

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202205192024101995

文章编号:1674-599X(2024)06-0009-08

引用格式:张智涛,龚爽,丑佳璇,等.端部无预应力的内嵌碳纤维加固梁试验研究[J].交通科学与工程,2024,40(6):9-16.

Citation: ZHANG Zhitao, GONG Shuang, CHOU Jiakuan, et al. Experimental study on near-surface mounted carbon fiber reinforced polymer strengthened beams with non-prestressed section at end[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(6): 9-16.

端部无预应力的内嵌碳纤维加固梁试验研究

张智涛¹,龚爽¹,丑佳璇¹,李恒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 南方桥梁长期性能提升国地联合工程实验室,湖南 长沙 410114)

摘要:针对表层嵌贴(near-surface mounted, NSM)预应力碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)加固梁易发生端部剥离破坏的问题,提出了增设无预应力段的端部锚固改进措施,并设计了5个采用表层嵌贴预应力CFRP加固的钢筋混凝土梁进行静载试验,以分析增设端部无预应力段、延长端部无预应力段长度对加固梁承载性能及变形性能的影响。结果表明:端部增设无预应力段能显著提升加固梁黏结端部的开裂荷载与极限荷载,有效地延缓并抑制加固梁端部的剥离破坏;与单纯采用预应力加固的方式相比,增设的端部无预应力段能弥补构件由施加预应力而导致的构件剩余变形能力降低;加固构件的承载能力和变形性能与端部增设的无预应力段长度之间均为正相关关系。

关键词:表层嵌贴;预应力CFRP;增设无预应力段;静载试验;端部剥离

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Experimental study on near-surface mounted carbon fiber reinforced polymer strengthened beams with non-prestressed section at end

ZHANG Zhitao¹, GONG Shuang¹, CHOU Jiakuan¹, LI Heng¹, PENG Hui^{1,2}

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

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Technique for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: To address the problem that the prestressed near-surface mounted (NSM) carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strengthened beam is prone to debonding at the end, this paper proposed an end-anchoring measure by adding non-prestressed sections and designed 5 prestressed NSM CFRP strengthened concrete beams for static loading test. The paper also analyzed the effects of adding the non-prestressed section at the end and extending the length of the non-prestressed section at the end on the bearing capacity and deformation performance of the strengthened beam. The results show that adding the non-prestressed section at the end can significantly increase the cracking load and ultimate load at the bonded end of the strengthened beam and effectively delay and restrain the debonding failure of the end. Compared with the prestressed reinforcement form, the non-prestressed section at the end can make up for the residual deformation capacity of the component which is reduced due to

收稿日期:2022-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52178186,51578078)

通信作者:彭晖(1976—),教授,主要从事预应力CFRP增强混凝土结构的力学和耐久性能等方面的研究工作。

E-mail:huipeng1210@163.com

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

the application of the prestress. The bearing performance and deformation performance of the strengthened components are positively correlated with the length of the non-prestressed section added at the end.

Key words: near-surface mounted; prestressed CFRP; adding non-prestressed section; static loading test; end debonding

近年来,随着我国经济的快速增长,交通需求激增,超载现象频发,加之设计施工环节可能存在的缺陷导致我国许多现役桥梁结构面临严峻的安全挑战。因此,对既有危旧桥梁进行维修加固已成为当前结构工程的研究重点。碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)作为一种密度小、强度高、抗疲劳能力强且具有良好的环境适应性的新兴土木工程材料,在混凝土结构加固领域已得到了推广应用^[1-4]。近十年来,预应力NSM CFRP加固钢筋混凝土梁已成为老化基础设施结构修复和改造的主流解决方案^[5]。

随着国内外学者对预应力NSM CFRP加固混凝土梁抗弯性能的持续深入研究^[6-9],研究人员发现在不设置永久性锚具的情况下,加固结构容易在CFRP黏结端部出现脆性剥离破坏^[10-11],导致结构在达到预期承载力前就过早失效。针对这一不利的破坏模式,许多学者提出了增设外部附加装置的预应力NSM CFRP加固梁端部锚固方案。EL-MAADDAWY等^[12]提出了一种用带螺栓的钢板压条固定CFRP带材的机械锚固法,试验结果表明:加固构件易发生局部拉断或承压处易产生应力集中破坏;卓静等^[13]研发了一种波形齿夹具锚,该锚具虽能同时满足加固和施工便捷性的要求,但其需要凿除一定厚度的混凝土保护层进行埋置,因此难以应用于NSM CFRP加固梁;SMITH等^[14]采用了端部设置U形箍的锚固措施,这一措施能有效地抑制端部剥离的发生,但对加固结构承载性能的提升却非常有限;梁小雨^[15]研究了一种在底部预留孔洞并植入锚杆的端锚方法,但这种方法存在试件制作工艺复杂,需要严格控制锚杆深度及植锚间距等缺点。综上所述,现有的抑制预应力NSM CFRP加固梁端部剥离的方法多数为增设外部附加锚固装置,然而这些方法普遍存在工艺复杂、成本增加及可能损伤原结构等不足,导致实际锚固效果不理想。基于此,本文提出了一种增设无预应力段的端部锚固方法,通过静载试验研究了增设无预应力段后预应力NSM CFRP加固钢筋混凝土梁的力学性能和破坏形

态,分析了端部无预应力段长度的变化对构件性能的影响,以期为预应力CFRP加固混凝土梁技术提供新的设计思路与参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文设计了5个NSM CFRP加固钢筋混凝土梁进行试验,其中包括1个非预应力加固试件、1个全预应力加固试件、3个增设无预应力段的加固试件。所有试件均采用设计强度等级为C30的混凝土,标准混凝土梁试件的尺寸均为2 700 mm(长)×150 mm(宽)×250 mm(高),净跨长为2 500 mm。在受拉区预制了2个通长槽,槽宽10 mm,槽深20 mm,槽边距为30 mm。受拉区、受压区主筋均布置了2根直径为16 mm的HRB400钢筋。同时,为避免试验梁在弯曲破坏前先发生剪切破坏,基于“强剪弱弯”的设计原则,全梁通长布置了间距为100 mm、直径为8 mm的HRB235箍筋,试件尺寸和配筋构造如图1所示,钢筋力学性能见表1。试验所用的CFRP板条为Dextra公司生产的ASTECC T124-2型板条,其截面尺寸为2 mm(厚)×16 mm(宽);黏结胶采用瑞士Sika公司生产Sikadur®-30型环氧树脂胶,CFRP板条及环氧树脂的力学性能见表2。在综合考虑CFRP材料高性能利用率及加固构件的变形性能后^[16-20],本文将CFRP初始应力设置为900 MPa(相当于CFRP拉伸强度的45%),试件参数见表3。由表3可知各试件的初始应力、预应力黏结长度及无预应力黏结长度等参数。

1.2 试件制作

本文采用的端部锚固方法结合了两种技术:一种是施加预应力的NSM CFRP加固混凝土梁的技术,另一种是梯度放张预应力CFRP加固混凝土结构的技术。试验时将预先开好槽的钢筋混凝土梁倒置,采用课题组自主研发的预应力NSM CFRP板条夹具将其固定于预应力张拉机具上,通过顶推张拉机具逐级且缓慢地拉伸CFRP板条,直至CFRP板

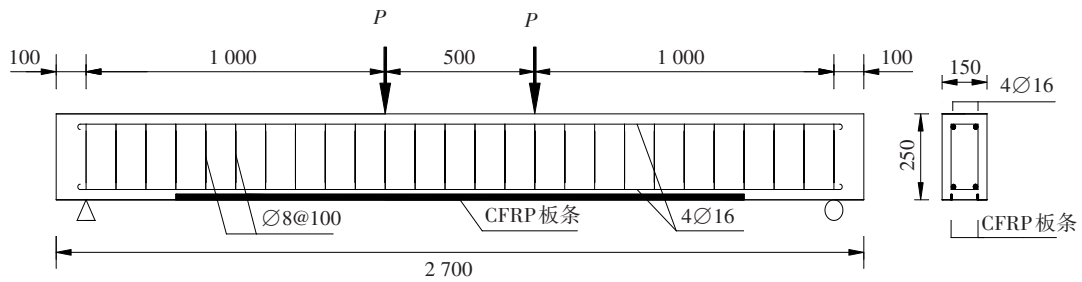


图1 试件尺寸与配筋(单位:mm)

Fig. 1 Dimension and reinforcement of specimen (unit:mm)

表1 钢筋力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel

钢筋型号	直径/mm	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
HRB400	16	400	540	201.9

表2 CFRP及黏结剂力学性能

Table 2 Mechanical properties of CFRP and epoxy as cementing agent

材料	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	剪切强度/MPa
CFRP板条	2 068	140.0	
环氧树脂	24~27	11.2	14~17

注:+15 °C条件下环氧树脂7 d达到上述性能。

表3 试件参数

Table 3 Specimen parameters

试件编号	初始应力/MPa	预应力黏结段长度/mm	无预应力黏结段长度/mm	总黏结段长度/mm
N-L2000	0	0	2 000	2 000
P-L2000	900	2 000	0	2 000
P-L1400+400	900	1 400	2×200	1 800
P-L1400+600	900	1 400	2×300	2 000
P-L1400+800	900	1 400	2×400	2 200

注:试件编号中P表示预应力,N表示非预应力,L后面数字表示预应力加固长度,+号后面数字表示对称两侧无预应力黏结段总长度。

条达到预设的初始应力。内置NSM CFRP板条夹具如图2所示,预应力CFRP张拉机具如图3所示。



图2 NSM CFRP 夹具

Fig. 2 NSM CFRP anchor



图3 预应力CFRP张拉机具

Fig. 3 Tensioning machine for prestressed CFRP

当被加固试件为端部无预应力的NSM CFRP加固梁时,待NSM CFRP槽内环氧树脂固化达到黏结强度并完全释放预应力后,再根据实际需求在CFRP板条的黏结端部截面两侧填充一定长度的黏结剂作为锚具。为便于区分,将放张后预应力直接作用的截面简称为“放张端部”,黏结CFRP板条末端的截面简称为“黏结端部”。梁两端的无预应力黏结段沿梁中线对称布置,如图4所示。

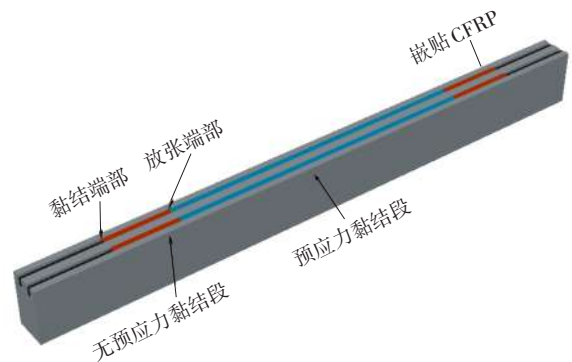


图4 端部增设无预应力段加固梁示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reinforced beam with non-prestressed section at the end

1.3 加载及量测

试验加载装置如图5所示。静载试验前,先对试件预加载6 kN并持载10 min,在检查各应变测点

及仪表是否正常工作后,采用力-位移混合控制方式进行加载;正式加载过程中,首先以10 kN/级的加载步长控制加载,直至试件黏结端部出现首条裂缝,然后,调整加载步长为5 kN/级。当试件加载至无法稳定维持某一荷载级别时,采用跨中位移控制的加载方式,每级增加2 mm,直至试件最终破坏。

试验过程中,在跨中截面的受压区混凝土表面粘贴电阻应变片,并在跨中截面粘贴NSM CFRP应变片,所有应变数据均采用TDS-150应变采集仪进行采集。百分表分别布置在试件的跨中、加载点和支座截面,挠度数据采用百分表进行测量。

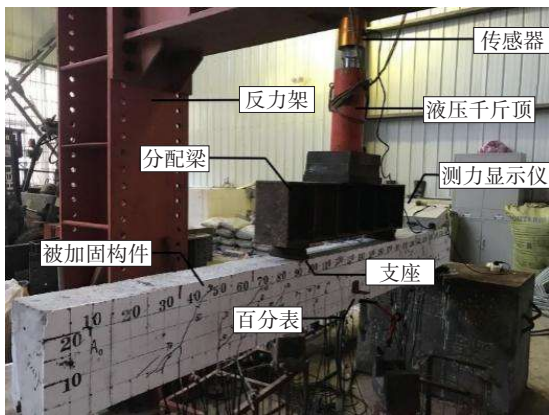


图5 试验加载装置
Fig. 5 Test setup

2 试验结果与分析

2.1 初始预应力对加固梁力学性能的影响

试验过程中非预应力加固试件N-L2000的破坏形态如图6所示,预应力加固试件P-L2000的破坏形态如图7所示。由图6~7可知,非预应力试件与预应力试件的最终破坏模式均为端部混凝土保护层剥离,但非预应力加固试件N-L2000在保护层剥离前已出现受压区混凝土被压碎的现象。非预应力加固试件N-L2000及预应力加固试件P-L2000的特征荷载、跨中CFRP应变、跨中混凝土应变及跨中受拉钢筋应变曲线如图8所示。由图8可知,试件P-L2000的跨中开裂荷载相较于试件N-L2000提升了100%,且在剥离破坏前的任意荷载下,P-L2000材料应变的增长速率始终比N-L2000的小。这表明构件施加的初始应力能有效地平衡一部分外部荷载引起的拉应力,同时降低构件内受拉钢筋的应力,从而延缓受拉混凝土的开裂过程。然而,试件P-L2000的端部开裂荷载、端部水平开裂荷载及极限

荷载相较于N-L2000分别降低了73.3%、66.7%、49.5%,这可能是由于预应力加固试件的黏结端部同时也是放张端部,随着外部荷载的不断增大,该截面的混凝土同时承受由CFRP传递而来的、在预应力和外荷载共同作用下出现的集中应力。由此可见,预应力NSM CFRP加固梁CFRP黏结端部出现的应力集中,是加固结构材料性能无法得到充分发挥甚至过早破坏的主要原因。因此,针对这种不利的端部剥离破坏模式,设计简便且合理的锚固与防治措施显得尤为必要。



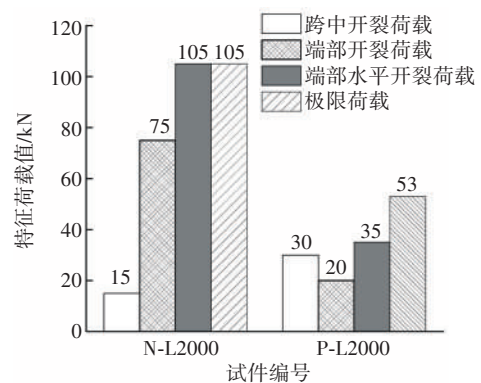
图6 非预应力加固试件N-L2000的破坏形态

Fig. 6 Failure mode of non-prestressed reinforced specimen N-L2000

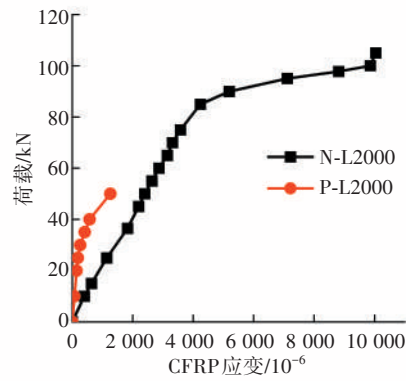


图7 预应力加固试件P-L2000的破坏形态

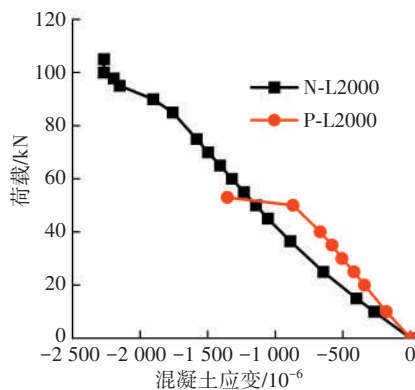
Fig. 7 Failure mode of prestressed reinforced specimen P-L2000



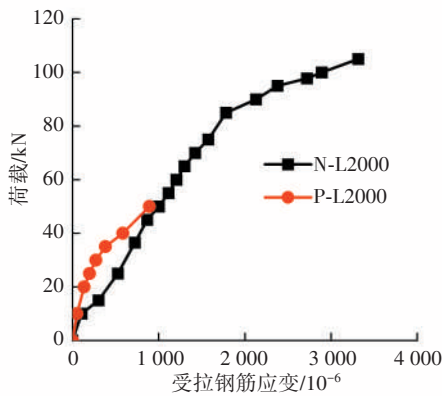
(a) 特征荷载比较



(b) 跨中CFRP应变曲线



(c) 跨中混凝土应变曲线



(d) 跨中受拉钢筋应变曲线

图8 试件N-L2000与试件P-L2000试验值比较

Fig. 8 Comparison of test values between specimen N-L2000 and specimen P-L2000

2.2 增设无预应力段对加固梁力学性能的影响

增设无预应力段的加固试件P-L1400+600的破坏形态如图9所示。由图9可知,相较于预应力NSM CFRP加固梁,端部无预应力的加固试件在黏结端部发生了混凝土保护层剥离破坏,但被撕裂剥落的混凝土、环氧树脂胶层以及CFRP三者之间仍保持良好的黏结状态。

不同加固形式下的试件试验结果见表4。由表4可知,与预应力加固试件P-L2000相比,试件P-L1400+600的放张端部与黏结端部被增设的无预应力段有效地分开,因而其放张端部开裂荷载提升了50%,黏结端部开裂荷载提升了250%,最终在荷载达到115 kN时其端部混凝土保护层才发生剥离破坏,极限荷载提升了117%。这表明,试件P-L1400+600中增设的无预应力段成功地分散了由放张预应力及外荷载所引起的界面黏结集中应力,有效避免了这两种应力在同一位置叠加所带来的不利影响,显著提高了加固构件黏结端部的开裂荷载与极限荷载,从而有效地延缓了预应力NSM CFRP加固试件黏结端部的剥离破坏。



图9 增设无预应力段的加固试件P-L1400+600的破坏形态

Fig. 9 Failure mode of specimen P-L1400+600 reinforced by adding non-prestressing section

表4 不同加固形式下试件的试验结果

Table 4 Main test results of specimens in different reinforcement forms

试件编号	跨中开裂荷载/kN	放张端部开裂荷载/kN	黏结端部开裂荷载/kN	端部水平开裂荷载/kN	极限挠度/mm	极限荷载/kN	破坏模式
P-L2000	30	20	20	35	11.16	53	B
N-L2000	15	75	75	105	34.74	105	A+B
P-L1400+600	35	30	70	-	21.65	115	B ₂

注:A为混凝土压碎受弯破坏,B为混凝土保护层剥离破坏,B₂为黏结端部混凝土保护层剥离破坏。

预应力加固、非预应力加固与增设无预应力段试件的跨中荷载-挠度曲线如图10所示。由图10可知,增设无预应力段加固试件P-L1400+600

的变形性能介于预应力加固试件 P-L2000 与非预应力加固试件 N-L2000 的变形性能之间,其极限挠度值较预应力加固试件 P-L2000 提高了 94%,这表明与全预应力加固方式相比,端部增设的无预应力段能弥补构件因施加预应力而降低的剩余变形能力,从而显著提高构件的延性。

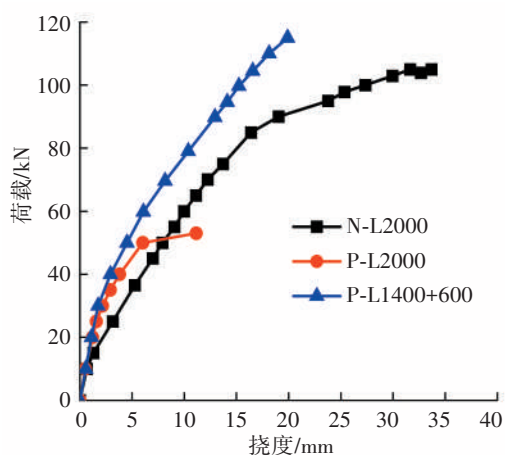


图 10 不同加固形式下试件跨中荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curve of specimens in different reinforcement forms

进一步分析图 10 中曲线的趋势可以看出,除加载初期混凝土开裂引起的明显刚度退化外,增设无预应力段的加固构件在整个受载过程中未表现出突变性的刚度退化特征。这意味着不同加固形式下 NSM CFRP 加固梁的受力过程基本相似,可分为以下三个阶段:第一阶段为弹性阶段,此阶段发生在受拉截面混凝土开裂之前,CFRP、混凝土与钢筋三者协同承受拉应力,构件处于全截面工作状态,该阶段内预应力加固构件相较于非预应力加固构件其初始刚度更高,但材料应变及挠度变化趋势均为线性增长;第二阶段为混凝土开裂后至受拉钢筋屈服阶段,随着外部荷载的不断增大,构件产生了弯剪裂缝,裂缝截面上的混凝土逐渐失去承载能力,裂缝间 CFRP 与钢筋因应力重分布而承担了更多的拉应力,CFRP-混凝土界面与钢筋-混凝土界面的黏结性能逐渐退化;第三阶段为受拉钢筋屈服后,此时由外部荷载增加而导致的剩余拉应力由预应力 CFRP 承担,其黏结端部截面在预应力与外荷载的共同作用下产生了较高的界面剪切应力与拉伸应力,最终导致该截面的混凝土保护层在黏结界面退化与较大的界面应力的双重影响下发生撕裂并剥落。

2.3 无预应力段长度变化对加固梁力学性能影响

试验过程中观测到的增设无预应力段加固梁 P-L1400+400 与 P-L1400+800 的破坏形态如图 11~12 所示。结合图 9 中试件 P-L1400+600 的破坏形态可以发现,端部无预应力加固构件的破坏模式与无预应力黏结段长度无关。在达到极限荷载时,这些构件的破坏过程均遵循相同的模式:首先在黏结端部的截面形成水平方向的裂缝分支,随后裂缝扩展导致保护层混凝土发生剥离破坏。



图 11 增设无预应力段加固试件 P-L1400+400 的破坏形态

Fig. 11 Failure mode of specimen P-L1400+400 reinforced by adding non-prestressed section



图 12 增设无预应力段加固试件 P-L1400+800 的破坏形态

Fig. 12 Failure mode of specimen P-L1400+800 reinforced by adding non-prestressing section

端部增设不同长度无预应力段的预应力 NSM CFRP 加固梁试验结果见表 5。由表 5 可知,随着增设的无预应力段的长度由 200 mm 增长为 400 mm,加固构件的放张端部开裂荷载、黏结端部开裂荷载与极限荷载均呈现出增长的趋势。不同无预应力段长度下试件荷载-挠度曲线如图 13 所示。由图 13 可知,加固构件端部增设的无预应力段越长,其剥

离破坏时的极限挠度值也越大,也具有更好的延性破坏特征。由此可见,加固构件的承载能力和变形性能均与增设的无预应力段长度之间存在显著的正相关关系。

表5 无预应力段长度对加固试件力学行为的影响

Table 5 Effects of non-prestressed section length on mechanical behavior of reinforced specimens

试件编号	跨中开裂荷载/kN	放张端部开裂荷载/kN	黏结端部开裂荷载/kN	端部水平开裂荷载/kN	极限挠度/mm	极限荷载/kN	破坏模式
P-L1400+400	40	20	45	95	14.88	103	B ₂
P-L1400+600	35	30	70	-	21.65	115	B ₂
P-L1400+800	35	30	125	-	22.53	130	B ₂

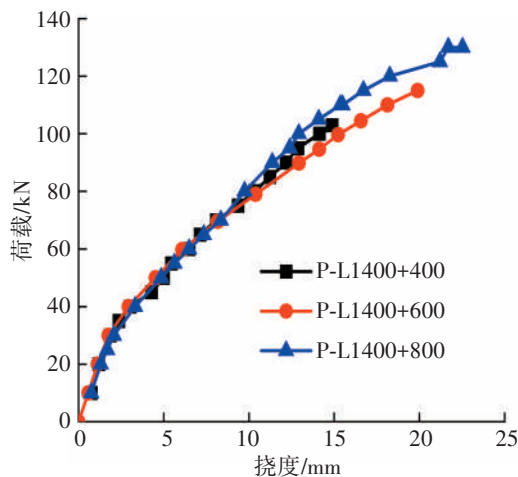


图13 不同无预应力段长度下试件跨中荷载-挠度曲线

Fig. 13 Load-deflection curve of specimens at different non-prestressed section lengths

3 结论

针对目前预应力NSM CFRP加固梁易发生端部剥离破坏的问题,本文提出一种增设无预应力段的端部锚固方法。对比考察了不同预应力加固形式下加固梁的力学性能,并在此基础上分析了增设端部无预应力段、延长端部无预应力段长度对加固梁承载性能及变形性能的影响。研究表明:

1) 对预应力NSM CFRP加固梁增设端部无预应力段能显著提高加固构件的黏结端部开裂荷载与极限荷载,从而延缓端部剥离破坏的发生。

2) 与全预应力NSM CFRP加固方式相比,端部

设置的无预应力段能弥补构件因施加预应力而降低的剩余变形能力,进而提高构件延性。

3) 加固构件承载能力和变形性能与端部增设的无预应力段长度之间均为正相关关系。

参考文献(References):

- [1] 张建仁,张智伟,彭晖,等.表层嵌贴碳纤维板混凝土试件疲劳性能研究[J].交通科学与工程,2020,36(4):1-9.DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.001.
ZHANG Jianren, ZHANG Zhiwei, PENG Hui, et al. An experimental investigation on the fatigue performance of NSM CFRP strip-concrete interface [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 1-9. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.001.
- [2] 王进潇,程斌,闫兴非,等.全FRP车行桥梁结构设计与分析[J].公路工程,2020,45(1):92-97. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.01.017.
WANG Jinxiao, CHENG Bin, YAN Xingfei, et al. Structure design and analysis of all FRP vehicle bridge [J]. Highway Engineering, 2020, 45(1): 92-97. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.01.017.
- [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. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-131X.2006.03.004.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-131X.2006.03.004.
- [4] BUYUKOZTURK O, GUNES O, KARACA E. Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(1): 9-19. DOI: 10.1016/S0950-0618(03)00094-1.
- [5] DE-LORENZIS L, TENG J G. Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2): 119-143. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.08.003.
- [6] EL-HACHA R, GAAFAR M. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface-mounted CFRP bars [J]. PCI Journal, 2011, 56(4): 134-151. DOI: 10.15554/pci.09012011.134.151.
- [7] 徐平,曾宪桃,丁亚红,等.表层嵌入预应力碳纤维筋混凝土梁抗弯试验研究[J].工业建筑,2012,42(3):71-75. DOI: 10.13204/j.gyjz2012.03.020.
XU Ping, ZENG Xiantao, DING Yahong, et al. Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted prestressed CFRP tendons [J]. Industrial Construction, 2012, 42(3): 71-75. DOI: 10.13204/j.gyjz2012.03.020.

- [8] REZAZADEH M, COSTA I, BARROS J. Influence of prestress level on NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC beams [J]. *Composite Structures*, 2014, 116: 489-500. DOI: 10.1016/j.compstruct. 2014.05.043.
- [9] 张智梅, 熊浩. 表层嵌贴预应力 CFRP 板条加固 RC 梁抗弯性能有限元分析 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2018, 24(1): 100-107. DOI: 10.12066/j.issn.1007-2861.1807.
ZHANG Zhimei, XIONG Hao. Finite element analysis on flexural performance of RC beams strengthened with pre-stressed near-surface-mounted CFRP strips [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2018, 24 (1) : 100-107. DOI: 10.12066/j.issn.1007-2861.1807.
- [10] KHALIFA A M. Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2016, 55 (2) : 1497-1505. DOI: 10.1016/j.aej.2016.01.033.
- [11] TENG J G, CHEN J F. Mechanics of debonding in FRP-plated RC beams [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 2009, 162 (5) : 335-345. DOI: 10.1680/stbu.2009.162.5.335.
- [12] EL-MAADDAWY T, SOUDKI K. Strengthening of reinforced concrete slabs with mechanically-anchored unbonded FRP system [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22 (4) : 444-455. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.022.
- [13] 卓静, 李唐宁, 邢世建, 等. 一种锚固 FRP 片材的体外预应力新方法 [J]. *土木工程学报*, 2007, 40(1): 15-19, 41. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-131X.2007.01.003.
ZHUO Jing, LI Tangning, XING Shijian, et al. An innovative external prestressing method with carbon fiber sheet anchored to structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(1): 15-19, 41. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-131X.2007.01.003.
- [14] SMITH S T, TENG J G. Shear-bending interaction in debonding failures of FRP-plated RC beams [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2003, 6(3) : 183-199. DOI: 10.1260/136943303322419214.
- [15] 梁小雨. 锚固作用下复材加固混凝土梁保护层剥离机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LIANG Xiaoyu. Study on peeling mechanism of protective layer of concrete beams strengthened with composite materials under anchorage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [16] HONG S, PARK S K. Effect of prestress and transverse grooves on reinforced concrete beams prestressed with near-surface-mounted carbon fiber-reinforced polymer plates [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 91: 640-650. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.01.018.
- [17] 丁亚红, 马艳洁. 内嵌预应力碳纤维筋加固混凝土梁受力性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(2) : 128-134. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.02.017.
DING Yahong, MA Yanjie. Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted tendons [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33 (2) : 128-134. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.02.017.
- [18] 滑硕, 周东华, 王鹏, 等. 考虑剪切变形的变截面构件的变形计算 [J]. *交通科学与工程*, 2022, 38(3) : 94-99. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.001.
HUA Shuo, ZHOU Donghua, WANG Peng, et al. Deformation calculation of variable cross section member considering shear deformation [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2022, 38(3) : 94-99. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.001.
- [19] 李谦, 吕文舒. CFRP 加固的承插式桥墩抗震性能分析 [J]. *中外公路*, 2023, 43(5) : 109-113. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.019.
LI Qian, LYU Wenshu. Seismic performance analysis of CFRP reinforced socket pier [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43 (5) : 109-113. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.019.
- [20] 陈业丰, 陈得良. 碳纤维布加固具多裂纹 RC 梁振动分析 [J]. *公路与汽运*, 2022(1) : 124-127, 132. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.032.
CHEN Yefeng, CHEN Deliang. Vibration analysis of RC beams with multiple cracks strengthened with carbon fiber sheets [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2022 (1) : 124-127, 132. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.032.

(责任编辑:薛仪)