



# 高桩码头梁体预应力碳纤维板加固 与增大截面加固法的对比试验

李帅, 杨帅, 王翔, 孟岩  
(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 在老旧码头结构维修加固中加固方法的选择对于加固效果、施工难度、经济成本来说都具有非常重要的意义。为研究预应力碳纤维板加固方法与增大截面加固方法的特点, 比较两种加固方法的可行性与加固效果, 进行室内梁体抗弯对比试验。结果表明, 预应力碳纤维板加固法相对于其他方式的加固效果更好; 预应力的提升对于提升构件的承载能力也有一定的帮助; 设置初载对于构件的开裂荷载也有一定的提升。

**关键词:** 维修加固; 对比试验; 预应力; 碳纤维板

中图分类号: U 655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0080-06

## Comparative tests of prestressed carbon fiber board reinforcement and enlarged section reinforcement method of high-piled wharf beam

LI Shuai, YANG Shuai, WANG Xiang, MENG Yan

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** The selection of reinforcement methods in the maintenance and reinforcement of old wharf structure is of great significance for the reinforcement effect, construction difficulty, and economic costs. To study the characteristics of the prestressed carbon fiber board reinforcement method and the enlarged section reinforcement method, we compare the feasibility and reinforcement effect of the two methods and comparatively test the indoor beam bending. The results indicate that the reinforcement effect of the prestressed carbon fiber board reinforcement method is better; the increase in prestress is also helpful in improving the load-bearing capacity of components, and the setting of the initial load can also improve the cracking load of components.

**Keywords:** maintenance and reinforcement; comparative test; prestress; carbon fiber board

在老旧高桩码头结构中, 钢筋混凝土梁体往往由于钢筋锈蚀、混凝土破损、开裂等原因造成结构性能退化。为保证老旧码头的安全运行、提高老旧码头的适用率, 需要研究钢筋混凝土结构缺陷修补加固技术。目前对既有钢筋混凝土构造物的修补加固常采用的方法大致可分为两类, 即主动加固法与被动加固法。主动加固法常采用体外预应力加固的方法; 被动加固法最常用的是通过增加待加固结构横截面积的方法恢复或提高其承载力。相较被动加固法, 采用体外预应力进行加固的方法无论是理论上还是实际施工时往往更加复杂, 也是现在应用越

来越多的方法。黄侨等<sup>[1]</sup>对体外预应力加固体系和各受力阶段进行分析, 从力学本质上揭示了体外预应力加固的机理; 王宗林等<sup>[2]</sup>在分析体外预应力钢筋与混凝土梁变形的基础上, 通过截面内力平衡方程和变形协调关系, 对体外预应力混凝土梁进行了从加载到破坏的全过程分析, 得到极限状态下体外钢筋的极限应力和混凝土梁的极限抗弯强度, 其理论分析结果与实测值吻合良好; 黄侨等<sup>[3-4]</sup>对12片梁进行试验, 探讨梁内钢筋极限应力合理的取值范围, 分析其极限破坏机理, 最终基于试验结论提出体外预应力加固后混凝土梁的极限强度计算方法。

收稿日期: 2022-02-15

作者简介: 李帅(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事地下工程、水工结构等的试验与分析。

为进一步研究体外预应力加固方法的可行性、加固效果, 比较预应力碳纤维板加固与增大截面加固法的优缺点, 本文通过设置不同的室内梁体抗弯试验, 对不同加固方法进行对比试验研究。

### 1 预应力碳纤维板施工方法

本文施加预应力的方法为先锚固后张拉法<sup>[5]</sup>,

相较反拱法<sup>[6-7]</sup>与外部张拉法<sup>[8]</sup>, 先锚固后张拉法施工期短、不影响结构使用, 是碳纤维板施加预应力的较优解决办法。

该加固系统由碳纤维板、锚固体系(含支座、锚头、张拉杆等)、碳板胶、张拉机具(含千斤顶、工具挡板、工具拉杆及高强螺母等)和压条等组成, 见图 1。



图 1 预应力碳纤维板加固系统

碳纤维板粘贴时, 首先确定碳纤维板和两端锚具及支座钻孔位置; 然后进行混凝土表面清理、粘接面找平; 再采用植筋法对螺栓进行安装; 待化学锚栓固定, 达到设计强度后, 安装固定端、张拉端支座并调整, 在张拉端安装张拉螺杆并锚上螺母; 在碳纤维板表面与混凝土构件接触面均涂抹碳板胶; 再安装固定端、张拉端锚具, 连接张拉螺杆并安放千斤顶; 张拉时分级张拉预应力碳纤维板; 预应力张拉到位后, 压紧压条, 使碳

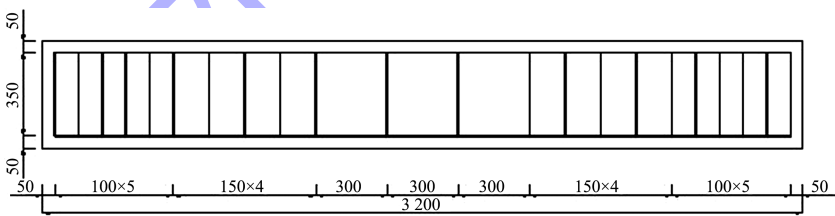
纤维板紧贴梁面; 最后对锚具、张拉支座、张拉杆及锚栓表面涂刷一层环氧基材料进行防护处理, 对防腐层、磨损层涂抹封护。

### 2 试验方案

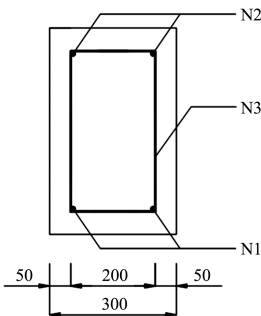
#### 2.1 试验梁设计

##### 2.1.1 基础梁

基础梁尺寸设计为 3 200 mm × 300 mm × 450 mm(长×宽×高), 钢筋布置见图 2。



a) 基础梁尺寸



b) 钢筋布置

图 2 基础梁尺寸及钢筋布置 (单位: mm)

设置 B1-1 和 B1-2 基础梁, 钢筋直径见表 1, 设置两种 N1 钢筋是为了用钢筋直径为 18 mm 的构件模拟未锈蚀的构件、用钢筋直径为 14 mm 的构件模拟锈蚀的构件, 通过试验验证锈蚀构件通过不同的加固方法是否能达到原构件的承载能力, 并且比较这些方法的加固效果。

表 1 基础梁钢筋直径

基础梁	N1 直径/mm	N2 直径/mm	N3 直径/mm
B1-1	18	10	8
B1-2	14	10	8

### 2.1.2 预应力碳纤维板加固梁

在基础梁底面安装预应力碳纤维系统，见图3、4。碳纤维板张拉应力 $\sigma_{\text{张拉}}$ 按 $(0.4 \sim 0.7)f_{cf}$ 取值，其中 $f_{cf}$ 为碳纤维材料强度设计值(2.4 GPa)，并考虑施加张拉力后，混凝土梁上缘不开裂，确定最大张拉力 $F_{\text{max}}$ 。设置2组加固设计参数组合，张拉力分别为 $0.83F_{\text{max}}$ 、 $0.50F_{\text{max}}$ 。预应力碳纤维板加固的梁体同B1-2基础梁。

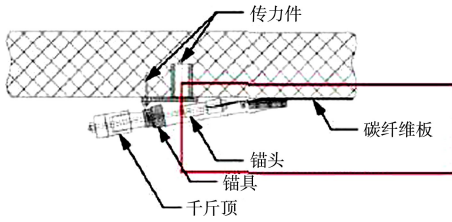


图3 预应力碳纤维板锚固系统

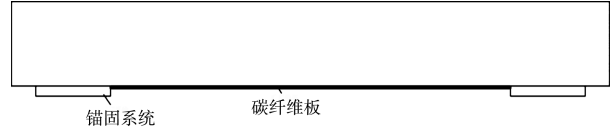


图4 预应力加固

### 2.1.3 增大截面加固梁

在基础梁底面增大受拉区截面面积，并增加受拉钢筋 $2\phi 14 \text{ mm}$ 。增大截面后，在梁底面粘贴碳纤维板，见图5。增大截面加固的梁体同B1-2基础梁。

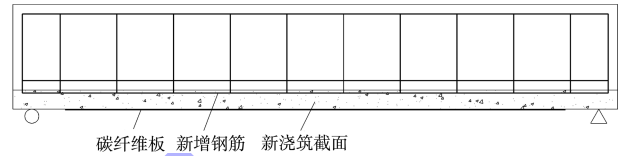


图5 增大截面加固

试验梁数量及分类见表2。

表2 试验梁数量及分类

梁编号	加固情况	数量
B1-1	基础梁, 不加固, 受拉区主筋为 $\phi 18 \text{ mm}$	1
B1-2	基础梁, 不加固, 受拉区主筋为 $\phi 14 \text{ mm}$	1
B1-3	基础梁, 不加固, 受拉区主筋为 $\phi 14 \text{ mm}$	1
B2	增大截面加固, 增加受拉钢筋, 增大截面, 粘贴碳纤维板	1
B3	张拉预应力碳纤维板, 张拉力分别取 $0.83F_{\text{max}}$ 、 $0.50F_{\text{max}}$ , 无初始荷载下试验	2
B4	张拉预应力碳纤维板, 张拉力分别取 $0.83F_{\text{max}}$ 、 $0.50F_{\text{max}}$ , 有初始荷载下试验	2

### 2.2 加载方案

试验装置由结构试验反力架、加载系统(包括千斤顶、油泵等)、传感器(力传感器、百分表、应变片、振弦式应变计)以及数据采集系统(静态数据采集仪、综合测试仪等)组成。

试验采用分级加载，荷载等级的划分主要考虑开裂荷载、极限荷载，以等级差进行划分，见图6。

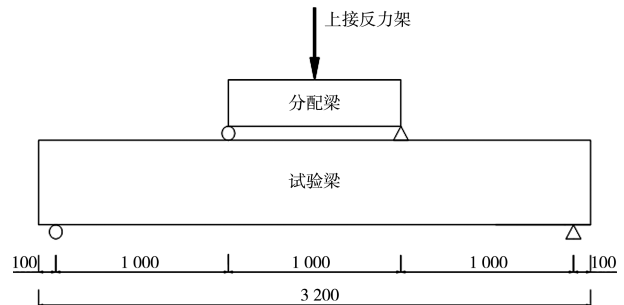


图6 荷载加载 (单位: mm)

### 2.3 数据采集

测点布置及仪表安设见表3。

表3 测点布置方式

数据类型	布设测点的位置	主要测量仪表	仪表数量
挠度	分别在2个支座处、跨中位置布置挠度测点	百分表	4
应变	在跨中及1/4截面处的梁侧面和底面布置应变测点	表贴式混凝土应变片	75

应变片位置见图 7, 其中竖向布置的为混凝土应变片, 横向布置的为碳纤维板应变片。

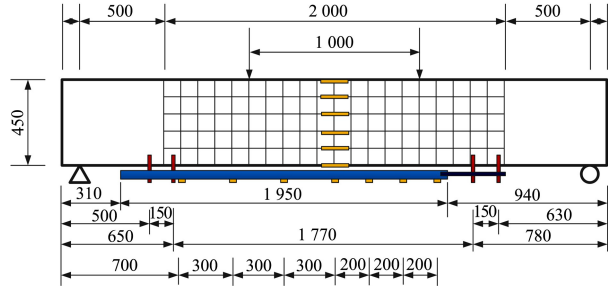


图 7 应变片位置 (单位: mm)

### 2.4 试验理论值

1) 增大截面法加固试件的弯矩理论值为:

$$M_1 \leq \alpha_s f_y A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{y0} A_{s0} \left( h_1 - \frac{x}{2} \right) - f_{y0}' A_{s0}' \left( \frac{x}{2} - a' \right) \quad (1)$$

式中:  $\alpha_s$  为新增钢筋强度利用系数, 取 0.9;  $f_y$  为新增钢筋的抗拉强度设计值 (MPa);  $A_s$  为新增受拉钢筋的截面面积 ( $\text{mm}^2$ );  $h_0$ 、 $h_1$  为构件加固后、加固前的截面有效高度 (mm);  $x$  为等效矩形应力图形的混凝土受压区高度 (mm), 简称混凝土受压区高度;  $f_{y0}$ 、 $f_{y0}'$  为原构件中钢筋的抗拉、抗压强度设计值 (MPa);  $A_{s0}$ 、 $A_{s0}'$  为原构件中受拉钢筋和受压钢筋的锈后实际截面面积 ( $\text{mm}^2$ );  $a'$  为纵向受压钢筋合力点至混凝土受压区边缘的距离 (mm)。

经计算,  $M_1 \leq 222 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

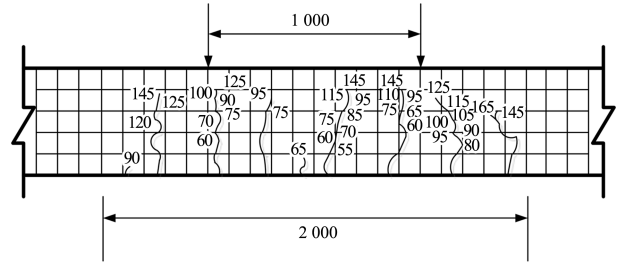
2) 预应力碳纤维板加固试件的弯矩理论值为:

$$M_2 \leq \alpha_1 f_{c0} b x \left( h - \frac{x}{2} \right) + f_{y0} A_{s0}' (h - a') - f_{y0} A_{s0} (h - h_0) \quad (2)$$

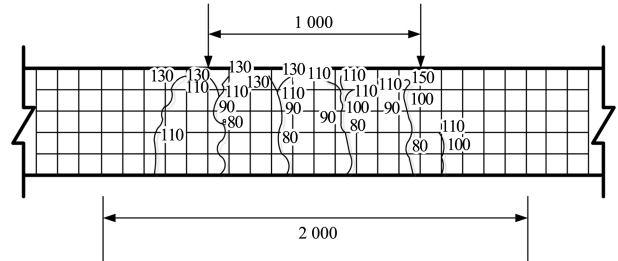
式中:  $\alpha_1$  为受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值, 当混凝土强度等级不超过 C50 时取  $\alpha_1 = 1.0$ , 当混凝土强度等级为 C80 时取  $\alpha_1 = 0.94$ , 其间按线性内插法确定;  $f_{c0}$  为原构件混凝土的抗压强度设计值 (MPa);  $b$ 、 $h$  为矩形截面的宽度、高度 (mm);  $x$  为等效矩形应力图形的混凝土受压区高度。经计算,  $M_2 \leq 221.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

### 3 试验结果分析

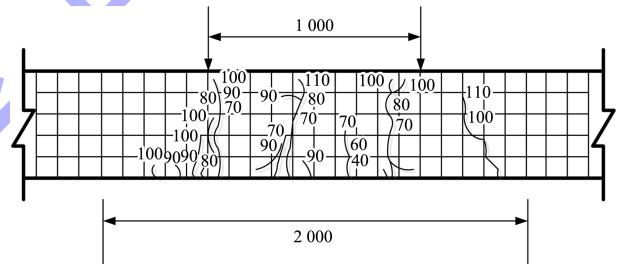
各试件的裂纹见图 8, 承载力情况见表 4。



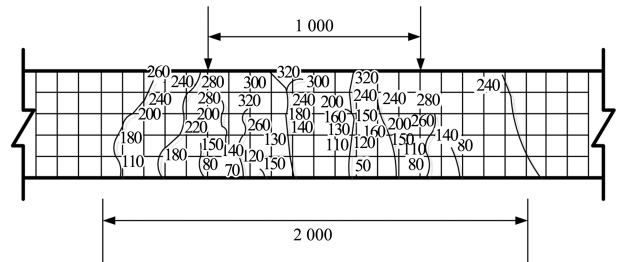
a) B1-1



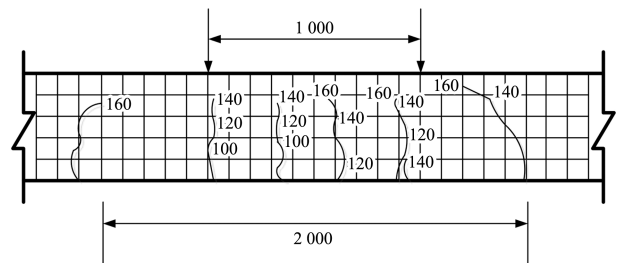
b) B1-2



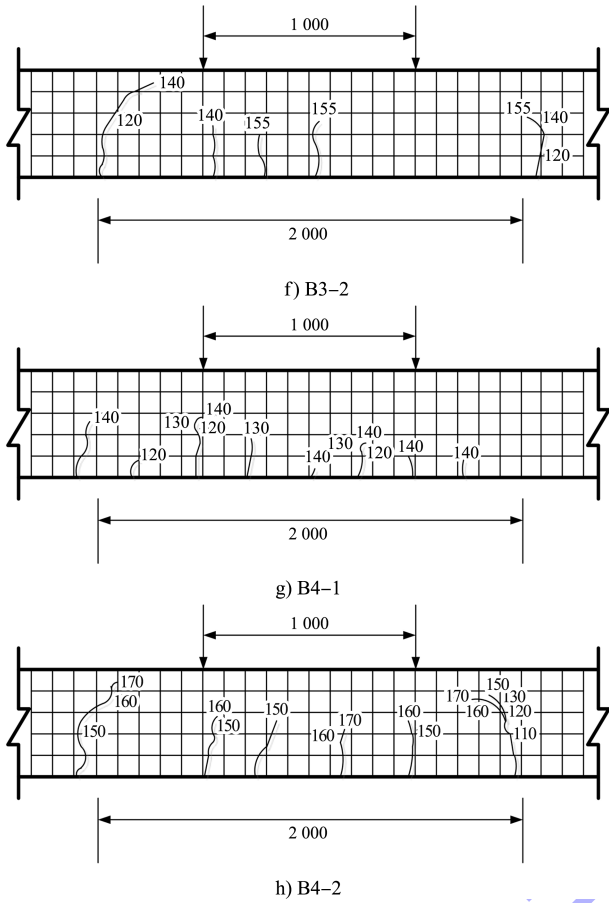
c) B1-3



d) B2



e) B3-1



注：裂纹附近的数值单位为 kN，为开裂时的荷载。

图 8 各试件裂纹 (单位: mm)

由图 8 的裂缝开展情况以及表 4 的承载能力情况分析可得：由未加固试件的试验对比可知，混凝土受拉区钢筋直径对构件的承载能力有显著的影响，因此钢筋锈蚀对结构承载能力会造成一定的影响；采用不同加固形式的试件相比于未加固试件在承载力方面都有明显提高，并且加固后构件的开裂荷载以及破坏荷载都比模拟的未锈蚀构件 B1-1 要大，故这些加固方式对锈蚀构件能起到很好的加固效果；通过预应力碳纤维板加固 4 组试件试验的横向对比可知，预应力的提高对构件承载力的提升也有很大帮助；通过静载与设置初载的对比可知，设置初载对结构的开裂荷载起到很大的提升作用；预应力碳纤维板加固 4 组试件的承载能力与 B1-1 试件相比，开裂荷载和破坏荷载都有明显提高，并且混凝土在锚固区最先出现破坏，说明锚固区的锚固系统的可靠性对加固后构件的承载力有重要影响，还有待进一步的研究和提高。

表 4 各种处理方式承载力情况

试件编号	承载力情况
B1-1(未加固)	加载到 55 kN 时，跨中出现裂缝；90 kN 时，支座处出现裂缝；145 kN 时，结构破坏
B1-2(未加固)	加载到 45 kN 时，跨中出现裂缝；80 kN 时，支座处出现裂缝；130 kN 时，结构破坏
B1-3(未加固)	加载到 40 kN 时，跨中出现裂缝；80 kN 时，支座处出现裂缝；110 kN 时，结构破坏
B2(增大截面加固)	加载到 50 kN 时，跨中出现裂缝；80 kN 时，支座处出现裂缝；280 kN 时，碳纤维板脱胶、破坏；320 kN 时，混凝土结构破坏
B3-1(600 MPa 静压载)	加载到 100 kN 时，跨中出现裂缝；160 kN 时，支座处发生破坏
B3-2(1 000 MPa 静压载)	加载到 120 kN 时，跨中出现明显的裂缝；120 kN 时，支座处出现裂缝；155 kN 时，结构破坏
B4-1(600 MPa 静压载、张拉 10 kN)	加载到 120 kN 时，跨中出现明显的裂缝；120 kN 时，支座处出现裂缝；150 kN 时，结构破坏
B4-2(1 000 MPa 静压载、张拉 10 kN)	加载到 150 kN 时，跨中出现明显的裂缝；110 kN 时，支座处出现裂缝；170 kN 时，结构破坏

各加固方法的构件受弯承载力试验值与理论值见表 5。其中增大截面加固 B2 试件采用的是增大截面法和粘贴碳纤维复合材料加固法结合，其他 4 组加固试件均采用预应力碳纤维板加固法。

表 5 各加固构件试验值与理论值对比

试件编号	弯矩/(kN·m)	
	试验值	理论值
B2	160.0	222.0
B3-1	80.0	221.8
B3-2	77.5	221.8
B4-1	75.0	221.8
B4-2	85.0	221.8

根据表 5 可知, B2 试件的试验值与理论值有较大偏差, 可能的原因是当荷载加载到 280 kN 时, 碳纤维板脱胶、破坏, 使得碳纤维板无法充分发挥其受弯承载特性的作用, 导致试验弯矩值比理论值偏小, 说明碳纤维板与混凝土构件的粘贴效果很大程度上影响了构件的承载能力; 其余 4 组构件的试验值与理论值产生较大差距的原因是: 当荷载加载到 150~170 kN 都出现了支座破坏, 构件无法再起到承载作用, 说明在安装预应力碳纤维板时, 支座处的安装工艺有待进一步改进和优化, 同时也说明, 安装预应力碳纤维板后支座处的承载能力非常重要。

各种处理方式梁加载过程荷载-跨中位移曲线见图 9, 各种处理方式梁加载过程中跨中混凝土以及跨中碳纤维部分的荷载-应变曲线见图 10。

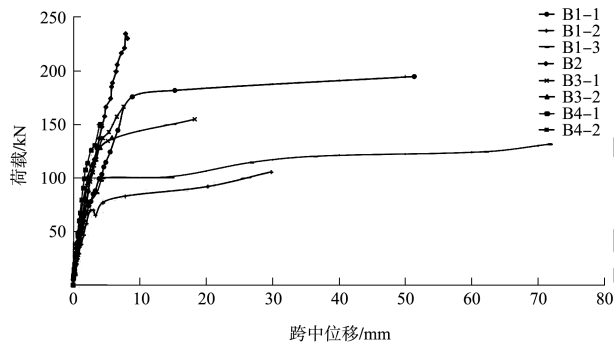
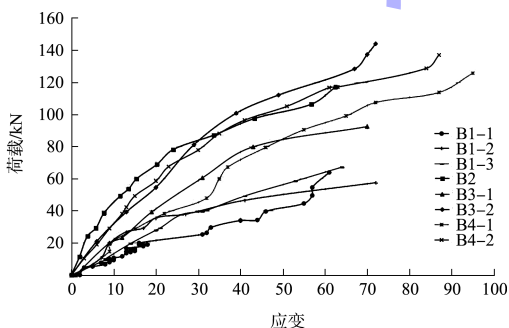
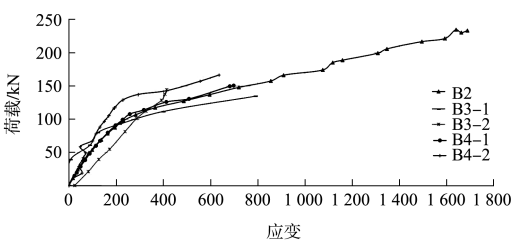


图 9 各种处理方式下荷载-跨中位移曲线



a) 跨中混凝土部分



b) 跨中碳纤维部分

图 10 跨中混凝土以及跨中碳纤维部分的荷载-应变曲线

由图 9、10 可知, 各构件的变化曲线大致相似, 主要区别在于破坏荷载的大小不同, 这是由于不同加固方式产生的加固效果不同, 其中增大截面面积配合碳纤维板的组合加固法的加固效果最好; 另外, 提升预应力对于体外预应力加固法的加固效果也有一定的帮助。

碳纤维板加固混凝土梁的正截面破坏过程与普通钢筋混凝土梁相似, 经历了 3 个阶段。但由于使用碳纤维板加固, 各阶段的特征荷载有所提高, 而且加固梁的变形形态也不一样。从试验中发现加固梁中出现弯曲裂缝时对应的荷载值增大, 即碳纤维板的使用延长了梁的弹性阶段; 裂缝出现后梁进入第 2 阶段, 随着荷载的增加, 钢筋和碳纤维板中的应力值增大; 钢筋屈服后, 标志着梁的第 3 阶段开始, 这个阶段加固梁的承载力明显高于基准梁, 特别受拉钢筋屈服后, 由于碳纤维板的作用得到充分发挥, 梁的承载力有较大幅度的提高, 且随碳纤维板用量的增加而增大, 但其抗变形能力减弱, 梁的延性大幅降低。

#### 4 结论

1) 增大截面加固法和粘贴碳纤维板法的组合可以对构件的破坏荷载有很大的提升, 但开裂荷载的提升效果不明显; 预应力碳纤维板加固法对于构件的开裂荷载有很大帮助, 可有效避免裂缝的开展, 从而延缓混凝土中钢筋的锈蚀; 此外该方法对于构件的破坏荷载也有提升, 对于新老结构共同受力有很大的帮助, 可有效延长构件的使用寿命。

2) 通过设置 4 组不同的预应力碳纤维板加固方法的试验对比, 可以得出预应力的提升对于提升构件的承载能力有一定帮助; 通过设置初载与静载的试验对比可以得出, 设置初载对于构件的开裂荷载也有一定的提升。

3) 通过各加固构件试验值与理论值的比较可以看出, 预应力碳纤维板加固方法中预应力碳纤维板与混凝土构件在支座处的安装质量以及碳纤维板与混凝土梁的粘接效果对于加固结果都有很大影响。

(下转第 92 页)