

# 内嵌 CFRP 板条加固损伤预应力混凝土梁抗弯性能

杨佳<sup>1,2</sup>, 王连广<sup>1</sup>, 侯雯峪<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳大学 建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

**摘 要:** 为研究超载状态下内嵌 CFRP 板条加固损伤预应力钢筋混凝土梁的抗弯性能, 对 6 根预应力钢筋混凝土梁进行了抗弯试验. 研究了损伤加固梁的破坏形态、加固梁的承载能力和刚度, 探讨了超载重复次数、超载幅值和负载加固对梁抗弯性能的影响. 试验结果表明: 与未加固梁相比, 加固后梁的承载能力和抗弯刚度显著提高, 极限承载力提高幅度在 7% ~ 15% 之间; 超载重复次数、超载幅值和负载加固对加固梁的极限承载力影响较小; 超载幅值和负载加固影响加固梁的刚度; 建立的承载力计算公式合理, 与试验结果相符.

**关 键 词:** 预应力钢筋混凝土梁; 抗弯性能; 试验研究; 碳纤维增强复合材料; 损伤; 负载

中图分类号: TU 378.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)04-0590-06

## Flexural Performance of Damaged Prestressed Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips

YANG Jia<sup>1,2</sup>, WANG Lian-guang<sup>1</sup>, HOU Wen-yu<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Architectural Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China. Corresponding author: WANG Lian-guang, E-mail: wanglianguang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In order to investigate the flexural performance of damaged prestressed reinforced concrete (PRC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips under overloading, bending tests of six PRC beams were carried out. The failure mode, bearing capacity and stiffness of PRC beams strengthened with NSM CFRP strips were studied. The influences of the number of overloading cycles, overloading amplitude and sustaining load on the performance of strengthened beams were also evaluated. The experimental results indicated that compared with un-strengthened beam, the flexural capacity and stiffness of the strengthened beams can be enhanced obviously. The ultimate loads are increased by 7% to 15%. There are little influences on ultimate bearing capacity of the strengthened beams caused by the cycle number, the overload amplitude and the sustaining load, while the overload amplitude and the sustaining load affect the stiffness of the strengthened beams. A calculation formula of bearing capacity is established, and the theoretical values agree well with the experimental values.

**Key words:** prestressed reinforced concrete beams; flexural performance; experimental research; carbon fiber reinforced polymer; damage; sustaining load

由于车辆日趋大型化、重载化, 现役部分桥梁的实际交通量远远超过设计交通量, 以及新旧桥梁设计规范的荷载设计标准不统一, 导致超载现象存在, 车辆超载运输会对桥梁安全性和耐久性造成损害<sup>[1]</sup>. 对损伤桥梁进行必要加固, 可以提

高桥梁的承载能力, 延长桥梁的使用寿命<sup>[2-3]</sup>. 目前普遍采用的加固材料为碳纤维增强复合材料 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP). 最常见的加固方法是表面粘贴法和内嵌法. 粘贴法是将 CFRP 片材粘贴在需加固构件的表面以提高其强

收稿日期: 2018-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504125); 中国博士后基金资助项目(2017M611253); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540303).

作者简介: 杨佳(1981-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学博士研究生; 王连广(1964-), 男, 辽宁鞍山人, 东北大学教授, 博士生导师.

度、刚度等性能;内嵌法是利用粘结剂将 CFRP 筋或板条嵌入混凝土表面预先开好的槽内以改善加固构件的力学性能. 国内外学者针对 CFRP 片材或预应力 CFRP 片材加固钢筋混凝土结构和预应力钢筋混凝土结构进行了大量研究<sup>[4-8]</sup>,针对超载损伤情况,文献[2,9]开展了外贴 CFRP 布、钢板加固超载损伤钢筋混凝土梁的力学性能方面的研究. 结果表明,加固效果主要受超载幅值、超载次数、加固方式等的影响,超载幅值和超载次数对梁的寿命有较大影响. 但是针对超载损伤对 CFRP 加固预应力混凝土梁的影响方面的研究未见文献报道. 另外,工程中需要加固的构件通常为负载状态. 为此,本文对负载损伤的预应力混凝土 T 形梁进行 CFRP 板条加固试验,研究不同损伤状态下,加固梁的承载能力和刚度随超载重复次数、超

载幅值的增加而变化的规律,以及负载加固对抗弯性能的影响.

# 1 试验简介

## 1.1 试件设计

本试验制作了 6 根无粘结预应力混凝土 T 形梁,梁长均为 4.5 m,净跨为 4.3 m. 纵筋保护层厚度为 20 mm,腹板内纵筋采用 2 $\phi$ 16 钢筋,混凝土翼缘内纵筋采用 4 $\phi$ 10 钢筋. 混凝土 T 形梁翼缘配置  $\phi$ 6@200 箍筋,混凝土腹板分别在端部和跨中配置  $\phi$ 8@100, $\phi$ 8@120 的箍筋. 预应力钢筋采用 2 根 1 $\times$ 7 $\phi$ <sup>s</sup>-15.2 高强低松弛钢绞线. 试验梁截面配筋见图 1.

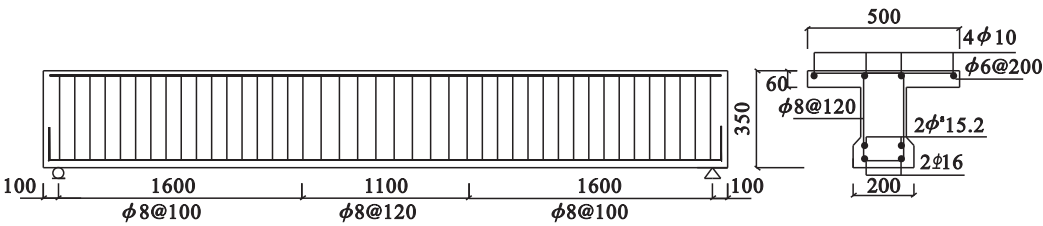


图 1 试验梁截面配筋 (mm)  
Fig. 1 Reinforcement of test beam

## 1.2 材料性能

1) 混凝土:试件混凝土到 28 d 龄期时,对混凝土立方体试块进行抗压强度试验,测得混凝土抗压强度为 32.5 MPa.

2) 钢筋:实测钢筋性能见表 1.

表 1 钢筋的实测性能 Table 1 Tested properties of steel reinforcements			
类型	屈服强度 MPa	极限强度 MPa	弹性模量 GPa
$\phi$ 6	445.5	557.7	210
$\phi$ 8	406.0	551.4	200
$\phi$ 10	339.2	481.8	200
$\phi$ 16	374.7	539.7	200
1 $\times$ 7 $\phi^s$ -15.2	—	1 963	203

3) CFRP 板:CFRP 板由上海华征复合材料有限公司提供,CFRP 板的实测性能见表 2.

表 2 CFRP 板的实测性能 Table 2 Tested properties of CFRP plate				
名称	型号	抗拉强度 MPa	延伸率 %	弹性模量/GPa
CFRP 板	1.2 mm $\times$ 50 mm	2 540	1.73	165

4) 粘结胶:嵌板用的粘结胶为上海华征复合

材料有限公司提供的 E380 粘结剂. 粘结胶的实测性能见表 3.

表 3 粘结胶的实测性能 Table 3 Tested properties of bonding cement				
名称	型号	抗拉强度 MPa	延伸率 %	弹性模量 GPa
板胶	E380	>30	>1.3	>4.0

## 1.3 试验方案

试件主要参数见表 4.

表 4 试件主要参数 Table 4 Key parameters of specimens			
编号	幅值 上限	重复 次数	加载方式
PCB0	—	—	直接静载至破坏
MPCB1	0.9 $P_y$	1	加载至 0.9 $P_y$ 持荷加固
MPCB2	0.9 $P_y$	50	加载至 0.9 $P_y$ 持荷加固
MPCB3	0.9 $P_y$	100	加载至 0.9 $P_y$ 持荷加固
MPCB4	1.3 $P_y$	50	加载至 1.3 $P_y$ 持荷加固
MPCB5	0.9 $P_y$	50	卸载加固

注: $P_y$  为对比梁 PCB0 屈服荷载实测值.

1) 对对比梁 PCB0 进行静力加载直至梁破坏,根据所测数据得到屈服荷载  $P_y$  和极限荷

载  $P_{u0}$ .

2) 为了使试验梁在加固前产生不同程度的初始损伤,需对梁进行不同程度的加载及卸载.美国公路运输部规定<sup>[10]</sup>,在正常使用极限状态下,桥梁构件钢筋应力超过钢筋屈服应力的 60% 即视为超载运营.本文以对比梁屈服荷载的 0.9 倍和 1.3 倍作为超载幅值上限,屈服荷载的 0.1 倍作为超载幅值下限,对试验梁进行重复加载、卸载.通常高超载幅值工况出现频率低,所以重复次数分别取为 1,50 和 100 次.

3) 将超载损伤后的试件 MPCB1 ~ MPCB4 倒置架于加载装置上,再加载至超载幅值上限,利用注胶工具把树脂胶注入宽度超过 0.15 mm 的裂缝,待胶固结后与混凝土形成整体.注胶修复之后,持荷状态下嵌入 CFRP 板条,经过养护期后继续加载试验.试件 MPCB5 超载损伤之后卸载进行 CFRP 板条加固,最后得到各个加固梁的极限承载力.

1.4 加载方案

本试验采用两点对称加载,荷载由分配梁传递给试验梁.超载损伤时反复循环加载装置采用压力试验机,由荷载控制,加载速度为 2 kN/s,卸载速度为 20 kN/s,加载装置见图 2.持载并静载破坏时加载装置采用机械式手动千斤顶,在试验梁的跨中布置位移计,加载装置见图 3.在试验梁纯弯段受压区混凝土上表面、受拉钢筋跨中、CFRP 板条跨中分别粘贴应变片,具体应变片的布置见图 4.

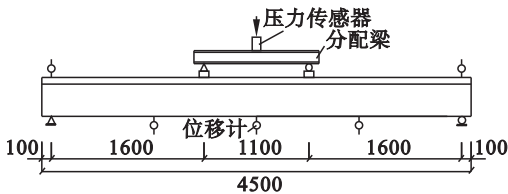


图 2 循环加载装置 (mm)  
Fig. 2 Device of cyclic loading

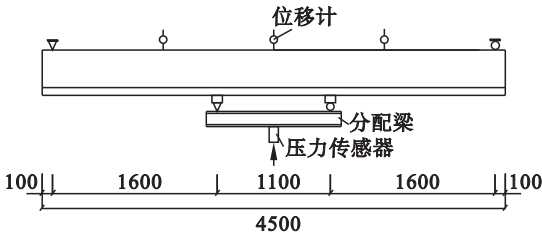


图 3 持载加载装置 (mm)  
Fig. 3 Device of sustained loading

1.5 加固方案

超载损伤后,对梁进行 CFRP 板条嵌入加固,

加固步骤如下:

1) 开槽:在损伤梁底面位置开双槽,每个槽长度为 3 000 mm,宽度为 10 mm,深度为 20 mm.试件的开槽尺寸和位置见图 4.

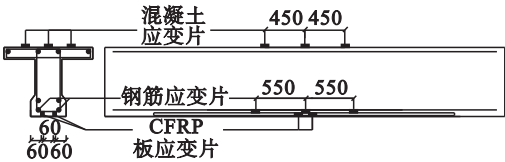


图 4 应变片布置 (mm)  
Fig. 4 Arrangement of strain gauges

2) 加固:将 CFRP 板切割成尺寸为 3 000 mm × 10 mm × 1.2 mm 的板条,用砂纸打磨,并在中心位置粘贴应变片.利用粘结剂将 3 片 CFRP 板条粘结到一起形成整体.待粘结剂固化 24 h 后,再将板条嵌入槽中.养护 7d 即可进行试验.

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏形态

1) 对比梁 PCB0:当加载至约 67 kN (0.29  $P_{u0}$ ,  $P_{u0}$  为 PCB0 实测极限荷载)时,跨中出现第一条微小裂缝,裂缝相继出现在两个加载点附近,荷载继续增加,纯弯段内形成数条主裂缝,裂缝间距基本稳定并均匀分布.当荷载达到约 120 kN (0.52  $P_{u0}$ ) 时,裂缝宽度明显变宽.当荷载达到 229.4 kN 时,伴随着噼啪的响声,受压区加载点附近混凝土被压碎,梁宣告破坏.

2) 负载加固梁 MPCB1 ~ MPCB4:试件 MPCB1 ~ MPCB4 经过不同超载次数和超载幅值的反复加载后,产生裂缝、变形等初始损伤.将梁倒置于加载装置上,加载至持荷荷载,保持荷载不变,对裂缝注胶修复,之后嵌入 CFRP 板条,养护期后继续加载试验.继续加载,随着荷载增加,新旧裂缝向混凝土翼缘延伸,变形也不断加大.

试件 MPCB1, MPCB4:当荷载接近各自极限荷载时,出现频繁的噼啪响声,受拉区 CFRP 板胶和混凝土部分开裂,达到极限荷载时,受压区加载点附近混凝土被压碎,受拉区混凝土保护层部分发生楔形破坏,即局部混凝土保护层发生剥离破坏.

试件 MPCB2, MPCB3:当荷载达到极限荷载时,伴随着噼啪响声,跨中和加载点部位混凝土和 CFRP 板胶发生剥离,受拉区混凝土保护层部分发生剥离破坏.试件 MPCB2 可见明显的沿开槽

部位根部开裂的混凝土小块脱落。

3) 卸载加固梁 MPCB5: 试件 MPCB5 经过反复超载损伤, 完全卸载后嵌入 CFRP 板条。当荷载达到 64 kN ( $0.24P_{us}$ ,  $P_{us}$  为 MPCB5 实测极限荷载) 时, 纯弯段内原有裂缝开裂, 当荷载达到 80 kN ( $0.3P_{us}$ ) 时, 加载点附近出现新裂缝, 当荷载达到 245 kN ( $0.93P_{us}$ ) 时, 出现板胶剥离的声音, 继续加载, 混凝土加载点附近混凝土压碎, 梁宣告破坏, 见图 5。

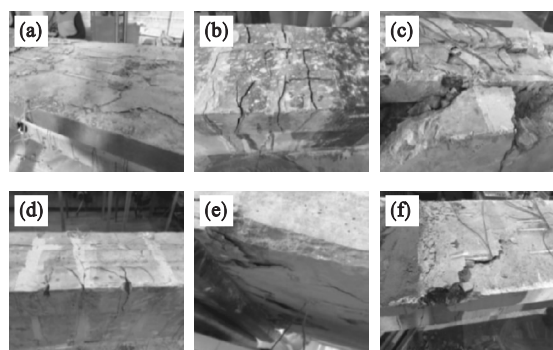


图 5 试件的破坏形态

Fig. 5 Failure patterns of specimens

- (a) — 试件 PCB0; (b) — 试件 MPCB1;  
(c) — 试件 MPCB2; (d) — 试件 MPCB3;  
(e) — 试件 MPCB4; (f) — 试件 MPCB5。

可见, 加固梁的破坏模式主要体现为 3 种: 受压区混凝土压碎破坏、受拉区部分混凝土保护层剥离破坏及两种破坏模式同时发生。受拉区部分混凝土保护层发生剥离破坏, 分析认为是由于受拉区最大弯矩处混凝土竖向弯曲裂缝与附近水平向混凝土和板胶的粘结裂缝并存, 导致混凝土保护层被分成多个三角形或四边形楔块, 发生楔形破坏, 即局部混凝土保护层剥离破坏。

## 2.2 应变分析

由试验得到各试件的荷载与应变关系曲线, 见图 6。

1) 混凝土应变: 从图 6 可知, 加载初期, 混凝土的荷载与应变曲线呈线性; 当加载至  $(0.14 \sim 0.28) P_{ui}$  ( $P_{ui}$  为各试验梁的实测极限荷载), 曲线斜率减小, 出现转折; 当加载至  $(0.5 \sim 0.56) P_{ui}$  时, 曲线斜率明显降低, 出现明显转折; 当加载至极限荷载时, 测得混凝土压应变数值在  $1.7 \times 10^{-3} \sim 3.2 \times 10^{-3}$  之间, 接近压碎破坏。试件 MPCB1 破坏时, 混凝土应变数值较低, 主要是因为混凝土保护层过早发生了剥离破坏。

2) 钢筋应变: 加载早期, 荷载与钢筋应变曲线呈线性发展; 加载至  $(0.2 \sim 0.28) P_{ui}$  时, 曲线出现转折, 斜率降低明显。对比梁 PCB0, 当加载至

$0.5P_{u0}$  时, 由于预应力的作用, 曲线斜率不降反升, 应变增长速度减慢; 当荷载达到  $0.8P_{u0}$  时, 荷载与应变曲线出现第三个拐点, 钢筋应变增长速度明显大于荷载增长速度, 斜率较上一阶段降低很多。对于持载加固梁, 当荷载达到持荷荷载之后, 继续加载, 钢筋应变曲线均出现转折点, 钢筋应变增长速度减缓, 斜率增大, 分析认为, 达到持荷荷载之后加固, CFRP 板条开始起作用, 所以钢筋应变增长速度较之前减缓, 曲线又呈上升趋势, 其中试件 MPCB2 和 MPCB3 尚未达到极限荷载, 钢筋应变数据已经溢出。卸载加固梁 MPCB5 钢筋屈服后, 应变增长很少, 直至破坏, 分析认为试件经过反复加载卸载, 导致钢筋强化。

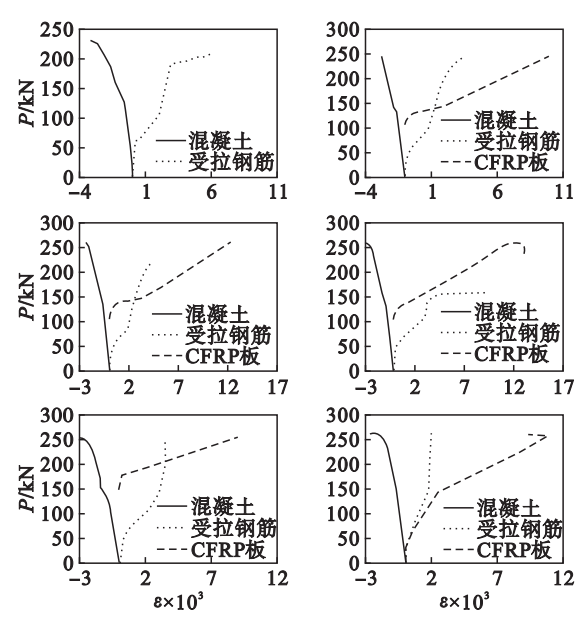


图 6 荷载 - 应变曲线

Fig. 6 Load-strain curves

- (a) — 试件 PCB0; (b) — 试件 MPCB1;  
(c) — 试件 MPCB2; (d) — 试件 MPCB3;  
(e) — 试件 MPCB4; (f) — 试件 MPCB5。

3) CFRP 板条应变: 持载加固梁 CFRP 板条的荷载与应变关系曲线划分为两阶段: ①第一阶段随着荷载继续增加, CFRP 板条应变增长缓慢; ②当荷载达到约  $(0.52 \sim 0.69) P_{ui}$  时, 曲线出现明显转折, 斜率较第一阶段减小很多。卸载加固梁的荷载与 CFRP 板条应变曲线划分为三阶段: 第一阶段, CFRP 与钢筋应变曲线斜率相差不多; 第二阶段, 加载至  $0.2P_{us}$  时, CFRP 曲线出现转折点, 应变增长速度加快, 且 CFRP 板条应变逐渐大于钢筋应变; 第三阶段, 当荷载达到约  $0.55P_{us}$  时, CFRP 曲线出现拐点, 应变增长速度明显大于荷载增加速度, 斜率减小很多, CFRP 板条的应变远远大于钢筋的应变, 说明钢筋屈服后, 主要由



CFRP 板条承担截面主要拉应力. 加固梁破坏时 CFRP 板条并未拉断,但其极限应变均达到  $11 \times 10^{-3}$  左右,说明 CFRP 的强度得到利用,具有一定加固效果.

2.3 承载力与变形

荷载与变形曲线随超载重复次数、超载幅值和卸载加固的变化规律见图 7.

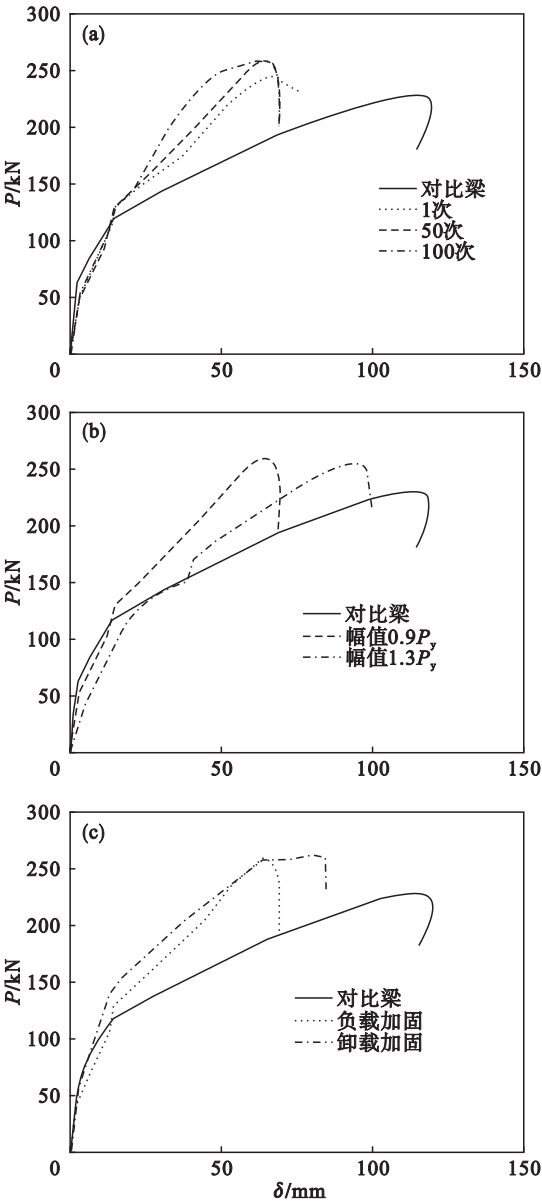


图 7 不同参数荷载与变形曲线

Fig. 7 Load-deformation curves under different parameters

(a)—超载重复次数; (b)—超载幅值;  
(c)—卸载、卸载加固.

在初期弹性阶段,荷载与变形曲线呈线性;混凝土开裂以后,曲线发生转折,刚度较弹性阶段有所下降,其跨中变形较前一阶段发展加快;纵筋屈服后,变形曲线再次转折,刚度降低较多,直到极限荷载,在整个塑性阶段变形增长很快,由于受到

预应力筋的影响,变形的第三阶段较长. 其中,负荷载加固梁 CFRP 板条加固后梁刚度提高而在变形曲线上持荷荷载处出现了拐点,斜率变大,跨中变形增长趋势又逐步减缓,之后进入塑性阶段,加固梁的荷载与变形关系曲线又明显转折,直至极限荷载.

1) 重复次数的影响:由图 7a 可知,在荷载与变形曲线第一、二阶段,试件 MPCB1 ~ MPCB3 刚度相差不多,且均低于对比梁,主要是因为梁在重复荷载作用下,产生裂缝等初始损伤,导致刚度较对比梁低;在变形的第三阶段,由于 CFRP 板条的加固作用,梁的刚度均高于对比梁,同级荷载作用下,试件 MPCB3 变形较 MPCB1 和 MPCB2 小,分析认为试件 MPCB3 重复加载次数多,钢筋在反复荷载作用下,得到强化;另一方面,试件 MPCB3 持载时裂缝宽,裂缝注胶修复效果更好,导致构件后期刚度稍有提高.

加固后,与对比梁相比,试件 MPCB1 ~ MPCB3 的极限荷载分别提高了 7%,14%,12%,其中试件 MPCB1 的极限荷载偏低,主要是由于部分混凝土保护层过早发生了剥离破坏. 试件 MPCB3 极限荷载较试件 MPCB2 降低约 1%. 可见,超载重复次数增加,对承载力影响不明显.

2) 超载幅值的影响:试件 MPCB2, MPCB4 的荷载与变形关系曲线,见图 7b. 由于反复加载卸载,变形曲线的第一、二阶段,刚度均低于对比梁,试件 MPCB4 刚度稍低于 MPCB2;持荷加固后,试件 MPCB2 和 MPCB4 刚度均超过对比梁,主要是因为嵌入的 CFRP 板条开始起作用,所以刚度提高. 可见,超载幅值对加固梁的刚度有影响,超载幅值越大,损伤程度越大,刚度降低越多.

与对比梁相比,试件 MPCB2, MPCB4 的极限荷载分别提高了 14%,11%. 随着超载幅值的增加,加固梁的极限荷载降低约 2%,降低程度并不明显.

3) 卸载、卸载加固的影响:卸载加固梁 MPCB2 和卸载加固梁 MPCB5 的荷载与变形关系曲线见图 7c. 可以看出,试件 MPCB5 在变形的第一阶段,荷载作用初期,嵌入的板条尚未完全发挥作用,所以刚度提高不多;之后阶段,刚度明显高于对比梁和试件 MPCB2,主要是由于试件 MPCB5 中嵌入的 CFRP 板条全程参与受力,而试件 MPCB2 中的板条仅在后期参与受力,所以试件 MPCB5 刚度较 MPCB2 高.

试件 MPCB5 的极限荷载较对比梁提高 15%,较 MPCB2 的极限荷载稍有提高,可见,负

载加固梁较卸载加固梁极限承载力稍低,影响亦不明显.

由此分析可知,超载重复次数、超载幅值和负载加固对梁的刚度均有不同程度的影响,但不会显著影响极限荷载.

### 3 承载力计算

CFRP 板条加固预应力 T 形梁的极限承载力  $M_u$  计算公式为

$$M_u = 0.4f_c b x_{cu}^2 + 0.8f_c (b_c - b) h_c (x_{cu} - 0.5h_c) + f_y A_s' (x_{cu} - a_s') + f_y A_s (h - x_{cu} - a_s) + f_{py} A_p (h - x_{cu} - a_p) + E_f A_f [\varepsilon_{fu}] (h - x_{cu} - a_f).$$

式中: $f_c$  为混凝土轴心抗压强度; $b_c, b$  分别为预应力混凝土 T 形梁上翼缘板宽度和腹板宽度; $h$  为预应力混凝土 T 形梁截面高度; $x_{cu}$  为预应力混凝土受压区高度; $f_y, f_y'$  分别为钢筋的抗拉、压强度设计值; $f_{py}$  为预应力钢筋抗拉强度设计值; $A_s, A_s', A_p, A_f$  分别为受拉、压钢筋,预应力钢筋和 CFRP 板条的截面面积; $a_s, a_s', a_p, a_f$  分别为受拉、压钢筋,预应力钢筋和 CFRP 板合力点至截面边缘的距离; $E_f$  为 CFRP 板的弹性模量; $[\varepsilon_{fu}] = \min(2\varepsilon_{fu}/3, 0.01)$ .

理论计算值与试验数据进行对比汇总,见表 5.

表 5 极限荷载的理论和试验数据汇总  
Table 5 Summary of theoretical and experimental values for ultimate loads

试件编号	$P_u^e$ /kN	$P_u^t$ /kN	$P_u^t/P_u^e$
PCB0	211.744	229.4	0.923
MPCB1	249.861	245.8	1.017
MPCB2	249.861	260.7	0.958
MPCB3	249.861	257.6	0.97
MPCB4	249.861	254.6	0.981
MPCB5	249.861	263.8	0.947

注: $P_u^e$  和  $P_u^t$  分别为极限荷载理论数据和试验数据.

由表 5 可知,理论数据与试验结果比值的平均值为 0.966,标准差为 0.029,变异系数为 0.03,理论数据和试验结果符合较好,精确度高,说明承载力计算公式合理,可以应用于加固工程中.

### 4 结 论

1) 对比梁和卸载加固梁的荷载与变形曲线

均由弹性、弹塑性和塑性阶段组成;负载加固梁由于 CFRP 板条加固作用使梁刚度提高而在荷载与变形曲线上持荷荷载处出现了拐点,斜率变大,其跨中变形增长趋势逐步减缓,之后进入塑性阶段.

2) 内嵌 CFRP 板条加固损伤预应力混凝土梁能提高梁的极限荷载,提高幅度在 7% ~ 15% 之间.随着重复次数增加,极限荷载降低约 1%;随着超载幅值的增加,极限荷载降低约 2%;负载加固梁较卸载加固梁极限荷载降低约 1%.可见,重复次数、超载幅值和负载加固对加固梁的极限承载力影响较小,可以忽略.

3) 超载幅值和负载加固对梁的刚度均有不同程度的影响.梁的刚度随着超载幅值的增加而降低;负载加固梁的刚度低于卸载加固梁.

4) 建立了极限承载力计算公式,理论数值与试验数据吻合良好,说明承载力公式是合理的.

#### 参考文献:

[1] 孙晓燕,王海龙,黄承逵. 超载运营对服役桥梁受弯性能影响的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2008,42(1): 152-156,163.  
(Sun Xiao-yan, Wang Hai-long, Huang Cheng-kui. Experimental investigation on flexural performance of bridge members under overloading [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(1): 152-156,163.)

[2] 孙晓燕,徐冲,王海龙,等. CFRP 加固前后桥梁构件超载疲劳试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(9): 1585-1591.  
(Sun Xiao-yan, Xu Chong, Wang Hai-long, et al. Overloading simulation fatigue experiment of bridge member with and without CFRP reinforcement [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(9): 1585-1591.)

[3] 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.

[4] Laura A, Antonio B, Giusy F. Increasing the flexural performance of RC beams strengthened with CFRP materials [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(1): 55-61.

[5] Hawileh R A, Rasheed H A, Abdalla J A, et al. Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems [J]. Materials and Design, 2014, 53: 972-982.

[6] Zhou Y Z, Gou M K, Zhang F Y, et al. Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: experimental investigation [J]. Materials and Design, 2013, 50: 130-139.

[7] Khalifa A M. Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips [J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55(2): 1497-1505.

[8] Badawi M, Soudki K. Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods—experimental and analytical investigation [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23: 3292-3300.

[9] 王荣霞,王康,崔志武. 碳纤维布和钢板加固超载预裂梁的受力机理分析[J]. 河北工业大学学报, 2009, 38(6): 85-88.  
(Wang Rong-xia, Wang Kang, Cui Zhi-wu. Mechanical characteristics analysis of overload pre-cracked RC beams strengthened with CFRP and steel sheet [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2009, 38(6): 85-88.)

[10] AASHTO. Bridge design specifications [M]. Washington D C: [s. n.], 2012.