

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.014

锚固方法和预应力水平对 CFRP 板加固 钢筋混凝土梁抗弯性能的影响

王海涛¹, 朱长玉¹, 熊浩^{2,3}, 许国文^{2,3}, 刘赛赛¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122; 3. 上海碳纤维复合材料土木工程应用工程技术研究中心, 上海 200122)

摘要: 为了研究端部锚固方法和预应力水平对碳纤维复合材料(CFRP)板加固钢筋混凝土(RC)梁抗弯性能的影响,进行了6根大尺寸T梁抗弯试验,对失效模式、荷载-挠度曲线、特征荷载、CFRP板强度利用率及延性等指标进行分析。结果表明:锚固方法对RC梁的极限荷载有显著影响,但对开裂荷载和屈服荷载基本没有影响;当预应力水平从0提高到0.5,失效模式从混凝土压碎转变为CFRP拉断,开裂荷载和屈服荷载比未加固试件分别提高了75.0%~237.5%和13.6%~50.9%;极限荷载在混凝土压碎模式下随预应力水平的提高而提高,但在CFRP拉断模式下受预应力水平的影响很小;可靠的端部锚固可提高极限荷载下CFRP的利用率,但施加预应力能明显提高整个受力阶段CFRP的利用率。

关键词: 碳纤维复合材料;抗弯加固;锚固方法;预应力水平;钢筋混凝土梁

中图分类号: TU399

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)05-0104-07

Effects of anchorage method and prestressing level on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates

WANG Haitao¹, ZHU Changyu¹, XIONG Hao^{2,3}, XU Guowen^{2,3}, LIU Saisai¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200122, China;

3. Research Center of Shanghai Carbon Fiber Composite Application Technology in Civil Engineering, Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to investigate the effects of end anchorage method and prestressing level on the flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plates, an experiment was carried out on six large-scale T-beams. The failure mode, load-deflection curve, characteristic load, CFRP strain, CFRP utilization rate and ductility were analyzed. The results indicate that the anchorage method has a significant effect on the ultimate load of RC beams, whereas it has little effect on the cracking and yielding loads. With an increase of prestressing level from 0 to 0.5, the failure mode changes from the concrete crushing to the CFRP fracture and the cracking and yielding loads are increased by 75.0%-237.5% and 13.6%-50.9%, respectively, compared with the unstrengthened specimen. The ultimate load increases gradually in the concrete crushing mode but is affected limitedly in the CFRP fracture mode with an increase of prestressing level. The use of a reliable end anchorage can increase the CFRP utilization rate in the ultimate load; however, applying the prestress can considerably increase the CFRP utilization rate in the whole loading state.

Key words: carbon fiber reinforced polymer plate; flexural strengthening; anchorage method; prestressing level; reinforced concrete beam

纤维增强复合材料(FRP)在基础设施领域的创新应用引起了有关学者广泛的关注,特别是碳纤维复合材料(CFRP)已大量应用于钢筋混凝土(RC)结构的加固中^[1-5]。最常用的外贴CFRP加固方法虽然能够提高RC

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708174);中建股份科技研发计划项目(CSCEC-2020-Z-1);上海市科技计划项目(20DZ2253000)

作者简介: 王海涛(1987—),男,副教授,博士,主要从事结构加固技术研究。E-mail:cewht@hhu.edu.cn

通信作者: 熊浩(1986—),男,高级工程师,硕士,主要从事新材料在土木工程中的应用研究。E-mail:xionghao@cscec.com

引用本文: 王海涛,朱长玉,熊浩,等. 锚固方法和预应力水平对CFRP板加固钢筋混凝土梁抗弯性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):104-110.

WANG Haitao, ZHU Changyu, XIONG Hao, et al. Effects of anchorage method and prestressing level on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 104-110.

梁的抗弯性能,但 CFRP 端部易发生剥离破坏,导致 CFRP 强度利用率较低,高强特性不能得到有效的发挥^[6-7]。为解决普通外贴 CFRP 加固方法的早期剥离问题,通常在 CFRP 端部施加锚固措施^[6-9]。国内外学者开发了多种端部锚固方法,如纤维布 U 形箍锚固、机械锚固、纤维束锚固、复合锚固、开槽锚固等^[6-11],并进行了相关研究。黄丽华等^[8]通过数值模拟,发现在碳纤维布加固混凝土梁上施加 U 形箍锚固能有效提高屈服荷载和极限荷载;董坤等^[7]通过碳纤维布-混凝土单剪试验,发现机械锚固虽然可以显著提高界面承载力和纤维布强度利用率,但仍会发生锚固失效;卓静等^[10]通过试验发现波形齿夹具锚固显著优于碳纤维布 U 形箍;Wu 等^[11]和胡程鹤等^[6]研究了复合锚固方法,验证了该方法能显著提高混凝土梁的承载力和变形。既有文献大多针对碳纤维布加固 RC 梁中的 U 形箍及新型锚固方法开展研究,而关于 CFRP 板加固工程中常用的机械锚固方法对 CFRP 板加固 RC 梁性能影响的研究则很少。

为了提高 CFRP 对 RC 梁的抗弯加固效果,Piatek 等^[12-17]结合体外预应力技术和外贴 CFRP 技术的优势,开展了预应力 CFRP 加固 RC 梁的抗弯性能研究,结果表明,采用预应力 CFRP 加固能够显著提高 RC 梁在正常使用阶段以及极限状态的受力性能。预应力水平是影响加固效果的一个重要参数。Yang 等^[15]通过试验发现,随着 CFRP 板预应力水平的提高,RC 梁的开裂荷载和屈服荷载逐渐增大,但极限荷载基本不变,Piatek 等^[12]的研究也得到了相似的结论。然而,Deng 等^[16]通过试验发现,开裂荷载、屈服荷载及极限荷载均随着 CFRP 板预应力水平的提高而逐渐增大;Wang 等^[17]通过预应力碳纤维布加固 RC 梁的研究也发现了相似的现象。以上研究说明,随着预应力水平的提高,RC 梁的开裂荷载和屈服荷载逐渐增大,但是不同研究者关于极限荷载变化趋势的结论并不一致,说明预应力水平对加固效果的影响比较复杂。

为进一步理解端部锚固和预应力水平对 CFRP 板加固效果的影响,本文对 CFRP 板加固大尺寸 RC 梁进行了抗弯试验,对比了 2 种端部机械锚固措施和 4 个预应力水平,通过分析失效模式、荷载-挠度曲线、特征荷载、CFRP 板强度利用率以及延性等指标,评估锚固方法和预应力水平对 CFRP 板抗弯加固效果的影响,为 CFRP 板在 RC 结构抗弯加固中的高效利用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计 6 根大尺寸混凝土 T 梁,梁全长为 6 000 mm,高度为 500 mm,腹板宽度为 350 mm,翼缘高度和宽度分别为 100 mm 和 500 mm;梁底配有 2 根直径为 22 mm 和 1 根直径为 25 mm 的受拉钢筋,翼缘配有 5 根直径为 10 mm 的受压钢筋,箍筋直径为 8 mm,在弯剪段和纯弯段的箍筋间距分别为 120 mm 和 150 mm。试件的几何尺寸和配筋如图 1 所示。

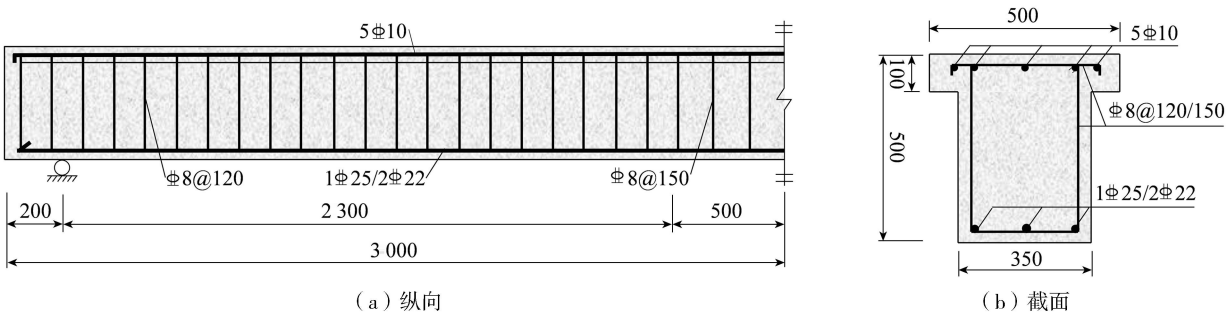


图 1 试件几何尺寸和配筋示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of beam geometry and steel rebar (unit:mm)

试件的设计参数如表 1 所示。试件 B0 为未加固对比梁。试件 BS-0-1 和 BS-0-2 为非预应力 CFRP 板加固梁,其中 BS-0-1 采用钢板进行端部锚固,钢板尺寸为 200 mm × 200 mm × 12 mm,并在梁中部布置两道 U 形箍,每个 U 形箍粘贴 2 层碳纤维布,每层厚度为 0.167 mm,宽度为 200 mm;BS-0-2 采用与预应力 CFRP 板加固试件一样的楔形锚具进行锚固。试件 BS-0.3、BS-0.4 和 BS-0.5 为预应力 CFRP 板加固梁,以研究预应力水平对加固效果的影响。设计预应力分别为 CFRP 板抗拉强度标准值 f_{pk} 的 0.3、0.4 和 0.5 倍,其中 f_{pk} 根据 GB 50367—2013《混凝土结构加固设计规范》取为 2 400 MPa。各加固试件的 CFRP 板宽度为 100 mm,厚度为 1.4 mm,粘贴长度为 4 000 mm,以保证具有相同的加固量。

1.2 材料性能

试件采用强度等级为 C30 的商品混凝土浇筑,将边长为 150 mm 的立方体试块放置在与试验梁相同的室外自然环境下养护 28 d 后,实测立方体抗压强度平均值为 26.8 MPa。钢筋均为 HRB400 级。CFRP 板为单向拉挤板材,采用双组分结构胶将 CFRP 板粘贴在混凝土表面,实测的受拉钢筋、CFRP 板及厂家提供的结构胶力学指标见表 2。

1.3 锚具及预应力张拉

CFRP 板锚具为天津卡本公司生产的楔形夹片式锚具,锚具与固定在梁上的张拉端支座和固定端支座连接,如图 2 所示。使用液压千斤顶施加预应力,张拉应力通过 CFRP 板表面粘贴的应变片监测。首先进行预张拉,预张拉应力为 $0.15\sigma_{con}$,以检查仪表及锚具等能否正常工作,其中 σ_{con} 为 CFRP 板的设计预应力。预张拉完成后在梁表面涂抹结构胶,然后分 5 级进行正式张拉,每级张拉 $0.2\sigma_{con}$,完成后持荷 5 min。为了弥补可能的预应力损失,最终超张拉至 $1.05\sigma_{con}$ 。张拉结束后,清理多余的结构胶并在室内养护一周。

1.4 加载及测量方案

利用液压伺服加载系统进行四点弯曲加载,如图 3 所示,梁净跨为 5 600 mm,两个加载点之间的距离为 1 000 mm。采用分级加载制度和位移控制模式,钢筋屈服前的加载速率为 0.015 mm/s,其中开裂前和开裂后每级分别加载 2 kN 和 10 kN;钢筋屈服后的加载速率为 0.05 mm/s,每级加载 10 mm 直至试件完全失效。在试件的跨中、加载点及支座位置各布置一个位移计,在 CFRP 板上沿长度方向每隔 250 mm 布置一个电阻应变片,通过应变仪采集位移和应变数据。

表 1 试件设计

Table 1 Design of specimens

试件	加固方式	预应力水平	设计预应力/MPa	端部锚固方式
B0	未加固			
BS-0-1	非预应力	0	0	钢板
BS-0-2	非预应力	0	0	楔形锚具
BS-0.3	预应力	0.3	720	楔形锚具
BS-0.4	预应力	0.4	960	楔形锚具
BS-0.5	预应力	0.5	1 200	楔形锚具

表 2 材料的主要力学指标

Table 2 Main mechanical properties of materials

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%
钢筋($d=22$ mm)	447	614	202	19.7
钢筋($d=25$ mm)	452	625	202	26.0
CFRP 板		2 625	164	1.7
结构胶		49.2	4.5	1.6

注: d 为钢筋的公称直径。

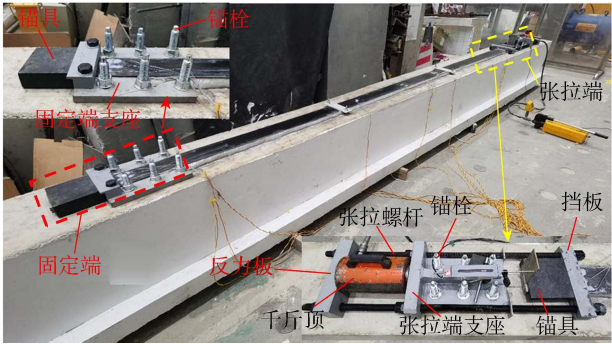


图 2 锚具及预应力张拉

Fig.2 Anchors and prestress tensioning

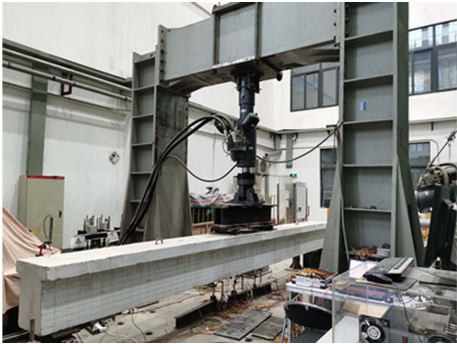


图 3 加载装置

Fig.3 Test device

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及失效模式

未加固试件 B0 在加载至大约 193.3 kN 时,纵向受拉钢筋屈服,当加载至 221.3 kN 时受压区混凝土压碎,表现出典型的适筋梁破坏特征,具有很好的延性,如图 4(a)所示。

对于非预应力 CFRP 板加固试件 BS-0-1 和 BS-0-2,在受拉钢筋屈服后,很快就发生了由弯曲裂缝引起的 CFRP 板跨中剥离。随后,试件 BS-0-1 在 246.9 kN 时发生了端部锚固失效,表现为 CFRP 板在一端钢板处滑出并伴随 U 形箍撕裂(图 4(b));而试件 BS-0-2 在约 305 kN 时发生混凝土压碎失效。可见锚固方法对 CFRP 板加固 RC 梁的失效模式有很大影响。

对于预应力 CFRP 板加固试件,试件 BS-0.3 在受拉钢筋屈服后出现跨中剥离,但试件 BS-0.4 和 BS-0.5

的跨中剥离均发生在受拉钢筋屈服前。随着剥离的不断扩展,3 个试件均未发生端部锚固失效,最终试件 BS-0.3 发生混凝土压碎失效(图 4(c)),而试件 BS-0.4 和 BS-0.5 发生 CFRP 板拉断失效(图 4(d)),表明预应力水平影响 CFRP 板加固 RC 梁的失效模式。

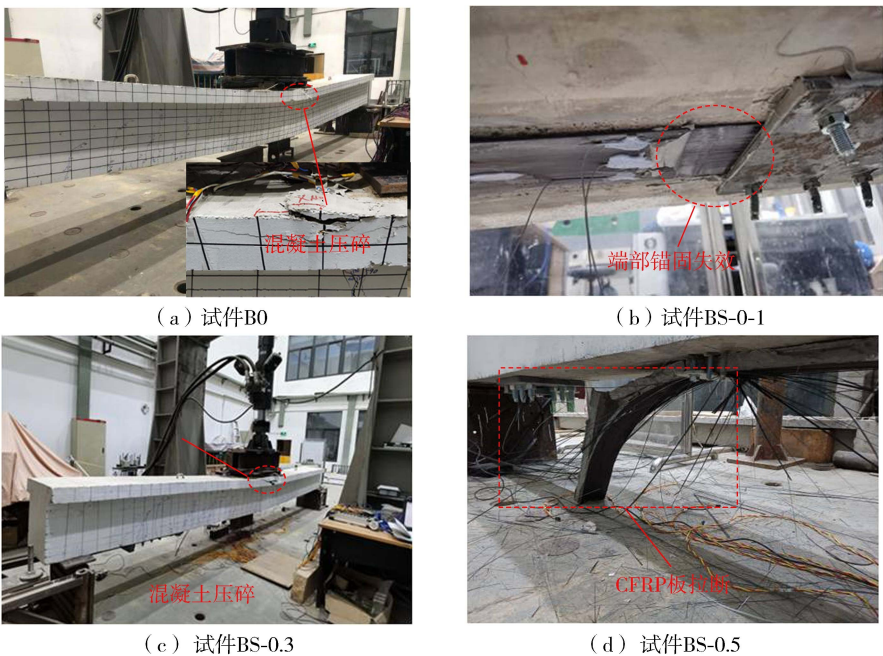


图 4 典型的失效模式

Fig.4 Typical failure modes

2.2 荷载-跨中挠度曲线

图 5 为各试件的荷载-跨中挠度曲线。可以看出, B0 的荷载-挠度曲线显示出适筋梁典型的三阶段特征,CFRP 板加固试件也主要包含了 3 个发展阶段。在混凝土开裂前,由于 CFRP 板刚度相比于梁截面刚度很小,锚固方法和预应力水平对开裂前的刚度影响较小。在混凝土开裂后,由于 CFRP 板对裂缝开展的限制,加固试件的刚度明显大于未加固试件,锚固方法对这一阶段的刚度基本没有影响,但预应力 CFRP 板比非预应力 CFRP 板具有更好的刚度提高效果。在钢筋屈服后,由于 CFRP 板的线弹性特性,加固试件的荷载-挠度曲线具有明显的屈服后刚度,虽然预应力 CFRP 板和非预应力 CFRP 板加固试件屈服后的刚度近似,但各试件屈服后的曲线长度相差很大,说明锚固方法和预应力水平对试件的变形能力影响显著。

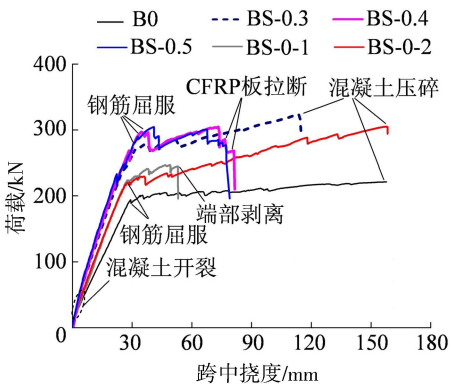


图 5 荷载-挠度曲线

Fig.5 Load-deflection curves

2.3 特征荷载

试件的主要特征荷载见表 3,其中 P_{cr} 、 P_y 和 P_u 分别为开裂荷载、屈服荷载和极限荷载, η_{cr} 、 η_y 和 η_u 分别为加固试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载与未加固试件的比值,即相对特征荷载。由表 3 可知,CFRP 板的锚固方法和预应力水平对特征荷载有明显的影响。

表 3 主要特征荷载

Table 3 Main characteristic loads

试件	P_{cr}/kN	η_{cr}	P_y/kN	η_y	P_u/kN	η_u
B0	16.0		193.3		221.3	
BS-0-1	26.0	1.63	222.6	1.15	246.9	1.12
BS-0-2	28.0	1.75	219.6	1.14	305.0	1.38
BS-0.3	44.0	2.75	269.9	1.40	323.1	1.46
BS-0.4	48.0	3.00	283.3	1.47	304.6	1.38
BS-0.5	54.0	3.38	291.7	1.51	304.8	1.38

2.3.1 锚固方法的影响

由表 3 可以看出,端部锚固方法对开裂荷载和屈服荷载基本没有影响,两个试件的开裂荷载分别为

26 kN 和 28 kN, 屈服荷载分别为 222.6 kN 和 219.6 kN。这主要是由于在钢筋屈服前, CFRP 板与混凝土梁表面黏结良好, 未出现剥离, 此时两个试件的 CFRP 板均能与混凝土梁协同工作。然而, 端部锚固方法对极限荷载有重大影响, 两个试件的极限荷载分别为 246.9 kN 和 305.0 kN, 试件 BS-0-2 的极限荷载比 BS-0-1 提高了 23.5%, 即两个试件发生了不同的失效模式, 相比于混凝土压碎失效, 端部锚固失效发生的更早, 对应 CFRP 板的加固作用更小。

2.3.2 预应力水平的影响

图 6(a) 对比了试件相对特征荷载随预应力水平的变化。可以看出, 随着预应力水平从 0 增加到 0.5, 开裂荷载和屈服荷载逐渐增大, 相比于未加固试件, 加固试件的开裂荷载提高幅度从 75% 增加到 237.5%, 屈服荷载提高幅度从 13.6% 增加到 55.3%。这是因为随着预应力水平的提高, 预应力对受拉区混凝土和钢筋产生的预压应力逐渐增大。然而, 试验发现极限荷载并未随着预应力水平的增加而逐渐增大, 当预应力水平从 0 增加到 0.3 时, 试件的失效模式均为混凝土压碎, 极限荷载提高幅度从 37.8% 增加到 46%, 但当预应力水平从 0.4 增加到 0.5 时, 极限荷载受预应力水平的影响很小, 分别提高了 37.6% 和 37.7%。

为了进一步说明预应力水平对极限荷载的影响, 图 6(b) 总结了国内外文献中发生混凝土压碎和 CFRP 板拉断失效模式的试验结果, 为了方便比较, 纵坐标为相对极限荷载值。可以发现, 在混凝土压碎失效模式下, 极限荷载随着预应力水平的增加有较为明显的提高^[16,18-20], 但当失效模式为 CFRP 板拉断时, 预应力水平对极限荷载的影响并不明显^[15,21-22], 说明预应力水平对极限荷载的影响与试件的失效模式相关。

2.4 CFRP 板应变分布

图 7 为试件 BS-0-1 和 BS-0.3 在不同荷载下 CFRP 板应变沿长度的分布, 其中试件 BS-0.3 的应变未包括初始张拉应变。可以看出, 在钢筋屈服前, CFRP 板应变在纯弯段最大, 在弯剪段呈降低趋势, 该阶段 CFRP 板与混凝土黏结完好, CFRP 板应变与梁弯矩的分布趋势基本一致。在钢筋屈服后, 由于截面增加的拉力主要由 CFRP 板承担, 在屈服位置处的 CFRP 板应变显著增加。随着 CFRP 板剥离现象的出现, 在剥离段 CFRP 板与混凝土之间的黏结应力基本消失, 导致 CFRP 板的应变重分布, 造成 CFRP 板应变在剥离段基本分布均匀。在 CFRP 板完全剥离后, 有黏结加固系统变成了无黏结加固系统, CFRP 板应变沿整个长度基本不变, 而应变值随着荷载的增加而快速增大。

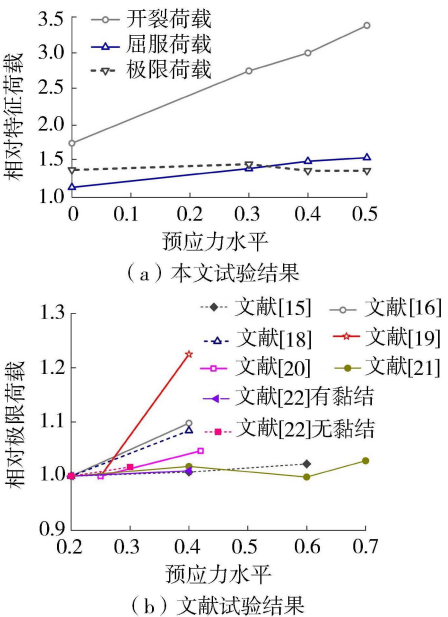


图 6 预应力水平对特征荷载的影响
Fig. 6 Effect of prestressing level on characteristic loads

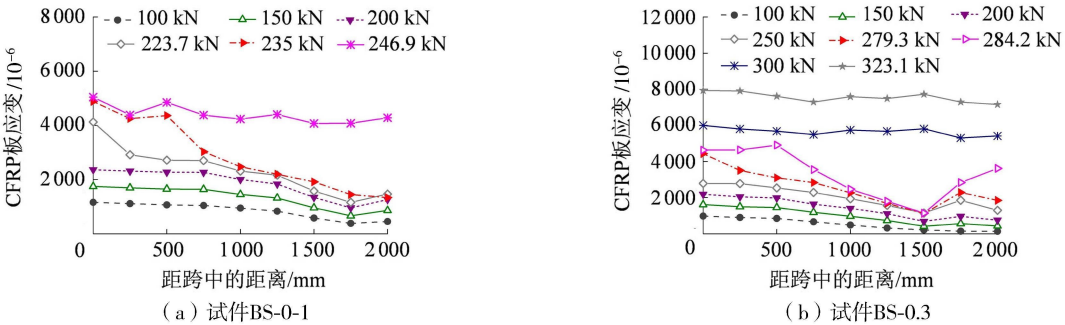


图 7 CFRP 板应变分布
Fig. 7 Strain distributions of CFRP plate

2.5 CFRP 板利用率

表 4 为加固试件的初始张拉应变、在屈服和失效时 CFRP 板跨中总应变及利用率, 其中利用率为相应荷载下 CFRP 板应变与极限应变 (17000×10^{-6}) 的比值。由表 4 可以发现, 非预应力 CFRP 板加固试件在屈服时

CFRP 板的利用率非常低,两个试件的利用率仅约 17%;在失效时,试件 BS-0-1 CFRP 板的利用率仅为 30%,而锚固可靠的试件 BS-0-2 的 CFRP 板利用率达到了 59%,说明当采用非预应力 CFRP 板加固时,在正常使用阶段 CFRP 板的强度远不能发挥,可靠的端部锚固虽然可以提高承载能力极限状态下的利用率,但对正常使用阶段的利用率基本没有影响。相比而言,预应力 CFRP 板的利用率得到了显著提高,在屈服时 3 个试件的利用率随着预应力水平的提高而提高,达到了 45.9%~55.4%,在失效时的利用率均达到 73% 以上,CFRP 板的高强特性得到了较好的发挥。以上分析表明,仅采用锚固措施不能提高正常使用阶段的 CFRP 板强度利用率,而施加预应力是提高正常使用阶段和承载能力极限状态下 CFRP 板强度利用率的有效措施。

2.6 延性

表 5 为各试件的位移延性系数,其中 Δ_y 和 Δ_u 分别为受拉钢筋屈服及试件失效时的梁跨中挠度。可以看出,未加固试件具有很好的延性,而加固试件的延性受锚固措施以及预应力水平的影响很大。试件 BS-0-1 由于发生锚固失效,延性系数显著降低,比未加固试件降低了约 65.5%;而试件 BS-0-2 采用可靠的锚具锚固,具有很好的延性,延性系数与未加固梁相当。这进一步说明,采用外贴 CFRP 板加固时,CFRP 板端部的有效锚固非常重要。整体上,预应力 CFRP 板加固试件的延性相比于未加固试件明显降低,而且随着预应力水平的提高,延性越来越差,3 个预应力 CFRP 板加固试件的延性系数分别降低至未加固试件的 65.7%、48.2% 和 41.9%。以上分析表明,在采用 CFRP 板加固时,要采用可靠的端部锚固以及合理的预应力水平来保证加固后的结构仍有足够的延性以满足变形要求。

3 结 论

- a. 端部锚固和预应力水平影响 RC 梁的失效模式。采用钢板和楔形锚具锚固的试件分别发生了 CFRP 板锚固失效和混凝土压碎失效;随着预应力水平的提高,失效模式从混凝土压碎转变为 CFRP 板拉断。
- b. 端部锚固和预应力水平对加固效果有很大影响。相比于钢板锚固,楔形锚具虽然对开裂荷载和屈服荷载基本没有影响,但可以将极限承载力提高 23.5%。开裂荷载和屈服荷载随着预应力水平的增大而提高,预应力加固比非预应力加固的开裂荷载提高 57.1%~92.9%,屈服荷载提高 22.9%~32.8%;而极限荷载在混凝土压碎模式下随着预应力水平的提高而提高,在 CFRP 板拉断模式下受预应力水平的影响并不明显。
- c. 端部锚固和预应力水平影响 CFRP 板的强度利用率。可靠的端部锚固虽然可以提高失效时 CFRP 板的利用率,但对正常使用下的利用率基本没有影响;而对 CFRP 板施加预应力可以显著提高整个受力阶段的强度利用率。
- d. 端部锚固和预应力水平对延性影响很大。可靠的端部锚固是确保 CFRP 板加固 RC 梁延性的必要条件,而延性随着预应力水平的提高不断降低。

参考文献:

[1] 胡成,翁兴中,朱懋江,等. 纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):84-92. (HU Cheng,WENG Xingzhong,ZHU Maojiang,et al. Frost resistance performance of surface reinforced concrete with fiber mesh [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):84-92. (in Chinese))

[2] 陈雨唐,缪凡璠,唐晨,等. 冻融循环与持续荷载共同作用下 FRP 片材-混凝土界面黏结性能的退化行为[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):468-476. (CHEN Yutang,LIAO Fanfan,TANG Chen,et al. Bond performance degradation behavior of FRP laminate-to-concrete interface under combined effects of freeze-thaw cycling and sustained loading[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(5):468-476. (in Chinese))

表 4 CFRP 板应变及利用率

Table 4 Strain and utilization ratio of CFRP plates

试件	张拉应变/ 10 ⁻⁶	屈服时 CFRP 总应变/10 ⁻⁶	屈服时 利用率/%	失效时 CFRP 总应变/10 ⁻⁶	失效时 利用率/%
BS-0-1	0	2 801	16.5	5 044	29.7
BS-0-2	0	2 951	17.4	10 032	59.0
BS-0.3	4 601	7 802	45.9	12 497	73.5
BS-0.4	6 045	9 072	53.4	13 115	77.1
BS-0.5	7 575	9 415	55.4	13 929	81.9

表 5 延性系数

Table 5 Ductility factor

试件	Δ_y /mm	Δ_u /mm	Δ_u/Δ_y
BO	28.5	157.8	5.54
BS-0-1	27.8	53.0	1.91
BS-0-2	27.5	157.5	5.73
BS-0.3	31.3	113.8	3.64
BS-0.4	33.0	88.1	2.67
BS-0.5	32.8	76.1	2.32

- [3] 王海涛,吴刚,张磊. FRP修复开裂钢板的应力强度因子影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):440-445. (WANG Haitao, WU Gang, ZHANG Lei. Influencing factor analysis of stress intensity factor for FRP-strengthened cracked steel plates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):440-445. (in Chinese))
- [4] 王海涛,吴刚,吴智深. FRP布置方式对含裂纹钢板加固后的疲劳性能影响分析[J]. 土木工程学报,2015,48(1):56-63. (WANG Haitao, WU Gang, WU Zhishen. Study on the effect of FRP configurations on the fatigue behavior of strengthened steel plate with an initial crack[J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(1):56-63. (in Chinese))
- [5] 唐煜,卢宏宇,邹友泉,等. 组合加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2020,50(5):822-830. (TANG Yu, LU Hongyu, ZOU Youquan, et al. Experimental study on the flexural performance of reinforced concrete beams strengthened by composite method[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2020,50(5):822-830. (in Chinese))
- [6] 胡程鹤,吴智敏,宿莹,等. FRP复合锚固技术试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(3):309-314. (HU Chenghe, WU Zhimin, SU Ying, et al. Experimental study of FRP composite anchoring technology[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2010,30(3):309-314. (in Chinese))
- [7] 董坤,耿治鹏,杨松,等. 端部机械锚固FRP-混凝土黏结界面承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(增刊1):399-405. (DONG Kun, JI Zhipeng, YANG Song, et al. Experimental study on bearing capacity of FRP-concrete bonding interface with mechanical end anchorage[J]. Journal of Building Structures,2020,41(Sup1):399-405. (in Chinese))
- [8] 黄丽华,王跃方,李璐. CFRP加固梁U型锚固效果的数值分析[J]. 土木建筑与环境工程,2014,36(6):8-13. (HUANG Lihua, WANG Yuefang, LI Lu. Finite element analysis of the effects of U-wrap anchorages on RC beams strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2014,36(6):8-13. (in Chinese))
- [9] KALFAT R, GADD J, AL-MAHAIDI R, et al. An efficiency framework for anchorage devices used to enhance the performance of FRP strengthened RC members[J]. Construction and Building Materials,2018,191:354-375.
- [10] 卓静,李唐宁,章庆学,等. 波形齿夹具锚与碳纤维布U形箍锚固作用的对比试验[J]. 建筑结构,2006,36(3):22-24. (ZHUO Jing, LI Tangning, ZHANG Qingxue, et al. Comparative experiment on beams strengthened with carbon fiber sheets anchored by wave-shaped-gear-grip anchorage and by carbon fiber sheet U-ferrule[J]. Building Structure,2006,36(3):22-24. (in Chinese))
- [11] WU Y F, HUANG Y. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures[J]. Journal of Composites for Construction,2008,12(3):266-273.
- [12] PLATEK B, SIWOWSKI T, MICHALOWSKI J, et al. Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP strips: development of novel anchor and tensioning system[J]. Journal of Composites for Construction,2020,24(3):04020015.
- [13] 彭晖,尚守平,金勇俊,等. 预应力碳纤维板加固受弯构件的试验研究[J]. 工程力学,2008,25(5):142-151. (PENG Hui, SHANG Shouping, JIN Yongjun, et al. Experimental study of reinforced concrete beam with prestressed CFRP plate[J]. Engineering Mechanics,2008,25(5):142-151. (in Chinese))
- [14] 郭蓉,杜力峰,郭娇,等. 预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁的受弯性能[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(6):61-67. (GUO Rong, DU Lifeng, GUO Jiao, et al. Flexural property of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer plate[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2017,39(6):61-67. (in Chinese))
- [15] YANG D S, PARK S K, NEALE K W. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites[J]. Composite Structures,2009,88:497-508.
- [16] DENG J, RASHID K, LI X D, et al. Comparative study on prestress loss and flexural performance of rectangular and T beam strengthened by prestressing CFRP plate[J]. Composite Structures,2021,262:113340.
- [17] WANG W W, DAI J G, HARRIES K A, et al. Prestress losses and flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with posttensioned CFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction,2012,16(2):207-216.
- [18] RASHID K, LI X D, DENG J, et al. Experimental and analytical study on the flexural performance of CFRP strengthened RC beams at various pre-stressing levels[J]. Composite Structures,2019,227:111323.
- [19] WEI M W, XIE J H, LI J L, et al. Effect of the chloride environmental exposure on the flexural performance of strengthened RC beams with self-anchored prestressed CFRP plates[J]. Engineering Structures,2021,231:111718.
- [20] 陈华,邓朗妮,张鹏,等. 预应力CFRP板加固混凝土梁的抗弯性能试验[J]. 桂林工学院学报,2009,29(1):81-83. (CHEN Hua, DENG Langni, ZHANG Peng, et al. Flexural performance of RC strengthened beam with prestressed CFRP plate[J]. Journal of Guilin University of Technology,2009,29(1):81-83. (in Chinese))
- [21] YOU Y C, CHOI K S, KIM J H. An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system[J]. Composites:Part B,2012,43(8):3026-3036.
- [22] 康侃,张鹏,邓朗妮. 两端锚固预应力CFRP板加固混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 兰州理工大学学报,2011,37(6):110-115. (KANG Kan, ZHANG Peng, DENG Langni. Experimental research on flexural behavior of reinforced RC beams strengthened with prestressed CFRP plates anchored at both ends[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2011,37(6):110-115. (in Chinese))