



CECS G: XXX: 20XX

中国工程建设协会标准

公路混凝土桥梁预应力碳纤维板

抗弯加固技术规程

Technical Specification for Flexural Reinforcement of Highway Concrete

Bridges with Prestressed Carbon Fiber Plate

(征求意见稿)

XXX 出版社

中国工程建设协会标准

公路混凝土桥梁预应力碳纤维板 抗弯加固技术规程

Technical Specification for Flexural Reinforcement of Highway Concrete
Bridges with Prestressed Carbon Fiber Plate

CECS G: XXX: 20XX

主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：20××年××月××日

XXX 出版社

20XX 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2016 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2016]038 号）的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外相关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程的主要技术内容是：1. 总则；2. 符号；3. 基本规定；4. 材料与锚具；5. 设计；6. 施工与控制；7. 检验与验收。

本规程由中国工程建设标准化协会归口管理，由招商局重庆交通科研设计院有限公司负责具体技术内容的解释。本规程在执行过程中如有意见或建议，请将意见和有关资料寄送解释单位（地址：重庆市南岸区学府大道 33 号，邮政编码：400067）。

本规程主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

本规程参编单位：重庆万桥交通科技发展有限公司

武汉二航路桥特种工程有限责任公司

重庆交通大学

长安大学

西南交通大学

宁波大学

深圳市威士邦建筑新材料科技有限公司

重庆达力索缆有限公司

目 次

目 次	I
1 总则	1
2 符号	2
3 基本规定.....	4
4 材料与锚具.....	6
4.1 碳纤维板.....	6
4.2 配套胶黏剂及表面防护材料.....	6
4.3 锚（夹）具.....	7
5 设计	9
5.1 一般规定.....	9
5.2 预应力损失.....	10
5.3 持久状况承载能力极限状态计算.....	11
5.4 持久状况正常使用极限状态计算.....	15
5.5 应力复核.....	16
5.6 构造要求.....	19
6 施工与控制.....	20
6.1 一般规定.....	20
6.2 病害处治.....	21
6.3 钻孔及植入锚栓.....	21
6.4 锚固系统安装.....	22
6.5 预应力碳纤维板的张拉、粘贴.....	22

7 检验与验收.....	24
7.1 一般规定.....	24
7.2 表面处理及植入锚栓.....	24
7.3 碳纤维板张拉、粘贴.....	24
7.4 施工质量检验.....	25
7.5 工程验收.....	26

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为了规范公路混凝土桥梁预应力碳纤维板抗弯加固设计工作，满足安全可靠、经久耐用、经济合理的要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于采用预应力碳纤维板公路混凝土桥梁抗弯加固设计、施工及验收。

条文说明

根据预应力碳纤维板加固混凝土梁的受力特点，规定了采用此种方式加固的适用范围。本方法不适用于素混凝土构件，包括配筋率不符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）最小配筋率构造要求的构件的加固。

1.0.3 桥梁加固前应对加固方案进行社会、经济、技术比较论证。

1.0.4 采用预应力碳纤维板对公路混凝土桥梁进行抗弯加固时，除应符合本规程的规定外，尚应遵守现行国家、行业及相关团体标准的规定。

征求意见稿

2 符号

2.1 材料性能符号

E_f —— 碳纤维板的弹性模量；

E_c —— 原加固构件混凝土的弹性模量；

$[\varepsilon_{fd}]$ —— 碳纤维板允许拉应变设计值；

f_{cd} —— 原构件混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{sd} 、 f'_{sd} —— 原构件受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值。

2.2 作用、作用效应及承载力符号

M_d —— 包含初始弯矩的总弯矩设计值；

M_{d1} —— 加固前受弯构件计算截面承受的初始弯矩；

T_{fp} —— 碳纤维板的有效张拉力；

σ_{con} —— 预应力碳纤维板的张拉控制应力；

σ_{fp} —— 扣除预应力损失后的碳纤维板有效张拉应力；

σ_{pc} —— 由预加力产生的混凝土法向预压应力；

ε_f —— 碳纤维板的拉应变；

ε_{fp} —— 扣除预应力损失后的碳纤维板有效张拉应变；

ε_{cu} —— 混凝土极限压应变；

ε_1 —— 加固前构件在初始弯矩及碳纤维板张拉力共同作用下，截面受拉边缘的初始应变；

2.3 几何参数符号

A_f —— 碳纤维板的截面面积；

A_0 、 I_0 —— 分别为将钢筋、碳纤维板片材按与混凝土弹性模量比换算成混凝土后的换算截面面积和换算截面惯性矩；

l —— 张拉端至锚固端之间的净距离(mm)；

b —— 矩形截面宽度；

h_0 —— 截面的有效高度，即受拉钢筋面积重心至受压边缘的距离；

x —— 混凝土受压区等效矩形应力图高度；

a_s' —— 受压钢筋截面重心至混凝土受压区边缘的距离；

A_s 、 A'_s —— 受拉钢筋、受压钢筋截面面积；

e —— 碳纤维板加固中心位置至截面中性轴的距离；

- x_1 —— 加固前原构件开裂截面换算截面的混凝土受压区高度；
- I_{cr} —— 加固前原构件开裂截面换算截面的惯性矩；
- S_0 —— 全截面换算截面重心轴以上（或以下）部分面积对重心轴的面积矩；
- I_{cr} —— 开裂截面的换算截面惯性矩；
- W_0 —— 原梁换算截面抗裂边缘的弹性抵抗矩。

2.4 计算系数及其它符号

- r —— 松弛损失率；
- α_f —— 碳纤维板的轴向温度膨胀系数；
- α_c —— 混凝土的轴向温度膨胀系数；
- ΔT —— 年平均最高（或最低）温度与预应力碳纤维板张拉锚固时的温差；
- ρ —— 预应力碳纤维增强复合材料和钢筋的配筋率。

征求意见稿

3 基本规定

3.0.1 混凝土桥梁经过技术状态评定和承载能力鉴定,确认经过加固能够满足结构安全和正常使用要求,方可进行加固,

3.0.2 加固的碳纤维板必须与构件牢固地粘贴在一起,变形协调,共同受力,且两端应设置锚具。

3.0.3 被加固的钢筋混凝土结构构件,其现场实测混凝土强度等级不得低于 C25,且混凝土表面的正拉粘结强度不得低于 2.0MPa。

条文说明

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,它与碳纤维片材的粘结强度也很低,易发生剥离破坏,碳纤维板就不能充分发挥作用,因此应对被加固结构的混凝土强度的最低等级提出要求。混凝土表面粘贴强度现场试验检测方法见《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)附录 D,其室内试验检测方法见《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》(GB 50728—2011)附录 F。

3.0.4 桥梁加固设计应与实际施工方法紧密结合,保证施工过程中尽可能不损伤原结构,对被加固构件造成二次伤害。

条文说明

预应力碳纤维板加固混凝土梁需要安装锚具,因此设计和施工应尽可能减小对原结构的损伤。

3.0.5 预应力碳纤维板抗弯加固后不应低于原设计标准,宜达到现行标准。

3.0.6 对桥梁加固过程中可能出现倾斜、失稳、过大变形或坍塌的桥梁结构和构件,应在加固设计文件中提出相应的施工安全措施和施工监控要求,并明确要求施工单位应严格执行。

条文说明

预应力碳纤维板加固混凝土梁时对梁体施加预应力,相当于对梁体施加了体外预应力,在设计和施工过程中应当采取相应的安全措施,防止在加固过程中出现不必要事故。

3.0.7 加固前应按照《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22)对构件表面缺陷进行处治。

3.0.8 粘贴在混凝土构件表面上的碳纤维板,不宜直接暴露于阳光或有害介质中,对其表面进行防护处理。采用本方法加固的混凝土桥梁,长期使用的环境温度不应高于 60℃,处于特殊环境(如高温、高湿、冻融、腐蚀、放射等)的混凝土结构采用本方法加固时,应采用耐环境因素作用的结构胶黏剂。

条文说明

本条规定粘贴在混凝土表面的碳纤维板不宜直接暴露于阳光或有害介质中。为此,其表面应该进行防护处理,以防止长期受阳光照射或介质腐蚀,从而起到延缓材料老化、延长使用寿命的作用。采用预应力碳纤维板加固的混凝土桥梁,其长期使用环境温度不应高于 60℃。当采用耐高温胶黏剂粘结时,可不受此规定限制。对于其他特殊环境(振动、高

温、冻融、腐蚀、放射等)采用粘贴碳纤维板加固时,除应符合相应的国家现行有关标准的规定采取专门的粘贴工艺和相应的防护措施外,尚应采用耐环境因素作用的结构胶黏剂。

3.0.9 采用预应力碳纤维板加固的锚具外观表面应平整洁净,无机械损伤,不应有裂纹、结疤、折叠及夹杂等,应满足《桥梁用预应力碳纤维板—夹持式锚具》(JTT 1267-2019)的要求,锚固区构造及计算满足《混凝土结构后锚固技术规程》(JGJ 145-2013)中的有关要求。

3.0.10 采用预应力碳纤维板锚固后的实际预应力值与设计规定的相对允许偏差值不超过 $\pm 5\%$,当被加固构件的表面防火要求时,锚具、胶黏剂和碳纤维板应满足现行国家标准中的耐火等级及耐火极限要求。

条文说明

碳纤维板的胶黏剂一般是可燃的,故应按照相关规范规定的耐火等级和耐火极限要求,对加固部位进行防护。

征求意见稿

4 材料与锚具

4.1 碳纤维板

4.1.1 碳纤维板材用的碳纤维应为连续纤维，其主要力学性能指标满足表 4.1.1 的规定。抗拉强度标准值应具有 95%的保证率，弹性模量和伸长率取平均值。

表4.1.1-1 碳纤维板材主要力学性能指标

性能项目 纤维类别	抗拉强度标准值 (MPa)	弹性模量 (MPa)	伸长率 (%)	设计强度 (MPa)
板材	≥2400	≥1.6×10 ⁵	≥1.4	≥1840

碳纤维板的主要力学性能应按现行国家标准《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》(GB/T 3354)测定。

4.1.2 用于预应力碳纤维加固板材应符合下列规定：

1 碳纤维板的抗拉强度应按板的截面面积(含树脂)计算，截面面积(含树脂)应取实测厚度乘以计算宽度。

2 单向碳纤维板的宽度不宜大于 100mm；碳纤维体积含量不应低于 60%~70%。

3 碳纤维板以 500m² 为一批进行抽检，每批中检查 5%，但不少于 5 卷。当全部试件全部项目检测合格时为合格，若有某样不合格，应双倍抽样重检，若仍不合格，则判定为不合格产品。

条文说明

碳纤维板材过厚或过宽，施工质量均难以保证，所以在设计和施工时，都应尽量使用宽度较小的板材。相关研究表明，碳纤维体积含量在 60%~70%时性能最好。

4.2 配套胶黏剂及表面防护材料

4.2.1 桥梁加固用胶黏剂宜采用《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)中所规定的 A 级胶。

4.2.2 桥梁承重结构(构件)加固用浸渍、粘贴碳纤维板的胶黏剂的安全性能指标必须符合表 4.2.2 的规定。不得使用不饱和聚酯树脂、醇酸树脂等作为浸渍、粘贴胶黏剂。

表4.2.2 碳纤维浸渍、粘贴用胶黏剂安全性能指标

性能项目		性能要求
		A级胶
胶体性能	抗拉强度 (MPa)	≥40
	抗拉弹性模量 (MPa)	≥2500
	抗弯强度 (MPa)	≥50
		且不得呈脆性破坏
	抗压强度 (MPa)	≥70
伸长率 (%)	≥1.5	

黏结能力	钢-钢拉伸抗剪强度标准值 (MPa)	≥14
	钢-钢不均匀扯离强度 (kN/m)	≥20
	与混凝土的正拉黏结强度 (MPa)	≥2.5, 且为混凝土内聚破坏
不挥发物含量 (固体含量) (%)		≥99

注：1.表中的胶黏剂性能指标，应根据置信水平C=0.90、保证率为95%的要求确定。

2.表中的性能指标除标有标准值者外，其余均为平均值。

3.用于粘贴碳纤维板的胶黏剂，当涂抹厚度小于3mm时，材料的流挂应小于1mm。

4.2.3 粘贴碳纤维板用的底胶与修补胶应与浸渍、粘贴胶黏剂相适配，其安全性能指标必须符合表 4.2.3 的规定。

表4. 2. 3 底胶及修补胶的安全性能指标

性能项目		性能要求
		A级胶
底胶	钢-钢拉伸抗剪强度标准值 (MPa)	≥14
	与混凝土的正拉黏结强度 (MPa)	≥2.5, 且为混凝土内聚破坏
	不挥发物含量 (固体含量) (%)	≥99
	混合后初黏度 (23°C) (mPa·s)	≤6000
修补胶	胶体抗拉强度 (MPa)	≥30
	胶体抗弯强度 (MPa)	≥40, 且不得呈脆裂破坏
	与混凝土的正拉黏结强度 (MPa)	≥2.5, 且为混凝土内聚破坏

注：表中的性能指标除标有标准值者外，其余均为平均值。

4.2.4 当被加固结构处于防腐、防渗、防火等特殊环境时，应根据结构服役的具体条件选择表面防护材料，材料的主要要求应符合现行国家标准规定。

条文说明

利用预应力复合材料加固的桥梁结构在其服役过程中可能会遭受不同程度的环境侵蚀。复合材料的表面防护是为了防止复合材料中树脂基体和碳纤维免受外界不利环境的侵害，避免因复合材料材料的力学性能或耐久性性能的降低影响到结构的安全及使用性能。复合材料的表面防护可使用具有不同功能的表面涂层来实现，必须保证表面涂层材料和复合材料基体树脂之间的可靠粘结及变形协调。对锚固组装件的防护是为了防止锚具和螺杆锈蚀，以避免锚具失效。

4.3 锚（夹）具

4.3.1 预应力碳纤维板锚固组装件一般由碳纤维板、固定端锚具、张拉端锚具、张拉端预锚装置、拉杆、锚栓及配套的胶黏剂组成，如图 4.3.1。

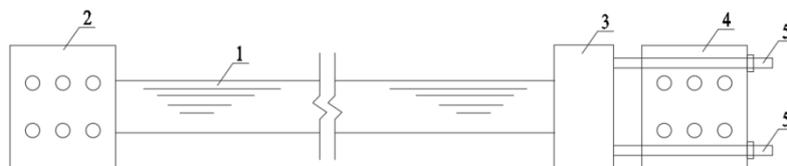


图 4.3.1 预应力碳纤维板锚固组装件示意图

1—碳纤维板；2—固定端锚具；3—张拉端夹具；4—张拉端预锚装置；5—拉杆

条文说明

预应力碳纤维板张拉系统已在工程中大量使用，本条介绍了其系统组成，可供设计和施工参考。张拉端和固定端应至少有一端为自由移动端。锚具组装时，应在锚具与碳纤维板之间涂刷高强快固型结构胶，并在凝固前迅速将夹具锚紧，以防止预应力碳纤维板与锚具之间滑移。

4.3.2 预应力碳纤维板加固用锚具可采用平板锚具、齿纹锚具、波形锚具及楔形锚具等，平板锚具的盖板、底板厚度及螺栓的公称直径，齿纹锚具的齿深、齿间距，波形锚具及楔形锚具等符合现行标准规定的构造要求。

条文说明

工程设计人员可根据工程环境条件、结构的要求、产品的技术性能、张拉施工方法和经济合理等因素进行综合分析比较后确定锚具的选用，采用的材料应符合国家标准的相关规定，并符合结构的耐久性规定。平板锚具及齿状锚具结构形式应符合《混凝土结构加固设计规范》（GB50367—2013）第11.3节的规定。

4.3.3 碳纤维板锚固组装件的静载锚固性能、疲劳性能、应力松弛性能等指标应符合《桥梁用预应力碳纤维板—夹持式锚具》（JT/T 1267—2019）附录 C、附录 D 和附录 E 的相关规定。

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 采用预应力碳纤维板对公路混凝土桥梁进行抗弯加固时，应按下列两个阶段进行计算：

1 第一阶段：预应力碳纤维板加固施工前，作用（或荷载）应考虑加固时原构件自重、加固构件自重及施工时的其他荷载，由原结构承担。

2 第二阶段：预应力碳纤维板加固施工后，作用（或荷载）应考虑包括构件自重在内的恒载及使用阶段的可变作用，加固后活载及新增恒载由加固后结构共同承担。作用效应组合系数取值按现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）取用。

5.1.2 采用预应力碳纤维板对公路混凝土桥梁进行抗弯加固时，应进行施工过程、承载能力极限状态和正常使用极限状态的验算，计算时应遵守下列规定：

1 构件达到承载能力极限状态时，粘贴预应力碳纤维板的拉应变 ε_f 应按截面应变保持平面的假设确定；

2 碳纤维板拉应力 σ_f 取等于拉应变 ε_f 与弹性模量 E_f 的乘积，且不应超过其抗拉强度设计值，同时其极限拉应变设计值不应大于0.01；

3 在达到受弯承载力极限状态前，预应力碳纤维板与混凝土之间的粘结不致出现剥离破坏。

条文说明

采用预应力碳纤维板对钢筋混凝土适筋截面进行加固，加固设计除应遵守《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）正截面承载力计算的基本假定外，依据碳纤维板加固梁的受力性质，对碳纤维板的应力应变关系、碳纤维板的极限拉应变设计值及避免粘结剥离破坏等亦进行了规定。

5.1.3 采用预应力碳纤维板加固的混凝土桥梁抗弯构件，应进行正常使用极限状态的抗裂和变形验算。

5.1.4 锚固区应按《混凝土结构后锚固技术规程》（JGJ145）进行锚固设计和验算，应对锚栓的抗剪强度进行验算，锚栓的设计剪应力不得大于锚栓材料抗剪强度设计值的0.6倍。

5.1.5 粘贴在混凝土构件表面的预应力碳纤维板，其表面应进行防护处理，表面防护材料应对纤维及胶黏剂无害。

5.1.6 采用预应力碳纤维板对公路混凝土桥梁进行加固时，其破坏形式应为正截面破坏先于斜截面破坏，正截面承载力按碳纤维板或受压混凝土达到其设计强度值控制。

条文说明

对于受弯构件进行正截面抗弯加固，而斜截面承载力提高相对有限，而斜截面破坏为脆性破坏，其危险性大，避免发生脆性破坏非常重要。

对于采用预应力碳纤维板进行加固，由于碳纤维板施加预应力，且其极限拉应变设计值为0.01，因此在加固构件破坏时，原结构中的受拉钢筋不会达到其强度设计值。预应力碳纤维板

加固混凝土梁的理想破坏形态为碳纤维板达到抗拉强度设计值或受压混凝土完全压碎，因此正截面承载力由碳纤维板或受压混凝土达到其设计强度值控制。

5.1.7 预应力碳纤维板的张拉控制应力宜取材料抗拉强度标准值的 0.45-0.65 倍，且不应大于 0.70 倍。

【条文说明】本条关于预应力碳纤维复合材料的张拉控制应力是根据参编单位的相关研究和已有工程实践，并借鉴美国 ACI440 委员会颁布的 *Presstressing Concrete Structures with FRP Tendons (ACI440.4R-04)* 而确定。设计中应考虑工程和选用材料的实际情况确定合理的张拉控制应力。 σ_{con} 取值过高，可能会在张拉时引起断筋事故，产生过大应力松弛。

5.2 预应力损失

5.2.1 当采用预应力碳纤维板对公路混凝土桥梁受弯构件进行加固时，首先应明确施加的预应力大小，预应力损失应按下列规定计算：

1 锚具变形和碳纤维板内缩引起的预应力损失值 σ_{11} ：

$$\sigma_{11} = \frac{a}{l} E_f \quad (5.2.1-1)$$

式中： a ——张拉锚具变形和碳纤维板的内缩值(mm)，应按表 5.2.1 采用；

l ——张拉端至锚固端之间的净距离(mm)；

E_f ——碳纤维复合板的弹性模量 (MPa)；

表 5.2.1 锚具类型和预应力碳纤维复合板内缩值 a (mm)

锚具类型	a
平板锚具	2
波形锚具	1

2 预应力碳纤维板的松弛损失 σ_{12} ：

$$\sigma_{12} = r \sigma_{con} \quad (5.2.1-2)$$

式中： r ——松弛损失率，可近似取 2.2%；

σ_{con} ——预应力碳纤维板的张拉控制应力。

3 混凝土收缩和徐变引起的预应力损失值 σ_{13} ：

$$\sigma_{13} = \frac{55 + 300 \sigma_{pc} / f_{ck}}{1 + 15 \rho} \quad (5.2.1-3)$$

式中： σ_{pc} ——预应力碳纤维板处的混凝土法向压应力；

ρ ——预应力碳纤维板和钢筋的配筋率，计算公式为： $\rho = (A_f E_f / E_{s0} + A_{s0}) / b h_0$ ；

f_{ck} ——施加预应力时的实测混凝土抗压强度标准值。

4 由季节温差造成的温差损失 σ_{14} ：

$$\sigma_{14} = \Delta T |\alpha_f - \alpha_c| E_f \quad (5.2.1-4)$$

式中： ΔT ——年平均最高（或最低）温度与预应力碳纤维板张拉锚固时的温差；

α_f 、 α_c ——碳纤维板、混凝土的轴向温度膨胀系数。 α_f 可取为 $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ； α_c 可取为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

5 分批张拉引起的构件混凝土弹性压缩预应力损失 σ_{i5} ：

弹性压缩损失的平均值可近似按下式估算：

$$\sigma_{i5} \approx \frac{m-1}{2} \alpha_{E_p} \Delta \sigma_{pe} \quad (5.2.1-5)$$

式中： α_{E_p} ——碳纤维板的弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

$\Delta \sigma_{pe}$ ——在先张拉的碳纤维板计算截面中心处，由后张拉每一批碳纤维板产生的混凝土法向应力；

m ——碳纤维板分批张拉的次数。

由于施加预应力引起的原构件预应力筋（束）的弹性压缩损失 σ_{i5o} 可按下式计算：

$$\sigma_{i5o} = \alpha_{E_p} m \Delta \sigma_{pe} \quad (5.2.1-6)$$

式中： $\Delta \sigma_{pe}$ ——原梁控制截面上预应力钢筋重心处，由张拉的一批碳纤维板产生的法向应力。

5.3 持久状况承载能力极限状态计算

5.3.1 对矩形截面或翼板位于受拉边的 T 形混凝土截面受弯构件，在受拉面粘贴预应力碳纤维板进行抗弯加固时，应按下列公式计算正截面受弯承载力：

1 普通混凝土正截面受弯承载力计算：

1. 当混凝土受压区高度 x 大于 $\xi_b h$ ，且小于 $\xi_b h_0$ 时（图 5.3.3-a）：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + E_f \varepsilon_f A_f a_s \quad (5.3.1-1)$$

混凝土受压区高度 x 和受拉面碳纤维板拉应变 ε_f 按下列公式联立求解：

$$f'_{sd} A'_s + f_{cd} b x = f_{sd} A_s + E_f \varepsilon_f A_f \quad (5.3.1-2)$$

$$x = \frac{0.8 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f - \varepsilon_{fp} + \varepsilon_1} h \quad (5.3.1-3)$$

2. 当混凝土受压区高度 $x \leq \xi_b h$ ，且小于 $\xi_b h_0$ 时（图 5.3.3-b）：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s (h_0 - 0.5 \xi_{fb} h) + E_f [\varepsilon_{fd}] A_f (h - 0.5 \xi_{fb} h) \quad (5.3.1-4)$$

3. 当混凝土受压区高度 $x \leq 2a'_s$ 时：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s (h_0 - a'_s) + E_f [\varepsilon_{fd}] A_f (h - a'_s) \quad (5.3.1-5)$$

2 预应力混凝土正截面受弯承载力计算：

1. 当混凝土受压区高度 x 大于 $\xi_b h$ ，且小于 $\xi_b h_0$ 时（图 5.3.3-c）：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + E_f \varepsilon_f A_f a_s + f_{pd} A_p (a_p - a_s) \quad (5.3.1-6)$$

混凝土受压区高度 x 和受拉面碳纤维板拉应变 ε_f 按下列公式联立求解：

$$f'_{sd} A'_s + f_{cd} b x = f_{sd} A_s + f_{pd} A_p + E_f \varepsilon_f A_f \quad (5.3.1-7)$$

$$x = \frac{0.8 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f - \varepsilon_{fp} + \varepsilon_1} h \quad (5.3.1-8)$$

2. 当混凝土受压区高度 $x \leq \xi_{fb} h$ ，且小于 $\xi_b h_0$ 时（图 5.3.3-d）：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s (h_0 - 0.5 \xi_{fb} h) + E_f [\varepsilon_{fd}] A_f (h - 0.5 \xi_{fb} h) + f_{pd} A_p (h - a_p - 0.5 \xi_{fb} h) \quad (5.3.1-4)$$

3. 当混凝土受压区高度 $x \leq 2a'$ 时：

$$\gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s (h_0 - a'_s) + E_f [\varepsilon_{fd}] A_f (h - a'_s) + f_{pd} A_p (h - a_p - a'_s) \quad (5.3.1-5)$$

式中：

M_d —— 第二阶段弯矩组合设计值；

b —— 矩形截面宽度；

h_0 —— 截面的有效高度，即受拉区预应力筋和普通钢筋的合力作用点至受压边缘的距离；

a_p —— 受拉区预应力筋合力作用点至受拉区边缘的距离；

x —— 混凝土受压区等效矩形应力图高度；

ε_f —— 碳纤维板的拉应变；

$[\varepsilon_{fd}]$ —— 碳纤维板允许拉应变设计值，取为 0.01；

ξ_{fb} —— 碳纤维板达到其允许拉应变设计值与混凝土压坏同时发生时的界限相对受压区高度；

$$\xi_{fb} = \frac{0.8 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + [\varepsilon_{fd}] - \varepsilon_{fp} + \varepsilon_1} \quad (5.3.1-6)$$

ε_1 —— 加固前构件在初始弯矩及碳纤维板张拉力共同作用下，截面受拉边缘的初始应变，按本规程第 5.3.4 条计算；

ε_{cu} —— 混凝土极限压应变，当混凝土强度等级为 C50 及 C50 以下时，取 $\varepsilon_{cu}=0.0033$ ；

ε_{fp} —— 扣除预应力损失后的碳纤维板有效张拉应变；

a'_s —— 受压钢筋截面重心至混凝土受压区边缘的距离；

A_s 、 A'_s —— 受拉钢筋、受压钢筋截面面积；

A_p —— 预应力筋的截面面积；

A_f —— 预应力碳纤维板的有效截面面积；

f_{cd} —— 混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{sd} 、 f'_{sd} —— 受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值；

f_{pd} —— 预应力筋的抗拉强度设计值；

ξ_b —— 相对界限受压区高度，按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 的规定选用。

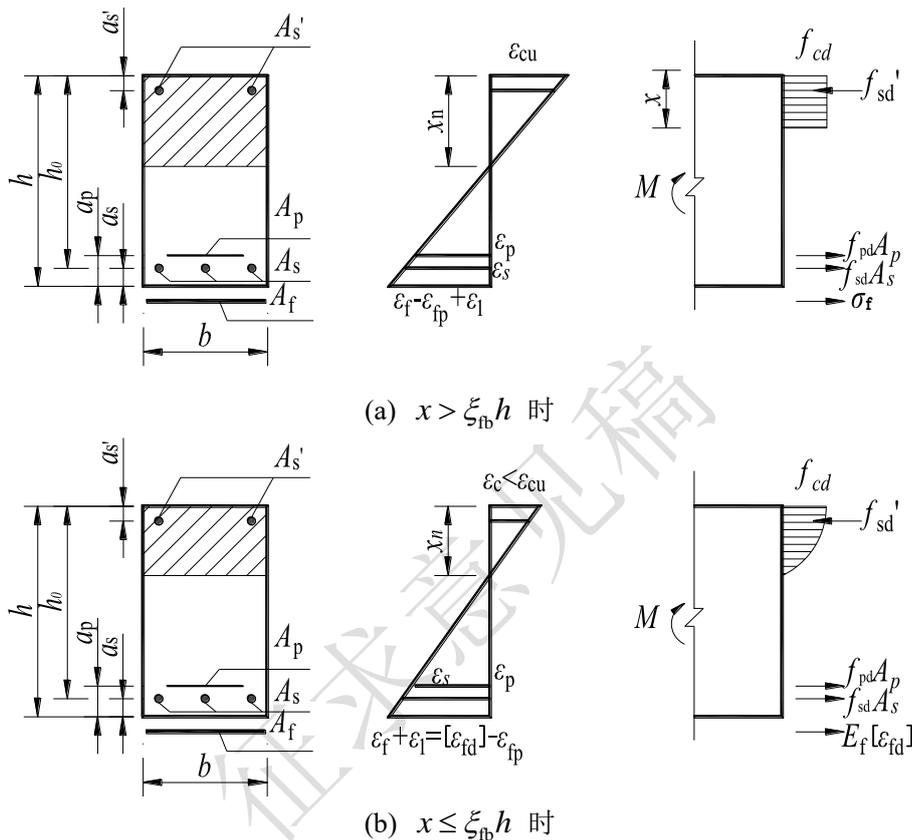


图 5.3.3 矩形截面梁正截面受弯承载力计算图示

条文说明

国内外的试验研究均表明，在受弯构件的受拉面采用有粘结的预应力碳纤维板进行抗弯加固时，截面应变分布仍符合平截面假定。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而导致超筋性质的脆性破坏。当在受拉面粘贴碳纤维板，预应力碳纤维板的面积形心至受压边缘的有效高度，可取截面高度 h 。

采用预应力碳纤维板进行抗弯加固时，构件的极限形态主要有以下几种：

- (1) 受拉钢筋屈服后，碳纤维板的拉应变没有达到其允许拉应变 $[\epsilon_{fd}]$ ，受压区混凝土压碎；
- (2) 受拉钢筋屈服后，碳纤维板的拉应变达到其允许拉应变 $[\epsilon_{fd}]$ ，受压区混凝土尚未完全压碎；
- (3) 受拉钢筋未屈服，碳纤维板未达到其允许拉应变，受压区混凝土压碎；

(4) 受拉钢筋未屈服，碳纤维板的拉应变达到其允许拉应变，受压区混凝土压碎；

(5) 在达到正截面极限承载力前，碳纤维板与混凝土之间发生剥离破坏。

对正截面进行抗弯加固，按前两种破坏形态进行设计计算。对于第(3)中破坏形态，其主要是因为碳纤维板加固量较大、受拉钢筋配置较多或混凝土梁的本身强度不高等原因造成的，可通过控制加固量上限来避免发生此种破坏形态。对于第(4)中破坏形态，主要原因是碳纤维板的预应力水平较高造成的，可以通过控制预应力碳板的初始张拉力来避免此种破坏形态。式(5.3.1-1)和式(5.3.1-2)中限制受压区高度 x 不大于 $0.8\xi_b h_0$ ，即可控制不产生第(3)和第(4)种破坏形态。第(5)种破坏形态属于脆性破坏，此时碳纤维板中的应力较小，必须避免。

式(5.3.1-1)至式(5.3.1-3)为第(1)种破坏形态的抗弯承载能力计算公式。式(5.3.1-1)从对受拉钢筋截面形心取矩的力矩平衡方程得到的，式(5.3.1-2)为力的平衡方程，式(5.3.1-3)是按平截面假定得到的。

式(5.3.1-4)、式(5.3.1-5)为第(2)种破坏形态的抗弯承载能力近似计算公式。此时受压区高度很小。式(5.3.1-4)偏安全地对受压区边缘混凝土达到极限压应变时的受压区混凝土合力作用点取矩，此时，由平截面假定可以求得相应碳纤维板的计算应变。式(5.3.1-5)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混凝土合力作用点重合。

5.3.2 对翼缘位于受拉区的T形截面受弯构件，当在其受拉面粘贴碳纤维板时，应按本规程第5.3.1条的规定和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第5.2.3条计算。

5.3.3 在第一阶段弯矩 M_{d1} 及碳纤维板张拉力共同作用下，截面受拉边缘混凝土应变 ε_1 按下列公式计算：

$$\varepsilon_1 = \frac{(M_{d1} - T_{fp}e)(h - x_1)}{E_c I_{cr}} \quad (5.3.3-2)$$

式中：

M_{d1} —— 第一阶段弯矩组合设计值，当 M_{d1} 小于未加固截面受弯承载力的20%时，可忽略初始弯矩的影响；

T_{fp} —— 碳纤维板的有效张拉力，按下式进行计算：

$$T_{fp} = \sigma_{fp} A_f \quad (5.3.3-3)$$

σ_{fp} —— 扣除预应力损失后的碳纤维板有效张拉应力；

e —— 碳纤维板加固中心位置至截面中性轴的距离；

x_1 —— 加固前原构件开裂截面换算截面的混凝土受压区高度；

E_c —— 原加固构件混凝土的弹性模量；

I_{cr} —— 加固前原构件开裂截面换算截面的惯性矩。

5.4 持久状况正常使用极限状态计算

5.4.1 预应力碳纤维板加固受弯构件按下列三种情况设计：

1 全预应力混凝土加固结构，在作用频遇组合下控制截面边缘不允许出现拉应力，在结构自重和碳纤维板张拉预应力作用下简支梁控制截面的上缘不得消压。

2 预应力碳纤维板加固A类混凝土结构，在作用频遇组合下控制截面边缘可出现不超过限制的拉应力。

3 预应力碳纤维板加固B类混凝土结构，在作用频遇组合下控制截面边缘可出现超过限制的拉应力，但裂缝宽度应小于限值。

5.4.2 预应力碳纤维板加固受弯构件抗裂性验算：

1 全预应力碳纤维板加固混凝土结构和A类预应力碳纤维板加固混凝土结构，抗裂验算按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》的方法进行。

2 B类预应力碳纤维板加固混凝土结构在各类环境中的最大裂缝宽度限值及最大裂缝宽度计算方法按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第6.4节执行。其中当原构件为钢筋混凝土梁时，钢筋应力 σ_{ss} 应取为加固后原构件普通钢筋的应力；当原构件为预应力钢筋混凝土梁时， σ_{ss} 应取为加固后原构件预应力钢筋相对于其重心点混凝土应力为零时的拉应力增量。

5.4.3 预应力碳纤维板加固的混凝土受弯构件挠度可根据给定的构件刚度用结构力学的方法计算。

5.4.4 预应力碳纤维板材料加固混凝土受弯构件的截面刚度计算方法：

1 全预应力碳纤维板加固混凝土结构和A类预应力碳纤维板加固混凝土构件刚度：

$$B_0 = 0.95E_c I_0 \quad (5.4.5-1)$$

2 B类预应力碳纤维板加固混凝土构件刚度：

在开裂弯矩 M_{cr} 作用下

$$B_0 = 0.95E_c I_0 \quad (5.4.5-2)$$

在 $(M_s - M_{cr})$ 作用下

$$B_{cr} = E_c I_{cr} \quad (5.4.5-3)$$

开裂弯矩 M_{cr} 按下列公式计算

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0 \quad (5.4.5-4)$$

$$\gamma = \frac{2S_0}{W_0} \quad (5.4.5-5)$$

式中： S_0 ——全截面换算截面重心轴以上（或以下）部分面积对重心轴的面积矩；

σ_{pc} ——由预应力碳纤维板扣除预应力损失后的永存预应力和水平钢筋合力在构件

抗裂边缘产生的混凝土预压应力；

I_0 ——全截面换算截面惯性矩；

I_{cr} ——开裂截面的换算截面惯性矩；

W_0 ——原梁换算截面抗裂边缘的弹性抵抗矩。

5.5 应力复核

5.5.1 持久状况设计的预应力碳纤维板加固的混凝土受弯构件，应计算其使用阶段正截面混凝土的法向压应力、斜截面混凝土的主压应力，原梁受拉区预应力钢筋的拉应力，以及预应力碳纤维板的拉应力。计算上述应力时，作用（或荷载）取其标准值，汽车荷载须考虑其冲击系数。

5.5.2 对预应力碳纤维板加固后的构件，应力的计算方法宜按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362—2018）第 7.1.2~7.1.4 和第 7.1.6 条进行。预应力碳纤维板的拉力 $N_{p0,e}$ 等于其永存预加力与可变作用标准值产生的拉力增量之和，即：

$$\sigma_{pe,f} + \Delta\sigma_{p,f} = \frac{N_{p0,f}}{A_{p,f}} \quad (5.5.2-1)$$

式中 $N_{p0,f}$ ——在使用阶段，预应力碳纤维板的拉力；

$\Delta\sigma_{p,f}$ ——预应力碳纤维板中由可变作用标准值引起的拉应力增量，按第 5.5.3 条中的方法计算；

$A_{p,f}$ 、 $\sigma_{pe,f}$ ——分别为预应力碳纤维板的截面面积和永存预应力。

使用荷载作用阶段，预应力碳纤维板中的最大拉应力为：

$$\sigma_{p,f} = \sigma_{pe,f} + \Delta\sigma_{p,f} \text{ 或 } \sigma_{p,f} = N_{p0,f} / A_{p,f} \quad (5.5.2-2)$$

5.5.3 对简支体系的加固，预应力碳纤维板中的应力增量可按照《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T J22—2008）附录 E 中的方法计算。

5.5.4 对连续体系的加固，预应力碳纤维板中的应力增量应考虑二次矩效应。

5.5.5 钢筋混凝土构件加固后为全预应力混凝土或预应力混凝土 A 类构件时，混凝土法向压应力和法向拉应力可按下式计算：

$$\sigma_{kcp} \text{ 或 } \sigma_{ktp} = \frac{N_{p0,f}}{A_0} \mp \frac{N_{p0,f} h_2}{I_0} y_0 \mp \frac{M_k}{I_0} y_0 \quad (5.5.4-1)$$

式中 σ_{kcp} 、 σ_{ktp} ——分别为使用阶段由荷载标准值产生的混凝土法向压应力和拉应力；

M_k ——按荷载标准值组合计算的弯矩值；

y_0 ——原梁换算截面重心轴至受压区或受拉区计算碳纤维板处的距离。

其他符号意义同前。

预应力混凝土构件加固后，应考虑原构件中预应力筋引起的受压边缘压应力和拉应力。计算中应考虑由预应力碳纤维板引起的原构件体内预应力钢筋的弹性压缩损失的变化，见公式 (5.2.1-6)。

在预应力筋、预应力碳纤维板和荷载标准值组合的共同作用下，原构件的混凝土压应力或拉应力按下式计算：

先张法:

$$\sigma_{kcp} \text{ 或 } \sigma_{ktp} = \frac{N_{p0,f} + N_{p0}}{A_0} \mp \frac{N_{p0,f} h_2}{I_0} y_o \mp \frac{N_{p0} e_{p0}}{I_0} \pm \frac{M_k}{I_0} y_0 \quad (5.5.4-2)$$

后张法:

$$\sigma_{kcp} \text{ 或 } \sigma_{ktp} = \frac{N_{p0,f}}{A_0} + \frac{N_p}{A_n} \mp \frac{N_{p0,f} h_2}{I_0} y_o \mp \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_n \pm \frac{M_k}{I_0} y_0 \pm \frac{M_{p2}}{I_n} y_n \quad (5.5.4-3)$$

原构件预应力钢筋的最大应力为:

$$\sigma_{p,i} = \sigma_{pe,i} + \alpha_{EP} \left(\frac{M_k}{I_0} y_0 \pm \frac{M_{p2}}{I_n} y_n \right) \quad (5.5.4-4)$$

式中 N_{p0} 、 N_p ——分别为原构件中预应力钢筋和普通钢筋的合力,按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)公式(6.1.7-1)或(6.1.7-3)计算;

$N_{p0,f}$ ——在使用阶段,预应力碳纤维板中的拉力;

A_n 、 I_n ——分别为原梁(跨中)净截面面积和惯性矩;

α_{EP} ——原梁体内预应力钢筋与混凝土的弹性模量之比;

σ_{kcp} 或 σ_{ktp} ——原梁混凝土截面由预应力筋、预应力碳纤维板、荷载标准值组合及预应力二次力矩引起的法向压、拉应力;

$\sigma_{pe,i}$ ——原梁预应力筋的永存预应力,应包括预应力碳纤维板对其引起的弹性压缩影响;

M_{p2} ——由预加力 N_p 在后张法预应力混凝土连续梁等超静定结构中产生的次弯矩,与 M_k 同号为正,异号为负;

e_{p0} 、 e_{pn} ——分别为原梁中先张法或后张法构件的预应力钢筋和普通钢筋的合力 N_{p0} 或 N_p 对换算截面或净截面的偏心距,按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)公式(6.1.7-2)或(6.1.7-4)计算。

5.5.6 加固后的结构为预应力混凝土 B 类构件时,混凝土的法向压应力 σ_{cc} 应按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第 7.1.4 条的方法计算,相关参数的计算方法如下:

$$\sigma_{cc} = \frac{N_{p0}}{A_{cr}} + \frac{N_{p0} e_{0N} c}{I_{cr}} \quad (5.5.5-1)$$

式中 N_{p0} ——混凝土法向应力等于零预应力筋、预应力碳纤维板和原梁中普通钢筋的合力,应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第 6.1.7 条的公式计算,计算中须增加预应力碳纤维板的拉力 $N_{p0,f}$ 一项;

e_{0N} —— N_{p0} 作用点至开裂截面重心轴的距离, $e_{0N} = e_N + c$;

e_N —— N_{p0} 作用点至截面受压边缘的距离, N_{p0} 位于截面之外为正, N_{p0} 位于截面之内为

$$\text{负, } e_N = \frac{M_k \pm M_{p2}}{N_{po}} - h_{pse};$$

c ——截面受压区边缘至开裂换算截面重心轴的距离;

A_{cr} 、 I_{cr} ——分别为 B 类构件开裂截面换算截面的面积和惯性矩;

h_{pse} ——预应力钢筋、预应力碳纤维板与普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离, 应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018) 第 7.1.4 条的公式 (7.1.4-4) 计算, 计算时其分子中须增加 $\sigma_{p,f} A_{p,f} (h + a_{pe})$ 一项, 分母中应包括 $N_{po,f}$ 。

原构件开裂截面体内预应力钢筋的应力增量 $\Delta\sigma_{p,i}$ 为:

$$\Delta\sigma_{p,i} = \alpha_{EP} \left[\frac{N_{po}}{A_{cr}} - \frac{N_{po} e_{0N} (h_p - c)}{I_{cr}} \right] \quad (5.5.5-2)$$

式中 α_{EP} ——原构件预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值;

h_p ——截面受拉预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离。

原构件开裂截面预应力钢筋的最大拉应力 $\sigma_{p,i}$ 为:

$$\sigma_{p,i} = \sigma_{pe,i} + \Delta\sigma_{p,i} \quad (5.5.5-3)$$

式中 $\sigma_{pe,i}$ ——原构件预应力钢筋的永存预应力。

用预应力碳纤维板加固后的预应力混凝土 B 类构件开裂截面换算截面中性轴位置 c 应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018) 附录 J 中 (受压区高度 x) 的方法计算。

5.5.7 使用阶段预应力碳纤维板加固受弯构件正截面混凝土的压应力、预应力钢筋 (束) 中的拉应力和预应力碳纤维板中的拉应力应满足下列规定:

1) 受压区混凝土的最大压应力:

$$\left. \begin{array}{l} \text{未开裂构件: } \sigma_{kcp} \\ \text{容许开裂构件: } \sigma_{cc} \end{array} \right\} \leq 0.5 f_{ck} \quad (5.5.6-1)$$

2) 预应力碳纤维板的最大拉应力:

钢绞线、钢丝:

$$\left. \begin{array}{l} \text{未开裂构件: } \sigma_{p,i} \\ \text{容许开裂构件: } \sigma_{p,i} \end{array} \right\} \leq 0.65 f_{pk,i} \quad (5.5.6-2)$$

精轧螺纹钢:

$$\left. \begin{array}{l} \text{未开裂构件: } \sigma_{p,i} \\ \text{容许开裂构件: } \sigma_{p,i} \end{array} \right\} \leq 0.8 f_{pk,i} \quad (5.5.6-3)$$

3) 预应力碳纤维板的最大拉应力:

$$\left. \begin{array}{l} \text{未开裂构件: } \sigma_{p,f} \\ \text{容许开裂构件: } \sigma_{p,f} \end{array} \right\} \leq 0.65 f_{pk,f} \quad (5.5.6-4)$$

式中 $f_{pk,i}$ ——预应力筋 (束) 材料的抗拉强度标准值, 应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018) 表 3.2.2-2 取值。

$f_{pk,f}$ ——预应力碳纤维板的抗拉强度标准值, 应按表 4.2.1 取值。

σ_{cc} ——原构件混凝土开裂截面最大压应力;

$\sigma_{p,f}$ ——预应力碳纤维板中的最大拉应力， $\sigma_{p,f} = \sigma_{pe} + \Delta\sigma_{p,f}$ ；

$\sigma_{p,i}$ ——原构件截面的预应力钢筋的最大拉应力

其他符号意义同前。

5.6 构造要求

5.6.1 预应力碳纤维板锚具布置时，应尽量布置在主梁腹板下方底板上，锚具螺栓与钢筋及预应力钢束波纹管的间距不小于 2 倍的锚栓直径，相邻两套预应力碳纤维锚具及锚固系统净距应不小于锚具长度。

5.6.2 锚栓的最小间距和最小间距应根据锚栓产品的认证报告确定，最小间距不小于 6 倍的锚栓直径，最小边距不小于 10 倍的锚栓直径且不小于最大骨料粒径的 2 倍。

5.6.3 预应力碳纤维板的中间区段宜设置横向锚固卡板，锚具与第一个卡板之间的距离 L_1 不宜小于 1m，预应力碳纤维板端部与梁底之间的距离 h_2 不宜大于 3cm，可将锚具嵌入到混凝土梁体中以减小复合材料与梁底夹角。其余压板不少于 3 条，且间距布置相等，并应对压板、锚栓进行验算。预应力碳纤维板及压板位置示意参见下图。

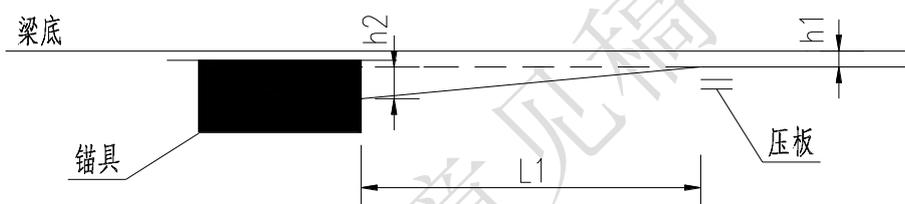


图 5.5.9 预应力碳纤维板及压板位置示意图

图中 h_1 ——碳纤维板与混凝土的粘结胶层厚度。

6 施工与控制

6.1 一般规定

6.1.1 采用预应力碳纤维板加固公路混凝土桥梁，施工前应对加固桥梁的技术状况进行复查并确定施工方案，然后将复查结果通知有关单位。在桥梁加固施工过程中，应加强观测与检查。

6.1.2 桥梁加固施工使用的材料，应具有国家相关管理部门认定的产品性能检测报告和产品合格证，其物理力学性能指标应满足设计要求，加固施工的材料在进场前要进行抽检，抽检指标满足相关规范要求。

6.1.3 张拉顶进设备在每次施工前应进行校准，对检验检测仪器进行系统标定。

6.1.4 施工完成后对碳纤维复合板及锚具表面进行防护。

6.1.5 预应力碳纤维板加固公路混凝土桥梁施工流程见图 6.1.6。

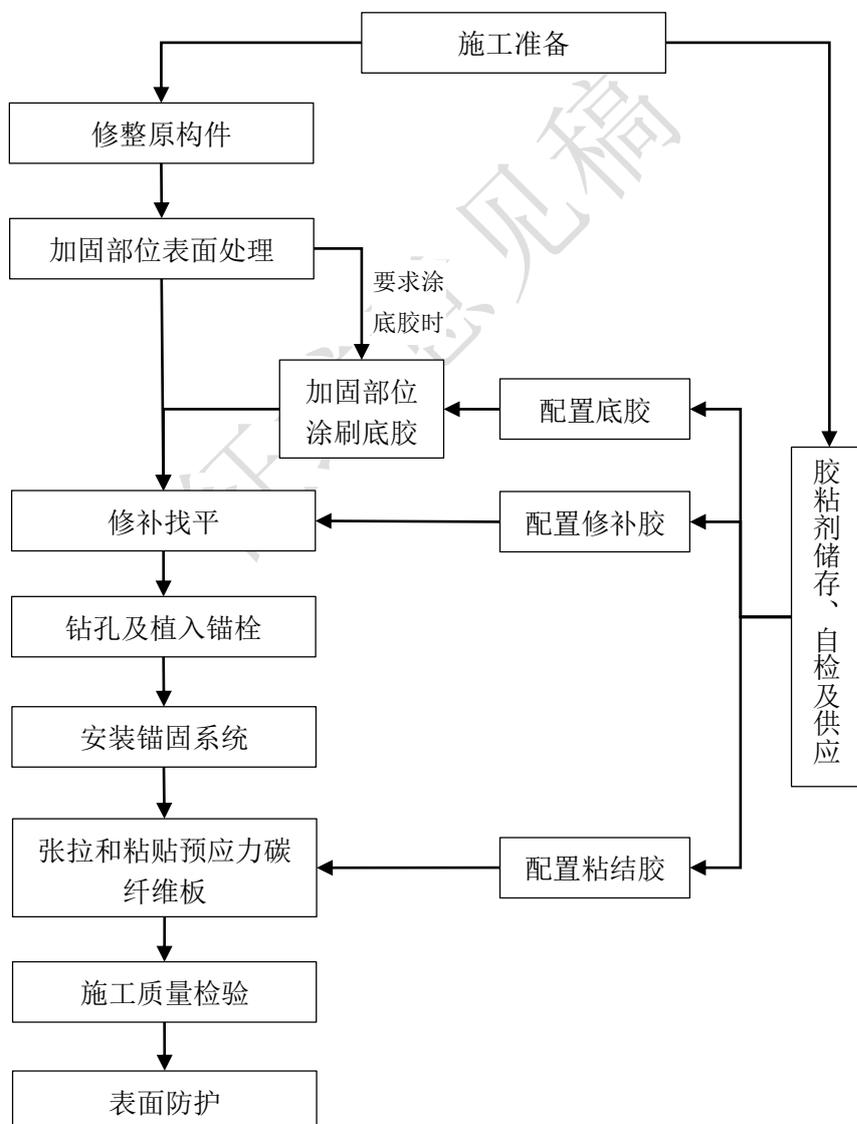


图 6.1.6 施工流程图

6.1.7 施工过程中应避免碳纤维板弯折，碳纤维板配套胶黏剂的原料应密封储存，远离火源，避免阳光直接照射。胶黏剂的配置和使用场所应保持通风良好。

6.2 病害处治

6.2.1 加固施工前，应对混凝土裂缝进行修补。当裂缝区的钢筋锈蚀时，应先对钢筋进行除锈，再进行裂缝修补。

条文说明：

混凝土裂缝一般分结构性裂缝和非结构性裂缝，对结构性裂缝，裂缝处理前应分析裂缝的成因，并采取相应的方法进行修补。

6.2.2 针对不同宽度的裂缝采用不同的修补方法，裂缝修补后进行表面处理。

表6.2.2 裂缝修补方法

序号	裂缝宽度	修补方法
1	$\leq 0.15\text{mm}$	表面封闭法
2	裂缝数量较多、宽度在0.1~0.15mm间	自动低压渗注法
3	裂缝较深、 $\geq 0.15\text{mm}$	压力灌注法

6.2.3 裂缝修补后，清除被加固构件表面的夹渣、疏松、蜂窝、麻面、腐蚀、碳化层等混凝土缺陷，露出混凝土石，并修复平整。对较大的孔洞、凹陷、露筋等部位进行修补。

条文说明：

对较大的孔洞、凹陷等应采用高粘结性能的修复材料修补平整。修复材料宜采用水性环氧类聚合物砂浆，以保证其与原混凝土粘结良好。

6.2.4 被粘贴的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，施工前应对混凝土表面进行干燥处理。

条文说明：

研究表明，在底胶表面接触干燥时，立即进入下一工序施工，其粘结效果最好，故做出本规定。底胶的指触干燥是指底胶刚达到凝胶的状态，即在施工现场以手指触摸胶层表面有凝胶的感觉，但却不会黏附手指的感觉。

6.3 钻孔及植入锚栓

6.3.1 锚栓施工前，应检测基材原钢筋位置，钻孔不得损伤原钢筋。当设计孔位与钢筋相碰或锚栓完全处于混凝土保护层内时，应通知设计单位，采取相应措施进行调整。

条文说明：

检测钢筋的位置是为了在钻孔时避开钢筋，以免影响锚固基材的原有强度及安全性；保护层过厚将导致锚栓未锚入保护层以下，达不到后锚固的构造要求。

6.3.2 锚孔应按照设计位置进行定位，锚孔深度、垂直度及锚孔直径允许偏差应满足表 6.3.2-1、表 6.3.2-2 的要求。

表6.3.2-1 锚栓钻孔质量要求

序号	检查项目	允许偏差
1	锚孔深度 (mm)	+5 0
2	锚孔垂直度	±2%
3	锚孔位置 (mm)	±5

表6.3.2-2 锚栓钻孔直径允许偏差 (mm)

钻孔直径	允许偏差	钻孔直径	允许偏差
≤14	+0.3	30~32	+0.6
	0		0
16~22	+0.4	34~37	+0.7
	0		0
24~28	+0.5	≥40	+0.8
	0		0

6.3.3 锚栓应按照设计和产品说明书的规定进行安装，锚固深度和控制位移允许偏差应符合设计和产品说明书中的规定，临近锚固区的废弃锚孔应采用高强度无收缩砂浆填充密实。

条文说明：

锚栓锚孔的清理是否到位对后锚固的承载力影响很大，所以本条对清孔方法、临时封闭等关键环节作了具体要求。

6.4 锚固系统安装

6.4.1 预应力碳纤维板-锚具组装前应清洁所有零件，不得有油渍、碰伤、锈蚀、划痕。

6.4.2 采用预应力碳纤维板加固时，不可搭接，应按设计尺寸一次性完成下料。

6.4.3 锚具宜根据锚栓实际位置进行现场配孔。

6.4.4 锚固系统的螺栓紧固检验应符合现行行业标准《桥梁用预应力碳纤维板—夹持式锚具》的相关要求。

6.5 预应力碳纤维板的张拉、粘贴

6.5.1 将碳纤维板表面擦拭干净，并立即涂抹配制好的胶黏剂，胶层应呈突起状。

6.5.2 安装张拉装置时，两端锚具及顶进装置中心连线与碳纤维板中心轴线偏差不得大于10mm。

条文说明：

安装张拉装置时，两端锚具及顶进装置要与混凝土梁中轴线准确对正，否则可能使结构发生扭转和侧弯，产生有害应力。

6.5.3 对预应力碳纤维板施加预应力时，应符合以下规定：

1 千斤顶安装时，张拉杆的张拉有效长度应保持一致，实施张拉时，千斤顶与碳纤维板、锚具

的中心线位于同一轴线上。

2 碳纤维板的张拉顺序及张拉控制应力应满足设计要求，张拉过程应采取分级张拉，测定并记录各级荷载值及相应的复合材料伸长量。

3 预应力碳纤维板采用张拉应力控制时，应以伸长量进行校核，实际伸长量与理论伸长量的差值应符合设计规定，设计未规定时，其偏差应控制在 $\pm 6\%$ 以内，否则应暂停张拉，待查明原因并采取调整措施予以调整后，方可继续张拉。

4 张拉过程中，非施工人员应尽量远离张拉现场，正对张拉装置两端的位置严禁站人。施工过程中如有异常声响，须立即停止操作，分析原因后方可进行后续操作。

5 预应力碳纤维板锚具的锚固，应在张拉控制应力处于稳定状态下进行。

条文说明：

预应力碳纤维板张拉后实际建立的预应力值对结构受力性能影响很大，施工过程必须予以保证，所以张拉力和伸长量都要进行控制，全部检查达到设计要求。预应力隐蔽工程反映预应力分项工程施工的综合质量，基层处理等工序隐蔽工程的检验与验收是为了确保有良好的粘贴碳纤维板。

碳纤维板是脆性材料，破坏比较突然，并伴有噼里啪啦的声音，施工过程中如有异常声响，须立即停止操作，分析原因后方可进行后续操作。

6.5.4 在张拉过程中，应对桥梁控制截面的应变及挠度进行监控。

6.5.5 胶黏剂配置时应采用配套的底层树脂、找平材料、浸渍树脂或 FRP 板粘接剂，并按产品使用说明书中规定的配比称量并置于容器中，用搅拌器搅拌至色泽均匀。在搅拌用容器内及搅拌器上不得有油污和杂质。应根据现场实际环境温度确定胶黏剂的每次拌合量，并按要求严格控制使用时间。

6.5.6 碳纤维板张拉后应使用压板挤压碳纤维板，使胶黏剂从复合材料两侧挤出，确保胶层密实无空洞。

6.5.7 预应力碳纤维板粘贴施工时应满足以下环境条件：

1 雨天或空气潮湿条件下不宜施工。如确需在潮湿的构件上施工，必须烘干构件表面或采用专门的胶黏剂。

2 碳纤维板粘贴宜在 5~35°C 环境温度条件下进行，胶黏剂的选用应满足使用环境温度的要求。

7 检验与验收

7.1 一般规定

7.1.1 碳纤维板、锚具及锚固组装件、配套胶黏剂及表面防护材料应按工程用量一次进场到位。进场时，应会同监理单位对产品合格证、产品质量出厂检验报告、中文标志和包装完整性进行检查。同时，应对产品的安全性能进行见证抽样复验。抽验结果应符合本规程第4章的要求。

7.1.2 采用预应力碳纤维板和配套胶黏剂对结构进行修复或加固时，应严格执行本规程第6章有关条款的规定，并按隐蔽工程的要求，对各工序进行检验及验收。如施工质量不符合本规程第6章有关条款的要求，应立即采取补救措施或返工。

7.1.3 碳纤维板和锚具表面防护的构造和施工应符合设计规定，其施工过程控制和施工质量验收，应符合国家现行有关标准的规定。

7.2 表面处理及植入锚栓

7.2.1 经修整露出骨料新面的混凝土加固粘贴部位，应进一步按设计要求修复平整，并采用结构修补胶对较大孔洞、凹面、露筋等缺陷进行修补、复原；对有段差、内转角的部位应抹成平滑的曲面；对构件截面的棱角，应打磨成圆弧半径不小于25mm的圆角。在完成以上加工后，应将混凝土表面清理干净，并保持干燥。修补后平整度允许偏差值应满足表7.2.1要求。

表7.2.1 平整度允许偏差值实测项目

项目	允许偏差	检查方法与频率
整体平整度 (mm)	5	钢尺丈量
阴阳角 (°)	5	尺量

检查数量：全数检查。

检验方法：观察、触摸，并辅助以圆弧样板（靠尺）检查。

7.2.2 粘贴碳纤维板部位的混凝土，其表层含水率不宜大于4%，对含水率超限的混凝土进行表面干燥处理。

检查数量：每根梁构件不少于1处。

检验方法：含水率测定仪

7.2.3 锚栓安装、紧固或固化完毕后，应进行锚固承载力现场检验。锚栓应按设计或产品安装说明书的要求，检查其锚固深度、预紧力控制值及位置偏差等。锚固质量符合混凝土结构后锚固技术规程中关于锚固承载力现场检验与评定的规定。

7.3 碳纤维板张拉、粘贴

7.3.1 预应力碳纤维板与锚具及锚固组装件安装后，预应力碳纤维板的受力长度偏差不应大于5mm。

检查数量：全数检查。

检验方法：钢尺测量。

7.3.2 底胶应按产品说明书提供的工艺条件配制，拌匀后应立即抽样检测底胶的初黏度。底胶指干时，其表面若有凸起处，应用细砂纸磨光，并应重刷一遍。底胶涂刷完毕应静置固化至指干时，才能继续施工。

检查数量：全数检查。

检验方法：监理人员旁站监督其配置并检查初黏度检测报告，若怀疑有溶剂或稀释剂，应取样送检。

7.3.3 结构胶粘剂拌合应采用低速搅拌机充分搅拌，拌好的胶液色泽应均匀、无气泡，初黏度应符合规范要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，并对照产品使用说明检查配制记录，测定初黏度并记录。

7.3.4 碳纤维板胶粘完毕后应静置固化，并按胶粘剂产品说明书规定的固化环境温度和固化时间进行养护。当达到 7d 时，采用 D 型邵氏硬度计检测胶层硬度，邵氏硬度 $H_D \geq 70$ 为合格。

检查数量：全数检查。

检验方法：D 型邵氏硬度计检测硬度。

7.3.5 胶粘剂以同一品种、同一批次的 3t 产品为一批，同一检验批应于 3 个不同点随机抽样，每个点抽样量不少于检验所需样品总量的 2/3，所检项目的检验结果均达到要求时，判定检验批为合格，否则为不合格。

7.3.6 预应力碳纤维板锚具检验项目、技术要求、检验频次应符合《桥梁用预应力碳纤维板—夹持式锚具》JTT 1267—2019 中第 7.2.1 条的规定。

7.4 施工质量检验

7.4.1 碳纤维板与混凝土之间的粘结质量可用锤击法或其他有效探测法进行检查。根据检查结果确认的总有效粘结面积不应小于总粘结面积的 95%，其检查方法应按《建筑结构加固工程施工质量验收规范》（GB50550—2010）第 10.4.1 条的规定进行。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查检测报告及处理记录。

7.4.2 碳纤维板与混凝土的粘结胶层厚度 h_1 应符合下列要求： $h_1 = (3.0 \pm 1.0)$ mm

检查数量：全数检查。

检验方法：每根构件检查 2 处，但应选在胶层最厚及最薄处，用刻度放大镜测量。

7.4.3 碳纤维板与基材混凝土的正拉粘结强度，必须进行见证抽样检验。检验结果符合表 7.4.3 的指标要求。

表 7.4.3 正拉粘结强度合格指标

检验项目	原构件混凝土强度等级	检验合格指标
------	------------	--------

正拉粘结强度及其破坏形式	C15~C20	≥ 1.5 MPa	混凝土内聚破坏
	≥ C45	≥ 2.5 MPa	

7.4.4 用钢尺测量碳纤维板的粘贴位置，与设计要求的位置相比，其中心线偏差不应大于 10mm；长度负误差不应大于 15mm。

检查数量：全数检查。

检验方法：钢尺测量。

7.4.5 施工结束后应对预应力碳纤维板进行逐条检验。如存在空鼓及缺胶现象，应使用刮板将胶黏剂填充于空隙处；如复合材料出现损坏现象，须进行更换。

7.5 工程验收

7.5.1 加固工程竣工验收程序和组织符合下列规定：

- 1 检验由监理工程师组织施工单位项目负责人和技术、安全、质量负责人进行验收，加固设计单位项目负责人及施工单位部门负责人也应参加。
- 2 加固工程验收合格后，建设单位负责办理有关建档和备案等事宜。
- 3 若参加竣工验收各方对加固工程的安全和质量有异议，应请当地工程质量监督机构协调处理。

7.5.2 加固工程的施工质量应按下列要求进行竣工验收：

- 1 加固工程施工质量应符合本规范、加固设计文件及相关专业验收标准的规定。
- 2 加固工程质量的验收应在施工单位自行检查评定合格的基础上进行。
- 3 隐蔽工程应在隐蔽前由施工单位通知有关单位进行验收，并已形成验收文件。
- 4 加固工程的质量验收应由验收人员现场检查，其检查结果的综合结论得到验收组成员共同确认。

7.5.3 加固工程竣工验收应按照国家相关施工验收规范要求执行，验收时宜包括以下文件：

- 1) 碳纤维复合材料、锚具及锚固组装件、配套胶黏剂及表面防护材料的产品合格证及相应测试报告。
- 2) 混凝土表面打磨、修补的隐蔽工程验收记录。
- 3) 粘贴部位、数量及空鼓检查记录。
- 4) 锚固组装件安装工程施工记录。
- 5) 锚固组装件安装工程质量检查记录表。
- 6) 锚栓拉拔试验报告。
- 7) 张拉设备配套标定报告。
- 8) 碳纤维复合材料安装坐标检查记录。

9) 碳纤维复合材料张拉记录。

10) 碳纤维复合材料表面防护封闭记录。

征求意见稿

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示由选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。