

引文格式:钟正强,刘 珺,郭凯军,等.端锚 CFRP 网格 U 型箍加固 RC 箱梁抗弯性能试验[J].建筑科学与工程学报,2025,42(2):93-100.
ZHONG Zhengqiang,LIU Jun,GUO Kaijun,et al.End anchor CFRP grid U-hoop reinforced RC box girder bending performance test[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering,2025,42(2):93-100.

DOI:10.19815/j.jace.2023.04010

端锚 CFRP 网格 U 型箍加固 RC 箱梁抗弯性能试验

钟正强^{1,2},刘 珺¹,郭凯军¹,陈子慕¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 桥梁结构安全控制湖南省工程实验室,湖南 长沙 410114)

摘要:为研究聚合物砂浆(PCM)-碳纤维增强复合材料(CFRP)网格 U 型箍加固钢筋混凝土箱梁在受弯过程中的界面机理和破坏模式,深入探究不同加固方式下的抗弯加固效果以及网格 U 型箍的受力情况,对 5 根箱形钢筋混凝土梁进行四点弯曲静力加载试验。结果表明:在使用 CFRP 网格 U 型箍进行端部锚固后,箱梁的抗弯承载力以及底部 CFRP 网格的抗拉利用率都有进一步提升,使用宽度为 120 mm 的 45°斜向 U 型箍进行加固时,其抗弯承载力相比 FT 试件(仅在梁底部用纵向 CFRP 网格加固的试件)提升了 18.4%,CFRP 底部网格最大应变提升了 93.1%;PCM-CFRP 网格组合加固系统与钢筋的共同受力性能良好,能有效延后钢筋进入屈服阶段;当使用 90°U 型箍对箱梁进行端部锚固时,试件破坏模式为 PCM-CFRP 网格组合层与混凝土之间的中部剥离破坏,而 45°斜向 U 型箍锚固加固的试件在同样的荷载下未出现中部剥离和受压区混凝土压碎的情况,说明其可有效遏制中部剥离破坏的出现;U 型箍宽度越大,45°斜向 U 型箍加固效果越好,但 90°U 型箍加固的试件延性比 45°U 型箍加固的试件更好。

关键词:CFRP 网格;U 型箍;组合加固;钢筋混凝土箱形梁;抗弯试验

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)02-0093-08

End anchor CFRP grid U-hoop reinforced RC box girder bending performance test

ZHONG Zhengqiang^{1,2}, LIU Jun¹, GUO Kaijun¹, CHEN Zimu¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;

2. Hunan Province Engineering Laboratory for Safety Control of Bridge Structures, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to study the interface mechanism and failure mode of reinforced concrete box girder reinforced with polymer mortar(PCM)-carbon fiber reinforced composite material (CFRP) grid U-hoop reinforcement in the bending process, and to deeply explore the bending reinforcement effect and the force of the grid U-hoop under different reinforcement methods, four-point bending static loading test was carried out on five box-shaped reinforced concrete beams. The results show that after using CFRP grid U-hoop for end anchoring, the bending bearing capacity of the box girder and the tensile utilization rate of the bottom CFRP grid are

further improved, and the bending capacity of 45° oblique U-hoop with a width of 120 mm is increased by 18.4% compared with that of FT specimen (specimen reinforced only with longitudinal CFRP grid), and the maximum strain of CFRP bottom grid is increased by 93.1%. The PCM-CFRP grid combination reinforcement system has good common force performance with the steel bar, which can effectively delay the steel bar into the yield stage. When 90° U-hoop is used to anchor the end of the box girder, the failure mode is the middle peel failure between the PCM-CFRP grid composite layer and the concrete, while the specimen reinforced with 45° oblique U-hoop anchorage does not have the middle peel and the crushing of concrete in the compression area under the same load, indicating that it can effectively limit the occurrence of middle peel failure. The larger the width of the U-hoop, the better the reinforcement effect of the 45° oblique U-hoop, but the ductility of the specimen reinforced with a 90° U-hoop is better than that of 45° U-hoop.

Key words: CFRP grid; U-hoop; combination reinforcement; reinforced concrete box girder; bending test

Author resume: ZHONG Zhengqiang(1968-), male, PhD, associate professor, E-mail: zzq6010@sina.com.

0 引言

钢筋混凝土箱梁具有抗扭刚度大、对受正负弯矩结构具有较好适应性、适应现代化施工方法等优点,被大量应用于桥梁建设当中,但由于施工、设计或者钢筋的腐蚀问题,以及使用过程中施加在结构上的荷载增加,需要对这一结构进行加固。

作为一种简捷高效的加固方法,纤维增强材料(FRP)加固法被越来越多的国内外研究学者关注,一种较新的复材形式 FRP 网格也逐渐被研究并应用在混凝土结构上。FRP 网格-水泥基材复合加固法将网格用铆钉固定在混凝土结构表面后,再喷射或涂抹水泥基材与旧有混凝土成为一个整体,从而达到提高结构承载力、刚度和耐久性的目的。目前,国内外关于 FRP 网格-水泥基材加固 RC 梁的相关研究已经有所进展。吴万开等^[1]通过 CFRP 网格-增强无机磷酸盐水泥基材加固混凝土板的抗弯试验发现,此加固方法可以有效地提高混凝土板的刚度、抗裂性能和抗弯承载力。Khalifa 等^[2]提出了一个 FRP 材料的有效应变理论,即对极限应变进行折减后所得到的应变就是在受力过程中产生的真实应变。Zheng 等^[3]以玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)网格的厚度及加固层的黏结长度为主要变量,研究了 BFRP 网格-高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)复合加固 RC 梁对混凝土梁抗弯性能的影响。徐世烺等^[4]研究了 FRP 网格增强混凝土薄

板后网格表面不同的黏砂粒径、ECC 中 PVA 短纤维掺量对混凝土薄板受弯性能的影响。王新玲等^[5]通过 FRP 网格增强 ECC 加固素混凝土受压性能试验发现,加固柱的峰值承载力随 ECC 厚度的增加呈线性增长,抵抗变形的能力随 FRP 网格的减小而大幅增加,峰值承载力与混凝土的强度等级成正比,但承载力下降段的构件承载力减小速度会加快。朱忠锋等^[6]通过试验发现,加固柱的承载力和抵抗变形能力会随着编织网层数的增加而有所提升,处理表面后的 FRP 编织网与 ECC 的界面黏结性能和协同工作性能也会有明显改善。Wang 等^[7]提出了使用 CFRP 网格-聚合物水泥砂浆(PCM)对 RC 梁加固的方法。Amiruddin 等^[8]通过三点弯曲试验对比研究 CFRP 网格和 PCM 抗剪加固 RC 梁和未加固梁的抗剪性能影响规律,得出了在现有 RC 梁中设置 PCM 加固层、CFRP 网格也能有效提高混凝土梁抗剪承载力的结论。Hino 等^[9]探讨了碳纤维布格栅和 PCM 喷射混凝土的配筋率和配筋范围的影响,证实碳纤维布网格的变形能力会随着配筋率的提高而降低。王博等^[10]对 RC 梁进行了四点弯曲试验和有限元模拟,发现在 RC 梁侧面粘贴 CFRP 网格和 PCM 加固层不仅可以提高梁体的抗剪承载力,还可以对斜裂缝的发展起一定的抑制作用,认为 CFRP 网格和钢筋有着良好的共同工作性能。曹亮等^[11]通过四点弯曲试验和有限元模拟,提出了纤维网格增强地聚物砂浆加固梁抗剪承载力的计算方

法。Ghayeb 等^[12]对 3 个 RC 实心板加固试件和未加固试件进行了测试,发现 CFRP 加固试样在延缓第一裂纹出现、提高抗剪裂纹扩展能力、增强荷载位移和延性方面表现出更好的性能。Guo 等^[13]通过数据回归分析拟合出了横向网格有效应变与网格配筋率之间的定量关系,并提出了用于确定 CFRP 网格-PCM 层加固 RC 梁抗剪承载力的评价方法。杜敏等^[14]通过试验研究了 FRP 网格-环氧砂浆加固的 RC 梁在受剪过程中的界面机理和破坏模式,发现这种加固方式能够有效抑制斜裂缝的发展,对于极限承载力和变形能力的提高有促进作用。刘浪等^[15]设计了 4 根钢筋混凝土梁,对 CFRP 加固修复不同损伤 RC 梁的抗弯性能进行研究,发现 CFRP 加固损伤构件能显著提高梁体的极限承载力和刚度。赵洪飞等^[16]通过四点弯曲试验对 4 块纤维织物网增强水泥聚合物砂浆加固技术(TRM)加固 RC 单向板进行试验,指出采用 TRM 对 RC 板进行加固可有效提升承载能力和抗弯性能,并且能抑制裂缝的扩展。王苏岩等^[17]通过试验发现,CFRP 加固高强 RC 梁的力学性能在湿热环境和冻融循环作用下会被削弱。彭晖等^[18]通过拔出试验探究了在冻融循环作用下表层嵌贴的 CFRP 和混凝土之间的界面黏结退化主要是混凝土冻融损伤导致的。Qiang 等^[19]通过四点弯曲试验研究了预应力 CFRP 板加固非黏结改造体系钢-混组合梁的弯曲行为,发现预应力 CFRP 板有效提高了钢-混组合梁的屈服荷载和极限荷载,CFRP 板横截面积的增加对梁刚度的贡献大于预应力水平。Tatar 等^[20]通过 U 型箍锚固的外贴 CFRP 加固大型 RC 梁的弯曲试验发现,U 型箍可使纵向 CFRP 的应变利用率提高 40%~57%,同时可以缓解中间裂纹脱黏失效模式。

综上所述可以看出国内外学者对于 CFRP 网格加固钢筋混凝土试件已开展一定研究,但对于 CFRP 网格 U 型箍这一新型结构形式对箱形梁的加固效果未做出系统性研究。因此,本文提出了使用 CFRP 网格 U 型箍与聚合物水泥砂浆组合加固箱形混凝土梁的方法,该方法充分利用了相变材料(PCM)黏性好、固化迅速、耐火性能好等优点,并且 CFRP 网格状的几何构造使其能充分嵌入 PCM 中从而提升共同受力效率。通过开展 PCM-CFRP 网格 U 型箍组合加固钢筋混凝土箱梁抗弯试验,深入探究其在受弯过程中的界面机理和破坏模式,以及不同加固方式下箱梁的抗弯加固效果和网格 U 型箍的实际受力行为,为其在实际工程中的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验以 U 型箍宽度和 U 型箍与箱梁纵向角度为变量,设计 5 根 RC 箱梁试件,并对各试件进行命名:未加固参考梁命名为“CT”,仅在底部设置纵向 PCM-CFRP 网格加固的试件命名为“FT”;剩余 3 个试件的编号中“A45”、“A90”代表 U 型箍的倾斜角度,“W120”、“W240”代表 U 型箍的宽度,例如“A90W120”表示为试验梁配置了底部 PCM-CFRP 网格板和与梁纵向呈 90°、宽度为 120 mm 的 U 型箍。试件的基本尺寸为:箱梁底板宽 300 mm,翼缘宽 100 mm,翼缘高 60 mm,跨度 2 600 mm,腹板宽 60 mm,底板宽 60 mm,具体参数如图 1 所示,试验参数如表 1 所示。

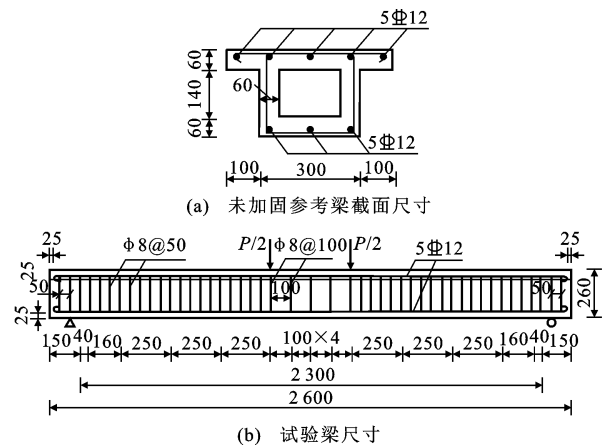


图 1 试验梁尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Test beam size and reinforcement (unit:mm)

表 1 试件分类

Table 1 Specimen classification

试件编号	混凝土强度	加固方式	备注
CT	C30	无加固	未加固参考梁
FT	C30	仅有底部纵向 CFRP 网格加固	加固参考梁
A90W120	C30	底部纵向加固及横向 90°、宽度 120 mm 的 U 型箍一层加固	加固参考梁
A45W120	C30	底部纵向加固及横向 45°、宽度 120 mm 的 U 型箍一层加固	加固参考梁
A45W240	C30	底部纵向加固及横向 45°、宽度 240 mm 的 U 型箍一层加固	加固参考梁

箱形梁的计算长度为 2 400 mm,高跨比为 0.11,惯性矩为 $4.9 \times 10^8 \text{ mm}^4$,长细比为 27.35,剪跨比为 4.762。梁体纵筋选用 HRB400 级钢筋,其中受拉纵筋采用 3 Φ 12,受压钢筋采用 5 Φ 12。在设

计试件箍筋配置时,在纯弯段按构造要求采用 $\phi 8@100$,在弯剪区加密配置 $\phi 8@50$,以达到纯弯段比弯剪段先发生破坏的试验目的。为方便后期吊装箱梁,在试件的支座处设置 2 个 $\phi 8$ 钢筋环,试验梁的材料参数见表 2,截面尺寸以及钢筋配置如图 1 所示。

表 2 试件材料参数

Table 2 Material parameters of specimen			
材料	型号	参数	数值
混凝土	C30	轴向抗压强度平均值/MPa	35
HPB300 光圆钢筋	$\phi 8$	屈服强度/MPa	306.2
		极限强度/MPa	535.8
HRB400 带肋钢筋	$\Phi 12$	屈服强度/MPa	375.6
		极限强度/MPa	558.9
双向碳纤维 维网格		横向强度/MPa	5 112
		纵向强度/MPa	4 915
		弹性模量/GPa	240
纤维增强聚合 物水泥砂浆	湿法喷射	劈裂抗拉强度/MPa	7.95
	PCMCWSM	与混凝土正拉黏结强度/MPa	2.7

1.2 梁体加固

本试验中 FT 试件仅在底部平铺一层尺寸为 1 200 mm \times 300 mm 的 CFRP 网格作参考梁; A90W120、A45W120、A45W240 试件则是在底部平铺一层 2 300 mm \times 300 mm 的 CFRP 网格后,采用不同端部锚固形式的试验梁。加固顺序为在凿毛处理后的加固面周围钉上木模板,然后在加固面上抹上一层 8 mm 左右的 PCM,接着网格平铺并嵌入到 PCM 中,再将网格 U 型箍安置好并按实,随后在网格上再抹上一层 PCM,最后将加固后的试件置于原 RC 箱梁同等环境下至少养护 7 d。

1.3 试验装置和测点布置

本试验为简支梁的四点弯曲静载试验。试验时,将一根分配梁横置于梁体居中位置,分配梁与梁体之间设置间隔 400 mm 的 2 个支座垫块,加载装置由 20 t 千斤顶和反力架梁组成,千斤顶和分配梁之间放置一个压力传感器,压力传感器与一个荷载显示器连接,可实时观测荷载的变化,以便于控制加载量。为探究不同倾斜角度 CFRP 网格 U 型箍以及不同宽度斜向 U 型箍的共同工作情况,试验时在试件跨中、2 个加载点和 2 个支座处布置 5 个电子位移表,测量各个位置的实时挠度。加载装置和电子位移表位置如图 2 所示。

在底部 3 根受拉钢筋跨中位置布置 3 个电阻应变片,在 2 根受压钢筋跨中位置布置 2 个电阻应变片,编号为 S_1 、 S_2 。在试件侧面高度范围为 260 mm

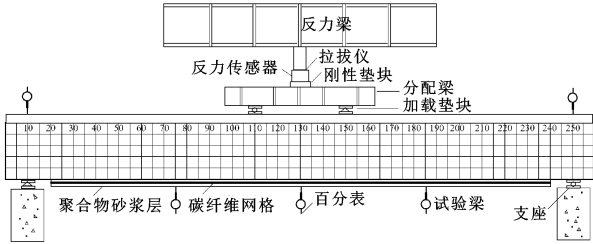


图 2 加载装置和电子位移表位置

Fig. 2 Loading device and electronic displacement meter position

的跨中位置均匀布置 5 个混凝土应变片,从上至下编号为 C1~C5。在底部 CFRP 网格的纯弯曲段内间隔 100 mm 布置 3 个应变片,弯剪区内则间隔 200 mm 再布置 4 个应变片,在 CFRP 网格 U 型箍上布置 6 个应变片,其中横向均匀布置 3 个,沿着纤维纵向方向布置 3 个,具体位置如图 3、4 所示。

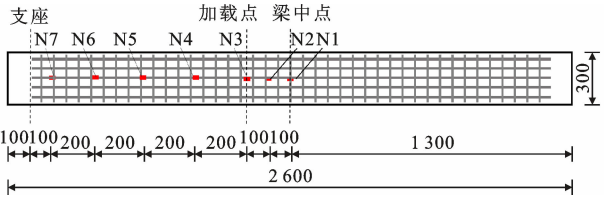


图 3 CFRP 网格底板应变片位置(单位:mm)

Fig. 3 Position of CFRP grid base plate strain gauges (unit:mm)

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

试件受弯后损伤及裂缝如图 5 所示,可以看出,试件在相应的峰值荷载下是以弯曲模式破坏的,跨中都出现了竖向裂缝和斜向裂缝,与未加固的试件相比,只用纵向 CFRP 网格加固的 FT 试件的主裂缝明显,严重破坏了混凝土与 CFRP 网格之间的黏结,使得网格过早脱黏,这说明此加固方式没有使网格跟梁之间协同变形,导致在加载时无法再为钢筋混凝土梁的抗弯做贡献。用 U 型箍加固的试件裂缝数量更加多且细密,表明在网格 U 型箍作用下的加固梁与 CFRP 网格产生的协同作用会提高梁的弯曲刚度,抗弯承载能力得到了提高,抑制了裂缝的发展扩散。同时,网格 U 型箍加固方式使得加固梁的破坏方式从中部剥离[图 5(b)、(c)]转变为 CFRP 纵向断裂[图 5(d)、(e)],说明 U 型箍延迟了加固梁的中部剥离,这与文献[1]中的现象类似。总的来说,与未加固梁相比,加固梁的抗弯能力、裂缝数量和宽度都有明显改善,如果 CFRP 网格与混凝土界

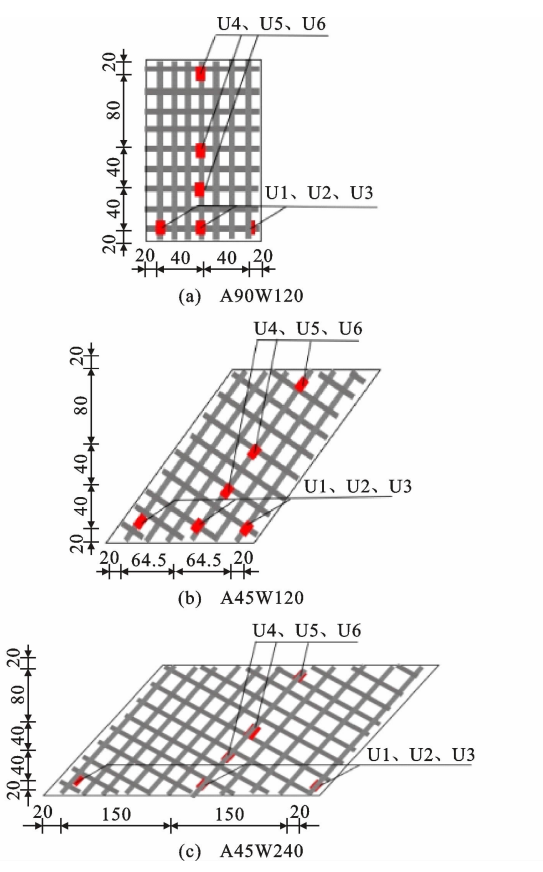


图 4 网格 U 型箍应变片位置(单位:mm)

面黏结足够好,则网格还能进一步提高梁体的抗弯能力,直至梁体破坏。

2.2 跨中荷载-挠度分析

试件荷载-挠度曲线如图 6 所示。由图 6 可知,所有试件的加载过程可大致分为 3 个阶段:第一阶段,试件梁未开裂阶段,此阶段由于混凝土未开裂,加固梁刚度较大,整体变形缓慢增加;第二阶段,混凝土出现裂缝与裂缝发展阶段,随着荷载增加,受拉区混凝土开裂,刚度不断下降,挠度增加速度变快,直至底部受拉纵筋屈服,荷载-挠度曲线出现明显拐点;第三阶段,受拉纵筋屈服至试验梁的破坏阶段,随着荷载增加,挠度变化速率加快,裂缝宽度加剧,梁的刚度持续下降,并且下降幅度较大,直至梁出现弯曲破坏特征。

表 3 为试验结果汇总。由表 3 可知,各加固梁的开裂荷载相较于未加固梁 CT 试件均有不同幅度提升,其中 FT 试件提升了 50%,A90W120 提升了 66.7%,A45W120 提升了 100%,A45W240 提升了 133%。说明在梁底使用 PCM-CFRP 网格组合加固系统可以延缓受拉区混凝土开裂,提升 RC 箱梁的开裂荷载,并且在箱梁侧外腹板使用 U 型锚固后

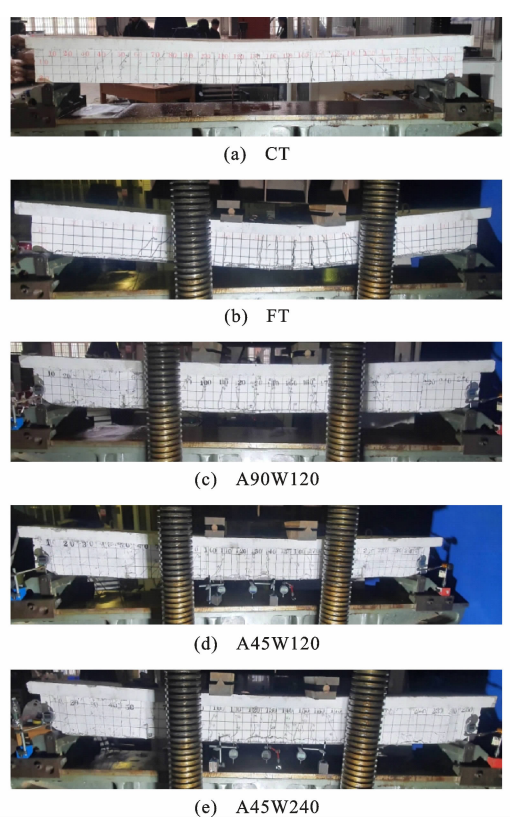


图 5 裂缝分布及破坏形态

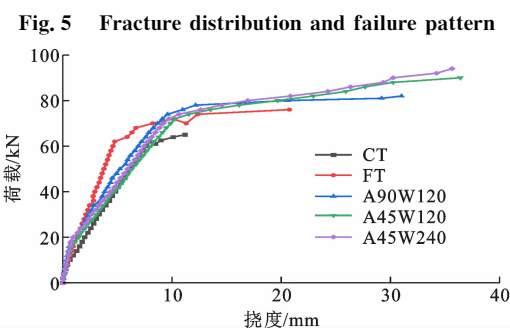


图 6 荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curve

的开裂荷载可进一步提升。加固梁 FT 试件的屈服荷载比未加固的 CT 试件提升了 10%,加固梁 A90W240 试件、A45W120 试件和 A45W240 试件的屈服荷载相较于未加固参考梁 CT 试件提升幅度分别为 23.3%、26.7%和 36.7%,说明采用 PCM-CFRP 网格组合加固可有效提高 RC 箱梁正截面抗弯承载力,也表明与 90°U 型箍加固方式相比,45°U 型箍加固方法能延迟加固梁的中部剥离。混凝土开裂后,由于受拉区混凝土开裂失去承载能力,受拉钢筋与 CFRP 网格共同受力延缓了钢筋进入屈服阶段;当仅加固箱梁底部时,其提升效果明显低于在梁两侧使用 U 型箍加固的试件。分析各试件延性系数可知,各加固梁的延性系数均大于未加固参考梁

表 3 试验结果
Table 3 Test results

试件编号	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	μ	P_Δ	破坏模式
CT	12	0.95	60	7.62	66	10.11	1.33		混凝土被压碎
FT	18	1.11	66	6.35	76	20.76	3.27	1.15	中部剥离
A90W120	20	1.01	74	9.60	82	31.03	3.23	1.24	中部剥离
A45W120	24	2.04	76	13.53	90	36.42	2.69	1.36	CFRP 网格被拉断
A45W240	28	2.35	82	20.85	94	35.65	1.71	1.42	混凝土被压碎,CFRP 网格被拉断

注： P_{cr} 为试件梁的混凝土开裂荷载； Δ_{cr} 为试件混凝土开裂时的跨中位移； P_y 为受拉钢筋屈服荷载； Δ_y 为试件梁受拉钢筋屈服时的跨中位移； P_u 为试件梁破坏时的极限荷载； Δ_u 为试件梁破坏时的跨中位移； μ 为延性系数； P_Δ 为极限荷载增幅系数，其数值等于各试件极限荷载与 CT 试件极限荷载的比值。

CT 试件，采用 PCM-CFRP 网格组合加固系统可以提升梁的延性，延性系数越大说明试件的耗散能量能力越强，具有更强的抵抗变形能力。在所有加固梁中，FT 试件的延性提升最大，延性系数为 3.27，在使用 U 型箍锚固后，延性相比 FT 试件有所下降，其中使用 45°U 型箍加固的试件延性最好，延性系数为 2.69，说明 U 型箍的使用能提高钢筋混凝土梁的承载能力，但会使延性有所降低。

2.3 跨中荷载-应变分析

图 7 为加固参考梁试件荷载-钢筋应变和荷载-CFRP 网格应变图，数值均来自于跨中位置应变片。由图 7 可知，各梁的荷载-钢筋应变曲线和荷载-CFRP 网格应变曲线走势大致相同，说明 PCM-CFRP 网格组合加固系统与钢筋的共同受力性能良好，均可分为 3 个阶段：开裂前阶段、屈服阶段、破坏阶段。混凝土开裂前，混凝土应变极小，此时钢筋、CFRP 网格应变值均很小，随荷载线性增加，CFRP 网格应变值略大于钢筋应变值，符合平截面假定；屈服阶段为混凝土开裂至受拉钢筋屈服前这一时期，混凝土开裂后，开裂部分混凝土失去承载能力，这部分荷载由钢筋与 CFRP 网格共同承担，因此曲线斜率放缓，钢筋和 CFRP 网格应变增加速度变快；破坏阶段为钢筋屈服至试件破坏，当荷载增加至钢筋屈服荷载时，钢筋进入屈服阶段，此时钢筋应变迅速增加，CFRP 网格承受更大拉力，应变也随之迅速增加，曲线出现明显转折点，显然 PCM-CFRP 网格加固可有效延后钢筋进入屈服阶段。

图 8 为不同角度、宽度 U 型箍在箱形梁破坏时距离 CFRP 网格底板不同高度处的应变分布情况。A45W120、A90W120 和 A45W240 试件在梁破坏时，其在距离 CFRP 网格底板 20 mm 高度处的应变值分别为 $2\,640\times10^{-6}$ 、 $2\,190\times10^{-6}$ 、 418×10^{-6} ；距离 CFRP 底板高度 100 mm 处的应变值分别减小为 296×10^{-6} 、 149×10^{-6} 、 71×10^{-6} ；距离 CFRP 底板

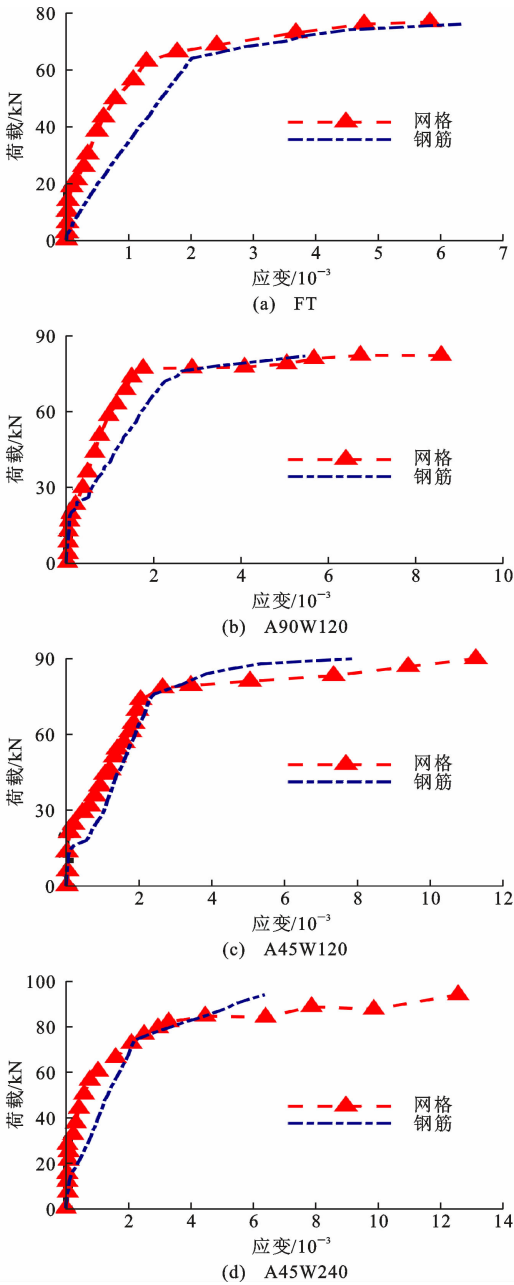


图 7 各试件跨中荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain Curves in mid-span of each specimen

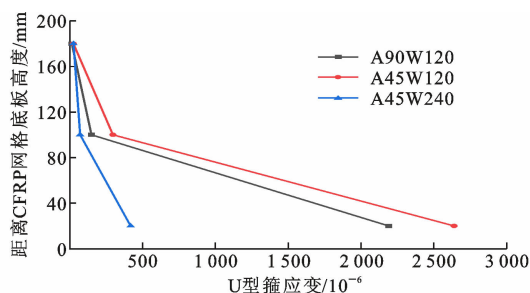


图8 U型箍破坏应变

Fig. 8 U-hoops break strain

高度 180 mm 处的应变值分别减小为 25×10^{-6} 、 14×10^{-6} 、 26×10^{-6} 。分析试验结果可知,U 型箍应变分布并不均匀,随着距离梁底 CFRP 网格高度减小而逐渐变大,其最大应变值出现在距离底部 20 mm 处,靠近受拉钢筋所处高度截面处。各试件中 U45W120 试件 U 型箍破坏应变最小,说明其在整个试验过程中,U 型箍的材料强度利用率最好,且能明显提升底部 CFRP 网格材料的强度利用率。

3 结 语

(1)PCM-CFRP 网格组合加固系统能有效提升钢筋混凝土箱梁的正截面抗弯性能,在使用 CFRP 网格 U 型箍进行端部锚固后,箱梁的抗弯承载力以及底部 CFRP 网格的抗拉利用率都有进一步提升。

(2)碳纤维网格 U 型箍的角度和宽度对钢筋混凝土箱梁的性能具有显著影响,45°斜向 U 型箍锚固对中部剥离破坏具有明显遏制作用。

(3)本文仅探究了有限角度和宽度的 CFRP 网格 U 型箍锚固对箱形梁抗弯性能的影响,针对更多角度、宽度以及层数的 CFRP 网格 U 型箍,可开展进一步系统性的研究,同时在底部使用 PCM-CFRP 网格 U 型箍加固的基础上,可进一步研究预应力 CFRP 网格加固钢筋混凝土箱形梁的抗弯性能和斜截面抗剪性能。

参考文献:

References:

[1] 吴万开,方海,顾刘勇,等.基于改性磷酸盐水泥的 CFRP 网格加固钢筋混凝土板的受弯试验[J].混凝土,2020(4):153-156.
WU Wankai, FANG Hai, GU Liuyong, et al. Bending test of reinforced concrete slabs strengthened with CFRP mesh based on magnesium phosphate cementitious[J]. Concrete, 2020(4): 153-156.

[2] KHALIFA A, NANNI A. Rehabilitation of rectan-

gular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(3): 135-146.

[3] 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.

[4] 徐世烺,蔡向荣.超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能[J].水利学报,2009,40(9):1055-1063.
XU Shilang, CAI Xiangrong. Experimental study on mechanical properties of ultra-high toughness fiber reinforced cementitious composite[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1055-1063.

[5] 王新玲,苏会晓,李可,等.FRP 网格增强 ECC 加固素混凝土柱受压性能数值分析[J].建筑科学,2018,34(3):22-29.
WANG Xinling, SU Huixiao, LI Ke, et al. Numerical analysis of compressive performance of plain concrete columns strengthened with FRP-grid and ECC [J]. Building Science, 2018, 34(3): 22-29.

[6] 朱忠锋,王文炜.FRP 编织网/ECC 复合加固钢筋混凝土圆柱力学性能的试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(5):1082-1087.
ZHU Zhongfeng, WANG Wenwei. Experimental study on mechanical behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with FRP textile and ECC[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 1082-1087.

[7] WANG B, UJI K, WU T, et al. Experimental investigation of stress transfer and failure mechanism between existing concrete and CFRP grid-sprayed PCM [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 43-58.

[8] AMIRUDDIN A A. Shear behavior of concrete beams strengthened with CFRP grid and PCM shotcrete[J]. EPI International Journal of Engineering, 2019, 2(1): 5-8.

[9] HINO S, YAMAGUCHI K. Shearing capacity for RC beam with CFRP grid by reinforcement regions in haunch[C]//ACF. Proceedings of the 6th International Conference of Asian Concrete Federation. Seoul: ACF, 2014:9.

[10] 王博,王媛媛,王征鹏,等.CFRP 网格-聚合物水泥砂浆加固 RC 梁抗剪承载力计算方法[J].复合材料学报,2023,40(2):990-1003.
WANG Bo, WANG Yuanyuan, WANG Zhengpeng,

- et al. Study on calculation method of RC beam's shear bearing capacity of CFRP grid-polymer cement mortar[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(2): 990-1003.
- [11] 曹 亮,张海燕,吴 波.纤维编织网增强地聚物砂浆加固钢筋混凝土梁受剪性能研究[J]. *工程力学*, 2019,36(1):207-215.
- CAO Liang, ZHANG Haiyan, WU Bo. Shear behavior of RC beams strengthened with textile reinforced geopolymer mortar [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(1): 207-215.
- [12] GHAYEB H H, ATEA R S, AL-KANNOON M A A, et al. Performance of reinforced concrete flat slab strengthened with CFRP for punching shear[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e01801.
- [13] GUO R, CAI L H, HINO S, et al. Experimental study on shear strengthening of RC beams with an FRP grid-PCM reinforcement layer[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15): 2984.
- [14] 杜 敏,陈思远,郭兢业,等.纤维增强复合材料网格-环氧砂浆加固混凝土梁的抗剪性能试验[J]. *工业建筑*, 2021,51(8):206-213,119.
- DU Min, CHEN Siyuan, GUO Jingye, et al. Experimental research on shear properties of RC beams reinforced with FRP grids and epoxy mortar[J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(8): 206-213, 119.
- [15] 刘 浪,余文成,雷 芸,等.CFRP加固损伤 RC 梁抗弯性能试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2022, 44(2):66-71.
- LIU Lang, YU Wencheng, LEI Yun, et al. Experimental study on flexural performance of CFRP reinforced RC beams[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2022, 44(2): 66-71.
- [16] 赵洪飞,张译文,王卫东,等.纤维网格增强砂浆加固 RC 单向板抗弯性能[J]. *工程抗震与加固改造*, 2022, 44(3):149-156,46.
- ZHAO Hongfei, ZHANG Yiwen, WANG Weidong, et al. Flexural behavior of one-way RC slabs strengthened with textile reinforced mortar [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2022, 44(3): 149-156, 46.
- [17] 王苏岩,张红涛,朱方芳,等.复杂环境及荷载共同作用下 CFRP 加固高强钢筋混凝土梁受力性能试验[J]. *建筑科学与工程学报*, 2018,35(4):54-62.
- WANG Suyan, ZHANG Hongtao, ZHU Fangfang, et al. Mechanical performance test of high-strength reinforced concrete beam strengthened by CFRP under combined action of complex environment and loading[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2018, 35(4): 54-62.
- [18] 彭 晖,刘 洋,付俊俊,等.冻融循环作用下表层嵌贴 CFRP-混凝土界面黏结性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017,44(5):63-72.
- PENG Hui, LIU Yang, FU Junjun, et al. Experimental study of bond between near-surface mounted CFRP strips and concrete under freeze-thawing cycles[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017,44(5):63-72.
- [19] QIANG X H, CHEN L L, JIANG X. Experimental and theoretical study on flexural behavior of steel-concrete composite beams strengthened by CFRP plates with unbonded retrofit systems[J]. *Composite Structures*, 2023, 309: 116763.
- [20] TATAR J, VINIARSKI C, ISHFAQ M, et al. Effect of U-wrap anchors on flexural behavior of reinforced concrete beams flexurally strengthened with externally bonded CFRP sheets[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2023, 27(1): 04022099.