

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202203072024081976

文章编号: 1674-599X(2024)04-0122-07

引用格式: 林福宽, 彭 晖, 龚 爽, 等. 预应力NSM CFRP加固悬臂梁有限元与试验研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 122-128.

Citation: LING Fu kuan, PENG Hui, GONG Shuang, et al. Finite element analysis and test research on cantilever beams strengthened with pre-stressed near-surface-mounted CFRP strips[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 122-128.

# 预应力NSM CFRP加固悬臂梁有限元与试验研究

林福宽, 彭晖, 龚爽, 吕卉敏

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为研究表层嵌贴碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)加固技术对悬臂梁性能的提升效果, 采用ABAQUS有限元分析软件建立了悬臂梁的数值模型, 分别分析了CFRP加固方式、CFRP加固率、CFRP预应力对悬臂加固梁抗弯性能的影响, 并在数值模拟的基础上选取部分试件进行现场试验, 分析其加载过程、破坏模式、荷载-挠度曲线和钢筋应变, 以此验证有限元模型的准确性。结果表明: 有限元模型结果与试验结果吻合良好, 能够有效地预测加固梁的极限荷载、挠度及损伤模式; CFRP加固方式、CFRP加固率、CFRP预应力对悬臂加固梁的承载力都有较显著的影响。通过表层嵌贴预应力CFRP加固悬臂梁的有限元与试验研究, 验证了表层嵌贴CFRP预应力加固技术应用于悬臂梁的可行性。

**关键词:** CFRP; 表层嵌贴; 悬臂梁; 试验研究; 数值模拟

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

## Finite element analysis and test research on cantilever beams strengthened with pre-stressed near-surface-mounted CFRP strips

LING Fukuan, PENG Hui, GONG Shuang, LYU Huimin

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** To investigate the improvement effect of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforcement technology on the performance of cantilever beams, a numerical model of the cantilever beam was established using ABAQUS finite element analysis software. The effects of CFRP reinforcement method, CFRP reinforcement rate, and CFRP prestress on the bending performance of cantilever reinforced beams were analyzed. And based on numerical simulation, some specimens were selected for on-site testing to analyze their loading process, failure mode, load deflection curve, and steel bar strain, in order to verify the accuracy of the finite element model. The results show that the finite element model is in good agreement with the experimental results, and can effectively predict the ultimate load, deflection, and damage mode of the reinforced beam; The CFRP reinforcement method, CFRP reinforcement rate, and CFRP prestressing all have a significant impact on the bearing capacity of cantilever reinforced beams. In addition, The feasibility of applying surface embedded prestressed CFRP reinforcement technology to cantilever beams was verified through finite element and experimental research.

**Key words:** CFRP; near-surface-mounted; cantilever beam; experimental research; numerical simulation

收稿日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(5217818、51578078)

通信作者: 彭晖(1976—), 男, 教授, 主要从事CFRP加固方面的研究工作。E-mail: huipeng@csust.edu.cn

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

钢筋混凝土结构在长期的运营过程中,不可避免地会经历自然老化与潜在缺陷的累积,这是一个无法逆转的物理过程<sup>[1]</sup>。近年来,我国在大力发展基础设施建设的同时,也提出了要强化基础设施的养护,增强设施的耐久性和可靠性。在此背景下,采取有效措施以延缓结构损伤的发展速度,并对已受损的钢筋混凝土建筑结构进行科学合理的加固处理,不仅能够有效提升结构的承载能力,还能显著延长其服役寿命,这对确保国家基础设施的安全、稳定与可持续发展具有重要意义。

传统的结构加固方法,如加大截面加固法、外包钢加固法、增设构件加固法和喷射混凝土加固法等,都存在一些明显的缺陷,如增加了结构自重、改变了结构形状、施工复杂且周期长、存在耐久性风险等。碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)的密度通常仅为钢筋的1/4,但抗拉强度可达钢筋的数倍,且耐腐蚀性极佳。这些优异的材料性能使得CFRP在结构加固领域得到了广泛应用<sup>[2-3]</sup>。CFRP材料与结构的结合,通常采用表面粘贴<sup>[4]</sup>(externally bonded, EB)或表层嵌贴<sup>[5]</sup>(near surface mounted, NSM)两种方法。其中,表层嵌贴CFRP加固技术是在构件表面开槽,将CFRP筋或板材嵌入槽中,并填入黏结剂使其与构件紧密结合的加固方法,该方法通过增加CFRP与结构的黏结面积进而提升黏结效果,该技术将CFRP嵌贴在构件内部,使结构具有更好的黏结性能和抗外界干扰性能,已成为了近年来的研究热点<sup>[6-9]</sup>。现有的研究主要集中于加固简支梁,但其实表层嵌贴CFRP加固技术的特点也适合于桥面板、悬臂梁和连续梁负弯矩区加固。

悬臂梁、框架梁和连续梁根部在自重、荷载作用下均会产生负弯矩,使得结构容易出现裂缝进而发生破坏。目前,负弯矩区的加固技术大多还停留在传统的加固方法上<sup>[10]</sup>,只有少数学者采用外贴CFRP法进行加固<sup>[11-12]</sup>,而使用表层嵌贴CFRP的方式加固悬臂梁更是鲜有学者尝试<sup>[13-15]</sup>。本文针对悬臂梁的结构特点并参考以往学者的经验,通过在悬臂梁顶部嵌入CFRP板条并对其施加预应力,研究表层嵌贴预应力CFRP加固技术对悬臂梁抗弯性能的影响。具体试验方法为:首先建立有限元模型进行数值模拟,然后进行试验验证,最后根据试验过程和结果修正有限元模型,验证加固效果。

1 试验方案

试件设计如图1所示,其中悬臂梁试件总长为1 700 mm,锚固段长度为400 mm,弯剪段长度为1 200 mm,截面尺寸为150 mm×250 mm。选取C40混凝土。同时,为防止悬臂梁在锚固段与弯剪段的结合处发生破坏,自锚固端点起,设定一个600 mm长的加密区域。此区段内箍筋加密为C8@50 mm,并增设1根C16钢筋进行补强,所有钢筋均采用HRB400热轧带肋钢筋。在悬臂梁顶部受拉侧预制截面尺寸为15 mm×20 mm的通长凹槽内,嵌入CFRP板条进行加固,并采用环氧树脂胶作为黏结剂。在CFRP板条上以35 mm为间距布设光栅应变片;在锚固段与弯剪段结合处、弯剪段中点布设受拉钢筋和箍筋应变片;在弯剪段中点梁侧的不同高度上布设混凝土应变片。本文共设计5根悬臂梁试件,建立所有试件的有限元模型进行数值模拟,并选取其中3根梁进行实际试验验证。其中,试件C-1为未加固的钢筋混凝土对比梁,其余试件均为表层嵌贴CFRP的加固梁,试件参数及材料性能见表1和表2。

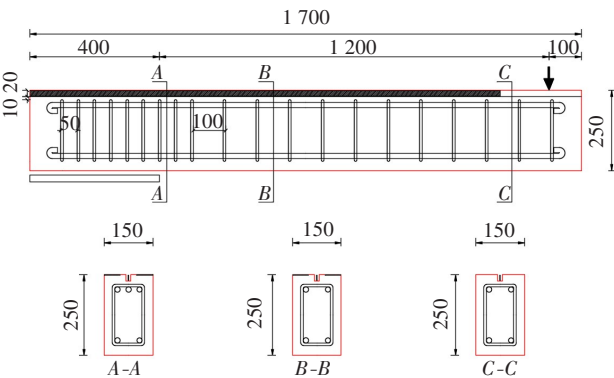


图1 悬臂梁试件细节(单位:mm)  
Fig. 1 Details of cantilever beam specimen (unit:mm)

表1 材料性能  
Table 1 Material properties

材料	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa
C40混凝土		34.1	43.1
HRB400钢筋	540.0	201.9	442.0
CFRP板条	2 561.1	150.2	
sikadur-30CN胶	31.9	11.2	

表2 悬臂梁试件参数

Table 2 Parameters of cantilever beam specimens

试件编号	嵌贴CFRP截面尺寸	嵌贴CFRP长度/mm	嵌贴CFRP预应力/MPa	外贴CFRP截面尺寸	外贴CFRP长度/mm	外贴CFRP预应力/MPa	加固率/%	试验
C-1								是
NC-1	2 mm×16 mm	1 600					0.057	
NPC-1	2 mm×16 mm	1 600	1 000				0.057	是
NCE-1	2 mm×16 mm	1 600		50 mm×3 mm	1 000	0	0.325	
NPCE-1	2 mm×16 mm	1 600	1 000	50 mm×3 mm	1 000	0	0.325	是

注:试件编号中C代表悬臂梁,N表示表层嵌贴加固,P表示施加预应力(仅对表层嵌贴CFRP板条施加1 000 MPa预应力),E表示外贴加固。

试验加载装置如图2所示。加载过程中有如下三点值得注意:首先,在加载千斤顶的底部放置铰支座以保证加载过程中千斤顶及传感器能垂直于反力架;然后,在加载前使悬臂段顶部的机械千斤顶持荷200 kN左右,并在加载过程中逐渐增加荷载以满足受力平衡关系,且为了保证悬臂端在加载过程中不出现翘曲,需同时限制锚固端混凝土,防止其出现纵向滑移;最后,采用螺杆将试件悬臂端与竖向反力架固结,进一步限制悬臂梁轴向位移。

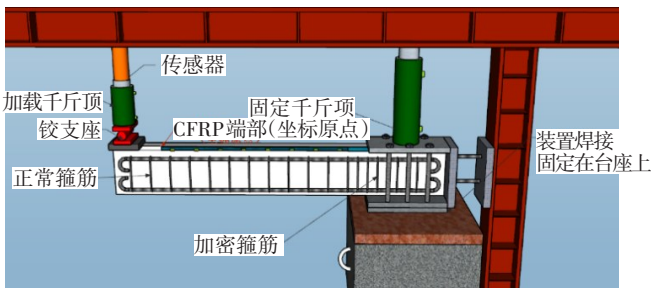
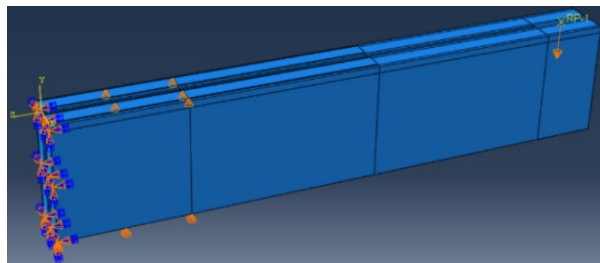


图2 试验加载装置

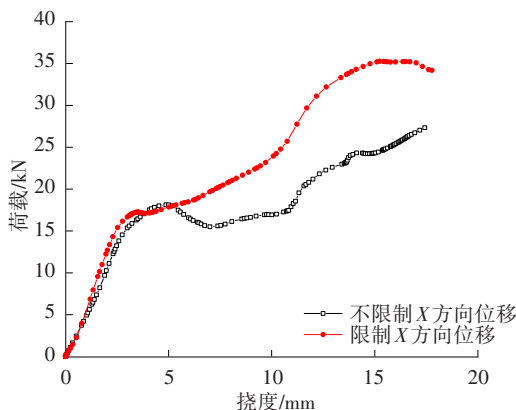
Fig. 2 Test loading device

## 2 影响因素分析

本试验设计与常规的三点式悬臂梁荷载试验有所不同,悬臂段竖向完全固结。为了深入探究加载过程中悬臂端可能发生的翘曲现象,以及这种翘曲如何引发试件在轴向的滑移,进而削弱其承载能力,本文采用了数值模拟的方法对未加固试件进行模拟与演算。图3(a)为有限元模型边界条件设置示意图,图3(b)为不同边界条件下荷载-挠度曲线,从结果中可以看出,当不限制试件X方向的位移时,加载至18 kN时未加固试件会进入明显的软化阶段,极限荷载明显偏低。



(a) 有限元模型边界条件设置



(b) 荷载-挠度曲线

图3 边界条件分析

Fig. 3 Analysis of boundary conditions

本文对试验设计中的所有试件均建立了有限元模型,并进行数值分析。其中,混凝土采用塑性损伤模型进行模拟,钢筋简化为理想弹塑性材料,CFRP设置为线弹性模型,表层嵌贴CFRP与混凝土的黏结界面采用线性弹簧单元进行模拟。根据拉拔试验得到了CFRP-混凝土界面黏结性能<sup>[16]</sup>,用以定义弹簧单元的刚度参数;外贴CFRP与混凝土的黏结界面则采用Tie接触进行约束(忽略两者间的相对滑移),具体计算结果如图4和图5所示。由图4(a)荷载-挠度曲线可以看出,表层嵌贴CFRP加固悬臂梁的承载性能都得到了显著提升,极限荷载提升幅度为

21.41%~65.70%, 极限挠度提升幅度为 11.33%~51.95%。其中,仅采用表层嵌贴预应力 CFRP 加固的试件极限荷载提高了 32.71%。试件 NPC-1 的 CFRP 应变分布如图 4(b)所示,由图 4(b)可以看出 CFRP 应变与此处弯矩近似呈正相关关系,但在靠近悬臂段的部分(图中横坐标 1 000~1 200 mm 区段)应变值有明显波动,出现了明显的“峰”和“谷”。其原因可能是:此区段处于弯剪段和悬臂段的交界处,受拉钢筋由 3 根减少至 2 根,在弯矩和剪力的共同作用下,在此处应力存在显著的突变,使得不同截面间的裂缝过大,处在裂缝位置的 CFRP 受到力的共同作用,产生了 CFRP 应变波动。从图 5 所示的损伤示意图中可以看出,对比梁的破坏主要体现在混凝土上,悬臂段内混凝土受到明显的压应力,悬臂段与弯剪段的交界处存在较大面积的混凝土受拉区。在弯剪段可以看到明显的弯剪裂缝,裂缝间距较大,裂缝与梁的纵向夹角也较大,对比梁呈现出明显的弯剪破坏形态。而加固梁的破坏则有所不同,悬臂段混凝土损伤更为严重,弯剪段裂缝数量更多,裂缝间距和夹角都有所减小,但由于 CFRP 的存在,梁顶受拉区的损伤更为均匀。

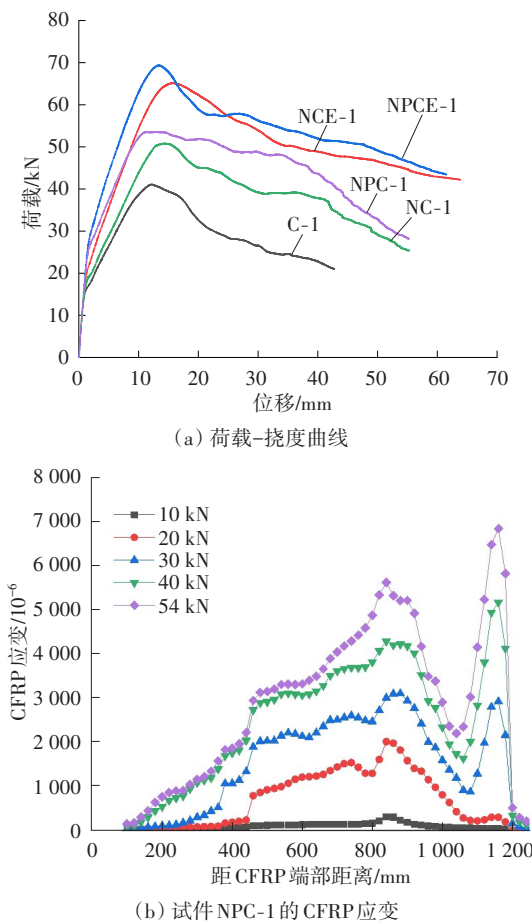


图4 有限元计算结果

Fig. 4 Finite element calculation results

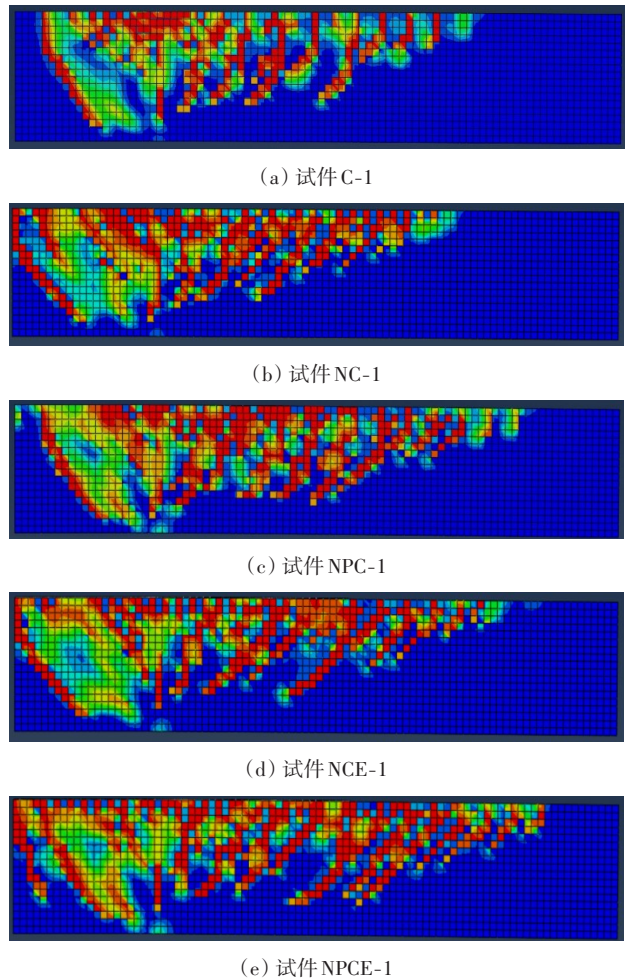


图5 损伤示意图

Fig. 5 Schematic diagram of damage

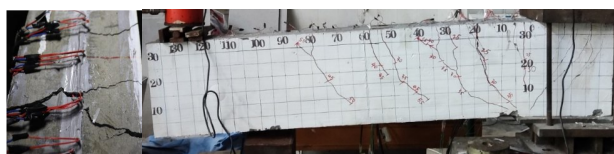
### 3 试验分析

在有限元模型的基础上,选择试件 C-1、NPC-1 和 NPCE-1 进行现场试验,以验证数值模拟的有效性,并对其不足之处进行改进。

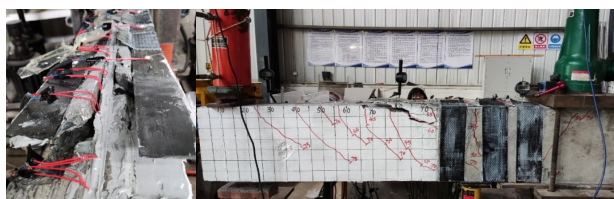
试件 C-1 为普通钢筋混凝土梁,破坏模式为常规的悬臂梁弯剪破坏,在此不进行详细叙述。

当加载至 25 kN 时,试件 NPC-1 在悬臂段与弯剪段的过渡区域 1 200、1 300、1 450 mm 处出现弯剪裂缝;继续加载后,由于悬臂段机械千斤顶荷载较小,混凝土在拉应力和弯矩的共同作用下出现多处开裂;加载至 50 kN 时,1 300 mm 处的裂缝成为主要裂缝,宽度持续增长,同时受拉纵筋也逐渐接近屈服;继续加载至峰值荷载 57 kN 时,仅 1 300 mm 处裂缝持续变宽,其余裂缝停止发展;继续按加载点处的位移控制加载,按照每级 2 mm 进行加载,最终的极限挠度为 66.3 mm,破坏形式如图 6(a)所示。

试件 NPCE-1 加载至 30 kN 时,在 1 100 mm 处首先出现弯剪裂缝;加载至 50 kN 时,悬臂段出现拉剪裂缝,且 1 400 mm 处悬臂段受压混凝土出现压溃裂缝;加载至 60 kN 时,抗弯补强的外贴 CFRP 端部 800 mm 处出现弯剪裂缝并迅速传递到受拉钢筋位置;加载至 70 kN 时,受拉钢筋屈服,外贴 CFRP 端部裂缝宽度迅速增长;加载至峰值荷载 75 kN 时,应力传递至弯剪段 CFRP 端部。随后采用位移控制继续加载,当荷载减至 65 kN 时,外贴 CFRP 端部混凝土保护层发生剥离破坏,嵌贴 CFRP 回缩导致 700 ~ 1 200 mm 区段内胶层-混凝土界面黏结失效,出现明显的分层,极限挠度为 65.34 mm,最终破坏形式如图 6(b)所示。



(a) 试件 NPC-1 悬臂端混凝土压碎破坏

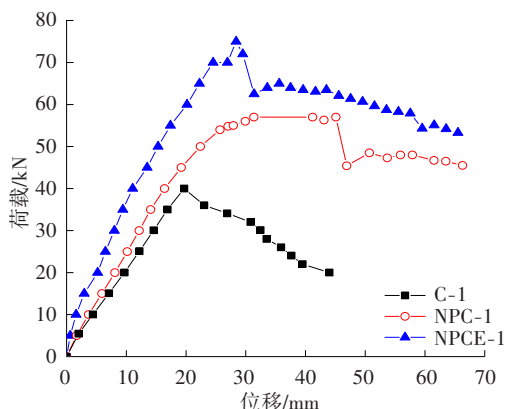


(b) 试件 NPCE-1 中部混凝土保护层剥离破坏

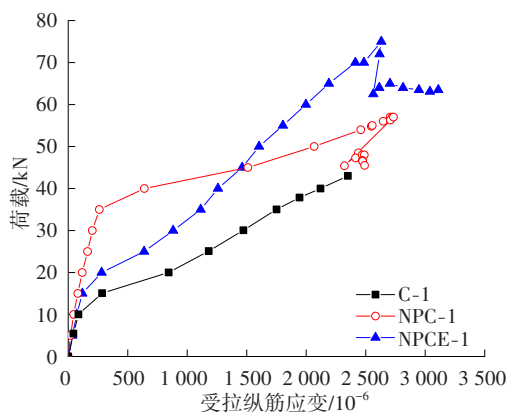
图 6 破坏模式细节

Fig. 6 Details of destruction model

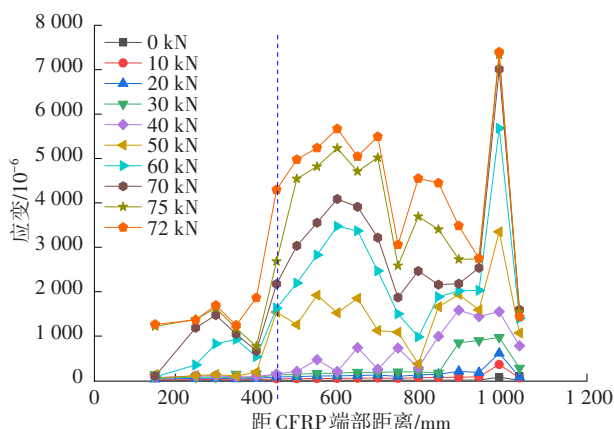
实测数据分析如图 7 所示,从图 7(a)可以看出,相较于对比试件,加固试件的刚度和极限荷载都明显增加,但极限挠度稍有降低;图 7(b)所示为试件受拉纵筋应变,其最大值在弯剪段内,距弯剪段与悬臂段交界处约 300 mm 的位置,可以看出对比梁在破坏时(43 kN)受拉钢筋接近屈服,由于加固试件受拉区有预应力 CFRP 的存在,屈服荷载得到了有效



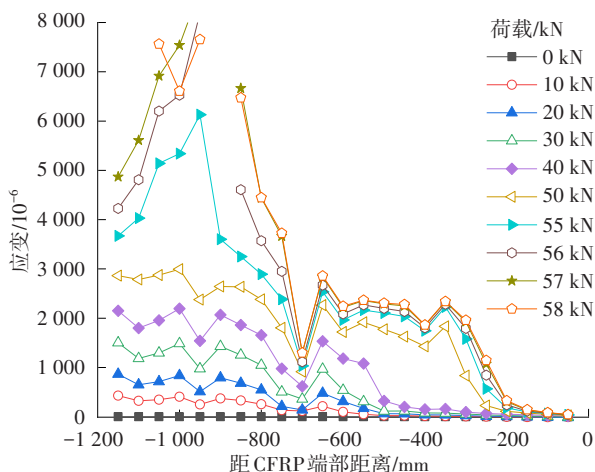
(a) 荷载-挠度曲线



(b) 受拉纵筋应变



(c) NPCE-1 试件 CFRP 应变分布图



(d) NPC-1 试件 CFRP 应变分布图

图 7 数据分析

Fig. 7 Data analysis

提升。从图 7(c)和 7(d)可以看出,由于未进行更多的加固,NPC-1 试件裂缝出现较早,靠近悬臂段的 CFRP 更早地承担了拉应力;由于 CFRP 弹性模量比受拉纵筋的小,且在 35 kN 时其挠度和主裂缝的发展程度都明显比试件 NPCE-1 的高,因此受拉钢筋的应变显著增加,并先于试件 NPCE-1 达到屈服,且由于加载方式的缺陷,NPC-1 试件在距 CFRP 端部

800~1 200 mm 区段内存在明显的应力集中现象,CFRP应变明显比补强试件的大;由于试件NPCE-1的受力状态和应力传递都更合理,因此在距CFRP端部200~800 mm范围内的CFRP应变更大。如图6(b)所示,NPCE-1试件在保护层剥离处发生弯折,剥离裂缝两侧变形不协调导致该区段内CFRP回缩,CFRP应变大幅度减小,胶层与混凝土间黏结失效,试件破坏。

## 4 结果分析

### 4.1 有限元结果分析

表3为各试件有限元分析与实际试验极限荷载结果的对比。

表3 极限荷载对比

Table 3 Comparison of ultimate load

试件编号	极限荷载试验值/kN	极限荷载模拟值/kN	误差/%
C-1	43.00	41.66	3.12
NC-1		50.58	
NPC-1	58.00	54.49	6.05
NCE-1		64.86	
NPCE-1	75.00	69.03	7.96

由表3和上述分析可以得知,有限元的模拟结果与实测值较为相近。未加固试件极限荷载的实测值和模拟值之间的误差仅为3.12%。而采用表层嵌贴预应力CFRP技术加固后的悬臂梁的极限荷载误差为6.05%。由此可见,有限元模型能够很好地得到较为接近的荷载-挠度曲线和CFRP应变分布,且可以从数值分析的损伤示意图中推测加固梁的破坏模式。试件的加固融合了表层嵌贴的预应力CFRP与外贴的无预应力CFRP两种加固方式。这种设计不仅充分利用了预应力CFRP提供的主动预应力增强效果,还结合了无预应力CFRP的被动加固特性,实现了预应力和无预应力加固技术的融合,从而显著提升了试件的结构强度和稳定性,且为防止加载后期悬臂段与弯剪段结合处产生剪切破坏,还在此区段用CFRP设置了3道U形箍。由于U形箍在有限元模型中需要用壳单元模拟,但壳单元无法与混凝土采用Tie接触进行连接,因此模型中未体现U形箍这一元素。虽然忽略此元素会造成一定的荷载误差,但误差未超过8%,属于合理范围。

### 4.2 影响因素分析

从表3可以看出,加固方式和预应力都对加固效果有显著的影响,具体为:试件采用表层嵌贴加固技术使其极限荷载相较于未加固试件提高了21.41%;继续对CFRP施加1 000 MPa预应力,使其极限荷载相较于未加固试件提高了30.80%;将表层嵌贴和外贴加固技术相结合后,试件极限荷载相较于未加固试件提高了55.69%;若对其中内嵌的CFRP板条施加1 000 MPa的预应力,试件极限荷载相较于未加固试件提高了65.70%。由以上分析可知,采用CFRP加固技术、提高加固率和对CFRP施加预应力都能提高试件的承载能力,其中采用表层嵌贴与外贴加固技术相结合的方法对悬臂梁承载力提升效果最明显。

## 5 结论

1) 表层嵌贴预应力CFRP加固技术能够很好地提高加固梁的极限承载能力和极限挠度,使受拉钢筋和CFRP板能够充分发挥其力学性能,提升加固梁的抗弯性能。

2) 采用CFRP加固技术、提高CFRP加固率、对CFRP施加预应力等方法能明显地提升试件加固效果,其中加固率对加固效果影响最大。将表层嵌贴加固技术、外贴加固技术、预应力技术和CFRP材料进行合理结合,可以使悬臂梁破坏模式由混凝土界面转移至CFRP-混凝土黏结界面,使悬臂梁承载能力得到明显提升。

### 参考文献(References):

- [1] 李清鑫,刘小燕,张华,等.裂缝宽度的提取及在桥梁承载力评估中的应用研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(1):60-64. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.010.  
LI Qingxin, LIU Xiaoyan, ZHANG Hua, et al. Research on the extraction of crack width and its application in the evaluation of bridge bearing capacity [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(1): 60-64. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.010.
- [2] 岳清瑞,杨勇新.纤维增强复合材料加固结构耐久性研究综述[J].建筑结构学报,2009,30(6):8-15. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.06.002.  
YUE Qingrui, YANG Yongxin. Introduction to durability of concrete strengthened with fiber reinforced polymers [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 8-15.

- DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.06.002.
- [3] 刘伟庆, 方海, 方园. 纤维增强复合材料及其结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 1-16. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.04.001.
- LIU Weiqing, FANG Hai, FANG Yuan. Research progress of fiber-reinforced composites and structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 1-16. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.04.001.
- [4] SPADEA G, BENCARDINO F, SWAMY R N. Structural behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP [J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(3): 132-137. DOI: 10.1061/(asce)1090-0268(1998)2: 3(132).
- [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] 周延阳. 混凝土表层嵌贴CFRP板黏结机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- ZHOU Yanyang. Investigation of bond mechanics of NSM CFRP strips to concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [7] 朱晓旭. 混凝土表层嵌贴CFRP板黏结性能试验研究及理论分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- ZHU Xiaoxu. Test investigation of bond mechanics and theoretical analysis of NSM CFRP strips to concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [8] 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.
- [9] 陈俊敏. 表层嵌贴CFRP板条: 混凝土界面黏结性能的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- CHEN Junmin. Study of the bond performance between CFRP strips and concrete in NSM reinforcement [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012.
- [10] 卢靖宇. 连续梁桥加固方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- LU Jingyu. Continuous girder bridge reinforcement method analysis [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [11] 陈瑶艳. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁负弯矩区的抗弯性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- CHEN Yaoyan. The experimental research of strengthening the negative flexural area of RC beams with CFRP [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [12] 洪一红. CFRP侧面加固钢筋混凝土梁负弯矩区抗弯性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- HONG Yihong. Experimental research on the flexural performance of the RC beam strengthened by bonding the CFRP sheets on lateral side [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [13] 郑宇宙, 王兴国, 陈红强. 悬臂梁支座附近表层嵌入FRP筋后性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(增刊1): 75-78.
- ZHENG Yuzhou, WANG Xingguo, CHEN Hongqiang. Behavior of support zone of cantilever beam embedded with FRP tendons [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(sup 1): 75-78.
- [14] 杨勇, 谢标云, 周丕健. 表层嵌贴碳纤维筋加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊2): 243-248. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.s2.025.
- YANG Yong, XIE Biaoyun, ZHOU Pijian. Experimental study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforcement on the surface [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(sup 2): 243-248. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.s2.025.
- [15] 陈红强. 内嵌FRP筋加固悬臂梁桥抗弯性能试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- CHEN Hongqiang. Experimental study on the flexural behavior of reinforced cantilever beams strengthened with near-surface-mounted FRP tendons [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.
- [16] 彭晖, 丑佳璇, 孙溢, 等. 表层嵌贴CFRP-混凝土结构的黏结性能研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 156-166. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.12.016.
- PENG Hui, CHOU Jiaxuan, SUN Yi, et al. Bond behavior of near-surface-mounted CFRP to concrete structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 156-166. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.12.016.

(责任编辑: 薛仪; 英文编辑: 杜雪明)