



CECS G: XXX: 20XX

中国工程建设标准化协会标准

公路混凝土桥梁预应力碳纤维索加固技术 规程

Technical Specification for Strengthening Highway Concrete
Bridges with Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer
Tendons

(征求意见稿)

XXX 出版社

公路混凝土桥梁预应力碳纤维索加固技术 规程

Technical Specification for Strengthening Highway Concrete
Bridges with Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer
Tendons

CECS G: XXX: 20XX

主编单位：温州市公路与运输管理中心

宁波大学

发布机构：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<2023 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》建标协字〔2023〕10 号的要求，由温州市公路与运输管理中心、宁波大学共同承担《公路混凝土桥梁预应力碳纤维索加固技术规程》（以下简称“本规程”）的制定工作。

编写组在总结浙江省内 40 余座桥梁多年来的加固工程经验和相关科研成果的基础上，参考国家和行业现行标准，广泛征求意见，完成了本规程的编制工作。

本规程分为 6 章，主要内容包括：1 总则、2 术语和符号、3 加固材料、4 加固设计、5 加固施工、6 质量检验。

请注意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。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于一般公路混凝土桥梁的预应力碳纤维索加固工程。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由宁波大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或诸葛萍（地址：浙江省宁波市江北区风华路 818 号；邮编：315211；传真：0574-87603821；电子邮箱：zhugeping@nbu.edu.cn），以便修订时研用。

主 编 单 位： 温州市公路与运输管理中心

宁波大学

参 编 单 位： 金华市公路港航与运输管理中心

浙江固周科技有限公司

宁波邦纤科技有限公司

浙江数智交院科技股份有限公司

中交瑞通路桥养护科技有限责任公司

中路公科（北京）咨询有限公司

宁波市交通规划设计研究院有限公司

文成县公路与运输管理中心

中交远洲交通科技集团有限公司

主 编： 吴秀勇 诸葛萍

主要参编人员： 吴闻秀 唐振宇 孙莉莉 刘秦睿 揭志羽 吕建伟 方文斌 蒋昌平 江科 周土瑶 刘惊方寅兵 钱登朝 刘洋 王松林 周林平 赵俊杰 朱小勇 詹志勇 王卫国 王朝晖 宗汇丰 赵军舰 邹睿

主 审： 黄福伟

参与审查人员： 谢峻 崔振山 江瑞龄 丰月华 张河锦 任碧云

目 录

1 总则	1
2 术语和符号	2
3 加固材料	7
3.1 一般规定	7
3.2 碳纤维索	7
3.3 胶粘剂	8
3.4 锚固装置	10
3.5 锚固件	11
4 加固设计	12
4.1 一般规定	12
4.2 持久状况承载能力极限状态计算	13
4.3 持久状况正常使用极限状态计算	19
4.4 持久状况下构件应力计算	23
4.5 锚固装置计算	26
4.6 构造要求	26
5 加固施工	29
5.1 一般规定	29
5.2 施工准备	29
5.3 加固构件表面处理	31
5.4 钻孔及植入锚栓	32

5.5 安装锚固装置	33
5.6 张拉预应力碳纤维索	34
5.7 表面防护	35
5.8 施工注意事项	35
6 质量检验	37
6.1 一般规定	37
6.2 材料检验	37
6.3 现场检验	37
本规程用词说明	40
引用标准名录	41

1 总则

1.0.1 为规范公路混凝土桥梁预应力碳纤维索加固设计工作,使其满足安全可靠、经久耐用、经济合理的要求,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路混凝土桥梁受弯及受剪构件预应力碳纤维索加固的设计、施工、检验与验收。

条文说明

根据预应力碳纤维索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加固。

1.0.3 桥梁加固前,应对加固方案进行社会、经济、技术等方面的综合比较论证。

1.0.4 预应力碳纤维索加固混凝土构件的设计使用年限不应低于 20 年。特殊情况下,经专项论证可适当调整。

条文说明

根据《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 及《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的规定,一般的建筑结构、桥梁结构的设计使用年限分别为 50 年或 100 年。对于可更换的构件(如桥梁的某些受力部件),其设计使用年限可低于主体结构,但需在设计文件中明确规定。本条规定的“20 年”是作为加固构件的最低要求,旨在确保加固后结构体系在相当长的一个大修周期内能够安全服役,而非要求其与新建主体结构的整体设计使用年限等同。

设定 20 年的最低使用年限,既能充分发挥碳纤维材料高强、耐腐、抗疲劳的技术优势,又能避免因盲目追求与新建结构同等的 50 年或 100 年期限而导致过高的防护成本或材料冗余。对于大部分既有建筑的加固改造需求,20 年通常被视为一个合理的使用目标或下一个大修周期。

当因特殊工程需求或特定服役环境(如临时性建筑、即将列入拆除计划的改造项目,或存在极端腐蚀环境等)需调整上述年限时,必须进行专项论证。

1.0.5 采用预应力碳纤维索对公路混凝土桥梁进行抗弯、抗剪加固时,除应符合本规程的规定外,尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 预应力碳纤维索

预应力碳纤维索由单根或多跟碳纤维复合材料筋组成，碳纤维筋由连续碳纤维丝束经树脂浸渍、拉挤固化成型的具有高抗拉强度和高弹性模量的索状制品，通过专用锚具施加并保持张拉应力，用于结构加固。

2.1.2 锚固装置

固定于原混凝土结构上，用于安装锚具、支撑张拉设备并承担预应力索张拉反力的钢质组合构件，通常由反力钢架、锚栓等组成。

2.1.3 植筋胶

一种专用的结构胶粘剂，用于将带肋钢筋或全螺纹螺杆种植于基材混凝土中，通过胶粘剂的粘结力实现后锚固连接。

2.1.4 粘钢胶

用于将加固钢板粘贴于混凝土构件表面，使其与原结构形成整体并共同受力的结构型深层胶粘剂，需具有较高的剪切强度和耐久性。

2.1.5 锚固装置

固定于原混凝土结构上，用于安装锚具、支撑张拉设备并承担预应力索张拉反力的钢质组合构件，通常由锚板、加劲肋、锚栓等组成。

2.2 符号

2.2.1 材料性能符号

E_c —— 原构件混凝土的弹性模量；

E_s —— 原构件中钢筋的弹性模量；

$E_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的弹性模量；

$E_{pb,e}$ —— 体外预应力受剪碳纤维索的弹性模量；

f_{cd} —— 原构件混凝土轴心抗压强度设计值；

$f_{cu,k}$ —— 原构件混凝土轴心抗压强度标准值；

f_{ck} —— 施加预应力时的实测混凝土抗压强度标准值；

f_{tk} —— 原构件混凝土的抗拉强度标准值；

f_{sd} 、 f'_{sd} —— 原构件内纵向受拉、压普通钢筋的抗拉强度设计值；

- f_{sk} 、 f'_{sk} —— 原构件内纵向受拉、压普通钢筋的抗拉强度标准值；
- $f_{pd,i}$ —— 原构件体内预应力钢筋的抗拉强度设计值；
- f_{pk} —— 原构件体内预应力钢筋的抗拉强度标准值；
- $f_{pd,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的抗拉强度设计值；
- f_{fk} —— 体外预应力碳纤维索的强度标准值；
- f_{sv} 、 f_{sd} 、 f_{pd} —— 原构件箍筋、普通弯起钢筋、体内预应力弯起钢筋抗拉强度设计值；
- $\Delta\varepsilon_{pb}$ —— 体外预应力受剪碳纤维索的应变增量。

2.2.2 作用、作用效应及承载力符号

- M_d —— 第二阶段构件加固后弯矩设计值；
- M_k —— 按荷载标准值组合计算的弯矩值；
- M_{G1k} —— 原构件自重引起的截面弯矩；
- M_{G2k} —— 原构件二期恒载引起的截面弯矩；
- V_d —— 斜截面受压端剪力的组合设计值；
- V_{cs} —— 钢筋混凝土梁承担的剪力(N)；
- V_p —— 体外预应力碳纤维索承担的剪力；
- $\sigma_{pu,e}$ —— 体外预应力碳纤维索水平段的极限应力；
- $\sigma_{pe,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的永存预应力；
- $\sigma_{pub,e}$ —— 体外预应力抗剪碳纤维索的极限应力；
- σ_{pb} —— 体外预应力受剪碳纤维索施加的预应力；
- $\Delta\sigma_{pb}$ —— 体外预应力受剪碳纤维索的应力增量；
- σ_{con} —— 体外预应力碳纤维索的张拉控制应力；
- σ_{pc} —— 体外预应力碳纤维索处的混凝土法向压应力；
- σ_l —— 预应力损失；
- $\Delta\sigma_{pe}$ —— 在先张拉的碳纤维索计算截面中心处，由后张拉每一批碳纤维索产生的混凝土法向应力；
- σ_{pc} 、 σ_{pt} —— 由预加力产生的混凝土法向压应力、拉应力；

- $\sigma_{pe,i}$ —— 受拉区体内预应力钢筋的有效预应力；
- $\sigma_{p,e}$ —— 在使用阶段，体外预应力碳纤维索的拉应力；
- $\Delta\sigma_{p,e}$ —— 预应力碳纤维索中由可变作用标准值引起的拉应力增量；
- σ_{kcp} 、 σ_{kcp} —— 使用阶段由荷载标准值产生的混凝土法向压应力、拉应力；
- N_{p0} —— 先张法构件中原预应力钢筋和原普通钢筋的合力；
- N_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的体内预应力钢筋、
体外预应力碳纤维索和普通钢筋的合力；
- N_{pe} —— 混凝土法向应力等于零时原普通钢筋、原体内预应力钢筋和新
增体外预应力碳纤维索的合力；
- N_e —— 在使用阶段，体外预应力碳纤维索产生的拉力。

2.2.3 几何参数符号

- B_0 —— 全截面的抗弯刚度；
- A_c —— 受弯构件的截面面积；
- A_s 、 A'_s —— 原构件体内纵向受拉、受压普通钢筋的截面面积；
- $A_{p,i}$ —— 原构件体内预应力钢筋的截面面积；
- $A_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的截面面积；
- $A_{pb,e}$ —— 体外预应力受剪碳纤维索的截面面积；
- A_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的截面面积；
- A_0 —— 构件加固后全截面面积；
- A_n —— 原构件净截面面积；
- A_{sv} 、 A_{sb} 、 A_{pb} —— 原构件箍筋、普通弯起钢筋、体内弯起预应力截面面积
- P —— 原构件斜截面内纵向受拉钢筋、预应力钢筋的配筋率；
- I_n —— 原构件全截面的净截面；
- I_0 —— 全截面换算截面惯性矩；
- I_{cr} —— 开裂截面换算截面惯性矩；
- I_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的截面惯性矩；
- e_{p0} 、 e_{pn} —— 原构件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；
- e_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的截面重心至体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索和普通钢筋合力点的距离；
- e_e —— 体外预应力碳纤维索合力点至换算截面重心轴的距离；
- e_{0n} —— N_{pe} 作用点至开裂截面重心轴的距离；
- e_n —— N_{pe} 作用点至截面受压边缘的距离；
- y_s —— 普通钢筋的重心至换算截面重心轴的距离；
- $y_{p,i}$ 、 $y_{p,e}$ —— 受拉区体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索至换算截面重心轴的距离；
- b'_f —— T 形或 I 形截面受压翼板的有效宽度；
- h'_f —— T 形或 I 形截面翼缘板的厚度；
- b —— 矩形截面宽度或 T 形截面的腹板宽度；
- a'_s —— 受压区普通钢筋的合力作用点至受压区边缘的距离；
- a —— 受拉区体内(外)预应力筋(索)和普通钢筋的合力作用点至受拉区边缘的距离；
- h_0 —— 截面的有效高度，即受拉区体内(外)预应力筋(索)和普通钢筋的合力作用点到受压区边缘的距离；
- h_s 、 $h_{p,i}$ —— 原构件中普通钢筋和体内预应力钢筋的合力作用点至受压区边缘的距离；
- $h_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的合力作用点到受压区边缘的距离；
- x —— 混凝土受压区等效矩形应力图高度；
- c —— 截面中性轴到受压区边缘的距离；
- c_{cr} —— 截面受压区边缘至开裂换算截面重心轴的距离；
- h_{pse} —— 体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索与普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离；
- h_p —— 体外预应力抗剪碳纤维索加固的高度；
- s_v —— 斜截面内的箍筋间距
- $l_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的有效长度；

- l_i —— 两端锚具间体外预应力碳纤维索的总长度；
 l —— 张拉端至锚固端之间的净距离；
 l_{pb} —— 体外预应力受剪碳纤维索计算长度；
 Δl_{pb} —— 体外预应力受剪碳纤维索长度方向上的长度变形增量；
 S_p —— 体外预应力碳纤维索加固的净间距；
 d_p —— 体外预应力碳纤维索加固的直径；
 θ_s 、 θ_i —— 原构件普通弯起钢筋的弯起角度、体内弯起预应力钢筋在斜截面受压端正截面处与梁轴线的夹角；
 φ —— 体外预应力碳纤维索的加固角度。

2.2.4 计算系数及其它符号

- γ_0 —— 桥梁结构重要性系数；
 $\gamma_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的安全系数；
 ξ_b —— 原构件的相对界限受压区高度；
 $\alpha_{Ep,i}$ —— 原构件体内预应力钢筋与混凝土的弹性模量的比值；
 $\alpha_{Ep,e}$ —— 碳纤维索的弹性模量与混凝土弹性模量的比值；
 N_s —— 构件失效时形成的塑性铰数目；
 β —— 截面等效矩形应力图形受压区高度 x 与实际受压区高度的比值；
 a —— 夹片式锚具变形和碳纤维索的内缩值；
 r —— 预应力碳纤维索的松弛系数；
 ρ —— 预应力碳纤维索和钢筋的等效配筋率；
 ΔT —— 年平均最高（或最低）温度与预应力碳纤维索张拉时的温差；
 α_p 、 α_c —— 预应力碳纤维索、混凝土的轴向温度膨胀系数；
 m —— 碳纤维索分批张拉的次数；
 α_1 —— 异号弯矩影响系数；
 α_2 —— 预应力提高系数；
 α_3 —— 受压翼缘的影响系数。

3 加固材料

3.1 一般规定

3.1.1 加固用预应力碳纤维索、胶粘剂、锚固装置及锚固件等材料的力学性能和耐久性能，应符合本规程及现行相关国家标准的规定。

3.1.2 被加固的混凝土结构构件，其现场实测混凝土强度等级不得低于 C30，且混凝土表面的正拉黏结强度不得低于 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，它与碳纤维索的黏结强度也很低，易发生剥离破坏，碳纤维索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。混凝土表面黏结强度现场试验检测方法见《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T J22）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）附录F。

3.1.3 采用预应力碳纤维索加固的锚具，其外观表面应平整洁净，无机械损伤，且不得有裂纹、结疤、折叠及夹杂等缺陷。

3.1.4 预应力碳纤维索、胶粘剂、锚固装置及锚固件等主要加固材料应配套使用，其兼容性应通过专项试验验证。

条文说明：

碳纤维索、锚具、胶粘剂三者之间存在复杂的力学与化学兼容性关系。例如，锚具的夹持方式需与碳纤维索的表面特性匹配，植筋胶需与锚栓及混凝土基材形成可靠的粘结体系。不同厂家、不同批次材料混用前，应进行系统的兼容性试验，确保协同工作性能满足设计要求。

3.1.5 加固材料的设计使用年限不应低于本规程第1.0.4条规定的加固结构设计使用年限，且应满足相应环境条件下的耐久性要求。

条文说明：

加固材料（尤其是胶粘剂和防护涂层）在长期服役过程中可能发生老化、劣化。材料的耐久性应与加固结构的目标使用年限相匹配。当缺乏长期耐久性数据时，应通过加速老化试验并结合工程经验进行综合评定。

3.2 碳纤维索

3.2.1 碳纤维索用的碳纤维应为连续纤维，其主要力学性能指标应满足表 3.2.1 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3.2.1 碳纤维索力学性能

性能项目 纤维类别	抗拉强度标准值 f_{fk} (MPa)	抗拉强度设计值 f_{td} (MPa)	弹性模量 E_f (MPa)	极限拉应变 $[\varepsilon_{fu}]$ (%)	拉应变设计值 (%)
索材	≥ 2100	1350	$\geq 1.55 \times 10^5$	≥ 1.5	0.9

条文说明:

本条文规定碳纤维索的抗拉强度标准值 f_{fk} 应按 95% 保证率确定。所谓 95%保证率,是指在相同生产与试验条件下,碳纤维索的抗拉强度实测值中有不低于 95%的样本值大于或等于该标准值。该取值原则与现行《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153)对材料强度标准值的规定相一致。表中给出抗拉强度标准值 $\geq 2100\text{MPa}$ 是基于国内外典型碳纤维索(如T700 级及以上等级原丝、热固性树脂基体、机械锚固系统)在标准试验条件下统计得到的下分位数,可作为本条文的最低合格判据。其余参数应符合现行《混凝土结构加固设计规范》要求。

3.2.2 加固用预应力碳纤维索应符合下列规定:

- (1) 碳纤维索的性能指标应按索的截面(含胶)计算,截面(含胶)面积应按实测圆面积计算。
- (2) 碳纤维连续丝束按规则排列,经环氧树脂浸渍模具拉挤固化成形,具有纤维复合增强效应的可施加体外预应力的束体。
- (3) 碳纤维筋应整丝连续成型,不得长短丝混制。
- (4) 碳纤维筋的直径应不小于 10mm,不宜大于 12.7mm。
- (5) 在正常(光)照度下,目测外观应均一、整齐,表面干净,不得有污染和破损。

条文说明

碳纤维索由单根或多根碳纤维复合材料筋组成,碳纤维筋直径过小或过大,施工质量均难以保证,所以在设计和施工时,都应尽量使用直径适宜的筋材。碳纤维筋内部的碳纤维原丝体积含量在 60%~70%时性能最好。

3.3 胶粘剂

3.3.1 预应力碳纤维筋抗弯加固用植筋胶应符合《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T5431-2025)的有关规定,植筋胶具体力学性能指标如表 3.3.1 所示:

表3.3.1 植筋胶安全性能指标

性能项目			性能要求
			A级胶性能要求
胶体性能	劈裂抗拉强度（MPa）		≥8.5
	抗压强度（MPa）		≥60
	抗弯强度（MPa）		≥50，且不得呈脆性破坏
黏结性能	钢-钢（钢套筒法）拉伸抗剪强度标准值（MPa）		≥10
	约束拉拔条件下带肋钢筋与混凝土的黏结强度（MPa）	C30（φ25 L=150mm）	≥11
		C60（φ25 L=125mm）	≥17
不挥发物含量（固体含量）（%）			≥99

注：表中性能指标除标有标准值者外，其余均为平均值。C30~C60 之间抗剪强度标准值按线性内插法计算。

3.3.2 预应力碳纤维筋抗弯加固粘钢胶应符合《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T-5431-2025) 的有关规定，其主要性能指标如表 3.3.2 所示。

表3.3.2 粘钢胶安全性能指标

性能项目		性能要求
胶体性能	抗拉强度 (MPa)	≥ 30
	抗拉弹性模量 (MPa)	≥ 3200
	伸长率 (%)	≥ 1.2
	抗压强度 (MPa)	≥ 65
	抗弯强度 (MPa)	≥ 45 (且不得呈脆性破坏)
粘结能力	钢-钢拉伸抗剪强度标准值 (MPa)	≥ 15
	钢-钢不均匀扯离强度 (kN/m)	—
	钢-钢黏结抗拉强度 (MPa)	≥ 33
	与混凝土的正拉粘结强度 (MPa)	≥ 2.5 , 且为混凝土内聚破坏
热变形温度 (°C)		≥ 65
不挥发物含量 (固体含量) (%)		≥ 99

注：表中性能指标除标有标准值者外，其余均为平均值。

3.4 锚固装置

3.4.1 预应力碳纤维索加固系统由碳纤维复合材料索、锚具和张拉装置（包括锚固装置、连接螺杆、锁固螺母、胶锚螺栓）组成，其结构示意图见图 3.4.1。



图 3.4.1-1 碳纤维索结构示意图

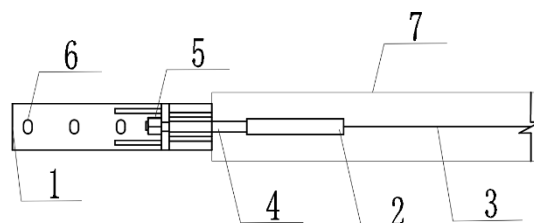


图 3.4.1-2 预应力碳纤维索张拉装置示意图

1—锚固装置；2—锚具；3—碳纤维索；4—连接螺杆；5—锁固螺母；6—锚栓；7—保护罩
条文说明

预应力碳纤维索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。为简化施工流程并提高工程可靠性，张拉装置不区分张拉端与固定端，采用统一的锚固装置。锚栓布置与构造应能可靠抵抗索体张拉过程中产生的全部外力。装置本身须具备足够的刚度与强度，在长期预应力以及梁体恒载作用下，不发生有害变形或失稳。

3.4.2 静载锚固性能试验应符合《预应力筋用锚具、夹具和连接器》（GB/T14370-2015）的有关规定。锚固效率系数可按下式计算：

$$\eta_a = \frac{F_{apu}}{F_{pm}} \quad (3.4.2)$$

式中： F_{apu} 为碳纤维索锚固体系实测极限拉力； F_{pm} 为实测碳纤维索平均极限抗拉力。

3.4.3 碳纤维索锚具的锚固效率系数不应低于 0.90。

3.4.4 锚具抗疲劳性能应满足承受超过 200 万次、应力幅为 80 MPa 的循环荷载作用的要求。

条文说明

本条规定旨在确保锚具在服役期内能够抵抗因车辆通行、风振、温度变化、预应力波动等引起的反复荷载作用，避免因疲劳破坏导致锚固体系失效，保障结构的安全性与耐久性。试验方法可参照现行相关标准（如GB/T 14370《预应力筋用锚具、夹具和连接器》）。

3.5 锚固件

3.5.1 加固用锚栓的材质宜为碳素钢、合金钢、不锈钢或高抗腐蚀不锈钢，其钢材的性能指标应符合《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T 5431-2025）的相关规定，具体见表 3.5.1。

表 3.5.1 加固用锚栓主要性能指标

性能项目	性能等级	抗拉强度标准值 (MPa)	抗拉强度设计值 (MPa)	伸长率 (%)
碳素钢及合金钢锚栓	4.8 级	320	250	14
	5.8 级	400	310	10
	6.8 级	480	370	8
	8.8 级	640	490	12
奥氏体不锈钢锚栓	50 ($d \leq 39\text{mm}$)	210	175	$0.6d$
	70 ($d \leq 24\text{mm}$)	450	370	$0.4d$
	80 ($d \leq 24\text{mm}$)	600	500	$0.3d$

注：表中抗拉强度标准值为锚栓抗拉屈服强度， d 为锚栓的公称直径。

4 加固设计

4.1 一般规定

4.1.1 预应力碳纤维索加固受弯构件按下列三种情况之一进行设计：

(1) 全预应力混凝土加固结构，在作用频遇组合下，控制截面边缘不得出现拉应力。在结构自重和碳纤维索张拉预应力作用下，受弯构件受拉截面边缘亦不得出现拉应力。

(2) 预应力碳纤维索加固A类混凝土结构，在作用短期效应组合下控制截面边缘可出现不超过限制的拉应力。

(3) 预应力碳纤维索加固B类混凝土结构，在作用短期效应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。

4.1.2 采用预应力碳纤维索对公路混凝土桥梁进行抗弯、抗剪加固时，应根据结构实际受力状态，按以下两个阶段进行设计计算：

(1) 第一阶段为新增荷载与原荷载结合的作用由原结构承担。

(2) 第二阶段为新增荷载与原荷载结合的作用由加固后的结构承担。

4.1.3 采用预应力碳纤维索对公路混凝土桥梁进行加固时，应进行承载能力极限状态、正常使用极限状态和短暂状态的验算，计算时应遵守下列规定：

(1) 构件达到承载能力极限状态时，按平截面假定确定预应力碳纤维索的拉应变；

(2) 碳纤维索拉应力等于拉应变与弹性模量的乘积，且碳纤维索的拉应变不应超过材料的允许拉应变，同时其极限拉应变设计值不应大于 0.01（此限制已考虑安全储备）。

条文说明

采用预应力碳纤维索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，依据碳纤维索加固梁的受力性质，对碳纤维索的应力应变关系、碳纤维索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。

4.1.4 采用预应力碳纤维索对公路混凝土桥梁进行抗弯加固时，承载能力极限状态下，正截面破坏应先于斜截面破坏发生。正截面承载力按碳纤维索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，若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索进行加固，由于碳纤维索施加预应力，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。预应力碳纤维索加固混凝土梁的理想破坏形态为碳纤维索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索或受压混凝土达到其设计强度值控制。

4.1.5 采用预应力碳纤维索对公路混凝土桥梁进行抗剪加固时，其破坏形式应为斜截面破坏先于正截面破坏，斜截面承载力按碳纤维索或受压混凝土达到其设计强度值控制。

4.1.6 预应力碳纤维索的张拉控制应力宜取材料抗拉强度标准值的 0.40-0.60 倍，且不应大于材料抗拉强度标准值的 0.65 倍。

条文说明

考虑到体外预应力结构的预应力损失比体内预应力筋小很多，可变作用引起的拉力增量相对于其有效预应力的比例也很小，而且体外预应力钢筋在正常使用阶段也不能长期处于高应力状态，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。

4.1.7 加固后，桥梁结构的承载能力及正常使用性能应满足现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 规定的公路-II 级汽车荷载作用要求，且不应低于原设计标准。当原设计标准低于现行规范要求时，应按现行规范执行。富余承载力须可承担后续设计使用年限内拟新增的荷载。

4.1.8 混凝土桥梁经过技术状况评定和承载能力鉴定，确认加固后能满足结构安全或正常使用要求时，方可进行加固。加固工作的内容及范围应根据评定结论和使用要求确定。

4.1.9 桥梁加固设计应与实际施工方法紧密结合。

4.2 持久状况承载能力极限状态计算

4.2.1 混凝土受弯构件可采用体外预应力碳纤维索加固时，正截面抗弯承载力计算应符合下列规定（图 4.2.1）：

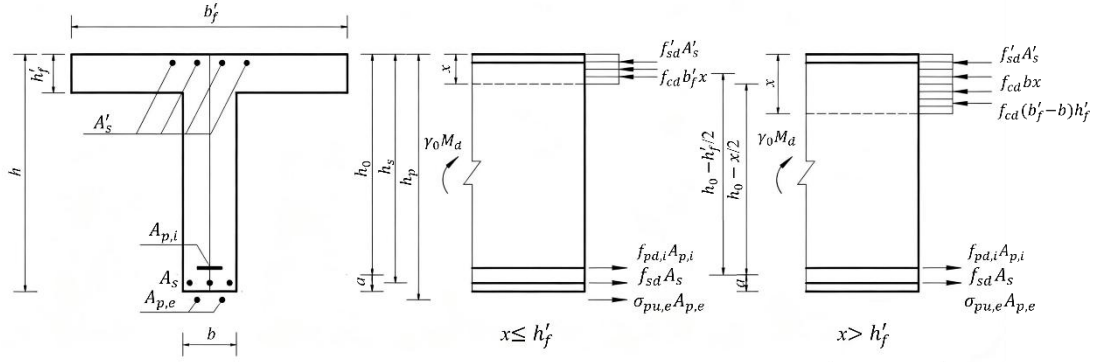


图 4.2.1 矩形、T 形截面梁正截面抗弯承载力计算图示

1 中性轴位于 T 形或 I 形截面翼板内($x \leq h'_f$)

$$f_{cd} b'_f x + f_{sd} A'_s = \sigma_{pu,e} A_{p,e} + f_{pd,i} A_{p,i} + f_{sd} A_s \quad (4.2.1-1)$$

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b'_f x (h_0 - \frac{x}{2}) \quad (4.2.1-2)$$

2 T 形或 I 形截面且中性轴位于截面腹板内

$$f_{cd} b x + f_{cd} (b'_f - b) h'_f + f_{sd} A'_s = \sigma_{pu,e} A_{p,e} + f_{pd,i} A_{p,i} + f_{sd} A_s \quad (4.2.1-3)$$

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f_{cd} (b'_f - b) h'_f (h_0 - \frac{h'_f}{2}) + f_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) \quad (4.2.1-4)$$

为确保加固后的混凝土梁仍为塑性破坏，上述公式中的截面受压区高度 x 应满足下列条件：

$$x \leq 0.85 \xi_b h_s \quad (4.2.1-5)$$

$$\text{或 } x \leq 0.85 \xi_b h_{p,i} \quad (4.2.1-6)$$

$$\text{且 } x \geq 2a'_s \quad (4.2.1-7)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构重要性系数；

M_d ——第二阶段构件加固后弯矩设计值(N·mm)；

f_{cd} ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)；

f_{sd} 、 f'_{sd} ——原构件内纵向受拉、压普通钢筋的抗拉强度设计值(MPa)；

$f_{pd,i}$ ——原构件体内预应力钢筋的抗拉强度设计值(MPa)；

$\sigma_{pu,e}$ ——当构件达到极限抗弯承载能力时，体外预应力碳纤维索水平段的极限应力(MPa)，按式(4.2.1-8)计算；

- A_s 、 A'_s —— 原构件体内纵向受拉、受压普通钢筋的截面面积(mm^2);
- $A_{p,i}$ —— 原构件体内预应力钢筋的截面面积(mm^2);
- $A_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的截面面积(mm^2);
- b'_f —— T 形或 I 形截面受压翼板的有效宽度(mm), 按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362—2018)第 4.3.3 条的规定取用;
- b —— 矩形截面宽度或 T 形截面的腹板宽度(mm);
- a'_s —— 受压区普通钢筋的合力作用点至受压区边缘的距离(mm);
- a —— 受拉区体内(外)预应力筋(索)和普通钢筋的合力作用点至受拉区边缘的距离(mm);
- h'_f —— T 形或 I 形截面翼缘板的厚度(mm);
- h_0 —— 截面的有效高度, 即受拉区体内(外)预应力筋(索)和普通钢筋的合力作用点到受压区边缘的距离(mm), $h_0 = h - a$;
- h_s 、 $h_{p,i}$ —— 分别为原构件中普通钢筋和体内预应力钢筋的合力作用点至受压区边缘的距离(mm);
- x —— 混凝土受压区等效矩形应力图高度(mm);
- ξ_b —— 原构件的相对界限受压区高度, 按《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T 5431-2025)第 3.3.8 条的规定取用。

条文说明

本条参照了《混凝土结构加固设计规范》(GB50367-2013)的有关规定, 给出了预应力碳纤维索加固受弯构件的相对界限受压区高度的控制值, 以避免加固量过大而发生具有超筋特征的脆性破坏。对于所有构件均采用原构件加固前相对界限受压区高度控制值的 0.85 倍; 满足此条件, 实际上已经规定了预应力碳纤维索的最大加固用量, 且在加固设计中便于控制。

采用预应力碳纤维索进行抗弯加固时, 构件的极限形态主要有以下几种:

- (1) 受拉钢筋屈服后, 碳纤维索的拉应变达到其允许拉应变 $[\epsilon_s]$, 受压区混凝土尚未完全压碎;
- (2) 受拉钢筋屈服后, 碳纤维索的拉应变没有达到其允许拉应变 $[\epsilon_s]$, 受压区混凝土压碎;
- (3) 受拉钢筋未屈服, 碳纤维索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, 碳纤维索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, 碳纤维索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)种破坏形态, 其主要是因为碳纤维索加固量较大、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

是碳纤维索的预应力水平较高造成的,可以通过控制预应力碳索的初始张拉力来避免此种破坏形态。式(4.2.1-1)至式 (4.2.1-4)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,此时碳纤维索中的应力较小,必须避免。式(4.2.1-1)至式 (4.2.1-2)为第(1)种破坏形态的抗弯承载力计算公式,此时碳纤维索充分作用,受压区高度较小。式(4.2.1-3)和式(4.2.1-4)为第(2)种破坏形态的抗弯承载力近似计算公式,此时碳纤维索未充分发挥作用,受压区高度较大。式(4.2.1-1)和式(4.2.1-3)为力的平衡方程,式(4.2.1-2)和式(4.2.1-4)从对受拉截面形心取矩的力矩平衡方程得到。

3 正截面抗弯承载力计算中,体外预应力碳纤维索的水平段极限应力 $\sigma_{pu,e}$ 按式(4.2.1-8)计算:

$$\sigma_{pu,e} = \sigma_{pe,e} + 0.03E_{p,e} \frac{h_{p,e}-c}{\gamma_{p,e}l_{p,e}} \leq f_{pd,e} \quad (4.2.1-8)$$

式中: $E_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的弹性模量(MPa);

$f_{pd,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的抗拉强度设计值(MPa);

$\sigma_{pe,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的永存预应力(MPa); 按式(4.3.4-2)计算;

$l_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的有效长度(mm), $l_{p,e} = \frac{2l_i}{N_s + 2}$;

N_s —— 构件失效时形成的塑性铰数目,对于简支梁 $N_s=0$,对于连续梁 $N_s=n-1$, n 为连续梁的跨数;

l_i —— 两端锚具间体外预应力碳纤维索的总长度(mm);

$\gamma_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的安全系数,取 $\gamma_{p,e} = 2.2$;

$h_{p,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的合力作用点到受压区边缘的距离(mm);

c —— 截面中性轴到受压区边缘的距离(mm),对于 T 形截面,

$$c = \frac{\sigma_{pu,e}A_{p,e} + f_{sk}A_s + f_{pk}A_{p,i} - f'_{sk}A'_s - 0.75f_{cu,k}\beta(b'_f - b)h'_f}{0.75f_{cu,k}\beta b}; \text{对于矩形}$$

$$\text{截面 } c = \frac{\sigma_{pu,e}A_{p,e} + f_{sk}A_s + f_{pk}A_p - f'_{sk}A'_s}{0.75f_{cu,k}\beta b};$$

β —— 截面等效矩形应力图形受压区高度 x 与实际受压区高度的比值,按《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T 5431-2025)第 3.3.7 条的规定取用;

$f_{cu,k}$ —— 原构件混凝土轴心抗压强度标准值(MPa);

f_{sk} 、 f'_{sk} —— 原构件内纵向受拉、压普通钢筋的抗拉强度标准值(MPa);

f_{pk} —— 原构件体内预应力钢筋的抗拉强度标准值(MPa);

4.2.2 预应力碳纤维索加固受弯构件抗剪验算按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）进行。根据碳纤维索加固梁抗剪破坏机理，体外碳纤维索加固钢筋混凝土梁的抗剪承载力可将碳纤维索类比为箍筋，其抗剪承载力与梁自身抗剪承载力叠加计算。计算图示见图 4.2.2。

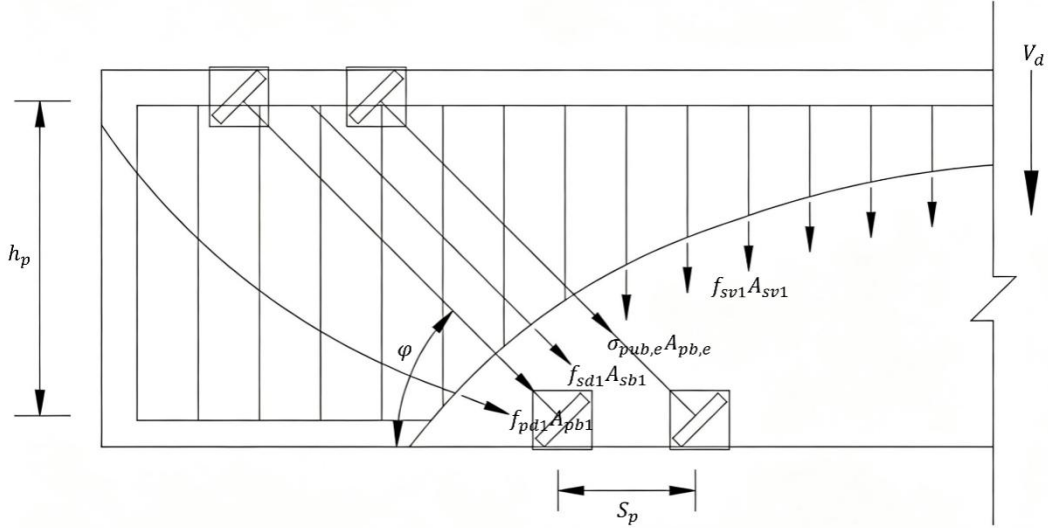


图 4.2.2 抗剪承载力加固计算图示

1 体外碳纤维索加固钢筋混凝土梁的抗剪承载力是钢筋混凝土梁抗剪承载力与碳纤维索贡献的抗剪承载力之和，即：

$$V = V_{cs} + V_p \quad (4.2.2-1)$$

$$V_{cs} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \times 0.45 b h_0 \sqrt{(2 + 0.6P) \sqrt{f_{cu,k}} (\rho_{sv} f_{sv})} + 0.75 f_{sd} \sum A_{sb} \sin \theta_s + 0.75 f_{pd} \sum A_{pb} \sin \theta_i \quad (4.2.2-2)$$

式中： V_{cs} —— 钢筋混凝土梁承担的剪力(N)；

V_p —— 体外预应力碳纤维索承担的剪力(N)

α_1 —— 异号弯矩影响系数，计算简支梁和连续梁近边支点段的抗剪承载力时 $\alpha_1 = 1.0$ ；计算连续梁和悬臂梁近中间支点段的抗剪承载力时， $\alpha_1 = 0.9$ ；

α_2 —— 预应力提高系数，构件为钢筋混凝土受弯构件 $\alpha_2 = 1.0$ ；全预应力混凝土受弯构件或预应力混凝土 A 类构件 $\alpha_2 = 1.25$ ；预应力混凝土 B 类受弯构件中由钢筋合力引起的截面弯矩与外弯矩的方向相同时，取 $\alpha_2 = 1.0$ ；

α_3 —— 受压翼缘的影响系数，对于 T 形截面构件，取 $\alpha_3 = 1.1$ ；对于矩形截面构件，取 $\alpha_3 = 1.0$ ；

P —— 原构件斜截面内纵向受拉钢筋、预应力钢筋的配筋率； $P = 100\rho$ ，

$\rho = (A_{s1} + A_{p1}) / (bh_0)$ ，当 $P > 2.5$ 时，取 $P = 2.5$ ；

ρ_{sv} —— 斜截面内箍筋配筋率， $\rho_{sv} = A_{sv} / (s_v b)$ ；

f_{sv} 、 f_{sd} 、 f_{pd} —— 原构件箍筋、普通弯起钢筋、体内预应力弯起钢筋抗拉强度设计值(MPa)；

A_{sv} 、 A_{sb} 、 A_{pb} —— 原构件箍筋、普通弯起钢筋、体内弯起预应力截面面积(mm²)；

θ_s 、 θ_i —— 原构件普通弯起钢筋的弯起角度、体内弯起预应力钢筋在斜截面受压端正截面处与梁轴线的夹角；

s_v —— 斜截面内的箍筋间距(mm)。

2 体外碳纤维索的抗剪承载力可类比为箍筋的抗剪承载力，一般表示为：

$$V_p = \varphi \frac{h_p}{S_p + d_p} \sigma_{pub,e} A_{pb,e} \quad (4.2.2-3)$$

式中： φ —— 体外预应力碳纤维索的加固角度，对 45°加固取 1.0，对 90°取 0.65，中间值采用线性内插法计算；

h_p —— 体外预应力碳纤维索加固的高度(mm)；

S_p —— 体外预应力碳纤维索加固的净间距(mm)；

d_p —— 体外预应力碳纤维索加固的直径(mm)；

$\sigma_{pub,e}$ —— 体外预应力碳纤维索的极限应力(MPa)，按式(4.2.2-4)计算；

$A_{pb,e}$ —— 体外预应力受剪碳纤维索的截面面积(mm²)。

3 如果设有转向块，体外预应力碳纤维索的极限应力 $\sigma_{pub,e}$ ，与转向块处的摩阻情况有关，可按式 (4.2.2-4) 计算：

$$\sigma_{pub,e} = \sigma_{pb} + \Delta\sigma_{pb} \quad (4.2.2-4)$$

$$\Delta\sigma_{pb} = E_{pb,e} \Delta\varepsilon_{pb} \quad (4.2.2-5)$$

$$\Delta\varepsilon_{pb} = \frac{\Delta l_{pb}}{l_{pb}} \quad (4.2.2-6)$$

式中： σ_{pb} —— 体外预应力受剪碳纤维索施加的预应力；

$\Delta\sigma_{pb}$ —— 体外预应力受剪碳纤维索的应力增量；

$E_{pb,e}$ —— 体外预应力受剪碳纤维索的弹性模量；

$\Delta\varepsilon_{pb}$ —— 体外预应力受剪碳纤维索的应变增量；

Δl_{pb} —— 体外预应力受剪碳纤维索长度方向上的长度变形增量即锚固端之

间的相对变形；

l_{pb} —— 体外预应力受剪碳纤维索计算长度。

条文说明

体外预应力碳纤维索抗剪加固构件有短束和弯起加固长束两种构造形式，本规程中，抗剪加固用体外预应力碳纤维索的布置方法为：在开裂斜截面处布置短束碳纤维索，不采用体外纵向碳纤维索弯起提供抗剪作用。该布置方式能使短束碳纤维索更有针对性地加固开裂斜截面，从而有效提高该区域的抗剪能力。其中长束的转向装置设计及体外纵向碳纤维索弯起提供抗剪作用的计算应按现行《公路桥梁加固设计规范》(JTG 5431-2025)中新增预应力加固构件的有关规定进行设计计算。

4 体外预应力碳纤维索加固的矩形、T 形和 I 形截面的受弯构件，其抗剪截面应满足(式 4.2.2-7)的要求：

$$\gamma_0 V_d - \sigma_{pub,e} A_{pb,e} \sin \theta_e \leq 0.51 \sqrt{f_{cu,k}} b h_0 \quad (4.2.2-7)$$

式中： V_d —— 斜截面受压端剪力的组合设计值(N)；

b —— 相应于剪力组合设计值处的矩形截面宽度或 T 形、I 形截面腹板宽度(mm)；

h_0 —— 相应于剪力组合设计值处的截面有效高度，即纵向受拉钢筋合力作用点至受压边缘的距离(mm)；

其他符号意义同前。

4.3 持久状况正常使用极限状态计算

4.3.1 钢筋混凝土及预应力混凝土受弯构件采用体外预应力加固时，其构件设计应符合下列规定：

1 体外预应力加固后满足预应力混凝土受弯构件关于抗裂性设计要求时，应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)的有关规定进行构件设计。

2 体外预应力加固后不满足现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)的 B 类预应力混凝土受弯构件关于抗裂性设计要求时，可仅按 B 类预应力混凝土受弯构件验算裂缝宽度，且裂缝宽度不应超过限值。

4.3.2 体外预应力加固后的预应力混凝土受弯构件，计算弹性阶段应力时，构件截面性质的采用除应符合现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)的有关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 全预应力混凝土构件或预应力混凝土 A 类构件采用全截面；
- 2 预应力混凝土 B 类构件采用开裂截面。

条文说明

不论原构件是钢筋混凝土梁还是预应力混凝土梁,只要其加固后为全预应力混凝土或预应力混凝土 A 类构件,加固后的梁体混凝土截面不开裂,均采用全截面的换算截面几何性质,其截面应力计算需按不开裂的偏心受压构件考虑。

4.3.3 当采用预应力碳纤维索对公路混凝土桥梁受弯构件或受剪构件进行加固时,首先应明确施加的预应力大小,预应力损失应考虑表 4.3.3 所列各项因素。预应力损失宜根据实测数据确定;当无可靠实测数据时,可按本节的有关规定进行计算。

表 4.3.3 体外预应力碳纤维索的预应力损失影响因素

预应力损失影响因素	预应力碳纤维索
锚具变形、预应力材料内缩	σ_{l1}
应力松弛	σ_{l2}
季节温差	σ_{l3}
分批张拉引起混凝土弹性压缩损失	σ_{l4}

(1) 锚具变形和碳纤维索内缩引起的预应力损失值 σ_{l1} :

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_{p,e} \quad (4.3.3-1)$$

式中: a —— 夹片式锚具变形和碳纤维索的内缩值(mm),按 1mm 取值,其他锚具形式内缩值根据实验确定;

l —— 张拉端至锚固端之间的净距离(mm);

(2) 预应力碳纤维索的应力松弛损失值 σ_{l2} :

$$\sigma_{l2} = r \sigma_{con} \quad (4.3.3-2)$$

式中: r —— 预应力碳纤维索的松弛系数,可近似取 0.06;

σ_{con} —— 预应力碳纤维索的张拉控制应力(MPa),按本规程第 4.1.6 条的规定取用。

条文说明

目前国内关于预应力碳纤维索的长期松弛研究仍很少,且局限在 1000h。《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367-2013)在松弛损失计算时的建议值为 $r=2.2\%$;柳州 OVM 公司的相关试验为 $r=3.8\%$,且与其张拉控制应力有关;广西大学邓朗妮博士的试验结果表明,预应力碳纤维板加固试验梁张拉 7d 后的预应力损失量大约在 2.4%~7.7% 范围内,且张拉应力越高,其相对应力损失量越小,其建议的碳纤维板的预应力的总损失量的设计估算值可在 10%~15% 范围内;日本最新的相关研究表明,碳纤维筋的长期松弛可以达到 6%。宁波大学陶国城研

究碳纤维索预应力损失表明碳纤维索松弛损失率随着初始预应力水平的增大而增大,并且松弛损失的绝大部分损失在预应力施加后的100h内完成,其值一般在1%-4%之间。在上述数据的基础上,由于预应力碳纤维索相较于预应力碳纤维板不依赖胶黏剂与锚具配合,专用夹具锚固更可靠,偏于安全地建议取为 $r=6\%$,待将来有更多的松弛试验数据时再作调整。

(3) 由季节温差造成的温差损失值 σ_{l3} :

$$\sigma_{l3} = \Delta T [\alpha_p - \alpha_c] E_{p,e} \quad (4.3.3-3)$$

式中: ΔT —— 年平均最高(或最低)温度与预应力碳纤维索张拉时的温差($^{\circ}\text{C}$);

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

(4) 分批张拉引起的构件混凝土弹性压缩预应力损失 σ_{l4} :

弹性压缩损失的平均值可近似按下式估算:

$$\sigma_{l4} = \frac{m-1}{2} \alpha_{Ep,e} \Delta \sigma_{pe} \quad (4.3.3-4)$$

式中: $\alpha_{Ep,e}$ —— 碳纤维索的弹性模量与混凝土弹性模量的比值;

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

m —— 碳纤维索分批张拉的次数。

预应力碳纤维索的应力损失总量为:

$$\sigma_l = \sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l3} + \sigma_{l4} \quad (4.3.3-5)$$

条文说明

考虑到被加固桥梁通常已使用了一定年限,混凝土的收缩、徐变已基本完成,因此本规程不再考虑混凝土收缩、徐变引起的碳纤维索预应力损失。公式4.3.3-3~4.3.3-5的计算方法参考了国家标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362中关于预应力钢筋的温差损失、张拉预应力碳纤维索引起混凝土弹性压缩而产生的预应力损失计算公式,并结合了碳纤维索线弹性、无松弛、无徐变(与传统预应力钢材相比可忽略其自身徐变)的材料特性进行了适当简化。

4.3.4 由预加力产生的混凝土法向应力及相应阶段预应力碳纤维索的应力,应按下列公式计算:

由预加力产生的混凝土法向压应力 σ_{pc} 和拉应力 σ_{pt} :

$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_p} \pm \frac{N_p e_p}{I_p} y_p \quad (4.3.4-1)$$

相应阶段体外预应力碳纤维索的有效预应力，即永存预应力：

$$\sigma_{pe,e} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (4.3.4-2)$$

式中： N_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索和普通钢筋的合力(N)，按式(4.3.5-1)计算；

A_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的截面面积(mm²)，考虑管道影响，采用换算截面；

I_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的截面惯性矩(mm⁴)，考虑管道压浆的影响，采用换算截面；

e_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的截面重心至体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索和普通钢筋合力点的距离(mm)，按式(4.3.5-2)计算；

y_p —— 后张法体内和体外混合预应力混凝土构件的截面重心至计算纤维处距离(mm)；

4.3.5 后张法体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索和普通钢筋的合力及合力偏心距应按下列公式计算：

$$N_p = \sigma_{pe,i} A_{p,i} + \sigma_{pe,e} A_{p,e} - \sigma_{l3} A_s \quad (4.3.5-1)$$

$$e_p = \frac{\sigma_{pe,i} A_{p,i} y_{p,i} + \sigma_{pe,e} A_{p,e} y_{p,e} - \sigma_{l3} A_s y_s}{N_p} \quad (4.3.5-2)$$

式中： $\sigma_{pe,i}$ —— 受拉区体内预应力钢筋的有效预应力(MPa)；

$A_{p,i}$ 、 $A_{p,e}$ —— 受拉区体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索的截面面积(mm²)；

$y_{p,i}$ 、 $y_{p,e}$ 、 y_s —— 受拉区体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索、普通钢筋的重心至换算截面重心轴的距离(mm)；

4.3.6 预应力碳纤维索加固受弯构件抗裂性验算：

(1) 全预应力碳纤维索加固混凝土结构和 A 类预应力碳纤维索加固混凝土结构，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 类预应力碳纤维索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) 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。
开裂弯矩计算方法按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）第6.5节执行。

4.3.6 预应力碳纤维索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按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）第 6.5 节执行。

4.4 持久状况下构件应力计算

4.4.1 持久状况设计的预应力碳纤维索加固的混凝土构件，应计算其永存应力。
计算上述应力时，作用（或荷载）应取其标准值，汽车荷载尚应考虑其冲击系数。

4.4.2 对预应力碳纤维索加固后的构件，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）第 7.1.2～7.1.4 和第 7.1.6 条进行。使用荷载作用阶段，预应力碳纤维索中的最大拉应力应按下列公式计算：

$$\sigma_{p,e} = \sigma_{pe,e} + \Delta\sigma_{p,e} \text{ 或 } \sigma_{p,e} = \frac{N_e}{A_{p,e}} \quad (4.4.2-1)$$

式中： $\sigma_{p,e}$ —— 在使用阶段，体外预应力碳纤维索的拉应力(MPa)；

$\Delta\sigma_{p,e}$ —— 预应力碳纤维索中由可变作用标准值引起的拉应力增量(MPa)，按第 4.4.3 条中的方法计算；

N_e —— 在使用阶段，体外预应力碳纤维索产生的拉力。

4.4.3 对简支体系的加固，预应力碳纤维索中的应力增量可按照《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T 5431-2025）中的方法计算。

4.4.4 对连续体系的加固，预应力碳纤维索中的应力增量应考虑二次矩效应。

4.4.5 混凝土受弯构件采用体外预应力加固后为全预应力混凝土构件或 A 类预应力混凝土构件时，由作用标准值产生的混凝土法向压应力和原构件内预应力钢筋应力增量计算应符合下列规定：

1 原构件为钢筋混凝土受弯构件时，混凝土法向应力可按式(4.4.5-1)计算：

$$\begin{aligned} \sigma_{kcp} &= \frac{N_e}{A_0} \pm \frac{N_e e_e}{I_0} y_0 \pm \frac{M_k}{I_0} y_0 \\ \sigma_{ktp} & \end{aligned} \quad (4.4.5-1)$$

式中： σ_{kcp} —— 使用阶段由荷载标准值产生的混凝土法向压应力(MPa)；

σ_{ktp} —— 使用阶段由荷载标准值产生的混凝土法向拉应力(MPa)；

M_k —— 按荷载标准值组合计算的弯矩值(N·mm)；

A_0 —— 构件加固后全截面面积(mm²)；

I_0 —— 构件加固后全截面换算截面惯性矩(mm^4);

e_e —— 体外预应力碳纤维索合力点至换算截面重心轴的距离(mm);

y_0 —— 原构件换算截面重心轴至受压区或受拉区计算碳纤维索处的距离(mm)。

2 原构件为预应力混凝土构件时, 在体内预应力筋、体外预应力碳纤维索和作用(或荷载)标准值组合的共同作用下, 原构件的混凝土法向应力可按式(4.4.5-2)、式(4.4.5-3)计算:

先张法:

$$\begin{aligned} \sigma_{kcp} &= \frac{N_e + N_{p0}}{A_0} \mp \frac{N_e e_e}{I_0} y_0 \mp \frac{N_{p0} e_{p0}}{I_0} y_0 \mp \frac{M_k}{I_0} y_0 \\ \sigma_{ktp} & \end{aligned} \quad (4.4.5-2)$$

后张法

$$\begin{aligned} \sigma_{kcp} &= \frac{N_e}{A_0} + \frac{N_p}{A_n} \mp \frac{N_e e_e}{I_0} y_0 \mp \frac{N_p e_{pn}}{I_0} y_n \mp \frac{M_k}{I_0} y_0 \\ \sigma_{ktp} & \end{aligned} \quad (4.4.5-3)$$

式中: N_{p0} —— 先张法构件中原预应力钢筋和原普通钢筋的合力(N), 按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362-2018)式(6.1.7-1)进行计算;

N_p —— 后张法构件中原预应力钢筋和原普通钢筋的合力(N), 按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362-2018)式(6.1.7-3)进行计算;

A_n —— 原构件净截面面积(mm^2);

σ_{kcp} 、 σ_{ktp} —— 原构件混凝土截面由体内、体外预应力、作用(或荷载)标准值组合及预加力引起的法向压、拉应力(MPa);

e_{p0} 、 e_{pn} —— 分别为原构件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(mm), 按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362-2018)式(6.1.7-2)或式(6.1.7-4)进行计算。

3 原构件为预应力混凝土构件时, 原构件内预应力钢筋的最大应力可按式(4.4.5-4)计算:

$$\sigma_{p,i} = \sigma_{pe,i} + \alpha_{Ep} \left(\frac{M_k}{I_0} y_0 \right) \quad (4.4.5-4)$$

式中: $\sigma_{pe,i}$ —— 原构件体内预应力筋的永存预应力(MPa), 应包括体外预应力对其

引起的弹性压缩影响；

α_{Ep} —— 原构件体内预应力钢筋与混凝土的弹性模量之比， $\alpha_{Ep} = E_p / E_c$ 。

条文说明

预应力钢筋在相应作用引起结构变形后张拉时，计算时不计入相应作用标准值的影响。

4.4.6 混凝土受弯构件采用体外预应力加固后为 B 类预应力混凝土构件时，由作用标准值产生的混凝土法向压应力和原构件内预应力钢筋应力增量计算应符合下列规定：

1 开裂截面混凝土法向压应力 σ_{cc} 可按式(4.4.6-1)计算：

$$\sigma_{cc} = \frac{N_{pe}}{A_{cr}} + \frac{N_{pe}e_{0n}c}{I_{cr}} \quad (4.4.6-1)$$

式中： N_{pe} —— 混凝土法向应力等于零时原普通钢筋、原体内预应力钢筋和新增体外预应力碳纤维索的合力(N)，应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362-2018)第 6.1.6 条和第 6.1.7 条的公式计算，计算中需增加一项体外预应力碳纤维索的拉力 N_e ；

e_{0n} —— N_{pe} 作用点至开裂截面重心轴的距离(mm)， $e_{0n} = e_n + c$ ；

e_n —— N_{pe} 作用点至截面受压边缘的距离(mm)， N_{pe} 位于截面之外为正， N_{p0} 位于截面之内为负， $e_n = (M_k) / N_{pe} - h_{pse}$ ；

c —— 截面受压区边缘至开裂换算截面重心轴的距离(mm)；

I_{cr} —— B 类构件开裂截面换算截面惯性矩(mm⁴)；

h_{pse} —— 体内预应力钢筋、体外预应力碳纤维索与普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离(mm)，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)的式(7.1.4-4)计算，计算时其分子中须增加 $\sigma_{p,e}A_{p,e}(h + a_{p,e})$ 一项，分母中应包括 N_e 。

2 开裂截面原体内预应力钢筋的应力增量 $\Delta\sigma_{p,i}$ 可按式(4.4.6-2)计算：

$$\Delta\sigma_{p,i} = \alpha_{Ep} \left[\frac{N_{pe}}{A_{cr}} - \frac{N_{pe}e_{0n}(h_{p,i} - c)}{I_{cr}} \right] \quad (4.4.6-2)$$

式中： $h_{p,i}$ —— 原构件受拉预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离(mm)。

3 开裂截面原体内预应力钢筋的最大拉应力 $\sigma_{p,i}$ 可按式(4.4.6-3)和式(4.4.6-4)计算：

原构件为先张法构件：

$$\sigma_{p,i} = \sigma_{pe,i} + \Delta\sigma_{p,i} + \sigma_{l4,i} \quad (4.4.6-3)$$

原构件为后张法构件：

$$\sigma_{p,i} = \sigma_{pe,i} + \Delta\sigma_{p,i} + \alpha_{Ep}\sigma_{pc} - \alpha_{Ep}\left(\frac{M_{G1k}}{I_n}y_{pn} + \frac{M_{G2k}}{I_0}y_{p0}\right) \quad (4.4.6-4)$$

式中： M_{G1k} —— 原构件自重引起的截面弯矩(N·mm)；

M_{G2k} —— 原构件二期恒载引起的截面弯矩(N·mm)；

I_n 、 I_0 —— 分别为原构件全截面的净截面和换算截面惯性矩(mm)；

y_{pn} 、 y_{p0} —— 分别为原构件中预应力钢筋重心至净截面和换算截面重心的距离(mm)。

4.4.7 使用阶段体外预应力碳纤维索加固受弯构件正截面混凝土的压应力、预应力钢筋中的拉应力应符合现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362)的有关规定。预应力碳纤维索的最大拉应力应满足式(4.4.7)的要求：

$$\sigma_{f,e} \leq 0.5f_{fk} \quad (4.4.7)$$

式中： f_{fk} —— 碳纤维索的强度标准值(MPa)。

4.4.8 混凝土受弯构件体外预应力加固后，由作用标准值和预加力产生的主压应力、主拉应力应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362)的有关规定进行计算。

4.5 锚固装置计算

4.5.1 锚固装置的设计应满足强度、刚度和稳定性要求，其与混凝土基材的连接应按现行行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》(JGJ 145)的有关规定进行锚固承载力计算。

4.5.2 锚栓应承受预应力张拉力及长期使用荷载的组合效应，单根锚栓的设计拉力不应大于其抗拉承载力设计值，设计剪力不应大于其抗剪承载力设计值，拉剪复合受力时应符合 JGJ 145 的相关规定。

4.5.3 锚固装置中的锚板、加劲肋及连接焊缝应按现行国家标准《钢结构设计标准》(GB 50017)进行承载力验算。

条文说明

锚固装置是预应力碳纤维索加固体系中的关键传力构件，其可靠性直接影响加固效果。锚栓承载力的计算应考虑群锚效应、边距及间距影响，计算方法及构造要求可参照 JGJ 145 执行；钢构件的验算参照 GB 50017 执行。本规程对锚固装置的具体计算不再展开，设计时应按上述标准执行。

4.6 构造要求

4.6.1 预应力碳纤维索锚具布置时，应布置在主梁腹板下方底板上，连接锚具用的锚固装置植筋螺栓应避开原有普通钢筋，且与预应力钢束波纹管的净距不小于 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。

4.6.2 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，设计应对所用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。

4.6.3 群锚锚栓的最小间距和最小边距应根据锚栓产品的认证报告确定，最小间距不小于 6 倍的锚栓外径，最小边距遵循《混凝土结构后锚固技术规程》的相关规定且不小于最大骨料粒径的 2 倍。

4.6.4 加固的碳纤维索必须与构件牢固地连接在一起，变形协调，共同受力，且两端应设置锚具。

4.6.5 必要时可采用薄壁镀锌钢板或不锈钢板作为碳纤维索和锚具的保护罩。

4.6.6 预应力碳纤维索加固用锚具宜采用物理连接型锚具，锚具内不宜含有化学胶粘剂。

4.6.7 碳纤维索及锚具宜在工厂组装。

4.6.8 锚具应满足分级张拉和放张工艺的要求。

4.6.9 化学锚栓的螺杆应为普通全牙螺杆或特殊倒锥形螺杆。

条文说明：

对于化学锚栓，螺杆的形态直接影响其受力机理：普通全牙螺杆通过全螺纹结构与化学胶粘剂的充分结合实现均布粘结应力；而特殊倒锥形螺杆则利用其端部倒锥构造，在承受拉力时将荷载由胶粘剂传递至基材混凝土，形成明确的机械锁固效应，避免脆性破坏。两类螺杆均能有效保证锚固连接的延性与安全度，因此规定化学锚栓的螺杆应为上述两种形式之一，不得采用其他形式的非标光杆或局部螺纹杆件。

4.6.10 承重构件用的锚栓，应采用化学锚栓或扩底型机械锚栓。不得采用膨胀型锚栓作为桥梁主要承重构件的连接件。

条文说明

膨胀型锚栓依靠锥体螺杆推进时，使套筒或膨胀片径向胀开，对孔壁产生挤压力，通过孔壁混凝土承受的环向拉应力来实现锚固。该锚固力对混凝土基材的密实度及孔壁质量高度敏感，且长期承受动荷载或温度变化时，易发生应力松弛、蠕变甚至锚固失效。尤其在桥梁主要承重构件（如主梁、墩柱、拱肋等）中，承受车辆荷载、风振、温度应力等复杂交变作用，膨胀型锚栓的锚固力会随时间显著衰减，存在突发脆性破坏的风险。此外，在开裂混凝土区

段，膨胀锚栓的承载力将大幅下降，难以保证桥梁结构在极限状态下的安全。因此，为确保桥梁主要承重构件的连接安全与耐久，严禁采用膨胀型锚栓，而应优先选用能形成可靠机械锁固或化学粘结并适应动荷载性能的化学锚栓或扩底型机械锚栓。

5 加固施工

5.1 一般规定

5.1.1 采用预应力碳纤维索加固公路混凝土桥梁，加固施工前应比对核查历年桥梁定检报告，根据桥梁病害发展情况指导施工，在桥梁的加固施工过程中，应加强观测与检查，及时反馈信息指导施工。

5.1.2 应按照设计文件和技术规范要求编制实施性施工组织设计或专项方案；桥梁加固施工对交通有影响时，应编制交通组织方案。

5.1.3 加固施工使用的材料应符合下列规定：

(1) 碳纤维索、锚固装置、结构胶粘剂等主要材料应具有产品性能检测报告和合格证，其物理力学性能指标应满足设计要求。

(2) 主要材料进场前应按国家及行业现行有关标准进行复验，合格后方可使用。

(3) 预应力碳纤维索体外束与混凝土结构连接的锚栓，其强度等级不应低于 8.8 级；植入用结构胶宜采用环氧类植筋胶。

条文说明

锚栓强度不低于 8.8 级可保证预应力张拉及长期使用中的连接可靠性与抗松弛性能；环氧类植筋胶具有强度高、收缩小、耐久性好的特点，适用于预应力体系锚固连接。

5.1.4 预应力碳纤维索体外束在安装过程中，应防止碳纤维索受到机械损伤、扭曲变形、压剪弯折等影响，避免索材出现损伤缺陷。

5.1.5 采用预应力碳纤维索锚固后的有效预应力值与设计规定的偏差不应超过 $\pm 5\%$ 。

5.1.6 施工完成后对锚具结构以及锚固装置表面进行防腐防护。

5.2 施工准备

5.2.1 施工单位应在加固施工前，依据设计文件及现场勘察情况，编制详细的施工组织设计或专项施工方案，内容应包括施工方法、工艺流程、质量控制措施、安全保障措施及应急预案等。

5.2.2 施工前应完成下列技术准备工作：

(1) 熟悉设计图纸及相关技术文件，掌握预应力碳纤维索的布置形式、张拉控制应力、锚固构造等关键技术要求。

(2) 对施工人员进行技术交底，明确施工工艺、操作要点、质量控制标准及安全注意事项。

5.2.3 施工前应对被加固构件进行现场检查与状态确认：

(1) 核查桥梁的现有病害状况，特别是裂缝分布、混凝土劣化、钢筋锈蚀等情况，并应与设计假定一致。

(2) 对混凝土强度进行现场检测，确认其符合本规程第 3.1.2 条的要求。

(3) 对锚固区域的钢筋（含预应力筋）布置进行探测，明确钻孔避让范围。

5.2.4 施工前应对机械设备及生产工具进行调试测试，预应力张拉设备及测力设备应按现行有关标准进行标定校准。

5.2.5 桥梁加固施工前，应根据加固工程实施需要对新增构件位置进行测量放样。

5.2.6 施工前应对锚固区钢筋分布进行探测，并应进行锚栓试钻孔。当无法避开原结构主筋时，可在设计允许范围内对锚栓位置进行微调，并应通知设计单位确认。

5.2.7 植筋胶强度达到设计值的 80%以上，且常温下固化时间不少于 3 天后，方可进行张拉。

条文说明

植筋胶在固化初期强度增长较快，但达到 80%设计强度前胶体尚未完全稳定，此时张拉可能引起锚固失效或过大变形。常温下 3 天是基于常规环氧类植筋胶固化特性给出的最低要求，施工中还应根据产品说明书和现场温度条件调整。

5.2.8 施工材料和设备的准备应符合下列规定：

(1) 预应力碳纤维索、锚具、胶粘剂、锚固装置等主要材料应已进场并经检验合格。

(2) 张拉设备（千斤顶、油泵、压力表）应经计量标定，且在有效期内。

(3) 施工所需的钻孔设备、清孔工具、注胶设备、测量仪器等应准备齐全，并处于良好工作状态。

条文说明：

千斤顶、油泵和压力表共同组成张拉测力系统，三者之间相互匹配，分开标定或混用会导致测力误差增大。标定周期参照现行《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T 5531）及《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》（JGJ 85）的相关规定，并结合碳纤维索张拉精度要求确定。压力表精度不低于 1.0 级、有效期不超过 3 个月，是确保张拉力控制准确的关键条件。标定循环应覆盖超张拉荷载（105%），以验证系统在持荷状态下的稳定性。相关系数不小于 0.9999 的要求，确保标定结果具有极高的线性拟合度，从而保证张拉力控制精度满足本规程第 5.1.5 条（现 5.1.5 条为有效预应力偏差 $\pm 5\%$ ）的要求。

5.2.9 施工现场应满足下列环境与安全条件：

- （1）施工环境温度应符合胶粘剂的施工要求，一般不低于 5℃，不高于 35℃。
- （2）应采取防雨、防尘、防潮等措施，确保施工过程中材料及作业面的干燥清洁。

5.2.10 施工前应在典型位置进行试钻、试植锚栓及试张拉工艺试验，验证施工工艺参数和锚固效果，确认满足设计要求后方可全面施工。

5.2.11 预应力碳纤维索加固公路混凝土桥梁施工流程见图 5.2.11。

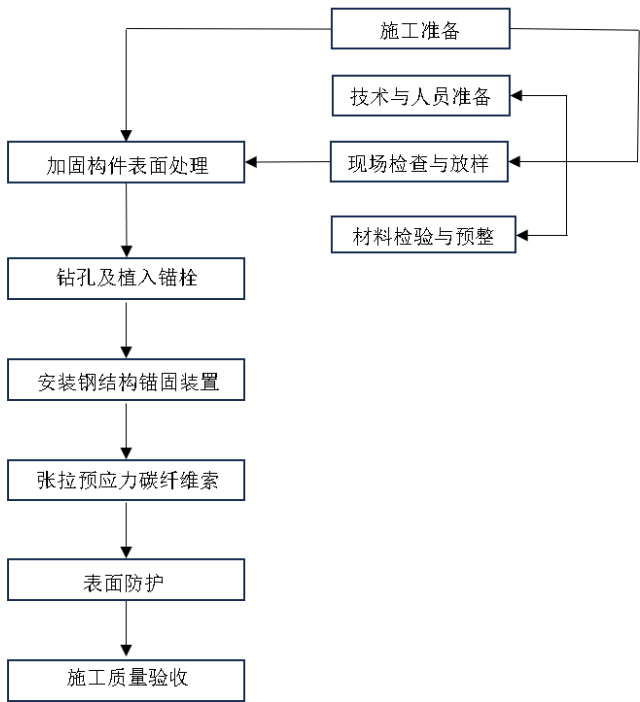


图5.2.11 施工流程图

5.3 加固构件表面处理

5.3.1 表面处理应符合现行《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T 5531）的有关规定，并应对混凝土表面缺陷进行处治以及对混凝土裂缝进行修补。

5.3.2 安装锚固装置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

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。

5.3.3 加固前应按《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T 5431-2025）的规定处治构

件表面缺陷。

5.4 钻孔及植入锚栓

5.4.1 应按设计要求标出锚栓钻孔位置，钻孔前应采用钢筋探测仪探测，避免与原结构受力钢筋（含预应力筋）冲突。当孔位冲突时，可在设计允许范围内调整；调整后应重新复核碳纤维索角度偏差。超出允许调整范围时，应经设计单位确认后方可施工。

植入锚栓施工工艺流程可按图 5.4.1 的步骤进行。

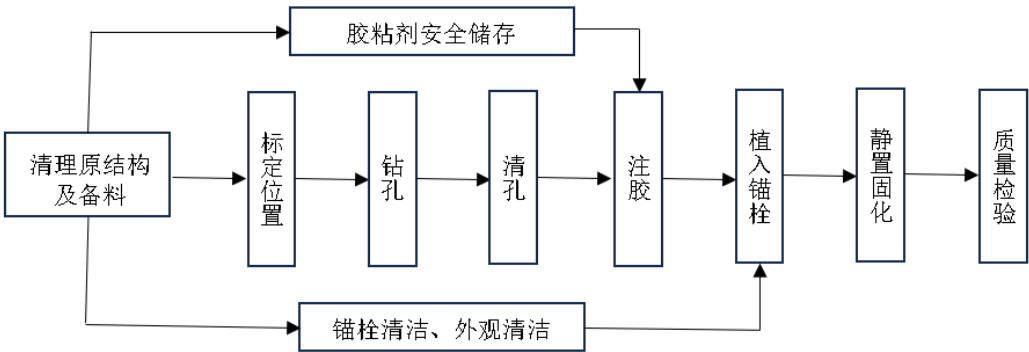


图5.4.1 锚栓植筋施工流程图

5.4.2 钻孔植筋应符合《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T 5531）的相关要求，孔道应保证垂直于梁板底面，锚栓钻孔遇到原构件钢筋或预埋件时应立即停钻，在设计允许范围内适当调整钻孔位置，废弃孔洞应封闭填实。

5.4.3 锚栓植筋时必须保持孔内无尘、干燥。若不立即植筋，应暂时封闭孔口，防止尘土、碎屑、油污和水分等落入孔中影响锚固质量。

5.4.4 植筋孔清孔应符合下列规定

- （1）用硬毛刷伸至孔底，将孔内灰尘、碎渣带出，来回反复刷动不少于 3 次。
- （2）用空气压缩机吹出孔内浮尘，循环上述步骤，保证二刷二吹，最后用工业酒精擦洗孔壁。

5.4.5 植筋孔注胶植筋应符合下列规定

- （1）注胶应采用专用灌注器或注射枪，将胶嘴插入孔底，边注射边往外提注射枪，保证孔内无空气，灌注量应达到孔深的 2/3。
- （2）植筋前应将螺杆锚固长度范围的铁锈清除干净，并打磨出金属光泽。
- （3）孔内注胶后应立即将螺杆顺着螺纹方向边旋转边插入孔内，直至达到设计深度，应确保植入钢筋后有少许胶粘剂溢出。

(4) 在完成固化过程之前,不得对结构有较大扰动,在满足胶粘剂产品规定的固化温度和对应的静置固化时间后,进行下一道工序施工。

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;另外,对于空心板梁,板内存在空心腔体,若钻孔位置恰好位于空腔处,将导致无法形成有效锚固。

5.5 安装锚固装置

5.5.1 预应力碳纤维索、钢构件粘贴施工应在环境温度为 5~35° C 的干燥条件下进行,所用胶粘剂应满足环境温度、湿度的要求。

5.5.2 用角磨机打磨清理需安装锚固装置的基面,并用压缩机将表面浮尘吹净。在与混凝土接触面饱满涂抹粘钢胶,安装完成后确保粘钢胶从锚固装置周边溢出,并刮净胶体;锚固装置与混凝土界面胶体厚度不宜过厚。

5.5.3 锚固装置与结构表面间宜采用结构胶或环氧砂浆填充找平,螺栓与锚固装置栓孔间隙宜采用结构胶填充密实,确保全部螺栓均匀受力。

5.5.4 预应力索展开:顺着碳索长度方向逐个解开捆绑点,将成捆的预应力碳纤维索展直,整个展长过程需防止碳纤维索高速弹开伤人,并防止索材出现过度弯折。

5.5.5 锚固装置制作与安装除应符合现行《公路桥梁加固施工技术规范》(JTG/T5531)有关规定外,尚应符合下列规定:

(1) 锚固装置安装前应按设计文件进行放样,其中心位置偏差应符合表 5.5.5 的规定。

(2) 锚固装置宜在工厂加工制作,其外形尺寸偏差应符合表 5.5.5 的规定。

(3) 基材为混凝土时,结合面处理、锚栓种植或安装、锚固装置锚板粘贴应符合本规范第 5 章的有关规定。锚板上的锚孔与混凝土基材上的钻孔中心偏差应符合表 5.5.5 的规定。

(4) 基材为钢材时,锚固装置与原构件连接的焊缝等级应符合设计要求,采取栓接连接时,螺栓紧固力应符合设计要求。

(5) 混凝土构件安装锚固装置时,锚栓宜在锚固装置就位且固定后安装,锚栓宜与锚板一侧的锚孔孔壁密贴,锚栓与锚孔孔壁之间的间隙应压入结构胶粘剂填充密实,待胶体固化后方可进行锚栓紧固。

表 5.5.5 锚固装置中心位置允许偏差

编号	项目	技术要求
1	外形尺寸允许偏差 (mm)	±2
2	对角线长度 (mm)	+10/0
3	中心位置允许偏差 (mm)	±10
4	锚固装置与基材孔位相对允许偏差 (mm)	±1

条文说明

基面打磨旨在清除装置底面可能附着的焊渣，结合压缩空气清尘，提供平整、洁净的粘结界面，确保后续粘钢胶的可靠粘结。要求安装时胶体从锚固装置周边溢出，是为了直观验证界面填充密实。预应力碳纤维索因工厂预制长度大，常卷绕成捆运输，现场展开时须沿长度方向顺序解除捆绑，严格控制展开过程，避免碳纤维这一脆性材料因过度弯折或冲击而受到损伤，确保材料性能不受影响。

5.6 张拉预应力碳纤维索

5.6.1 将成品预应力碳纤维索布置至设计位置，并通过螺母与锚固装置连接；张拉端连接预应力张拉系统，该系统包括张拉框架、千斤顶、连接油管和油泵。

5.6.2 可通过千斤顶施加较小的顶力将预应力碳纤维索拉直，应根据设计要求在索体跨中对称设置减震器；当索体跨度较大时，减震器的设置数量不应少于 2 个。。

条文说明

本条规定了预应力碳纤维索拉直及减震器安装的要求。设置减震器的目的是为了限制预应力索在风载、车辆荷载等动力作用下产生振动，避免索体与梁底结构发生碰撞或长期摩擦导致索体损伤。减震器的结构形式可参考管夹或抱箍式防震装置，其固定安装通常采用简便、可靠的方式，一般通过膨胀螺栓直接锚固于桥梁梁底混凝土。由于减震器属于非承重构件，使用膨胀螺栓连接可满足其抗振和定位要求，且便于施工。当索体跨度较大时，单点减震效果有限，故规定应根据实际跨度对称增加减震器的数量，以保证减震效果。**5.6.3** 预应力碳纤维索张拉施工前，应测量固定端与张拉端锚孔中心距，张拉端后方预留的操作空间不应小于 50cm。

5.6.4 预应力碳纤维索张拉应按下列规定分级进行：

- (1) 正式张拉前应进行预紧，使碳纤维索初步绷直。
- (2) 抗弯、抗剪加固应按设计拉力的 0%→预张拉→40%→80%→105%（持荷 5min）分级张拉。

(3) 横向加固应按设计拉力的 0%→预张拉→50%→105% (持荷 5min) 分级张拉。

(4) 张拉应采用张拉力和伸长量双控, 并应及时锁紧锚固螺母。

5.6.5 体外预应力张拉过程中, 结构变形异常、出现新增裂缝或既有裂缝发展较快时, 应立即停止张拉并查明原因, 确认结构安全后方可继续进行张拉作业。

5.6.6 若需对碳纤维索的索力进行长期监测, 则需在预应力碳纤维索锚具或拉杆上安装监测传感器。

5.6.7 在体外预应力张拉过程中宜进行施工监控, 监控宜包括下列内容:

- (1) 预应力碳纤维索的张拉控制应力与对应的伸长量。
- (2) 锚固装置与混凝土结合面的表观状况。
- (3) 原混凝土构件的新增裂缝情况及既有裂缝的发展变化。

5.7 表面防护

5.7.1 预应力碳纤维索张拉安装完成后, 应对端部锚具进行防腐防护处理, 防止外部水分或有害物质侵入腐蚀, 并对张拉构件以及锚具结构涂刷防腐材料。

5.7.2 预应力碳纤维索张拉完成后, 应根据设计要求安装防护罩。碳纤维索锚固端及外露段应采取可靠的防腐、防渗措施。

5.7.3 当被加固构件的表面有防火要求时, 应按现行国家标准规定的耐火等级及耐火极限要求, 对碳纤维索进行防护。

条文说明

碳纤维索胶粘剂一般是可燃的, 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。

5.7.4 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, 其性能要求应符合现行国家标准的相关规定。

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。

5.8 施工注意事项

5.8.1 采用预应力碳纤维索加固时，不可搭接，应按设计尺寸一次完成下料。

6 质量检验

6.1 一般规定

6.1.1 加固工程的施工质量检验应在施工单位自行检查评定合格的基础上进行。

6.1.2 隐蔽工程应在隐蔽前由施工单位通知有关单位进行检查确认，并形成检查记录文件。

6.1.3 当加固结构处于腐蚀、高温、高湿、冻融等特殊环境时，应根据服役条件选择具有相应耐久性能的材料，并按现行国家标准进行专项检验。

6.1.4 碳纤维索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《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T 5531）等国家现行有关标准的规定。

6.1.5 施工过程中，应防止体外预应力碳纤维索污染或损伤，并应避免预应力碳纤维索发生过大弯折。

6.2 材料检验

6.2.1 预应力碳纤维索及配套锚具、锚固装置、结构胶粘剂进场后，应会同监理单位对产品合格证、产品出厂检验报告、中文标识和包装完整性进行检查，各项性能指标应符合本规程的规定。

6.2.2 碳纤维索的进场检验应符合现行行业标准《纤维增强复合材料筋》（JG/T 351-2012）的相关规定。：

6.2.3 碳纤维索锚具进场检验应符合现行《预应力筋用锚具、夹具和连接器》（GB/T 14370-2015）的相关规定。

6.2.4 结构胶粘剂（粘钢胶、植筋胶）的进场检验，应符合《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》（GB 50728-2011）的有关规定。

6.2.5 锚栓进场检验应符合下列规定：

- （1）锚栓的材质和性能等级应符合设计要求及本规程表 3.5.1 的规定；
- （2）化学锚栓应采用热轧带肋钢筋或全牙螺杆，不得采用光圆钢筋；
- （3）承重构件用锚栓应采用化学锚栓或扩底型机械锚栓，不得采用膨胀型锚栓；

6.3 现场检验

6.3.1 桥梁混凝土缺陷修补完成后表面应平整，无裂缝、脱层、起鼓、脱落等，修补处表面与原结构表面色泽应基本一致。修补后平整度允许偏差值应满足表 6.3.1 要求。

表6.3.1 平整度允许偏差值实测项目

项目	允许偏差	检查方法	检查频率
整体平整度 (mm)	5	钢尺丈量、观察	全数检查
阴阳角 (°)	5	尺量、观察	全数检查

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 和表 6.3.2-2 的要求。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。

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 0	30~32	+0.6 0
16~22	+0.4 0	34~37	+0.7 0
24~28	+0.5 0	≥40	+0.8 0

6.3.3 锚具及锚固装置等受力构件应符合以下规定：

- (1) 锚具、锚固装置和减振装置应确保安装牢固，无松动现象。
- (2) 锚具、锚固装置和减振装置的钢构件轮廓线应保持顺直流畅，无明显折弯或突变，确保整体结构受力均匀。
- (3) 焊缝应无裂纹、气孔、焊瘤、夹渣、电弧擦伤、未焊透及未填满弧坑等缺陷。构件表面应洁净，无残留焊渣及飞溅物。
- (4) 钢构件防腐涂层应完整、光洁，色泽均匀一致，无破损、气泡、裂纹等不良缺陷，确保长期防护性能。
- (5) 锚固装置与混凝土结合面应密实，粘钢胶应饱满溢出。

6.3.4 预应力碳纤维索体外束两端锚固装置安装后的中心线同轴线误差，应控制

在设计规定的范围内，无设计要求时，其安装后的中心线同轴线允许误差应符合表 6.3.4 的规定。

表6.3.4 碳纤维索中心线同轴线偏差值实测项目

项目	允许偏差	检查方法	检查频率
中心线同轴线误差	$\pm 10\text{mm}$	尺量、观察	全数检查

6.3.5 预应力碳纤维索张拉检验应符合下列规定：

- (1) 张拉设备（千斤顶、油泵、压力表）应经过标定校准，且在有效期内使用；
- (2) 张拉应采用张拉力和伸长量双控，实测伸长量与理论伸长量的允许偏差应为 $\pm 6\%$ ；
- (3) 锚固后的有效预应力值与设计值的允许偏差不应超过 $\pm 5\%$ ；
- (4) 张拉过程中应逐级记录张拉力、伸长量及结构变形情况；
- (5) 张拉完成后应对预应力碳纤维索进行逐束检查，出现损坏者须进行更换。

6.3.6 外观检验应符合下列规定：

- (1) 锚固装置尺寸、锚栓直径和数量、碳纤维索尺寸和数量应符合设计要求；
- (2) 锚固装置防腐涂装应完整，无漏涂、起泡、剥落等缺陷；
- (3) 碳纤维索及其锚具如设有防护罩，则防护罩节段之间应无明显缝隙，密封良好；
- (4) 预应力碳纤维索应无污染、无机械损伤、无过大弯折。

6.3.7 施工过程检验应形成以下检查记录：

- (1) 碳纤维复合材料、锚具及锚固组装件的产品合格证及进场检验记录；
- (2) 锚固组装件安装工程施工记录；
- (3) 碳纤维索施工安装工程质量检查记录表；
- (4) 张拉设备配套标定报告；
- (5) 碳纤维索张拉记录（包括张拉力、伸长量、持荷时间等）；
- (6) 隐蔽工程检查记录；
- (7) 施工过程中异常情况处理记录。

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”。

引用标准名录

- 《公路工程技术标准》 JTG B01
- 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153
- 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60
- 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG 3362
- 《公路桥梁加固设计规范》 JTG/T 5431-2025
- 《公路桥梁加固施工技术规范》 JTG/T 5531-2025
- 《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T 3650
- 《公路工程质量检验评定标准》 JTG F80/1