

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202205042024101976

文章编号: 1674-599X(2024)05-0029-08

引用格式: 肖运鑫, 彭晖. 端部嵌贴预应力CFRP加固RC梁的弯曲性能研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(5): 29-36.

Citation: XIAO Yunxin, PENG Hui. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-end enhanced embedded prestressed CFRP strips[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 29-36.

端部嵌贴预应力CFRP加固RC梁的弯曲性能研究

肖运鑫¹, 彭晖^{1,2}

(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 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:为考察端部嵌贴(near-end enhanced embedded, NEEE)预应力碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)新型加固系统的效能,研究了不同加固方法、CFRP板条尺寸与黏结长度等影响因素下加固梁的受力行为。研究结果表明:与传统纤维复合材料加固技术相比,NEEE预应力CFRP加固技术具有更大的极限承载力和延性,且能有效抑制混凝土保护层剥离破坏。增大板条厚度会增大加固梁的刚度,但可能引起板端混凝土保护层过早剥离破坏。增大黏结长度能够改善加固梁的延性,减小板端弯矩,提高屈服荷载和极限承载力。

关键词:结构工程;加固;嵌贴;CFRP;受力性能

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-end enhanced embedded prestressed CFRP strips

XIAO Yunxin¹, PENG Hui^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control, Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The effectiveness of the new strengthening system of near-end enhanced embedded (NEEE) prestressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips was investigated through a study on the mechanical behavior of strengthened beams under various strengthening methods, sizes of CFRP strips, and bond lengths. The test results demonstrate that the NEEE prestressed CFRP strengthening technique results in superior ultimate bearing capacity and ductility compared to traditional strengthening techniques with fiber composite materials, effectively preventing concrete cover separation failure. Increasing the thickness of the strips enhances the stiffness of strengthened beams. However, it may also lead to premature failure due to concrete cover separation at strip ends. Additionally, increasing bond length improves the ductility of strengthened beams, reduces bending moment at strip ends, and increases yield load and ultimate bearing capacity.

Key words: engineering structure; strengthening; embedded; CFRP; mechanical property

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)强度高、质量轻、耐腐蚀^[1],使用该

种材料的混凝土结构加固技术于近二十年间在土木工程领域被广泛研究与应用^[2-4]。对于混凝土结

收稿日期: 2022-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178186)

通信作者: 彭晖(1976—),男,教授,主要从事桥梁性能提升技术方面的研究工作。E-mail: huipeng@csust.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

构尤其是所处环境严峻的混凝土桥梁结构而言, CFRP是一种效果优良、施工方便、耐久性好的结构加固新选择。现阶段应用较多且已形成设计规范的是外贴(externally bonded, EB)预应力CFRP板条的加固方法,然而薄弱的界面黏结和过高的预应力锚具成本一直是该方法的显著缺点^[5]。表层嵌贴(near surface mounted, NSM)预应力CFRP板条加固法以优异的界面黏结性能逐渐成为CFRP加固技术中的新选择,然而板端混凝土保护层剥离难以被有效抑制和开槽施工困难等问题已成为该方法进一步推广应用的瓶颈^[5-7]。

为此,本文提出了一种端部嵌贴预应力CFRP板条加固混凝土结构的新方法^[8],其构造形式如图1所示。这种新方法是通过对混凝土梁受拉侧梁端部的短槽,即端部嵌贴段,对预应力CFRP板条进行锚固的,而其余CFRP板条仅需开设约5 mm深的浅槽进行布设即可。这将大大降低施工的复杂程度,且端部嵌贴构造可以锚固预应力CFRP板条,无需使用额外的锚固措施。

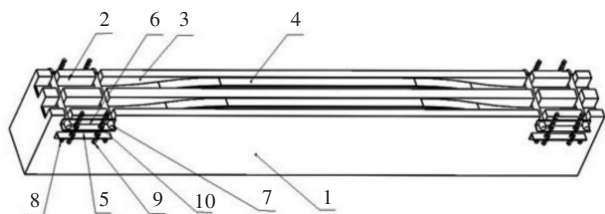


图1 端部嵌贴法示意图^[8]

Fig. 1 Diagram of near-end enhanced embedded method^[8]

为了验证端部嵌贴工法的有效性,本文开展预应力CFRP板条加固混凝土梁抗弯性能试验研究。首先比较了表层嵌贴和端部嵌贴预应力CFRP板条加固混凝土梁的受力性能,在此基础上考察了CFRP板条尺寸和黏结长度对破坏模式、极限承载力和裂缝发展行为等性能的影响,进一步明确了新型加固方法的受力行为和机理。

1 试验设计

1.1 试件设计

本文研究了5根预应力CFRP板条加固的钢筋混凝土矩形截面梁的静力性能。混凝土梁长3 500 mm,净跨3 300 mm,纯弯段长1 000 mm,试验采用四点加载形式。受拉和受压钢筋均采用两根直径为16 mm的HRB400型带肋钢筋,在梁的全长沿轴向按100 mm等间距布置直径8 mm的HRB400型箍筋。所有梁试件均采用两根施加了预应力的CFRP板条加固。依据加固方法的不同,在梁受拉侧混凝土表面开设两种不同规格的矩形截面槽:对采用表层嵌贴技术的试件,在梁底通长开设两道尺寸为15 mm(宽)×25 mm(深)的矩形截面槽,CFRP板条黏结于槽内中间位置,CFRP板条形心间距为75 mm;对采用端部嵌贴技术的试件,在梁底两端分别开设两道长750 mm,尺寸为25 mm(宽)×40 mm(深)的矩形截面槽,CFRP板条同样黏结于槽内正中,CFRP板条形心间距与表层嵌贴加固试件的相同。

试件参数见表1。本文试验通过加固梁的裂缝分布、极限承载力、挠度、破坏模式和应变分布等分析方法,首先比较了表层嵌贴和端部嵌贴预应力CFRP板条加固混凝土梁的抗弯性能差异,该组试件均采用两根2.0 mm厚的CFRP板条加固,预应力均为1 000 MPa(张拉力64 kN),黏结长度均为3 000 mm。在此基础上,考虑到混凝土保护层剥离破坏频繁发生在表层嵌贴CFRP板条的混凝土梁上^[5-7],为研究该种破坏模式在端部嵌贴加固方法中的显著性,进一步探究了CFRP板条尺寸和黏结长度等对加固梁静力尤其是混凝土保护层剥离损伤行为的影响。具体而言,考察了2.0 mm×16.0 mm和4.5 mm×16.0 mm两种CFRP板条的横截面尺寸,而CFRP张拉力和黏结长度保持不变(分别为64 kN和3 000

表1 试验参数

Table 1 Test parameters

试件编号	加固方法	CFRP板条横截面尺寸	黏结长度/mm	CFRP张拉力/kN	CFRP预应力/MPa	水平嵌贴段长度/mm	倾斜嵌贴段长度/mm	表面粘贴段长度/mm
NSM-T2	表层嵌贴	2.0 mm×16.0 mm	3 000	64	1 000			
300-200-T2	端部嵌贴	2.0 mm×16.0 mm	3 000	64	1 000	300	200	2 000
300-200-T4.5	端部嵌贴	4.5 mm×16.0 mm	3 000	64	445	300	200	2 000
150-200-T4.5	端部嵌贴	4.5 mm×16.0 mm	2 700	64	445	150	200	2 000
400-200-T4.5	端部嵌贴	4.5 mm×16.0 mm	3 200	64	445	400	200	2 000

mm);另外,考察了2 700、3 000、3 200 mm三种黏结长度,而CFRP张拉力和板条横截面尺寸不变(64 kN和4.5 mm×16.0 mm)。需要指出的是,本文试验通过改变水平嵌贴段长度来改变总黏结长度,一方面是由于课题组前期研究发现倾斜嵌贴段长度可能影响CFRP板条的折角,进而影响局部应力传递行为;另一方面在于这样做可以保持表面粘贴段、水平嵌贴段和倾斜嵌贴段三者两两交界处的弯矩和剪力相同,从而减小弯矩、剪力差异对CFRP应力传递行为的影响。

1.2 材料性能

将混凝土梁试件在常温下养护28 d以上,采用C40等级混凝土;与混凝土梁同批次浇筑5个边长为150 mm的混凝土立方体试块,根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)中的方法测试养护28 d后立方体的抗压强度,计算其平均值,为42.5 MPa。加固材料为2.0 mm×16.0 mm和4.5 mm×16.0 mm两种横截面尺寸的CFRP板条,其名义抗拉强度分别为2 068、2 179 MPa,名义弹性模量分别为124、140 GPa。CFRP板条与混凝土间的黏结介质为Sikadur-30型环氧树脂黏结剂,其名义抗拉强度为31.9 MPa,名义弹性模量为2.63 GPa。

1.3 测量及加载方案

用电阻式应变片、线性可变差动变压器LVDT和裂缝测宽仪分别测量应变、位移和裂缝宽度。对于每一个试件,在两根CFRP板条上不均匀(跨中、加载点、表面粘贴段末端及端部嵌贴段)粘贴5 mm长的应变片用于监测CFRP板条的变形和受力,在两根受拉钢筋的纯弯段各粘贴3个5 mm长的应变片以监测钢筋的屈服状况,在梁跨中顶部粘贴1个70 mm长的应变片以监测受压区的高度变化。所有应变片均采用快干型双组分环氧树脂胶粘贴。在梁跨中底部布置1个位移传感器以监测加固梁跨中挠度。在试验过程中,在每一加载级记录一次梁表面的裂缝宽度和其发展情况,及静态应变和位移。

本文静载试验采用的是四点弯曲简支梁加载试验。在加固梁受拉钢筋屈服之前,每5 kN设置一个加载级,加载级间停顿3 min,以观察现象、采集数据,同时使损伤充分发展,应力充分传递。在加固梁受拉钢筋屈服后荷载一般难以稳定,故改用位移加载形式,即以1 mm位移增量为一个加载级,加载级间仍停顿3 min。逐级加载,直至加固梁破坏。为保证加载的稳定性,本文试验使用机械式千斤顶进行加载。

2 试验结果

2.1 加固方法的比较

所有试件的试验结果见表2。本文首先比较了表层嵌贴和端部嵌贴预应力CFRP加固混凝土梁的抗弯性能。表层嵌贴加固梁NSM-T2开裂和屈服荷载分别为50、150 kN,在154 kN时CFRP板端出现斜裂缝,于165 kN时衍生出一条沿水平方向的裂缝分支并迅速沿钢筋底面发展,进而造成混凝土保护层剥离破坏,此时挠度约为33 mm。此种破坏行为与课题组前期的相关研究类似^[5]。端部嵌贴加固梁300-200-T2开裂荷载和屈服荷载分别为50、145 kN,与NSM-T2试件的相近。裂缝分别于90 kN时发展至左跨表面粘贴段末端,于110 kN时发展至右跨表面粘贴段末端,在179 kN时,荷载无法稳定,随后CFRP板条被拉断,极限承载力下的挠度为49 mm。

上述两试件的荷载-挠度关系曲线如图2所示。由图2可知,两试件在弹性阶段的刚度相当;加固梁开裂后300-200-T2的刚度比NSM-T2的大,应是混凝土梁初始钢筋位置差异造成的;钢筋屈服后二者刚度相近,然而如前所述,NSM-T2发生了始于CFRP板条端部的混凝土保护层剥离破坏,延性明显比300-200-T2的差。

将(极限承载力-钢筋屈服荷载)/极限承载力定义为延性指标,并分析所有试件的延性指标,结果如图3所示。由图3可知,与表层嵌贴梁试件NSM-T2相比,端部嵌贴梁试件300-200-T2的延性提升了约109%。由以上结果能初步推测:与传统的表层嵌贴技术相比,端部嵌贴预应力CFRP加固混凝土结构技术能够带来更大的结构承载力和延性,且能抑制混凝土保护层剥离破坏。

裂缝分布规律能直接反映加固梁的损伤破坏过程,其中,裂缝高度反映裂缝延伸行为,裂缝距跨中距离反映裂缝向梁端的扩展行为。为此,分别分析试件NSM-T2和300-200-T2的裂缝高度与荷载、裂缝距跨中距离与荷载的关系,结果如图4~5所示。由图4~5可知,随着荷载的增大,裂缝高度大致呈先增大后稳定的趋势。两个试件裂缝高度的发展趋势几乎一致,且在相同荷载下端部嵌贴加固梁的裂缝高度比表层嵌贴加固梁的更大,表明前者抑制裂缝延伸的能力比后者的差,应是表层嵌贴加固技术中CFRP板条竖向嵌贴所致。当CFRP板条

与混凝土梁协同变形时,竖向嵌贴的CFRP板条因不协调的变形为结构贡献了更大的刚度。图5显示裂缝距跨中距离发展至1 000 mm之前,试件NSM-T2裂缝向梁端的扩展行为和300-200-T2的没有明显区别。然而此后,在相同荷载下试件300-200-T2的裂缝距跨中距离明显比试件NSM-T2的小,这可能是因为试件300-200-T2的端部嵌贴构造抑制了裂缝向梁端部扩展(试件300-200-T2的表面粘贴段末端距跨中1 000 mm,距跨中1 000~1 500 mm的部分是端部嵌贴段)。另外,在相同参数下,试件300-200-

T2的裂缝在加载后期距CFRP板条端部仍然有相当一段距离,其板端抗裂性能明显比NSM-T2的更好。以上分析表明,端部嵌贴预应力CFRP板条加固混凝土梁对于裂缝延伸的抑制能力比表层嵌贴加固梁的差,更容易发生混凝土压溃或CFRP板条被拉断等弯曲破坏,但因端部嵌贴技术特有的端部嵌贴段构造,其更能抑制裂缝向加固梁端部发展,从而抑制起始于CFRP板条端部的混凝土保护层剥离破坏,而这一破坏模式一直是传统表层嵌贴预应力CFRP板条加固混凝土结构技术所面临的瓶颈问题。

表2 试验结果

Table 2 Test results

试件编号	关键截面开裂荷载/kN						钢筋屈服荷载/ kN	极限承载力/ kN	破坏模式
	跨中	表面粘贴段末端	倾斜嵌贴段	倾斜嵌贴段-水平嵌贴段交界处	水平嵌贴段	CFRP板端			
NSM-T2	50					154	150	165	CCS
300-200-T2	50	90	110	149			145	179	R
300-200-T4.5	60	130	150	165		175	178	180	CCS
150-200-T4.5	60					110		110	CCS
400-200-T4.5	50	110	130	170	220	232	203	245	CCS

注:CCS指CFRP板条端部混凝土保护层剥离破坏;R指CFRP板条拉断破坏。

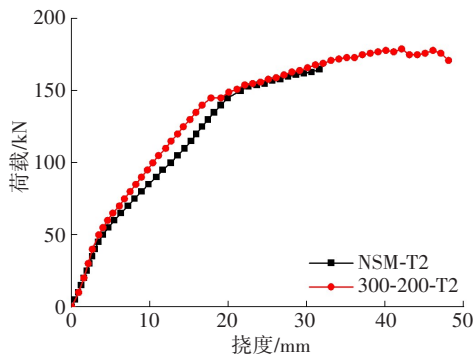


图2 采用不同加固方法试件的荷载-挠度曲线

Fig. 2 Load-deflection curves of the specimens with different strengthening techniques

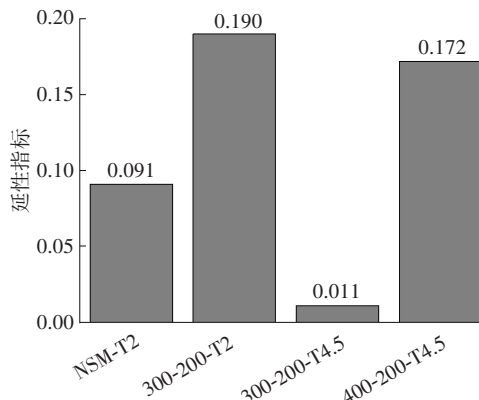


图3 试件的延性指标

Fig. 3 Ductility indexes of the specimens

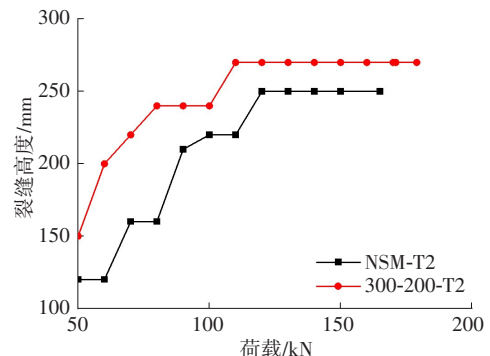


图4 采用不同加固方法试件的裂缝高度-荷载关系曲线

Fig. 4 Cracking height vs. load curves of the specimens with different strengthening techniques

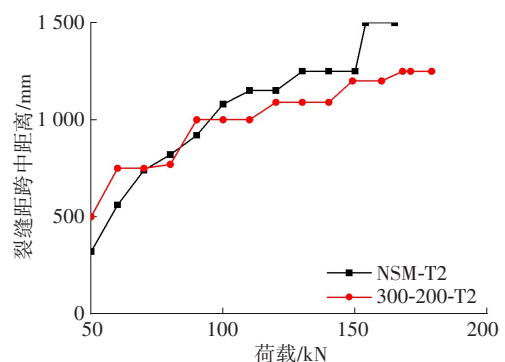


图5 采用不同加固方法试件裂缝距跨中距离-荷载相关性曲线

Fig. 5 Crack distance to midspan vs. load curves of the specimens with different strengthening techniques

2.2 板条尺寸对梁受力性能的影响

为了研究板条尺寸对端部嵌贴预应力CFRP板条加固混凝土梁受力性能的影响,本文设计了试件300-200-T2和300-200-T4.5。如前所述,300-200-T2在179 kN时发生了CFRP板条拉断破坏。试件300-200-T2使用两根2.0 mm厚板条施加1 000 MPa预应力(对应64 kN张拉力),而试件300-200-T4.5使用两根4.5 mm厚板条进行加固,同样施加64 kN张拉力,预应力445 MPa,二者由预应力引起的CFRP板条端部应力集中效应相同。300-200-T4.5于60 kN在纯弯段开裂;在178 kN时钢筋屈服,随后很快由右跨板端斜裂缝于受拉钢筋交界位置形成一条沿水平方向发展的裂缝;在180 kN时水平方向裂缝沿钢筋笼底面不断向跨中延伸,进而使始于CFRP板条端部的混凝土保护层发生剥离破坏。

对比300-200-T2和300-200-T4.5的关键截面开裂荷载(表2)后可以发现,后者的表面粘贴段末端、倾斜嵌贴段和倾斜嵌贴段-水平嵌贴段交界处的开裂荷载均比前者的大,这意味着更大的板条厚度能抑制裂缝向加固梁两端扩展,这是因为更厚的CFRP板条刚度更大,对于裂缝的抑制效果更明显。比较二者的钢筋屈服荷载可以进一步验证这一观点,体现为试件300-200-T4.5的屈服荷载较试件300-200-T2的提升了约22.8%。尽管厚板条有益,且能够有效避免CFRP板条被拉断,却并没有使得加固梁的极限承载力提升,两试件的极限承载力几乎相等。主要是因为厚板条刚度大,与加固梁的变形不协调,进而使得混凝土保护层过早剥离破坏。

图6所示为试件300-200-T2和300-200-T4.5的荷载-挠度曲线。由图6可知,在弹性阶段两试件的刚度相当,开裂后300-200-T4.5的刚度比300-200-T2的略大,主要是因为钢筋尚未屈服时能有效承担拉伸应力,厚板条刚度优势并未充分发挥出来。理论上,钢筋屈服后拉伸应力转移至CFRP板条上,厚板条加固的试件应比薄板条加固的试件具有更大的刚度,而300-200-T4.5在钢筋屈服后很快发生了破坏,并未体现出刚度差异。比较图3所示试件300-200-T2和300-200-T4.5的延性指标可以发现,厚板条加固试件的延性指标比薄板条加固试件的显著降低,降幅达94.2%。综上所述,更厚的板条能够增大加固梁刚度,抑制裂缝向梁端扩展,但会大幅降低加固梁的延性,且可能会使始于CFRP板条端部的混凝土保护层过早发生剥离破坏。

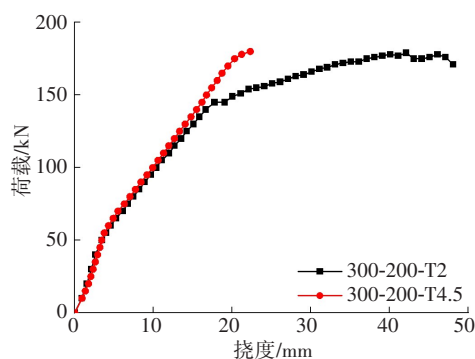


图6 具有不同板条厚度试件的荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curves of the specimens with different strip thicknesses

试件300-200-T2和300-200-T4.5的裂缝高度与荷载的关系曲线如图7所示。由图7可知,即使这两个试件采用了不同尺寸的CFRP板条,但二者具有相似的裂缝高度发展趋势,即加载前期和中期快速发展,加载后期趋于稳定。值得注意的是,试件300-200-T2和300-200-T4.5的裂缝高度趋于稳定的荷载分别为110、150 kN,对应于二者倾斜嵌贴段的开裂荷载。这一现象意味着裂缝发展至端部嵌贴段后能得到明显抑制,这与上文结论相符。在相同荷载下,CFRP板条厚度更大的300-200-T4.5试件具有更小的裂缝高度,这应是更大的CFRP板条刚度造成的。

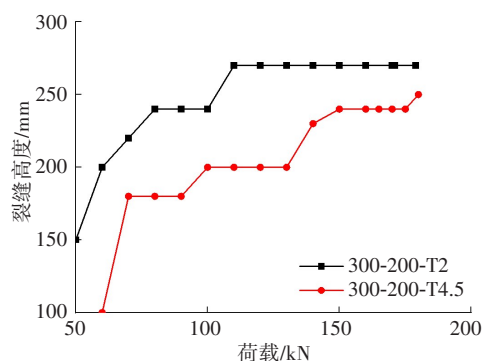


图7 具有不同板条厚度试件的裂缝高度-荷载关系曲线

Fig. 7 Cracking height vs. load curves of the specimens with different strip thicknesses

试件300-200-T2和300-200-T4.5的裂缝距跨中距离与荷载的关系曲线如图8所示。由图8可知,在相同荷载下,拥有更大板条刚度的试件300-200-T4.5具有更小的裂缝距跨中距离。这是因为更大的刚度引起的变形不协调使得该试件的裂缝在加载后期迅速向板条端部扩展,并迅速引起始于CFRP板条端部的混凝土保护层剥离破坏。CFRP板条刚度更小的300-200-T2的裂缝向梁端的扩展行为更

稳定。

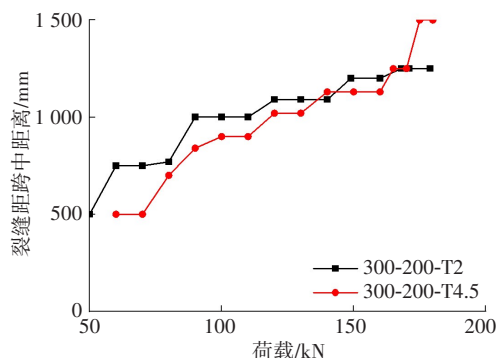


图8 具有不同板条厚度试件的裂缝距跨中距离-荷载关系曲线

Fig. 8 Crack distance to midspan vs. load curves of the specimens with different strip thicknesses

图9~10所示为300-200-T2和300-200-T4.5的应变分布规律。由图9~10可知,尽管这两个试件的极限承载力大致相同,但前者的极限应变约为 $11\,000 \times 10^{-6}$,远大于后者约 $5\,000 \times 10^{-6}$ 的极限应变,表明使用合适尺寸的CFRP板条能够在保证加固效果的同时充分发挥材料性能。在加载过程中CFRP板条的应变在距梁端75~275 cm(表面粘贴段)时明显较大,在距梁端25~<75 cm(端部嵌贴段)时较小,表明本文试验所采用的端部嵌贴技术在端部嵌贴段有效锚固了预应力CFRP板条。

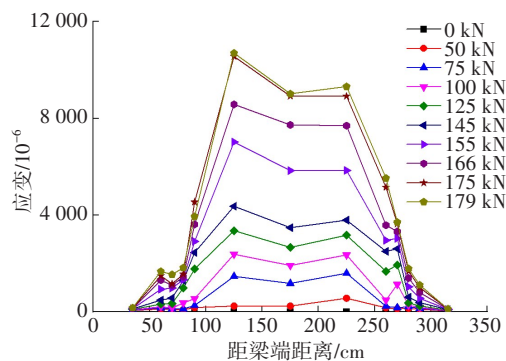


图9 试件300-200-T2的应变分布

Fig. 9 Strain distribution of specimen 300-200-T2

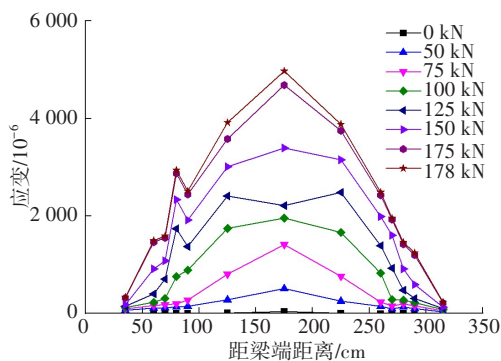


图10 试件300-200-T4.5的应变分布

Fig. 10 Strain distribution of specimen 300-200-T4.5

2.3 黏结长度对梁受力性能的影响

本文研究了2 700、3 000、3 200 mm三种黏结长度对加固梁受力性能的影响。在300-200-T4.5试件(总黏结长度为3 000 mm)参数的基础上,仅改变水平嵌贴段长度,使得150-200-T4.5试件总黏结长度变为2 700 mm。当该试件的开裂荷载为60、100 kN时,其右跨CFRP板端突然出现斜裂缝,此时表面粘贴段末端、倾斜嵌贴段和水平嵌贴段均没有开裂,随后在110 kN时发生了始于CFRP板端的混凝土保护层剥离破坏。进一步增大黏结长度至3 200 mm的试件400-200-T4.5的开裂荷载和屈服荷载分别为50、203 kN,并在217 kN时于左跨板条端部形成斜裂缝,在232 kN时于右跨板端形成斜裂缝,并最终在245 kN时混凝土保护层剥离,破坏过程十分剧烈。

对比各试件的试验现象可以发现,试件150-200-T4.5、300-200-T4.5和400-200-T4.5的板端弯矩依次减小,使得CFRP板端开裂荷载依次增大,极限承载力也依次显著变大。然而,本组试验所采用的4.5 mm厚的CFRP板条难以被拉断,且其带来了较大的加固梁刚度,从而减小了混凝土压溃的可能性,因此该组三个试件最终均发生了始于CFRP板条端部的混凝土保护层剥离破坏。尽管这三个试件的破坏模式相同,但它们的钢筋屈服荷载和延性指标随着黏结长度的增大而显著增长。以上分析表明,弯矩是引起不同黏结长度试件局部混凝土开裂的关键因素之一,黏结长度由2 700 mm增大到3 200 mm仍然没有避免混凝土保护层剥离破坏的发生,但显著改善了加固梁的延性,明显延缓了钢筋屈服和构件破坏的进程。

试件150-200-T4.5、300-200-T4.5和400-200-T4.5的裂缝高度与荷载的关系如图11所示。在这三个试件中,试件150-200-T4.5的裂缝高度增长最为迅速,在100~110 kN时裂缝高度明显的涨幅是由CFRP板条端部斜裂缝引起的。除此之外,不同黏结长度试件裂缝高度的变化趋势相似,且均呈现出加载前期、中期增大,裂缝发展至倾斜嵌贴段(端部嵌贴段内)后趋于稳定的特点。

不同黏结长度试件的裂缝距跨中距离与荷载的关系曲线如图12所示。由图12可知,各试件斜率大致随着黏结长度的增大而减小,这意味着增大黏结长度能够在一定程度上减小裂缝向梁端扩展的速度。与黏结长度为2 700 mm的试件相比,黏结

长度为3 000、3 200 mm试件的裂缝扩展至板端的荷载分别提升了约59%、111%。值得注意的是,该组试件均采用4.5 mm厚的CFRP板条进行加固,这些试件的裂缝在加载后期均出现迅速向梁端扩展的现象,表明4.5 mm厚的板条对于本文试验中混凝土梁的加固程度过大。

试件150-200-T4.5承载力过小导致其应变分布不具参考价值。试件400-200-4.5的应变分布如图13所示。由图13可知,试件400-200-T4.5的应变向

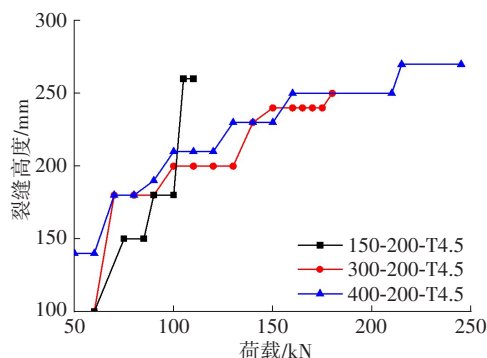


图11 具有不同黏结长度试件的裂缝高度-荷载关系曲线

Fig. 11 Cracking height vs. load curves of the specimens with different bond lengths

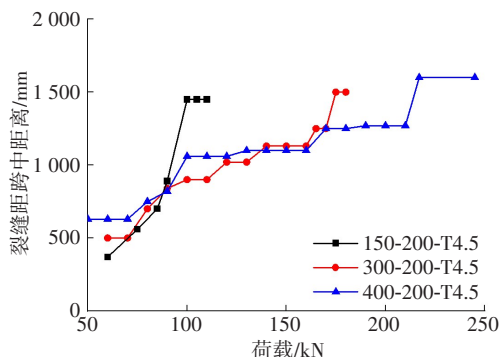


图12 具有不同黏结长度试件的裂缝距跨中距离-荷载关系曲线

Fig. 12 Crack distance to midspan vs. load curves of the specimens with different bond lengths

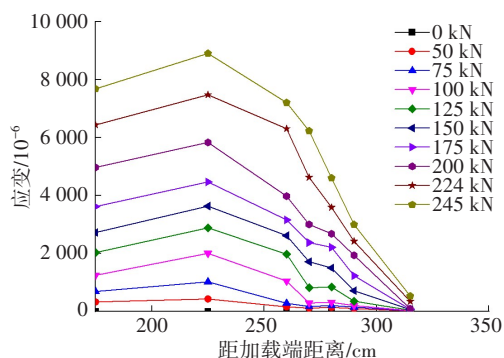


图13 试件400-200-T4.5的应变分布

Fig. 13 Strain distribution of specimen 400-200-T4.5

板端充分发展,在加载后期其倾斜嵌贴段应变达到了 $4\ 600\times 10^{-6}$,明显比图9~10所示的其他试件的大。尽管如此,其应力峰仅传递至倾斜嵌贴段而未进入水平嵌贴段,这进一步说明端部嵌贴段具有良好的锚固作用^[9-12]。

3 结论

本文通过5根预应力CFRP板条加固混凝土梁的静载试验研究,比较了端部嵌贴新技术与表层嵌贴技术加固梁的抗弯性能,阐明了不同CFRP板条尺寸和黏结长度影响下加固梁的破坏形态、极限承载力、裂缝分布规律等受力性能。具体结论如下:

1) 与传统的表层嵌贴技术相比,端部嵌贴技术可使CFRP加固的钢筋混凝土梁具有更大的极限承载力和延性,且端部嵌贴段构造能抑制裂缝向加固梁端部发展和锚固预应力CFRP板条,因此能够有效抑制混凝土保护层剥离破坏。

2) 较薄的CFRP板条试件的裂缝向梁端的扩展行为更稳定,材料利用率更大。采用较厚板条虽然能够避免CFRP板条被拉断,但会降低其与加固梁的变形协调性,大幅降低加固梁的延性,同时引起始于CFRP板条端部的混凝土保护层过早剥离破坏。

3) 在本文的试验条件下,增大黏结长度(由2 700 mm增大至3 200 mm)显著改善了加固梁的延性,但无法避免混凝土保护层发生剥离破坏。

参考文献(References):

- [1] AL-SAAD N T K, MOHAMMED A, AL-MAHAIDI R, et al. A state-of-the-art review: near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 748-769. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.121.
- [2] KIM Y J. State of the practice of FRP composites in highway bridges [J]. Engineering Structures, 2019, 179: 1-8. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.067.
- [3] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36.
- [4] YAO J, TENG J G, CHEN J F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints [J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36 (2): 99-113. DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.06.001.

- [5] PENG H, ZHANG J R, CAI C S, et al. An experimental study on reinforced concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP strips [J]. *Engineering Structures*, 2014, 79: 222-233. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.08.007.
- [6] BARRIS C, SALA P, GÓMEZ J, et al. Flexural behaviour of FRP reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP strips [J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 112059. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112059.
- [7] ZHANG S S, YU T, CHEN G M. Reinforced concrete beams strengthened in flexure with near-surface mounted (NSM) CFRP strips: current status and research needs [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 131: 30-42. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.07.072.
- [8] 彭晖, 丑佳璇, 张建仁, 等. 一种端部嵌贴预应力FRP板条的混凝土结构加固方法: 中国, CN110438910B [P]. 2021-01-05.
- PENG Hui, CHOU Jiaxuan, ZHANG Jianren, et al. The utility model relates to a concrete structure with prestressed FRP slats embedded at the ends: China, CN110438910B [P]. 2021-01-05.
- [9] 郑中华, 杨宏卫. 基于GESO的钢筋混凝土梁拓扑优化方法研究[J]. *交通科学与工程*, 2022, 38(2): 95-101. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.012.
- ZHENG Zhonghua, YANG Hongwei. Topology optimization of reinforced concrete beams based on GESO [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2022, 38(2): 95-101. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.012.
- [10] 雷启南, 王鹏, 南洪良, 等. 栓钉及荷载对简支组合梁滑移和挠度的影响分析[J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(4): 105-113. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022032408239771.
- LEI Qinan, WANG Peng, NAN Hongliang, et al. Analysis on the influence of studs and loads on slip and deflection of simply supported composite beams [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(4): 105-113. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022032408239771.
- [11] 孙同非, 杨则英. 基于SMA筋加固的RC梁最优预应力水平研究[J]. *公路与汽运*, 2023(3): 111-117. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.03.024.
- SUN Tongfei, YANG Zeyang. Study on optimal prestress level of RC beams strengthened with SMA bars [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2023(3): 111-117. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.03.024.
- [12] 张顺, 刘保东, 高猛, 等. 不同截面选型对波纹钢箱涵受力性能影响分析[J]. *中外公路*, 2024, 44(1): 126-132. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.01.017.
- ZHANG Shun, LIU Baodong, GAO Meng, et al. Influence of section selection on mechanical performance of corrugated steel box culvert [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(1): 126-132. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.01.017.

(责任编辑:石月珍)