

碳纤维布与钢板复合加固 RC 梁抗震性能试验

廖绍怀^{1,2}, 卢亦焱¹, 陈道凡¹

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 华中科技大学土木工程与力学学院, 武汉 430074)

摘要:碳纤维布或钢板加固混凝土构件在改善结构抗震性能上均存在不足,二者复合加固具有互补性。基于此,对 6 根钢筋混凝土梁(5 根梁加固)在低周反复荷载作用下的抗震性能进行对比试验,对其破坏特征、滞回曲线、位移延性系数、骨架曲线、刚度退化、承载能力进行对比分析。试验结果表明:复合加固更有效地提高梁的承载力、延性和变形能力,减缓刚度退化,改善钢筋混凝土梁的抗震性能,碳纤维布与钢板能较好地协同工作。

关键词:复合加固;钢筋混凝土梁;低周反复荷载;抗震性能

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)06-0014-08

Test on Seismic Behaviors of Reinforced Concrete Beams Composite Rehabilitation with Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer and Steel Plate

LIAO Shao-huai^{1,2}, LU Yi-yan¹, CHEN Dao-fan¹

(1. School of Civil Engineering, Wu Han University, Wu Han 430072, P. R. China;

2. School of Civil Engineering & Mechanics, Hua Zhong University of Science & Technology, Wu Han 430074, P. R. China)

Abstract: Neither the Carbon Fiber Reinforced Plastic nor the steel plate strengthening concrete components shows sufficiency in improving the structures' seismic behaviors independently, while they complement each other by the way of composite strengthening. Six reinforced concrete beams, five of which are strengthened, were comparatively and experimentally tested under low frequency cyclic load to investigate their mechanical performances such as characteristic of resilience, hysteretic curve, seismic behaviors, skeleton curve, degeneration of rigidity and loading capacity. It is indicated that the way of composite strengthening can boost the beams' ultimate bearing capacity, ductility and deformability capacity effectively, and it can delay rigidity degeneration and improve the seismic behaviors of the beams. Also, the CFRP and steel plate can work together very well.

Key words: composite strengthening; reinforced concrete beam; low frequency cyclic load; seismic behaviors

用碳纤维布(CFRP)或钢板对混凝土构件进行单一材料加固的技术在加固工程应用中已成熟^[1-2],但二者在改善结构抗震性能上均存在不足。粘 CFRP 加固^[3-6]构件的延性降低,同时由于纤维材料

的脆性性能,其破坏具有一定的突然性,且 CFRP 不易锚固;而粘钢加固构件^[7-8],加载至破坏过程中可以保持较好的延性,且钢板易于锚固,但是钢板的厚度和层数受限,CFRP 加固材料轻而薄、易粘贴性能

收稿日期:2010-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678136);湖北省青年杰出人才基金 2004ABB014

作者简介:廖绍怀(1964-),男,副教授,硕士生导师,博士生,主要从事建筑结构教学、科研和设计等工作,(E-mail)lshxhy@126.com。

卢亦焱(联系人),男,教授,博士后,博士生导师,(E-mail)yylu901@163.com。

可改善粘钢加固的不足,故二者复合加固具有互补性。CFRP 与钢板复合加固梁^[10],作为一种新的加固形式,国内外对其研究很少。采用粘 CFRP 或粘钢板加固钢筋混凝土结构抗震性能研究,主要集中在柱、节点和框架^[9-13],对于梁的抗震性能研究见诸报道也很少,而复合加固梁的抗震性能研究尚未见报道。因此,论文对 CFRP 及钢板加固梁在低周反复荷载作用下进行对比试验和对比分析,以期对 CFRP 与钢板复合加固梁抗震性能有较全面的了解,为工程应用提供试验依据。

1 试验概况

1.1 试验材料性能

试验梁的混凝土强度设计为 C35,其实测 28 d 立方体抗压强度的平均值为 42.4 N/mm^2 。混凝土的配合比为 $C:W:S:G=1:0.48:1.55:3.0$,水灰比为 0.48。试验梁中纵筋为 $2\Phi 12$,试验梁中所用材料的实测力学性能如表 1 所示。

表 1 所用材料的力学性能

型号	实测直径或厚度/mm	屈服或拉伸强度/MPa	极限强度/MPa	延伸率/%
$\phi 8$	7.8	249.2	353.6	31.2
$\Phi 12$	10.2	375.8	541.1	17.8
Q235 钢	1.85	249.5	360.5	20.2
(CFRP)UT70-20	0.111	4240	—	1.9

1.2 试件设计

试验梁一批成形,截面尺寸: $150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,跨度为 2.1 m,净跨 1.95 m,采用对称配筋,均为 $2\Phi 12$ 。为确保试验梁在加固量较大的情况下仍有抗剪富余,箍筋在纯弯区段配置为 $\Phi 8@200$,剪跨区段配置为 $\Phi 8@100$ 。试验梁截面尺寸、配筋及加固见图 1、图 2 所示,试件设计如表 2 所示。

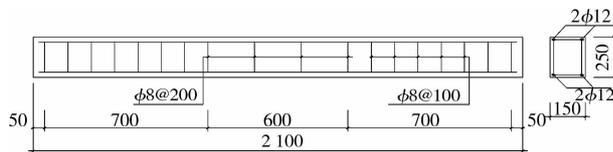


图 1 试验梁

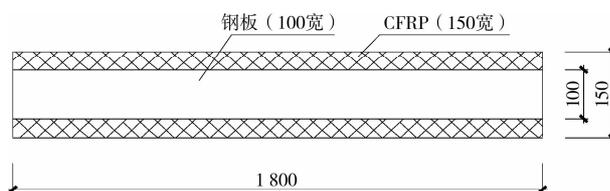


图 2 钢板与 CFRP 钢板粘帖示意

表 2 试件设计

试件编号	加固方式	CFRP 面积/ mm^2 及长度/mm	钢板面积/ mm^2
LA-1	未加固	—	—
LA-2	1 层 CFRP	16.65(1800)	—
LA-3	2 层 CFRP	33.30(1800)	—
LA-4	1 层钢板	—	185
LA-5	1 层钢板+1 层 CFRP	16.65(1800)	185
LA-6	1 层钢板+2 层 CFRP	33.30(1800)	185

1.3 锚固方法

大量试验和工程实际应用表明^[1],采用封闭的 CFRP 箍和 U 型钢板箍可有效地防止锚固区因应力集中而产生的粘结锚固破坏^[14-15]。考虑到本实验采用低周反复加载方式,对仅贴碳纤维布的试件采用封闭的 CFRP 箍,对外粘钢板的试件则采用封闭的钢板箍进行锚固。

1.4 加载方案

试验梁中采用分配梁三分点二集中力加载,采用荷载—位移双控制的方法^[16],即:1) 试件屈服前,采用荷载控制,按预计屈服荷载 Q_y 的 75% 为极差分级加载,接近开裂及屈服荷载适当减少极差进行加载。2) 试件屈服后采用变形控制,屈服位移 δ_y 取梁纵筋屈服或钢板屈服时构件位移,以该位移值的整数倍为极差进行加载控制。3) 试件屈服后每级荷载往复 3 次。加载制度见图 3。加载设备为 300 kN 机械式千斤顶,千斤顶连接 YJ-X4 上海新达数显静态应变仪进行读数控制,10 kN 对应的应变为 $95 \mu\epsilon$ 。每级荷载下通过东华 DH3816 静态应变仪测试系统记录应变值,同时在试验中随时观测裂缝发展并描绘其发展情况。

1.5 测试内容及测点布置

试验的具体测量包括以下内容:1) 混凝土开裂前及开裂后量测跨中纯弯区段截面各点应变。2) 在试验梁底及梁顶部钢板的中部均对称粘贴 2 个 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的电阻应变片,测量钢板的应变。3) 在试验梁底及梁顶部 CFRP(未粘钢板的两侧)纯弯区段中部均对称粘贴 2 个 $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的电阻应变片,测量 CFRP 的平均拉应变。4) 试验梁内钢筋于浇注前在纯弯区段中部预埋粘贴 6 个 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的电阻应变片,测量钢筋的平均拉压应变。5) 在试验梁跨中放置位移计以量测跨中挠度。

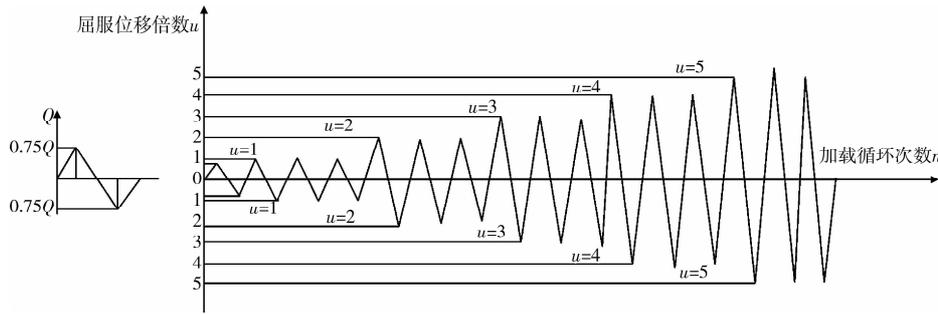


图 3 加载制度

2 试验结果分析

2.1 试验结果

各试验梁的试验结果如表 3 所示。

2.2 破坏形态

2.2.1 破坏过程 试验结果表明,在低周反复荷载作用下,未加固梁(LA-1)从加荷到破坏经历 3 个受力阶段即开裂前弹性工作、带裂缝工作、钢筋屈服后混凝土裂缝达到限值 1.5 mm 而破坏。仅采用碳纤维布加固梁(LA-2、LA-3)从加荷到破坏经历 4 个受力阶段即开裂前弹性工作、带裂缝工作、钢筋屈服、

碳纤维布与混凝土剥离拉断而破坏。仅采用钢板加固梁(LA-4)从加荷到破坏经历 4 个受力阶段即开裂前弹性工作、带裂缝工作、钢板屈服、钢筋屈服、钢板与混凝土剥离且混凝土裂缝达到限值 1.5 mm 而破坏。采用碳纤维布(CFRP)与钢板复合加固梁(LA-5、LA-6)从加荷到破坏经历 4 个受力阶段即开裂前弹性工作、带裂缝工作、钢板屈服、钢筋屈服、碳纤维布剥离且混凝土裂缝达到限值 1.5 mm 而破坏。在实验加载过程中,复合加固梁在破坏前碳纤维布与钢板能很好的协同工作。

表 3 试验结果

试件编号	开裂荷载/kN	纵筋屈服		钢板屈服		极限荷载		延性系数	破坏形态
		荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm		
LA-1	21	40.5	4.104	—	—	45	16.278	3.97	受弯破坏,
LA-2	27	45	3.722	—	—	70	16.265	4.44	受弯破坏
LA-3	30	55	4.297	—	—	85	17.842	4.15	受弯破坏
LA-4	25	-62	-8.161	-57	-5.025	-80	-22.652	4.51	受弯破坏
LA-5	33	80	5.526	70	3.39	115	18.424	5.43	受弯破坏,
LA-6	35	85	7.195	75	4.657	120	23.010	4.94	受弯破坏,

2.2.2 破坏形态 试验过程中,试验梁始于受拉区首先屈服而进入破坏阶段,破坏前挠度增加较快,裂缝迅速开展,破坏前有明显的预兆,表现了较好的承受变形的能力,属于延续破坏。这是因为试验梁采用对称配筋和对称加固的型式,混凝土相对受压区高度均在界限相对受压区高度之内,故具有适筋梁受力破坏形态特点。

2.3 滞回特性与分析

2.3.1 滞回曲线 结构在低周反复荷载作用下的荷载-位移滞回曲线能够较全面地反映构件受力性能的变化,如裂缝的开闭、钢筋的屈服和强化、局部混凝土的剥落、压碎以及破坏等;并且可以反映强

度、刚度和延性等方面的力学特征。此次试验各试件的滞回曲线见图 4 至图 9。

在低周反复荷载作用下,钢筋混凝土受弯构件滞回性能取决于构件的破坏特征。钢筋混凝土梁发生弯曲破坏时,在钢筋屈服前,其滞回曲线呈稳定的梭形,刚度退化较小,强度没有降低,骨架曲线与循环加载的荷载-变形曲线基本重合。钢筋屈服后,刚度开始退化,滞回曲线有所捏拢。从以上各试件的滞回曲线可以看出,未加固试件 LA-1 呈典型的弯曲破坏状态,滞回曲线形状比较饱满。对比各加固试件可发现,各加固梁均表现出较好的变形能力和耗能能力,试件刚度衰减较慢。比较 LA-1 和 LA-2

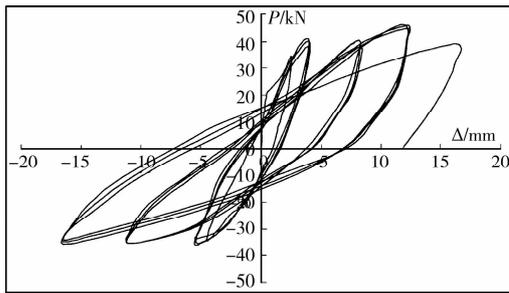


图 4 LA-1 的滞回曲线

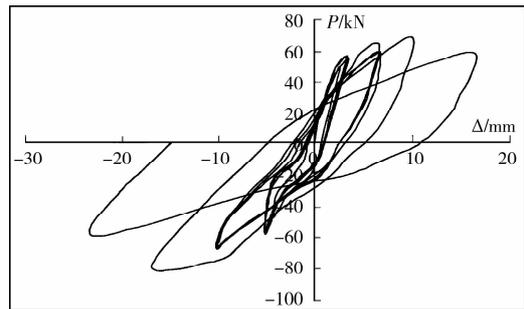


图 7 LA-4 的滞回曲线

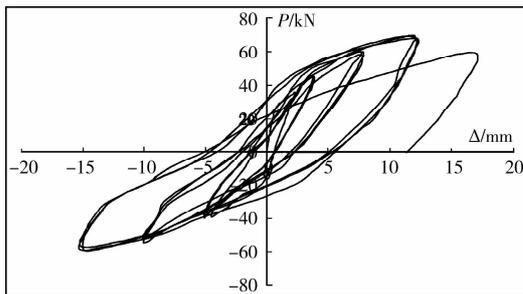


图 5 LA-2 的滞回曲线

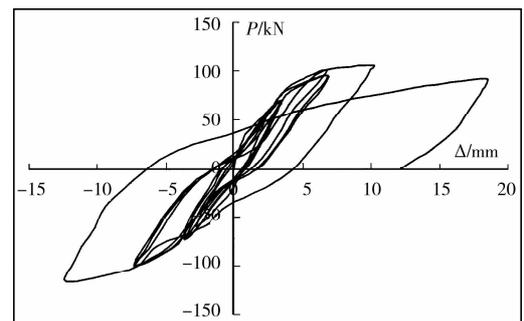


图 8 LA-5 的滞回曲线

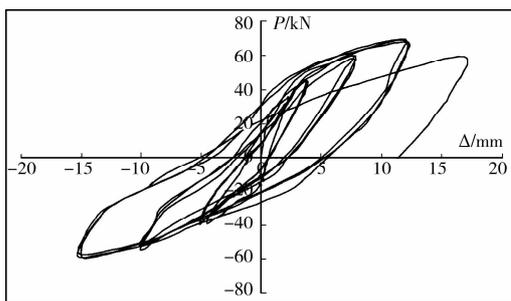


图 6 LA-3 的滞回曲线

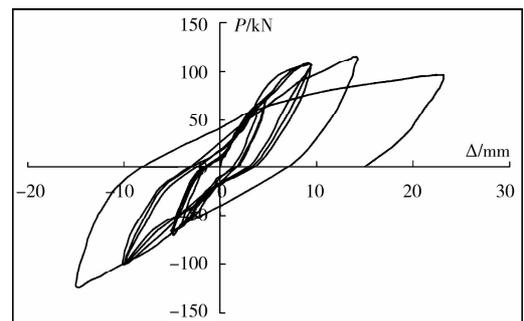


图 9 LA-6 的滞回曲线

知,梁的承载能力有较大的提高,刚度退化减缓很多,变形能力也有所改善;比较 LA-2 和 LA-3 知,梁的承载能力有所提高但不明显,且随着 CFRP 加固量的增加,试件的滞回环变得略为扁平;比较 LA-1 和 LA-4 知,随着钢板加固量的增加,梁的承载力有很大幅度的提高,并且梁的变形能力和刚度退化均有较大的改善;比较 LA-2 和 LA-5 以及 LA-4 和 LA-5 知,复合加固较单一材料加固无论在承载力提高上还是变形能力上均有较大的改善,且刚度退化有所减缓;比较梁 LA-4、LA-5、LA-6 知,随着 CFRP 加固量的增加,梁的承载力提高但随着 CFRP 量的进一步增多时承载力提高的幅度减缓。总之,从定性角度来看,对比梁单一材料加固,2 种材料的复合能更显著改善梁的抗震性能。

2.3.2 骨架曲线与承载力比较分析 骨架曲线是将荷载一位移滞回曲线的所有峰值点连接起来所得

的包络线,骨架曲线的形状与单调加载时的荷载一位移曲线非常相似,而极限荷载值比单调加载时略低。

骨架曲线可以用来定性比较和衡量结构构件的抗震性能。试验中各试件的骨架曲线见图 10 至图 14。

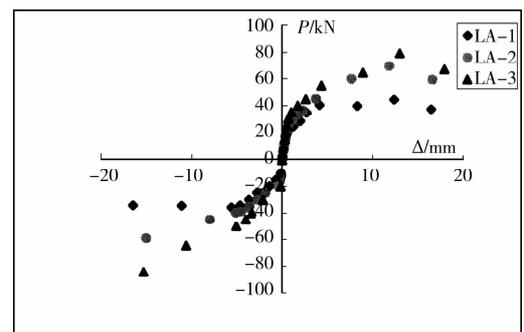


图 10 LA-1、LA-2、LA-3 骨架曲线

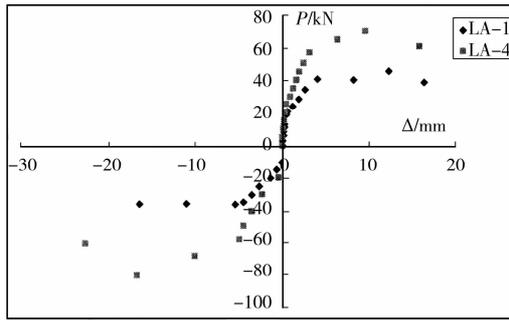


图 11 LA-1、LA-4 骨架曲线

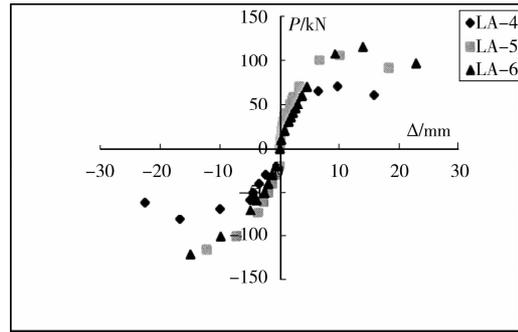


图 13 LA-4、LA-5、LA-6 骨架曲线

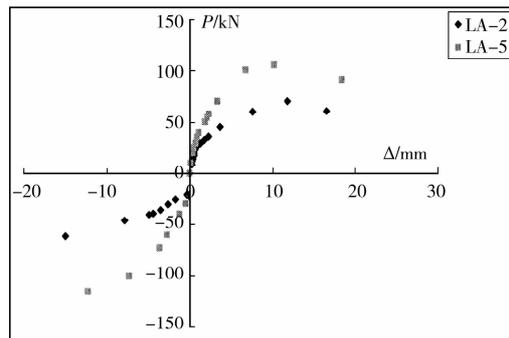


图 12 LA-2、LA-5 骨架曲线

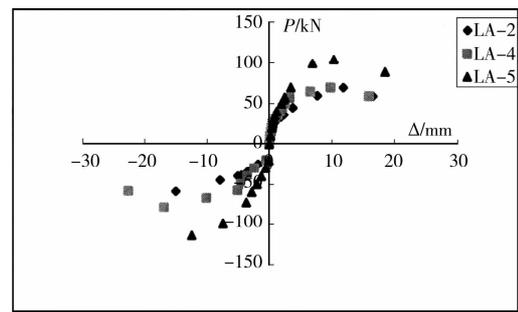


图 14 LA-2、LA-4、LA-5 骨架曲线

从图 10 至图 14 可看出,加固梁与未加固梁相比,屈服荷载、极限荷载均有较大幅度的提高,并且极限位移与屈服位移的比值即延性系数均提高。由图 10 知,随着 CFRP 加固量增加,试件的极限荷载提高,前者破坏态为 CFRP 拉断,而后者为 CFRP 剥离,CFRP 的作用没得到充分利用而使承载力提高的幅度有所下降;并且在屈服前三者刚度基本相同,这说明 CFRP 对梁弹性刚度的提高作用有限。由图 11、图 12 知,用钢板加固梁既可以较大幅度提高梁的极限承载能力和刚度,又可增加其变形能力。由图 13、图 14 知,复合加固较单一材料加固其加固效果更显著,既可以大幅度提高梁的极限承载能力,又能改善构件的延性和增强试件的抗震性能。由表 3 知,CFRP 或钢板或复合加固既能提高试件的开裂荷载(依次提高 28.6%、42.9%、19.0%、57.1%、66.7%),又能提高极限承载力(依次提高 55.6%、

88.9%、77.8%、155.6%、166.7%)。而复合加固更显著提高梁开裂荷载和极限承载能力。

2.4 刚度退化及刚度变化分析

2.4.1 刚度退化分析 在位移幅值不变的情况下,结构构件的刚度随反复加载的次数的增加而降低的特性为刚度退化,每施加一循环荷载后刚度降低的速率为刚度退化率。一般用同一级变形下的环线刚度来反映刚度退化的特性,环线刚度按下式计算:

$$K_n = \frac{\sum_{i=1}^n F_i^j}{\sum_{i=1}^n \Delta_i^j} \quad (1)$$

式中, K_n 表示环线刚度; F_i^j 表示位移延性系数为 j 时,第 i 次循环的峰值荷载; Δ_i^j 为位移延性系数为 j 时,第 i 次循环的变形峰值。

根据试验,由试 1 计算出所有时间的环线刚度 K_n 见表 4 所示。

表 4 梁的环线刚度

试件编号	环线刚度											
	1 倍屈服位移时				2 倍屈服位移时				3 倍屈服位移时			
	正向		反向		正向		反向		正向		反向	
	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3
LA-1	9.870	9.680	6.506	6.392	4.834	4.684	3.157	3.072	3.654	3.513	2.120	2.045
LA-2	12.09	11.94	7.924	7.793	7.861	7.665	5.51	5.388	5.594	5.771	3.995	3.869
LA-3	12.8	12.64	10.0	9.841	7.335	7.161	6.153	6.019	—	—	—	—

续表 4

试件编号	环线刚度											
	1 倍屈服位移时				2 倍屈服位移时				3 倍屈服位移时			
	正向		反向		正向		反向		正向		反向	
	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3
LA-4	17.65	17.47	11.48	11.32	9.977	9.765	6.733	6.589	—	—	—	—
LA-5	20.65	20.46	19.86	19.65	14.66	14.41	13.57	13.35	—	—	—	—
LA-6	15.03	14.88	13.92	13.75	11.36	11.16	9.958	9.791	—	—	—	—

定义刚度退化率 T 为:

$$T = (K_1 - K_2)/K_1 \times 100\%$$

根据试验,所有试件的刚度退化率 T 计算结果

(2) 如表 5 所示。

表 5 梁的刚度退化率 (%)

试件编号	退化率					
	1 倍屈服位移时		2 倍屈服位移时		3 倍屈服位移时	
	正向	反向	正向	反向	正向	反向
LA-1	1.925	1.752	3.103	2.692	3.859	3.538
LA-2	1.241	1.653	2.493	2.214	3.073	3.154
LA-3	1.25	1.59	2.372	2.178	—	—
LA-4	1.02	1.393	2.124	2.139	—	—
LA-5	0.92	1.057 3	1.705	1.621	—	—
LA-6	0.998	1.221	1.761	1.677	—	—

从表 4、表 5 可看出,随着循环次数的增加,梁的刚度减小即刚度退化,且随着位移的增加,退化率增大,耗能能力下降。相比未加固试件,试件破坏前,加固试件的刚度退化率小,这说明用碳纤维布或钢板加固可以减缓刚度的退化。比较 LA-2、LA-4、LA-5、LA-6 知,复合加固的试件的刚度退化率更小,且复合加固试件在各级控制位移下,刚度随循环次数的增加退化现象不明显,说明复合加固效果更好。

2.4.2 刚度变化分析 从荷载一位移滞回曲线图看出,随着往复荷载的不断增大,试件的刚度逐渐减小。可用相对刚度 K_i/K_0 来描述,其中 K_i 表示骨架曲线第 i 个峰值点与原点连线的斜率,在计算初始刚度 K_0 时取原点与 0.75 倍屈服荷载点连线的斜率。

各试件的初始刚度值 K_0 ,各级位移下刚度 K_i 及相对刚度 K_i/K_0 见表 6 至表 7。其中屈服时刚度为 K_1 ,2 倍屈服位移时刚度为 K_2 ,3 倍屈服位移时刚度为 K_3 。

表 6 K_0 及 K_i (kN/mm)

试件编号	LA-1		LA-2		LA-3		LA-4		LA-5		LA-6	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
K_0	12.86	7.521	16.66	9.758	17.27	11.39	19.89	12.17	24.24	21.48	15.73	14.6
K_1	9.868	6.506	12.09	7.924	12.80	10.0	17.65	11.48	20.65	19.86	15.03	13.92
K_2	4.834	3.157	7.862	5.047	7.336	6.153	9.977	7.333	14.65	13.57	11.36	9.958
K_3	3.654	2.120	5.594	3.995	6.208	5.56	7.171	6.242	10.26	9.277	8.155	7.93

表 7 相对刚度 K_i/K_0

试件编号	LA-1		LA-2		LA-3		LA-4		LA-5		LA-6	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
K_1	0.767	0.865	0.726	0.812	0.741	0.878	0.887	0.943	0.852	0.924	0.955	0.953
K_2	0.376	0.42	0.472	0.517	0.425	0.54	0.502	0.603	0.604	0.632	0.722	0.682
K_3	0.284	0.282	0.357	0.409	0.359	0.488	0.361	0.512	0.423	0.432	0.518	0.543

由表 6 知, 钢板加固可显著提高梁的初始刚度 K_0 , 而碳纤维布对梁的初始刚度影响不及钢板大, 且随着位移的增加, 各试件的刚度均有大幅度的减小。

由表 7 知, 加固试件的相对刚度均比未加固试件要高, 钢板加固时, 梁的相对刚度比碳纤维布加固时的相对刚度大, 说明钢板对梁刚度的衰减可以起到更好的抑制作用。比较复合加固和粘钢加固, 复合加固试件的相对刚度大于粘钢加固试件的相对刚度, 这是由于碳纤维布的使用, 试件的刚度衰减受到了抑制。

2.5 变形能力分析

2.5.1 变形恢复能力 梁的变形恢复能力大小可以用残余变形率 n (残余变形 Δ_e 与极限变形 Δ_u 的比值) 表示, 残余变形率越低, 变形恢复能力越强。所有试件的变形恢复性能指标见表 8。

表 8 试件的变形恢复能力

试件编号	荷载方向	残余变形 Δ_e /mm	极限变形 Δ_u /mm	残余变形率 (Δ_e/Δ_u)
LA-1	正向	11.826	16.278	0.720
LA-2	正向	11.312	16.524	0.684
LA-3	正向	12.346	17.842	0.692
LA-4	反向	-14.924	-22.652	0.664
LA-5	正向	12.132	18.424	0.658
LA-6	正向	15.012	23.010	0.652

由表 8 可知, 各梁的残余变形率在 0.65~0.72, 均表现出一定的变形恢复能力; 碳纤维布加固和钢板加固均能提高梁的变形恢复能力, 而复合加固梁的变形残余率较单一材料加固小, 表明复合加固梁的变形恢复能力更高。

2.5.2 延性分析 根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-96)^[10], 试件的延性系数 μ , 应根据极限位移 Δ_u 和屈服位移 Δ_y 之比计算, 各试件的延性系数见表 9。

表 9 梁的延性系数

试件编号	荷载方向	开裂位移 Δ_{cr} /mm	屈服位移 Δ_y /mm	极限位移 Δ_u /mm	延性系数 μ
LA-1	正向	0.612	4.104	16.278	3.97
LA-2	正向	0.792	3.722	16.524	4.44
LA-3	正向	0.654	4.297	17.842	4.15
LA-4	反向	0.507	-5.025	-22.652	4.51
LA-5	正向	0.772	3.39	18.424	5.43
LA-6	正向	1.896	4.657	23.010	4.94

从表 9 可以看出, 各梁的延性系数都大于 3, 均表现出较好的延性。加固试件的延性系数均大于未加固试件, 延性系数依次提高 11.8%、4.53%、13.6%、36.8%、24.4%。单一材料加固时, 钢板加固提高的幅度最大, 其次为一层布加固; 复合加固试件的延性系数较单一材料加固提高, 说明复合加固对构件的抗震性能有明显的改善; 而当增加碳纤维布层数时, 其延性系数提高幅度降低, 原因在于其加固破坏形式为碳纤维布剥离或拉断。

3 结论

通过对 6 根钢筋混凝土梁(5 根加固)在低周反复荷载作用下的试验研究, 对各试件的破坏形态、滞回特性、刚度退化、变形恢复能力、延性、承载能力等进行了对比分析, 得到如下结论:

1) 试验梁始于受拉区首先屈服而进入破坏阶段, 破坏前有明显的预兆, 表现了较好的承受变形的能力, 属于延续破坏。碳纤维布与钢板能较好地协同工作。

2) 复合加固能进一步提高梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载。

3) 相比单一材料加固, 复合加固进一步减缓梁的刚度退化, 进一步提高梁的变形恢复能力和延性系数; 表明复合加固能更有效地改善梁的抗震性能。

参考文献:

- [1] 高作平, 陈明祥. 混凝土结构粘结加固技术新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 刘飞. 粘钢加固技术在建筑物中的应用[J]. 山西建筑, 2005, 28(11): 115-116.
LIU FEI. Application of adhesive steel stabilization technology in architecture [J]. Shanxi Architecture, 2005, 28(11): 115-116.
- [3] RABINOVITCH O, FROSTIG Y. Experiments and analytical comparison of RC beams strengthened with CFRP composites[J]. Composites part B, December 1, 2003, 34(8): 663-677
- [4] AYMAN S KERNEL, ALAA E ELWI, ROGER J J CHENG. Experimental study on the behavior of carbon fiber reinforced polymer sheets bonded to concrete[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(11): 47-66.
- [5] JONQSUNQ S, HONGSEDB O. Structural assessment of externally flexural strengthened reinforced concrete beam after repaired with polymer mixture [J]. Composites Interfaces, 2006, 13(1): 47-66.
- [6] ABDALLA H A. Evaluation of deflection in concrete

- members reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) bars[J]. *Composite Structures*, 2002, 56: 63-71.
- [7] 邹昀,周定松. 粘钢加固混凝土梁抗弯强度的理论研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2005, 31(6):85-91.
ZHOU YUN, ZHOU DING-SONG. Analytical study on reinforced concrete beam strengthened by steel plate [J]. *Sichuan Building Science*, 2005, 31(6):85-91.
- [8] 高轩能,周期源,陈明华. 粘钢加固 RC 梁承载性能的理论研究和试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(8):38-44.
GAO XUAN-NENG, ZHOU QI-YOUN, CHEN MING-HUA. Theoretical and experimental research on bearing behavior of RC beams strengthened by bonded steel plates[J]. *Civil Engineering Journal*, 2006, 39(8): 38-44.
- [9] 卢亦焱,周婷. 碳纤维布与钢板复合加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. *北京:铁道学报*, 2006, 28(1): 80-87.
LU YE-YAN, ZHOUTING. Experimental Research on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Combination Strengthened with Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer and Steel plates[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2006, 28(1):80-87.
- [10] 卢亦焱,童光兵,张号军. 外包钢与碳纤维布复合加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2006, 27(1):109-114.
LU YE-YAN, TONG GUANG-BING, ZHUANG HAO-JUN. Experimental research on RC eccentric compression column strengthened with the combination of CFRP and angle steel [J]. *Journal of Building Structures*, 2006, 27(1):109-114.
- [11] GHOBARAH A, EL-AMOURY T. Seismic rehabilitation of deficient exterior concrete frame joints [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(5): 408-416.
- [12] TASTANI S P, PANTAZOPOULOU S J. Detailing procedures for seismic rehabilitation of reinforced concrete members with fiber reinforced polymers [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(2): 450-461.
- [13] 吴波,王维俊. 碳纤维布加固钢筋混凝土框架节点的抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(4):60-65.
WU BO, WANG WEI-JUN. An Experimental study on the seismic behaviour of beam-column joints strengthened with carbon fiber sheets [J]. *Civil Engineering Journal*, 2005, 38(4):60-65.
- [14] WEI CHEN-X, LEI Z, YUAN T. Experimental studies on bond behavior of high strength CFRP plates [J]. *Composites Part: B*, 2008, 39:592-603.
- [15] BARROS JAO, DIAS SJE, LIMA JLT. Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2007, 29:203-217.
- [16] JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.

(编辑 王秀玲)