

# 预应力碳纤维板加固二次受力受弯构件的试验研究

唐军<sup>1</sup> 朱万旭<sup>2</sup> 李丽<sup>1</sup> 陈艺玲<sup>2</sup>

(1 桂林理工大学土木建筑学院 桂林 541002 2 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

**摘要:**以往的预应力碳纤维板加固受弯试验大多建立在结构“一次受力”的基础上,本文从加固工程中结构大多为“二次受力”的实际情况出发,试验研究预应力碳纤维板加固“二次受力”钢筋混凝土受弯结构。作者利用柳州欧维姆机械股份有限公司开发的预应力碳纤维板专用锚具的基础上,完成了2根预应力碳纤维板加固的试验梁、1根非预应力碳纤维板加固的试验梁受弯构件的模型试验。研究了预应力碳纤维板加固的试验梁的受力性能。研究了预应力碳纤维加固对试件承载力、使用阶段变形、碳纤维应用效率及延性的影响。试验结果表明:预应力碳纤维板加固可显著提高受弯构件开裂及屈服荷载,减小构件使用阶段内的变形,充分利用碳纤维材料性能,对延性下降趋势加强设计。

**关键词:**预应力 碳纤维板 加固 受弯构件

由于使用不当、设计或施工等原因都会造成钢筋混凝土构件刚度、抗弯承载力的降低而需要补强,工程结构补强加固的任务越来越多。碳纤维板加固由于其自身的优势(如强度高、自重轻、易于施工耐腐蚀等),近年来在我国的应用逐渐增多。传统的外部粘贴碳纤维加固技术无法充分发挥材料的高强性能,对受弯结构的加固仅在结构钢筋屈服以后才能有效地利用碳纤维的强度。针对该问题,对碳纤维应用预应力技术成为最佳的选择。

以往的预应力碳纤维板试验研究大多建立在“一次受力”的基础上,即对未曾受力的钢筋混凝土结构进行预应力碳纤维板加固试验研究。但这与加固工程中结构大多为“二次受力”的状况不符。所谓“二次受力”,就是结构在加固之前已经受力,在已受力的结构上粘贴CFRP加固后再次受力<sup>[1]</sup>。本文从加固工程实际情况出发,试验研究预应力碳纤维板加固“二次受力”的钢筋混凝土受弯结构,以期得出更加满足工程实际的研究成果。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

本文共进行了3根钢筋混凝土受弯试件的静载试验<sup>[2]</sup>。试件混凝土设计强度为C40,采用同

一尺寸,截面尺寸为160mm×300mm,全长3200mm,净跨3000mm。剪跨段长度为1000mm,纯弯段长度为1000mm。所有试件采用相同配筋,底部受拉纵筋配有2φ18HRB335热轧钢筋,箍筋为φ8@100mm HPB235,受压区配有2φ10 HPB235架立钢筋。试件具体尺寸与配筋如图1所示。

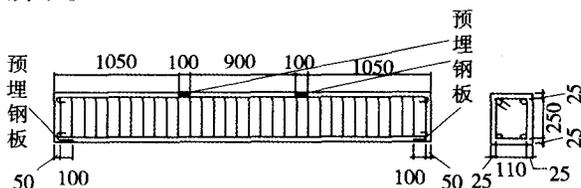


图1 试件尺寸配筋

3根试件全部粘贴碳纤维板加固,其中1根未施加预应力,碳板两端未实施锚固,作为对比试件与施加预应力加固试件进行受弯性能比较,编号为Y0。2根试件采用预应力碳纤维板加固,施加30kN预应力的试件编号为Y30,施加50kN预应力的试件编号为Y50。3根试件均采用50mm宽,1.2mm厚的碳纤维板加固。Y0的碳纤维板粘贴长度为2700mm,碳纤维板端部距试件端部距离为250mm。Y30和Y50的碳纤维板粘贴长度为2200mm,固定端一侧碳纤维板粘贴边缘与试件端部距离为400mm,张拉端一侧碳纤维板粘贴边缘与试件端部距离为600mm。试件参数详见表1。

表1 试件参数

试件编号	受拉钢筋	粘贴长度/mm	碳纤维板的张拉控制应力/kN	加固方式
Y0	2φ18	2700	0	非预应力FRP板加固
Y30	2φ18	2200	30	预应力FRP板加固
Y50	2φ18	2200	50	预应力FRP板加固

## 1.2 试验材料

采用的混凝土设计配比为C40, 实际立方体抗压强度为42MPa。受拉纵筋采用的HRB335 热处理钢筋, 实际屈服强度为365MPa。加固试件用的碳纤维板为柳州欧维姆机械股份有限公司生产的OVM.CFP50-1.2型高强碳纤维板, 规格为1.2mm × 50mm, 碳纤维板性能如表2所示。

表2 碳纤维板性能

名称	厚度 (mm)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	伸长率 (%)
碳纤维板	1.2	2570	173	1.7

锚固及张拉装置为柳州欧维姆机械股份有限公司生产的预应力碳纤维板专用锚具, 该锚具分为固定端和张拉端, 图2为预应力碳纤维板专用锚具。

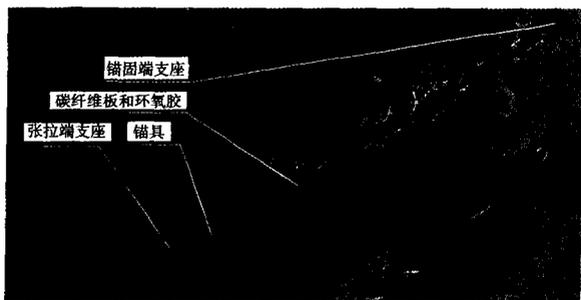


图2 预应力碳纤维板专用锚具

粘贴碳纤维板的胶粘剂为某企业生产的碳纤维片材加固修复混凝土结构专用胶, 材性测试结果如表3所示。

表3 胶粘剂性能

试验项目	JN-CS底胶	JN-CE找平胶	JN-3P粘贴胶
抗压强度/MPa	-	-	82.0
抗拉强度/MPa	-	36.8	52.5
抗弯强度/MPa	-	51.0	68.0
钢-钢抗剪强度标准值/MPa	17.0	-	20.5
钢-混凝土正拉粘结强度/MPa	3.7	3.7	3.7

## 1.3 加载方案

试验为了模拟桥梁等钢筋混凝土梁在现实中大多是先受荷载开裂, 再粘贴预应力碳纤维板进行加固的实际情况。本试验也将按上述工况进行, 试验分两次进行加载, 即先对钢筋混凝土简支梁在单调荷载下加载至开裂即出现第一条裂纹, 然后卸载, 再进行预应力碳纤维板的粘贴和张拉, 最后再对梁加载至破坏。

试验梁两端简支, 集中荷载通过分配梁作用到钢垫片上, 由钢垫片作用到试验梁上。加载按结构静力学中单调加载的方法进行, 加载示意如图3。

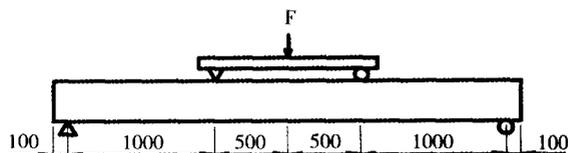


图3 试验梁加载示意图

## 1.4 试验量测方案

本文试验在混凝土、钢筋以及碳纤维板上分别设置了电阻应变片用于测量不同位置的材料应变。混凝土上的应变片布置为在试件纯弯段顶部受压区连续不间隔粘贴5个100mm × 3mm 规格应变片, 试件跨中侧面沿截面高度间隔均匀粘贴5个100mm × 3mm 规格应变片。受拉钢筋上粘贴4个5mm × 3mm 规格应变片, 位置全部在试件纯弯段内。由于碳纤维板材质较均匀, 因此主要采用5mm × 3mm 规格应变片, 具体布置为从试件跨中位置向碳纤维板两端顺次粘贴, 应变片间距为150mm, 两端应变片均布置至锚固处。具体应变测量布置如图4所示。

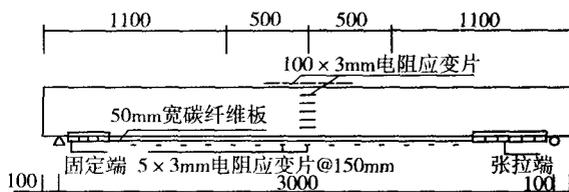


图4 应变量测

另外, 在试件的跨中、加载点以及支座处均布置百分表以测量试件的跨中最大变形、加载点变形及支座沉降。本文试验在广西工学院土建系结构实验室完成。

## 2 试验现象及结果

### 2.1 试验现象

非预应力碳纤维板加固试件的主要破坏形式为碳纤维板剥离破坏。在受拉钢筋屈服以后,碳纤维板与试件混凝土之间开始产生剥离,剥离裂缝产生于碳纤维板端部粘结位置的试件底部,然后沿水平方向发展,最终碳纤维板带胶水层从一端完全剥离,胶水层上未携带混凝土碎块<sup>[3]</sup>。

预应力碳纤维板加固试件,由于在碳纤维板端部设置了锚固,因此在本文试验中初始的剥离并不是产生于碳纤维板端部,剥离形式主要为在接近加载点,剪力、弯距以及剪切变形均较大的区域产生的碳纤维板剥离。剥离产生后,向碳纤维板端部发展,在此过程中剥离区域的碳纤维板应力一直沿长度方向发生重分布,弯距较大区域的碳纤维板应力不再增大,试件的承载能力也不再规律的增大。最终剥离裂缝发展至接近碳纤维板端部时,一侧的碳纤维板与试件混凝土的剩余粘结面积小于抵抗拉应力所需的有效粘结面积,锚具对碳纤维板的剥离应力抑制失效,碳纤维板与试件完全剥离。剥离裂缝发展至锚具处后,端部一定长度范围内碳纤维板成了无粘结体系,锚具完全承担了抵抗碳纤维板拉应力的作用,锚具前端边缘的碳纤维板处于高拉应力状态下,承受拉剪复合应力作用而被拉断。

预应力加固试件的钢筋屈服荷载都较非预应力加固试件有较大提高。预应力加固试件的裂缝间距与非预应力加固试件基本相等,但由于预应力减小了试件受拉区应变,因此预应力加固试件的裂缝宽度明显小于非预应力加固试件。

### 2.2 试验主要结果

表4列出了本文试验的主要结果。

表4 主要试验结果

试件编号	开裂荷载 /kN	屈服荷载 /kN	极限荷载 /kN	极限变形 /mm	碳纤维板最大应变/ $10^{-6}$	破坏形式
Y0	30	80	120	39.87	4311	碳纤维板从端部完全剥离
Y30	36	85	143	33.92	6684	碳纤维板从锚具处被拉断
Y50	40	100	150	22.16	4930	碳纤维板从锚具处被拉断

## 3 试验结果分析

### 3.1 试件受弯性能分析

因为本试验经过两次加载,第一次加载把3根梁都加载至试验梁出现第一条裂缝,因此得到未加固时梁的开裂荷载为20kN。因为试验需要在第二次加载前进行碳纤维板的粘贴与张拉,故第一次加载完毕后进行卸载,所以第二次加载观察开裂荷载时,测得的开裂荷载值偏大。承载能力提高分析见表5。

表5 承载能力提高分析表

试件编号	开裂荷载 /kN	开裂荷载较未加固梁的提高系数(%)	屈服荷载 /kN	屈服荷载较非预应力的提高系数(%)	极限荷载 /kN	极限荷载较非预应力的提高系数(%)
Y0	30	50	80	-	120	-
Y30	36	80	85	6.3	143	19.2
Y50	40	100	100	25	150	25

从试验结果表5可以看出:

(1) 对于开裂荷载,非预应力碳纤维板加固的试件有50%的提高;预应力为30kN和50kN的碳纤维板加固试件Y30与Y50较未加固时有80%和100%的提高。而且预应力碳纤维板加固能有效延缓梁的开裂,相比于非预应力碳纤维板加固的梁,在相同荷载作用下,预应力碳纤维板加固的梁的裂缝发展长度更短,裂缝宽度更小,裂缝间距也更小。说明对曾开裂过的受弯构件,在对其卸载后,粘贴碳纤维板进行加固可以有效提高其抗裂性能,尤其预应力碳纤维板加固体现了预应力加固技术的优势。预应力越大,在相同荷载作用时,裂缝宽度和间距越小。

(2) 对于屈服荷载及极限荷载, Y30较Y0分别提高了6.3%和19.2%, Y50较Y0分别提高了25%和25%。预应力碳纤维板加固相比于非预应力碳纤维板加固的梁在屈服荷载和极限荷载方面均有明显提高,但在配筋率相同的情况下,预应力的提高对极限荷载的提高并不明显。

### 3.2 荷载—挠度及延性分析

图5为试验构件的荷载—挠度曲线,从图5中我们可以得出:

(1) 预应力碳纤维板的加固在提高梁承载

力的同时可以明显提高梁的刚度，减小了试件的变形。随预应力的增大变形也进一步减小。

(2) 良好的锚固措施可以确保加固后碳纤维板、钢筋、混凝土共同受力。采用柳州欧维姆机械股份有限公司生产的预应力碳纤维板专用锚具锚固梁端部的梁，荷载-挠度曲线更加平滑、稳定；未采用锚固措施的非预应力加固试件梁，较易产生碳纤维板的脱落破坏。

(3) 加强筋屈服后，梁的挠度值反映其延性的大小，从图5可以看出，预应力碳纤维板加固后对梁的延性有较大影响，延性有降低的趋势。

表6为试验梁延性系数对比表，我们得出非预应力碳纤维板加固梁的延性系数高于预应力碳纤维板加固的梁。Y0梁比Y30和Y50梁分别高出12%和87%。试验梁随预应力度的提高，延性系数降低。Y50梁比Y30梁的预应力度提高66.7%，延性系数降低40%，说明预应力的提高对梁的延性有的降低趋势。

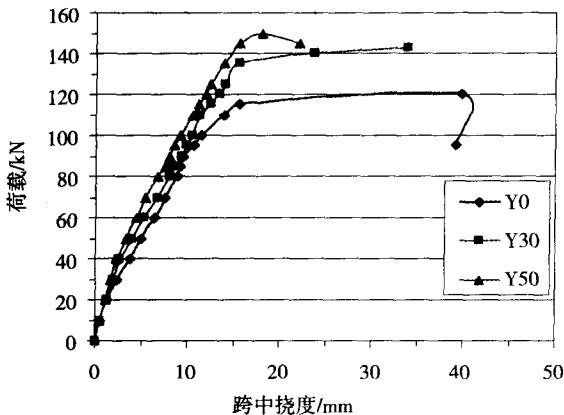


图5 荷载-跨中挠度曲线

表6 试验梁延性系数对比表

试件编号	屈服变形 $\Delta y(\text{mm})$	极限变形 $\Delta u(\text{mm})$	延性系数 $\Delta u/\Delta y$
Y0	8.9	39.87	4.48
Y30	8.5	33.92	4.0
Y50	9.2	22.16	2.4

### 3.3 试件的应变分析

图6是试件的钢筋应变-荷载对比图。受拉钢筋应变曲线大致可分为三个阶段，即混凝土开裂前的弹性阶段、混凝土开裂至钢筋屈服阶段和钢

筋屈服至梁破坏阶段。而试件在这三个阶段的应变增长率呈递增趋势。在进入下一阶段时，首先是非预应力碳纤维板加固试件，其次是低预应力碳纤维板加固试件，最后是高预应力碳纤维板加固试件。图中看到，非预应力碳纤维板加固试件和预应力碳纤维板加固试件在第一个阶段的钢筋应变增长率较接近，但是非预应力碳纤维板加固试件在进入第二个阶段的时机比预应力碳纤维板加固试件早，进一步证明了预应力对屈服荷载的提高作用明显。在钢筋屈服进入第三个阶段后，预应力碳纤维板加固试件的应变增长明显慢于非预应力加固试件，其极限应变也明显小于非预应力加固试件，这说明在钢筋屈服后，预应力碳纤维板在承担抵抗弯矩和抑制应变增长方面作用明显，而且预应力越大作用越明显。

图7是试件的碳纤维板应变-荷载对比图，图中可以看到碳纤维板的应变表现出与钢筋应变相似的布局。即也分成了三个阶段，而且预应力碳纤维板加固试件的碳纤维板应变在进入第二个阶段的时机要比非预应力碳纤维板加固试件推迟较多<sup>[4]</sup>。说明对碳纤维板施加预应力同样可以有效地减缓碳纤维板应变进入第二个阶段的时机，从而使碳纤维板的应变在整个全过程中减缓了其增长性，更好的发挥了碳纤维板高强的优势，提高了碳纤维板的利用率，其利用程度随初始应力提高而提高。

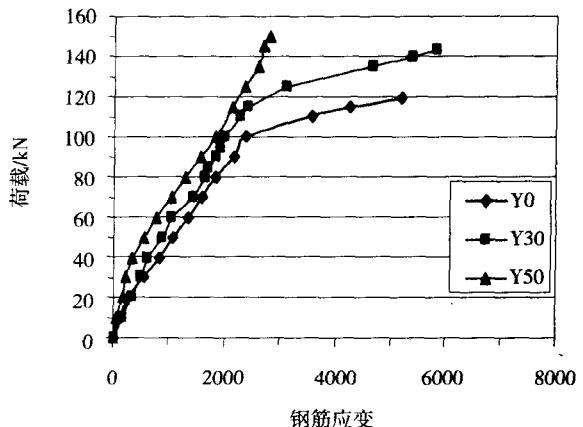


图6 钢筋的应变-荷载曲线

(下转第38页)

缝钢管里面出现生锈现象,以及导管安装弧度跟设计理论值存在有误差,致使成孔弧度的顺畅程度与设计理论值存在差异,造成实际孔道摩擦系数大于设计理论摩擦系数,所以张拉穹顶导管时,出现钢绞线实际张拉伸长值 $\Delta L_{实} < 0.95 \Delta L_{设}$ 的情况。后经过与设计单位沟通,采取在孔道内加入200g以下石墨和适量钢绞线专用水溶性油的方法改善孔道状态,使摩擦系数满足设计要求。最终钢绞线张拉伸长值达到设计规定范围。

#### 4.2 钢绞线张拉滑丝

施工时必须定期检查千斤顶内工具锚夹片内齿磨损情况,如发现工具夹片内齿磨损严重,需要及时更换。以免在张拉时工具锚夹片不能有效咬合全部张拉钢绞线束,在张拉至最终张拉力时,导致未能有效咬合的钢绞线出现局部滑丝,伸长值明显小于设计规定值,而其他钢绞线伸长值则大于设计规定值。如果出现此种情况,证明在整体张拉力达到设计规定后,未能咬合钢绞线

单根受力明显小于本该承受的平均拉力,其它钢绞线单根受力则明显大于本该承受的平均张拉力,情况严重的将导致其它钢绞线超张拉断裂,产生安全事故和严重的质量事故。

#### 5 结论

秦山核电二期扩建4#反应堆穹顶预应力施工直接关系到核电后期反应堆过渡区和穹顶避雷装置安装施工能否按时介入,与核电如期并网发电息息相关。施工工期紧,任务重。在采用先进工艺和相关施工人员的密切配合下,最终出现一例安全事故和一例质量事故,提前一个月完成了穹顶预应力张拉施工任务,倍受业主单位好评,为以后类似施工积累了宝贵经验和打下了坚实基础。

#### 参考文献

- [1] 压水堆核电站预应力混凝土安全壳建造规范[S]. 中国核工业总公司. 1996.
- [2] 后张有粘结预应力施工技术若干问题的探讨[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 02.
- [3] 后张预应力混凝土施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999

(上接第24页)

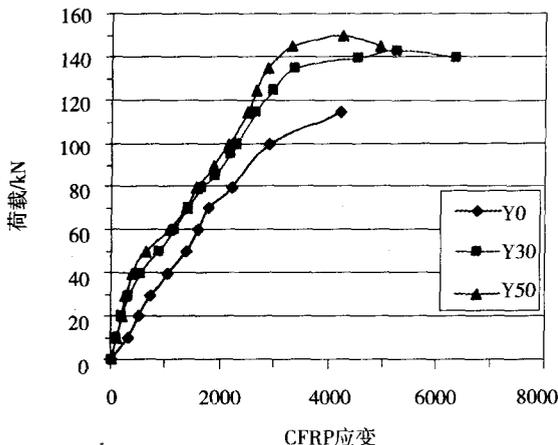


图7 CFRP的应变-荷载曲线

#### 4 结论

从本文试验结果,可以得出如下结论:

(1) 对于二次受力的构件进行碳纤维板加固,与非预应力碳纤维板加固相比,预应力碳纤维板加固可极大地提高受弯构件的开裂荷载,显著提高受弯构件的屈服荷载和极限荷载。

(2) 预应力碳纤维板材加固技术可在提高

试件刚度的同时减小试件的变形,对梁的延性有较大影响,延性有降低的趋势。

(3) 对碳纤维板施加预应力可以更好的发挥碳纤维板高强的优势,提高受弯构件使用阶段内碳纤维板强度的利用效率,利用率随初始应力增大而提高。

(4) 在试验过程中所使用柳州欧维姆机械股份有限公司的预应力碳纤维板专用锚具结构简单,易于操作,非常适用于实际工程,可大大提高施工的效率。

#### 参考文献

- [1] 侯发亮. FRP加固混凝土结构二次受力分析[J]. 工业建筑, 2004, 增刊
- [2] 曾磊. 预应力CFRP板加固混凝土梁实验与理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2005
- [3] 彭晖, 尚守平. 预应力碳纤维板加固受弯构件的试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 142-151
- [4] 金勇俊. 预应力碳纤维板加固混凝土受弯构件的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007