

预应力 CFRP 与钢板加固 T 形梁抗弯荷载、刚度及裂缝分析

朱广山^{1,2}, 朱浮声¹, 盛国华³, 马作鑫²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要 目的 为获得 T 形梁复合加固效果及不同加固参数对承载力、刚度及裂缝的影响规律. 方法 对 10 根混凝土试件进行抗弯性能试验, 对比分析荷载-挠度及荷载-裂缝条数关系. 结果 复合加固 T 形梁开裂荷载 P_{cr} 、屈服荷载 P_y 、极限荷载 P_u 达到对比梁的 242.1%, 182.5% 和 196.8%. P_{cr} 、 P_y 随着预应力提高而增加, P_u 略降低; 随 CFRP 层数增加, P_{cr} 、 P_y 与 P_u 呈线性增长; 预裂梁 P_y 与 P_u 达到对比梁 150% 以上. 预应力 10%~15% 时, 加固 2 层的屈服后刚度比 1 层提高近 1 倍. 复合加固裂缝最少, 随层数增加, 最大裂缝宽度随荷载增大而减小. 结论 复合加固对荷载及屈服后刚度影响明显, 并有阻裂效果, 可显著提高 T 形梁的抗弯性能.

关键词 T 形梁; 预应力 CFRP; 复合加固; 抗弯荷载; 抗弯刚度; 裂缝

中图分类号 TU375.1 文献标志码 A

Analysis on Anti-bending Load, Rigidity and Crack of Prestressed CFRP and Steel Plate Reinforced T-shape Beam

ZHU Guangshan^{1,2}, ZHU Fusheng¹, SHENG Guohua³, MA Zuoxin²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China, 110819; 2. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, China, 110870)

Abstract: The goal of the paper is to obtain the influence rule of composite reinforcement effect and different reinforcement parameters of T-shape beam on bearing capacity, rigidity and crack. The test on anti-bending performance of 10 pieces of concrete test pieces was done to compare and analyze the relationship between load-deflection and load-number of cracks. The results show that, cracking load P_{cr} , yield load P_y , and ultimate load P_u of composite reinforcement T-shape beam reached 242.1%, 182.5% and 196.8% of the compared beam. P_{cr} and P_y increase with the increase of prestress, and P_u decreases slightly; With the increase of CFRP layer, P_{cr} , P_y , and P_u show the linear growth trend; P_y and P_u of precracked beam reached over 150% of the compared beam.

收稿日期: 2017-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478276); 辽宁省教育厅基金项目(20156406)

作者简介: 朱广山(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事结构工程方面研究.

When the prestress increases in 10% ~ 15% ,the rigidity of reinforced two-layer after the yield increases nearly one time than that of one-layer. The number of crack generated by composite reinforcement is the least. With the increase of layer,the maximum crack width decreases as the increase of load. We can conclude that,the influence of composite reinforcement on load and rigidity after the yield is obvious,with anti-cracking effect,which can remarkably improve the anti-bending performance of T-shape beam.

Key words: T-shape beam; prestressed CFRP; composite reinforcement; anti-bending load; anti-bending rigidity;crack

混凝土桥梁主梁往往因为外界环境的影响及车辆超载而出现抗弯承载力及刚度不足的现象^[1-2]. 近些年,国内外学者对粘钢法及碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,CFRP)加固法开展了大量的理论及试验研究^[3-11]. 研究表明,采用单一 CFRP 加固后的混凝土构件截面延性会大幅降低,且破坏时具有突然性;采用单一钢板加固,其钢板厚度又受到限制. 而采用 CFRP 与钢板的复合加固技术则克服了单一材料加固的不足,成为了一种新兴技术^[12-15].

目前对梁的复合加固研究均采用普通 CFRP 与钢板进行复合加固,加固对象为矩形梁^[16-19]. 在正常的使用状态下未能充分发挥 CFRP 的抗拉性能,且其研究并未针对我国老、旧桥梁应用最为广泛的 T 形梁. 因此,开展对预应力 CFRP 与钢板复合加固 T 形梁的抗弯性能研究,使预应力 CFRP 充分发挥其材料的高强性能,有效控制裂缝开展,提高

被加固构件刚度具有重要意义. 笔者通过 1 根未加固 T 形梁,两根单一材料加固 T 形梁和 7 根复合加固 T 形梁的抗弯试验结果,量化了不同复合加固参数梁相对于未加固梁的荷载及抗弯刚度提高程度. 研究了预应力程度、CFRP 加固层数以及预裂程度对抗弯荷载、裂缝,以及构件刚度的影响规律,为复合加固 T 形梁的理论研究及工程设计提供试验依据.

1 试验概况

1.1 模型制作

试验模型以 T 形简支梁的缩尺模型为试验对象(比例 1:6). 主梁混凝土标号 C40,混凝土立方体试件的实测抗压强度为 47.2 MPa. 主梁内纵向受拉钢筋为 $\Phi 12$ mm,箍筋为 $\Phi 6$ mm,钢筋布置、模型参数如图 1 所示.

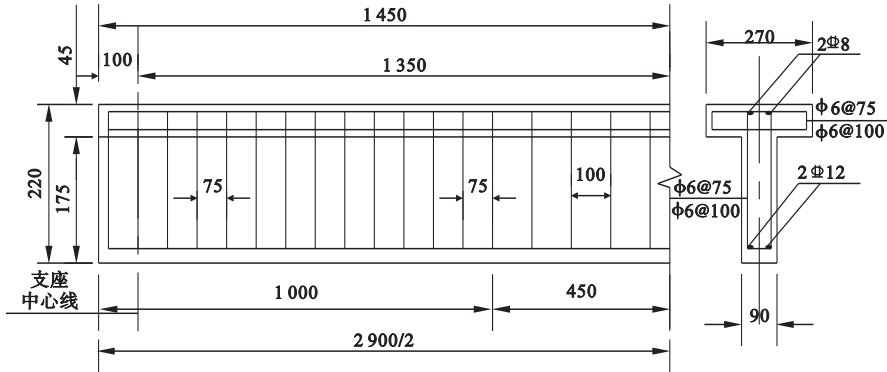


图 1 模型尺寸及截面配筋

Fig. 1 Model size and reinforcing bars of cross section

预应力 CFRP 采用自行研制发明^[20] 的预应力 FRP 张拉机进行张拉. CFRP 为卡本复合材料(天津)有限公司生产的 I 级卡本碳

纤维布,理论计算厚度为 0.167 mm;加固钢板为厚度为 2 mm 的 Q235 等级钢. 复合加固后 T 梁如图 2 所示.

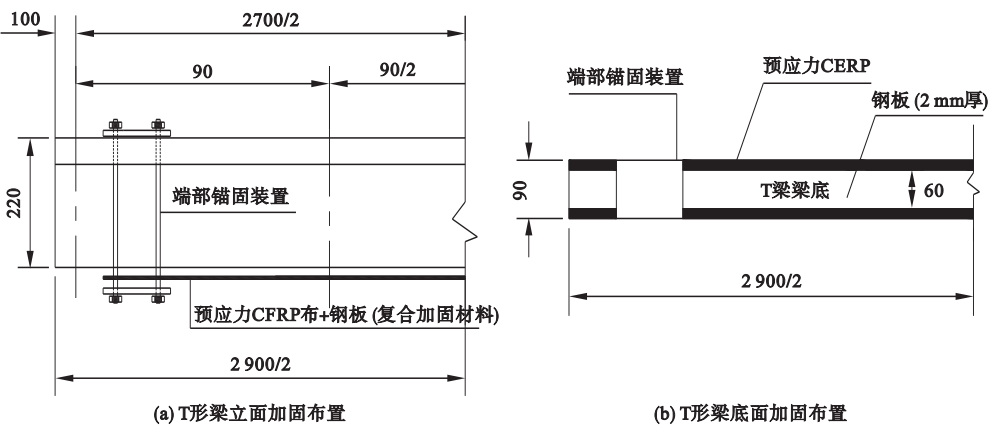


图 2 加固尺寸及位置

Fig. 2 Reinforcement dimension and position

1.2 试验方案

抗弯试验在沈阳建筑大学结构实验室进行. 在构件受拉区混凝土开裂前,按 2 kN 逐级进行加载,开裂后,按 3 kN 逐级进行加载,每级荷载持荷 5 min. 应变值应用英国输入力强 IMP 数据采集系统进行记录,试验中随时观测被加固梁的裂缝发展情况,记录发展过程. 试件加固参数设计如表 1 所示. 试验装置如图 3 所示.

表 1 试件加固设计参数

Table 1 Design reinforcement parameters for specimen			
试件编号	加固方式 + 碳布层数	CFRP 预应力度/%	预裂程度
L-0-1	未加固	—	未预裂
L-1-1	1 层钢板	—	未预裂
L-1-2	1 层碳布	10	未预裂
L-1-3	1 层钢板 + 1 层碳布	10	未预裂
L-1-4	1 层钢板 + 1 层碳布	5	未预裂
L-1-5	1 层钢板 + 1 层碳布	15	未预裂
L-2-1	1 层钢板 + 2 层碳布	10	未预裂
L-2-2	1 层钢板 + 3 层碳布	10	未预裂
L-3-1	1 层钢板 + 1 层碳布	10	预裂 30%
L-3-2	1 层钢板 + 1 层碳布	10	预裂 60%

注:预裂 30% 与 60% 指的是加固前对梁施加对比梁极限荷载 30%、60% 的荷载.

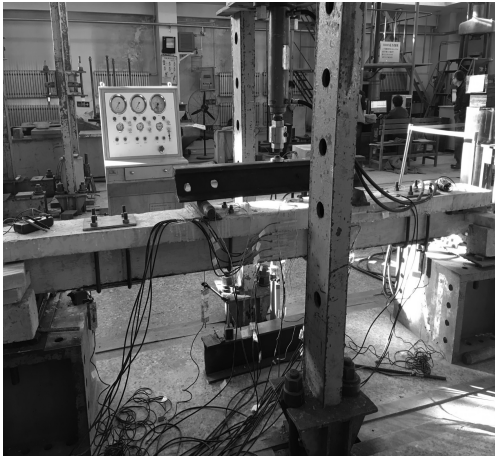


图 3 试验加载设备

Fig. 3 Loading test equipment

2 试验现象

对比梁 L-0-1, 以及钢板加固梁 L-1-1 的破坏过程分为三个阶段,当荷载加至 7.6 kN 时,L-0-1 梁底开裂,随荷载增大,裂缝条增多,裂缝宽度逐渐开展;当钢筋屈服后,裂缝条数变化不大,裂缝宽度迅速增大,裂缝高度开展至 T 梁翼板,T 梁翼板顶缘混凝土出现轻微压碎,试验梁破坏. L-1-1 开裂荷载为 15.9 kN,随荷载增大,裂缝条数逐渐增加,裂缝宽度逐渐开展,部分裂缝高度开展至 T 梁翼板,在加载过程伴随轻微响声,当钢板及钢筋屈服后,所有裂缝宽度开始加速开展,最终,裂缝宽度在梁底贯

穿,试件破坏.

L-1-2 开裂荷载为 13.6 kN,继续加载时,裂缝条数、宽度逐渐开展,在加载过程中 CFRP 有轻微响声;当钢筋开始屈服后,CFRP 出现连续响声,但裂缝宽度仍缓慢开展;当 CFRP 达到极限荷载时,CFRP 发出“啪”的较大响声,在跨中瞬间断裂,几乎所有裂缝宽度立刻达到最大值.

L-1-3、L-1-4、L-1-5、L-2-1、L-2-2 为预应力 CFRP 与钢板复合加固梁,其破坏过程分为四个阶段.复合加固梁开裂荷载均大于单一材料加固梁.开裂后,随着荷载的增加,裂缝条数、宽度、高度逐渐开展;钢板及钢筋屈服后,CFRP 出现连续响声,裂缝宽度明显增加;当 CFRP 达到极限承载能

力时,CFRP 发出“啪”的较大响声,并瞬间断裂,此时由于试验梁仍处于钢板的有效约束下,CFRP 断裂后裂缝宽度出现突增.各复合加固梁的主要区别表现为:随着加固参数的变化,开裂荷载、钢板或钢筋屈服荷载、CFRP 的破坏荷载,以及 T 梁的极限荷载各不相同.

L-3-1、L3-2-1 为预应力 FRP 与钢板复合加固的预裂梁,破坏过程分为三个阶段,无开裂前阶段,裂缝宽度随荷载的增加逐渐增大,其发展过程与 L-1-3 类似.但其钢板或钢筋屈服荷载,CFRP 的破坏荷载,T 梁的极限荷载均小于未预裂梁;T 梁破坏时最大裂缝宽度大于未预裂梁.部分试验梁的最终破坏情况见图 4.

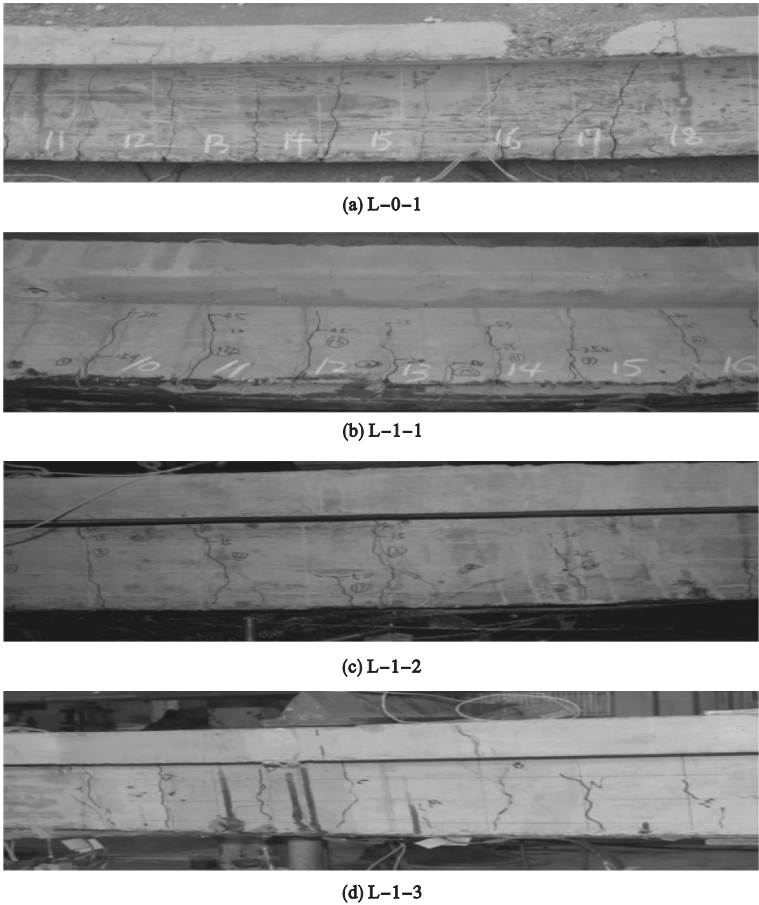


图 4 部分试验梁典型破坏状态及裂缝分布情况

Fig. 4 Typical failure status and crack distribution condition of partial test beams

3 试验结果及分析

3.1 荷载分析

表 2 给出了各试件开裂荷载、屈服荷载、极限荷载的试验结果.

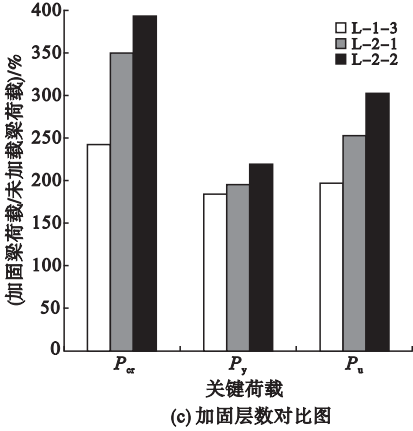
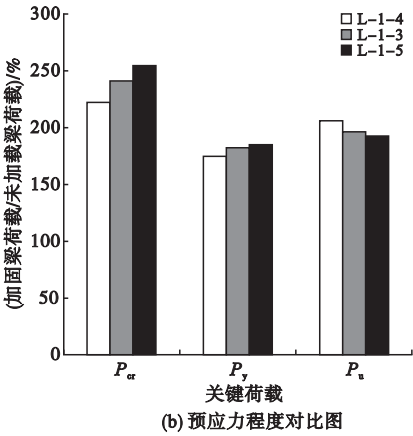
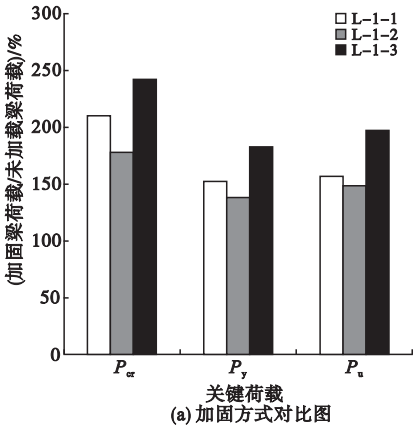
表 2 抗弯荷载结果

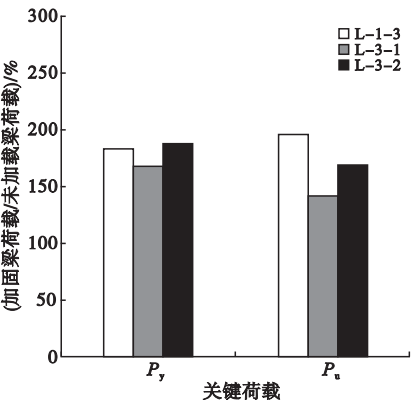
Table 2 Anti-bending load results kN			
试件编号	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载
L-0-1	7.6	41.2	44.2
L-1-1	15.9	62.1	69.0
L-1-2	13.6	56.9	65.5
L-1-3	18.4	75.2	87.0
L-1-4	16.8	72.0	90.9
L-1-5	19.4	76.4	85.4
L-2-1	26.5	80.4	111.1
L-2-2	29.8	90.3	133.0
L-3-1	—	68.6	82.6
L-3-2	—	58.1	74.6

图 5 为不同加固方式、预应力程度、加固层数以及预裂程度对 T 形梁开裂荷载 P_{cr} 、屈服荷载 P_y 、极限荷载 P_u 的影响规律. 为便于观察和分析复合加固及各加固参数下对未加固梁荷载的提高程度,以未加固梁 P_{cr} 、 P_y 、 P_u 为基准值. 由于预裂梁已有裂缝,因此预裂程度中不包含 P_{cr} 对比情况.

图 5(a) 表明,相比于未加固梁,3 种加固方式均可提高 T 形梁的 P_{cr} 、 P_y 与 P_u . 其中 P_{cr} 提高最为明显,几乎均达到了 200%. 复合加固梁在各关键荷载中整体提高程度最大, P_{cr} 、 P_y 、 P_u 分别达到了未加固梁的 242.1%、182.5% 和 196.8%. 3 种加固方式提高荷载程度从大到小依次为:1 层钢板+1 层预应力 10% CFRP 布、1 层钢板、1 层预应力 10% CFRP 布. 图 5(b) 表明,预应力程度在 5% ~ 15%,随着预应力程度的提高,相对于未加固梁 P_{cr} 、 P_y 所提高的程度有所增加, P_u 的提高趋势则有所降低,但趋势并不明显. 本试验预应力复合加固范围内,与未加固梁相比 P_y 提高的程度均弱于 P_{cr} 和 P_u ,这与复合加固不

能提高钢筋的屈服能力相符. 图 5(c) 表明,加固层数在 3 层范围内,随着加固层数的增加, P_{cr} 、 P_y 与 P_u 均呈现线性增大趋势,且 P_{cr} 增大趋势更为明显,3 层 CFRP 复合加固梁的 P_{cr} 达到了未加固梁 P_{cr} 的 400%. 图 5(d) 表明,预裂程度在 60% 时,与未预裂复合加固梁相比,预裂均使 P_y 与 P_u 有所降低,但仍达到了未加固梁的 150% 以上.





(d) 预裂程度对比图

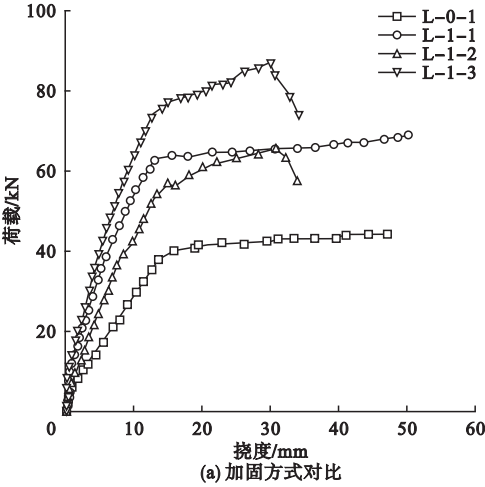
图5 屈服、极限荷载对比图

Fig. 5 Comparison diagram of yield load and ultimate load

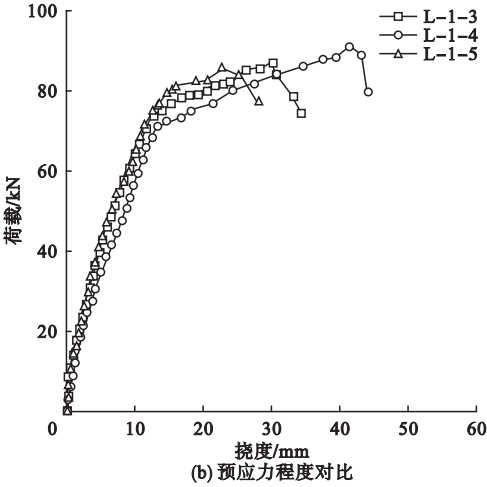
3.2 刚度分析

图6为不同加固方式、预应力程度、加固层数以及预裂程度下的荷载-跨中挠度曲线

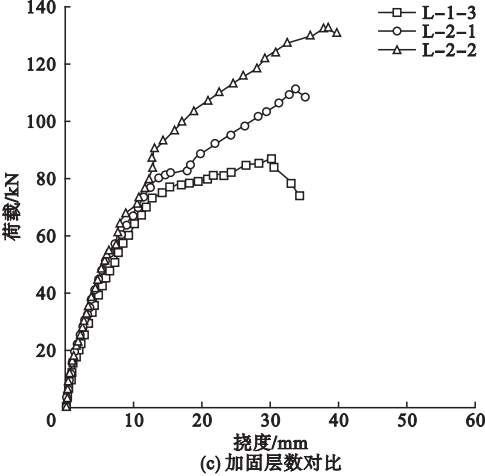
对比图.图6(a)可以看出,L-0-1与L-1-1的荷载-挠度曲线为三折线,转折点分别为开裂点、屈服点以及极限点,这与试验现象所观察到的3个阶段相互对应.图6(d)可以看出,L-3-1和L-3-2屈服前刚度基本无明显变化,为三折线,转折点分别为屈服点、荷载峰值点以及极限点.除此之外其余梁的荷载-挠度曲线均为四折线,转折点分别为开裂点、屈服点、荷载峰值点以及极限点.荷载-挠度曲线可以看出,开裂前后刚度变化并不明显,屈服点前后是刚度变化的转折之处,刚度急剧衰减.峰值点后出现了负刚度,负刚度对研究使用阶段的梁意义不大.因此,将整个刚度变化划分为屈服前刚度 EI_y 和屈服后刚度 EI_u .



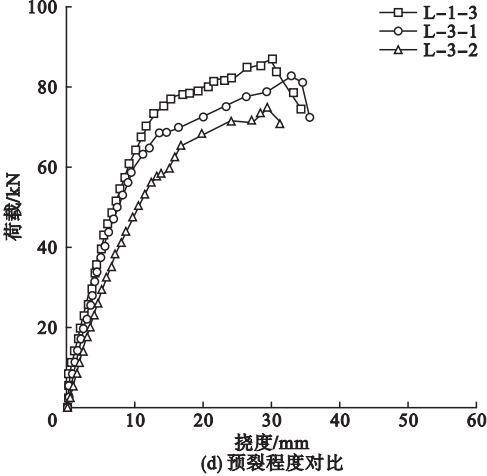
(a) 加固方式对比



(b) 预应力程度对比



(c) 加固层数对比



(d) 预裂程度对比

图6 荷载-跨中挠度曲线对比

Fig. 6 Comparison diagram of load-midspan deflection curves

根据图 6 确立出加固方式、预应力程度、加固层数以及预裂程度对 EI_y 、 EI_u 变化趋势的影响规律如图 7 所示. 其中图中纵坐标为 T 梁 EI_y 、 EI_u 与未加固梁屈服前刚度 EI_{y0} 、屈服后刚度 EI_{u0} 的比值, 借此表征各因素较未加固梁刚度提高程度. 图 7(a) 表明, 三种加固方式对屈服前、后刚度均有提高. 屈服前刚度提高程度从大到小依次为: 1 层钢板 + 1 层预应力 10% CFRP 布、1 层钢板、1 层预应力 10% CFRP 布. 屈服后刚度提高程度从大到小依次为: 1 层钢板 + 1 层预应力 10% CFRP 布、1 层预应力 10% CFRP 布、1 层钢板. 可见复合加固 T 梁是三种加固方式中刚度提高

最为显著的, 其中屈服前后刚度较对比梁的屈服前后刚度分别提高了 1 倍与 7 倍. 图 7(b) 表明, 随着预应力程度的增大, 屈服前刚度无明显变化. 但当预应力程度在 10% ~ 15% 时, 屈服后刚度有明显增大趋势. 图 7(c) 表明, 随着加固层数的增加, 屈服前后刚度均有所增加, 但屈服前刚度增加程度极不明显. 在两层内, 屈服后刚度增加明显. 两层屈服后刚度比 1 层屈服后刚度提高了近 1 倍. 当层数大于 2 后, 增加趋于平缓. 图 7(d) 表明, 预裂程度 30% 与未预裂 T 梁的屈服前刚度几乎相同. 预裂程度 60% 的 T 梁屈服前刚度有所降低, 屈服后刚度则有所增大.

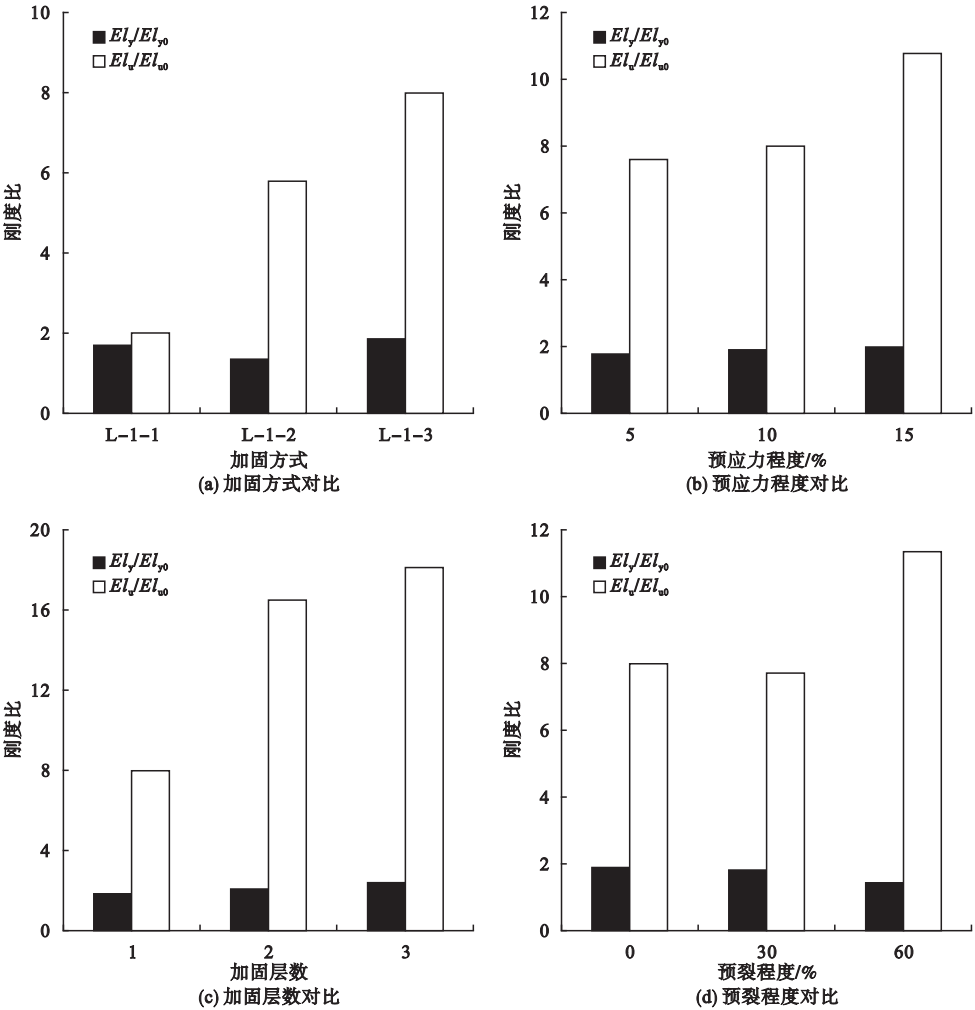


图 7 屈服前、后刚度对比

Fig. 7 Comparison diagram of rigidity before and after the yield

3.3 裂缝分析

3.3.1 裂缝条数分析

试件按强剪弱弯设计,最终破坏均为弯曲破坏,因此纯弯段裂缝情况对实际抗弯性能有影响。图8为不同加固方式、预应力程度、加固层数及预裂程度下,试验梁纯弯段荷载-裂缝条数趋势。从图中可以看出:①相同荷载情况下,不同加固方式中复合加固方式产生的裂缝条数最少,复合加固产生单位裂缝所需荷载最大。最终破坏时,各加固方式裂缝条数基本相同,均在14~16条。②预应力程度在5%~15%,相同荷载下,预应力10%的T形梁纯弯段产生的裂缝条数最少。在55 kN以内,相同荷载下,预应力5%的试验梁

裂缝条数要多于预应力15%的梁。最终破坏时,预应力15%梁的裂缝条数最多。③不同CFRP加固层数下,加固1层CFRP布T梁初始裂缝荷载要明显小于加固两层和3层的梁。最终破坏时,加固1层与两层CFRP布T梁的裂缝条数均为15条,而加固3层的裂缝条数则达到了19条。④预裂30%与预裂60%的预裂荷载分别为13.5 kN与27.0 kN,预裂产生的裂缝条数则为6条与13条(见图8(d)中椭圆圈内所示)。含初始裂缝,预裂程度越大,最终破坏时的裂缝条数越多。不含初始裂缝,预裂程度越大,最终破坏时产生新裂缝条数越少。

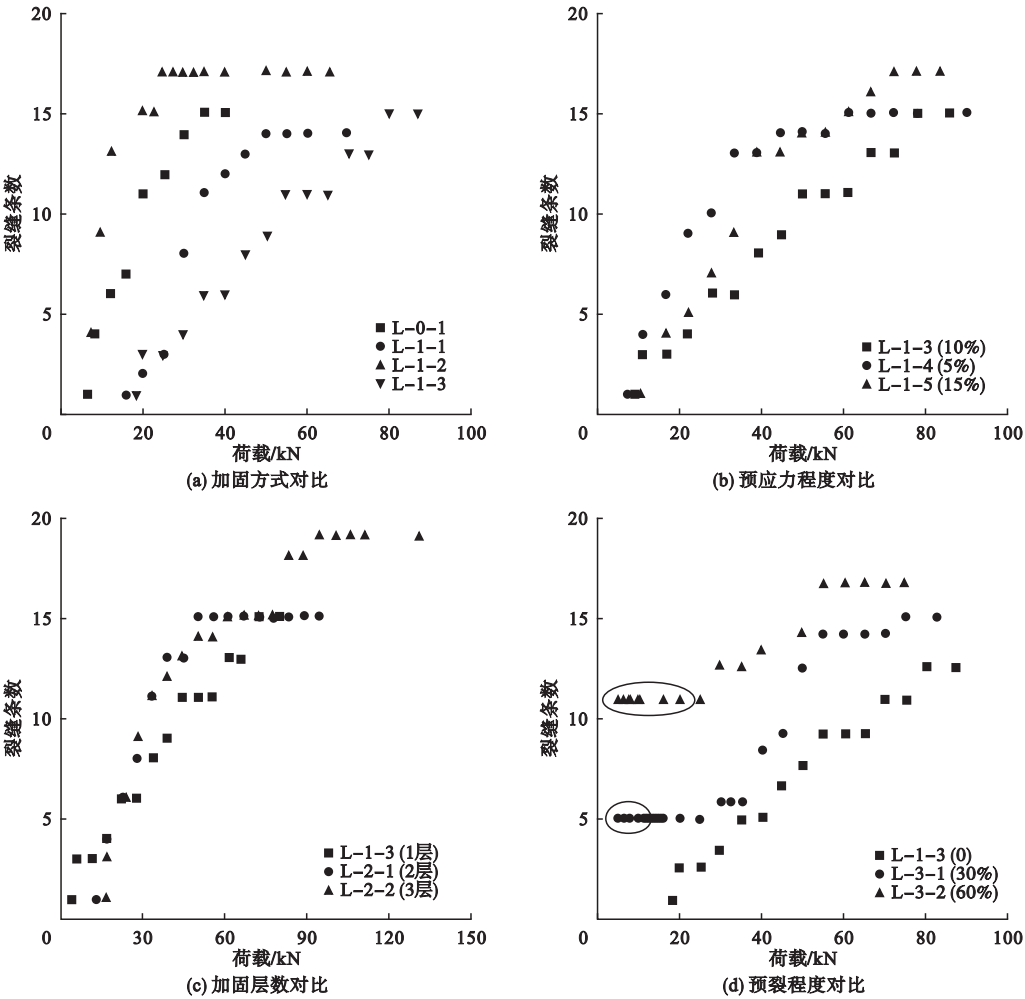


图8 裂缝条数-荷载趋势

Fig. 8 Diagram of number of crack- load trend

上述情况说明:①复合加固抗裂缝发展效果最好.②并非预应力程度越大抗裂发展的效果越好,10%的预应力程度是抗裂缝发展的最优值.荷载较小时(55 kN 以内),预应力程度 15% 梁的抗裂缝条数发展程度要优于 5%.但当荷载较大时,预应力程度 15% 的梁抗裂缝条数发展的能力明显下降,笔者分析这可能是由于 CFRP 预应力过大后,造成梁在较小受拉变形时 CFRP 就已产生过大拉应变而产生局部撕裂,削弱了其抗裂缝发展的能力.③加固层数越多,其抗裂性能越好,特别是加固 3 层时,虽然最终破坏时裂缝的条数(19 条)要多于加固 1 层及两层(15 条).但就其产生单位裂缝的荷载而言,加固 3 层为 $133\text{ kN} \div 19\text{ 条} = 7.0\text{ kN/条}$,大于加固 1 层的 $87\text{ kN} \div 15\text{ 条} = 5.8\text{ kN/条}$,大于加固 2 层的 $100\text{ kN} \div 15\text{ 条} = 6.7\text{ kN/条}$.④预裂程度对后期新生裂缝的产生和发展有影响,即预裂程度越大(旧裂缝越多),最终破

坏时产生的新裂缝越小.旧裂缝的开展一定程度上避免了新裂缝的产生和发展,但最终整体裂缝条数相差不大.

3.3.2 最大裂缝宽度分析

图 9 为不同加固方式、预应力程度、加固层数及预裂程度下,试验梁纯弯段荷载-最大裂缝宽度趋势.从图中可以看出:①不同加固方式下,最大裂缝宽度随荷载增大的趋势有所不同.复合加固 T 梁最大裂缝宽度增大的趋势最慢,未加固 T 梁最大裂缝宽度增大趋势最快.最终破坏时,复合加固方式的极限最大裂缝宽度可达 3 mm.②预应力程度对最大裂缝宽度的变化趋势影响不明显,由于预应力达到了 15%,CFRP 突然拉断后,作用于 CFRP 布的拉力迅速作用于梁受拉区,造成极限最大裂缝宽度达到近 4 mm.③加固层数在 1~3 层,随着层数的增加,最大裂缝宽度随荷载增大的趋势有所减小.④预裂程度对最大裂缝宽度的变化趋势影响不明显.

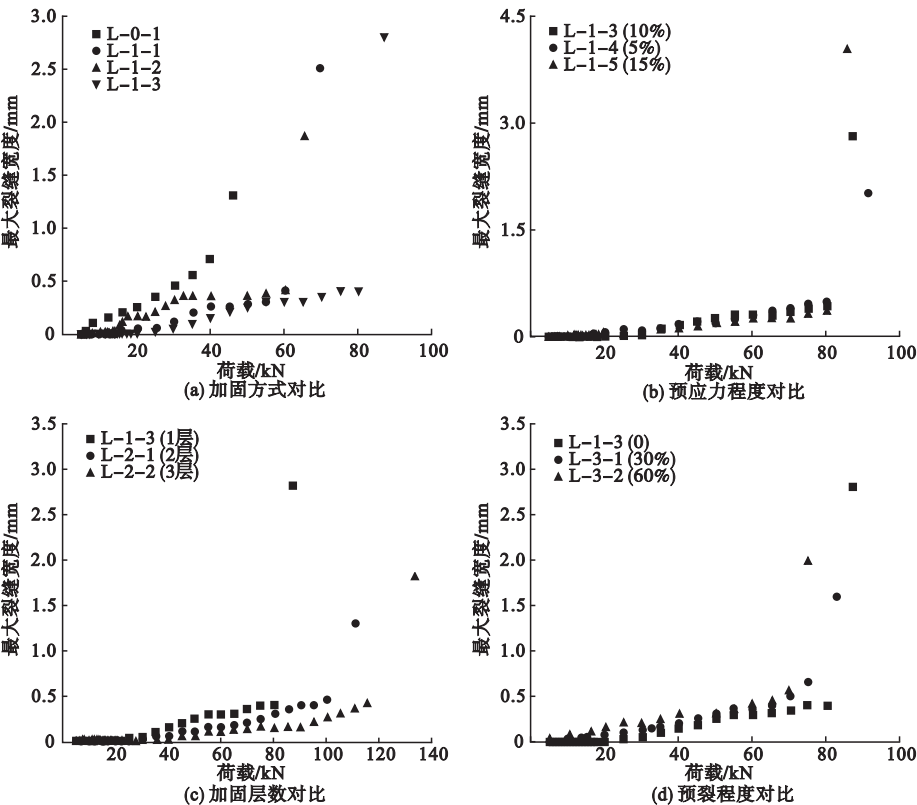


图 9 最大裂缝宽度-荷载趋势

Fig. 9 Diagram of the maximum crack width-load trend

4 结 论

(1) 相比于未加固梁, 3 种加固方式均可提高 T 形梁的 P_{cr} 、 P_y 与 P_u 。其中 P_{cr} 提高最为明显, 几乎均达到了 200%。复合加固梁在各关键荷载中整体提高程度最大, P_{cr} 、 P_y 、 P_u 分别达到了未加固梁的 242.1%、182.5% 和 196.8%。复合加固 T 梁是三种加固方式中刚度提高最为显著的, 其中屈服前后刚度较对比梁屈服前后刚度分别提高了 1 倍与 7 倍。在各级相同荷载情况下, 复合加固方式产生的裂缝条数最少, 最大裂缝宽度增大的趋势最慢。

(2) 随着预应力程度的提高, 相对于未加固梁 P_{cr} 、 P_y 所提高的程度有所增加, P_u 的提高趋势则有所降低, 但趋势并不明显。屈服前刚度无明显变化。但当预应力程度在 10%~15% 时, 其屈服后刚度有明显增大趋势。相同荷载下, 预应力 10% 的 T 形梁纯弯段产生的裂缝条数最少; 最终破坏时, 预应力为 15% 的梁裂缝条数最多; 在预应力对裂缝最大宽度的影响不明显情况下, 预应力 10% 的 T 形梁加固效果较好。

(3) 随着加固层数的增加, P_{cr} 、 P_y 与 P_u 均呈现线性增大趋势, 且 P_{cr} 增大趋势更为明显, 3 层 CFRP 复合加固梁的 P_{cr} 达到了未加固梁的 400%。两层屈服后刚度比 1 层屈服后刚度提高了近 1 倍。当层数大于 2 后, 增加趋于平缓。加固 1 层 CFRP 布 T 梁初始裂缝荷载要明显小于加固两层和 3 层的梁。随着层数的增加, 最大裂缝宽度随荷载增大的趋势有所减小。

(4) 预裂程度在 60% 时, 与未预裂复合加固梁相比, 预裂均使 P_y 与 P_u 有所降低, 但仍达到了未加固梁的 150% 以上。预裂程度 30% 与未预裂 T 梁的屈服前刚度几乎相同。预裂程度为 60% T 梁的屈服前刚度有所降低, 屈服后刚度则有所增大。含初始裂缝, 预裂程度越大, 最终破坏时的裂缝条数越多。不

含初始裂缝, 预裂程度越大, 最终破坏时产生新裂缝条数越少。

参考文献

- [1] 张龚, 张哲, 赵卓. 钢板加固混凝土梁试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(3): 485-489.
(ZHANG Gong, ZHANG Zhe, ZHAO Zhuo. Experiment research on concrete beams reinforced by steel plate[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(3): 485-489.)
- [2] 谢丽丽, 余术刚, 刘立新, 等. 铆粘钢板加固钢筋混凝土梁的抗弯性能试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(2): 31-34.
(XIE Lili, YU Shugang, LIU Lixin, et al. Experimental study on flexural properties of RC beams strengthened with externally bonded steel plate anchored by rivets or screw[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2008, 29(2): 31-34.)
- [3] SALLAM H E M, BADAWY A A M, SABA A M, et al. Flexural behavior of strengthened steel concrete composite beams by various plating methods[J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(8/9): 1081-1087.
- [4] LEE J H, LOPEZ M M, BAKIS C E. Slip effects in reinforced concrete beams with mechanically fastened FRP strip[J]. Cement and concrete composites, 2009, 31(7): 496-504.
- [5] KIM Y J, WIGHT R G, GREEN M F. Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP sheets; using nonmetallic anchor systems[J]. Journal of composites for construction, 2008, 12(1): 44-52.
- [6] OUDAH F, EL-HACHA R. A new ductility model of reinforced concrete beams strengthened using fiber reinforced polymer reinforcement[J]. Composites: part B: engineering, 2012, 43(8): 3338-3347.
- [7] SU R K L, SIU W H, SMITH S T. Effects of bolt plate arrangements on steel plate strengthened reinforced concrete beams[J]. Engineering structure, 2010, 32(6): 1769-1778.
- [8] RICARDO P, DANIEL B I. A unified for the

- static and dynamic analyses of intermediate debonding in FRP-strengthened reinforced concrete beams[J]. Composite structures, 2010, 92(11): 2728–2737.
- [9] HONGBO L, RIADH A. Boundary element analysis of CFRP reinforced steel plates [J]. Composite structures, 2009, 91(1): 74–83.
- [10] BOCCIARELLI M, COLOMBI P, FAVA G, et al. Fatigue members strengthened with CFRP plates [J]. Composite performance of tensile steel structures, 2009, 87(4): 334–343.
- [11] 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.
- [12] 尚守平, 张宝静, 吕新飞. 预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁间接刚度试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11): 74–81.
(SHANG Shouping, ZHANG Baojing, Lü Xinfei. Experiment on indirect stiffness of RC beams strengthened with prestressed CFRP plate[J]. China journal of highway and transport, 2016, 29(11): 74–81.)
- [13] 陈小英, 李唐宁, 陈明政, 等. 波形齿锚具锚固 CFRP 片材的力学性能试验研究及锚具体系设计[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 184–192.
(CHEN Xiaoying, LI Tangning, CHEN Mingzheng, et al. Experimental research on mechanical property of anchor CFRP sheet with the wave-shaped-teeth anchor and design of anchor system [J]. Engineering mechanics, 2009, 26(6): 184–192.)
- [14] CARLO P, EMANUELE M, CLAUDIO C. FRP strengthening of steel and steel-concrete composite structures: an analytical approach [J]. Materials and structures, 2009, 42(3): 353–363.
- [15] 熊学玉, 徐海峰. 碳纤维与钢板复合加固钢筋混凝土梁裂缝的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(3): 21–27.
(XIONG Xueyu, XU Haifeng. Experimental research on crack of reinforced concrete beam strengthened by combination of carbon fiber and steel plates [J]. China railway science, 2012, 33(3): 21–27.)
- [16] 熊学玉, 张序. 碳纤维布与钢板复合加固钢筋混凝土梁延性计算[J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37(2): 83–86.
(XIONG Xueyu, ZHANG Xu. Calculation of ductility of RC beams strengthened with CFRP and steel-plate [J]. Sichuan building science, 2011, 37(2): 83–86.)
- [17] 廖少怀, 卢亦焱, 陈道凡. 碳纤维布与钢板复合加固 RC 抗震性能试验[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(6): 14–21
(LIAO Shaohuai, LU Yiyang, CHEN Daofan. Test on seismic behaviors of reinforced concrete beams composite rehabilitation with bonded carbon fiber reinforced polymer and steel plate [J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2010, 32(6): 14–21.)
- [18] 熊学玉, 范新海. 负载下 CFRP 与钢板复合加固钢筋混凝土梁抗弯试验及设计理论[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1165–1171.
(XIONG Xueyu, FAN Xinhai. Flexural behavior and design theories of CFRP-steel plates composite strengthened reinforced concrete beams at different preloaded levels [J]. Journal of central south university (science and technology), 2010, 41(3): 1165–1171.)
- [19] 熊学玉, 范新海. 负载对 CFRP 及 CFRP 与钢板复合加固 R. C 梁抗弯性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(6): 2393–2399.
(XIONG Xueyu, FAN Xinhai. Effect of different preloaded states on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP or CFRP-steel combined plates [J]. Journal of central south university (science and technology), 2010, 41(6): 2393–2399.)
- [20] 朱广山. 用于 FRP 定量控制自锚式预应力张拉机: 中国, ZL 2014 1 0554300. 4 [P]. 2016–04–13.
(ZHU Guangshan. Self-anchorage prestressed tensioning equipment for quantitative control of FRP: China, ZL 2014 1 0554300. 4 [P]. 2016–04–13.)