



T/CECS 146-2022

中国工程建设标准化协会标准

碳纤维增强复合材料加固 混凝土结构技术规程

Technical specification for strengthening concrete structures
with carbon fiber reinforced polymer



中国建筑工业出版社

中国工程建设标准化协会标准

碳纤维增强复合材料加固
混凝土结构技术规程

Technical specification for strengthening concrete structures
with carbon fiber reinforced polymer

T/CECS 146 - 2022

主编单位：中冶建筑研究总院有限公司

批准部门：中国工程建设标准化协会

施行日期：2 0 2 2 年 7 月 1 日

中国建筑工业出版社

2022 北 京

中国工程建设标准化协会标准

碳纤维增强复合材料加固

混凝土结构技术规程

Technical specification for strengthening concrete structures
with carbon fiber reinforced polymer

T/CECS 146 - 2022

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路9号）

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本：850毫米×1168毫米 1/32 印张：5 $\frac{1}{4}$ 字数：157千字

2022年6月第一版 2022年6月第一次印刷

印数：1—2000册

定价：**82.00元**

统一书号：15112·39184

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社图书出版中心退换

（邮政编码 100037）

本社网址：<http://www.cabp.com.cn>

网上书店：<http://www.china-building.com.cn>

中国工程建设标准化协会公告

第 1113 号

关于发布《碳纤维增强复合材料加固 混凝土结构技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2017 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2017〕031 号）的要求，由中冶建筑研究总院有限公司等单位编制的《碳纤维增强复合材料加固混凝土结构技术规程》，经本协会建筑物鉴定与加固专业委员会组织审查，现批准发布，编号为 T/CECS 146-2022，自 2022 年 7 月 1 日起施行。原《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》CECS 146：2003 同时废止。

中国工程建设标准化协会

2022 年 2 月 25 日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2017 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2017〕031 号）的要求，编制组经过深入调查研究，认真总结工程经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，修订本规程。

本规程共分为 8 章及 8 个附录，主要技术内容包括：总则、术语和符号、材料、碳纤维片材加固设计、碳纤维网格加固设计、预应力碳纤维板抗弯加固设计、施工、检验与验收等。

本规程是对《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》CECS 146：2003 的修订。

本次修订内容主要包括：

1. 将加固类型由“碳纤维片材加固”扩展为“碳纤维增强复合材料加固”；
2. 补充了混凝土结构加固用碳纤维增强复合材料的种类及一般要求；
3. 补充了碳纤维片材加固混凝土结构的应用规定，增加了耐火与防护设计的规定；
4. 增加了嵌入式碳纤维板条加固混凝土结构的应用规定；
5. 增加了碳纤维网格加固混凝土结构的应用规定；
6. 增加了预应力碳纤维板加固混凝土结构的应用规定；
7. 补充了施工、检验与验收的相关规定。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑物鉴定与加固专业委员会归口管理，由中冶建筑研究总院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈至中冶建筑研究总院有限公司（地址：北京市海淀区西土城路 33 号，《碳纤维增强复合材料加固混凝土结构技术规程》管理组，邮政编码：100088）。

主 编 单 位：中冶建筑研究总院有限公司

参 编 单 位：北京科技大学

清华大学

香港理工大学

同济大学

哈尔滨工业大学

东南大学

四川华西集团有限公司

清华大学建筑设计研究院有限公司

中国电子工程设计院有限公司

中国京冶工程技术有限公司

中国建筑科学研究院有限公司

江苏省建筑科学研究院有限公司

四川省建筑科学研究院有限公司

华南理工大学

信宏实业有限公司

南京海拓复合材料有限责任公司

主要起草人：岳清瑞 李 荣 滕锦光 冯 鹏 陈小兵
罗苓隆 咸贵军 陆新征 刘彦生 薛伟辰
张继文 杨勇新 俞伟根 胡孔国 陈建飞
王震宇 丁 一 王 彬 朱 虹 陈 瑜
陈光明 张世顺 陈大奇 陈 杰 毛星明

林 观 刘宗全 刘晓刚 杨家琦 彭 飞
主要审查人：张晋勋 霍文营 马建勋 狄 谨 方 志
张林文 甄 伟

目 次

1	总则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(3)
3	材料	(8)
3.1	一般规定	(8)
3.2	碳纤维	(8)
3.3	碳纤维布及碳纤维复材	(8)
3.4	粘贴用树脂材料	(11)
3.5	表面防护材料	(13)
4	碳纤维片材加固设计	(14)
4.1	一般规定	(14)
4.2	抗弯加固	(15)
4.3	抗剪加固	(27)
4.4	受压构件加固	(32)
4.5	柱提高延性的抗震加固	(41)
4.6	嵌入式非预应力碳纤维板条抗弯加固	(43)
4.7	耐火与防护设计	(46)
5	碳纤维网格加固设计	(49)
5.1	一般规定	(49)
5.2	抗弯加固	(49)
5.3	抗剪加固	(53)
5.4	构造措施	(54)
6	预应力碳纤维板抗弯加固设计	(56)
6.1	一般规定	(56)
6.2	抗弯加固	(57)

6.3 锚固设计·····	(63)
7 施工 ·····	(65)
7.1 一般规定·····	(65)
7.2 粘贴碳纤维片材加固·····	(66)
7.3 嵌入式碳纤维板条加固·····	(67)
7.4 碳纤维网格加固·····	(69)
7.5 预应力碳纤维板加固·····	(70)
7.6 耐火与防护涂装·····	(71)
8 检验与验收 ·····	(72)
8.1 一般规定·····	(72)
8.2 粘贴碳纤维片材加固·····	(73)
8.3 嵌入式碳纤维板条加固·····	(74)
8.4 碳纤维网格加固·····	(76)
8.5 预应力碳纤维板加固·····	(77)
8.6 耐火与防护涂装·····	(78)
附录 A 碳纤维网格拉伸性能试验·····	(80)
附录 B 粘结树脂粘合碳纤维片材与混凝土的正拉粘结 强度测定 ·····	(83)
附录 C 碳纤维布层间剪切强度试样制备 ·····	(88)
附录 D 碳纤维复材与树脂材料的玻璃化转变温度测定 ···	(89)
附录 E 碳纤维布约束混凝土标准圆柱压缩试验 ·····	(91)
附录 F 耐火设计计算·····	(93)
附录 G 碳纤维网格锚固性能试验·····	(103)
附录 H 粘贴碳纤维片材加固混凝土结构施工质量 现场检测 ·····	(106)
用词说明 ·····	(109)
引用标准名录 ·····	(110)
附：条文说明 ·····	(111)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(3)
3	Materials	(8)
3.1	General requirements	(8)
3.2	Carbon fibers	(8)
3.3	Carbon fiber sheets and carbon fiber reinforced polymer composites	(8)
3.4	Bonding resins	(11)
3.5	Protective coatings	(13)
4	Externally bonded CFRP laminates for strengthening	(14)
4.1	General requirements	(14)
4.2	Flexural strengthening	(15)
4.3	Shear strengthening	(27)
4.4	Compressive strengthening	(32)
4.5	Seismic retrofit for improving ductility of columns	(41)
4.6	Flexural strengthening with non-prestressed near-surface mounted CFRP strips	(43)
4.7	Fire resistance design	(46)
5	CFRP grid systems for strengthening	(49)
5.1	General requirements	(49)
5.2	Flexural strengthening	(49)
5.3	Shear strengthening	(53)
5.4	Detailing	(54)

6	Prestressed CFRP plates for strengthening	(56)
6.1	General requirements	(56)
6.2	Flexural strengthening	(57)
6.3	Anchorage design	(63)
7	Construction requirements	(65)
7.1	General requirements	(65)
7.2	Externally bonded CFRP laminates for strengthening	(66)
7.3	Near-surface mounted CFRP strips for strengthening	(67)
7.4	CFRP grid systems for strengthening	(69)
7.5	Prestressed CFRP plates for strengthening	(70)
7.6	Protective coatings	(71)
8	Inspection and acceptance	(72)
8.1	General requirements	(72)
8.2	Externally bonded CFRP laminates for strengthening	(73)
8.3	Near-surface mounted CFRP strips for strengthening	(74)
8.4	CFRP grid systems for strengthening	(76)
8.5	Prestressed CFRP plates for strengthening	(77)
8.6	Protective coatings	(78)
Appendix A	Test method for tensile properties of CFRP grids	(80)
Appendix B	Test method for pull-off strength of adhesive resin between CFRP laminate and concrete	(83)
Appendix C	Preparation method for wet-layup CFRP samples for inter-laminar shear strength	(88)
Appendix D	Test method for glass transition temperature of CFRP and resin materials	(89)
Appendix E	Compression test method for CFRP-confined concrete cylinders	(91)
Appendix F	Fire endurance design	(93)

Appendix G	Test method for determination of development length of CFRP grid	(103)
Appendix H	In-situ quality assessment of externally bonded CFRP laminates for strengthening concrete structures	(106)
Explanation of wording		(109)
List of quoted standards		(110)
Addition: Explanation of provisions		(111)

1 总 则

1.0.1 为统一、规范碳纤维增强复合材料在混凝土结构加固工程中的技术要求，提高工程质量，做到技术先进、安全适用、经济合理，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于房屋建筑和构筑物中采用碳纤维增强复合材料对混凝土结构加固的设计、施工及验收。

1.0.3 采用碳纤维增强复合材料加固混凝土结构的设计、施工及验收，除应符合本规程的规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 碳纤维增强复合材料 carbon fiber reinforced polymer

由连续碳纤维或碳纤维织物为增强相，聚合物树脂为基体相，两相材料通过复合工艺组合而成的聚合物基复合材料，简称碳纤维复材（CFRP）。

2.1.2 碳纤维片材 carbon fiber reinforced polymer laminate

碳纤维布和碳纤维板的总称。

2.1.3 碳纤维布 carbon fiber sheet

连续碳纤维单向或多向排列，未经树脂浸渍的布状制品，简称 CFS。

2.1.4 碳纤维复材板 carbon fiber reinforced polymer plate

连续碳纤维单向或多向排列，并经树脂浸渍固化的板状制品，简称碳纤维板（CFP）。

2.1.5 底层树脂 primer

用于基底处理的树脂。

2.1.6 找平材料 putty fillers

用于对加固构件表面进行找平处理的材料。

2.1.7 浸渍树脂 saturating resin

用于粘贴并浸透碳纤维布的树脂。

2.1.8 粘结树脂 adhesives

用于粘贴碳纤维复材板的树脂。

2.1.9 碳纤维复材筋 carbon fiber reinforced polymer bar

由单向连续碳纤维拉挤成型并经树脂浸渍固化的棒状制品，简称碳纤维筋（CFB）。

2.1.10 碳纤维复材网格 carbon fiber reinforced polymer grid
由双向连续碳纤维经树脂浸渍固化的网格状制品，简称碳纤维网格（CFG）。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能

E_c —— 混凝土的弹性模量；
 E_1 —— 碳纤维布约束混凝土应力-应变曲线的第一段初始斜率；
 E_2 —— 碳纤维布约束混凝土应力-应变曲线的第二段斜率；
 E_f —— 碳纤维复材弹性模量；
 E_s —— 受拉钢筋的弹性模量；
 f_{fd} —— 碳纤维复材抗拉强度设计值；
 f_{fk} —— 碳纤维复材抗拉强度标准值；
 f_c —— 混凝土轴心抗压强度设计值；
 f_{cc} —— 碳纤维布约束混凝土轴心抗压强度设计值；
 f_y 、 f'_y —— 受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值；
 ϵ_{cu} —— 混凝土极限压应变；
 ϵ_{ru} —— 约束混凝土柱中碳纤维布环向极限应变设计值；
 $\epsilon_{ru,k}$ —— 约束混凝土柱中碳纤维布环向极限应变标准值；
 $\epsilon_{fe,ml}$ —— 受压边缘混凝土达到极限压应变时碳纤维片材的有效拉应变；
 $\epsilon_{fe,m2}$ —— 碳纤维片材与混凝土界面产生剥离破坏时碳纤维片材的有效拉应变；
 ϵ_{fp0} —— 预应力碳纤维板扣除有关预应力损失后，在受拉边缘混凝土应力等于零时的应变值；
 ϵ_i —— 截面受拉边缘混凝土的初始应变；
 τ_{ave} —— 碳纤维布搭接平均剪切强度；
 τ_b —— 碳纤维片材与混凝土的粘结强度设计值。

2 用于裂缝修复的碳纤维片材应粘贴于受弯构件的受拉面或侧面,纤维方向宜与裂缝方向垂直。

4.2.3 粘贴碳纤维片材抗弯加固设计应符合下列规定:

1 加固后应避免加固构件受剪破坏先于受弯破坏发生。

2 当未加固钢筋混凝土梁的受压区高度大于界限受压区高度 ($\xi_b h_0$) 的 80% 时,不宜采用碳纤维片材进行抗弯加固。 ξ_b 应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算。

4.2.4 矩形或 T 形截面受弯构件,对受拉面和梁侧面粘贴碳纤维片材进行抗弯加固时,应按下列公式计算正截面受弯承载力:

1 当混凝土受压区高度 x 小于 $0.8\xi_b h_0$, 且大于 h'_f 时 (图 4.2.4-1), 应按下列公式验算:

$$M \leq \omega f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \omega f_c (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a') + \sigma_{f,md} A_f (h_{fe} - h_0) \quad (4.2.4-1)$$

$$\omega f_c b x + \omega f_c (b'_f - b) h'_f = f_y A_s - f'_y A'_s + \sigma_{f,md} A_f \quad (4.2.4-2)$$

式中: M ——包含初始弯矩的总弯矩设计值 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);

b ——矩形截面宽度或 T 形截面腹板的宽度 (mm);

h_0 ——截面的有效高度 (mm), 即受拉钢筋面积重心至受压边缘的距离;

h_{fe} ——受拉碳纤维片材的面积重心至受压边缘的有效高度 (mm), 当在构件受拉面粘贴碳纤维片材时, 可取 h_{fe} 等于截面高度 h ;

b'_f ——T 形截面受压翼缘宽度 (mm);

h'_f ——T 形截面受压翼缘高度 (mm);

x ——混凝土受压区等效矩形应力图高度 (mm);

a' ——受压钢筋截面重心至混凝土受压区边缘的距离 (mm);

A_s 、 A'_s ——受拉钢筋、受压钢筋截面面积 (mm^2);

A_f ——受拉碳纤维片材的截面面积 (mm^2); 对于在受拉区侧面粘贴加固, 仅计入距受拉边缘 $1/4$ 梁高范围内粘贴的碳纤维片材, 且应将侧面碳纤维片材的截面面积乘以折减系数 $(1-0.5h_f/h)$, 其中 h_f 为侧面 $1/4$ 梁高范围内碳纤维片材的粘贴高度;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm^2);

f_y 、 f'_y ——受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值 (N/mm^2);

$\sigma_{f,md}$ ——达到受弯承载力极限状态时, 受拉碳纤维片材的拉应力设计值 (N/mm^2);

ω ——受压区混凝土等效应力图形的折减系数, 混凝土强度等级不大于 C50 时, 还应按照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中的矩形应力图形系数进行调整。

2 当混凝土受压区高度 x 小于或等于 h'_f , 且大于或等于 $2a'$ 时 (图 4.2.4-2), 应按下列公式验算:

$$M \leq \omega f_c b'_f x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a') + \sigma_{f,md} A_f (h_{fe} - h_0) \quad (4.2.4-3)$$

$$\omega f_c b'_f x = f_y A_s - f'_y A'_s + \sigma_{f,md} A_f \quad (4.2.4-4)$$

3 当混凝土受压区高度 x 小于 $2a'$ 时, 应符合下式规定:

$$M \leq f_y A_s (h_0 - a') + \sigma_{f,md} A_f (h_{fe} - a') \quad (4.2.4-5)$$

4 达到受弯承载力极限状态时, 受拉碳纤维片材的拉应力设计值应按下列公式计算:

$$\sigma_{f,md} = E_f \epsilon_{f,md} \quad (4.2.4-6)$$

$$\epsilon_{f,md} = \min \left\{ \frac{f_{fd}}{E_f}, \epsilon_{fe,m1}, \epsilon_{fe,m2} \right\} \quad (4.2.4-7)$$

式中： $\epsilon_{f,md}$ ——达到受弯承载力极限状态时，受拉碳纤维片材的拉应变设计值；

f_{fd} ——碳纤维片材的抗拉强度设计值（N/mm²）；

$\epsilon_{fe,m1}$ ——受压边缘混凝土达到极限压应变时碳纤维片材的有效拉应变，按本规程第 4.2.5 条计算；

$\epsilon_{fe,m2}$ ——碳纤维片材与混凝土界面产生剥离破坏时碳纤维片材的有效拉应变，按本规程第 4.2.6 条计算，且不宜小于 $0.5\epsilon_{fe,m1}$ ；

E_f ——碳纤维片材的弹性模量（MPa）。

5 当 $E_f\epsilon_{f,md} < f_{fd}$ 时，受压区混凝土等效应力图形的折减系数（ ω ）应按下式计算：

$$\omega = 0.5 + 0.5 \frac{\epsilon_{f,md}}{\epsilon_{fe,m1}} \quad (4.2.4-8)$$

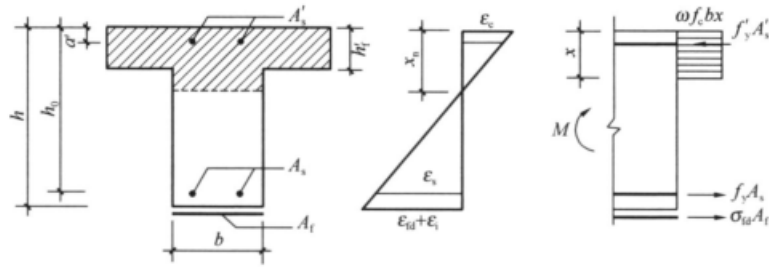


图 4.2.4-1 $x > h'_f$ 时正截面受弯承载力计算截面变形和应力

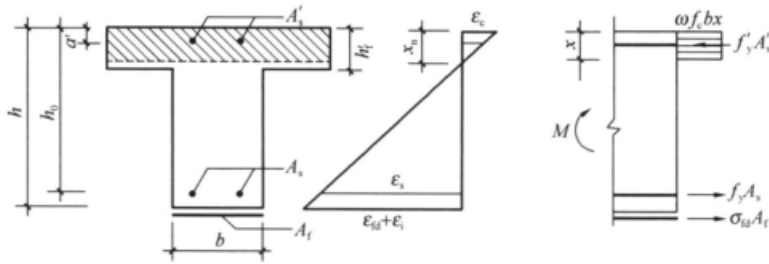


图 4.2.4-2 $2a' < x < h'_f$ 时正截面受弯承载力计算截面应变和应力

4.2.5 受压边缘混凝土达到极限压应变时，碳纤维片材的有效拉应变（ $\epsilon_{fe,ml}$ ）的计算应符合下列规定：

1 当混凝土受压区高度 x 大于受压翼缘高度 h'_f 时，应按下列公式计算：

$$f_c[bx + (b'_f - b)h'_f] = f_y A_s - f'_y A'_s + E_f \epsilon_{fe,ml} A_f \quad (4.2.5-1)$$

$$x = \frac{0.8\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fe,ml} + \epsilon_i} h \quad (4.2.5-2)$$

式中： x ——混凝土受压区等效矩形应力图高度（mm）；

h'_f ——受压翼缘高度（mm）；

ϵ_i ——计入二次受力影响时，加固前受弯构件在初始弯矩 M_i 作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变，按本规程第 4.2.7 条计算；当忽略二次受力影响时，取 ϵ_i 等于 0；

ϵ_{cu} ——混凝土极限压应变，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定确定，对于不大于 C50 级的混凝土，取 0.0033。

2 当混凝土受压区高度 x 小于受压翼缘高度 h'_f 时，应按下列公式计算：

$$f_c b'_f x = f_y A_s - f'_y A'_s + E_f \epsilon_{fe,ml} A_f \quad (4.2.5-3)$$

4.2.6 粘贴碳纤维片材进行抗弯加固时，受弯剥离时的有效拉应变（ $\epsilon_{fe,m2}$ ）应符合下列公式的规定，且不宜小于受压边缘混凝土达到极限压应变时碳纤维片材的有效拉应变（ $\epsilon_{fe,ml}$ ）的 50%：

$$\epsilon_{fe,m2} = \frac{(1.1/\sqrt{E_f t_f} - 0.2/L_d)\beta_w f_t}{\gamma_{ei}} \quad (4.2.6-1)$$

$$\beta_w = \sqrt{(2.25 - b_{fl}/b_c)/(1.25 + b_{fl}/b_c)} \quad (4.2.6-2)$$

$$L_d \geq L_f + 200 \quad (4.2.6-3)$$

式中： $\varepsilon_{fe,m2}$ ——碳纤维片材与混凝土界面产生剥离破坏时碳纤维片材的有效拉应变；

E_f ——碳纤维片材的弹性模量（MPa）；

t_f ——碳纤维片材的厚度（mm）；

L_d ——碳纤维片材从其充分利用截面到截断位置的延伸长度（mm）（图 4.2.6）；

L_f ——碳纤维片材抗弯承载力充分利用截面到不需要碳纤维片材截面的距离；

β_w ——碳纤维片材宽度影响系数；

b_f ——碳纤维片材的宽度（mm）；

b_c ——混凝土梁底宽度（mm）；

f_t ——混凝土抗拉强度设计值（N/mm²）；

γ_{ei} ——碳纤维片材与混凝土界面的环境影响系数：室内环境取 1.0，一般室外环境取 1.2，海洋环境及侵蚀性环境取 1.4。

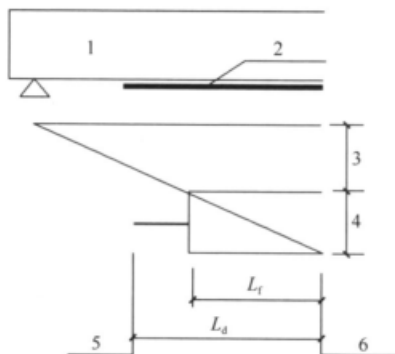


图 4.2.6 碳纤维片材的延伸长度示意图

1—梁；2—碳纤维片材；3—原受弯承载力；4—加固后提高的受弯承载力；

5—碳纤维片材截断截面；6—受弯承载力充分利用截面

4.2.7 加固前受弯构件承受的初始弯矩对受弯承载力的影响，应符合下列规定：

1 当加固前计算截面承担的初始弯矩 (M_i) 小于未加固截面受弯承载力的 20% 时, 可不计二次受力的影响。当加固前计算截面承担的初始弯矩 (M_i) 大于未加固截面受弯承载力的 50% 以上, 且无法卸载时, 不宜采取非预应力加固方法。

2 加固前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:

$$\epsilon_i = \frac{h}{h_0}(\epsilon_{ci} + \epsilon_{si}) - \epsilon_{ci} \quad (4.2.7-1)$$

$$\epsilon_{ci} = \frac{M_i}{\zeta \cdot E_c b h_0^2} \quad (4.2.7-2)$$

$$\epsilon_{si} = \frac{\psi}{\eta} \cdot \frac{M_i}{E_s A_s \cdot h_0} \quad (4.2.7-3)$$

$$\zeta = \frac{(1 + 3.5\gamma'_f)\alpha_E \rho}{0.2(1 + 3.5\gamma'_f) + 6\alpha_E \rho} \quad (4.2.7-4)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{si} \rho_{te}} \quad (4.2.7-5)$$

$$\sigma_{si} = \frac{M_i}{A_s \cdot \eta h_0} \quad (4.2.7-6)$$

$$\rho = A_s / b h_0 \quad (4.2.7-7)$$

$$A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f \quad (4.2.7-8)$$

$$\gamma'_f = \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0} \quad (4.2.7-9)$$

式中: M_i ——加固前受弯构件计算截面承受的初始弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);

ϵ_{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和拉应力 (N/mm^2);

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, 当小于 0.2 时, 取 0.2; 当大于 1.0 时, 取 1.0;

η ——内力臂系数, 取 0.87;

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；

f_{tk} ——混凝土抗拉强度标准值 (N/mm²)；

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

A_{te} ——有效受拉混凝土截面面积 (mm²)；

γ'_f ——受压翼缘加强系数；

b_f 、 h_f ——受拉翼缘的宽度和高度 (mm)；

b'_f 、 h'_f ——受压翼缘的宽度和高度 (mm)。

4.2.8 在荷载标准组合下，受拉钢筋的拉应力不应大于抗拉强度标准值，可按下列公式计算：

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87h_0(1+\beta_f)A_s} \quad (4.2.8-1)$$

$$\beta_f = 1.08 \left(1 + 1.15 \frac{a}{h_0} \right) \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \quad (4.2.8-2)$$

式中： σ_{sk} ——荷载标准组合下受拉钢筋的拉应力 (N/mm²)；

M_k ——正常使用阶段的标准荷载组合下的弯矩值 (kN·m)；

a ——受拉钢筋截面重心至混凝土受拉区边缘的距离 (mm)；

E_s 、 A_s ——受拉钢筋的弹性模量 (MPa) 和截面面积 (mm²)；

E_f 、 A_f ——碳纤维片材的弹性模量 (MPa) 和截面面积 (mm²)。

4.2.9 碳纤维片材对钢筋混凝土受弯构件进行裂缝修复应符合下列规定：

1 粘贴碳纤维片材前，应对原有裂缝进行封闭处理。

2 碳纤维片材的纤维方向宜与裂缝方向垂直。

3 当梁受拉区裂缝发展高度较大时，除应在被加固梁的最大受拉面粘贴碳纤维片材外，尚应在梁侧面粘贴碳纤维片材进行裂缝修复。

4.2.10 对受弯构件的受拉面粘贴碳纤维片材进行受弯加固时，应根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，按所处环境类别和结构类别确定相应的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值。受弯构件加固后按荷载标准组合并计入长期作用影响的最大裂缝宽度（ $w_{\max}$ ），可按下列公式计算：

$$w_{\max} = 2.1\psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \frac{1}{1+\beta} \quad (4.2.10-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk}\rho_{te} \left(1 + 0.415 \frac{A_f}{A_s + A_f} \right)} \quad (4.2.10-2)$$

$$\beta = \frac{A_f}{A_s + A_f} \left[\left(0.35 \frac{A_f}{A_s} + 0.05 \right) \frac{d_{eq}}{t_f} - 1 \right] \quad (4.2.10-3)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_f}{0.5bh + (b_f - b)h_f} \quad (4.2.10-4)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (4.2.10-5)$$

式中： σ_{sk} ——荷载标准组合下受拉钢筋的拉应力（N/mm²），按本规程公式（4.2.8-1）计算；

d_{eq} ——受拉区纵向钢筋的等效直径（mm）；

t_f ——碳纤维片材的厚度（mm），当碳纤维片材的弹性模量小于 210GPa 时， A_f 、 t_f 均应乘以 $E_f/210$ ，其中 E_f 为碳纤维片材的弹性模量（GPa）；

ψ ——钢筋应力不均匀系数；

β ——受拉面粘贴的碳纤维片材对裂缝间距的影响系数；

d_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径（mm）；

n_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的根数；

c ——梁受拉面到受拉纵筋边缘的距离（mm）；

v_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的相对粘结特性系数，按国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 - 2010 表 7.1.2-2 采用。

4.2.11 正常使用极限状态下碳纤维片材加固受弯构件的挠度应符合下列规定：

1 加固后受弯构件总挠度变形的计算值，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

2 加固后受弯构件的总挠度应包括加固前已产生的挠度和加固后增加荷载所产生的挠度。

3 加固后荷载增加所引起的挠度变形，应根据加固后的荷载增加情况，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算，计算中受拉钢筋的截面面积可用换算受拉钢筋截面面积代替，换算受拉钢筋截面面积可按下式计算：

$$A_{se} = A_s + \frac{E_f}{E_s} A_f \quad (4.2.11)$$

式中： A_{se} ——计算碳纤维片材加固混凝土受弯构件挠度变形时的换算受拉钢筋截面面积 (mm^2)；

A_s ——原受拉钢筋截面面积 (mm^2)；

A_f ——碳纤维片材截面面积 (mm^2)。

4.2.12 采用碳纤维片材进行受弯承载力加固时，应符合下列规定：

1 梁跨中受弯承载力加固（图 4.2.12-1）时，应符合下列规定：

1) 碳纤维片材宜延伸至支座边缘，并应在端部设置一道 45° 斜向或竖向的同种碳纤维布 U 形箍。 45° 斜向碳纤维布 U 形箍的宽度不应小于梁高的 80% 和受弯加固碳纤维布或碳纤维板宽度 1/2 的较大者，厚度不应小于受弯加固碳纤维布或碳纤维板厚度的 1/2；竖向碳纤

维布 U 形箍的宽度不应小于 1.2 倍梁高及受弯加固碳纤维布或碳纤维板宽度 1/2 的较大者，厚度不应小于受弯加固碳纤维布或碳纤维板厚度的 1/2。

- 2) 集中荷载或次梁两侧宜设置宽度不小于 100mm 的竖向同种碳纤维布构造 U 形箍，且纤维布 U 形箍宜伸至梁顶部或梁顶部的板底面，厚度不宜小于 0.33mm。
- 3) 在其他部位宜适当设置宽度不小于 100mm 的竖向同种碳纤维布构造 U 形箍，高度不宜小于 300mm 和梁侧高两者的较小值，净间距不宜大于梁高的 3 倍。

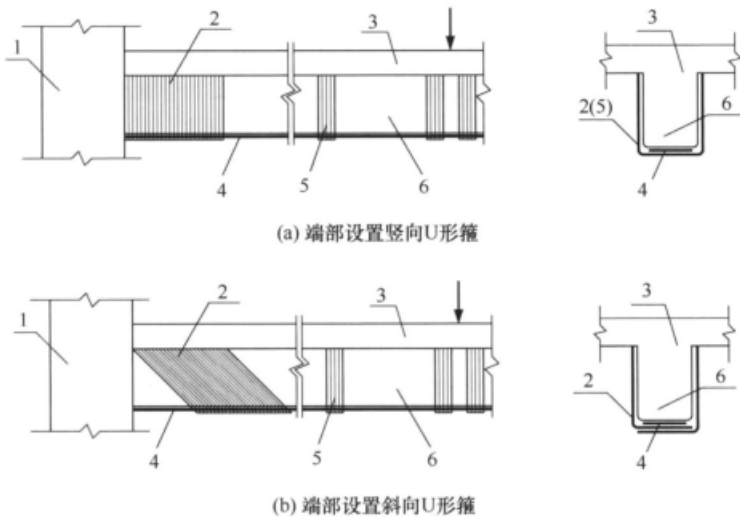


图 4.2.12-1 梁跨中受弯加固 U 形箍构造示意图

1—柱；2—端部 U 形箍；3—板；4—碳纤维片材；
5—其他部位构造 U 形箍；6—梁

2 受拉粘贴面宽度大于 500mm 的构件（图 4.2.12-2），受弯承载力加固碳纤维片材宜延伸至支座边缘，碳纤维片材端部应采取锚固措施，包括机械锚固或在碳纤维片材端部粘贴不小于 200mm 宽的横向纤维布压条。并应符合下列规定：

- 1) 采用碳纤维布加固时，横向碳纤维布压条的宽度和厚度应分别不小于受弯加固碳纤维布条带宽度和厚度的 $1/2$ 。
- 2) 采用碳纤维板加固时，横向碳纤维布压条的截面面积不宜小于碳纤维板截面面积的 $1/4$ 。

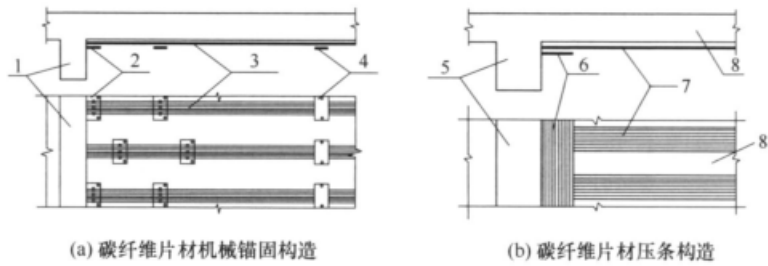


图 4.2.12-2 板受弯加固时碳纤维片材端部锚固措施示意图

1—梁；2—锚板；3—碳纤维片材；4—压板；
5—梁；6—压条；7—碳纤维片材；8—板

3 连续梁、板支座附近受弯加固的碳纤维片材长度应按支座边缘至截断位置的距离算，不应小于碳纤维片材抗弯承载力的充分利用截面到不需要碳纤维片材截面的距离加 200mm，且对板不应小于跨度的 $1/4$ ，对梁不应小于跨度的 $1/3$ 。

4 框架梁支座附近受弯加固的碳纤维片材应与支座锚固连接。当碳纤维片材需绕过柱时，宜在梁两侧 4 倍板厚范围内粘贴碳纤维片材（图 4.2.12-3）。

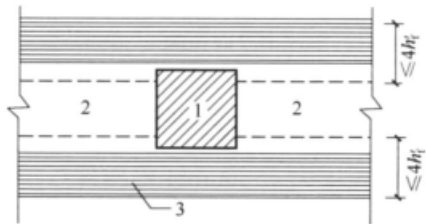


图 4.2.12-3 负弯矩区加固时梁侧有效粘贴范围示意图

1—柱；2—梁；3—板顶面碳纤维片材； h'_f —板厚

4.2.13 混凝土板抗弯加固的碳纤维片材宜采用多条密布方案，碳纤维片材条带之间的净间距不应大于受力钢筋的间距，且不应大于 200mm。

4.3 抗剪加固

4.3.1 粘贴碳纤维片材对混凝土梁、柱进行抗剪加固的形式可包括封闭粘贴、U 形粘贴或侧面粘贴（图 4.3.1），宜采用封闭粘贴形式。

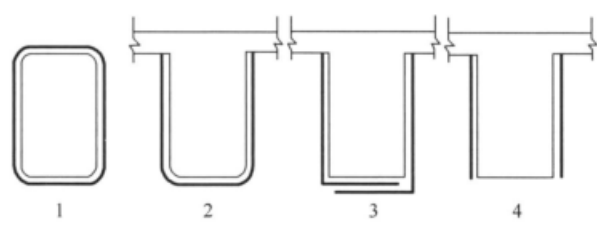


图 4.3.1 碳纤维片材抗剪加固形式示意图
1—封闭粘贴；2—U 形粘贴；3—双 L 形板 U 形粘贴；
4—侧面粘贴

4.3.2 粘贴碳纤维片材对混凝土梁、柱的抗剪加固应符合下列规定：

- 1 混凝土梁、柱的截面高度不应大于 500mm。
- 2 受剪承载力的提高幅度不宜超过 40%。
- 3 加固后构件的剪力设计值应符合国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 - 2010 中第 6.3.1 条及第 6.3.11 条的有关规定。

4.3.3 粘贴碳纤维片材对混凝土梁、柱进行抗剪加固的构造措施应符合下列规定：

- 1 梁抗剪加固可采用 U 形粘贴和侧面粘贴加固形式。碳纤维片材的纤维方向宜与构件轴线垂直。当纤维方向与轴线不垂直时，纤维方向宜垂直于 45°斜裂缝，且碳纤维片材宜采用轴向连

续的粘贴形式。当采用碳纤维板进行抗剪切加固时，宜采用双 L 形板形成 U 形粘贴。

2 条带布置的碳纤维片材条带净间距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 70%。

3 对于 U 形粘贴形式，宜在上端粘贴纵向碳纤维片材压条或采用机械锚固措施；对于侧面粘贴形式，宜在上、下两端分别粘贴纵向碳纤维片材压条或采用机械锚固措施（图 4.3.3）。

4 对柱的抗剪加固应采用封闭粘贴形式，且碳纤维片材的纤维方向应与柱轴线垂直。

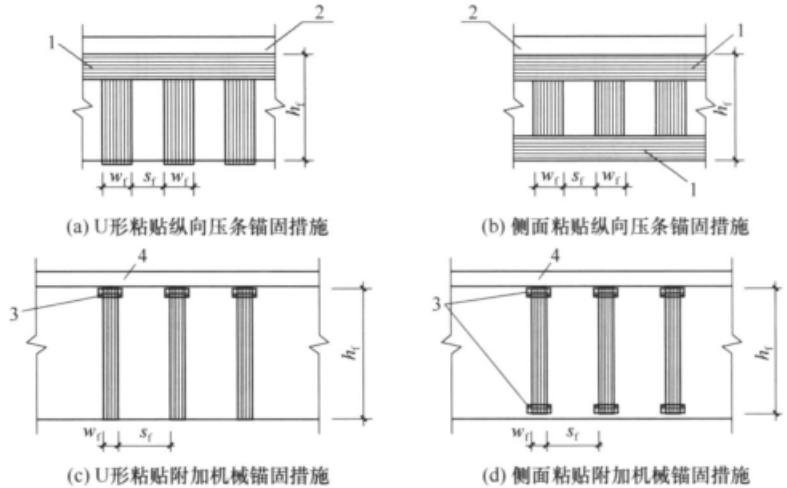


图 4.3.3 梁 U 形粘贴和侧面粘贴抗剪加固的锚固措施示意图

1—压条；2—混凝土翼缘板；3—锚板；4—混凝土翼缘板

4.3.4 钢筋混凝土梁粘贴碳纤维片材抗剪加固应按式(4.3.4)进行斜截面受剪承载力计算：

$$V_b \leq V_{b,rc} + V_{b,f} \tag{4.3.4}$$

式中： V_b ——梁的剪力设计值（kN）；