



CECS 146:2003

中国工程建设标准化协会标准

碳纤维片材加固修复混凝土结构 技术规程

**Technical specification for strengthening concrete
structures with carbon fiber reinforced polymer laminate**

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

碳纤维片材加固修复混凝土结构 技术规程

**Technical specification for strengthening concrete
structures with carbon fiber reinforced polymer laminate**

CECS 146:2003

主编单位：国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心

副主编单位：四川省建筑科学研究院

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2003 年 5 月 1 日

中国计划出版社

2002 北京

前言

根据中国工程建设标准化协会(98)建标协字第 13 号文件的要求,由国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心(冶金工业部建筑研究总院)和四川省建筑科学研究院会同有关单位共同编制了本规程。

本规程包括总则、术语及符号、材料、加固设计计算方法和构造要求、施工、检验与验收以及附录等内容。本规程是在总结近年来国内各高校和科研单位的研究成果以及各设计、施工单位采用碳纤维片材进行结构加固的实践经验,参考国外大量相关资料,并进行了大量试算和调研的基础上研制的。

根据国家计委计标[1986]649 号文《关于请中国工程建设标准化委员会负责组织推荐性工程建设标准试点工作的通知》要求,现批准协会标准《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》,编号为 CECS146:2003,推荐给工程设计、施工、使用单位采用。本规程由中车工程建设标准化协会建筑物鉴定与加固委员会归口管理,由国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心(北京市海淀区西土城路 33 号中冶集团建筑研究总院内,邮编:100088)负责解释。在使用中如发现需要修改或补充之处,请将意见和资料径寄解释单位。

主编单位:国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心

副主编单位:四川省建筑科学研究院

参编单位:清华大学、中国电子工程设计院、中国建筑科学研究院、同济大学、武汉钢铁(集团)公司、西安建筑科技大学、武汉大学、东南大学、江苏省建筑科学研究院、上海伽翎建筑材料有限公司

主要起草人:岳清瑞 叶列平 罗苓隆 陈小兵 李荣 娄宇 胡孔国
陈瑜 颜子涵 陈义军 张誉 张小冬 马永欣 高作平
张继文 张轲 毛星明 沈琨 顾瑞南 杨勇新 涂庆胜

中国工程建设标准化协会

2003 年 3 月 31 日

目次

前言	3
1 总则	6
2 术语、符	6
2.1 术	6
2.2 符	7
3 材料	8
3.1 材料种类及一般要求	8
3.2 碳纤维片材	8
3.3 配套树脂类粘结材料	9
3.4 表面防护材料	10
4 设计规定	10
4.1 一般规定	10
4.2 一般构造要求	11
4.3 受弯加固	12
4.4 受剪加固	18
4.5 柱的抗震加固	20
5 施工规定	21
5.1 一般规定	21
5.2 施工准备	21
5.3 表面处理	21
5.4 涂刷底层树脂	22

5.5 找平处理.....	22
5.6 粘贴碳纤维片材.....	22
5.7 表面防护.....	23
5.8 施工安全及注意事项.....	23
6 检验与验收.....	23

附录A 碳纤维片材配套树脂类粘结材料与混凝土的正拉粘结强度

测定方法.....	24
A.1 适用范围.....	24
A.2 试验设备和试样.....	24
A.3 试验条件.....	26
A.4 试验步骤.....	26
A.5 试验结果.....	26
附录B 碳纤维片材加固混凝土结构施工质量现场检验方法.....	28
B.1 适用范围.....	28
B.2 试验设备和试样.....	28
B.3 试验步骤.....	29
B.4 试验结果.....	29
本规程用词说明.....	31

1 总则

1.0.1 为使采用碳纤维片材加固修复混凝土结构技术做到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于房屋和一般构筑物的混凝土结构加固修复设计、施工和验收；铁路工程、公路工程、港口工程和水利水电等工程混凝土结构的加固修复及砌体结构、木结构加固修复中的共性技术问题，可参照本规程的有关规定执行。

1.0.3 采用粘贴碳纤维片材加固修复混凝土结构的设计、施工及验收，除应符合本规程的规定外，尚应遵守国家现行有关标准和规范的规定。

1.0.4 采用粘贴碳纤维片材加固修复的混凝土结构，长期使用环境温度不应高于 60℃。对处于特殊环境(腐蚀、放射、高温等)下的混凝土结构采用碳纤维片材进行加固修复时，还应遵守相应的国家现行有关标准和规范的规定，并应采取相应的防护措施。

1.0.5 采用碳纤维片材加固修复混凝土结构前，应按照国家现行有关标准和规范对原有结构进行检测鉴定或评估。

1.0.6 采用粘贴碳纤维片材加固修复混凝土结构时，应由对该加固修复方法有经验的设计人员进行设计，并应由专业施工队伍进行施工。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 碳纤维片材 Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate

碳纤维布和碳纤维板的总称。

2.1.2 碳纤维布 Carbon Fiber Sheet

碳纤维布为连续碳纤维单向或多向排列、未经树脂浸渍的布状碳纤维制品。

2.1.3 碳纤维板 Carbon Fiber Plate

碳纤维板为连续碳纤维单向或多向排列、并经树脂浸渍固化的板状碳纤维制品。

2.1.4 底层树脂 Primer

用于基底处理的树脂。

2.1.5 找平材料 Putty Fillers

用于对加固构件表面进行找平处理的材料。

2.1.6 浸渍树脂 Saturating Resin

用于粘贴并浸透碳纤维布的树脂。

2.1.7 粘结树脂 Adhesives

用于粘贴碳纤维板的树脂。

2.2 符号

2.2.1 作用效应和抗力

M ——弯矩设计值；

M_i ——加固前受弯构件计算截面上实际作用的初始弯矩；

V_b ——梁的剪力设计值；

V_c ——柱的剪力设计值；

σ_{cf} ——碳纤维片材的拉应力；

ε_{cf} ——碳纤维片材的拉应变；

ε_i ——考虑二次受力影响时，加固前构件在初始弯矩作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变；

ε_{cfv} ——达到受剪承载能力极限状态时碳纤维片材的应变。

2.2.2 材料性能

E_{cf} ——碳纤维片材的弹性模量；

f_{cfk} ——碳纤维片材的抗拉强度标准值；

f_{cf} ——碳纤维片材的抗拉强度设计值；

ε_{cfu} ——碳纤维片材的极限拉应变；

$[e_{cf}]$ ——碳纤维片材的允许拉应变；

t_{cf} ——碳纤维片材与混凝土间的粘结强度设计值。

2.2.3 几何参数

A_{cf} ——受拉面上粘贴的碳纤维片材的截面面积；

h_{cf} ——受拉面上粘贴的碳纤维片材的宽度；

b_{cf} ——侧面粘贴碳纤维片材的高度；

h_{cf0} ——侧面粘贴碳纤维片材的截面面积形心至受压区外边缘的距离；

l_d ——碳纤维片材从强度充分利用截面向外延伸所需的粘结长度；

s_{cf} ——碳纤维片材条带的净间距；

t_{cf} ——单层碳纤维片材的厚度；

ω_{cf} ——碳纤维片材条带的宽度。

2.2.4 计算系数及其它

k_m ——碳纤维片材厚度折减系数；

n_{cf} ——碳纤维片材的粘贴层数；

j ——碳纤维片材受剪加固形式系数；

v ——碳纤维片材的有效约束系数；

ξ_{cfb} ——碳纤维片材达到其允许拉应变与混凝土压坏同时发生时的界限相对受压区高度；

λ_b ——梁受剪截面的剪跨比；

λ_c ——柱的剪跨比；

ρ_v ——总折算体积配箍率。

其它符号参观一行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010。

3 材料

3.1 材料种类及一般要求

3.1.1 采用粘贴碳纤维片材对混凝土结构进行加固修复时，应使用碳纤维片材、配套树脂类粘结材料及表面防护材料。

3.1.2 加固修复用材料应具有产品合格证和质检部门的产品性能检测报告：碳纤维片材及配套树脂类粘结材料应具有符合本规程第 3.3 节规定的物理力学性能指标；配套树脂类粘结材料还应提供耐久性能指标及施工和使用环境要求。

3.1.3 混凝土、钢筋及其它材料的有关设计指标应按国家现行有关标准和规范采用。

3.1.4 本规程所列碳纤维片材的性能指标是对单向碳纤维片材的要求，双向或多向碳纤维片材的指标要求可以参照执行。

3.2 碳纤维片材

3.2.1 碳纤维布的抗拉强度应按纤维的净截面积计算，净截面积取碳纤维布的计算厚度乘以宽度，碳纤维布的计算厚度为碳纤维布的单位面积质量除以碳纤维密度；碳纤维板的性能指标应按板的截面（含树脂）面积计算，截面（含树脂）面积取实测厚度乘以宽度。

3.2.2 碳纤维片材的主要力学性能指标要求。

表 3.2.2 碳纤维片材的主要力学性能指标

性能项目	碳纤维布	碳纤维板
抗拉强度标准值 f_{cfk}	$\geq 3000\text{MPa}$	$\geq 2000\text{MPa}$
弹性模量 E_{cf}	$\geq 2.1 \times 10^5\text{MPa}$	$\geq 1.4 \times 10^5\text{MPa}$
伸长率	$\geq 1.5\%$	$\geq 1.5\%$

3.2.3 碳纤维片材的主要力学性能只要参照现行国家标准《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》GB/T 3354 测定。

3.2.4 单层纤维布单位面积碳纤维质量不宜低于 150g/m^2 ，且不宜高于 450g/m^2 。在施工质量有可靠保证时，单层碳纤维布单位面积碳纤维质量可提高到 600g/m^2 。

3.2.5 碳纤维板的厚度不宜大于 2.0mm ，宽度不宜大于 200mm ，纤维体积不宜小于 60% 。

3.3 配套树脂类粘结材料

3.3.1 采用探险为片材对混凝土结构进行加固修复时，应采用配套底层树脂、找平材料、浸渍树脂和粘结树脂。

3.2.2 配套树脂类粘结材料的主要性能指标应满足表 3.3.2-1、表 3.3.2-2 和表 3.3.2-3 的要求。

表 3.3.2-1 底层树脂性能指标

性能	性能指标要求	试验方法
正拉粘结强度	$\geq 2.5\text{MPa}$ 且不小于被加固混凝土抗拉强度的标准值 f_{tk}	附录 A

表 3.3.2-2 找平材料性能指标

性能	性能指标要求	试验方法
正拉粘结强度	$\geq 2.5\text{MPa}$ 且不小于被加固混凝土抗拉强度的标准值 f_{tk}	附录 A

表 3.3.2-3 浸渍树脂和粘结树脂性能指标

性能	性能指标要求	试验方法
拉伸剪切强度	$\geq 10\text{MPa}$	GB 7124-86
拉伸强度	$\geq 30\text{MPa}$	GB/T 2568-1995
压缩强度	$\geq 70\text{MPa}$	GB/T 2569-1995
弯曲强度	$\geq 40\text{MPa}$	GB/T 2570-1995
正拉粘结强度	$\geq 2.5\text{MPa}$ 且不小于被加固混凝土抗拉强度的标准值 f_{tk}	附录 A
弹性模量	$\geq 1500\text{MPa}$	GB/T 2568-1995
伸长率	$\geq 1.5\%$	GB/T 2568-1995

3.3.3 配套树脂类粘结材料应按附录 A 进行粘结强度测定。配套树脂类粘结材料应

参照《机械工业产品用塑料、涂料、橡胶材料人工气候加速实验方法》GB/T14522-93 规定的环境条件进行耐久性检验，经 2000h 的加速老化后，按附录 A 进行正拉粘结强度试验，要求粘结强度不明显降低。

3.4 表面防护材料

3.4.1 对已加固修复完的结构表面应进行防护处理，表面防护材料应与浸渍树脂或粘结树脂可靠粘结。

3.4.2 选用的防火材料及其处理方法应使加固后建筑物达到要求的防火等级。

3.4.3 当被加固结构处于其它特殊环境时，应根据具体情况选择有效的防护材料。

4 设计规定

4.1 一般规定

4.1.1 采用粘贴碳纤维片材加固混凝土结构时，应通过配套粘结材料将碳纤维片材粘贴于构件表面，使碳纤维片材承受拉力，并与混凝土变形协调，共同受力。

4.1.2 碳纤维片材可采用下列方式对混凝土结构构件进行加固：

1 在梁、板构件的受拉区粘贴碳纤维片材进行受弯加固，纤维方向与加固处的受拉方向一致。

2 采用封闭式粘贴、U 形粘贴或侧面粘贴对梁、柱构件进行受剪加固，纤维方向宜与构件轴向垂直。

3 采用封闭式粘贴对柱进行抗震加固，纤维方向与柱轴向垂直。

4 当有可靠依据时，碳纤维片材也可用于其它形式和其它受力状况的混凝土结构构件的加固。

4.1.3 采用粘贴碳纤维片材加固混凝土结构时，应按国家现行有关标准采用以概率理论为基础的极限状态设计法进行承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算。

钢筋和混凝土材料宜根据检测得到的实际强度，按国家现行有关标准确定其相应的材料强度设计指标。

碳纤维片材应根据构件达到极限状态时的应变，按线弹性应力应变关系确定其相应的应力。

4.1.4 碳纤维片材应取生产厂提供的不小于 95% 保证率的极限抗拉强度作为抗拉强度标准值 f_{cfk} 。

碳纤维片材的极限拉应变 ϵ_{cfu} 应取其抗拉强度标准值 f_{cfk} 除以弹性模量 E_{cf} 。

4.1.5 当采用粘贴碳纤维片材对结构或构件进行加固时，应考虑加固后对结构中其它构件或构件的其它性能可能产生的影响。

4.1.6 采用粘贴碳纤维片材进行结构加固时，宜卸除作用在结构上的活荷载。如不能在完全卸载条件下进行加固，应考虑二次受力的影响。

4.1.7 在受弯加固和受剪加固时，被加固混凝土结构和构件的实际混凝土强度等级不应低于 C15。采用封闭粘贴碳纤维片材加固混凝土柱时，混凝土强度等级不应低于 C10。

4.2 一般构造要求

4.2.1 当碳纤维布沿其纤维方向需绕构件转角粘贴时，构件转角处外表面的曲率半径不应小于 20mm（图 4.2.1）。

4.2.2 碳纤维布沿纤维受力方向的搭接长度不应小于 100mm。当采用多条或多层碳纤维布加固时，各条或各层碳纤维布的搭接位置宜相互错开。

4.2.3 为保证碳纤维片材可靠地与混凝土共同工作，必要时应采取附加锚固措施。

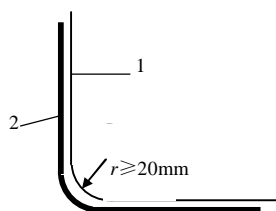


图 4.2.1 构件转角处粘贴示意图

1—构件 2—碳纤维布

4.3 受弯加固

4.3.1 采用碳纤维片材对梁、板构件进行受弯加固时的承载力计算，除应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 对受弯构件正截面承载力计算的基本假定外，尚应符合下列要求：

1 构件达到受弯承载能力极限状态时，碳纤维片材的拉应变 ϵ_{cf} 按截面应变保持平面的假定确定，但不应超过碳纤维片材的允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ ；

2 当考虑二次受力影响时，应根据加固时的荷载状况，按截面应变保持平面的假定计算加固前受拉区边缘混凝土的初始应变 ϵ_i ；

3 碳纤维片材的拉应力 σ_{cf} 应取碳纤维片材弹性模量 E_{cf} 与其拉应变 ϵ_{cf} 的乘积 $E_{cf}\epsilon_{cf}$ ；

4 在达到受弯承载能力极限状态前，碳纤维片材与混凝土之间不发生粘结剥离破坏。

4.3.2 在矩形截面受弯构件的受拉面上粘贴碳纤维片材进行受弯加固时，其正截面受弯承载力应按下列公式计算：

1 当混凝土受压区高度 x 大于 $\xi_{cfb}h$, 且小于 $\xi_b h_0$ (图 4.3.2a)

$$M \leq f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f_y' A_s' (h_0 - a') + E_{cf} e_{cf} A_{cf} (h - h_0) \quad (4.3.2-1)$$

混凝土受压区高度和受拉面上碳纤维片材的拉应变应按下列公式确定:

$$\begin{cases} f_c b x = f_y A_s - f_y' A_s' + E_{cf} e_{cf} A_{cf} \\ x = \frac{0.8 e_{cu}}{e_{cu} + e_{cf} + e_i} h \end{cases} \quad (4.3.2-2)$$

$$(4.3.2-3)$$

2 当混凝土受压区高度不大于 $2a'$ 时 (图 4.3.2b)

$$M \leq f_y A_s (h_0 - 0.5 x_{cfb} h) + E_{cf} [e_{cf}] A_{cf} h (1 - 0.5 x_{cfb}) \quad (4.3.2-4)$$

3 当混凝土受压区高度 x 小于 $2a'$ 时,

$$M \leq f_y A_s (h_0 - a') + E_{cf} [e_{cf}] A_{cf} (h - a') \quad (4.3.2-5)$$

式中 M ——包含初始弯矩的总弯矩设计值;

A_s 、 A_s' ——受拉钢筋、受压钢筋的截面面积;

A_{cf} ——受拉面上粘贴的碳纤维片材的截面面积;

f_y 、 f_y' ——受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值;

E_{cf} ——碳纤维片材的弹性模量;

x ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度;

ξ_{cfb} ——碳纤维片材达到其允许拉应变与混凝土压坏同时发生时的界限相对受压区高度, 取 $\frac{0.8 e_{cu}}{e_{cu} + [e_{cf}] + e_i}$;

ε_{cu} ——混凝土极限压应变, 取 0.0033;

ε_i ——考虑二次受力影响时, 加固前构件在初始弯矩作用下, 截面受拉边缘混凝土的初始应变, 按本规程第 4.3.4 条计算; 当可以不考虑二次受力时, 取 0;

ε_{cfu} ——碳纤维片材的极限拉应变;

$[e_{cf}]$ ——碳纤维片材的允许拉应变, 取, 且不应大于碳纤维片材极限拉应变的 2/3 和 0.01 两者中的较小值;

ε_{cf} ——碳纤维片材的拉应变;

k_m ——碳纤维片材厚度折减系数, 取 $1 - \frac{n_{cf} E_{cf} t_{cf}}{420000}$, 其中, t_{cf} 的单位取 mm, E_{cf}

的单位取MPa;

n_{cf} ——碳纤维片材的层数;

t_{cf} ——单层碳纤维片材的厚度;

b 、 h ——截面宽度、高度;

h_0 ——截面的有效高度;

a' ——受压钢筋截面重心至混凝土受压区边缘的距离。

图4.3.2中, x_n 为实际混凝土受压区高度。

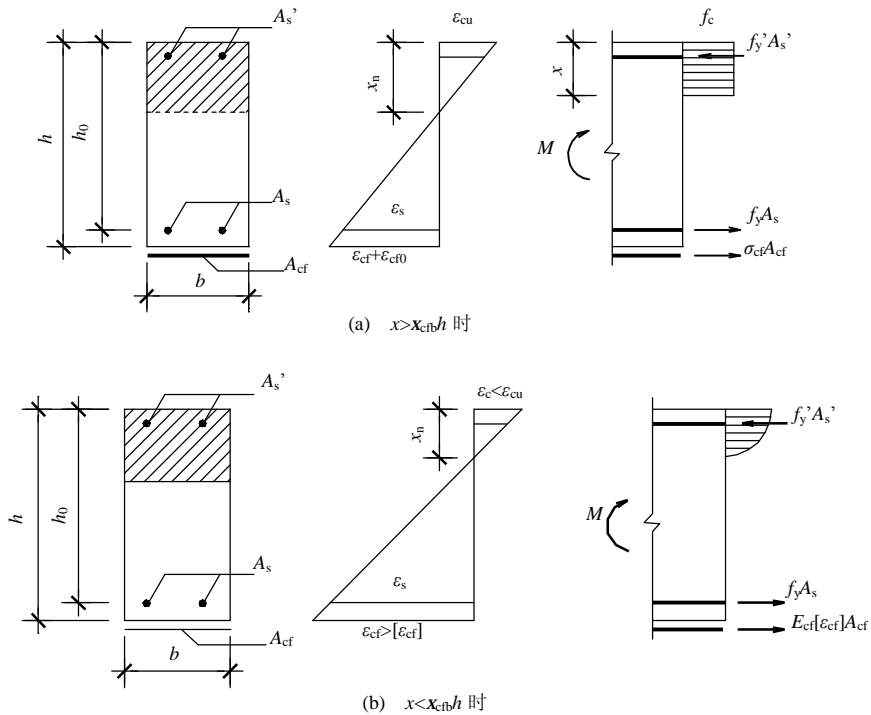


图 4.3.2 矩形截面正截面受弯承载力计算

4.3.3 对翼缘位于受压区的T形截面受弯构件, 当在其受拉区粘贴碳纤维片材进行受弯加固时, 应按本规程第4.3.2条的原则和现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010关于T形截面构件受弯承载力的计算方法进行计算和验算。

4.3.4 考虑二次受力影响时, 加固前在初始弯矩作用下, 截面受拉边缘混凝土的初始应变应按下列公式计算:

$$e_i = \frac{h}{h_o} (e_{ci} + e_{si}) - e_{ci} \quad (4.3.4-1)$$

$$e_{ci} = \frac{M_i}{x \cdot E_c b h_o^2} \quad (4.3.4-2)$$

$$e_{si} = \frac{y}{h} \cdot \frac{M_i}{E_s A_s \cdot h_o} \quad (4.3.4-3)$$

$$x = \frac{(1 + 3.5 g_f') a E_r}{0.2(1 + 3.5 g_f') + 6 a E_r} \quad (4.3.4-4)$$

$$y = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{s_{si} r_{te}} \quad (4.3.4-5)$$

$$s_{si} = \frac{M_i}{A_s \cdot h h_o} \quad (4.3.4-6)$$

式中 M_i ——加固前受弯构件计算截面上实际作用的初始弯矩；

e_{ci} ——加固前初始弯矩 M_i 作用下受压边缘的压应变；

ε_{si} 、 σ_{si} ——加固前初始弯矩 M_i 作用下受拉钢筋的拉应变、拉应力；

ζ ——受压边缘混凝土压应变综合系数；

ψ ——受拉钢筋拉应变不均匀系数；

η ——内力臂系数，取0.87；

E_c 、 E_s ——混凝土、钢筋的弹性模量；

α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

ρ ——受拉钢筋配筋率， $\rho = A_s / b h_o$ ；

f_{tk} ——混凝土抗拉强度标准值；

ρ_{te} ——有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率 $\frac{A_s}{A_{te}}$ ；

A_{te} ——有效受拉混凝土截面面积，对受弯构件取 $0.5bh + (b_f - b)h_f$ ， b_f 、 h_f 分别为受拉翼缘的宽度、高度；

γ_f' ——受压翼缘力，强系数，取 $\frac{(b_f' - b)h_f'}{bh_o}$ ， b_f' 、 h_f' 分别为受压翼缘的宽度、高度。

当初始弯矩 M_i 小于未加固截面受弯承载力的20%时，可忽略二次受力的影响。

4.3.5 计算正截面受弯承载力时，尚应满足下列要求：

1 受压区高度 x 不宜大于 $0.8\xi_b h_0$ ，其中界限相对受压区高度 ξ_b 按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定确定；

2 加固后受弯承载力的提高幅度不宜超过40%；

3 加固后在荷载效应标准组合下受拉钢筋的拉应力不宜超过钢筋抗拉强度标准值。
当有工程经验和依据时，上述规定可适当放宽。

4.3.6 当碳纤维片材粘贴于梁侧面的受拉区进行受弯加固时，粘贴区域宜在距受拉区边缘1/4梁高范围内。在进行正截面受弯承载力计算时，应将公式（4.3.2-1）～（4.3.2-4）中的改用碳纤维片材截面面积形心至梁受压区边缘的距离代替，且宜将侧面碳纤维片材的截面面积乘以折减系数（ $1-0.5h_{cf}/h$ ），其中 h_{cf} 为侧面碳纤维片材的粘贴高度。

4.3.7 对受弯加固的构件尚应验算构件的受剪承载力，避免受剪破坏先于受弯破坏发生。

4.3.8 对梁、板正弯矩区进行受弯加固时，碳纤维片材宜延伸至支座边缘。在集中荷载作用点两侧宜设置构造的碳纤维片材U型箍或横向压条。

碳纤维片材的切断位置距其充分利用截面的距离不应小于按下式计算得出的粘结延伸长度 l_d ，并应延伸至不需要碳纤维片材截面之外不小于200mm（图4.3.8）。

$$l_d = \frac{E_{cf} \epsilon_{cf} \cdot A_{cf}}{t_{cf} \cdot b_{cf}} \quad (4.3.8)$$

式中 l_d ——碳纤维片材从强度充分利用截面向外延伸所需的粘结长度；

ϵ_{cf} ——充分利用截面处碳纤维片材的拉应变，按本规程第4.3.2条确定；

τ_{cf} ——碳纤维片材与混凝土间的粘结强度设计值，取0.5MPa；

b_{cf} ——受拉面上粘贴的碳纤维片材的宽度；对板取1000mm板宽范围内粘贴的碳纤维片材宽度。

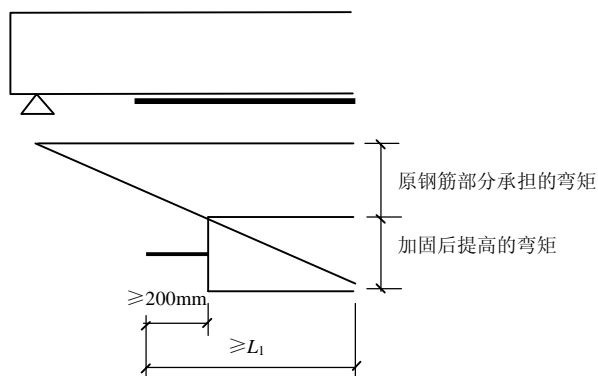


图 4.3.8 碳纤维片材的延伸长度

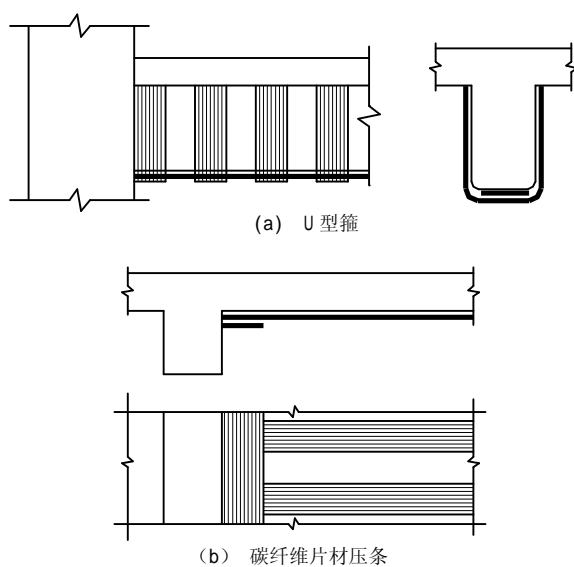


图 4.3.9 受弯加固时碳纤维片材端部附加锚固措施

4.3.9 当碳纤维片材延伸至支座边缘仍不满足本规程第4.3.8条的规定时，应采取下列锚固措施：

1 对于梁，在碳纤维片材延伸长度范围内应设置碳纤维片材U型箍锚固（图4.3.9a）。U型箍宜在延伸长度范围内均匀布置，且在延伸长度端部必须设置一道。U型箍的粘贴高度宜伸至板底面。每道U型箍的宽度不宜小于受弯加固碳纤维布宽度的1/2，U型箍的厚度不宜小于受弯加固碳纤维布厚度的1/2。

2 对于板，在碳纤维片材延伸长度范围内应通长设置垂直于受力碳纤维方向的压条（图4.3.9b）。压条宜在延伸锚固长度范围内均匀布置，且在延伸长度端部必须设置一道。每道压条的宽度不宜小于受弯加固碳纤维布条带宽度的1/2，压条的厚度不宜小于受弯加固碳纤维布厚度的1/2。

3 当碳纤维布的延伸长度小于按公式（4.3.8）计算所得长度的1/2时，应采取可靠的附加机械锚固措施。

4 当采用碳纤维板时，应在其延伸长度端部采取可靠的机械锚固措施。

4.3.10 对梁、板负弯矩区进行受弯加固时，碳纤维片材的截断位置距支座边缘的延伸长度应根据负弯矩分布按本规程第4.3.8条的原则确定，且对板不小于1/4跨度，对梁不小于1/3跨度。

当采用碳纤维片材对框架梁负弯矩区进行受弯加固时，应采取可靠锚固措施与支座连接。当碳纤维片材需绕过柱时，宜在梁侧 $4h_f$ 范围内粘贴（图4.3.10），当有可靠依据和经验时，此限制可适当放宽。

4.3.11 板受弯加固时，碳纤维片材宜采用多条密布方案。

4.3.12 当沿柱轴向粘贴碳纤维片材对柱的正截面承载力进行加固时，碳纤维片材应有可靠的锚固措施。

4.4 受剪加固

4.4.1 对钢筋混凝土梁进行受剪加固时，应按下列公式进行斜截面受剪承载力计算：

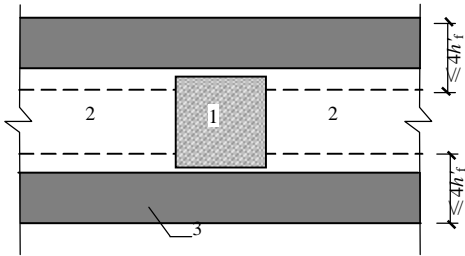
$$V_b \leq V_{brc} + V_{bcf} \tag{4.4.1-1}$$


图 4.3.10 负弯矩区加固时梁侧有效粘贴范围
1—柱 2—梁 3—碳纤维片材 h_f —板厚

$$V_{bcf} = j \frac{2n_{cf} w_{cf} t_{cf}}{(s_{cf} + w_{cf})} e_{cfv} E_{cf} h_{cf} \quad (4.4.1-2)$$

$$e_{cfv} = \frac{2}{3} (0.2 + 0.12 l_b) e_{cfu} \quad (4.4.1-3)$$

式中 V_b ——梁的剪力设计值；

V_{brc} ——未加固钢筋混凝土梁的受剪承载力，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定计算；

V_{bcf} ——碳纤维片材承担的剪力；

ε_{cfv} ——达到受剪承载能力极限状态时碳纤维片材的应变；

ε_{cfu} ——碳纤维片材的极限拉应变；

j ——碳纤维片材受剪加固形式系数，对封闭粘贴取1.0，对U形粘贴取0.85，对侧面粘贴取0.70；

λ_b ——梁受剪计算截面的剪跨比，对于集中荷载作用情况取 a/h_o ，当 λ_b 大于3.0时，取3.0，当 λ_b 小于1.5时，取1.5， a 为集中荷载作用点到支座边缘的距离；对于均布荷载作用情况，取3.0；

n_{cf} ——碳纤维片材的粘贴层数；

h_{cf} ——侧面粘贴碳纤维片材的高度；

s_{cf} ——碳纤维片材条带的净间距；

t_{cf} ——单层碳纤维片材的厚度；

w_{cf} ——碳纤维片材条带的宽度。

4.4.2 对钢筋混凝土柱进行受剪加固时，应按下列公式进行斜截面受剪承载力计算：

$$V_c \leq V_{crc} + V_{ccf} \quad (4.4.2-1)$$

$$V_{ccf} = j \frac{2n_{cf} w_{cf} t_{cf}}{(s_{cf} + w_{cf})} e_{cfv} E_{cf} h_{cf} \quad (4.4.2-2)$$

$$e_{cfv} = \frac{2}{3} (0.2 - 0.3n + 0.12 l_c) e_{cfu} \quad (4.4.2-3)$$

式中 V_c ——柱的剪力设计值；

V_{crc} ——未加固钢筋混凝土柱的受剪承载力，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定计算；

V_{ccf} ——碳纤维片材承担的剪力；

n ——柱的轴压比，取，为柱轴向压力设计值，为柱截面面积； $A_f N_c / N_A$

λ_c ——柱的剪跨比，对于框架柱取 $H_n / 2h_o$ ，当 λ_c 大于3.0时取3.0，当 λ_c 小于1.0时取1.0， H_n 为框架柱净高度， h_o 为框架柱的截面有效高度。

4.4.3 采用碳纤维片材对钢筋混凝土梁、柱构件进行受剪加固时，应符合下列规定：

- 1 碳纤维片材的纤维方向宜与构件轴向垂直；
- 2 应优先采用封闭粘贴形式，也可采用U形粘贴、侧面粘贴（图4.4.3a）。对碳纤维板，可采用双L形板形成U形粘贴；
- 3 当碳纤维片材采用条带布置时，其净间距5.，不应大于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010规定的最大箍筋间距的0.7倍；

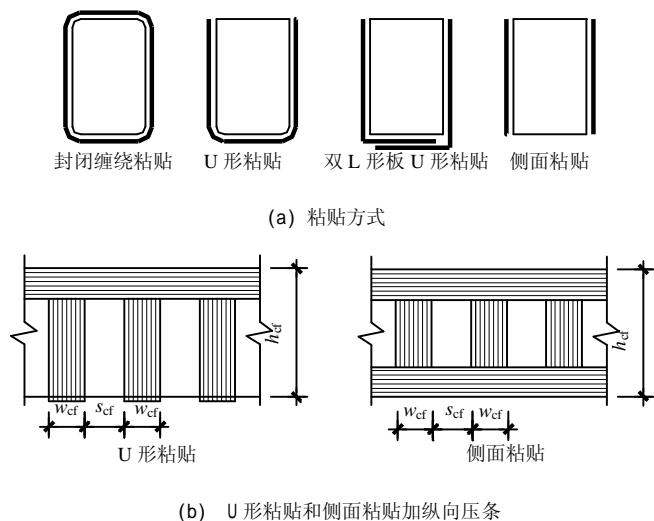


图 4.4.1 碳纤维片材的抗剪加固方式

4 U形粘贴和侧面粘贴的粘贴高度 h_{cf} 宜取构件截面高度。对于U形粘贴形式，宜在上端粘贴纵向碳纤维片材压条；对侧面粘贴形式，宜在上、下端粘贴纵向碳纤维片材压条（图4.4.3b）。

4.4.4 构件的受剪截面尺寸应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定。

4.5 柱的抗震加固

4.5.1 柱的抗震加固应采用封闭式粘贴碳纤维片材的方法。柱端箍筋加密区的总折算体积配箍率应按下列公式计算，并应满足现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 对

柱端箍筋加密区体积配箍率的要求:

$$\rho_v = \rho_{sv} + u \frac{2n_{cf} w_{cf} t_{cf} (b+h) f_{cf}}{(s_{cf} + w_{cf}) b h f_{yv}} \quad (4.5.1)$$

式中 b 、 h ——柱的截面宽度、高度;

ρ_v ——总折算体积配箍率;

ρ_{sv} ——按箍筋范围内核心截面计算的体积配箍率;

u ——碳纤维片材的有效约束系数, 取 0.45; 轴压比大于 0.5 且加固时未卸载时取 0.36;

f_{cf} ——碳纤维片材的抗拉强度设计值, 取 $f_{cfk}/1.1$;

f_{yv} ——箍筋的抗拉强度设计值。

4.5.2 碳纤维片材在箍筋加密区宜连续布置。碳纤维片材两端应搭接或采取可靠连接措施形成封闭箍。碳纤维片材条带的搭接长度不应小于 150mm, 各条带搭接位置应相互错开。

5 施工规定

5.1 一般规定

5.1.1 粘贴碳纤维片材加固修复混凝土结构应由熟悉该技术施工工艺的专业施工队完成,并应有加固修复方案和施工技术措施。

5.1.2 施工必须遵循下列工序进行:

- 1 施工准备
- 2 混凝土表面处理;
- 3 配制并涂刷底层树脂;
- 4 配制找平材料并对不平整处修复处;
- 5 配制并涂刷浸渍树脂或粘贴树脂;
- 6 粘贴碳纤维片材;
- 7 表面防护。

5.1.3 施工宜在 5℃以上环境温度条件下进行,并应符合配套树脂的施工使用温度环境温度低于 5℃时,应使用适用于低温环境的配套树脂或采用升温处理措施。

5.1.4 施工时应考虑环境湿度对树脂固化的不利影响。

5.1.5 在表面处理和粘贴碳纤维片材前,应按加固设计部位放线定位。

5.1.6 树脂配制时应按产品使用说明中规定的配比称量置于容量 20 中,用搅拌器均匀搅拌至色泽均匀。搅拌用容器内及搅拌器上不得有油污及杂质.应根据现场实际环境温度决定树脂的每次拌合量,并按使用要求严格控制使用时间。

5.2 施工准备

5.2.1 应认真阅读设计施工图。

5.2.2 应根据施工现场和被加固构件混凝土的实际状况,拟定施工方案和施工计划。

5.2.3 应对所使用的碳纤维片材、配套树脂、机具等作好施工前的准备工作。

5.3 表面处理

5.3.1 应清除被加固构件表面的剥落、疏松、蜂窝、腐蚀等劣化混凝土,露出混凝土结构

层，并用修复材料将表面修复平整。

5.3.2 应按设计要求对裂缝进行灌缝或封闭处理。

5.3.3 被粘贴混凝土表面应打磨平整，除去表层浮浆、油污等杂质，直至完全露出混凝土结构新面。转角粘贴处要进行导角处理并打磨成圆弧状，圆弧半径不应小于 20mm。

5.3.4 混凝土表面应清理干净并保持干燥。

5.4 涂刷底层树脂

5.4.1 应按产品供应商提供的工艺规定配制底层树脂。

5.4.2 应用滚筒刷将底层树脂均匀涂抹于混凝土表面。应在树脂表面指触干燥后立即进行下一步工序施工。

5.5 找平处理

5.5.1 应按产品供应商提供的工艺规定配制找平材料。

5.5.2 应对混凝土表面凹陷部位用找平材料填补平整，且不应有棱角。

5.5.3 转角处应用找平材料修复为光滑的圆弧，半径应不小于 20mm。

5.5.4 应在找平材料表面指触干燥后立即进行下一步工序施工。

5.6 粘贴碳纤维片材

5.6.1 粘贴碳纤维布应符合下列要求：

- 1 按设计要求的尺寸裁剪碳纤维布；
- 2 应按产品供应商提供的工艺规定配制浸渍树脂并均匀涂抹于所要粘贴的部位；
- 3 用专用的滚筒顺纤维方向多次滚压，挤出气泡，使浸渍树脂充分浸透碳纤维布。

滚压时不得损伤碳纤维布；

4 多层粘贴重复上述步骤，应在纤维表面浸渍树脂指触干燥后立即进行下一层的粘贴；

5 在最后一层碳纤维布的表面均匀涂抹浸渍树脂。

5.6.2 应按下列步骤粘贴碳纤维板，

- 1 应按设计要求的尺寸裁剪碳纤维板，按产品供应商提供的工艺规定配制粘结树

脂；

2 将碳纤维板表面擦拭干净至无粉尘。如需粘贴两层时，对底层碳纤维板两面均应擦拭干净；

3 擦拭干净的碳纤维板应立即涂刷粘结树脂，胶层应呈凸起状，平均厚度不小于 2mm；

4 将涂有粘结树脂的碳纤维板用手轻压贴于需粘贴的位置。用橡皮滚筒顺纤维方向均匀平稳压实，使树脂从两边溢出，保证密实无空洞。当平行粘贴多条碳纤维板时，两板之间空隙应不小于 5mm；

5 需粘贴两层碳纤维板时，应连续粘贴。如不能立即粘贴，再开始粘贴前应对底层碳纤维板重新做好清洁工作。

5.7 表面防护

5.7.1 当需要做表面防护时，应按有关规范的规定处理，并保证防护材料与碳纤维片材之间有可靠的粘结。

5.8 施工安全及注意事项

5.8.1 碳纤维片材为导电材料，施工碳纤维片材时应远离电气设备及电源，或采取可靠的防护措施。

5.8.2 施工过程中应避免碳纤维片材的弯折。

5.8.3 碳纤维片材配套树脂的原料应密封储存，远离火源，避免阳光直接照射。

5.8.4 树脂的配制和使用场所，应保持通风良好。

5.8.5 现场施工人员应采取相应的劳动保护措施。

6 检验与验收

6.0.1 在开始施工之前，应确认碳纤维片材及配套树脂类粘结材料的产品合格证，产品质量出厂检验报告，各项性能指标应符合本规程第 3.1 节、第 3.2 节、第 3.3 节规定的要求。

6.0.2 采用碳纤维片材及配套树脂类粘结材料对混凝土结构进行加固修复时，应严格按本规程第 5 章有关条款进行各工序隐蔽工程检验与验收。如施工质量不能满足本规程第 5 章有关条款要求时，应立即采取补救措施或返工。

6.0.3 碳纤维片材实际粘贴面积应不少于设计量，位置偏差应不大于 10mm。

6.0.4 碳纤维片材与混凝土之间的粘结质量可用小锤轻轻敲击或手压碳纤维片材表面的方法来检查，总有效粘结面积不应低于 95%。当碳纤维布的空鼓面积小于 10000mm² 时，可采用针管注胶的方式进行补救。空鼓面积大于 10000mm² 时，宜将空鼓处的碳纤维片材切除，重新搭接贴上等量的碳纤维片材，搭接长度应不小于 100mm。

6.0.5 必要时应按附录 A 方法对施工质量进行现场检验。

6.0.6 必要时可对碳纤维片材和配套树脂类粘结材料进行现场取样检验。

附录 A 碳纤维片材配套树脂类粘结材料与混凝土的正拉粘结强度测定方法

A.1 适用范围

A.1.1 本方法适用于与碳纤维片材配套的树脂类粘结材料单层或复合涂层与混凝土间的正拉粘结强度的测定。

A.2 试验设备和试样

A.2.1 拉力试验机。

拉力试验机的量程选择应与试样的破坏荷载相适应。试验时所用的夹具应能使试样对中、固定，试验机应能使拉力平稳地增加。

A.2.2 试验机具。

试验所用机具应采用钢材加工而成（图 A.2.2）。

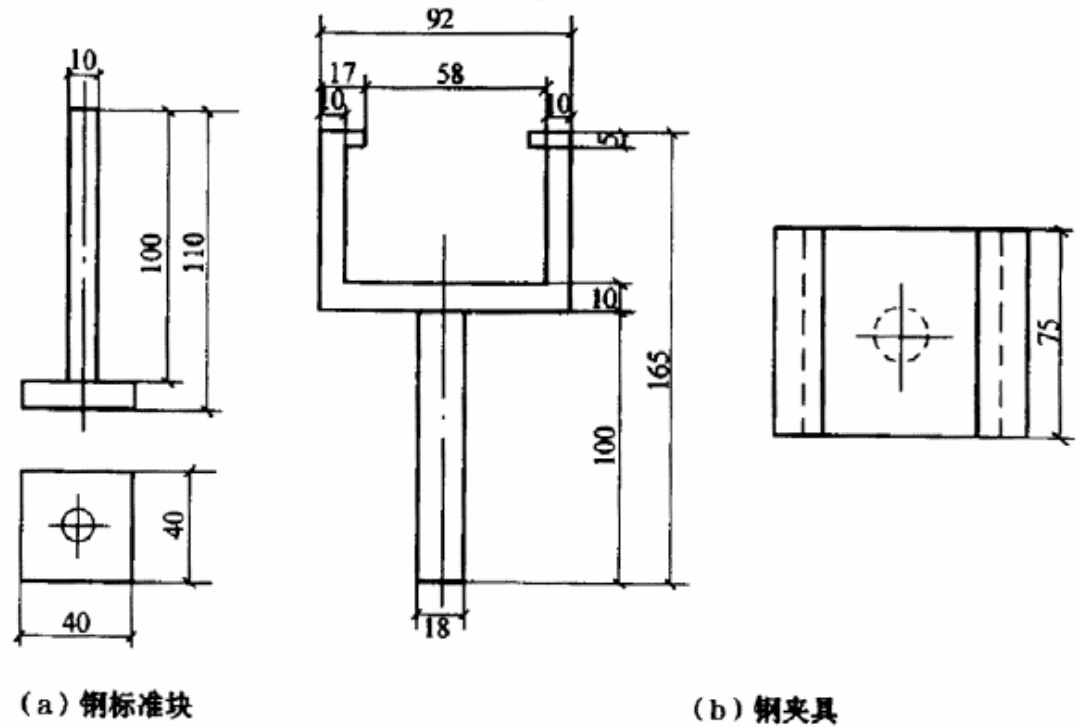


图 A.2.2 试验机具尺寸示意

A.2.3 混凝土试块。

试验所用混凝土试块的尺寸为70mm×70mm×40mm。预切缝深度取2~3mm。宽度1~2mm（图A.2.3）。

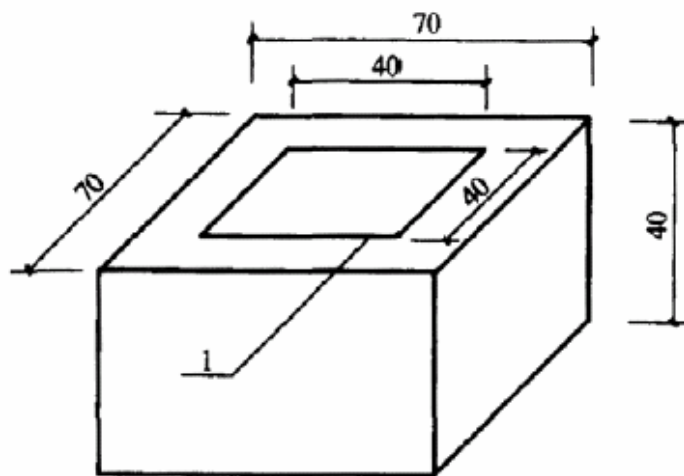
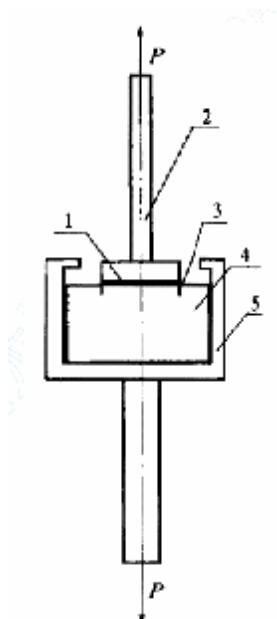


图 A. 2. 3 混凝土试块尺寸

1—预切缝

A.2.4 试样制备。

试样为钢标准块与混凝土试块的组合件。在混凝土试块的中央位置按照正常的施工工序粘贴尺寸为40mm×40mm的碳纤维片材，然后将钢标准块与混凝土试块粘结（图A.2.4）。



图A.2.4试样组成示意

1— 脂类粘结材料及碳纤维片材 2—钢标准块 3—预切缝
4—混凝土试块 5—钢夹具

A.3 试验条件

A.3.1 试验环境应保持在：温度 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相对湿度 60%～70%。

A.4 试验步骤

A.4.1 将制备好的试样放入拉力试验机的夹具中并对中。

A.4.2 以 1500～2000N/min 的速度进行加载，直至破坏。记录试样破坏时的荷载值并观察破坏形式。

A.5 试验结果

A.5.1 强度计算。

正拉粘结强度应按下式计算：

$$f = \frac{P}{A} \quad (\text{A.5.1})$$

式中 f ——正拉粘结强度, MPa;

P ——试样破坏时的荷载值, N;

A ——钢标准块的粘结面面积, mm^2 。

A.5.2 破坏形式。

1 混凝土破坏: 混凝土试块破坏, 以 A_f 表示。

2 层间破坏: 树脂与混凝土间复合涂层界面破坏, 以 B_f 表示。

3 碳纤维片材破坏: 碳纤维片材内部破坏, 以 C_f 表示。

4 粘结失效: 碳纤维片材与钢标准块之间破坏, 以 D_f 表示。

破坏形式为 A_f 、 B_f 时, 量测结果符合粘结强度试验要求。如出现两种或两种以上的破坏形式, 则应注明。破坏形式为 C_f 、 D_f 时, 量测结果应予剔除。

A.5.3 试验结果的表示。

每组被测试样应不少于 5 个。单个试样的 f 值与该组试样的算术平均值的误差不超过 $\pm 15\%$ 时为有效值。至少取 3 个有效值的算术平均值作为该组正拉粘结强度的试验结果。

试验结果用正拉粘结强度的试验结果和破坏形式共同表示, 如 3.5MPa, A_f 。

A.5.4 试验报告应包括下列内容:

- (1) 树脂的名称、牌号、批号和来源;
- (2) 制备试样的工艺条件;
- (3) 试样的编号和数量;
- (4) 试验时环境的温度、湿度;
- (5) 拉力试验机的型号、量程、加载速度;
- (6) 试样的破坏荷载、破坏形式、粘结强度及其平均误差;
- (7) 试验中出现的偏差和异常现象;
- (8) 试验日期、试验人员。



CECS 146:2003

中国工程建设标准化协会标准

碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程

**Technical specification for strengthening concrete structures with
carbon fiber reinforced polymer laminate**

条文说明

中国工程建设标准化协会标准

碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程

Technical specification for strengthening concrete structures with
carbon fiber reinforced polymer laminate

CECS 146:2003

条文说明

主编单位：国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心

副主编单位：四川省建筑科学研究院

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2003 年 5 月 1 日

2002 北京

目次

1	总则.....	4
3	材料.....	5
3.1	材料种类及一般要求.....	5
3.2	碳纤维片材.....	5
3.3	配套树脂类粘结材料.....	6
3.4	表面防护材料.....	7
4	设计与构造.....	7
4.1	设计基本原则与一般规定.....	7
4.2	一般构造要求.....	8
4.3	受弯加固.....	9
4.4	受剪加固.....	11
4.5	柱的抗震加固.....	11
5	施工规定.....	12
5.1	一般要求.....	12
5.3	表面处理.....	12
5.4	涂刷底层树脂.....	12
5.5	找平处理.....	12
5.6	粘贴碳纤维片材.....	12
6	检验与验收.....	13

1 总则

1.0.1 本条指出制定本规程的目的和要求，并提出了碳纤维片材加固修复混凝土结构必须遵循的原则。

碳纤维片材加固修复混凝土结构技术是一项新型的应用外粘高性能复合材料加固结构的技术，目前国内对碳纤维片材加固修复混凝土结构新技术的理论和试验研究成果已比较多，设计与施工水平正逐步提高，加固修复工程量也迅速增加。制定本规程，是为了在确保碳纤维片材加固工程质量的前提下，大力发展该项新技术，获得更好的经济效益和社会效益，并使该新技术在混凝土结构加固领域中的应用规范化。

1.0.2 本规程适用的范围是碳纤维片材加固修复房屋和一般构筑物的混凝土结构的设计、施工和验收。混凝土结构因设计失误、施工错误，材料质量不符合要求、结构荷载的增加、使用功能的改变和因遭受火灾、水灾、风灾及地震等灾害使结构和构件遭到损坏均可采用碳纤维片材加固修复新技术来进行加固处理。对于铁路工程、公路工程、港口工程和水利水电工程的混凝土结构用碳纤维片材进行加固也是可行的；同时，国内外研究和工程经验表明，对砌体结构，木结构也可以采用碳纤维片材进行加固，但应结合结构具体情况参照本规程的规定执行。

1.0.3 在执行本规程的同时，尚应配合使用和遵守现行国家标准，规范。如《混凝土结构设计规范》GB 50010 等。

1.0.4 本规程规定的结构长期使用温度不高于 60℃，是常温固化树脂类粘结材料的要求，同时也是因为一般混凝土结构使用温度是低于此温度。当采用与碳纤维片材相配套的高温固化树脂类粘结材料，且有可靠依据时，可不受此规定限制。在特殊环境(腐蚀，放射、高温等)下采用碳纤维片材进行混凝土结构加固时，尚应遵守相应的国家现行有关标准和规范的规定，采取必要的防护措施。这是指在碳纤维片材加固修复完成后，仍应按照国家现行有关(特殊环境的)标准和规范的相应规定进行防护处理。

1.0.5 碳纤维片材加固修复混凝土结构前，应进行结构检测鉴定或评估。我国已发布了《工业厂房可靠性鉴定标准》GBJ 144 和《民用建筑可靠性鉴定标准》GB 50292 等，通过检测鉴定评定结构及其构件的可靠性程度，为碳纤维片材加固修复混凝土结构设计和施工提供基本依据。4

1.0.6 由于碳纤维片材加固修复混凝土结构技术为一项新型结构加固技术，具有不同于其

它加固方法的特殊性，应由对碳纤维复合材料性质及加固设计有经验的专业设计人员进行设计，也应由熟悉该技术的专业施工队伍进行施工，以保证该技术的有效实施。如果由不了解碳纤维复合材料性质及其设计、施工特殊性的人员进行设计、施工，容易造成加固修复设计和施工的失误，导致该技术发展过程中出现倒退，影响该项新技术的健康发展。

3 材料

3.1 材料种类及一般要求

3.1.1 本条指出粘贴碳纤维片材加固方法所采用的材料种类，特别指出粘结材料应为与碳纤维片材相配套的产品，原则上应有试验资料证明粘结材料与配套碳纤维片材的粘结效果，这是为了避免因粘结材料与碳纤维片材不配套而造成加固效果降低或加固失效。

3.1.2 本条为加固修复用材料的一般要求，碳纤维片材和配套粘结材料各自产品的性能必须符合本条的规定才能作为混凝土结构加固修复用材料。使用不符合本条规定的产品进行结构加固修复会导致加固失效甚至造成严重事故。

3.1.3 目前在加固工程中大量使用的是单向碳纤维片材，故本规程列出了对单向碳纤维片材的性能指标。因为对各种加固修复用碳纤维片材的基本性能要求是一致的，因此对于双向或多向碳纤维片材的性能指标未予列出，可以参照单向碳纤维片材的指标采用，本规程中不再一一列举。

3.2 碳纤维片材

3.2.1 本规程仅针对碳纤维布和碳纤维板两种制品形式，统称为碳纤维片材。

碳纤维布的计算厚度为理论计算值，而不是碳纤维布的实测厚度，因为碳纤维布质地柔软，实测厚度离散性很大。碳纤维板的截面积指含树脂板材的实测截面面积。对碳纤维板产品应该说明纤维的体积含量。常用碳纤维布的单位面积碳纤维质量、截面面积及计算厚度见表 1

表 1 常用碳纤维布的单位面积质量，截面积及计算厚度

纤维单位面积质量 (g/m ²)	密度 (g/mm ²)	单位宽度的截面积 (mm ² /m)	计算厚度(mm)
200	1.8×10 ⁻³	111	0.111
300		167	0.167
450		250	0.250
600		333	0.333

3.2.2 碳纤维材料具有高强度、高弹性模量、重量轻及耐腐蚀性好等特点。目前，在混凝土结构加固中一般情况下使用高强度型碳纤维片材，其抗拉强度是普通钢筋的 10 倍左右，弹性模量略高于普通钢筋的弹性模量。另外，碳纤维没有类似钢筋的屈服点，在达到极限抗拉强度之前应力应变关系为线弹性，其应力应变关系见图 3.2.2 本规程的规定均以高强度型碳纤维片材为对象，当使用其它类型的碳纤维片材时，应有可靠依据。

3.2.4 试验研究和工程经验证明，单层碳纤维布的单位面积碳纤维质量越大，施工时浸渍树脂越不容易完全浸透，施工质量越难以保证。本规程所说碳纤维质量是指碳纤维的净质量，不包括固定碳纤维所用的纬线和预浸所用的树脂质量在内。

3.2.5 碳纤维板过厚或过宽，施工质量均较难以保证，所以在设计和施工时，都应尽量使用宽度较小的碳纤维板。材料研究表明碳纤维板中碳纤维体积含量在 60%～70%时性能最好，故本规程建议碳纤维板中纤维体积含量不宜低于 60%。

3.3 配套树脂类粘结材料

3.3.1 底层树脂的作用是增强混凝土表层，提高混凝土与找平材料或粘结树脂界面粘结强度。找平材料的作用是填充混凝土表面的空洞、裂隙等，使加固表面平整度符合规定要求，并与底层树脂及浸渍树脂具有可靠的粘结强度，形成粘结体系，当混凝土表面平整度满足要求时，可以尽量减少找平材料的用量。浸渍树脂是粘贴碳纤维布的主要粘结材料，其作用是使碳纤维布与混凝土得到充分的粘结，使其共同承受结构的作用。粘结树脂为粘贴碳纤维板的主要粘结材料。本条仍然强调必须使用与碳纤维片材相配套的粘结材料。

3.3.2 粘结材料的性质必须满足本规程的有关要求，因为粘结材料的性质与粘结质量和加固效果密切相关，粘结材料的性质达不到要求，会导致加固的效果降低，甚至加固失效。

3.3.3 粘结材料与混凝土的粘结强度是两者之间粘结性能的基本反映，可以用正拉粘结强度来表达，研究表明，采用正拉粘结强度为检测指标，是因为正拉粘结强度与其它受力状态下的粘结强度具有很好的相关关系，实测数据离散性小，且测试方便。按规定的的环境条件进行老化试验 2000h 后的正拉粘结强度降低不超过 10%时，认为降低不明显。

3.4 表面防护材料

3.4.1 表面防护的作用是保护加固修复结构的碳纤维片材及树脂免受外界不利环境的侵害，如紫外线照射、火灾等。表面防护材料的选择可以按国家现行标准和规范的规定执行。需要指出，碳纤维片材不能当作防护材料使用。当被加固混凝土结构本身有防护要求时，采用碳纤维片材加固后还应采取相应的防护措施，必须保证防护材料与漫溃树脂或粘结树脂粘结可靠，变形协调。

3.4.2 本条专门强调对于有防火要求的建筑物，必须按照要求选择防火材料并进行防护处理，以保证加固后建筑物能够达到有关防火规范规定的防火等级。

3.4.3 当被加固结构本身需要按使用环境条件采取规定的防护措施时，结构加固后同样应按照相应的国家标准和规范的规定执行。

4 设计与构造

4.1 设计基本原则与一般规定

4.1.1 碳纤维片材不能设计为承受压应力，但在反复荷载下碳纤维片材在经受一定的压应力作用后，仍可承受拉应力作用。

碳纤维片材应采用配套树脂类粘结材料粘贴于构件表面，在构件受力过程中应与构件保持变形协调，应采取措施保证不发生粘贴面的过早剥离而导致加固效果显著降低。本规程中的设计计算方法均是基于这一前提建立的。

4.1.2 到目前为止，碳纤维片材在混凝土结构受弯构件的受弯加固、受剪加固和柱的抗震加固中研究和应用最多，相应计算理论也较为成熟，故本规程列出这三种加固方法的有关设计计算方法和构造规定。受弯加固是指为提高受弯构件正截面承载力而进行的加固；受剪加固是指为提高受弯构件斜截面承载力而进行的加固；抗震加固是指为提高构件的抗震性能而进行的加固。在受弯加固时，应使碳纤维片材的纤维方向与受拉区的拉应力方向一致；在受剪加固时，应使碳纤维片材的纤维方向与混凝土中主拉应力方向一致，但为了施工方便，建议采用纤维方向与构件纵轴垂直的方法进行加固；抗震加固时，应使碳纤维布封闭缠绕在柱上，可以较好地提高抗震性能。除此以外，碳纤维片材也可沿构件轴向粘贴用于受拉构件的加固、沿环向粘贴用于轴心受压构件的加固。在受弯加固时，也可采用对碳纤维片材施加预应力的方法以提高加固效果。碳纤维片材也可用于剪力墙，以及壳体、筒仓，烟囱等特种结构的加固。这些加固方法虽有研究表明是有效的，但相应计算理论和方法的

研究尚不充分，应用也较少，故目前暂未列入本规程。实际应用中，当有可靠依据时，可采用这种加固方法。

4.1.3 本规程以房屋建筑和一般构筑物的钢筋混凝土的加固为主，主要按《建筑结构设计统一标准》以概率理论为基础的极限状态设计法确定有关加固计算方法，使其与结构设计规范协调。

试验研究表明，碳纤维片材加固混凝土结构构件，有多种破坏形态，除了与普通混凝土构件相同的以外，还有一些特殊的破坏形态，如碳纤维片材的剥离破坏等。构件达到破坏极限状态时，碳纤维片材的极限抗拉强度往往不能得到完全发挥，此时应以达到破坏极限状态时碳纤维片材所达到的应变值来确定其贡献。同时，由于碳纤维片材在最终拉断时表现为显著的脆性，因此即使对在构件破坏时碳纤维片材可达到其极限抗拉强度的情况，也应选择小于其极限拉应变的允许拉应变作为设计极限状态的标准，以保证有足够的可靠度。

4.1.4 本规程规定的产品性能是最低要求具体的规定可参见有关的产品标准。生产厂提供的产品性能必须满足规程的规定，方可在工程中的应用。

4.1.5 一般情况下，对结构(构件)的加固是局部的。加固后结构体系可能有所改变，因此加固设计中应进行验算，保证不发生脆性的破坏，例如在受弯加固后避免剪切破坏先于受弯破坏发生等。

4.1.6 研究证明，当加固前构件计算所受的初始弯距小于其受弯承载力的 20% 时，初始弯距的作用不大，即可以忽略二次受力的影响。

4.1.7 在实际工程中，某些结构的混凝土强度可能低于现行国家规范的最低强度级，如果结构混凝土强度过低，则与碳纤维片材的粘结强度较低，易产生脆性显著的剥离破坏，碳纤维片材也不能充分发挥作用，因此本条规定了被加固结构的混凝土强度的最低等级。而对于封闭粘贴碳纤维片材约束混凝土，当封闭碳纤维片材搭接构造满足本规程的规定时，约束混凝土的抗压强度可以得到提高，故被加固结构的混凝土强度等级最低可放宽至 C10。

4.2 一般构造要求

4.2.1 碳纤维片材沿其纤维方向弯折时会导致应力集中和纤维丝折断，影响其强度发挥。根据试验研究结果，当转角处的曲率半径不小于 20mm 时，可减缓应力集中，碳纤维片材强度基本不受影响。对于弹性模量较高的碳纤维片材，要求碳纤维片材强度不受影响时，转角处的曲率半径应该更大，但其曲率半径的大小与碳纤维片材的弹性模量高低有关，因缺少试验资料，本规程不作明确规定，待有试验资料以后加以修订补充。

4.2.2 试验研究表明，当碳纤维布的纤维单位质量不超过 $450\text{g} / \text{m}^2$ ，碳纤维布沿受力方向的搭接长度不小于 100mm 时，破坏不会发生在搭接位置。当单位面积碳纤维质量超过 $450\text{g} / \text{m}^2$ 时，尚应通过试验研究确定其搭接长度。碳纤维布的搭接位置相互错开是为了施工方便，有资料表明，在施工质量有保证时，碳纤维布的断裂或破坏一般不会发生在搭接处。

4.2.3 附加锚固措施可采用钢板或角钢等粘贴在碳纤维片材外，再用锚栓锚固于混凝土中，锚栓的数量及布置方式应根据锚固区受力大小确定。一般钢板压条厚度不宜小于 3mm，锚栓规格不宜小于 M6。但设计时应考虑因采取附加锚固措施而造成的碳纤维片材损伤对加固效果的影响。

4.3 受弯加固

4.3.1 国内外的试验研究表明，在受弯构件受拉面粘贴碳纤维片材进行受弯加固时，截面

应变分布仍符合平截面假定。为防止碳纤维片材最终产生脆性拉断破坏，所采用允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ 一般取其设计极限拉应变 ϵ_{cfu} 的 $2/3$ ，同时根据《混凝土结构设计规范》GB50010对构件塑性变形的控制条件， $[\epsilon_{cf}]$ 且不应大于0.01。

碳纤维片材从受载直至拉断，表现为线弹性行为。

4.3.2 粘贴碳纤维片材进行受弯加固时构件的破坏形态主要有以下几种：

1 受拉钢筋先达到屈服，然后受压区混凝土压坏，此时碳纤维片材未达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ ；

2 受拉钢筋先达到屈服，然后碳纤维片材超过其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ ，并达到极限拉应变而拉断，而此时受压区混凝土尚未压坏；

3 加固量过大，在受拉钢筋达到屈服前受压区混凝土压坏；

4 在达到正截面极限承载力前，碳纤维片材与混凝土产生剥离破坏。

对受弯加固按前两种破坏形态进行设计计算。对于第3种破坏形态可通过控制加固量上限来避免发生。本规程第4.3.5条第1款规定的受压区高度 x 不宜大于 $0.8\xi_b h_0$ ，即可控制不产生第3种破坏形态。第4种破坏形态属于脆性破坏，此时碳纤维片材中的应力很小，必须避免，一般通过构造或锚固措施予以保证，本规程第4.3.1条第4款即为本条计算公式的前提条件，构造按本规程第4.3.8条和第4.3.9条的规定执行。

本条第1款为第1种破坏形态的受弯承载力计算公式。公式(4.3.2-1)是对受拉钢筋面积形心取力矩平衡方程得到的，公式(4.3.2-2)为力平衡公式，公式(4.3.2-3)是按平截面假定得到的。

本条第2款、第3款为第2种破坏形态的受弯承载力近似计算公式，此时受压区高度很小。第2款中偏于安全地对受压区边缘混凝土达到极限压应变和碳纤维片材达到允许拉应变的界限状态时的受压区合力作用点取矩，并取碳纤维片材的应变为允许拉应变，即得公式(4.3.2-4)，第3款中对受压钢筋合力作用点取矩，并认为受压钢筋合力作用点与受压区混凝土合力作用点重合，即得公式(4.3.2-5)。

由于被加固混凝土结构的强度等级一般较低，故本规程中受弯承载力计算的有关公式中的等效矩形应力图形系数未考虑高强混凝土的影响。

4.3.4 根据钢筋混凝土受弯构件正常使用阶段受压区边缘混凝土和受拉钢筋的应变计算公式，按平截面假定确定加固前在初始弯矩作用下的混凝土拉应变 ϵ_i 。

根据计算分析和试验结果，当初始弯矩 M_i 小于末加固截面受弯承载力的20%时，二次受

力对受弯极限承载力的影响很小，可以不考虑二次受力的影响。

4.3.5 限制受压区高度 x 不大于 $0.8\xi_b h_0$ ，是为了避免因加固量过大导致超筋性质的脆性破坏。

因为没有成熟的研究成果，本规程未给出加固后正常使用阶段的裂缝和变形验算方法。为了控制加固后构件的裂缝宽度和变形，以及考虑到对碳纤维片材加固应用的经验尚有不足之处，故对加固后受弯承载力的提高程度进行了限制，并对正常使用阶段的钢筋应力进行了控制。

4.3.6 在梁侧面受拉区粘贴碳纤维片材进行受弯加固时，仍可按照平截面假定来确定碳纤维片材应变分布，但碳纤维片材距受拉区边缘越远，应变越小，碳纤维片材越不能充分发挥作用，因此限制碳纤维片材在梁侧面受拉区粘贴高度，同时乘以折减系数考虑应变分布不均匀的影响来简化计算。

4.3.7 本条是考虑受弯加固可能引起构件受力状态的改变而发生破坏形态的转移，所以要求进行受弯加固时尚应验算构件的受剪承载力。

4.3.8 碳纤维片材与混凝土之间粘结强度的取值是根据国内试验研究结果和经验并参照国外有关设计指南规定给出的，其中已经考虑了施工现场与实验室的施工质量差别、粘结界面的拉应力和剪应力共同作用等因素的影响。由于试验数据还不足，且碳纤维板与混凝土的粘结强度还低于碳纤维布与混凝土的粘结强度，因此规程中给出的粘结强度值是偏于保守的，且暂时没有考虑粘结强度与混凝土强度等级的关系，并建议设计中将碳纤维片材延伸至支座边缘。

4.3.9 构造规定系根据试验研究结果和工程经验给出的。

4.3.10 在对负弯矩区进行加固时，由于靠近梁肋处粘贴的碳纤维片材可以较充分地发挥作用，而远离梁肋的碳纤维片材作用较小，故限制了碳纤维的粘贴范围。

4.3.12 由于碳纤维片材在柱端锚固困难，故通常不采用碳纤维片材对柱端进行正截面承载力加固。当被加固位置的碳纤维片材有可靠锚固时，加固后的承载力计算可按截面应变符合平截面假定，参照本规程第 4.3.2 条的方法进行。

4.4 受剪加固

4.4.1、4.4.2 碳纤维片材的受剪承载力是根据加固后构件达到最大受剪承载力时碳纤维片材的应变发挥程度确定的。公式(4.4.1-3)和公(4.4.2-3)是根据国内外的试验结果分析,并参照美国 ACI 的有关设计指南给出的。对于钢筋混凝土柱,受剪加固应采取封闭式粘贴,此时, j 取 1,如不能封闭粘贴,不宜采用碳纤维片材加固。

4.4.3 本章受剪计算公式均是按碳纤维片材纤维方向与构件轴向垂直的情况给出的。可采用其它粘贴方向,但相应受剪计算公式应有可靠依据。

U 形粘贴和侧面粘贴易产生剥离破坏,影响碳纤维片材加固作用的发挥,故应优先采用封闭粘贴形式。当采用 U 形粘贴和侧面粘贴时,宜按本条第 4 款的要求设置水平压条,以增加粘贴面积,提高抗剥离承载力。试验表明,对于 U 形粘贴,当采取可靠的机械锚固措施时,与封闭粘贴具有同样效果。

4.5 柱的抗震加固

4.5.1 公式(4.5.1)的总折算体积配箍率是根据我国试验结果分析给出的。采用碳纤维片材缠绕加固混凝土柱可以约束混凝土的变形,从而提高混凝土的抗压强度,降低轴压比,但这方面的研究目前还不充分,当有可靠依据时,方可考虑其作用。

4.5.2 柱的抗震加固必须采用封闭式粘贴并有可靠连接,搭接长度比受弯加固、受剪加固时的搭接长度要大一些,以保证加固效果。

5 施工规定

5.1 一般要求

5.1.2 施工现场的环境温度必须符合粘结材料的使用温度才能保证粘贴质量,如果不能满足,必须采取措施使其满足要求后再进行粘贴。

5.1.4 当环境湿度不超过 70%时,可以不考虑环境湿度对树脂固化的不利影响。如果采用适用于潮湿环境的粘结材料时可不受此限制。

5.1.6 本条为配制底层树脂、找平材料、浸渍树脂和粘结树脂时均应满足的一般要求。施

工时应根据施工进度和环境温度控制每次的拌合量，以保证在粘结材料规定的使用时间内有效地使用拌合好的粘结材料。

5.3 表面处理

5.3.1 试验研究和工程经验证明，只有浸渍树脂充分浸透在碳纤维布中才能保证碳纤维布的粘贴质量，否则对粘贴质量有很不利的影响。用专用滚筒滚压碳纤维布时，可以向一个方向，也可以从中间向两个方向滚动，但不允许来回反复滚动，以免损伤碳纤维，影响粘结质量。

5.4 涂刷底层树脂

5.4.2 研究表明，在底层树脂表面指触干燥到完全固化期间进行下一工序施工，粘结效果最好；当有试验依据时，也可以在底层树脂完全固化后进行下一步工序。树脂的指触干燥是指树脂刚达到凝胶的状态，即在施工现场通过手指触摸树脂表面有凝胶的感觉，但不会粘附树脂的状态。

5.5 找平处理

5.5.4 研究表明，在找平材料表面指触干燥到完全固化期间进行一步工序施工，粘结效果最好；当有试验依据时，也可以在找平材料完全固化后进行下一步工序。

5.6 粘贴碳纤维片材

5.6.1 试验研究和工程经验表明，只有浸渍树脂充分浸透在碳纤维布中才能保证其粘贴质量，否则有很不利的影响。用专用滚筒滚压纤维布时，可以向一个方向，也可以从中间向两个方向滚动，但不许来回反复滚动以免损伤碳纤维，影响粘结质量。研究表明，从浸渍树脂表面上指触干燥到完全固化期间进行下一步工序的施工，粘结效果最好。当有试验依据时，也可以在浸渍树脂完全固化后进行一层碳纤维布的粘贴。

6 检验与验收

6.0.1 施工前应对材料性能进行检验，以保证工程质量。

6.0.2 本条中隐蔽工程指表面处理、涂刷底层树脂和找平处理三道工序。前一工序检查合格后方可进行下一道工序的施工，以保证工程的质量。

6.0.4 本条规定的检查方法，是经实践检验过的有效、简便方法，适用于任何条件下的碳纤维片材与混凝土粘结质量的检查。

6.0.5 对于重要或大型加固工程，除了按本规程第 6.0.4 条的方法进行常规检查外，还应按附录 B 的规定采用碳纤维片材粘结强度专用检测仪对施工质量进行进一步的检验，确保工程质量。

6.0.6 对于重要或大型加固工程，或使用材料品种、数量较多的工程，还应对碳纤维片材和粘结材料进行现场抽样并送检。一般对碳纤维片材需检测其抗拉强度，对粘结材料需检测其粘结强度。