Organic versus inorganic matrix composites for bond-critical strengthening applications of RC structures-State-of-the-art review [J]. *Composite Part B: Engineering*, 2019, 174: 106947.
- [9] RAOOF S M, BOURNAS D A. TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 424-437.
- [10] 沈玲华, 王激扬, 徐世烺. 掺入短切纤维的纤维编织网增强混凝土薄板弯曲力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 98-107.
- SHEN Linghua, WANG Jiyang, XU Shilang. Experimental study on bending mechanical behavior of textile reinforced concrete thin-plates with short dispersed fibers [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(10): 98-107(in Chinese).
- [11] BARHUM R, MECHTCHERINE V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 92: 56-71.
- [12] 董志芳, 邓明科, 张聪. 纤维织物增强高延性混凝土单轴拉伸性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 13-25.
- DONG Zhifang, DENG Mingke, ZHANG Cong. Experimental investigation on uniaxial tension behavior of textile-reinforced highly ductile concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(10): 13-25(in Chinese).
- [13] 寇佳亮, 邓明科, 梁兴文. 延性纤维增强混凝土单轴拉伸性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2013, 43(1): 59-64.
- KOU Jialiang, DENG Mingke, LIANG Xingwen. Experimental study of uniaxial tensile properties of ductile fiber reinforced concrete [J]. *Building Structure*, 2013, 43(1): 59-64(in Chinese).
- [14] 邓明科, 刘海勃, 秦萌, 等. 高延性纤维混凝土抗压韧性试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 660-665.
- DENG Mingke, LIU Haibo, QIN Meng, et al. Experimental research on compressive toughness of the high ductile fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 47(5): 660-665(in Chinese).
- [15] DENG M K, DONG Z F, ZHANG C. Experimental investigation on tensile behavior of carbon textile reinforced mortar (TRM) added with short polyvinyl alcohol (PVA) fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117801.
- [16] DONG Z F, DENG M K, ZHANG C, et al. Tensile behavior of glass textile reinforced mortar (TRM) added with short PVA fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119897.
- [17] 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 and Building Materials*, 2016, 115: 424-437.
- [18] YANG X, GAO W Y, DAI J G, et al. Flexural strengthening of RC beams with CFRP grid-reinforced ECC matrix [J]. *Composite Structures*, 2018, 189: 9-26.
- [19] 滕锦光, 陈建飞, 史密斯 S T, 等. FRP 加固混凝土结构 [M]. 李荣, 滕锦光, 顾磊, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 100-101.
- TENG Jinguang, CHEN Jianfei, SMITH S T, et al. FRP strengthened RC structures [M]. Translated by LI Rong, TENG Jinguang, GU Lei. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 100-101(in Chinese).
- [20] 郑宇宙, 王文炜, 戴建国, 等. FRP-UHTCC 复合层抗剪增强 RC 梁受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019(8): 118-126.
- ZHENG Yuzhou, WANG Wenwei, DAI Jianguo, et al. Experimental study on mechanical performance of reinforced concrete beams shear-strengthened with FRP-UHTCC composite [J]. *Journal of Building Structures*, 2019(8): 118-126(in Chinese).
- [21] GUO R, REN Y, LI M Q, et al. Experimental study on flexural shear strengthening effect on low-strength RC beams by using FRP grid and ECC [J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111434.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB/T 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/T 50010—2010[S]. Beijing: China Architectures & Building Press, 2010(in Chinese).
- [23] 《高延性混凝土应用技术规程》编制组. 高延性混凝土应用技术规程: DBJ 61/T 112—2016[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016.
- Compilation Group of Technical Specification for Application of High Ductile Concrete. Technical Specification for Application of High Ductile Concrete: DBJ 61/T 112—2016. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2016.

- tion of High Ductile Concrete. Technical specification for application of high ductile concrete: DBJ 61/T 112-2016[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2016(in Chinese).
- [24] TAN K H, TONG K, TANG C Y. Direct strut-and-tie model for prestressed deep beams[J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(9): 1076-1084.
- [25] TANG C Y, TONG K, TAN K H. A direct method for deep beams with web reinforcement[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2003, 55(1): 53-63.
- [26] COOK R D, YOUNG W C. Advanced mechanics of materials[J]. Text-Interdisciplinary Journal for the Study of Discourse, 1954, 7(4): 435-436.
- [27] ZHANG N, TAN K H. Direct strut-and-tie model for single span and continuous deep beams[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(11): 2987-3001.
- [28] 邓明科, 马福栋, 李勃志, 等. 基于修正拉-压杆模型的型钢混凝土深梁受剪承载力分析[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 95-103. DENG Mingke, MA Fudong, LI Bozhi, et al. Analysis on shear capacity of SRC deep beams based on modified strut-and-tie model[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(12): 95-103(in Chinese).
- [29] DENG M K, MA F D, YE W, et al. Investigation of the shear strength of HDC deep beams based on a modified direct strut-and-tie model[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172: 340-348.
- [30] HEGGER J, VOSS S, PRISCO M D, et al. Textile reinforced concrete under biaxial loading[C]. 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. Varenna: Publikationsserver der RWTH Aachen University, 2004.
- [31] 张海霞, 孙闯, 黄妍. 考虑二次受力的内嵌BFRP筋加固混凝土T形梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(6): 56-63. ZHANG Haixia, SUN Chuang, HUANG Yan. Experimental study on shear behavior of RC T-beams strengthened with near-surface mounted BFRP bars considering effect of secondary loading[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(6): 56-63(in Chinese).
- [32] 刘君, 周朝阳, 宋朋. 持载混凝土梁端锚无黏结预应力U形碳纤维带受剪加固试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 96-104. LIU Jun, ZHOU Chaoyang, SONG Peng. Experimental research on shear strengthening of concrete beams under sustained load with end-anchored and unbonded prestressed CFRP U-strips[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(12): 96-104(in Chinese).