

公路桥梁预应力碳纤维板加固技术指南

2023 - 12 - 04 发布

2024 - 04 - 05 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 2

5 材料 2

6 加固设计 4

7 加固施工 6

8 检验与验收 8

9 后期维护 9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由山西省交通运输厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对标准的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省交通运输标准化技术委员会（SXS/TC37）归口。

本文件起草单位：山西省交通新技术发展有限公司。

本文件主要起草人：牟开、黄帅、张坤、杨振江、和兆建、赵云川、杨海滨、解荣、崔元龙、李秀珍、睢向国、张明欣、赵博文、陈亚军、薛世豪。

公路桥梁预应力碳纤维板加固技术指南

1 范围

本文件提供了公路桥梁预应力碳纤维板加固设计、加固施工、检验与验收以及后期维护等方面的技术指导。

本文件适用于公路混凝土箱梁桥、空心板桥和T型梁桥的预应力碳纤维板加固工程，其它类型桥梁可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 18583 室内装饰装修材料 胶粘剂中有害物质限量
GB 50016 建筑设计防火规范
GB 50367 混凝土结构加固设计规范
GB 50550 建筑结构加固工程施工质量验收规范
GB 50728 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范
JGJ 145 混凝土结构后锚固技术规程
JGJ 146 建设工程施工现场环境与卫生标准
JT/T 532 桥梁用碳纤维布（板）
JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
JT/T 1267 桥梁用预应力碳纤维板-夹持式锚具
JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG 5120 公路桥涵养护规范
JTG 5220 公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
JTG F90 公路工程施工安全技术规范
JTG H30 公路养护安全作业规程
JTG/T J22 公路桥梁加固设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 碳纤维板

将同一方向排列的碳纤维使用树脂浸润固化形成的碳纤维板材，拉伸强度高、耐腐蚀性好、抗震性优、抗冲击性强，其长度、厚度可根据现场实际需求进行定制。

3.2

锚具

安装在碳纤维板的端部且在张拉过程中对碳纤维板端部保持锚固状态的装置，其作用是夹持在碳纤维板的端部传递预应力，包括张拉端锚具和固定端锚具。

3.3

定位板

连接被加固桥梁构件和锚具的重要承力装置，其作用是将锚具传来的碳纤维板预应力传递到被加固构件上，包括张拉端定位板和固定端定位板。

3.4

压条

用以对碳纤维板形成压紧作用的紧固件。

4 基本规定

4.1 一般规定

4.1.1 加固前按 JTG/T J22 的规定对桥梁病害进行处治。

4.1.2 被加固桥梁构件的混凝土强度等级不得低于 C25，且混凝土表面正拉黏结强度不得低于 2MPa。

4.1.3 加固过程避免损伤原桥梁构件，防止造成二次伤害。

4.1.4 对可能出现倾斜、失稳、过大变形或坍塌的桥梁构件，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，施工中严格执行。

4.2 程序与内容

4.2.1 加固流程：桥梁检测与评定→加固方案的比选→加固设计→加固施工→检验与验收。

4.2.2 加固设计主要内容：

- 预应力损失计算；
- 承载能力极限状态计算；
- 正常使用极限状态计算；
- 防护设计；
- 构造要求。

4.2.3 加固施工主要内容：

- 施工准备；
- 测量放样；
- 梁体打磨修补；
- 钻孔及植入锚栓；
- 锚具、定位板安装；
- 碳纤维板安装与张拉；
- 施工监测；
- 检验与验收。

5 材料

5.1 一般规定

- 5.1.1 材料质量及使用性能，应符合国家、行业现行相关标准的规定，并满足设计要求。
- 5.1.2 材料应具有出厂质量合格证明和检验检测报告。

5.2 碳纤维板

- 5.2.1 板的宽度不宜大于 100mm，其计算截面面积按板的面积计算。
- 5.2.2 采用满足 JT/T 532 要求的 I 级碳纤维板，其主要力学性能指标应符合表 1 的规定。

表1 碳纤维板的力学性能

检验项目	性能指标
抗拉强度标准值（MPa）	≥2400
受拉弹性模量（MPa）	≥1.6×10 ⁵
伸长率（%）	≥1.7
碳纤维板与混凝土正拉黏结强度（MPa）	≥2.5，且为混凝土内聚破坏
层间剪切强度（MPa）	≥50

5.3 锚具

- 5.3.1 可采用平板锚具、齿纹锚具等，其结构形式应符合 GB 50367 的规定。
- 5.3.2 静载锚固性能、疲劳性能、应力松弛性能等指标应符合 JT/T 1267 附录 C、附录 D 和附录 E 的相关规定。

5.4 胶黏剂

- 5.4.1 采用符合 JTG/T J22 规定的 A 级胶，包括碳纤维板浸渍、粘贴用胶黏剂，底胶及修补胶，锚固用胶黏剂等。
- 5.4.2 碳纤维板浸渍、粘贴用胶黏剂的安全性能指标应符合表 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2 碳纤维板浸渍、粘贴用胶黏剂安全性能指标

性能项目		性能要求
胶体性能	抗拉强度（MPa）	≥40
	受拉弹性模量（MPa）	≥2500
	伸长率（%）	≥1.5
	抗弯强度（MPa）	≥50，且不得呈脆性破坏
	抗压强度（MPa）	≥70
黏结能力	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（%）		≥99

- 5.4.3 粘贴碳纤维板用底胶及修补胶的安全性能指标应符合表 3 的规定。

表3 底胶及修补胶安全性能指标

性能项目		性能要求
底胶	钢-钢拉伸抗剪强度标准值（MPa）	≥14

性能项目		性能要求
	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（%）	≥99
	混合后初黏度（23℃时）（mPa·s）	≤6000
修补胶	胶体抗拉强度（MPa）	≥30
	胶体抗弯强度（MPa）	≥40，且不得呈脆性破坏
	与混凝土的正拉黏结强度（MPa）	≥2.5，且为混凝土内聚破坏

5.4.4 锚固用胶黏剂应采用专用改性环氧胶黏剂、改性乙烯基酯胶黏剂等，其安全性能指标应符合表4的规定。

表4 锚固用胶黏剂安全性能指标

性能项目			性能要求
胶体性能	劈裂抗拉强度（MPa）		≥8.5
	抗弯强度（MPa）		≥50，且不得呈碎裂状破坏
	抗压强度（MPa）		≥60
黏结能力	钢对钢（钢套筒法）拉伸抗剪强度标准值（MPa）		≥16
	约束抗拔条件下带肋钢筋与混凝土黏结抗剪强度（MPa）	C30 Φ25 埋深 150mm	≥12.0
		C60 Φ25 埋深 150mm	≥18.0
不挥发物含量（%）			≥99

- 5.4.5 胶黏剂宜进行毒性检验，材料检验结果应符合实际无毒卫生等级要求和 GB 18583 的规定。
- 5.4.6 胶黏剂不得掺入挥发性有害溶剂和非反应性稀释剂。
- 5.4.7 寒冷地区加固用胶黏剂应进行耐冻融性能试验验证。

6 加固设计

6.1 一般规定

- 6.1.1 设计人员应根据原桥梁设计图、竣工图与检测评定报告进行加固设计，并对原桥主要病害进行现场核对。
- 6.1.2 加固设计时，根据桥梁现状的检测结果，进行材料、几何等参数的取值，并考虑结构病害、材料劣化、材料性能差异及新旧材料的结合性能。
- 6.1.3 原桥梁构件的混凝土、钢筋力学指标，按下列规定取值：
- 构件材质状况良好时，可采用原设计的设计值；
 - 构件材质状况劣化时，应进行现场检测，采用检测结果推定的设计值；
 - 构件混凝土强度等级的检测受实际条件限制而无法取芯时，可采用回弹法与超声回弹检测。
- 6.1.4 公路桥梁预应力碳纤维板加固的作用（荷载）效应，按如下两阶段进行计算：
- 第一阶段：加固施工前，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；
 - 第二阶段：加固施工后，考虑包括构件自重在内的恒载及使用阶段的可变作用，加固后可变作用及新增恒载由加固后结构共同承担。

6.2 预应力损失计算

预应力损失计算应考虑：锚具变形和碳纤维板内缩引起的预应力损失 σ_{l1} ，预应力碳纤维板的松弛损失 σ_{l2} ，混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l3} ，由季节温差造成的温差损失 σ_{l4} ，分批张拉引起的构件混凝土弹性压缩预应力损失 σ_{l5} 。

上述各项预应力损失宜根据试验确定，当无可靠试验资料时可按GB 50367、JTG 3362、JTG/T J22的相关规定执行。

6.3 加固计算

6.3.1 采用预应力碳纤维板对公路桥梁进行加固时，应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态的计算，计算时符合下列规定：

- 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；
- 碳纤维板应力 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；
- 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黏结不致出现剥离破坏；
- 加固破坏模式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；
- 碳纤维板的张拉控制应力 σ_{con} 宜取材料抗拉强度标准值的0.6~0.7倍。

6.3.2 承载能力极限状态下的正截面抗弯承载力及斜截面抗剪承载力应按GB 50367、JTG 3362、JTG/T J22的有关规定计算。

6.3.3 正常使用极限状态下的抗裂验算、挠度验算及预应力碳纤维板应力验算应按GB 50367、JTG 3362、JTG/T J22的有关规定计算。

6.3.4 加固后构件成为B类预应力混凝土受弯构件时，尚应进行裂缝宽度验算。

6.3.5 锚固区应按JGJ 145的有关规定进行锚固设计和验算，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。

6.4 防护设计

6.4.1 粘贴在桥梁构件表面的碳纤维板，不得直接暴露于阳光或有害介质中，其表面应进行防护处理，表面防护材料的性能及使用环境可按JTG/T J22的相关规定执行。

6.4.2 对定位板、锚具、压条等金属件应按JT/T 722的规定进行防腐涂装。

6.4.3 当桥梁构件的表面有防火要求时，应按GB 50016规定的耐火等级及耐火极限要求，对碳纤维板进行防护。

6.5 构造要求

6.5.1 预应力碳纤维板加固装置（图1）宜由碳纤维板、固定端锚具、张拉端锚具、固定端定位板、张拉端定位板、压条、锚栓、张拉螺杆等组成。

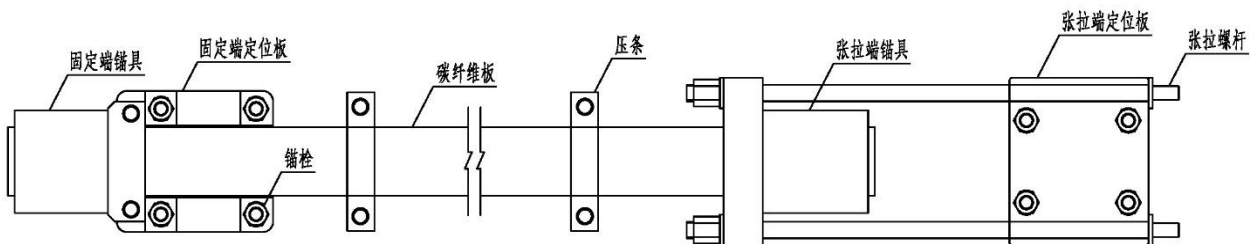


图1 预应力碳纤维板加固装置组成示意图

6.5.2 碳纤维板受力方式应设计成仅承受拉应力作用；对截面宽度较大的桥梁构件，宜安装多条平行

预应力碳纤维板进行加固。

6.5.3 碳纤维板宜采用机械锚固方式紧贴桥梁构件混凝土表面安装，安装后距离构件表面不应超过 5mm。张拉锚固部分以外的碳纤维板与混凝土之间填充胶黏剂黏结牢固，胶黏剂层厚度不宜超过 6mm。

6.5.4 锚具宜布置在桥梁主梁腹板下方的底板上，锚具螺栓与预应力钢束的间距不小于 2 倍的锚栓直径，相邻两套锚具沿纵向错位布置，净距不小于锚具长度。

6.5.5 预应力碳纤维板的中间区段宜设置压条，锚具与第一个压条之间的距离不宜小于 1m，预应力碳纤维板端部与桥梁构件底面之间的距离不宜大于 3cm，可将锚具嵌入到混凝土构件中以减小复合材料与构件底面夹角。其余压条不少于 3 条，且间距布置相等。

7 加固施工

7.1 一般规定

7.1.1 工艺流程：施工准备→测量放样→梁体打磨修补→钻孔及植入锚栓→锚具、定位板安装→碳纤维板安装与张拉→压条固定→防护。

7.1.2 施工前对被加固桥梁的技术状况进行复查，并将复查结果反馈给有关单位。

7.1.3 张拉设备和监测检测仪器按规定定期进行检定和校准。

7.1.4 碳纤维板粘贴宜在 5~35℃环境温度条件下进行，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，须烘干构件表面或采用专门的胶黏剂。

7.1.5 施工过程中应避免碳纤维板弯折，胶黏剂应密封储存，远离火源，避免阳光直接照射。施工完成后对碳纤维板及锚具表面进行防护。

7.1.6 施工现场的安全文明施工及环境保护措施应按 JGJ 146、JTG F90、JTG H30 的有关规定执行。

7.2 施工准备

7.2.1 施工前应结合工程的规模、工期、地形特点等情况，进行策划和实施，合理布置场地。开工前场地应平整，水、电、道路以及通信应通畅。

7.2.2 施工场地所设置的各种设施应满足施工需要及安全施工要求，防止事故发生。

7.2.3 施工平台应有足够的强度、刚度和稳定性，能承受施工过程中产生的各种荷载，抵挡施工过程中可能发生的振动和偶然撞击，且构造合理，安装拆除方便。

7.3 测量放样

7.3.1 测量放样前需探测桥梁结构构件内的钢筋和钢绞线位置和走向，避免施工时对其造成破坏。

7.3.2 放样时应标记锚栓孔和压条孔的圆心位置，并标记碳纤维板拉伸向的中心线和上下边缘线、定位板切槽边缘线位置等。

7.3.3 根据放样进行尺寸核对，张拉端预留出足够空间满足张拉需要。

7.4 梁体打磨修补

7.4.1 清理桥梁混凝土构件的待粘贴基面，在碳纤维板分布位置及其两侧各 2cm~3cm 范围内，打磨混凝土构件基面碳化层，用压缩空气将表面浮尘吹净。

7.4.2 转角安装粘贴处应倒角处理，打磨成圆弧状。

7.5 钻孔及植入锚栓

7.5.1 定位：按照设计要求在相应位置钻孔用于植入锚栓，在定位板安装处切割部分槽口。施工前应

检测原钢筋位置，钻孔不得损伤原钢筋及钢绞线。

7.5.2 钻孔：严格按放样位置的十字中心点打孔，最大限度减少偏移误差；确保孔的垂直度和深度。

7.5.3 安装：按照设计和产品说明书的规定安装锚栓，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，废弃锚孔采用高强度无收缩砂浆填充密实。

7.6 锚具、定位板安装

7.6.1 安装前应清洁锚具和定位板的零件，不得有油渍、碰伤、锈蚀、划痕。

7.6.2 分组安装固定端定位板、固定端锚具、张拉端定位板、张拉端锚具，应保证锚具和定位板的纵向中心线与碳纤维板中心重合。

7.6.3 定位板与混凝土构件应紧密贴合，对于未贴合的部位，采用胶黏剂等材料填补封闭。

7.7 碳纤维板安装与张拉

7.7.1 碳纤维板应按照设计尺寸一次性完成下料，不可搭接。

7.7.2 在碳纤维板与桥梁构件上涂抹胶黏剂，胶黏剂呈中间厚两边薄状，且确保胶体用量可以填满碳纤维板与构件的空隙。

7.7.3 张拉前应完成碳纤维板、锚具、定位板与千斤顶的安装，并调整中心线至同一轴线。

7.7.4 碳纤维板的张拉顺序及张拉控制应力应满足设计要求，张拉过程采取分级张拉。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，待查明原因并予以调整后，方可继续张拉。

7.7.5 碳纤维板初张拉，标记锚具张拉移动起始线，初应力宜为张拉控制应力的 10%~25%，碳纤维板边缘与混凝土构件表面间应有胶液挤出。若局部未挤出胶液，应及时补充胶黏剂。

7.7.6 分级给碳纤维板施加预应力，每一级之间持荷 5~10 分钟。张拉过程中随时检查碳纤维板的伸长量，严格控制张拉速度，要求缓慢、均匀、平稳。

7.7.7 每一级张拉到位后，应及时拧紧张拉螺杆上的锁紧螺母，进行碳纤维板的锚固。

7.7.8 当预应力施加到 100%张拉控制应力时，复验碳纤维板张拉伸长量，并持荷不少于 5 分钟；锚定后卸除千斤顶荷载并拆掉千斤顶、工具挡板等张拉装置，割掉过长的张拉螺杆。

7.7.9 张拉结束后挤压碳纤维板，使胶黏剂从碳纤维板两侧挤出，确保胶黏剂紧密填充，同时局部边缘未饱满的地方人工用胶填充。

7.7.10 张拉施工完成后按设计要求对碳纤维板表面涂刷防腐材料，保护层涂刷应厚度均匀，完全覆盖碳纤维板。

7.7.11 碳纤维板张拉施工完成并验收合格后，应预留后期更换或补张拉的长度。

7.7.12 张拉过程应在胶黏剂开始固化前完成，具体时间应符合设计文件的要求。

7.8 压条固定

7.8.1 张拉后采用压条压紧碳纤维板，压条采用锚栓紧固。

7.8.2 压条边缘要求倒钝打磨，以免与碳纤维板接触时损伤碳纤维板。

7.8.3 压条安装时要托起碳纤维板，对碳纤维板形成压紧作用，使大部分碳纤维板与桥梁构件底面的间距控制在 5mm 左右。相邻碳纤维板的压条需错开布置。

7.9 施工监测

7.9.1 对碳纤维板拉力进行监测，可通过安装传感器对碳纤维板进行全过程监测。

7.9.2 对桥梁应力和变形进行监测，监测碳纤维板张拉前、张拉过程中、张拉后的主梁挠度和关键截面应力变化情况。

7.9.3 对桥梁既有裂缝进行观测，监测碳纤维板张拉前、张拉过程中、张拉后主要裂缝的宽度和长度发展情况。

8 检验与验收

8.1 一般规定

8.1.1 碳纤维板加固用材料应按工程用量一次进场到位。进场时，施工单位会同监理单位对产品合格证、出厂检验报告进行检查。同时对产品的安全性能进行见证抽样复验。

8.1.2 公路桥梁预应力碳纤维板加固工程的检验与验收除应符合本文件的规定外，尚应满足 GB 50550、GB 50728、JTG 5220、JTG F80/1 的有关要求。

8.2 实测项目

8.2.1 梁底打磨修补平整度实测项目应符合表 5 要求

表5 平整度实测项目

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
整体平整度 (mm)	≤ 5	尺量：全部
阴阳角 (°)	≤ 5	尺量：全部

8.2.2 锚栓植筋实测项目应符合表 6 的规定。

表6 锚栓植筋实测项目

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
钻孔直径 (mm)	+3, 0	尺量：抽查10%，且不小于5根
钻孔深度 (mm)	+10, 0	尺量：抽查10%，且不小于5根
钻孔倾斜 (°)	≤ 5	测角仪：抽查10%，且不小于5根
孔中心偏位 (mm)	± 30	尺量：抽查10%，且不小于5根
拉拔力 (kN)	在合格标准内	按JTG 5220规定：抽查2%~3%，且不小于5根

8.2.3 碳纤维板粘贴实测项目应符合表 7 的规定。

表7 碳纤维板粘贴实测项目

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
张拉黏结强度 (MPa)	在合格标准内	按JTG 5220规定
空鼓率 (%)	≤ 5 ，且单个面积 $\leq 1000\text{mm}^2$	红外线或敲击：抽查50%
粘贴偏位 (mm)	横向	尺量：抽查10%且不小于5块，测中心线处
	纵向	

8.2.4 碳纤维板张拉实测项目应符合表 8 的规定。

表8 碳纤维板张拉实测项目

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
碳纤维板坐标 (mm)	构件长方向	尺量：抽查30%
	构件横方向	
张拉力 (kN)	满足设计要求	查油压表读数：全部

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
张拉伸长率（%）	满足设计要求，设计未要求时±6	尺量：全部
缺纬、脱纬、断经	不允许	目测：每片

9 后期维护

9.1 检查与维护

- 9.1.1 预应力碳纤维板加固施工完成后，定期对预应力碳纤维板系统进行检查与维护，确保运营状态良好。
- 9.1.2 采用预应力碳纤维板加固的重要桥梁，宜建立结构健康监测系统，进行长期监测。
- 9.1.3 对预应力碳纤维板加固混凝土桥梁，应按 JTG 5120 的规定进行经常检查、定期检查和特殊检查。
- 9.1.4 对外露的碳纤维板和金属件定期采取防腐措施加以防护。

9.2 碳纤维板更换

- 9.2.1 桥梁运营期间，当出现以下情况之一时，应更换碳纤维板：
 - 碳纤维板应力损失超过设计允许误差范围，且通过补张拉仍不能达到原设计要求；
 - 碳纤维板出现断丝超出安全使用范围；
 - 碳纤维板达到或接近产品的设计年限，经检测，继续运营存在安全隐患。
- 9.2.2 更换碳纤维板时，应进行专项设计，确定更换次序、张拉力和施工工艺。

