

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.134



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



CFRP 布加固无腹筋混凝土梁的抗剪作用试验研究

金浏, 蒋轩昂, 杜修力

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:对 12 根几何相似的 CFRP 加固无腹筋钢筋混凝土简支梁进行剪切破坏试验, 分析梁深、配纤率对梁剪切破坏模式与失效机制的影响, 获得了 CFRP 条带的全过程应变分布情况, 讨论梁深和 CFRP 配纤率对 CFRP 条带抗剪贡献的定量影响, 进而提出 CFRP 抗剪贡献的计算公式, 并与试验结果及规范计算结果等进行对比分析。结果表明, 梁深对 CFRP 布抗剪贡献影响明显, 即梁深增大时, CFRP 布名义抗剪强度显著降低。梁高由 300 mm 变化至 1 200 mm 时, CFRP 名义抗剪强度下降约 50%, 具有明显的尺寸效应; 不同尺寸下, CFRP 布名义抗剪强度均随着配纤率的增大而增大, 但名义抗剪强度增大幅度随着配纤率的增大而减小, 呈现出非线性增长趋势; 建立的 CFRP 抗剪承载力计算公式能较准确地预测不同配纤率及截面尺寸下的 CFRP 抗剪承载能力。

关键词:混凝土梁; 配纤率; 梁深; 剪切破坏; 抗剪贡献; 试验研究

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)01-0118-12

Experimental study on shear behavior of concrete beams without stirrups strengthened by CFRP sheet

JIN Liu, JIANG Xuanang, DU Xiuli

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: The shear failure mode and failure mechanism of 12 CFRP-strengthened concrete beams without stirrups were analyzed. The stress-strain curves of the CFRP beams in the whole process were obtained. The quantitative effects of structural size and CFRP ratio on the shear strength of CFRP are discussed. Furthermore, a formula for calculating the shear strength of CFRP is proposed and compared with the test results, the test results of others and the standard results in this work. It is found that the structural size has a significant influence on the shear strength of CFRP. The nominal shear strength of CFRP decreases significantly when the structural size increases. In addition, when the beam depth changes from 300 mm to 1 200 mm, the nominal shear strength of CFRP decreases by about 50%, which has an obvious size effect. Furthermore, under different cross-section sizes, the nominal shear strength of CFRP increases with the increase of CFRP ratio ρ_f , but with the increase of CFRP ratio ρ_f , the increase amplitude of nominal shear strength decreases, showing a

收稿日期: 2022-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51822801)

作者简介: 金浏(1985-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土结构防灾减灾研究, E-mail: kinglew2007@163.com。

杜修力(通信作者), 男, 博士, 中国工程院院士, E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn。

Received: 2022-07-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51822801)

Author brief: JIN Liu (1985-), professor, doctoral supervisor, main research interest: hazard mitigation of concrete structure, E-mail: kinglew2007@163.com.

DU Xiuli (corresponding author), PhD, academician of Chinese Academy of Engineering, E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn.

nonlinear growth trend. Finally, the established formula for calculating the shear capacity of CFRP could predict the shear capacity of CFRP under different CFRP ratio and section size scientifically.

Keywords: concrete beams; CFRP ratio; beam depth; shear failure; shear contribution; experimental investigation

钢筋混凝土结构的劣化主要是由于环境影响,如钢的腐蚀、疲劳荷载、温度变化和冻融循环等^[1-2]。全部更换或重建承重结构的成本较高,对混凝土结构外部进行加固是提高钢筋混凝土结构性能的有效方法之一^[3-4]。在实际工程中,剪切破坏往往比弯曲破坏更具破坏性,对加固梁剪切破坏的力学行为进行研究尤为必要^[5-6]。

关于CFRP加固混凝土梁,许多学者对CFRP的抗剪贡献进行了研究。CFRP的抗剪贡献,主要受配纤率、梁深、加固方式、粘贴角度等影响^[7-10]。学者们针对这些参数开展了研究工作,并讨论了CFRP加固梁的破坏机理。Bousselham^[11]对12根加固梁进行试验,研究配纤率、纵筋率和不同梁类型对钢筋混凝土梁受剪性能的影响。结果表明,CFRP在细长梁中的剪切增益高于深梁,且配纤率的增大使加固梁抗剪承载力获得了额外的增益,但不明显。Khalifa等^[12]对6根梁分别进行包裹方案和CFRP用量等因素的研究发现,相比U形包裹,只在梁侧面粘贴CFRP会带来更小的剪切贡献,且存在最佳的CFRP用量,超过此用量的加固效果尚不确定。Lu等^[13]认为FRP布对梁抗剪承载力的贡献很大程度上取决于FRP在极限状态下的应力(或应变)分布。不同的裂纹形状虽然会导致FRP内部应力分布的显著差异,但对应力分布因子的影响不显著。Leung等^[14]对不同尺寸的梁采用U形CFRP条带进行剪切加固,CFRP加固效果对构件尺寸非常敏感,梁高720 mm的构件比梁高180 mm的构件加固效果差得多。Oller等^[15]则认为混凝土、横向钢筋和CFRP布之间存在相互作用,且CFRP加固梁的极限剪力低于控制梁的极限剪力,这种差异被认为是内部横向加固造成的。

在试验、模拟及解析理论研究基础上,众多学者提出了一系列承载力计算公式^[16-17]。将CFRP的抗剪贡献类比于钢筋在混凝土结构中的贡献,有助于CFRP抗剪贡献的计算和理解^[18]。然而这也对CFRP抗剪研究提出了一些新挑战,如覆盖剪切裂缝的FRP布沿裂缝分布会产生可变的拉应力,且FRP加固不能保证混凝土和钢筋都能发挥其最大强度等^[19]。并且,钢筋和混凝土是较为成熟的建筑材料,但纤维复合材料种类多且性能相差较大,加固施工标准和方法等不尽明确,互相之间缺

少可比性^[20]。因此,仍然需要更多地关注FRP布抗剪加固钢筋混凝土构件的实用可靠的设计方法^[21]。

Sas等^[22]讨论了现有理论预测FRP对钢筋混凝土梁抗剪性能贡献的可靠性,不同模型的预测值与试验结果之间存在较大差异,预测公式在实际剪力设计方程中的应用值得怀疑。Chajes等^[23]认为外贴FRP与箍筋性能类似,并假定破坏前FRP和混凝土之间的界面理想粘结,提出了FRP抗剪计算经验公式。Chen等^[24]指出,在达到FRP拉断或FRP剥离破坏的极限状态时,沿剪切裂缝FRP中的应力分布不均匀,并基于桁架模型提出FRP抗剪计算模型。Monti等^[25]提出一种基于非数据回归的力学模型用于预测FRP加固钢筋混凝土梁的抗剪能力,该模型假设剪切裂纹沿梁轴均匀分布,将FRP片材中的有效应力定义为沿剪切裂纹长度的平均FRP应力场,模型被应用于意大利加固规范中。另外,中国、美国、日本、欧洲、加拿大等规范也给出了具体的公式。这些规范均认为CFRP的抗剪贡献及抗剪承载力与梁深、配纤率呈线性关系。但众多试验结果表明,规范公式过高地估计了CFRP部分的抗剪贡献^[26-27]。影响CFRP抗剪贡献的因素众多,各因素对其抗剪贡献的定量影响仍不明确,且混凝土的尺寸效应也会影响CFRP加固梁的力学性能。因此,需对CFRP加固梁尤其是大尺寸梁剪切破坏行为及CFRP抗剪贡献规律进行更深入的研究。

此外,由于混凝土材料的离散性和剪切机理的复杂性,CFRP抗剪加固无腹筋混凝土梁的剪切破坏机理尚不完全成熟^[28],而腹筋的加入使得CFRP加固钢筋混凝土梁剪切问题变得更复杂。纵观各国的混凝土加固结构设计规范,钢筋混凝土无腹筋加固梁的受剪承载力公式都是有腹筋加固梁受剪承载力公式的重要基础^[29]。因此,针对无腹筋加固梁剪切破坏机理及受剪承载力计算方法的研究仍然有重要的理论意义和工程需求^[30-31]。

笔者对12根几何相似的CFRP加固无腹筋钢筋混凝土简支梁进行两点加载剪切破坏试验,分析其剪切破坏模式与失效机制,得到了CFRP全过程应力-应变曲线。主要讨论结构尺寸和CFRP配纤率这两个因素对CFRP抗剪贡献的定量影响,进而提出CFRP抗剪承载力计算公式,并结合试验结果及规范计算结果等对其准确性和安全性进行对比分析。

1 试验与结果

1.1 试验概况

对 12 根几何相似的 CFRP 加固无腹筋钢筋混凝土简支梁进行两点加载剪切破坏试验,考虑尺寸效应(梁高为 300~1 200 mm)和 CFRP 配纤率(0.083 5%、0.167%、0.250 5%)这两个因素对 CFRP 布 U 形抗剪加固的影响。

试件梁的剪跨比 λ 为 1.5,纵筋率 ρ 为 2.5%。为防止应力集中,根据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[32],在梁两个底角处设置圆角半

径为 20 mm 的倒角。图 1 给出了试件的详细信息,包括几何形状、内部纵筋的布置及 CFRP 布抗剪加固形式。表 1 列出了混凝土试件的基本信息,其中,试件名称中的 0~3 表示不同的配纤率(0~0.250 5%); h 为梁的截面高度; h_0 为截面有效高度;配纤率 ρ_f 定义为^[33-34]

$$\rho_f = \frac{2n_f \omega_f t_f}{bs_f} \quad (1)$$

式中: ω_f 为 CFRP 条带的宽度; t_f 为纤维布的单层厚度; n_f 表示 CFRP 的层数; s_f 为 CFRP 带之间的间距(相邻两个带中心线之间的距离)。

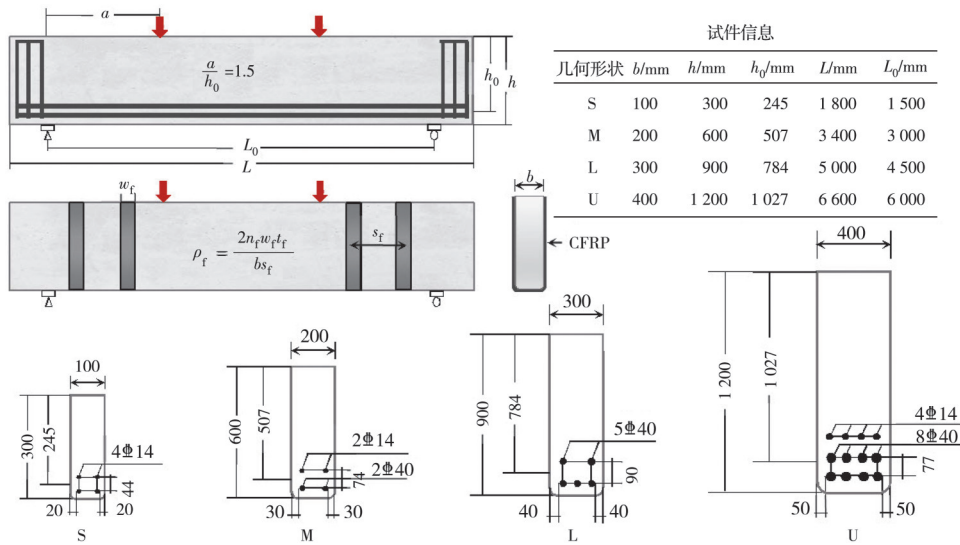


图 1 试件内部钢筋及外贴 CFRP 条带布置示意图

Fig. 1 The layout diagram of the internal reinforcement and external CFRP sheets of the specimen

表 1 试件几何参数

Table 1 Geometrical dimensions of tested specimens

| 试件 | $\rho_f/\%$ | h/mm | h_0/mm | ω_f/mm | s_f/mm | t_f/mm |
|-----|-------------|---------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| S-1 | 0.083 5 | 300 | 245 | 50 | 200 | 0.167 |
| S-2 | 0.167 | 300 | 245 | 100 | 200 | 0.167 |
| S-3 | 0.250 5 | 300 | 245 | 15 | 200 | 0.167 |
| M-1 | 0.083 5 | 600 | 507 | 100 | 240 | 0.334 |
| M-2 | 0.167 | 600 | 507 | 200 | 400 | 0.334 |
| M-3 | 0.250 5 | 600 | 507 | 300 | 400 | 0.334 |
| L-1 | 0.083 5 | 900 | 784 | 150 | 360 | 0.501 |
| L-2 | 0.167 | 900 | 784 | 300 | 600 | 0.501 |
| L-3 | 0.250 5 | 900 | 784 | 450 | 600 | 0.501 |
| U-1 | 0.083 5 | 1 200 | 1 027 | 200 | 480 | 0.668 |
| U-2 | 0.167 | 1 200 | 1 027 | 400 | 800 | 0.668 |
| U-3 | 0.250 5 | 1 200 | 1 027 | 600 | 800 | 0.668 |

注:梁的剪跨比 λ 为 1.5;配箍率 ρ_{sv} 为 0.0%;纵筋率 ρ 为 2.5%。

试验梁均为同一批浇筑。混凝土抗压强度和抗拉强度按《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[35]的规定进行测定,测得试验龄期立方体抗压平均强度 f_{cu} 为 49.2 MPa,圆柱体抗

压平均强度 f'_c 为 44.3 MPa,平均劈拉强度 f_t 为 2.77 MPa。

试验采用的 CFRP 布为卡本科技集团股份有限公司高强一级 300 g 碳纤维布(粘结胶为质量检测达标的配套环氧树脂胶),以聚丙烯腈基(PAN 基)12 K 小丝束碳纤维为原料,每平方米碳布重 300 g,单层厚度为 0.167 mm,按照《定向纤维增强聚合物复合材料拉伸性能试验方法》(GB/T 3354—2014)^[36]进行拉伸试验,得到 CFRP 的极限抗拉强度和弹性模量,如表 2 所示。

表 2 CFRP 布条带力学性能

Table 2 Mechanical properties of CFRP strips

| 密度 $\rho/$ (g/cm^3) | 单层厚度 t_f/mm | 抗拉强度 σ_t/MPa | 弹性模量 E/GPa | 极限 应变 ϵ |
|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------|
| 1.8 | 0.167 | 3 820 | 232 | 0.016 |

试验主要测量和记录的数据包括全过程的荷载、应变片的应变值、位移计读数及裂缝宽度。布置方案见图 2,试验装置如图 3 所示。

试件在 400 t 大型反力架上进行,采用 300 t 电

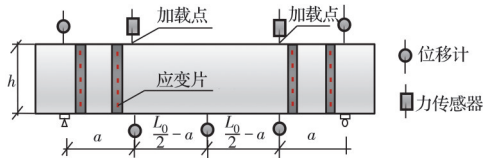


图 2 测点布置

Fig. 2 Layout of survey points



图 3 试验装置

Fig. 3 Test setup

动液压千斤顶加载。加载中采用千斤顶自锁和外加分压阀人工锁定的双重稳压措施。为防止加载点处发生局部受压破坏,在传感器下方设置具有足够刚度的钢垫片,支座处也设置相应的钢垫片。加载方式为力控制,加载速度为 1 kN/s,在加载后期,达到预估荷载的 75% 后,连续慢速地加载至构件破坏,以便获得完整的荷载-位移曲线。

1.2 试验结果

1.2.1 主要破坏模式

U形加固无腹筋钢筋混凝土梁的破坏模式如图 4 所示,不同尺寸和配纤率下,试件均发生明显的剪切破坏。从最终破坏模式上看,斜裂缝基本都是从支座处发展到加载点的贯穿斜裂缝,但某些加固梁如试件 U-2 和 U-3 的临界斜裂缝在加载点附近有些偏离。一方面,由于斜裂缝形成以前混凝土中的应力状态轨迹并不是单一的,混凝土也具有离散性;另一方面,由于斜裂缝是逐渐扩展的,支座附近开裂导致梁内传力路径略有变化,裂缝略有偏移。试件破坏时,还伴随着 CFRP 布的剥落,并能观察到 CFRP 的剥离发生在混凝土层,表明 CFRP 与树脂胶之间的粘结十分有效,是理想的粘贴加固。CFRP 大面积剥离发生在试件破坏前,斜裂缝变宽,位移突然增大,CFRP 崩开,加固梁随即破坏。CFRP 的剥落大部分位于斜裂缝以上,这与 El-Ghandour 等^[37]和 Li 等^[38]的结果一致。试验中后期,部分 CFRP 条带会发生端部的轻微剥离。实际上,CFRP 布大面积提前剥离是一种施工失败的表现,在实际工程中是不合格的。不同试件最终的破坏模式基本类似。

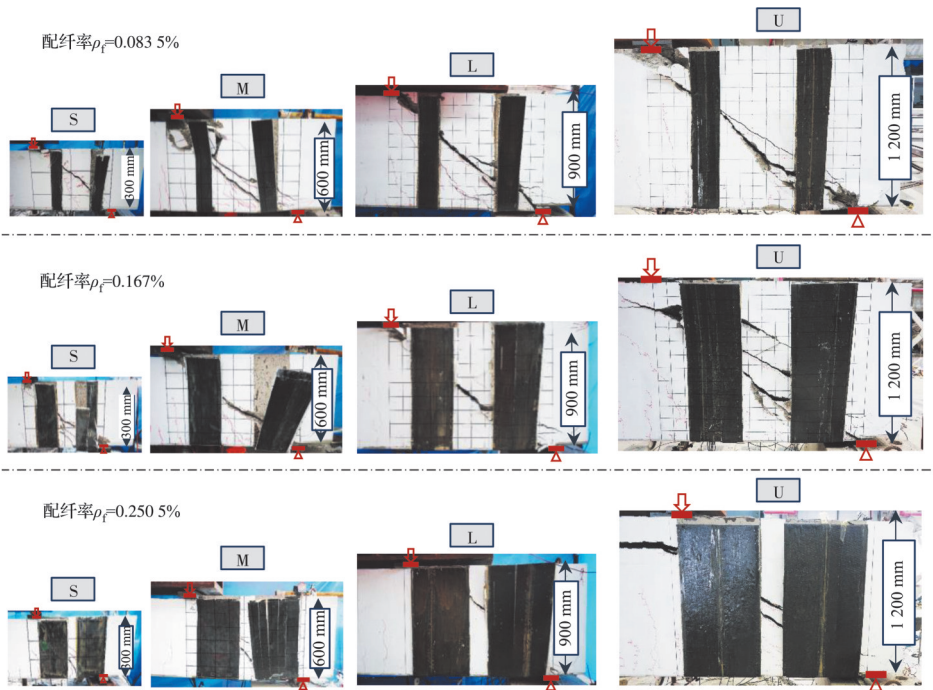


图 4 破坏模式

Fig. 4 Failure mode

1.2.2 荷载-位移曲线

图 5 为不同配纤率和结构尺寸下试件的剪力 V 随跨中位移 Δ 变化的曲线。表 3 列出了梁的主要试验结果,包括弯曲开裂荷载 P_{cr} 、初始斜裂缝荷载

V_{cr} 、试件达到破坏时的最大荷载 P_{ult} 、试件能承受的最大剪力 V_{ult} 、试件剪力达到峰值时的跨中位移 Δ 。另外,由于 CFRP 配纤率为 0.2505% 试件的加载区表面大部分被黑色的 CFRP 布覆盖,故初始斜裂缝

荷载没有给出具体数值。

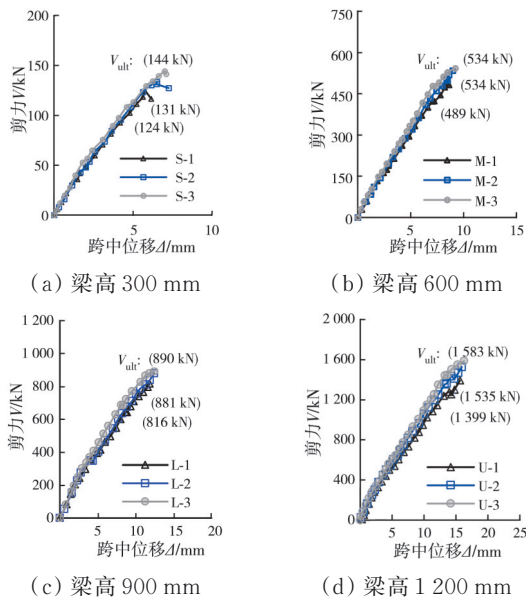


图 5 荷载-位移曲线

Fig. 5 $P-\Delta$ curves of the beams

表 3 主要试验结果

Table 3 Main experimental results

| 试件名称 | P_{cr}/kN | P_{ult}/kN | V_{cr}/kN | V_{ult}/kN | Δ/mm |
|------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| S-1 | 48 | 248.5 | 76 | 124.3 | 5.76 |
| S-2 | 54 | 262.0 | 90 | 131.0 | 6.53 |
| S-3 | 55 | 288.8 | | 144.4 | 7.02 |
| M-1 | 60 | 977.8 | 305 | 488.9 | 8.54 |
| M-2 | 75 | 1 068.8 | 330 | 534.4 | 8.98 |
| M-3 | 73 | 1 086.4 | | 543.2 | 9.21 |
| L-1 | 82 | 1 628.3 | 684 | 816.4 | 11.85 |
| L-2 | 86 | 1 779.0 | 695 | 880.5 | 12.43 |
| L-3 | 86 | 1 762.9 | | 890.2 | 12.48 |
| U-1 | 100 | 2 798.3 | 720 | 1 399.2 | 15.62 |
| U-2 | 110 | 3 070.0 | 1 040 | 1 535.0 | 16.03 |
| U-3 | 112 | 3 166.3 | | 1 583.2 | 16.26 |

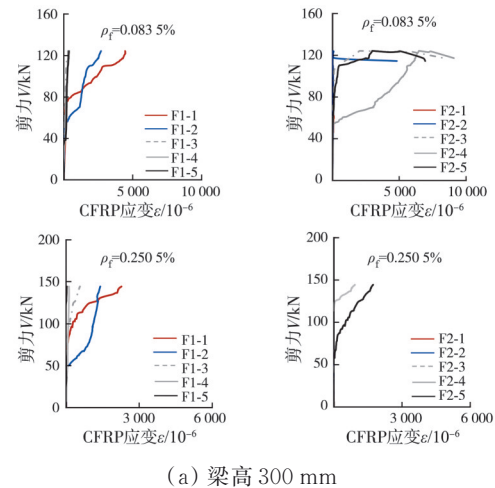
由图 5 和表 3 可知,CFRP 配筋率的增大,会增大加固梁的抗剪承载力,提高加固梁的极限跨中挠度,延长斜裂缝出现时间。但不同的配筋率加固效率不尽相同,以梁高为 1 200 mm 的加固梁为例,配筋率为 0.167% 的加固梁相较配筋率为 0.083 5% 的梁,承载力提高约 10%,而配筋率为 0.250 5% 的加固梁相较配筋率为 0.167% 的梁,承载力提高约 3%,表明配筋率的增加并不能使剪切增益线性增加,加固效率随配筋率的增大呈现下降趋势,这与 Khalifa 等^[12]的研究一致。另外,由图 5 可观察到,试验加载过程中出现的 CFRP 的局部剥离现象对荷载-位移曲线的影响较小,这是由于试验中 CFRP 大面积剥离基本发生在试件破坏前,而试验前中期由于斜裂缝变宽,CFRP 边缘与斜裂缝相交处产生轻

微剥离,由于大部分 CFRP 还能持续限制斜裂缝的开展,所以对加固梁的性能不会产生明显影响,这与 Leung 等^[14]的试验结果一致。

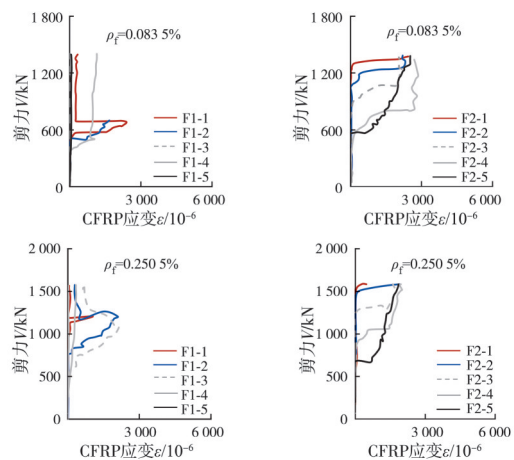
1.2.3 CFRP 应变分布

沿斜裂缝分布的 CFRP 条带应变是关注的重点。为清晰对比,图 6 为以梁高 300、1 200 mm 的加固梁为例,给出了不同配筋率(0.083 5% 和 0.250 5%)下试件中 CFRP 条带上各测点的应变与剪力间的变化关系。其中,F1 表示近加载点端的 CFRP 条带,F2 表示近支座端的 CFRP 条带。F1、F2 后的数字 1~5 分别表示 CFRP 条带上从上至下均匀布置的 5 个测点。整体来看,加载至极限荷载 30%~40% 之前,CFRP 条带应变值较小,说明此时 CFRP 基本没有参与抗剪,混凝土起主要作用。斜向裂缝开展后 CFRP 应变迅速发展。

由图 6(a)可知,梁高 300 mm 加固梁中 CFRP 的应变基本都呈现单一增长趋势,在试验过程中观察



(a) 梁高 300 mm



(b) 梁高 1 200 mm

图 6 CFRP 条带各测点应变与加固梁剪力的变化关系

Fig. 6 The relationship between the strain of CFRP strip at each measuring point and the shear force of CFRP-strengthened beams

到CFRP条带粘贴良好。而在配纤率为0.083 5%的加固梁中,加固梁达到极限荷载后,靠近支座端的CFRP条带的应变还在持续增长,这是由于CFRP条带在梁破坏后依旧极为短暂地附着在混凝土上,随后立即剥落失效。由图6(b)观察到,相比于图6(a)中的小尺寸梁,梁高1 200 mm的大尺寸梁由于部分CFRP条带局部剥离,剥离处的CFRP应变迅速降低,退出工作,而相比大配纤率($\rho_f=0.250 5\%$)的梁,小配纤率($\rho_f=0.083 5\%$)的梁中部分CFRP局部剥离的现象更为明显,这是由于大配纤率下CFRP在混凝土表面的粘贴面积更充分,不容易出现提前大面积剥离的现象。

图7所示为不同结构尺寸试件在不同荷载水平下最大应变所在的CFRP条带中应变沿梁高的变化。为方便比较,加固梁配纤率均为0.167%。可以发现,最大应变所在的CFRP条带靠近加载点端时,应变最大值靠近梁的上部,而靠近支座端时,CFRP的最大应变出现在梁的中下部,说明CFRP条带的最大应变与斜裂缝的位置相关,基本都在斜裂缝与条带相交处。

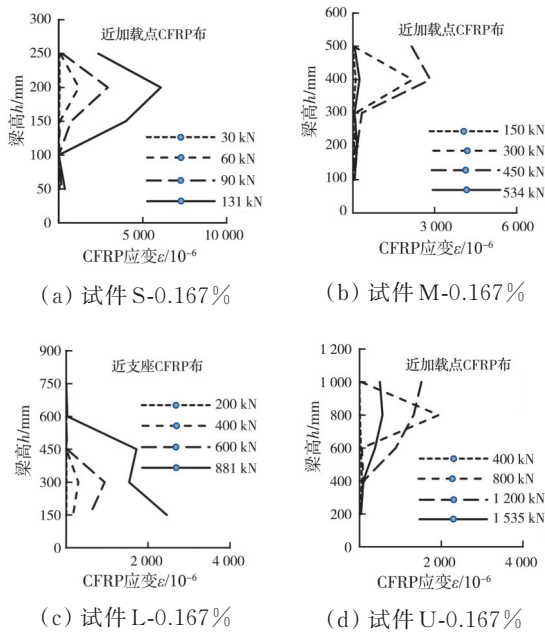


图 7 CFRP各测点最大应变沿梁高变化

Fig. 7 Distribution of the maximum strain on CFRP strip along the beam depth

1.2.4 CFRP抗剪贡献

现有的CFRP布抗剪贡献预测模型大多采用叠加法,即CFRP布加固混凝土梁的抗剪强度为混凝土贡献和FRP布贡献两部分之和,如文献[22-24, 26-27]认为钢筋混凝土的贡献与未加固混凝土梁的抗剪强度相同,在普通混凝土构件计算模式的基础上,增加外贴材料对抗剪承载力的贡献,即

$$V_u = V_c + V_f \tag{2}$$

式中: V_u 为加固混凝土梁的总抗剪承载力; V_c 和 V_f 分别为混凝土和CFRP的抗剪贡献值。

大多数研究^[16-18]都把CFRP的抗剪作用类比为箍筋,采用桁架模型计算CFRP的抗剪贡献。

$$V_f = \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} = E_f A_{fi} \sum_{i=1}^n \epsilon_{fi} \tag{3}$$

$$A_{fi} = 2n_f t_f s_f \tag{4}$$

式中: n 为条带数; σ_{fi} 为第*i*根条带上的应力; ϵ_{fi} 为第*i*根条带的应变; E_f 为碳纤维布的弹性模量; A_{fi} 为第*i*根条带碳纤维布的截面面积; t_f 为纤维布的厚度; n_f 为CFRP的层数; s_f 为CFRP条带之间的中心间距。

式(3)中,弹性模量 E_f 和每根条带的截面面积 A_{fi} 固定,需确定的是 ϵ_{fi} ,即每根条带的应变。一般文献的做法是取每根条带上的应变最大值,或取斜裂缝经过处CFRP的应变。但在试验过程中,由于CFRP的剥离,CFRP条带的应变可能不会同时达到其能发挥的最大值。若将各个条带上的应变最大值进行叠加,会在一定程度上高估CFRP的抗剪贡献。笔者比较同一时刻分别来自各条带的应变之和,取最大值,将这个值定义为构件中碳纤维材料的有效应变 ϵ_{fe} 。

$$\epsilon_{fe} = \max \left(\sum_{i=1}^n \epsilon_{fi} \right) \tag{5}$$

式中: ϵ_{fi} 为同一时刻第*i*根条带的应变。

因此,CFRP抗剪贡献可以表示为

$$V_f = E_f A_{fi} \sum_{i=1}^n \epsilon_{fi} = E_f \epsilon_{fe} A_f \tag{6}$$

如图8所示,以试件S-1为例,给出了混凝土和CFRP部分的抗剪贡献,其中混凝土的抗剪贡献 V_c 由试验测得的总抗剪承载力减去CFRP的贡献得到。

$$V_c = V_{test} - V_f \tag{7}$$

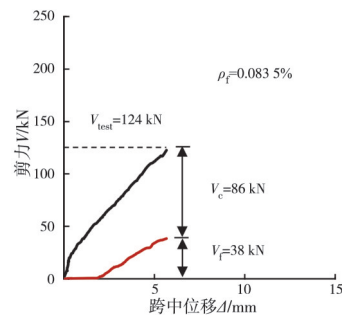


图 8 抗剪贡献

Fig. 8 Shear contribution

表4给出了各条带应变最大值的具体数值,以及各组分的抗剪贡献。其中 ϵ_{max1} 为近加载点端条带最大应变; ϵ_{max2} 为近支座端条带最大应变, ϵ_{fe} 为构件

中碳纤维材料的有效应变。可以发现,CFRP的有效应变比各条带上实测的应变值稍大,但小于两根条带上最大值总和,说明CFRP条带的应变不会同时达到其能发挥的最大值,与上述分析结论一致。

表 4 CFRP 应变和组分抗剪贡献
Table 4 CFRP strains and shear contribution of each component

| 试件名称 | $\epsilon_{max1}/10^{-6}$ | $\epsilon_{max2}/10^{-6}$ | $\epsilon_{fc}/10^{-6}$ | V_{test}/kN | V_f/kN | V_c/kN |
|------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|----------|----------|
| S-1 | 4 445 | 9 088 | 10 733 | 124 | 38 | 86 |
| S-2 | 6 079 | 4 832 | 7 485 | 131 | 53 | 78 |
| S-3 | 2 273 | 1 867 | 4 048 | 144 | 53 | 91 |
| M-1 | 3 660 | 5 734 | 6 779 | 489 | 96 | 393 |
| M-2 | 2 840 | 2 777 | 4 590 | 534 | 130 | 404 |
| M-3 | 2 785 | 1 760 | 3 672 | 543 | 156 | 387 |
| L-1 | 3 143 | 3 964 | 4 645 | 816 | 148 | 668 |
| L-2 | 4 201 | 2 577 | 4 472 | 881 | 285 | 596 |
| L-3 | 2 364 | 1 829 | 3 002 | 890 | 287 | 603 |
| U-1 | 2 390 | 2 942 | 4 360 | 1 399 | 247 | 1 152 |
| U-2 | 2 153 | 2 225 | 3 707 | 1 535 | 420 | 1 115 |
| U-3 | 2 179 | 2 128 | 2 719 | 1 583 | 482 | 1 101 |

2 CFRP 名义抗剪强度及影响因素

通常可以采用归一化的表征方法来研究各影响因素对CFRP抗剪贡献的影响^[13]。将CFRP名义抗剪强度 τ_f 定义为

$$\tau_f = V_f / (bh_0) \quad (8)$$

式中: V_f 为CFRP抗剪承载力; b 为加固梁的截面宽度; h_0 为梁的截面有效高度。

图9为试验获得的不同配纤率下CFRP名义抗剪强度 τ_f 与梁高 h 关系图。由图9可见:3组配纤率下,CFRP名义抗剪强度 τ_f 随梁高 h 的增大均显著降低,当梁高从300 mm变化至1 200 mm时,CFRP名义抗剪强度下降约50%,表现出明显的尺寸效应。因此,CFRP名义抗剪强度 τ_f 应是梁高 h 的函数。

图10为试验获得的不同截面尺寸下CFRP名义抗剪强度 τ_f 与配纤率 ρ_f 关系图。不同尺寸下,

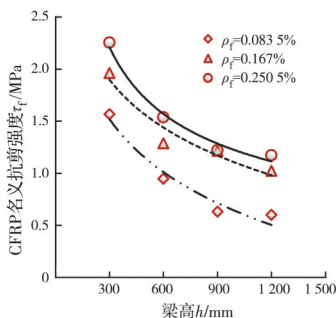


图 9 CFRP 名义抗剪强度与梁高 h 关系

Fig. 9 The relationship between the nominal shear strength of CFRP and beam depth h

CFRP 名义抗剪强度 τ_f 均随着配纤率的增大而增大,但随着配纤率 ρ_f 的增大, τ_f 增大幅度减小,而非线性增长。这与Bousselham^[11]的试验结果一致。

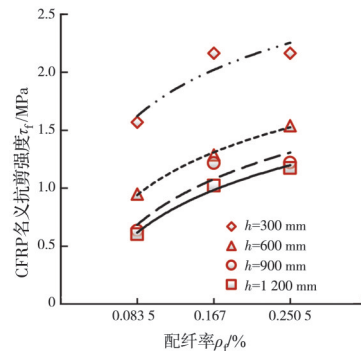


图 10 CFRP 名义抗剪强度与配纤率 ρ_f 关系

Fig. 10 The relationship between the nominal shear strength of CFRP and CFRP ratio ρ_f

根据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[32],CFRP条带承担的抗剪贡献 V_f 计算公式为

$$V_f = \varphi \frac{f_t A_f h_f}{s_f} \quad (9)$$

式中: φ 为抗剪强度折减系数; f_t 为受剪加固采用的纤维复合材料抗拉强度设计值(N/mm²),根据纤维复合材料品种分别规定的抗拉强度设计值(表5)乘调整系数0.56确定; A_f 为纤维材料的截面面积; h_f 为梁的有效高度; s_f 为纤维布之间的中心间距。

表 5 碳纤维复合材料抗拉强度设计值

Table 5 Design value of tensile strength of CFRP

| 结构类别 | 单向织物(布)/MPa | | | 条形板/MPa | |
|------|-------------|---------|----------|---------|---------|
| | 高强 I 级 | 高强 II 级 | 高强 III 级 | 高强 I 级 | 高强 II 级 |
| 重要构件 | 1 600 | 1 400 | | 1 150 | 1 000 |
| 一般构件 | 2 300 | 2 000 | 1 200 | 1 600 | 1 400 |

因此,根据式(1)、式(8)和式(9),中国规范^[32]中关于CFRP名义抗剪强度 τ_f 的计算公式为

$$\tau_f = \varphi f_t \rho_f \quad (10)$$

由式(10)可知,通过规范计算获得的CFRP名义抗剪强度 τ_f 与梁高 h 无关。从试验结果来看,这不尽合理,式(10)会明显高估大尺寸梁中CFRP的抗剪贡献。且从式(10)可知,规范认为 V_f 和 τ_f 随配纤率增大而线性增大。这种线性增长趋势也将高估大配纤率下梁中CFRP条带的抗剪贡献。

3 CFRP 抗剪贡献公式与验证

实际上,CFRP布的抗剪贡献应与梁深、FRP层数(配纤率)、胶粘材料性质、FRP包裹形式及粘贴角度等众多因素密切关联,仅针对梁深和配纤率两个主要因素进行讨论和分析。

综合梁深以及配纤率的影响规律,提出CFRP

布名义抗剪强度 τ_{fm} , 表达式为

$$\tau_{fm} = kf_i \rho_f^n \beta(h) \quad (11)$$

式中: k 为强度修正系数; f_i 为纤维抗拉强度; ρ_f 为配纤率; 指数 n 为待定参数 ($n < 1$), 反映配纤率的非线性贡献; $\beta(h)$ 为结构尺寸影响系数, 反映结构尺寸 (梁深 h) 对 τ_{fm} 的定量影响。

3.1 结构尺寸影响系数 $\beta(h)$

将试验中 300 mm 梁高的加固梁 CFRP 名义抗剪强度作为基准, 不同梁高的加固梁对应的 CFRP 名义抗剪强度分别除以最小梁高的 CFRP 抗剪强度, 可得到结构尺寸影响系数 $\beta(h)$ 随梁高的变化, 如图 11 所示, 图中的点为试验值。通过对数据点进行拟合, 结合图 11 中的最终拟合效果对比, 最终确定结构尺寸影响系数 $\beta(h)$ 的表达式为

$$\beta(h) = \begin{cases} 1, & h < 300 \text{ mm} \\ \frac{600}{300 + h}, & h \geq 300 \text{ mm} \end{cases} \quad (12)$$

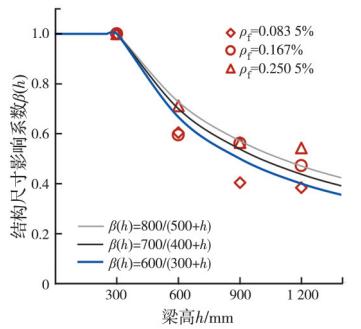


图 11 结构尺寸影响系数 $\beta(h)$ 的确定

Fig. 11 The determination of the $\beta(h)$ influenced by the structure size

3.2 配纤率影响系数 ρ_f^n

结合式 (11) 和式 (12) 得

$$\tau_{f-test} / \beta(h) = kf_i \rho_f^n \beta \quad (13)$$

为确定式 (13) 中的配纤率影响系数 n 与强度修正系数 k , 以 $\tau_{f-test} / \beta(h)$ 为纵坐标, ρ_f 为横坐标, 绘制出数据点, 如图 12 所示。通过多次拟合对比与分析, 发现取值 $n=0.5$ 、 $k=50$ 时拟合效果最佳。

考虑结构尺寸及配纤率影响的 CFRP 抗剪贡献 (抗剪强度 τ_{fm} 和抗剪承载力 V_{fm}) 为

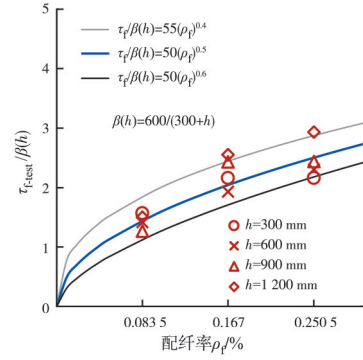
$$\tau_{fm} = kf_i \rho_f^{0.5} \frac{600}{300 + h} \quad (14)$$

$$V_{fm} = kf_i \rho_f^{0.5} \frac{600}{300 + h} bh_0 \quad (15)$$

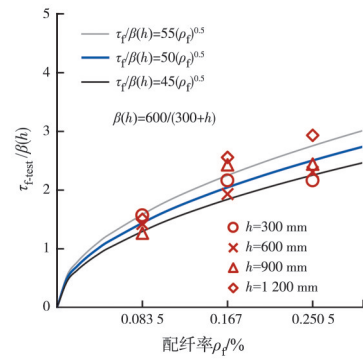
式中: k 为强度修正系数, 建议取 50。

3.3 公式验证

为验证公式的准确性, 将试验结果分别与《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[32] 计算结果和建立的 CFRP 抗剪承载力公式 (式 (15)) 计算



(a) 配纤率影响系数 n 的确定



(b) 强度修正系数 k 的确定

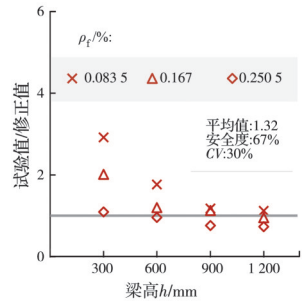
图 12 配纤率影响系数 n 与强度修正系数 k 的确定

Fig. 12 The determination of the n influenced by the CFRP ratio and the strength correction coefficient k

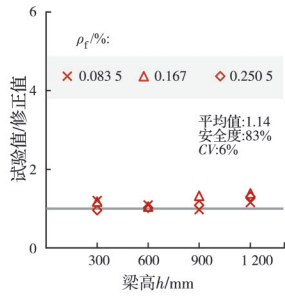
结果进行对比。如图 13 所示, 试验值与规范计算值、公式计算值的比值越小, 表明计算值越安全, 反之则越不安全。比值为 1.0 时表明试验值等于计算值, 即计算精准。

如图 13 所示, 分别将试验值与《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[32] 计算值和所提公式计算值进行对比。其中, 安全度表示比值大于 1 的样本数占总数的百分比; 平均值为总样本的平均值; 变异系数 (CV) 表示样本的离散程度。由图 13(a) 可以看出, 结构尺寸越大, 试验值与规范值的比值越靠近 1.0, 甚至小于 1.0, 说明规范的安全储备不断降低, 且随着配纤率的增大, 规范有高估 CFRP 抗剪贡献的趋势。试验值与公式计算值的对比如图 13(b) 所示, 结果表明试验值与修正后的计算值的比值基本稳定在 1.0 附近, 变异系数大大降低, 且在大尺寸及大配纤率情况下, 修正公式仍可以保持一定的安全度, 说明建立的理论公式能很好地预测试验中不同结构尺寸及配纤率下 CFRP 的抗剪贡献。

另外, 为更好地验证公式的适用性与准确性, 搜集了 50 余组 CFRP 加固无腹筋梁剪切试验数据, 如 Mhanna 等^[16] 开展了梁高为 250~350 mm、配纤率为 0.126%~0.189% 的 CFRP 加固梁剪切破坏试验; Boussetlam 等^[11] 开展了梁高为 220~605 mm、配



(a) 试验值与规范计算值对比



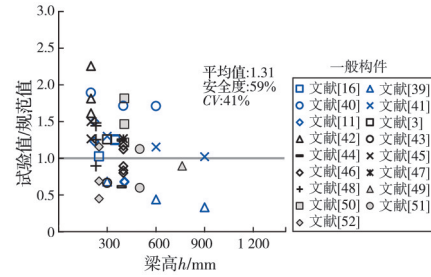
(b) 试验值与公式计算值对比

图 13 计算公式验证

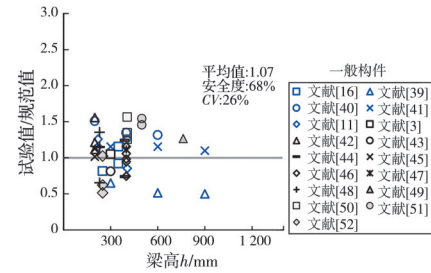
Fig. 13 Verification of the proposed equation

纤率为 0.14%~0.28% 的 CFRP 加固梁剪切破坏试验;周培远^[39]对梁高为 300~900 mm、配纤率为 0.049 3% 的 CFRP 加固梁进行受剪试验。另外,还有 Godat 等^[40]、罗若帆^[41]、Chalioris 等^[42]、Shomali 等^[43]、Karzad 等^[44]、Laftah Abass^[45]、Chen 等^[46]、Liu 等^[47]、Keskin 等^[48]、Belarbi 等^[49]、Mofidi 等^[50]、Bukhari 等^[51]和 Aksoylu 等^[52]均对 CFRP 加固梁剪切破坏力学性能进行了试验研究。将以上试验结果与《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[32]的计算值和所提公式计算值进行对比,如图 14 和图 15 所示。在对 CFRP 抗拉强度设计值取值时,分别取表 5 中的重要构件和一般构件进行对比分析。

图 14 为一般构件情况下,各文献试验值与公式计算值、规范计算值的对比情况;图 15 为重要构件情况下,各文献试验值与公式计算值、规范计算值的对比情况。纵坐标大于 1.0,表明规范预测结果安全(过于安全在实际工程中也会造成材料的浪费);纵坐标值小于 1.0,表明规范预测值偏大,CFRP 实际的抗剪值达不到规范的计算值。由图 14(a)可知,图中有 41% 的值在 1.0 以下,表明有 41% 的值在规范预测下都偏大,即不安全。尤其是随着梁高的增加,安全冗余度不断降低。这主要是由于,尺寸偏大时,FRP 条带的加固效率有所降低,而规范没有考虑将尺寸效应作为影响因素,所以随着尺寸增加规范的安全性将下降。另外,由于规范公式考虑因素的局限性,以及试验中实际的环境、工艺等都会对结果造成一定的影响,所以小尺寸下仍然



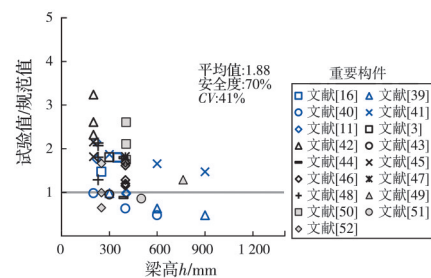
(a) 试验值与规范计算值对比



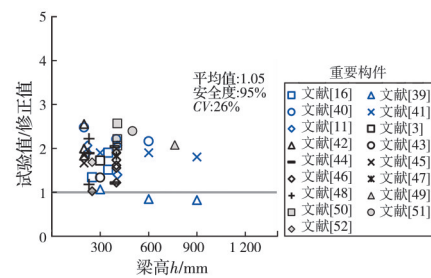
(b) 试验值与公式计算值对比

图 14 计算公式与其他试验结果对比(一般构件)

Fig. 14 Verification of the proposed equation with other result (general component)



(a) 试验值与规范计算值对比



(b) 试验值与公式计算值对比

图 15 计算公式与其他试验结果对比(重要构件)

Fig. 15 Verification of the proposed equation with other result (essential component)

有部分试验值在规范预测值之下。由图 14(b)可以看出,试验值与公式修正值的比值随梁高变化。修正后的公式在整体安全度上有了一定的提升,尤其是大大改善了数据离散程度,修正后的公式大大降低了数据样本的变异系数,说明修正后的计算值对试验结果的预测更加稳定。同样,由图 15 可知,取重要构件下 CFRP 抗拉强度设计值计算得到样本数

据与规范值、修正值对比的计算结果,与一般构件的计算结果相比,数据整体平均值均上升。安全度由修正前的 70% 提高至 95%,且修正后的变异系数由 41% 改善至 26%。由此可见,所建理论公式能更科学地反映各因素对 CFRP 抗剪能力的定量影响,较为科学地预测实际工程中 CFRP 的抗剪贡献。

4 结论

开展了 12 根几何相似的 CFRP 加固无腹筋钢筋混凝土简支梁两点加载剪切破坏试验,分析了其剪切破坏模式与失效机制,获得了试验中 CFRP 条带全过程应变分布情况。主要讨论了梁深和 CFRP 配纤率对 CFRP 抗剪贡献的定量影响。进而提出了 CFRP 抗剪承载力计算公式,并与试验结果及规范结果等进行对比分析。主要结论如下:

1) 试验中,不同配纤率及不同尺寸下 CFRP 包裹混凝土梁均发生明显的剪切破坏,并伴随 CFRP 的剥落,其中 CFRP 的剥落发生在混凝土层。

2) 梁深对 CFRP 布抗剪贡献影响明显,表现为梁深增大时,CFRP 布名义抗剪强度显著降低,当梁高由 300 mm 增加至 1 200 mm 时,CFRP 名义抗剪强度下降约 50%,具有明显的尺寸效应。

3) 不同梁深下,CFRP 布名义抗剪强度均随配纤率 ρ_f 的增大而增大,但随配纤率 ρ_f 的增大,名义抗剪强度增大幅度减小,呈非线性增长趋势。

4) 相较于《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013),提出的 CFRP 抗剪贡献计算公式与试验结果吻合更佳,能更科学地反映 CFRP 的抗剪贡献。

另外,仅讨论了 CFRP 配纤率对不同结构尺寸无腹筋加固梁剪切破坏力学行为及 CFRP 抗剪贡献的影响规律,对于剪跨比、CFRP 粘贴方式等影响下的加固梁,或力学行为更为复杂的含腹筋梁,还需进行更为深入的研究。

参考文献

- [1] FRHAAN W K M, HABUBAKAR B, HILAL N, et al. CFRP for strengthening and repairing reinforced concrete: A review [J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6(2): 1-13.
- [2] AL-ROUSAN R. Impact of elevated temperature on the shear behavior of strengthened RC beams [J]. *Magazine of Civil Engineering*, 2022, 110(2): 11002.
- [3] TRAN C T N, NGUYEN X H, NGUYEN H C, et al. Shear performance of short-span FRP-reinforced concrete beams strengthened with CFRP and TRC [J]. *Engineering Structures*, 2021, 242: 112548.
- [4] ARY M I, KANG T H K. Shear-strengthening of reinforced & prestressed concrete beams using FRP: Part I—Review of previous research [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2012, 6(1): 41-47.
- [5] YU F, GUO S, WANG S, et al. Experimental study on high pre-cracked RC beams shear-strengthened with CFRP strips [J]. *Composite Structures*, 2019, 225: 111163.
- [6] TETTA Z C, KOUTAS L N, BOURNAS D A. Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 77: 338-348.
- [7] 王作虎, 刘晶波, 杜修力. FRP 加固钢筋混凝土结构尺寸效应的研究进展 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2011, 28(3): 49-55.
WANG Z H, LIU J B, DU X L. Research progress of size effect on reinforced concrete structures strengthened with FRP [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2011, 28(3): 49-55. (in Chinese)
- [8] ABDEL-JABER M. Influence of externally bonded CFRP on the shear behavior of strengthened and rehabilitated reinforced concrete T-beams containing shear stirrups [J]. *Fibers*, 2021, 9(12): 87.
- [9] HAWILEH R A, SALEH R B, SAQAN E I, et al. Contribution of longitudinal NSM-CFRP bars on the shear strength of RC beams with varying depths and concrete strengths [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2022, 26(3): 87.
- [10] VO-LE D, TRAN D T, PHAM T M, et al. Re-evaluation of shear contribution of CFRP and GFRP sheets in concrete beams post-tensioned with unbonded tendons [J]. *Engineering Structures*, 2022, 259: 114173.
- [11] BOUSSELHAM A. Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2006, 37(1): 37-46.
- [12] KHALIFA A, NANNI A. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2000, 22(3): 165-174.
- [13] LU X Z, CHEN J F, YE L P, et al. RC beams shear-strengthened with FRP: Stress distributions in the FRP reinforcement [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(4): 1544-1554.
- [14] LEUNG C K Y, CHEN Z F, LEE S, et al. Effect of size on the failure of geometrically similar concrete beams strengthened in shear with FRP strips [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(5): 487-496.
- [15] OLLER E, PUJOL M, MARÍ A. Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 164: 235-248.
- [16] MHANNA H H, HAWILEH R A, ABDALLA J A.

- Comparative analysis of design guidelines for FRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 37: 359-366.
- [17] HADHOOD A, AGAMY M H, ABDELSALAM M M, et al. Shear strengthening of hybrid externally-bonded mechanically-fastened concrete beams using short CFRP strips: Experiments and theoretical evaluation [J]. *Engineering Structures*, 2019, 201: 109795.
- [18] 曹双寅, 潘建伍, 邱洪兴. 外贴纤维加固梁抗剪承载力计算方法分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(5): 766-770.
CAO S Y, PAN J W, QIU H X. Analysis of shear strength models for beams strengthened by externally bonded FRP composites [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2002, 32(5): 766-770. (in Chinese)
- [19] CHEN C, CHENG L J. Single crack - based model for FRP shear-strengthened RC beams [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(4): 04019030.
- [20] SPINELLA N. Modeling of shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP [J]. *Composite Structures*, 2019, 215: 351-364.
- [21] BUI L V H, STITMANNATHUM B. Prediction of shear contribution for the FRP strengthening systems in RC beams: A simple bonding-based approach [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2020, 18 (10): 600-617.
- [22] SAS G, TÄLJSTEN B, BARROS J, et al. Are available models reliable for predicting the FRP contribution to the shear resistance of RC beams? [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(6): 514-534.
- [23] CHAJES M J, JANUSZKA T F, MERTZ D R, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics [J]. *ACI Structural Journal*, 1995, 92(3): 295-303.
- [24] CHEN J F, TENG J G. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(1): 27-41.
- [25] MONTI G, LIOTTA M A. Tests and design equations for FRP-strengthening in shear [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(4): 799-809.
- [26] 胡铖玥. 基于试验数据库和随机森林算法的外贴FRP加固梁条带抗剪贡献研究[D]. 广东 深圳: 深圳大学, 2018.
HU C Y. Study on the EB-FRP shear strengthened rc beams based on the database and the arithmetic of random forests [D]. Shenzhen, Guangdong: Shenzhen University, 2018. (in Chinese)
- [27] ABUODEH O R, ABDALLA J A, HAWILEH R A. Prediction of shear strength and behavior of RC beams strengthened with externally bonded FRP sheets using machine learning techniques [J]. *Composite Structures*, 2020, 234: 111698.
- [28] KOTYNIA R, OLLER E, MARÍ A, et al. Efficiency of shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP materials: State-of-the-art in the experimental tests [J]. *Composite Structures*, 2021, 267: 113891.
- [29] 陈宏拓, 蒋骋昊, 陶慕轩, 等. 基于美德联合剪切试验数据库评价中国规范钢筋混凝土无腹筋梁受剪承载力公式[J]. *建筑结构*, 2022, 52(Sup1): 1403-1414.
CHEN H T, JIANG C H, TAO M X, et al. Evaluating the shear strength formula for reinforced concrete beams without stirrups in Chinese design code based on ACI-DaFStb shear test database [J]. *Building Structure*, 2022, 52(Sup1): 1403-1414. (in Chinese)
- [30] REINECK K H, BENTZ E, FITIK B, et al. ACI-DaFStb databases for shear tests on slender reinforced concrete beams with stirrups [J]. *ACI Structural Journal*, 2014, 111(5): 1147-1156.
- [31] 魏巍巍, 贡金鑫, 车轶. 无腹筋钢筋混凝土受弯构件基于修正压力场理论的受剪计算[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(8): 79-85.
WEI W W, GONG J X, CHE Y. Shear strength of reinforced concrete members without stirrups based on modified compression field theory [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(8): 79-85. (in Chinese)
- [32] 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [33] GODAT A, LABOSSIERE P, NEALE K W. Numerical investigation of the parameters influencing the behaviour of FRP shear-strengthened beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 32: 90-98.
- [34] 金浏, 夏海, 蒋轩昂, 等. 剪跨比对CFRP加固无腹筋混凝土梁剪切破坏及尺寸效应的影响研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 50-59, 85.
JIN L, XIA H, JIANG X A, et al. Effect of shear-span ratio on shear failure and size effect of concrete beams without web reinforcement strengthened by CFRP [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 50-59, 85. (in Chinese)
- [35] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [36] 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法: GB/T 3354—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Test method for tensile properties of orientation fiber reinforced polymer matrix composite materials: GB/T 3354—2014 [S]. Beijing: China Standard Press, 2014.

- (in Chinese)
- [37] EL-GHANDOUR A A. Experimental and analytical investigation of CFRP flexural and shear strengthening efficiencies of RC beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(3): 1419-1429.
- [38] LI A, ASSIH J, DELMAS Y. Shear strengthening of RC beams with externally bonded CFRP sheets [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(4): 374-380.
- [39] 周培远. CFRP U型箍抗剪加固大剪跨比钢筋混凝土梁尺寸效应试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
ZHOU P Y. Experimental study on size effect of large-shear-span-ratio RC beams shear-strengthen with CFRP U-strips [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [40] GODAT A, QU Z, LU X Z, et al. Size effects for reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP strips [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(3): 260-271.
- [41] 罗若帆. CFRP封闭缠绕抗剪加固小剪跨比RC梁尺寸效应试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
LUO R F. Experimental study on size effect of small shear span ratio RC beams shear strengthened with CFRP wraps [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [42] CHALIORIS C E, ZAPRIS A G, KARAYANNIS C G. U-jacketing applications of fiber-reinforced polymers in reinforced concrete T-beams against shear—Tests and design [J]. *Fibers*, 2020, 8(2): 13.
- [43] SHOMALI A, MOSTOFINEJAD D, ESFAHANI M R. Effective strain of CFRP in RC beams strengthened in shear with NSM reinforcements [J]. *Structures*, 2020, 23: 635-645.
- [44] KARZAD A S, LEBLOUBA M, TOUBAT SAL, et al. Repair and strengthening of shear-deficient reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer [J]. *Composite Structures*, 2019, 223: 110963.
- [45] LAFTAH ABASS A. Shear behavior of reinforced concrete wide beams strengthened with CFRP sheet without stirrups [J]. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 2019, 12(1): 80-98.
- [46] CHEN G M, ZHANG Z, LI Y L, et al. T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips [J]. *Composite Structures*, 2016, 144: 57-79.
- [47] LIU T, XIAO Y. Impact behavior of CFRP-strip-wrapped RC beams without stirrups [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(5): 04017035.
- [48] KESKIN R S O, ARSLAN G, SENGUN K. Influence of CFRP on the shear strength of RC and SFRC beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 153: 16-24.
- [49] BELARBI A, BAE S W, BRANCACCIO A. Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 32: 27-40.
- [50] MOFIDI A, CHAALLAL O. Shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP composites: Effect of strip-width-to-strip-spacing ratio [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(5): 732-742.
- [51] BUKHARI I A, VOLLUM R L, AHMAD S, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2010, 62(1): 65-77.
- [52] AKSOYLU C, YAZMAN Ş, ÖZKILIÇ Y O, et al. Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite [J]. *Composite Structures*, 2020, 249: 112561.

(编辑 胡英奎)