



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：2 0 0 3 年 5 月 1 日

2002 北京

第 2 页

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，水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。

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 ³)	单位宽度的截面积(mm ² / m)	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。生产厂家提供的产品性能必须满足规程的规定，方可在工程中应用。

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等级，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，采用允许拉应变 $[\varepsilon_{cf}]$ ，一般取其设计极限拉应变的 ε_{cf} 的 $2/3$ ，同时根据《混凝土结构设计规范》对构件塑性变形的控制条件， $[\varepsilon_{cf}]$ 也不应大于 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 $[\varepsilon_{cf}]$ ；

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 $[\varepsilon_{cf}]$ ，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 在对负弯距区进行加固时，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)和公式(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。对于钢筋滞柱，受剪加固应采取封闭式粘贴，此时， ϕ 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。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、漫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，只有漫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。用专用滚筒压遍纤维布时，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，

粘地效果最好。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。