



T/CECS G XXXX: 202X

中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路桥梁纤维增强复合材料加
固技术规程

Technical Specification for Strengthening Highway Bridges with
Fiber Reinforced Polymer

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

(空白)

征求意见稿

中国工程建设标准化协会标准

公路桥梁纤维增强复合材料加固技术规程

Technical Specification for Structural Strengthening Highway Bridges
with Fiber Reinforced Polymer

T/CECS G: XXXX-202X

主编单位：中交四航工程研究院有限公司

批准部门：中国工程建设标准化协会

实施日期：2023年XX月XX日

人民交通出版社股份有限公司

北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会公路分会发中建标公路[2020]150号《关于开展2020年第二批中国工程建设标准化协会标准(CECS G)制修订编制项目的通知》要求,由中交四航工程研究院有限公司、香港理工大学等承担《公路桥梁纤维增强复合材料加固技术规程》的制定工作。编制组开展了多项专题研究工作,调研了我国多年来公路桥梁纤维增强复合材料加固用材料、计算理论、加固方法和已实施工程等方面内容,并在广泛征求意见的基础上,制定本规程。

本规程共分为7章,主要内容包括:总则、术语和符号、基本规定、材料、加固设计、加固施工、加固质量检验。

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。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理,由中交四航工程研究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,请反馈给中交四航工程研究院有限公司(地址:广东省广州市海珠区前进路157号,中交四航工程研究院有限公司,邮编:510230)。

主编单位: 中交四航工程研究院有限公司

参编单位: 香港理工大学

广州港湾工程质量检测有限公司

中交四航局第七工程有限公司

广州大学

保利长大工程有限公司

北京工业大学

浙江大学

广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司

东南大学

主 编: 苏林王 戴建国

主要参编人员: (按姓氏笔画)

白玉磊 吕述晖 刘梅梅 孙文火 李平杰 李治学 李

安 杨帅 杨海成 吴云鹏 吴智深 张大伟 张溢 陈
海波 邹长春 罗人昆 查文洋 饶瑞 桑登峰 黄永辉
黄博滔 廖鸿钧 魏明晖

主 审：赵尚传

参与审查人员：

参加人员：

征求意见稿

目次

1 总则.....	1
2 术语和符号.....	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 基本规定.....	11
4 材料.....	13
4.1 一般规定.....	13
4.2 纤维增强复合材料.....	13
4.3 树脂材料.....	16
4.4 加固层水泥基材料.....	18
4.5 表面防护材料.....	19
5 加固设计.....	20
5.1 一般规定.....	20
5.2 受压构件加固.....	21
5.3 受拉构件加固.....	24
5.4 受弯构件加固.....	25
5.5 受剪构件加固.....	34
5.6 墩柱延性加固.....	37
5.7 钢构件抗疲劳加固.....	40
5.8 复材网格加固.....	42
5.9 构造要求.....	46
6 加固施工.....	53
6.1 一般规定.....	53
6.2 粘贴复材片材加固.....	53
6.3 预应力碳纤维复材板加固.....	55
6.4 复材筋及复材网络加固.....	57
7 加固质量检验.....	60
7.1 一般规定.....	60
7.2 加固材料进场检验.....	60
7.3 粘贴复材片材加固.....	62
7.4 预应力碳纤维复材板加固.....	64
7.5 复材筋及复材网络加固.....	65
附录 A 粘结树脂正拉粘结强度的检测方法.....	66
A.1 适用范围和试验原理.....	66
A.2 试验设备.....	66
A.3 试样.....	66
A.4 试验条件和步骤.....	68
A.5 试验结果.....	69

附录 B 预应力碳纤维复材板—锚具组装件试验方法	70
B.1 适用范围和试验原理	70
B.2 试验设备	70
B.3 试件制备	70
B.4 试验步骤	70
B.5 试验数据及判定	71
附录 C 粘贴复材片材加固混凝土结构施工质量现场检测方法	73
C.1 适用范围、试验设备和试样	73
C.2 试验步骤	74
C.3 试验结果	74
本规范用词说明	76
引用标准名录	77
条文说明	79
1 总则	80
2 术语和符号	81
3 基本规定	82
5 加固设计	83
5.1 一般规定	83
5.2 受压构件加固	83
5.3 受拉构件加固	84
5.4 受弯构件加固	84
5.5 受剪构件加固	85
5.7 钢构件抗疲劳加固	86
5.8 复材网格加固	87
5.9 构造要求	89
6 加固施工	91
6.1 一般规定	91
6.2 粘贴复材片材加固	91
6.3 预应力碳纤维复材板加固	91
6.4 复材筋及复材网络加固	92
7 加固质量检验	93
7.3 粘贴复材片材加固	93
7.4 预应力碳纤维复材板加固	93

1 总则

1.0.1 为指导纤维增强复合材料在公路桥梁工程结构加固中的应用，做到安全适用、质量可靠、技术先进、经济耐久，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于纤维增强复合材料在公路桥梁加固中的设计、施工与质量检验。

1.0.3 纤维增强复合材料在公路桥梁工程结构加固中的应用，除应符合本规程规定外，尚应符合现行国家和行业有关标准的规定。

征求意见稿

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 纤维 Fiber

本规程中指公路桥梁加固工程中采用的各类连续纤维，包括碳纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维、PET纤维和PEN纤维。

2.1.2 纤维增强复合材料 Fiber Reinforced Polymer

纤维或纤维织物为增强相，聚合物树脂为基体相，两相材料通过复合工艺制备而成的聚合物基复合材料，简称复材（FRP）。按纤维种类分为碳纤维复材（CFRP）、玻璃纤维复材（GFRP）、芳纶纤维复材（AFRP）和玄武岩纤维复材（BFRP）。

2.1.3 纤维布 Fiber Sheet

纤维布是连续纤维的一种制品形式，包括单向、双向或多向等纤维织物。按所用纤维的种类分为碳纤维布、玻璃纤维布、芳纶纤维布和玄武岩纤维布等。本标准中无特殊说明时指单向纤维布。碳纤维布、玻璃纤维布、芳纶纤维布和玄武岩纤维布分别简称为CFS、GFS、AFS和BFS。

2.1.4 复材板 FRP Plate

连续纤维单向或多向排列，经树脂浸渍固化的板状制品。碳纤维复材板、玻璃纤维复材板和玄武岩纤维复材板分别简称为CFP、GFP和BFP。

2.1.5 复材片材 FRP Laminate

现场用浸渍树脂粘贴的纤维布与复材板的统称。

2.1.6 复材筋 FRP Bar

单向连续纤维与树脂基体经拉挤成型工艺形成的纤维增强复合材料棒状制品，主要为碳纤维复材筋、玻璃纤维复材筋、芳纶纤维复材筋和玄武岩纤维复材筋，分别简称为CFB、GFB、AFB和BFB。

2.1.7 复材网格 FRP Grid

由双向连续纤维经树脂浸渍固化的网格状复材制品，主要为碳纤维复材网格和玄武岩纤维复材网格，分别简称为CFG和BFG。

2.1.7 复材增强水泥基材料 Fabric Reinforced Cementitious Matrix

复材筋/网格增强水泥基材料，简称 FRCM。

2.1.8 加固层水泥基材料 Cementitious Material of FRCM Layer

使用 FRCM 加固时包裹复材筋/网格的水泥基材料，同时为 FRCM 和原混凝土构件的粘结材料。

2.1.9 地聚合物砂浆 Geopolymer Mortar

碱激发剂与活性硅铝质材料(偏高岭土、粉煤灰、矿渣等)反应形成的无机胶凝材料。

2.1.10 超高性能混凝土 Ultra-High-Performance Concrete

由水泥、矿物掺合料、骨料、纤维、外加剂和水等原材料制成的具有超高力学性能（抗压强度一般不小于120MPa，拉伸强度不小于5MPa）、超高抗渗性能的水泥基复合材料。

2.1.11 应变硬化水泥基复合材料 Strain-Hardening Cementitious Composites

由水泥、细骨料、矿物掺合料、纤维、外加剂和水等原材料制成的具有拉伸应变硬化特征、多缝开裂行为及高拉伸变形能力（极限拉应变不小于1%）的纤维增强水泥基复合材料（简称SHCC），又名高延性纤维增强水泥基复合材料（Engineered Cementitious Composites，简称ECC）或超高韧性水泥基复合材料（Ultra-High Toughness Cementitious Composites，简称UHTCC）。

2.2 符号

2.2.1 材料性能

E_f ——复材的弹性模量；

E_c ——混凝土的弹性模量；

E_s ——钢材的弹性模量；

f'_{cc} ——约束混凝土的峰值应力；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{cd1} ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{ci} ——因环向围束带来的混凝土强度增量；

$f_{cu,k}$ ——混凝土边长为 150mm 立方体抗压强度标准值；

f_f ——达到抗弯承载力极限状态时受拉复材的拉应力；

f_{fd} ——复材的抗拉强度设计值；

f_{fk} ——复材的抗拉强度标准值；

f_{hk} ——箍筋抗拉强度标准值；

f_t ——混凝土抗拉强度设计值；

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

f_{svd} ——箍筋抗拉强度设计值；

f_y ——纵向受拉钢筋的受拉强度标准值；

G_f ——碳纤维/钢结构粘接界面的断裂能；

K_1 ——基体钢材裂缝尖端的强度应力因子设计值；

K_d ——基体钢材的应力强度因子设计值；

τ_b ——复材片材与混凝土的粘结强度设计值；

τ_{ave} ——纤维布搭接平均剪切强度；

2.2.2 作用效应及承载力

M ——包含初始弯矩的总弯矩设计值；

M_d ——构件加固后的弯矩组合设计值；

M_{d1} ——第一阶段弯矩组合设计值；

M_k ——正常使用阶段的标准荷载组合下的弯矩值；

N_c ——柱轴向压力设计值；

N_0 ——加固后扣除所有预应力损失后碳纤维复材板的预拉力；

N_d ——加固后轴向压力设计值；

- V_b ——梁的剪力设计值；
- $V_{b,f}$ ——加固梁达到受剪承载力极限状态时复材片材承担的剪力设计值；
- $V_{b,rc}$ ——未加固钢筋混凝土梁的受剪承载力设计值；
- V_c ——柱的剪力设计值；
- $V_{c,f}$ ——加固柱达到受剪承载力极限状态时复材片材承担的剪力设计值；
- $V_{c,rc}$ ——未加固钢筋混凝土柱的受剪承载力设计值；
- V_i ——加固前梁受剪计算截面承担的初始剪力设计值；
- σ_{com} ——预应力碳纤维复合板张拉控制应力；
- σ_f ——纤维复材应力计算值；
- $\sigma_{f,p0}$ ——加固后扣除所有预应力损失后碳纤维复材板的应力；
- $\sigma_{f,vd}$ ——采用封闭粘贴或有可靠锚固措施的 U 形粘贴受剪加固时复材片材的有效拉应力设计值；
- σ_{l1} ——锚具回缩引起的预应力损失值；
- σ_{l2} ——预应力碳纤维复合板的松弛损失值；
- σ_{l3} ——由混凝土收缩和徐变引起的预应力损失值；
- σ_{l4} ——由季节温差造成的温差损失值；
- σ_{le} ——后张拉的预应力对前批预应力碳纤维复材板产生弹性回缩损失值；
- σ_{pc} ——预应力碳纤维复合板粘贴侧的混凝土压应力；
- σ_s ——正常使用阶段受拉钢筋的拉应力；
- σ_{sk} ——荷载短期组合下受拉钢筋的拉应力；
- σ_{s0} ——加固后扣除所有预应力损失后受拉钢筋中的应力；
- $\Delta\sigma$ ——加固前计算应力幅；
- $\Delta\sigma_s$ ——加固后计算应力幅；

ε_c ——混凝土受压区边缘应变；

ε_{cu} ——混凝土极限压应变；

ε_f ——纤维复材的拉应变；

ε_{fd} ——纤维复材的拉应变设计值；

ε_{fe} ——纤维复材的有效拉应变设计值；

ε_{fm} ——受压边缘混凝土达到极限压应变时复材的有效拉应变；

ε_{fp0} ——预应力碳纤维复材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_{lu} ——纵筋的折减极限应变

ε_{su}^R ——约束钢筋的折减极限应变；

ε_1 ——考虑二次受力影响时，加固前构件在初始弯矩作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变；

2.2.3 几何参数

a ——张拉锚具变形和碳纤维复合板内缩值；

a_s ——受拉侧或受压较小侧纵向钢筋合力点至截面该侧边缘的距离；

a'_s ——受压钢筋截面重心至混凝土受压区边缘的距离；

A_c ——柱截面面积；

A_{cor} ——环向围束内混凝土有效面积；

A_f ——纤维复材的截面积

A_{f1} ——梁长垂直方向上的单肢复材网格的截面面积；

A_s 、 A'_s ——受拉钢筋（或加固部位钢结构）、受压钢筋截面面积；

A_0 ——将钢筋按与混凝土弹性模型比换算成混凝土后的换算面积；

b ——矩形截面宽度或 T 形截面腹板的宽度；

- b_f ——受拉面上粘贴的纤维复材的宽度；
- b'_f ——T形截面受压翼缘宽度；
- d_s ——钢筋的直径；
- D ——圆形截面直径；
- e ——复材板到中和轴的距离；
- e_s ——轴向拉力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离；
- f ——施加预应力时产生的反拱变形；
- h ——矩形截面高度；
- 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；
- h_{fe} ——复材片材的有效粘贴高度；
- h'_f ——T形截面受压翼缘高度；
- H ——悬臂墩的高度或塑性铰截面到反弯点的距离；
- L ——计算跨度；
- L_1 ——纤维复材的搭接长度；
- L_p ——等效塑性铰长度；
- l ——张拉端至锚固端之间的净距离；
- l_d ——纤维复材从强度充分利用截面向外延伸所需的粘结长度；
- I_s ——加固部位钢结构的截面惯性矩；
- I_f ——加固部位碳纤维复材的截面惯性矩；
- I_{cr} ——加固前原构件开裂截面换算截面的惯性矩；
- I_0 ——将碳纤维复材板按与混凝土弹性模型比换算成混凝土后的换算截面惯性矩；
- n_f ——纤维复材的层数；
- r ——截面棱角的圆化半径；

- r_1 ——松弛损失率；
- s ——相邻单肢复材网格之间的距离；
- s_{cf} ——对柱进行加固的复材片材条带净间；
- s_f ——对梁进行加固的复材片材条带沿梁轴向净间距；
- t_f ——每层纤维复材的厚度；
- t_{cf} ——对柱进行加固的单侧复材片材的厚度；
- t_{f1} ——单层纤维布的厚度；
- u ——柱截面周长；
- w_f ——对梁进行加固的复材片材垂直纤维方向的条带宽度；
- w_{cf} ——对柱进行加固的复材片材条带宽度
- ω_{max} ——加固后按荷载效应标准组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度；
- x ——混凝土受压区等效矩形应力图高度；
- 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；
- y_s ——截面重心至纵向受拉普通钢筋合力点的距离；
- z ——受拉钢筋与碳纤维复材板合力点至受压区压力合力点的距离；
- α ——复材片材纤维方向与梁轴线的夹角；
- ξ_b ——原构件的界限相对受压区高度；
- θ_p ——E2地震作用下潜在塑性铰区域的塑性转角；
- θ_u ——加固后塑性铰区域的最大容许转角；
- ϕ_u ——极限破坏状态的曲率；
- ϕ_y ——截面的等效屈服曲率；

2.2.4 计算系数及其他

- a_{cf} ——碳纤维复材板层数影响系数；
- C ——截面翼缘扩大系数；

N ——张拉批次；

k_c ——环向围束的有效约束系数；

K_{ds} ——延性安全系数；

K_f ——U形及侧面粘结受剪加固时受剪剥离系数；

K_s ——形状系数；

n ——柱的轴压比

α_f ——碳纤维复材板的轴向温度膨胀系数；

α_c ——混凝土的轴向温度膨胀系数；

β_c ——混凝土强度影响系数；

β_f ——受拉面粘贴的碳纤维复材板对裂缝间距的影响系数；

β_w ——复材片材宽度影响系数；

γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；

γ_f ——复材分项系数；

γ'_f ——受压翼缘加强系数；

γ_e ——复材环境影响系数；

ρ ——受拉侧碳纤维复合板和钢筋的折算配筋率；

ρ_f ——环向围束体积比；

ρ_s ——柱中纵向钢筋的配筋率；

ρ_v ——延性加固后总折算体积含箍率；

ρ_{ve} ——被加固柱原有箍筋的体积含箍率；

ρ_{vf} ——纤维复材作为附加箍筋折算的体积含箍率的增量；

η ——偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向压力偏心距增大系数；

η_u ——U形粘贴端锚区系数；

ω ——受压区混凝土等效应力图形的折减系数；

ψ ——钢筋应变不均匀系数；

ψ_v ——二次受力影响系数。

ϕ ——受剪加固形式系数；

征求意见稿

3 基本规定

- 3.0.1** 采用复材对公路桥梁进行加固时，应经过技术状况评定及适应性评定，确认加固后能满足结构安全和正常使用要求，加固的目标及范围应根据评定结论和使用要求确定。
- 3.0.2** 加固设计应依据原桥梁竣工图、设计图和检测评估报告进行，并经现场核对。资料缺失时，应补充勘测以满足设计需要。
- 3.0.3** 桥梁加固改造后的设计荷载应不低于原标准。
- 3.0.4** 在采用复材加固前，应对原桥梁进行检测和鉴定，根据检测和鉴定结果，并考虑结构病害影响、材料劣化、新旧材料的结合性能及材性差异，确定原结构材料强度设计指标等参数的取值。
- 3.0.5** 桥梁的加固应尽可能不损伤原结构，避免不必要的拆除及更换，防止加固中造成新的结构损伤或病害。
- 3.0.6** 地震设防区结构、构件的加固设计，除应满足承载力要求外，尚应进行抗震能力验算，必要时应进行抗震设防或减隔震设计。
- 3.0.7** 对因如高温、冻融、腐蚀等特殊环境因素作用造成的桥梁结构病害，加固设计应采取针对性的处治措施，并规定施工程序。
- 3.0.8** 桥梁结构的加固应确保新增构件与原结构连接可靠、新增截面与原截面粘结牢固，形成整体共同工作；应避免对未加固部分及相关结构、构件和地基基础造成不利影响。
- 3.0.9** 桥梁加固计算应考虑分阶段受力以及加固前的结构初始应力状态，新增部分与原结构或构件未有效共同受力前的荷载由原结构截面承担，共同受力后的荷载由加固后的组合截面承担。
- 3.0.10** 加固施工方法、流程、工艺的设计，应考虑结构或构件出现倾斜、失稳、坍塌等可能性，并采取有效保护措施。
- 3.0.11** 未经技术鉴定或设计许可，不得改变结构的用途和使用环境。
- 3.0.12** 桥梁的加固施工应做好施工期的准备工作及技术交底，编制施工组织设计，制定必要的施工工艺细则，确保加固质量。
- 3.0.13** 在桥梁加固施工前，若发现原结构或相关工程隐蔽部位的构造有严重缺

陷或与设计不相符的情况，应通知设计单位修改方案。施工过程中若出现异常变形、裂缝，应立即停止施工，并采取有效措施进行处理，经确认后方可继续进行。加固完工后，应检验加固效果，特大桥与技术复杂桥梁应进行荷载试验。

3.0.14 加固施工时宜卸除结构上的活荷载作用，并应采取措施减小被加固构件的初始受力对加固后二次受力的影响。当不能进行完全卸载加固时，应计算分析二次受力对加固的不利影响。

征求意见稿

4 材料

4.1 一般规定

4.1.1 纤维增强复合材料加固混凝土结构所用材料应包括复材片材、复材筋、复材网格、FRCM 及配套粘贴用树脂材料、FRCM 加固层水泥基材料和表面防护材料等。

4.1.2 粘贴用树脂材料和基体树脂的玻璃化转变温度 (T_g) 不应低于 60°C ，且应高于结构最高设计使用温度 10°C 以上。

4.1.3 加固材料的相关性能指标应符合国家现行相关产品标准的规定。

4.2 纤维增强复合材料

4.2.1 单向纤维布应符合下列规定：

1 单向纤维布的抗拉强度应按纤维的净截面积计算，净截面面积应取纤维布的计算厚度乘以实测宽度。纤维布的计算厚度为纤维布的单位面积质量除以纤维密度。纤维密度应由厂商提供，并应出具独立检验或鉴定机构的抽样检验证明文件。

2 单层碳纤维布单位面积质量不宜低于 $150\text{g}/\text{m}^2$ ，且不宜大于 $450\text{g}/\text{m}^2$ 。

3 单层玻璃纤维布单位面积质量不宜小于 $300\text{g}/\text{m}^2$ 且不宜大于 $900\text{g}/\text{m}^2$ 。

4 单层芳纶布单位面积质量不宜小于 $250\text{g}/\text{m}^2$ 且不宜大于 $650\text{g}/\text{m}^2$ 。

5 单层玄武岩纤维布单位面积质量不宜小于 $300\text{g}/\text{m}^2$ ，且不宜大于 $900\text{g}/\text{m}^2$ 。

6 PET 纤维布单位面积质量不宜小于 $1000\text{g}/\text{m}^2$ ，且不宜大于 $2000\text{g}/\text{m}^2$ 。

7 PEN 纤维布单位面积质量不宜小于 $1000\text{g}/\text{m}^2$ ，且不宜大于 $2000\text{g}/\text{m}^2$ 。

4.2.2 结构加固用玻璃纤维布，应使用高强型或无碱型玻璃纤维。

4.2.3 纤维布的主要力学性能指标应符合表 4.2.3 的规定。纤维布抗拉强度标准值应具有 95% 的保证率，弹性模量和极限应变应取平均值。

表 4.2.3 纤维布的主要力学性能指标

纤维布类型和等级		抗拉强度标准值 (MPa)	弹性模量 (GPa)	极限应变 (%)
碳纤维布 CFS	高强型	CFS3000	≥3000	≥230
		CFS3500	≥3500	≥230
		CFS4000	≥4000	≥230
	高模量	CFSM390	≥2900	≥390
玻璃纤维布 GFS	GFS1500	≥1500	≥75	≥2.0
	GFS2500	≥2500	≥80	≥2.3
芳纶纤维布AFS	AFS2000	≥2000	≥110	≥2.0
玄武岩纤维布 BFS	BFS2000	≥2000	≥90	≥2.0
PET纤维布	PET600/PET900	≥630	≥9	≥7.0
PEN纤维布	PEN600/PEN900	≥650	≥13	≥5.0

4.2.4 单向复材板应符合下列规定：

- 1 单向复材板的抗拉强度应按板的实测截面面积计算；
- 2 单向复材板的纤维体积含量不宜小于 60%。

4.2.5 单向复材板的主要力学性能指标应符合表 4.2.5 的规定，抗拉强度标准值应具有 95% 的保证率，弹性模量和极限应变应取平均值。

表 4.2.5 复材板的主要力学性能指标

复材板类型和等级		抗拉强度标准值 (MPa)	弹性模量 (GPa)	极限应变 (%)
碳纤维复材板 CFP	CFP2000	≥2000	≥140	≥1.4
	CFP2300	≥2300	≥150	≥1.4
玻璃纤维复材板 GFP	GFP800	≥800	≥40	≥2.0
玄武岩纤维复材板 BFP	BFS2000	≥1000	≥50	≥2.0

4.2.6 复材筋应符合下列规定：

- 1 复材筋截面可采用圆形、椭圆形、矩形、异形。
- 2 复材筋的抗拉强度应按筋的截面面积计算，截面面积应按名义直径计算。

对于椭圆截面筋，名义直径为与之截面面积相等的光圆筋直径。

3 复材筋的纤维体积含量不宜小于 60%。

4.2.7 复材筋的主要力学性能指标应符合表 4.2.7 的规定，抗拉强度标准值应具有 95%的保证率，弹性模量和极限应变应取平均值。

表 4.2.7 复材筋的主要力学性能指标

复材板类型和等级		抗拉强度标准值 (MPa)	弹性模量 (GPa)	极限应变 (%)
碳纤维复材筋 CFB	CFB1500	≥1500	≥130	≥1.2
	CFB1800	≥1800	≥140	≥1.2
	CFB2100	≥2100	≥140	≥1.4
	CFB2400	≥2400	≥150	≥1.4
玻璃纤维复材筋 GFB	GFB500	≥500	≥40	≥1.3
	GFB600	≥600		≥1.5
	GFB700	≥700		≥1.8
芳纶复材筋 AFB	AFB1300	≥1300	≥65	≥2.0
玄武岩纤维复材筋 BFB	BFB2000	≥800	≥50	≥1.6

4.2.8 复材网络的抗拉强度应按网络的名义截面面积计算。网络的主要力学性能应符合表 4.2.8 的规定。复材网络的抗拉强度和弹性模量应根据现行国家标准《纤维增强复合材料工程应用技术标准》（GB 50608）的有关规定测定。

表 4.2.8 复材网络的力学性能指标

复材板类型和等级	抗拉强度标准值 (MPa)	弹性模量 (GPa)	极限应变 (%)
碳纤维复材网络CFG	≥1800	≥140	≥1.0
玄武岩纤维复材网络BFG	≥900	≥45	≥1.6

4.2.9 复材抗拉强度的设计值应按下列公式计算：

$$f_{td} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f \gamma_e} \quad (4.2.9)$$

式中 f_{fd} ——复材的抗拉强度设计值 (N/mm^2);

f_{fk} ——复材的抗拉强度标准值 (N/mm^2);

γ_f ——复材分项系数, 纤维布取 1.4, 其他复材制品取 1.25;

γ_e ——复材环境影响系数, 应按表 4.2.9 取值; 对临时性混凝土结构, 可取 1.0。

表 4.2.9 复材环境影响系数 γ_e

环境条件	复材类型	γ_e
一般室外环境	碳纤维复材CFRP	1.10
	玻璃纤维复材GFRP	1.40
	芳纶纤维复材AFRP	1.30
	玄武岩纤维复材 BFRP	1.20
	PET纤维复材	1.40
	PEN纤维复材	1.30
海洋环境 侵蚀性环境	碳纤维复材CFRP	1.20
	玻璃纤维复材GFRP	1.60 强碱环境中取2.00
	芳纶纤维复材AFRP	1.50
	玄武岩纤维复材 BFRP	1.60 强碱环境中取2.00
	PET纤维复材	1.60 强碱环境中取2.00
	PEN纤维复材	1.50 强碱环境中取2.00

4.3 树脂材料

4.3.1 采用复材进行粘贴加固时, 应采用配套的树脂材料, 包括底层树脂、找平材料、浸渍树脂或粘结树脂。

4.3.2 粘贴用底层树脂材料的主要性能指标应符合表4.3.2的规定。

表 4.3.2 底层树脂性能指标

性能项目	性能要求
混合后初黏度 (25℃) (MPa.s)	≤2000
适用期 (25℃) (min)	≥40
凝胶时间 (25℃) (h)	≤12

注：适用期 (25℃) 是指常温型粘结树脂的性能指标，对其他性能指标测试，除非另有规定，固化方式均为23℃±2℃下固化7d。

4.3.3 粘贴用找平材料的主要性能指标应符合表4.3.3的规定。

表 4.3.3 找平材料性能指标

性能项目	性能要求
适用期 (25℃) (min)	≥40
凝胶时间 (25℃) (h)	≤12

注：适用期 (25℃) 是指常温型粘结树脂的性能指标，对其他性能指标测试，除非另有规定，固化方式均为23℃±2℃下固化7d。

4.3.4 粘贴用浸渍树脂主要性能指标应符合表4.3.4的规定。

表 4.3.4 浸渍树脂性能指标

性能项目	性能要求
混合后初黏度 (25℃) (MPa.s)	4000 ~ 20000
触变指数 TI	≥1.7
适用期 (25℃) (min)	≥40
凝胶时间 (25℃) (h)	≤12
拉伸强度 (MPa)	≥30
拉伸弹性模量 (MPa)	≥1500
伸长率 (%)	≥1.5
压缩强度 (MPa)	≥70
弯曲强度 (MPa)	≥40
拉伸剪切强度 (MPa)	≥10
层间剪切强度 (MPa)	≥35

注：适用期（25℃）是指常温型粘结树脂的性能指标，对其他性能指标测试，除非另有规定，固化方式均为23℃±2℃下固化7d。

4.3.5 粘结树脂的主要性能指标应符合表4.3.5的规定。

表 4.3.5 粘结树脂性能指标

性能项目	性能要求
适用期（25℃）（min）	≥40
凝胶时间（25℃）（h）	≤12
拉伸强度（MPa）	≥25
拉伸弹性模量（MPa）	≥2500
压缩强度（MPa）	≥70
弯曲强度（MPa）	≥30
拉伸剪切强度（钢-钢）（MPa）	≥15
对接接头拉伸强度（MPa）	≥25

注：适用期（25℃）是指常温型粘结树脂的性能指标，对其他性能指标测试，除非另有规定，固化方式均为23℃±2℃下固化7d。

4.3.6 配套粘贴树脂的正拉粘结强度标准值不应小于被加固混凝土抗拉强度标准值，且不应小于2.5MPa。配套粘贴树脂的正拉粘结强度标准值应按本标准附录A的方法测定。

层间剪切强度应根据现行国家标准《纤维增强复合材料工程应用技术标准》（GB 50608）的有关规定测定。

4.3.7 浸渍树脂和粘贴树脂经2000h的湿热循环加速老化后，拉伸剪切强度不应小于9MPa，且强度下降率应小于20%。

4.3.8 浸渍树脂和粘贴树脂的玻璃化转变温度 T_g 应根据现行国家标准《纤维增强复合材料工程应用技术标准》（GB 50608）的有关规定测定。

4.4 加固层水泥基材料

4.4.1 加固层水泥基材料的种类、力学性能、耐久性能等应根据实际工程需求进行选择与设计，可采用水泥砂浆、聚合物改性水泥砂浆、地聚合物砂浆、超高性能混凝土、应变硬化水泥基复合材料等。

4.4.2 地聚合物砂浆在使用过程中可根据工程实际需求添加钢纤维或聚合物纤维

等进行增韧和控裂。

4.4.3 超高性能混凝土的性能指标应符合现行国家标准《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》（T/CECS 10107）的有关规定，试验方法参照现行国家标准《超高性能混凝土试验方法标准》（T/CECS 864）的有关规定。

4.4.4 加固层水泥基材料的强度等级应大于原结构混凝土的强度等级。在加固层水泥基材料与混凝土的粘结强度测试中，应实现混凝土内聚破坏或混凝土内聚破坏面积占粘合面积85%以上的混合破坏模式。粘结强度应根据现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》（GB 50728）的有关规定测定。

4.4.5 加固层水泥基材料的收缩性能应根据工程实际需求严格控制，28d收缩率不宜大于0.1%。收缩率应根据现行行业标准《水泥胶砂干缩试验方法》（JC/T603）的有关规定测定。

4.4.6 加固层水泥基材料的的安全性应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》（GB 50728）的有关规定。加固层水泥基材料所使用的纤维性能指标应符合现行国家标准《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》（GB 21120）和《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》（GB 50728）的有关规定。

4.5 表面防护材料

4.5.1 采用外贴纤维布或复材板加固修复时，加固修复完成后的结构表面应进行防护处理。

4.5.2 当复材应用于特殊环境条件的结构时，应根据具体情况选择表面防护材料。

5 加固设计

5.1 一般规定

5.1.1 复材加固桥梁结构时，应进行承载能力极限状态的计算和正常使用极限状态的验算。

5.1.2 采用复材加固时，被加固结构的原承载力设计值不应低于其恒载和可变荷载频遇值组合下的作用效应设计值。

5.1.3 粘贴复材片材加固设计时，复材片材的纤维方向应与加固要求所需要的受力方向一致。当纤维方向与受力方向不一致时，应根据纤维方向与受力方向之间的夹角对复材受力作用进行折减。

5.1.4 采用复材加固抗弯构件时，其正截面受弯承载力应按下列基本假定进行计算：

- (1) 截面应变保持平面；
- (2) 不考虑混凝土的抗拉强度；
- (3) 混凝土受压应力与应变关系应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010)的有关规定执行；
- (4) 纵向钢筋的应力与应变关系应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010)的有关规定执行，同时钢筋极限拉应变不应大于 0.01；
- (5) 复材的拉应力应取复材的拉应变与其弹性模量的乘积，且不应超过复材抗拉强度设计值。

5.1.5 采用预应力碳纤维复材板加固抗弯构件时，应符合下列规定：

- (1) 应按国家现行有关标准对原桥梁进行检测和鉴定，未进行预应力加固桥梁的承载力不应低于加固后桥梁的准永久荷载组合效应；
- (2) 被加固的混凝土构件的实测推算混凝土立方体抗压强度不宜低于 25N/mm^2 ；
- (3) 应采用 CFP2300 或以上级别的碳纤维复材板，在板材与混凝土之间应采用树脂进行粘接；
- (4) 预应力碳纤维板材宽度不宜大于 100mm；
- (5) 应采用连续的碳纤维复材板进行加固。

5.1.6 采用预应力碳纤维复材板加固抗弯构件时，应进行施工张拉过程、承载能力极限状态和正常使用极限状态的验算，并应考虑结构二次受力和超静定结构次内力的影响。

5.2 受压构件加固

5.2.1 轴心受压构件可采用沿其全长无间隔地环向连续粘贴复材片材的方法（简称环向围束法）进行加固。

5.2.2 采用环向围束法加固轴心受压构件仅适用于下列情况：

(1) 长细比 $l/d \leq 12$ 的圆形截面柱；

(2) 长细比 $l/d \leq 14$ 且同时满足截面最大尺寸小于 90cm，高宽比 $h/b \leq 1.5$ ，且截面棱角经过圆化打磨的正方形或矩形截面柱。

5.2.3 采用环向围束法加固轴心受压构件，正截面承载力按式（5.2.3-1）至（5.2.3-8）计算。

(1) 正截面承载力

$$\gamma_0 N_d \leq 0.9 [(f_{cd1} + f_{ci}) A_{cor} + f'_{sd} A'_s] \quad (5.2.3-1)$$

式中 γ_0 ——桥梁结构的重要性系数，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）的规定采用；

N_d ——加固后轴向压力设计值（kN）；

f_{cd1} ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm²）；

f_{ci} ——因环向围束带来的混凝土强度增量（N/mm²）；按本规程式

（5.2.3-2）至（5.2.3-6）计算。

A_{cor} ——环向围束内混凝土有效面积（mm²），按本规程式（5.2.3-7）、

（5.2.3-8）计算。

(2) 环向围束混凝土强度增量

$$f_{ci} = 2\beta_c k_c \rho_f E_f \varepsilon_{fe} \quad (5.2.3-2)$$

式中 β_c ——混凝土强度影响系数；当混凝土强度等级不大于C50时， $\beta_c = 1.0$ ；

当混凝土强度等级为C80时， $\beta_c = 0.8$ ；其间接线性内插法确定；

k_c ——环向围束的有效约束系数；

ρ_f ——环向围束体积比；

E_f ——复材的弹性模量 (N/mm²)；

ε_{fe} ——纤维复材的有效拉应变设计值，取 $\varepsilon_{fe} = 0.004$

(3) 环向围束的有效约束系数

$$\text{圆形截面柱: } k_c = 0.95 \quad (5.2.3-3)$$

$$\text{矩形截面柱: } k_c = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3A_{cor}(1-\rho_s)} \quad (5.2.3-4)$$

式中 ρ_s ——柱中纵向钢筋的配筋率 (%)；

b ——正方形截面边长或矩形截面宽度 (mm)；

h ——矩形截面高度 (mm)；

r ——截面棱角的圆化半径 (mm)。

(4) 环向围束体积比

$$\text{圆形截面柱: } \rho_f = \frac{4n_f t_f}{D} \quad (5.2.3-5)$$

$$\text{矩形截面柱: } \rho_f = \frac{2n_f t_f (b+h)}{A_{cor}} \quad (5.2.3-6)$$

式中 D ——圆形截面直径 (mm)。

n_f 、 t_f ——纤维复材的层数及每层厚度 (mm)；

(5) 环向围束内混凝土面积

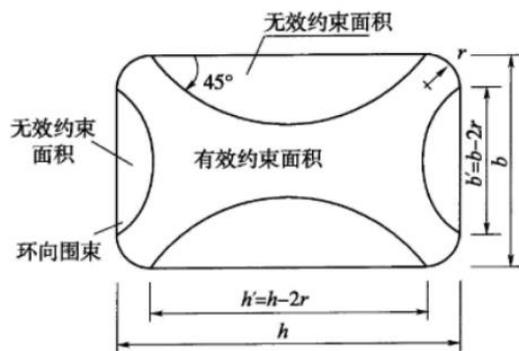


图 5.2.3 环向围束内矩形截面有效约束面积

$$\text{圆形截面柱: } A_{\text{cor}} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.2.3-7)$$

$$\text{矩形截面柱: } A_{\text{cor}} = bh - (4 - \pi)r^2 \quad (5.2.3-8)$$

5.2.4 加固大偏心受压的钢筋混凝土柱时，应将纤维复材粘贴于构件受拉边缘混凝土表面，且纤维方向应与柱的纵轴线方向一致。

5.2.5 矩形截面大偏心受压柱的加固，其正截面承载力应符合下列公式规定：

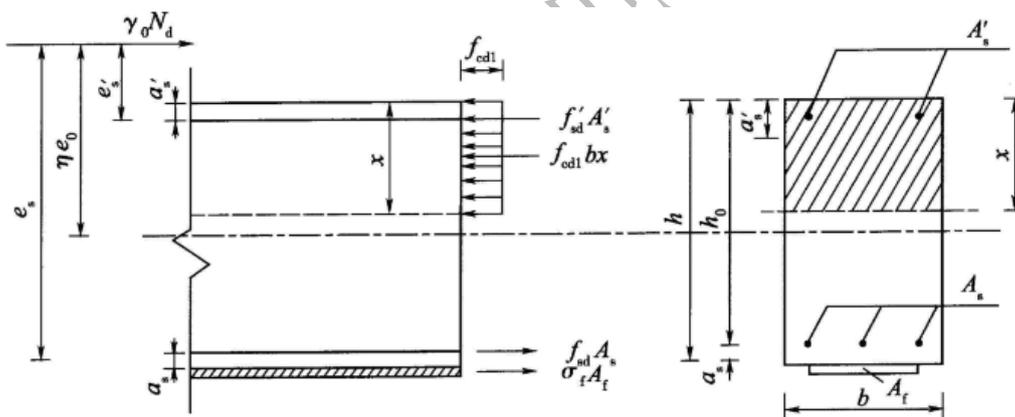


图 5.2.4 大偏心受压柱加固计算简图

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd1} bx + f_{sd} A_s' - f_{sd} A_s - \sigma_f A_f \quad (5.2.5-1)$$

$$\gamma_0 N_d e_s \leq f_{cd1} bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{sd} A_s' (h_0 - a_s') + \sigma_f A_f a_s \quad (5.2.5-2)$$

$$f_{cd1} bx \left(e_s - h_0 + \frac{x}{2} \right) = f_{sd} A_s e_s + \sigma_f A_f (e_s + a_s) - f_{sd} A_s' e_s' \quad (5.2.5-3)$$

$$e_s = \eta e_0 + \frac{h}{2} - a_s \quad (5.2.5-4)$$

$$e_s' = \eta e_0 - \frac{h}{2} + a_s' \quad (5.2.5-5)$$

式中 f_{cd1} ——原构件混凝土抗压强度设计值 (N/mm^2);

η ——偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向压力偏心距增大系数, 按现行《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22) 的有关规定计算;

A_f ——纤维复材面积 (mm^2);

σ_f ——纤维复材应力计算值 (N/mm^2), 可参照本规程5.4节相关规定计算。

5.2.6 小偏心受压构件的正截面承载力可参照轴心受压及大偏心受压构件的方法计算。

5.3 受拉构件加固

5.3.1 对轴心受拉构件粘贴纤维复合材料(片材、筋材)进行加固时, 正截面承载力应符合下列要求:

$$\gamma_0 N_d \leq f_{sd} A_s + \sigma_f A_f \quad (5.3.1-1)$$

式中 N_d ——轴向拉力设计值 (N);

f_{sd} ——钢筋轴心抗拉强度设计值 (N/mm^2);

A_s ——截面上全部纵向受拉钢筋截面面积 (mm^2);

A_f ——纤维复合材料(片材、筋材)的面积 (mm^2);

σ_f ——纤维复合材料(片材、筋材)有效抗拉强度设计值 (N/mm^2), 可

按下列公式取值: $\sigma_f = E_f \varepsilon_{fe}$; E_f 为纤维复合材料(片材、筋材)

的弹性模量 (N/mm^2), ε_{fe} 为纤维复合材料(片材、筋材)的有

效拉应变设计值; 重要构件取 $\varepsilon_{fe} = 0.0035$; 一般构件取 $\varepsilon_{fe} =$

0.0045。

5.3.2 对矩形截面大偏心受拉构件在受拉面粘贴纤维复合材料(片材、筋材)进行加固时(图5.3.2), 正截面承载力应按下列公式计算:

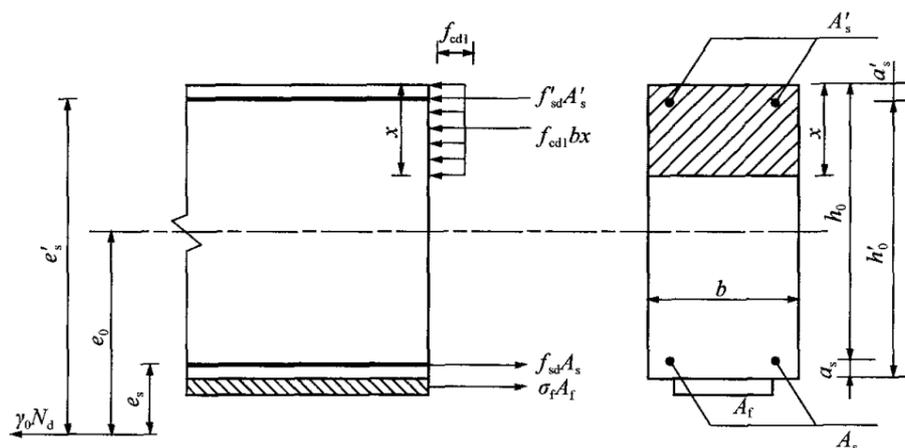


图 5.3.2 大偏心受拉构件加固计算简图

$$\gamma_0 N_d \leq f_{sd} A_s + \sigma_f A_f - f_{cd1} b x - f'_{sd} A'_s \quad (5.3.2-1)$$

$$\gamma_0 N_d e_s \leq f_{cd1} b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma_f A_f a_s \quad (5.3.2-2)$$

$$e_s = e_0 - \frac{h}{2} + a_s \quad (5.3.2-3)$$

式中 f_{cd1} ——原构件混凝土抗压强度设计值 (N/mm^2);

e_s ——轴向拉力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离 (mm);

σ_f ——纤维复合材料 (片材、筋材) 应力计算值 (N/mm^2), 按平截面假

定计算;

其他符号意义同上。

5.4 受弯构件加固

5.4.1 对钢筋混凝土受弯构件进行抗弯加固时, 除应遵守现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018) 相关假定外, 尚应遵守下列规定:

(1) 抗弯构件的作用效应应按两个阶段受力进行计算。

第一阶段为加固前, 作用应包括原构件自重在内的实际恒载及施工荷载。

第二阶段为加固后, 作用应考虑包括构件自重在内的恒载, 二期作用的恒载及使用阶段的可变作用。作用效应组合系数取值: 恒载的荷载效应分项系数 1.2; 使用阶段的可变作用效应分项系数按现行《公路桥涵设计通用规范》

(JTG D60-2015) 取用。

(2) 达到受弯承载能力极限状态时，按平截面假定确定复材的拉应变 ε_f ，且复材的拉应变 ε_f 不应超过其拉应变设计值 ε_{fd} ；复材的应力 f_f 取拉应变 ε_f 与弹性模量 E_f 的乘积，即 $f_f = E_f \varepsilon_f$ 。

(3) 在承载能力极限状态时，纤维复合材料与混凝土之间不应发生粘结剥离破坏。

5.4.2 对矩形截面或 T 形截面受弯构件，在受拉面粘贴加固时，正截面承载力按下列公式计算：

(1) 当混凝土受压区高度 $x > h'_f$ 时（图 5.4.2-1），

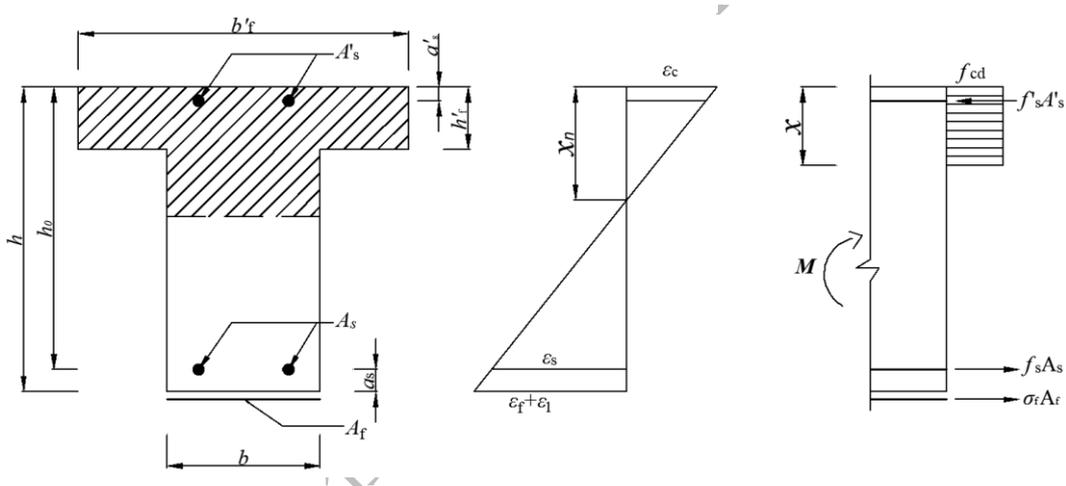


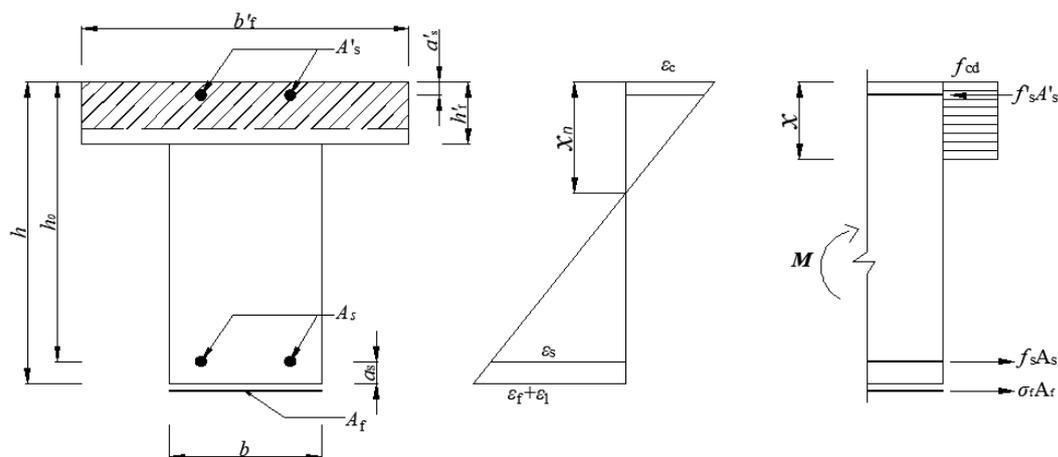
图 5.4.2-1 $x > h'_f$ 时正截面抗弯承载力计算截面应变和应力

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x \left(h_0 - \frac{1}{2} x \right) + f_{cd} (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{1}{2} h'_f \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma_f A_f a_s \quad (5.4.2-1)$$

混凝土受压区高度 x 按下式计算：

$$f_{cd} b x + f_{cd} (b'_f - b) h'_f + f'_{sd} A'_s = f_{sd} A_s + \sigma_f A_f \quad (5.4.2-2)$$

(2) 当混凝土受压区高度 $2a'_s \leq x \leq h'_f$ 时（图 5.4.2-2），

图 5.4.2-2 $2a'_s \leq x \leq h'_f$ 时正截面抗弯承载力计算截面应变和应力

$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b'_f x \left(h_0 - \frac{1}{2} x \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma_f A_f a_s \quad (5.4.2-3)$$

混凝土受压区高度 x 按下式计算：

$$f_{cd} b'_f x + f'_{sd} A'_s = f_{sd} A_s + \sigma_f A_f \quad (5.4.2-4)$$

(3) 当混凝土受压区高度 $x < 2a'_s$ 时

$$\gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s (h_0 - a'_s) + \sigma_f A_f (h - a'_s) \quad (5.4.2-5)$$

(4) 达到抗弯承载力极限状态时，受拉复材的拉应力 σ_f 按下式计算：

$$\sigma_f = \min \{ f_{fd}, E_f \varepsilon_{fm} \} \quad (5.4.2-6)$$

式中 γ_0 ——桥梁结构的重要性系数，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) 的规定采用；

M_d ——构件加固后的弯矩组合设计值 (kN·m)；

ξ_b ——原构件的界限相对受压区高度 (mm)，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) 的规定采用；

b 、 h ——分别为原构件截面宽度和高度 (mm)；

h'_f ——T型截面受压翼缘高度 (mm)；

a_s 、 a'_s ——分别为受拉区、受压区普通的钢筋合力点至受拉区边缘、受压区边缘的距离 (mm)；

h_0 ——原构件截面有效高度 (mm)， $h_0 = h - a_s$ ；

- A_s 、 A'_s ——分别为受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积 (mm^2);
- A_f ——受拉面粘贴的纤维复合材料的截面面积 (mm^2);
- f_{sd} 、 f'_{sd} ——分别为原构件纵向普通钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值;
- f_{cd} ——原构件混凝土抗压强度设计值 (N/mm^2);
- σ_f ——达到抗弯承载力极限状态时, 受拉复材的拉应力值 (N/mm^2);
- E_f ——复材的弹性模量 (N/mm^2);
- x ——等效矩形应力图形的混凝土受压区高度 (mm), 简称混凝土受压区高度;
- ε_c ——混凝土受压区边缘应变;
- ε_{fm} ——受压边缘混凝土达到极限压应变时复材的有效拉应变, 按本节5.4.3条计算;
- f_{fd} ——复材的抗拉强度设计值, 取 $f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f \gamma_e}$;
- f_{fk} ——复材的极限抗拉强度标准值, 按本规程4.2.2节取值;
- γ_f ——复材的分项系数, 纤维布取1.4, 其它复材制品取1.25;
- γ_e ——复材的环境影响系数, 按本规程表4.2.9取值;

5.4.3 受压边缘混凝土达到极限压应变时, 复材的有效拉应变 ε_{fm} 应按下列规定计算:

- (1) 当混凝土受压区高度 $x > h'_f$ 时, 应按下式联立求解:

$$f_{cd}bx + f_{cd}(b'_f - b)h' + f'_{sd}A'_s = f_{sd}A_s + E_f \varepsilon_{fm} A_f \quad (5.4.3-1)$$

$$x = \frac{0.8\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fm} + \varepsilon_1} h \quad (5.4.3-2)$$

- (2) 当混凝土受压区高度 $x \leq h'_f$ 时, 应按下式联立求解:

$$f_{cd}b'_f x + f'_{sd}A'_s = f_{sd}A_s + E_f \varepsilon_{fm} A_f \quad (5.4.3-3)$$

$$x = \frac{0.8\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fm} + \varepsilon_1} h \quad (5.4.3-4)$$

式中 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_1 ——考虑二次受力影响时，加固前构件在初始弯矩作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变，按式（5.4.3-5）计算；当不考虑二次受力时，取0；

(3) 加固前在第一阶段弯矩 M_{d1} 作用下，截面受拉边缘混凝土的初始应变 ε_1 按下列公式计算：

$$\varepsilon_1 = \frac{M_{d1} x_1}{E_c I_{cr}} \quad (5.4.3-5)$$

式中 M_{d1} ——第一阶段弯矩组合设计值；

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（mm）；

E_c ——原加固构件混凝土的弹性模量（N/mm²）；

I_{cr} ——加固前原构件开裂截面换算截面的惯性矩（mm⁴）。

当弯矩 M_{d1} 小于未加固截面受弯承载力的 20% 时，可忽略二次受力的影响。

5.4.4 计算正截面抗弯承载力时，尚应满足下列要求：

(1) 受压区高度 x 不宜大于 $0.8\xi_b h_0$ ；

(2) 加固后在荷载效应标准组合下受拉钢筋的拉应力不超过其抗拉强度设计值。

5.4.5 纤维复合材料粘贴于受拉区的梁侧时，正截面抗弯承载力按式（5.4.2-1）~（5.4.2-6）计算，其中 h 采用纤维复合材料截面面积形心至梁受压区边缘的距离 h_{f0} 代替，并将侧面纤维复合材料的截面面积乘以折减系数 $(1 - 0.5h_f/h)$ 。

其中 h_f 为侧面纤维复合材料的粘贴高度。

5.4.6 加固后的抗弯构件截面应符合下列条件：

$$\gamma_0 V_d \leq 0.51 \times 10^{-3} C \sqrt{f_{cu,k}} b h_0 \quad (5.4.6)$$

式中 C ——截面翼缘扩大系数；对T形、I形截面取 $C = 1.1$ ，其他截面取 $C = 1$ ；

$f_{cu,k}$ ——混凝土边长为 150mm 立方体抗压强度标准值。

5.4.7 采用预应力碳纤维复材板进行抗弯加固时，张拉控制应力宜取碳纤维板抗拉强度标准值 0.45 倍-0.65 倍，且不应大于 0.70 倍。

5.4.8 预应力碳纤维复材板的预应力损失应符合下列规定：

(1) 锚具回缩引起的预应力损失值 σ_{11} 应按照下式计算：

$$\sigma_{11} = \frac{a}{l} E_f \quad (5.4.8-1)$$

式中 a ——张拉锚具变形和碳纤维复合板内缩值 (mm)，应根据锚具形式和张拉方式确定，当采用平板锚具、波形锚具、楔形锚具、齿状锚具时可取 1mm；

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)。

(2) 预应力碳纤维复合板的松弛损失值 σ_{12} 应按下列计算：

$$\sigma_{12} = r_1 \sigma_{com} \quad (5.4.8-2)$$

式中 r_1 ——松弛损失率，近似取 2.5%。

σ_{com} ——预应力碳纤维复合板张拉控制应力 (N/mm²)。

(3) 由混凝土收缩和徐变引起的预应力损失值 σ_{13} 应按下列公式计算：

$$\sigma_{13} = \frac{30 + 8\sigma_{pc}}{1 + 15\rho} \quad (5.4.8-3)$$

$$\rho = \frac{A_f E_f / E_s + A_s}{A_c + a_s A_s} \quad (5.4.8-4)$$

式中 σ_{pc} ——预应力碳纤维复合板粘贴侧的混凝土压应力 (N/mm²)；

A_f ——复材的截面面积 (mm²)；

E_s ——钢筋的弹性模量 (MPa)；

A_s ——受拉钢筋截面面积 (mm^2);

A_c ——柱截面面积 (mm^2);

a_s ——受拉侧或受压较小侧纵向钢筋合力点至截面该侧边缘的距离 (mm);

ρ ——受拉侧碳纤维复合板和钢筋的折算配筋率。

(4) 由季节温差造成的温差损失值 σ_{14} 应按下式计算:

$$\sigma_{14} = \Delta T |\alpha_f - \alpha_c| E_f \quad (5.4.8-5)$$

式中 ΔT ——年平均最高 (或最低) 温度与预应力碳纤维复材板张拉锚固时的温 ($^{\circ}\text{C}$);

α_f ——碳纤维复材板的轴向温度膨胀系数, α_f 可取 0;

α_c ——混凝土的轴向温度膨胀系数, α_c 取为 $1 \times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 分批张拉的预应力碳纤维复材板, 后张拉的预应力对前批预应力碳纤维复材板产生弹性回缩损失值 σ_{1e} 应按下式计算:

$$\sigma_{1e} = \frac{N-1}{2N} \frac{E_f}{E_c} \sigma_{pc} \quad (5.4.8-6)$$

式中 N ——张拉批次;

E_c ——张拉时混凝土的弹性模量 (MPa);

σ_{pc} ——张拉位置混凝土的计算压应力 (N/mm^2)。

5.4.9 预应力碳纤维复材板加固后的混凝土构件再无外荷载作用下截面边缘的应力可按照弹性换算截面计算, 拉应力不应大于 $1.0 f_{tk}$, 压应力不应大于 $0.8 f_s$ 。

5.4.10 矩形或 T 形截面受弯构件, 在受拉面粘贴预应力碳纤维复材板进行抗弯加固时, 正截面承载力按下列公式计算:

(1) 采用预应力复材进行加固时, 其抗弯承载力计算公式与非预应力复材加固的抗弯承载力计算公式一致, 即采用公式 (5.4.2-1) ~ (5.4.2-5) 进行计算;

(2) 达到抗弯承载力极限状态时, 受拉复材的拉应力 σ_f 按下式计算:

$$\sigma_f = \min \{ f_{fd}, E_f (\varepsilon_{fm} + \varepsilon_{fp0}) \} \quad (5.4.10)$$

式中 f_{fd} ——复材的抗拉强度设计值;

ε_{fm} ——受压边缘混凝土达到极限压应变时复材的有效拉应变, 按本规程 5.4.3条计算;

ε_{fp0} ——预应力碳纤维复合材料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;

5.4.11 计算正截面抗弯承载力时, 尚应满足下列要求:

(1) 受压区高度 x 不宜大于 $0.8\xi_b h_0$;

(2) 加固后在荷载效应标准组合下受拉钢筋的拉应力不超过其抗拉强度设计值。

5.4.12 预应力复材粘贴于受拉区的梁侧时, 正截面抗弯承载力按式 (5.4.2-1) ~ (5.4.2-5) 及式 (5.4.3-3) 计算, 其中 h 采用纤维复合材料截面面积形心至梁受压区边缘的距离 h_{f0} 代替, 并将侧面纤维复合材料的截面面积乘以折减系数 $(1-0.5h_f/h)$ 。其中 h_f 为侧面纤维复合材料的粘贴高度。

5.4.13 在标准荷载组合下, 受拉钢筋的拉应力不应大于其抗拉强度标准值。标准荷载组合下受拉钢筋的拉应力, 可按下列规定计算:

$$\sigma_s = \frac{M_k - N_0 z}{A_s z} + \sigma_{s0} \quad (5.4.13-1)$$

$$z = [0.87(1 + \beta_f) - 0.12(1 - \gamma'_f) \left(\frac{h_0}{e}\right)^2] h_0 \quad (5.4.13-2)$$

$$N_0 = \sigma_{f,p0} A_f \quad (5.4.13-3)$$

$$e = \frac{M_k}{N_0} \quad (5.4.13-4)$$

$$\sigma_{s0} = \frac{M_1 - N_0 e_0}{I_0} y_s - \frac{N_0}{A_0} \quad (5.4.13-5)$$

式中 σ_s ——正常使用阶段受拉钢筋的拉应力 (N/mm^2);

σ_{s0} ——加固后扣除所有预应力损失后受拉钢筋中的应力 (N/mm²);

N_0 ——加固后扣除所有预应力损失后碳纤维复材板的预拉力 (kN);

M_k ——正常使用阶段的标准荷载组合下的弯矩值 (kN·m);

M_1 ——碳纤维复材板施加预应力前, 计算截面所受弯矩值 (kN·m);

γ'_f ——受压翼缘加强系数;

$\sigma_{f,p0}$ ——加固后扣除所有预应力损失后碳纤维复材板的应力 (N/mm²);

A_f ——碳纤维复材板的截面面积 (mm²);

E_f ——碳纤维复材板的弹性模量 (MPa);

y_s ——截面重心至纵向受拉普通钢筋合力点的距离 (mm);

z ——受拉钢筋与碳纤维复材板合力点至受压区压力合力点的距离 (mm);

A_0 、 I_0 ——分别为将钢筋、碳纤维复材板按与混凝土弹性模型比换算成混凝土后的换算面积 (mm²) 和换算截面惯性矩 (mm⁴)。

5.4.14 采用预应力碳纤维复材板加固的钢筋混凝土受弯构件, 其抗裂控制要求应符合现行国家标准《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB50608) 的有关规定。对仅在受拉面粘贴碳纤维复材板加固的受弯构件, 加固后按荷载效应标准组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度 ω_{\max} , 可按下列公式计算:

$$\omega_{\max} = 2.1\psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} (1.9c + 0.08 \frac{d_s}{\rho_{te}}) \frac{1}{1 + \beta_f} \quad (5.4.14-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk} \rho_{te} (1 + 0.415 \frac{A_f}{A_s + A_f})} \quad (5.4.14-2)$$

$$\beta_f = \frac{A_f}{A_s + A_f} [(0.35 \frac{A_f}{A_s} + 0.05) \frac{d_s}{t_f} - 1] \quad (5.4.14-3)$$

式中 σ_{sk} ——荷载短期组合下受拉钢筋的拉应力 (N/mm²), 按式 (5.4.13-1) 计算, 且该式中 σ_{s0} 取为0;

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;

d_s ——受拉钢筋直径 (mm);

f_{tk} ——碳纤维复材板的抗拉强度标准值 (N/mm²);

A_s ——受拉钢筋截面面积 (mm²);

A_f 、 t_f ——分别为碳纤维复材板的截面面积 (mm²) 和厚度 (mm);

ψ ——钢筋应变不均匀系数;

β_f ——受拉面粘贴的碳纤维复材板对裂缝间距的影响系数。

5.4.15 采用预应力碳纤维复材板加固的钢筋混凝土受弯构件, 其挠度验算应符合现行国家标准《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB50608) 的有关规定。挠度变形应按现行的国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定计算。挠度变形计算尚应扣除施加预应力时产生的反拱变形。反拱变形 f 可按下式计算:

$$f = a_{cf} \frac{\sigma_{f,p0} A_f L^2}{4E_c I_0} e \quad (5.4.15)$$

式中 L ——计算跨度 (mm);

E_c ——受弯构件混凝土的弹性模量 (N/mm²);

a_{cf} ——碳纤维复材板层数影响系数, 1层时 a_{cf} 取1.0; 2层时 a_{cf} 取0.95; 3层时 a_{cf} 取0.9;

e ——复材板到中和轴的距离 (mm)。

5.5 受剪构件加固

5.5.1 粘贴复材片材对钢筋混凝土梁进行抗剪加固时, 应按下式进行斜截面受剪承载力验算:

$$\gamma_0 V_b \leq V_{b,rc} + V_{b,f} \quad (5.5.1-1)$$

式中 V_b ——梁的剪力设计值 (kN);

$V_{b,rc}$ ——未加固钢筋混凝土梁的受剪承载力设计值 (kN); 按现行国家标准

《混凝土结构设计规范》GB50010的规定计算；

$V_{b,f}$ ——加固梁达到受剪承载力极限状态时复材片材承担的剪力设计值

(kN)，按本规程第5.5.2条的规定计算。

5.5.2 粘贴复材片材对钢筋混凝土梁进行抗剪加固时，达到受剪承载力极限状态时复材片材承担的剪力设计值应按下列方法确定：

(1) 封闭粘贴或有可靠锚固措施的 U 形粘贴加固时，应按下列公式计算：

$$V_{b,f} = \eta_u \psi_v \frac{2w_f t_f}{s_f + w_f / \sin \alpha} \sigma_{f,vd} h_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (5.5.2-1)$$

$$\sigma_{f,vd} = \min \left(0.4 f_{fd}, \frac{0.006 E_f}{\gamma_f \gamma_e} \right) \quad (5.5.2-2)$$

$$h_{fe} = h_f - (h - 0.9h_0) \quad (5.5.2-3)$$

式中 $\sigma_{f,vd}$ ——采用封闭粘贴或有可靠锚固措施的U形粘贴受剪加固时复材片材的有效拉应力设计值 (N/mm²)；

s_f ——对梁进行加固的复材片材条带沿梁轴向净间距 (mm)，在轴向连续粘贴时取0；

w_f ——对梁进行加固的复材片材垂直纤维方向的条带宽度 (mm)；

t_f ——对梁进行加固的单侧复材片材的厚度 (mm)；

h_{fe} ——复材片材的有效粘贴高度 (mm)；

h_f ——抗剪加固时复材片材的实际粘贴高度 (mm)，取复材片材上、下边缘的的竖向距离；

h_0 ——梁的有效高度 (mm)，取纵筋中心到梁顶的竖向距离；

ψ_v ——二次受力影响系数，按本规程第5.5.3条的规定确定；

α ——复材片材纤维方向与梁轴线的夹角；

E_f ——复材片材的弹性模量 (MPa)；

η_u ——U形粘贴端锚区系数，U形粘贴开口位于截面受压区时取1，位于截面受拉区时取0.7；采用封闭粘贴加固时取1。

(2) U形及侧面粘贴加固时,应按下列公式计算,且 $V_{b,f}$ 不应大于式(5.5.2-1)的计算结果:

$$V_{b,f} = K_f \tau_b w_f \frac{h_{fe}^2}{s_f + w_f / \sin \alpha} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (5.5.2-4)$$

$$K_f = \phi \frac{\sin \alpha \sqrt{E_f t_f}}{\sin \alpha \sqrt{E_f t_f} + 0.3 h_{fe} f_t} \quad (5.5.2-5)$$

$$\tau_b = 1.2 \beta_w f_t \quad (5.5.2-6)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2.25 - w_f / (s_f + w_f)}{1.25 + w_f / (s_f + w_f)}} \quad (5.5.2-7)$$

式中 τ_b ——复材片材与混凝土的粘结强度设计值 (N/mm^2);

K_f ——U形及侧面粘结受剪加固时受剪剥离系数;

ϕ ——受剪加固形式系数,当侧面粘贴和U形粘贴开口位于截面受拉区时取1.0;当U形粘贴开口位于截面受压区时取1.3;

β_w ——复材片材宽度影响系数;

f_t ——混凝土抗拉强度设计值 (N/mm^2)。

5.5.3 对梁进行抗剪加固前,初始剪力设计值 V_i 对受剪承载力的影响可按下列方法确定:

(1) 对于封闭包裹或有可靠锚固措施的 U 形粘贴加固情况,当初始剪力 V_i 小于或等于 $0.7f_t b h_0$ 时,可不计二次受力的影响;当初始剪力 V_i 大于 $0.7f_t b h_0$ 时,复材片材的受剪承载力设计值可按下式计算二次受力影响的折减系数:

$$\psi_v = 1 - \frac{V_i - 0.7 f_t b h_0}{V - 0.7 f_t b h_0} \quad (5.5.3-1)$$

式中 V_i ——加固前梁受剪计算截面承担的初始剪力设计值 (kN)。

(2) 对于 U 形和侧面粘贴加固情况,可忽略二次受力的影响;

(3) 当初始剪力设计值 V_i 大于未加固截面受剪承载力设计值的 70%以上,且无法卸载时,不宜进行抗剪加固。

5.5.4 采用封闭粘贴复材片材方式对混凝土柱进行抗剪加固时,粘贴复材的纤维方向应与柱轴线垂直,并按下列公式进行斜截面受剪承载力验算:

$$\gamma_0 V_c \leq V_{c,rc} + V_{c,f} \quad (5.5.4-1)$$

$$V_{c,f} = \frac{K_s(1-n)w_{cf}t_{cf}}{s_{cf} + w_{cf}} \sigma_{f,vd} h \quad (5.5.4-2)$$

式中 V_c ——柱的剪力设计值 (kN);

$V_{c,rc}$ ——未加固钢筋混凝土柱的受剪承载力设计值 (kN), 按现行国家标准

《混凝土结构设计规范》GB50010的规定计算;

$V_{c,f}$ ——加固柱达到受剪承载力极限状态时复材片材承担的剪力设计值

(kN);

s_{cf} ——对柱进行加固的复材片材条带净间 (mm), 连续粘贴时取0;

w_{cf} ——对柱进行加固的复材片材条带宽度 (mm);

t_{cf} ——对柱进行加固的单侧复材片材的厚度 (mm);

$\sigma_{f,vd}$ ——封闭粘贴复材片材的有效拉应力设计值 (N/mm²), 按本规程式

(5.5.2-2) 确定;

K_s ——形状系数, 对于矩形截面取2; 对于圆形截面取1.57;

n ——柱的轴压比, 取为 $N_c/f_c A_c$, N_c 为柱轴向压力设计值, A_c 为柱截面面积;

h ——截面尺寸 (mm), 对圆形截面取直径; 对矩形截面取剪力作用方向的截面尺寸。

5.6 墩柱延性加固

5.6.1 粘贴纤维复材对墩柱进行延性加固时, 宜在柱端箍筋加密区采用沿墩柱轴向连续封闭粘贴, 复材的纤维方向应与柱轴线垂直。当柱为矩形截面时, 截面高度与宽度之比不宜大于 1.5, 倒角半径不宜小于 20mm 及截面长度的 1/10 (大应变纤维复材为截面长度的 1/12)。

5.6.2 墩柱经延性加固后, 应按本规程 5.5 节验算 E2 地震作用下桥墩的斜截面抗剪强度。

5.6.3 延性加固后，应按下式验算 E2 地震作用下桥墩潜在塑性铰区域塑性转动能力：

$$\theta_p \leq \theta_u \quad (5.6.3-1)$$

式中 θ_p ——E2地震作用下，潜在塑性铰区域的塑性转角；

θ_u ——加固后塑性铰区域的最大容许转角，可按本规程第5.6.4条计算；

5.6.4 根据加固后墩柱极限破坏状态的曲率能力，塑性铰区域的最大容许转角应按下式计算：

$$\theta_u = L_p(\phi_u - \phi_y) / K_{ds} \quad (5.6.4-1)$$

$$L_{p1} = 0.08H + 0.022f_y d_s \geq 0.044f_y d_s \quad (5.6.4-2)$$

$$L_{p2} = \frac{2}{3}b \quad (5.6.4-3)$$

$$L_p = \min(L_{p1}, L_{p2}) \quad (5.6.4-4)$$

式中 H ——悬臂墩的高度或塑性铰截面到反弯点的距离 (cm)；

K_{ds} ——延性安全系数，可取2.0；

ϕ_y ——截面的等效屈服曲率 (1/cm)，可按本规程第5.6.5条计算；

ϕ_u ——极限破坏状态的曲率 (1/cm)，可按本规程第5.6.6条计算；

L_p ——等效塑性铰长度 (cm)；

b ——矩形截面的短边尺寸或圆形截面的直径 (cm)；

f_y ——纵向钢筋的受拉强度标准值 (MPa)；

d_s ——纵向钢筋的直径 (cm)。

5.6.5 截面的等效屈服曲率 ϕ_y 与等效屈服弯矩 M_y 应考虑最不利轴力组合，通过把实际的轴力-弯矩-曲率曲线等效为理想弹塑性轴力-弯矩-曲率曲线来求得 (图 5.6.5)，等效方法可根据图中阴影面积相等求得。

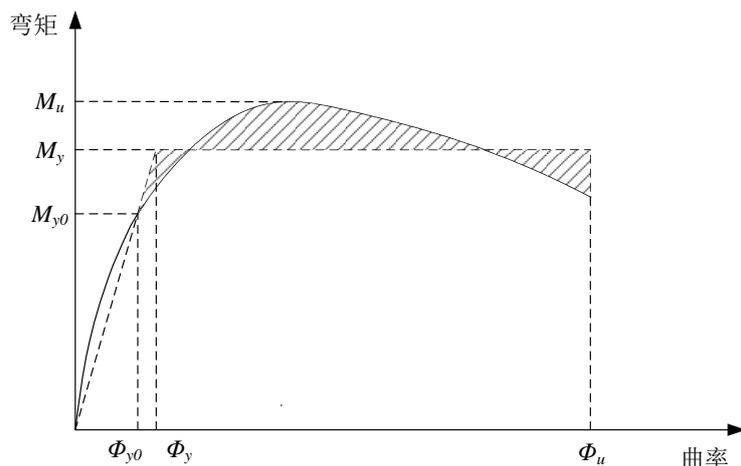


图 5.6.5 弯矩-曲率曲线

5.6.6 延性加固后，极限破坏状态的曲率 ϕ_u 应通过考虑最不利轴力组合的轴力-弯矩-曲率曲线确定，为混凝土达到极限压应变 ε_{cu} ，或约束钢筋达到折减极限应变 ε_{cu}^R ，或纵筋达到折减极限应变 ε_{lu} 时对应的曲率。混凝土的极限压应变可按下式计算：

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_v f_{hk} \varepsilon_{su}^R}{f'_{cc}} \quad (5.6.6-1)$$

式中 ρ_v ——延性加固后，总折算体积含箍率，可按本规程5.6.7条计算；

f_{hk} ——箍筋抗拉强度标准值（MPa）；

f'_{cc} ——约束混凝土的峰值应力（MPa），一般情况下可取1.25倍的混凝土抗压强度标准值；

ε_{su}^R ——约束钢筋的折减极限应变， $\varepsilon_{su}^R = 0.09$ 。

5.6.7 墩柱经延性加固后，总折算体积含箍率可按下列公式计算：

$$\rho_v = \rho_{ve} + \rho_{vf} \quad (5.6.7-1)$$

$$\rho_{vf} = \frac{t_f u w_f}{A_c (w_f + s_f)} \cdot \frac{E_f \varepsilon_{fe}}{f_{svd}} \quad (5.6.7-2)$$

式中 ρ_{ve} ——被加固柱原有箍筋的体积含箍率；当需要重新复核时，应按箍筋范围内的核心截面进行计算；

ρ_{vf} ——纤维复材作为附加箍筋折算的体积含箍率的增量；

t_f ——纤维复材的厚度（mm）；

u ——柱截面周长 (mm);

w_f ——纤维复材条带的宽度 (mm);

s_f ——纤维复材条带净间距 (mm);

A_c ——柱截面面积 (mm²);

ε_{fe} ——连续封闭粘贴纤维复材对钢筋混凝土柱抗震加固时纤维复材有效应变值, 按本规程表5.6.7取值, 当柱的轴压力设计值下的轴压比大于0.5时, 本规程表5.6.7中的值宜乘以0.8;

E_f ——复材的弹性模量 (N/mm²);

f_{svd} ——箍筋抗拉强度设计值 (N/mm²)。

表 5.6.7 抗震加固时纤维复材的有效应变

纤维种类		截面形状	
		矩形截面	圆柱
高强型碳纤维复材		0.005	0.006
玻璃纤维和芳纶纤维复材		0.007	0.008
大应变纤维复材	聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)	0.030	0.040
	聚萘二甲酸乙二醇酯 (PEN)	0.015	0.020

5.7 钢构件抗疲劳加固

5.7.1 当承受动力荷载的钢结构构件或连接件的疲劳承载力不满足要求, 或已达到设计疲劳寿命时, 可采用纤维复合材料进行疲劳加固。当构件有疲劳裂纹时, 应先对疲劳裂纹进行修复。

5.7.2 采用纤维复合材料进行疲劳加固宜采用双面粘贴的加固方式, 平整的加固面宜采用复材板进行加固, 焊缝等不平整的加固面宜采用复材布进行加固。

5.7.3 进行疲劳加固设计时, 粘贴的复材的纤维方向宜垂直于构件既有裂纹的扩展方向或平行于应力集中处的主拉应力方向。

5.7.4 当根据被加固部位的应力幅水平对加固后的钢构件进行疲劳验算时, 被加固构件的应力幅应按下列公式计算:

(1) 当构件处于受拉状态时, 应按下列公式计算:

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma \times \frac{E_s A_s}{E_s A_s + E_f A_f} \quad (5.7.4-1)$$

(2) 当构件处于受弯状态时, 应按下式计算:

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma \times \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_f I_f} \quad (5.7.4-2)$$

式中 $\Delta\sigma_s$ ——加固后计算应力幅 (N/mm^2);

$\Delta\sigma$ ——加固前计算应力幅 (N/mm^2);

E_f ——碳纤维复材的弹性模量 (MPa);

E_s ——钢材的弹性模量 (MPa);

A_f ——碳纤维复材的截面积 (mm^2);

A_s ——加固部位钢结构的截面积 (mm^2);

I_s ——加固部位钢结构的截面惯性矩 (mm^4);

I_f ——加固部位碳纤维复材的截面惯性矩 (mm^4)。

5.7.5 对于已经存在疲劳裂缝的钢梁截面, 若疲劳裂缝不能修复处理, 需对加固后钢梁裂缝尖端的应力强度因子进行评估验算, 加固后的应力强度因子应满足:

$$K_I < K_d \quad (5.7.5-1)$$

式中 K_I ——基体钢材裂缝尖端的强度应力因子设计值 ($\text{MPa}\times\text{m}^{-1/2}$);

K_d ——基体钢材的应力强度因子设计值 ($\text{MPa}\times\text{m}^{-1/2}$)。

5.7.6 钢结构加固后有裂缝缺陷截面处, 碳纤维复材中的抗拉应力需满足下列要求:

$$\sigma_f < \min(0.7f_{fd}, f_{bl}) \quad (5.7.6-1)$$

式中 σ_f ——碳纤维复材的拉应力 (MPa);

f_{fd} ——碳纤维复材抗拉强度设计值 (MPa);

f_{bl} ——FRP/钢结构粘接界面的剥离强度 (MPa);

FRP/钢结构粘接界面的剥离强度 f_{bl} 按下式进行计算:

$$f_{bl} = \frac{1}{t_f} \sqrt{2G_f \frac{E_f t_f}{1+\alpha}} \quad (5.7.6-2)$$

$$\alpha = \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \quad (5.7.6-3)$$

式中 t_f ——碳纤维复材厚度 (mm);

G_f ——碳纤维/钢结构粘接界面的断裂能 (N/mm), 可通过碳纤维复材与钢材单剪试验进行测量; 在缺乏相关测试数据情况下, 建议取保守值1.0 (N/mm)。

5.7.7 对疲劳加固的碳纤维复材应采取有效锚固措施

5.8 复材网格加固

5.8.1 对于潮湿环境中服役的混凝土结构以及防火等级较高的混凝土结构, 宜采用复材网格增强水泥基复合材料进行加固。

5.8.2 矩形或 T 型截面受弯构件, 混凝土强度等级不大于 C50 时, 采用复材网格增强水泥基复合材料进行抗弯加固, 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小于 $0.8\xi_b h_0$, 且大于 h'_f 时 (图 5.8.2-1):

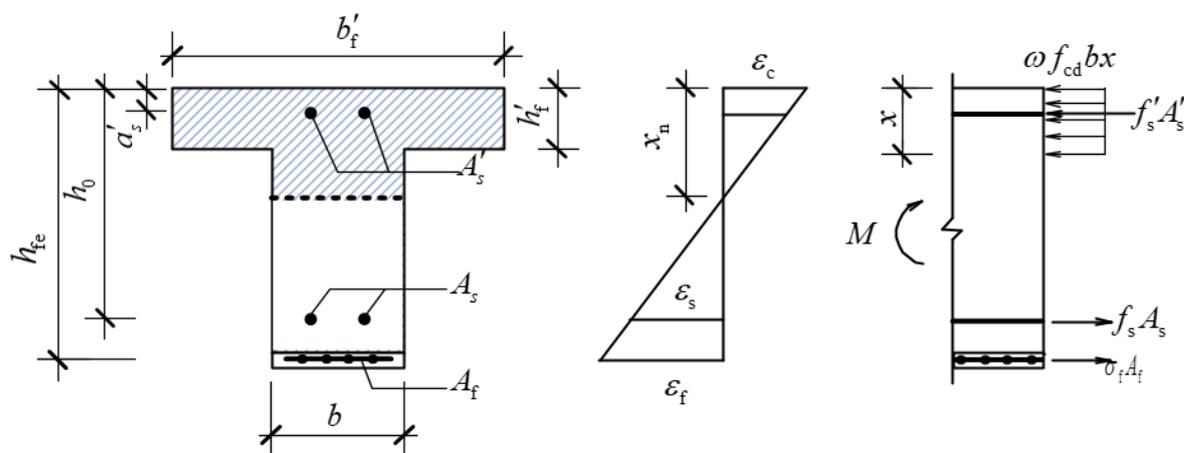


图 5.8.2-1 $x > h'_f$ 时正截面受弯承载力计算截面应力与应变

$$\gamma_0 M_d \leq \omega f_{cd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \omega f_{cd} (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma_f A_f (h_{fe} - h_0) \quad (5.8.2-1)$$

$$\omega f_{cd} b x + \omega f_{cd} (b'_f - b) h'_f = f_{sd} A_s - f'_{sd} A'_s + \sigma_f A_f \quad (5.8.2-2)$$

式中 γ_0 ——桥梁结构的重要性系数，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）的规定采用；

M_d ——包含初始弯矩的总弯矩设计值（kN·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} ——复材网格的面积形心至受压边缘的有效高度（mm）；

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'_s ——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（mm²）；

A_f ——复材网格受拉方向各肢的名义截面积之和（mm²）；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm²）；

f_{sd} 、 f'_{sd} ——受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值（N/mm²）；

σ_f ——达到受弯承载力极限状态时，复材网格拉应力设计值（N/mm²）；

ω ——受压区混凝土等效应力图形的折减系数。

(2) 当混凝土受压区高度小于 h'_f ，且大于 $2a'_s$ 时（图 5.8.2-2）：

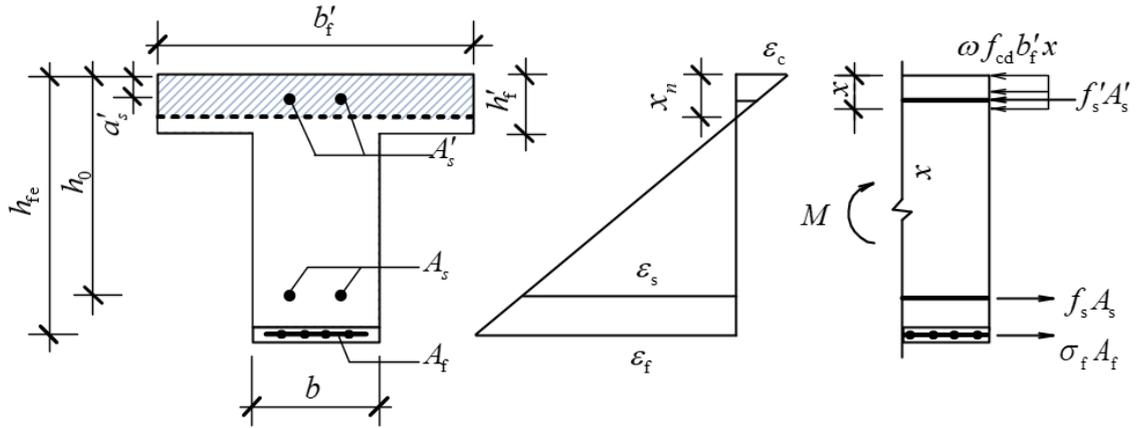


图 5.8.2-2 $2a'_s < x < h'_f$ 时正截面受弯承载力计算截面应力和应变

$$\gamma_0 M_d \leq \omega f_{cd} b'_f x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma_f A_f (h_{fe} - h_0) \quad (5.8.2-3)$$

$$\omega f_{cd} b'_f x = f_{sd} A_s - f'_{sd} A'_s + \sigma_f A_f \quad (5.8.2-4)$$

(3) 当混凝土受压区高度 x 小于 $2a'_s$ 时:

$$\gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s (h_0 - a'_s) + \sigma_f A_f (h_{fe} - a'_s) \quad (5.8.2-5)$$

(4) 达到受弯承载力极限状态时, 复材网格的拉应力设计值应按下列式计算:

$$\sigma_f = \min \{ f_{fd}, E_f \varepsilon_{fm} \} \quad (5.8.2-6)$$

式中 f_{fd} ——复材网格的抗拉强度设计值 (N/mm^2), 取 $f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f \gamma_e}$;

ε_{fm} ——受压边缘混凝土达到极限压应变时复材网格的有效拉应变;

E_f ——复材网格的弹性模量 (N/mm^2)。

(5) 当 $E_f \varepsilon_{fm} > f_{fd}$ 时, 受压区混凝土等效应力图形的折减系数应按下列式计算:

$$\omega = 0.5 + 0.5 \frac{f_{fd} / E_f}{\varepsilon_{fm}} \quad (5.8.2-7)$$

5.8.3 受压边缘混凝土达到极限压应变时, 复材网格的有效拉应变 ε_{fm} , 应按下列公式计算:

(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:

$$f_{cd} [bx + (b'_f - b)h'_f] = f_{sd} A_s - f'_{sd} A'_s + E_f \varepsilon_{fm} A_f \quad (5.8.3-1)$$

$$x = \frac{0.8 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fm}} h_{fe} \quad (5.8.3-2)$$

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

$$f_{cd}b'_fx = f_{sd}A_s - f'_{sd}A'_s + E_f\varepsilon_{fm}A_f \quad (5.8.3-3)$$

$$x = \frac{0.8\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fm}}h_{fe} \quad (5.8.3-4)$$

式中 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) 的有关规定确定, 对于不大于C50级的混凝土, 取0.0033

5.8.4 采用复材网格增强水泥基材料对混凝土梁进行抗剪加固时, 应按下列公式进行斜截面受剪承载力计算:

$$\gamma_0V_b \leq V_{b,rc} + V_{b,f} \quad (5.8.4-1)$$

式中 γ_0 ——桥梁结构的重要性系数, 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) 的规定采用;

V_b ——梁的剪力设计值 (kN);

$V_{b,rc}$ ——未加固钢筋混凝土梁的受剪承载力设计值 (kN), 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;

$V_{b,f}$ ——达到受剪承载力极限状态时复材网格承担的剪力设计值 (kN), 按本规程第5.8.5条的规定计算。

5.8.5 采用复材网格增强水泥基材料对混凝土梁进行抗剪加固时, 达到受剪承载力极限状态时复材网格承担的剪力设计值应按下列方法确定:

$$V_{b,f} = \frac{n_f A_{f1} E_f \varepsilon_{fm} h_f}{s} \quad (5.8.5-1)$$

$$\varepsilon_{fm} = \min\{\varepsilon_{fd}, \varepsilon_f\} \quad (5.8.5-2)$$

式中 A_{f1} ——梁长垂直方向上的单肢复材网格的截面面积 (mm^2);

n_f ——复材网格层数;

h_f ——复材网格的粘贴高度 (mm);

s ——相邻单肢复材网格之间的距离 (mm)。

E_f ——复材网格的弹性模量 (MPa);

ε_{fm} ——复材网格的有效拉应变;

ε_{fd} ——复材网格的拉应变设计值。

ε_f ——复材网格应变, 碳纤维复材网格取0.001, 玄武岩纤维复材网格取0.003。

5.9 构造要求

5.9.1 纤维复合材料粘贴应满足以下规定:

1 纤维复合材料宜粘贴成条带状, 非围束时不宜超过 2 层, 布材不宜超过 3 层。

2 纤维复合材料沿纤维受力方向的搭接长度不应小于 100mm; 当采用多条或多层纤维增强复合材加固时, 其搭接位置应相互错开。

3 粘贴多层纤维复合材料加固时, 宜将纤维复合材料逐段截断, 并在每层截断处最外层加压条或 U 型锚固, 其粘贴形式采用内短外长式, 相邻两层截断点间距离不小于 200mm, 见图 5.9.1-1。

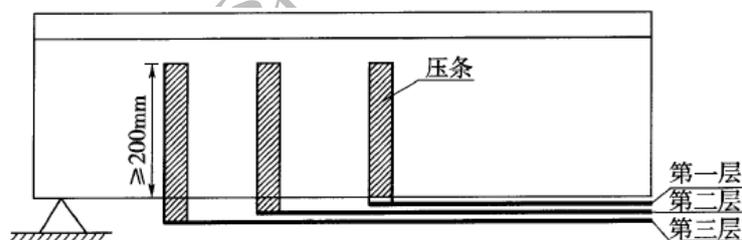


图 5.9.1-1 多层纤维增强复合材料粘贴构件

4 当纤维复合材料绕过构件 (截面) 的外倒角时, 构件的截面棱角应在粘贴前打磨成圆弧面, 见图 5.9.1-2。圆化半径, 梁不应小于 20mm; 柱不应小于 25mm。对于主要受力纤维增强复合材料不宜绕过内倒角。

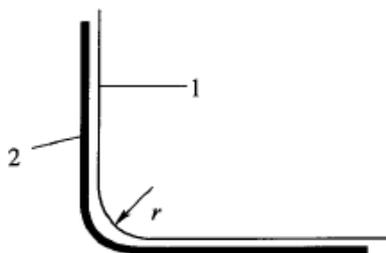


图 5.9.1-2 构件外倒角处粘贴示意图

1-构件；2-纤维复合材料

5 当采用纤维复合材料对钢筋混凝土梁或柱的斜截面承载力进行加固时，其构造应符合下列规定：

- 1) 宜选用环形箍或端部自锁式 U 形箍，当仅按构造需要设箍时，也可采用一般 U 形箍；
- 2) U 形箍的纤维受力方向应与构件轴向垂直；
- 3) 一般情况下，在梁的中部应增设一道纵向中压带。

5.9.2 柱的加固

5.9.2.1 采用纤维复合材料的环向围束对钢筋混凝土柱的强度及延性进行提升时，纤维复材条带应采用全长无间隔环向连续方式粘贴，且纤维方向应与柱的纵轴线垂直。纤维复合材料环向围束构造应符合以下规定：

1 环向围束的纤维复合材料层数，对圆形截面不应小于 2 层，对方形截面不应小于 3 层。

2 环向围束上下层之间的搭接宽度不应小于 50mm，纤维复合材料环向截断点的延伸长度不应小于 200mm，且各条带搭接位置应相互错开。

5.9.2.2 对于偏心受压柱，可将纤维复合材料粘贴于柱受拉区边缘混凝土表面，纤维方向应与主梁的纵轴线方向一致，且应用足够的锚固长度。对于大偏心受压柱，柱的两端应增设可靠的机械锚固措施。

5.9.3 梁和板的加固

5.9.3.1 对梁、板进行抗弯加固时（图 5.9.3），纤维复合材料切断位置距其充分利用截面的距离不应小于按下式计算得出粘结长度 l_d ，可在纤维复合材料两端设置 U 形箍或横压条。

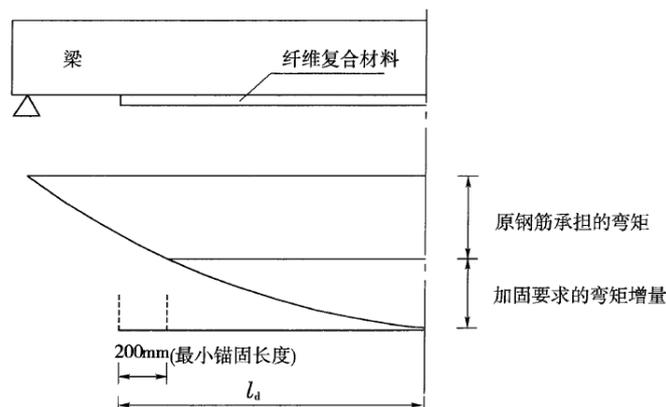


图 5.9.3 纤维复合材料的粘贴延伸长度

$$l_d = \frac{E_f \varepsilon_f A_f}{\tau_b b_f} + 200$$

式中 l_d ——纤维复材从强度充分利用截面向外延伸所需的粘结长度 (mm)；

ε_f ——充分利用截面处纤维复合材料的拉应变，通过计算确定；

τ_b ——纤维复合材料与混凝土间的粘结强度设计值，一般取0.5MPa；

b_f ——受拉面上粘贴的纤维复材的宽度 (mm)。

5.9.3.2 对受弯构件进行正截面抗弯加固时，纤维复合材料粘贴应符合下列规定：

- 1 应粘贴在构件受拉区表面，纤维方向应沿受拉方向；
- 2 当粘贴在梁的受拉区侧面时，粘贴高度不宜高于梁截面高度的 1/4；
- 3 纤维带端部附加的开缝板应安装在弯矩较小的区域；
- 4 当需重叠布置多层纤维带时，各层长度宜有差异，端绕开缝板并全长粘贴的纤维带应按内长外短的方式进行安装，锚孔的纵向距离不应小于 200mm。

5.9.3.3 对受弯构件斜截面抗剪加固时，其构造应符合下列规定：

- 1 纤维方向宜与构件轴线垂直或与其主拉应力方向平行。
- 2 纤维复合材料宜粘贴成 U 形，有条件时可粘贴成环形；当构件侧面的粘贴高度较大时，可粘贴成一字形。

3 U 形纤维带成一字形纤维带端部应附加自锁式锚板，并应采用锚栓锚固。

5.9.3.4 当纤维复合材料延伸至支座边缘仍不满足粘结长度 l_d 的规定时，应采取以下锚固措施：

1 对梁，应在延伸长度范围内均匀设置不少于三道 U 形箍锚固（图 5.9.3-a），其中一道应设置在延伸长度端部。U 形箍采用纤维复合材料制作；U 形箍的粘贴高度应为梁的截面高度；当梁有翼缘，应延伸至其底面。U 形箍的宽度，对端部箍不应小于加固纤维复合材料宽度的 2/3，且不应小于 150mm；对中间箍不应小于加固纤维复材条带宽度的 1/2，且不应小于 100mm。U 形箍的厚度不应小于受弯加固纤维复合材料厚度的 1/2。

2 对板，应在延伸长度范围内通长设置垂直于受力纤维方向的压条（图 5.9.3-b）。压条采用纤维复合材料制作。压条除应在延伸长度端部布置一道外，尚宜在延伸长度范围内再均匀布置 1 道~2 道。压条的宽度不应小于受弯加固纤维复材条带宽度的 3/5，压条的厚度不应小于受弯加固纤维复合材料厚度的 1/2。

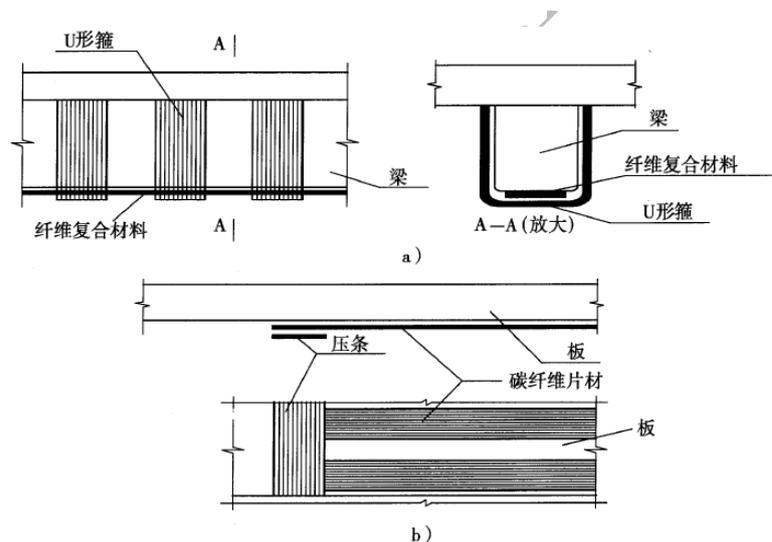


图 5.9.3 抗弯加固时纤维复合材料端部附加锚固措施

a) U 形箍；b) 纤维复材压条

3 纤维复合材料延伸至支座边缘，延伸长度小于粘结长度 l_d 的一半，应将端箍（或端部压条）改为钢材制作、传力可靠的机械锚固措施。

5.9.4 当采用复合网格对钢筋混凝土结构进行加固时，其构造应符合下列规定：

- 1 加固用水泥基材料的抗压强度应不低于原混凝土的抗压强度，且主要力学性能指标应满足国家现行有关标准的规定；
- 2 加固层水泥基材料的厚度不宜小于 25mm；
- 3 复材网格的最小保护层的厚度不应小于 10mm；
- 4 复材网格距被加固构件表面的距离不应小于 4mm；

5 被加固的混凝土构件表面应经凿毛处理，并应采取涂刷界面剂，增设锚固件等措施，以保证加固层与原结构的共同工作；

6 使用复材网格加固混凝土构件时，对于板类构件应均匀布设不小于 M6 的金属扩张型铆钉（图 5.9.4-1），且每平米不少于 6 根，并应根据原结构的表面状况来调整锚固件的数量。对于梁构件宜根据结构尺寸适当加密锚固件的布设，且应在梁端的复材网格各肢分别设置不少于 2 个锚固件。

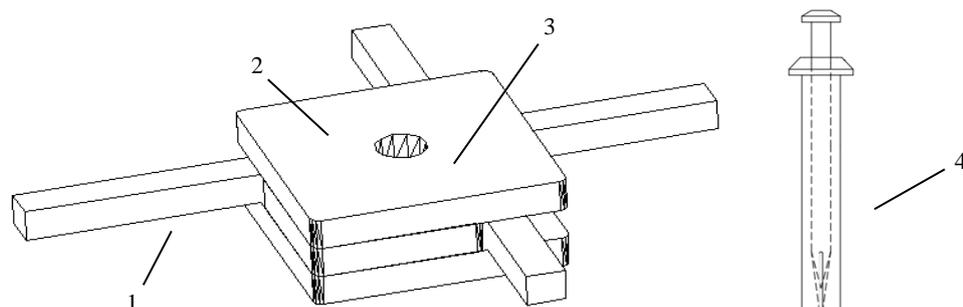


图 5.9.4-1 复材网格锚固件示意图

1-复材网格；2-锚固件；3-铆钉孔；4-铆钉

7 对于复材网格连接接头，可在应力传递方向设置交叉三点及以上的搭接接头或对接接头（图 5.9.4-2），应在搭接位置增设锚固件。

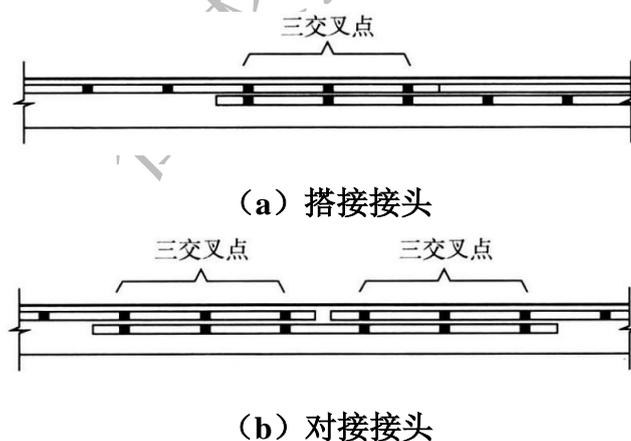


图 5.9.4-2 复材网格连接接头

5.9.5 当采用预应力碳纤维复材板对桥梁构件进行抗弯加固时，其构造应符合下列规定：

- 1 预应力纤维复材板两端应设有永久性的机械锚固或其他可靠锚固措施，中间区段宜采用横条粘贴或机械锚固的构造措施；
- 2 采用锚栓进行端部机械锚固时，应进行防腐防护。

5.9.6 外贴碳纤维复合材料进行钢结构疲劳加固时，宜在纤维复材末端部采用适当构造措施以抑制端部界面剥离（5.9.6-1 所示）。在无法进行机械锚固时、复材端部需进行楔形处理，即在板端逐渐降低纤维复材的厚度（5.9.6-2 所示，楔形尖端角度 α 可选取在 10° 至 20° 之间）。

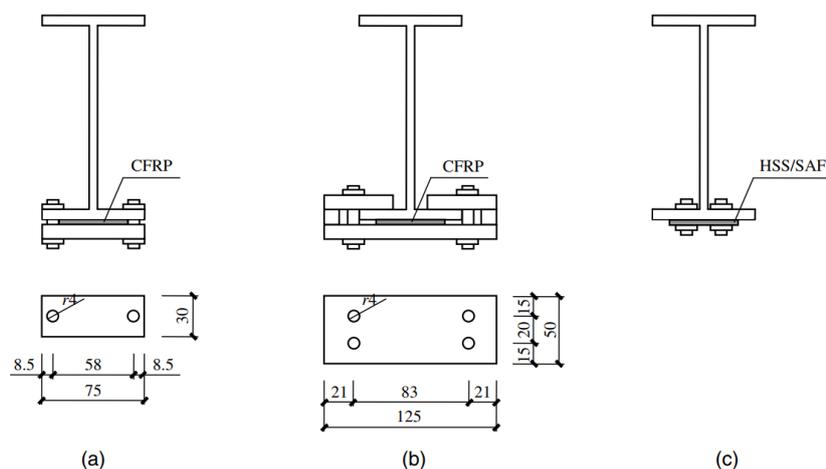


图 5.9.6-1 复材端部锚具构造

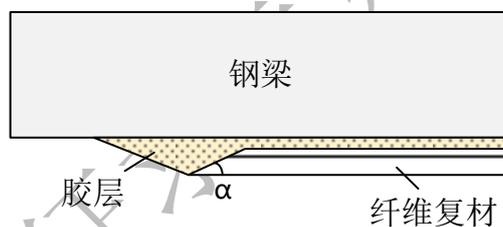


图 5.9.6-2 纤维复材端部楔形处理

在采用端部机械锚具锚固时，应力通过锚具经螺栓传至构件锚固区，容易导致锚固区应力集中导致的屈曲破坏。钢结构中通常采用图 5.9.5-3 所示的局部加强方式，即通过焊接加劲肋以消散端部下翼缘附近的应力集中。

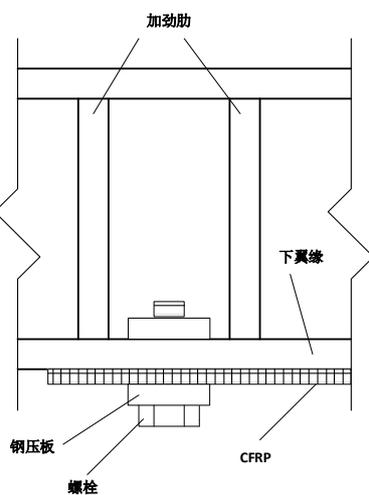


图 5.9.6-3 锚固位置钢梁局部加强

征求意见稿

6 加固施工

6.1 一般规定

6.1.1 采用粘贴复材片材进行加固时，被加固混凝土构件的实测混凝土强度等级不应低于 C15。采用预应力碳纤维复材板进行加固时，被加固混凝土构件的实测混凝土强度等级不应低于 C25。

6.1.2 加固施工宜在 5°C~35°C 环境温度条件下进行，并应符合配套胶黏剂的施工使用温度。

6.1.3 加固使用的纤维复合材料、胶黏剂的品种、规格、性能应符合国家现行有关产品标准和设计的规定。

6.1.4 加固使用的纤维复合材料、胶黏剂，应严格按照使用说明进行储存和使用。

6.1.5 加固施工前应采取措施卸除或大部分卸除作用在结构上的活荷载。

6.1.6 加固施工前应根据设计要求及施工现场的实际状况编制专项施工方案或技术方案，方案应包括但不限于施工计划、技术参数、工艺流程、操作要求、检验方法、安全措施等。

6.1.7 采用预应力碳纤维复材板加固时，专项施工方案或技术方案应经加固设计单位确认后再实施。

6.2 粘贴复材片材加固

6.2.1 粘贴复材片材施工之前，应按下列规定对被加固构件表面进行处理：

1 对混凝土：

- 1) 应清除被加固构件表面的剥落、疏松、蜂窝、腐蚀等劣化混凝土，并应露出坚实的混凝土结构层，同时应修复平整。
- 2) 应按设计要求对裂缝进行灌缝或封闭处理。
- 3) 被粘贴的混凝土表面应打磨平整，并应除去表层浮浆、油污等杂质，直至完全露出混凝土结构新面。
- 4) 转角粘贴处应进行倒角处理并打磨成圆弧状，曲率半径不应小于 20mm。

5) 混凝土表面应清理干净并保持干燥。

2 对钢结构:

- 1) 应清除被加固构件表面油污、锈蚀。
- 2) 当钢结构表面存在宏观裂纹时,应在裂纹尖端约 2mm 区域钻止裂孔。

6.2.2 纤维布粘贴施工应按下列步骤和要求进行:

1 按设计要求的尺寸裁剪纤维布。

2 配制并涂刷底层树脂。应采用滚筒刷将配制好的底层树脂均匀涂刷于混凝土表面。在底层树脂表面指触干燥后,应尽快进行下一工序的施工。

3 配制找平材料并对不平整处进行找平处理。对混凝土表面凹陷部位应采用找平材料填补平整,不应有棱角。在找平材料表面指触干燥后,应尽快进行下一工序的施工。

4 配制并涂刷浸渍树脂。应采用滚筒刷将配制好的浸渍树脂均匀涂刷于粘贴部位。

5 将片材用手轻压贴于需粘贴的位置,应采用专用的滚子顺纤维方向多次滚压,并应挤除气泡,滚压时不得损伤纤维布。

6 多层粘贴时应重复本条第 4 和 5 款的步骤,并应在纤维表面的浸渍树脂指触干燥后尽快进行下一层粘贴。

7 最后一层片材的表面应均匀涂抹浸渍树脂。

8 表面应进行防护处理。

6.2.3 复材板粘贴施工应按下列步骤和要求进行:

1 按设计要求的尺寸切割复材板。当采用表面未经粗糙化处理的复材板时,应将复材板粘贴面打磨处理。

2 配制并涂抹复材板胶黏剂。应将复材板表面擦拭干净,并应立即涂抹配制好的复材板胶黏剂,胶层应呈突起状,最小厚度不宜小于 2mm。

3 粘贴复材板。将涂有胶黏剂的复材板用手轻压贴于需粘贴的位置,采用橡皮滚筒顺纤维方向均匀平稳压实,并应保证密实无空洞。

4 需粘贴两层复材板时,应连续粘贴。底层复材板的两面均应粗糙并擦拭干净。当不能立即粘贴时,再开始粘贴前应对底层复材板重新进行清理。

5 表面应进行防护处理。

6.2.4 在高湿及海洋等环境下，采用碳纤维复材加固钢结构时，宜在碳纤维复材和钢材之间增加绝缘层。

6.2.5 当因外观要求、避免阳光直射、防止撞击或防火等原因需要进行表面防护时，应保证防护材料与复材片材之间有可靠的粘结。

6.2.6 施工完成后应注意成品维护，后续的施工中在加固部位不应进行有明火的操作，并应避免在加固部位进行穿孔或切割等破坏复材片材的操作行为。

6.3 预应力碳纤维复材板加固

6.3.1 粘贴预应力碳纤维复材板前，应按 6.2.1 规定进行表面处理。如存在裂缝，应采用裂缝修补胶灌注结构裂缝，其施工工艺应符合混凝土裂缝处理相关规定。

6.3.2 预应力碳纤维复材板加固施工应按下列步骤和要求进行：

1 钻孔并植入螺栓。钻孔前应先探明待加固构件植入螺栓部位钢筋位置并标记，若冲突则应适当调整钻孔位置。

2 安装固定端固定板。固定板中心线应与碳纤维复材板中心线重合。

3 粘贴复材板与夹具安装。应按设计要求的尺寸切割复材板，夹具模腔长度范围内的复材板正反两面均应进行打磨处理。

4 预应力张拉。复材板张拉时应按张拉应力和伸长量两个参数指标进行控制。

5 对复材板进行补胶。要求复材板与混凝土之间的缝隙均填满胶黏剂。

6 表面应防护。

6.3.3 钻孔处理，应符合下列规定：

1 根据待加固构件的放线定位，确定钻孔位置。

2 钻孔前应先探明待加固构件植入螺栓部位钢筋位置，并做标记，若孔位处存在钢筋，则应适当调整钻孔位置。

3 采用植筋法安装螺栓时，应采用与螺栓直径配套的钻头进行钻孔。

4 成孔后应及时清理孔位，并植入锚栓，锚栓应垂直于混凝土表面。

6.3.4 固定端固定板的安装应在植筋胶固化完成后进行。固定端固定板中心线应与碳纤维复材板中心线重合。

6.3.5 施工碳纤维板材时应远离电气设备和电源，或采取可靠的防护措施，并避免板材弯折。

6.3.6 碳纤维板材胶黏剂可按生产厂家提供的工艺条件进行配制，配制和使用场所应保持通风良好。胶黏剂原料应密封存储，远离火源，避免阳光直接照射。

6.3.7 粘贴碳纤维板与夹具的安装应符合以下规定：

1 按照设计尺寸裁剪碳纤维板材，并用砂纸将夹具模腔长度范围内的碳纤维板正反两面均匀打磨成毛面。

2 采用丙酮溶液将夹具模腔内部和打磨后的板材两面擦拭干净，待丙酮挥发干净后方可进行碳纤维板与夹具的粘结。

3 调制好的粘结胶应及时使用，用一次性软毛刷或特制滚筒将粘结胶均匀涂抹在夹具底板、盖板模腔和碳纤维板两端的正反面层，不得漏刷、流淌或有气泡。

4 碳纤维板不宜搭接，应按设计尺寸一次完成下料。已裁剪的碳纤维板应尽快使用。

5 将涂抹好胶黏剂的碳纤维板缓慢放入夹具内，并迅速拧紧锚具夹板，防止放入后的碳纤维板发生活动和松动。

6 锚固端和张拉端的碳纤维应平直、无表面缺陷。

7 待胶体固化后应尽快进行下一道工序，若涂刷时间超过 7 天，应清除原胶，重新涂抹。

6.3.8 预应力张拉应按下列步骤进行：

1 施加 10% 的张拉控制应力值，使碳纤维板绷直，卸荷。记录张拉端夹具的位置，并再次检查各部件的位置。

2 分别施加 20% 和 60% 张拉控制应力值，每一级张拉结束后用扳手拧紧螺帽，每一级之间持荷 5 分钟，记录张拉端夹具的位置，比较实测值与计算值之间的偏差。

3 施加 100% 张拉控制应力值，计算最终碳纤维板张拉伸长值，并持荷 5 分钟。

4 使用双螺帽固定张拉螺杆，卸除千斤顶。

5 切除过长的张拉螺杆，螺帽后端留 3cm。

6.3.9 碳纤维板张拉时应按张拉应力和伸长量两个参数指标进行控制。若实际伸长量小于理论伸长量甚至两者误差大于 $\pm 6\%$ ，应检查锚具位移是否顺畅或存在人为非正常摩擦阻力，卸载后重新张拉。

6.3.10 当张拉过程中发现有明显滑移现象或达不到设计张拉应力时，应调整螺栓紧固力后重新张拉。当张拉过程顺利且达到设计应力后，松开张拉装置，涂布胶黏剂，二次张拉至设计应力值。

6.3.11 预应力加载至指定范围后，锁紧固定板后卸载千斤顶，拧紧压紧条，保证碳纤维板和压紧条之间无间隙。

6.3.12 张拉完成后，对碳纤维板材表面应按设计要求进行防护处理，防护材料的粘结性能应与碳纤维板材表面涂刷的胶黏剂相容，并能可靠粘结。对外露的锚具也应采取防腐措施加以保护。

6.3.13 雨天或空气潮湿条件下不宜进行张拉施工。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。

6.4 复材筋及复材网络加固

6.4.1 加固前应对原结构构件的截面尺寸、轴线位置、裂缝状况、外观特征等进行检查和复核。当与原设计或现有加固设计要求不符时，应及时通知设计单位处理。

6.4.2 复材筋应具有出厂质量证明和报告单，使用前应分批抽样进行性能检验，检验合格后使用。复材筋应符合现行国家标准《结构工程用纤维增强复合材料筋》（GB/T 26743）的规定。复材网格应符合现行国家标准《结构工程用纤维增强复合材料网格》（GB/T 36262）的规定。同时，加固材料的安全性能应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》（GB 50728）的规定。

6.4.3 复材筋及复材网格的类别应按设计方案采用，需替换时，应取得设计人员书面认可。复材筋及复材网格表面不应有明显划痕，截断面面积损失率不得超过 1%，不满足要求应作为废料处理。

6.4.4 复材筋及复材网格的 FRCM 加固施工，应按下列步骤进行：

- 1 清理、修整原结构、构件，并进行界面处理。
- 2 复材筋及复材网格的定位件固定及锚栓施工。
- 3 复材筋及复材网格制作与安装。
- 4 施加 FRCM 加固层水泥基材料（支模浇筑、增厚抹面或喷射施工）。
- 5 养护。
- 6 施工质量检验。

6.4.5 在复材筋及复材网格加固施工之前，应按下列规定对被加固构件混凝土基层进行处理：

- 1 应清除被加固构件表面的剥落、疏松、蜂窝、腐蚀等劣化混凝土。对外露钢筋的锈蚀层及其周边粘结失效的混凝土应清除并应打磨钢筋至其表面露出金属光泽。
- 2 结合面处理过程中，结合面凿毛凹凸差不宜小于 6 mm，并露出粗骨料。
- 3 混凝土表面应清理干净，保持清洁湿润。

6.4.6 复材筋及复材网格安装时，应采用定位件固定位置，并宜采用塑料或其他无腐蚀性材料的专用定位件。定位件应具有足够的承载力、刚度、稳定性和耐久性。复材筋及复材网格安装的允许偏差为 $\pm 5\text{mm}$ 。复材筋及复材网格在 FRCM 层中的最小保护层厚度不应小于 15mm。

6.4.7 采用浇筑方式进行加固层水泥基材料施工时，支架、模板应满足强度、刚度和稳定性的要求，制作安装应符合专项施工方案要求，应稳固牢靠，接缝严密。其设计和施工应符合现行行业标准《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ2 和《建筑施工模板安全技术规范》JGJ162 的有关规定。

6.4.8 浇筑或涂抹水泥基材料前，应对埋置于其中的复材筋及复材网格进行全面检查验收，符合要求后方可进行施工。原混凝土表面应保持清洁湿润，且复材筋及复材网格表面应当保持清洁，没有附着泥及其他污染物。

6.4.9 进行复材筋及复材网格的 FRCM 加固施工时，应采取下列措施减少构件在新旧材料有效结合前的荷载或变形：

- 1 可采用减少部分恒载、封闭交通减少车辆活载、减少作业人员和机械的施工荷载等措施。
- 2 可采用在构件底部搭设支撑架、用临时体外预应力张拉梁体减少构件变

形等措施。

6.4.10 在浇筑混凝土完毕后应及时对混凝土采取浇水、覆盖涂刷养护剂等方法养护。FRCM加固层水泥基材料强度达到设计要求前，应封闭交通。

6.4.11 施工的其他相关要求应符合国家现行标准《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T J23）、《城市桥梁结构加固技术规程》（CJJ/T 239）及《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的有关规定。

征求意见稿

7 加固质量检验

7.1 一般规定

7.1.1 复材、配套粘结材料应进行进场验收，凡涉及安全、卫生、环境保护的材料和产品应进行见证抽样复检。若分批进场时，每批次进场均需进行相关检查和复检。

7.1.2 施工过程应严格进行各工序隐蔽工程的检验与验收，应在每道工序检查合格后再进行下一道工序的施工。

7.1.3 复材加固施工的过程控制和施工质量检验，除应执行本标准外，尚应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》（GB 50300）、《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204）、《钢结构工程施工质量验收规范》（GB 50205）、《建筑结构加固工程施工质量验收规范》（GB 50550）、《纤维增强复合材料工程应用技术标准》（GB 50608）等有关标准的规定。

7.2 加固材料进场检验

7.2.1 加固材料进场检验应符合下列规定：

1 加固材料进场检验分进场自检和型式检验两种，性能指标应符合本规程第4章和国家现行标准规范的相关要求。

2 加固材料进场自检应参照现行加固材料相关规范和工地检测实验室检测条件确定进场检验性能指标，宜按批进行检验，合格后方可用于施工。

3 加固材料的型式检验应严格按照现行加固材料相关规范，按批抽取样品并委托第三方检测机构进行检验。

4 加固材料进场时应查验并保存型式检验报告、使用说明书、出厂检验报告(或产品合格证)等质量证明文件。

7.2.2 纤维布进场自检宜检测外观、尺寸及单位质量偏差、拉伸性能（抗拉强度标准值、受拉弹性模量、极限应变）指标，其他进场检验应符合下列规定：

1 碳纤维布进场时，应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行行业标准《桥梁用碳纤维布（板）》（JT/T 532）的规定。进场检验宜以3000m²为一批，不足3000m²按一批计。

2 玻璃纤维布进场时，应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行行业标准《结构加固修复用玻璃纤维布》（JG/T 284）的规定。进场检验宜以 5000m² 为一批，不足 5000m² 按一批计。

3 芳纶纤维布进场时，应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行行业标准《桥梁用芳纶用纤维布（板）（JT/T 531）》的规定。进场检验宜以 3000m² 为一批，不足 3000m² 按一批计。

4 玄武岩纤维布进场时，应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行国家标准《土木工程结构用玄武岩纤维复合材料》（GB/T 26745）的规定。进场检验宜以 3000m² 为一批，不足 3000m² 按一批计。

5 PET、PEN 纤维布进场时，应按批抽取试件进行检验，其主要力学性能指标应符合本规程第 4.2.3 条的规定。进场检验宜以 3000m² 为一批，不足 3000m² 按一批计。

7.2.3 复材板进场自检宜检测外观、尺寸偏差、拉伸性能（抗拉强度标准值、受拉弹性模量、极限应变）指标，其他进场检验应符合下列规定：

1 碳纤维复材板进场时，应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行行业标准《桥梁用碳纤维布（板）》（JT/T 532）的规定。进场检验宜以 3000m 为一批，不足 3000m 按一批计。

2 玻璃纤维复材板进场时，应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行国家标准《结构加固修复用玻璃纤维片材》（GB/T 26744）的规定。进场检验宜以 100 卷（1 卷长度为 100m）为一批，不足 100 卷按一批计。

3 玄武岩复材板进场时，应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行国家标准《土木工程结构用玄武岩纤维复合材料》（GB/T 26745）的规定。进场检验宜以 3000m 为一批，不足 3000m 按一批计。

7.2.4 复材筋进场时，进场自检宜检测外观、尺寸偏差和拉伸性能（抗拉强度标准值、受拉弹性模量、极限应变）指标。应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行国家标准《结构工程用纤维增强复合材料筋》（GB/T 26743）的规定。进场检验宜以 500 根为一批，不足 500 根按一批计。

7.2.5 复材网格进场时，进场自检宜检测外观、尺寸偏差和拉伸性能（抗拉强度标准值、受拉弹性模量、极限应变）指标。应按批抽取试件进行检验，抽样、

检测与判定应符合符合现行国家标准《结构工程用纤维增强复合材料网格》（GB/T 36262）的规定。进场检验宜以 100 卷（1 卷长度为 100m）为一批，不足 100 卷按一批计。

7.2.6 复材加固配套的树脂材料进场时，进场自检宜针对外观、胶体性能、粘结性能和工艺性能检测相关指标，如色泽、抗拉强度、钢对钢拉伸剪切强度、凝胶时间等。应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合现行行业标准《桥梁结构加固修复用纤维粘结树脂》（JT/T 989）的规定。进场检验宜以 5t 为一批，不足 5t 按一批计。

7.2.7 加固层水泥基材料进场时，进场自检项目应包括加固层水泥基材料的性能和净含量。加固层水泥基材料包装净含量应符合下列规定，否则判为不合格品：

- 1 每袋净质量应为 25kg 或 50kg，且不得少于标识质量的 99%；
- 2 随机抽取 40 袋 25kg 包装或 20 袋 50kg 包装的产品，总净含量不得少于 1000kg；
- 3 其他包装形式可由供需双方协商确定，净含量应符合本条第 1、2 款的规定。

7.2.8 表面防护材料进场时，进场自检宜检测色泽、凝胶时间、粘结性能等指标，应按批抽取试件进行检验，抽样、检测与判定应符合相关表面防护材料的现行国家标准或行业标准规定。进场检验取样按照《色漆、清漆和色漆与清漆用原材料 取样》（GB/T 3186）的规定进行。

7.3 粘贴复材片材加固

7.3.1 粘贴复材片材加固质量检验应包括复材片材的粘贴位置、复材片材与混凝土之间的粘结质量、复材片材与基材混凝土的正拉粘结强度和复材片材胶层厚度的检验。

7.3.2 复材片材的粘贴位置与设计要求的位置相比，其中心线偏差应不大于 10mm，长度负偏差应不大于 15mm。检验应使用钢尺测量并全数检查。

7.3.3 复材片材与混凝土之间的粘结质量，可用敲击检测法或其他有效方法进

行全数检查，总有效粘结面积不应小于总粘结面积的 95%。探测时应将粘贴的纤维布分区，逐区测定空鼓面积；若单个空鼓面积不大于 10000mm²，可采用针管注胶的方法进行修补；若单个空鼓面积大于或等于 10000mm² 或发现因基层处理不当产生空鼓时，应将空鼓部位的纤维布切除，然后应重新处理基层并应粘贴等量的纤维布，新贴纤维布应与已贴纤维布搭接，搭接长度应符合下列规定。

1 复材片材的搭接宜避开复材片材受拉力较大部位。

2 搭接长度应满足下式要求：

$$L_1 = \max(150\text{mm}, f_{fk} \cdot t_{f1} / \tau_{ave}) \quad (7.3.3)$$

式中 L_1 ——纤维布的搭接长度 (mm)；

f_{fk} ——纤维布的抗拉强度标准值 (N/mm²)；

t_{f1} ——单层纤维布的厚度 (mm)；

τ_{ave} ——纤维布搭接平均剪切强度 (N/mm²)，取 4 N/mm²。

3 采用多条或多层纤维布加固混凝土结构时，各条或各层纤维布之间的搭接位置应相互错开，错开距离不应小于 250mm，且不应小于搭接长度的 1.5 倍

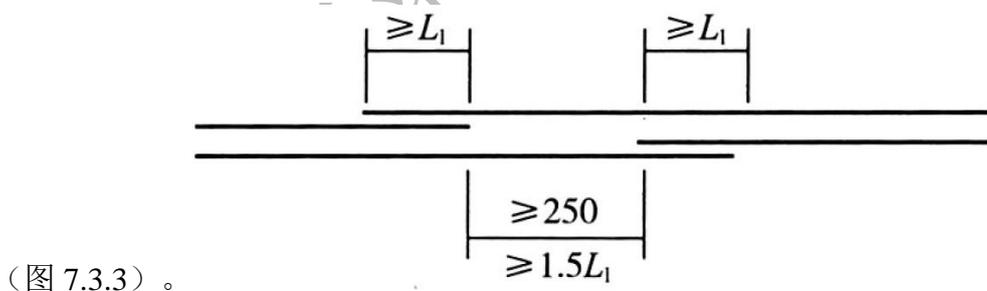


图 7.3.3 纤维布搭接长度的要求

7.3.4 复材片材与基材混凝土的正拉粘结强度，应进行见证抽样检验。其检验结果应符合表 7.3.4 的规定。若不合格，应清除重贴，并重新检查验收。

表 7.3.4 现场检验加固材料与混凝土正拉粘贴强度的合格指标

检验项目	原构件实测混凝土强度等级	检验合格指标		检验方法
正拉粘结强度及其破坏方式	C15~C20	≥1.5MPa	且为混凝土内聚破坏	本规程附录 C

	$\geq C45$	$\geq 2.5\text{MPa}$		
--	------------	----------------------	--	--

注：1、加固前应对原构件混凝土强度等级进行现场检测与推定，具体规定参照《建筑结构加固工程施工质量验收规范》（GB 50550）；

2、若检测结果介于 C20~ C45 之间，允许按换算的强度等级以线性插值法确定其合格指标。

7.3.5 复材片材胶层厚度（ δ ）应符合下列要求：

（1）合格标准为：（ 1.5 ± 0.5 ）mm。

（2）检查数量：全数检查。

（3）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。

7.3.6 应按本标准附录 C 对粘贴复材片材加固混凝土施工质量进行现场抽样检验。现场检验结果应符合本标准附录 C 的规定，检验不合格时，应揭去重新加固，并重新检查验收。

7.4 预应力碳纤维复材板加固

7.4.1 预应力碳纤维复材板加固质量检验应包括复材板的粘贴位置、复材板与混凝土之间的粘结质量、复材板与基材混凝土的正拉粘结强度和复材板胶层厚度的检验。

7.4.2 复材板的粘贴位置与设计要求的位置相比，其中心线偏差应不大于 10mm，长度负偏差应不大于 15mm。检验应使用钢尺测量并全数检查。

7.4.3 复材板和混凝土之间的粘结质量，可用敲击检测法或其他有效方法进行全数检查，总有效粘结面积不应小于总粘结面积的 95%，具体要求参照本标准第 7.3.2 节的规定。采用复材板进行抗弯加固时，主要受力区位置的加固复材板不宜搭接。

7.4.4 复材板与基材混凝土的正拉粘结强度应根据本标准第 7.3.3 节的规定进行见证抽样检验。

7.4.5 复材板胶层厚度（ δ ）应符合下列要求：

（1）合格标准为：（ 2.0 ± 0.3 ）mm。

(2) 检查数量：全数检查。

(3) 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。

7.5 复材筋及复材网格加固

7.5.1 复材筋和复材网格安装时，其种类、规格、数量、形状、位置必须符合设计规定。

7.5.2 加固层水泥基材料的强度等级必须符合设计要求，取样与留置试件应符合规定。原位检测可采用超声—回弹综合法、钻芯法等方法。每拌合 50 盘不超过 50m³ 的同一配比的水泥基材料取样不得少于 1 次；每次取样应至少留置 1 组标准养护试件；同条件养护试件的留置组数不应少于 3 组，具体组数可根据实际需求确定。

7.5.3 加固后，加固层的表面应平整、均匀，无裂缝、脱层、起鼓、脱落等。对重大工程，其加固效果尚需进行抽样加载试验，一般仅以标准使用荷载进行试验。加载后的构件应满足设计使用要求。

7.5.4 复材筋及复材网格加固质量检验应符合国家现行标准《公路桥梁加固施工技术规范》(JTG/T J23)、《城市桥梁结构加固技术规程》(CJJ/T 239) 及《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650) 的有关规定。

检测的粘结树脂、被粘结的复材片材、混凝土试块和金属标准块相互粘结而成(图 A.3.1)。

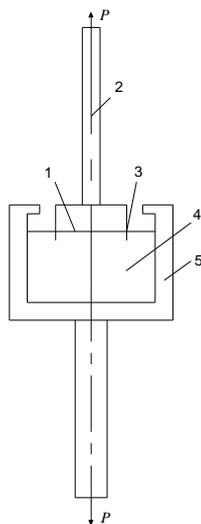


图 A.3.1 试样组成示意(mm)

- 1—粘结树脂及复材片材；2—金属标准块；3—预切缝；
4—混凝土试块；5—钢夹具

A.3.2 试样数量应符合下列规定：

- 1 对于常规试验，每组试样不应少于 5 个；
- 2 对于仲裁试验，试样数量不应少于 10 个。

A.3.3 试样组成部分的制备应符合下列规定：

1 受检测的粘结树脂应按规定的规则抽样；粘结树脂的配制与固化条件，应按其产品技术条件和工艺说明书的要求施行。

2 试样(图 A.3.1)中混凝土试块(图 A.3.3)尺寸应为 70mm×70mm×40mm。混凝土强度等级不应低于 C30，试块浇筑后应经过 28d 标准养护。试块使用前应切缝，预切缝深度宜取 2mm~3mm，缝宽度宜为 1mm~2mm，预切缝边长应为 40mm×40mm，并位于试块的中心。

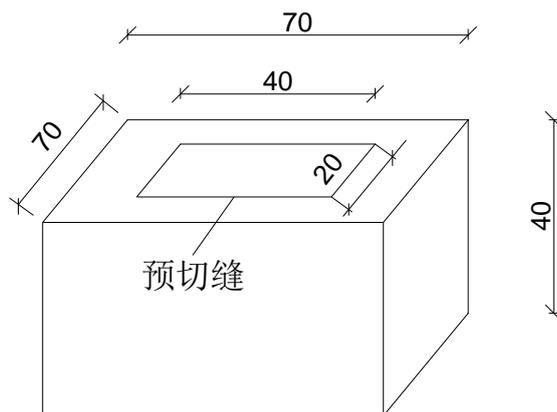


图 A.3.3 混凝土试块尺寸示意(mm)

3 金属标准块[图 A.2.2(a)]宜采用 45 号碳钢制作。金属标准块表面应采用喷砂或其他机械方法进行粗糙化处理。金属标准块可重复使用，但在粘贴前应重新进行表面粗糙化处理，完全清除粘结面上的胶层或污迹。

4 被粘结的加固材料应按该类材料规定的抽样规则取样；从送检样品的中间部位裁剪出尺寸为 40mm×40mm 的试件，试件外观应平整，无弯曲、歪斜等变形，粘结面应洁净、无油脂等污染物，表面应粗糙化处理。

A.3.4 试样的粘结和养护应符合下列规定：

1 在混凝土试块的中心位置，按规定的粘结工艺用受检的粘结树脂粘贴复材片材，复材片材的尺寸应与混凝土试块中部预切缝尺寸相同；

2 当为多层粘结时，应在胶层指触干燥时立即粘贴下一层，然后将金属标准块粘贴在 FRP 片材表面，每一道粘贴工序均应保证各层之间对中；

3 粘贴完成后的试样，宜在温度 $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 60%~70% 的条件下静置固化 7d 后检测。

A.4 试验条件和步骤

A.4.1 试验环境应保持在温度 $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 60%~70%。

A.4.2 将制备好的试样(图 A.3.1)放入拉力试验机的夹具中，并调整至对中状态后夹紧。

A.4.3 拉力试验机宜以 1500N/min~2000N/min 的速度加载直至破坏。记录试样破坏时的荷载值并观察破坏形式。

A.5 试验结果

A.5.1 正拉粘结强度的试验结果应按下列式计算：

$$f = \frac{P}{A} \quad (\text{A.5.1})$$

式中 f ——正拉粘结强度(MPa)；

P ——试样破坏时的荷载值(kN)；

A ——钢标准块的粘结面面积(mm²)

A.5.2 试验结果的表示与评定应符合下列规定：

1 破坏形式分为下列几种类型：

- 1) 内聚破坏：应分为混凝土试块内部发生破坏和粘结树脂胶层内部发生破坏，分别以 CFS 和 CF 表示；
- 2) 粘结失效破坏：应分为粘结树脂胶层与混凝土之间的界面破坏和粘结树脂胶层之间的界面破坏，分别以 AFI 和 AFZ 表示；
- 3) 混合破坏：粘结面出现两种或两种以上的破坏形式，以 MF 表示。

2 破坏判定应符合下列规定：

- 1) 当破坏形式为 CFS 时，或当为混合破坏形式且 CFS 形式的破坏面积占粘结面 85% 以上时，可判定为合格；
- 2) 当破坏形式为 CF 和 AF，或当为混合破坏形式且 CF 和 AF 破坏形式所占面积大于 15% 时，应判定为不合格。

3 每组被测试样不应少于 5 个。单个试样的 f 值与该组试样算术平均值的误差不超过 $\pm 15\%$ 时为有效值。至少取 3 个有效值的算术平均值作为该组正拉粘结强度的试验结果。

4 试验结果用正拉粘结强度的试验结果和破坏形式共同表示。

附录 B 预应力碳纤维复材板—锚具组装件试验方法

B.1 适用范围和试验原理

B.1.1 预应力碳纤维复材板—锚具组装件的静载锚固性能及疲劳荷载后的锚固性能测定应按本试验方法的规定执行。

B.1.2 在本附录规定的疲劳荷载及加载速度条件下，对预应力碳纤维复材板—锚具组装件试件进行疲劳试验和单轴拉伸，直至达到规定的碳纤维复材板极限抗拉标准力值 F_{tpk} 或试件被拉断。试件被拉断时的最大拉力值 F_{apu} 为预应力碳纤维复材板—锚具组装件的极限锚固力。

B.2 试验设备

B.2.1 拉力试验机及疲劳试验机应具备有效的隔离防护措施。

B.2.2 用于测量碳纤维复材板应变的引伸计或应变片测量精度不应小于标距的 0.002%。

B.2.3 数据采集系统应能连续记录荷载和应变。荷载的分辨率不应大于 100N，应变的分辨率不应大于 10×10^{-6} 。

B.3 试件制备

B.3.1 试件应为按实际使用形成完成装配的预应力碳纤维复材板—锚具组装件。碳纤维复材板受力长度不应小于 1000mm。

B.3.2 静载锚固性能试验试样数量应为 3 个/组，疲劳荷载后锚固性能试验试样数量应为 2 个/组。

B.4 试验步骤

B.4.1 将预应力碳纤维复材板—锚具组装件两端锚固分别安装固定于静载试验机两端，其中一端为移动端。两端锚具中心位置应予以核准，偏差尺寸不应大于碳纤维复材板受力长度的千分之一。

B.4.2 各种测量仪表应在加载之前完成安装和调试。

B.4.3 对预应力碳纤维复材板—锚具组装件进行等速加载，加载速度不宜大于 200MPa/min；达到 100% F_{tpk} 后，宜持荷 10min 观察。

B.4.4 随后可用不大于 100MPa/min 的加载速度缓慢继续加载至预应力碳纤维复材板—锚具组装件完全破坏，记录荷载最大值 F_{apu} ，作为该碳纤维复材板—锚具组装件的极限锚固力。

B.4.5 预应力碳纤维复材板—锚具组装件的疲劳性能试验应在疲劳试验机上进行，试验机应满足平稳、连续加载的条件。疲劳荷载上限值应为预应力碳纤维复材板极限抗拉标准力值 F_{tpk} 的 50%，疲劳应力幅度不应小于 80MPa，加载频率宜为 3Hz~6Hz。

B.4.6 将预应力碳纤维复材板—锚具组装件两端的锚具分别安装固定于疲劳试验机的两端。两端锚具中心位置应予以核准，偏差尺寸不应大于碳纤维复材板受力长度的千分之一。

B.4.7 疲劳荷载加载时，应以小于或等于 200MPa/min 的速度加载至疲劳荷载应力上限值，调节应力幅度达到规定值后，卸载至疲劳荷载应力下限值，开始记录循环次数。加载过程应连续不间断进行 200 万次。

B.4.8 疲劳荷载试验结束后，应再将试件按本附录第 B.4.1 条~第 B.4.4 条步骤进行测试。

B.5 试验数据及判定

B.5.1 应力荷载—应变曲线由数据采集系统采集的数据得到。

B.5.2 静载锚固性能试验中，在达到 100% F_{tpk} 力值后持荷 10min，期间如碳纤维复材板发生破坏或应变值下降超过 5% 应判定为不合格，不发生破坏或应变值下降不超过 5% 时，可停止试验并判定合格。

B.5.3 疲劳荷载试验结束后，对预应力碳纤维复材板—锚具组装件进行外观检验，锚具及零件和碳纤维复材板均不应发生疲劳破坏，否则判定为不合格。

B.5.4 疲劳荷载试验后外观检验合格的预应力碳纤维复材板—锚具组装件，按本附录第 B.4.1 条~第 B.4.4 条步骤进行测试时，应满足 F_{apu} 大于或等于 0.9 F_{tpk} 的规定方可判定为合格。

B.5.5 所有试件的试验结果均应符合附录第 B.5.1 条~第 B.5.4 条的规定，不得以平均值进行试验结果判定。

B.5.6 试验报告应包括以下内容：

(1) 试验概况。试验设备、锚具规格、碳纤维复材板规格及受力长度、碳纤维复材板极限抗拉标准力值 F_{tpk} 值、疲劳荷载、应力幅度、振动频率、疲劳次数等。

(2) 试验过程描述。试验中如有异常情况发生，应予以详细描述异常情况发生的过程。

(3) 试验结果及判定。试验记录应完整，所有试验结果均应做出记录。最后对试验结果做出是否合格的结论。

征求意见稿

附录 C 粘贴复材片材加固混凝土结构施工质量现场检测方法

C.1 适用范围、试验设备和试样

C.1.1 粘结强度检测仪宜符合现行行业标准《数显式粘结强度检测仪》（JG/T 507）的有关规定。粘结强度检测仪应每年检定一次，发现异常时应随时维修、检定。

C.1.2 取样应符合下列规定：

- 1 现场检验应在已完成复材片材粘贴加固的结构表面上进行；
- 2 按实际粘贴复材片材的加固结构表面面积计， 500m^2 以下工程应取一组试样，每组 3 个试样； $500\text{m}^2\sim 1000\text{m}^2$ ，工程应取两组试样； 1000m^2 以上工程每 1000m^2 应取两组试样；
- 3 试样应由检验人员随机抽取，试样间距不得小于 500mm 。

C.1.3 现场试验制备应符合下列规定：

- 1 被测部位的加固表面应清除污渍并保持干燥；
- 2 从加固表面向混凝土基体内部切割预切缝，切入混凝土深度 $2\text{mm}\sim 3\text{mm}$ ，宽度 $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$ 。预切缝形状为直径 40mm 的圆形。

3 应采用取样粘结剂粘贴直径为 40mm 的圆形钢标准块（图 C.1.3）。取样粘结剂的正拉粘结强度应大于复材片材粘贴树脂的正拉粘结强度。钢标准块粘贴后应及时固定。

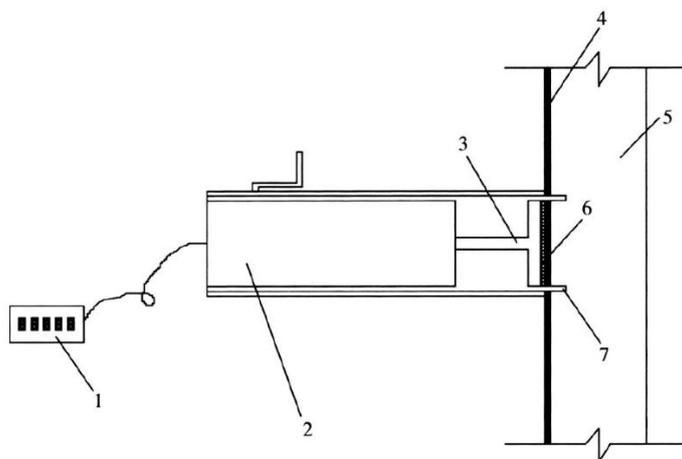


图 C.1.3 现场粘贴强度检测方法

1—读数表；2—碳纤维粘结强度测定仪；3—钢标准块；

4—碳纤维布；5—混凝土；6—取样粘结剂；7—预切缝 2mm~3mm

C.2 试验步骤

C.2.1 钢标准块应按粘结强度检测仪生产厂家提供的使用说明书连接。

C.2.2 试验时，应以 1500N/min~2000N/min 的速度匀速加载，并应记录破坏时的荷载值及观察破坏形态。

C.3 试验结果

C.3.1 正拉粘结强度应按下列公式计算：

$$f = \frac{P}{S} \quad (\text{C.3.1})$$

式中 f ——正拉粘结强度 (MPa)；

P ——试样破坏时的荷载值 (kN)；

S ——钢标准块的粘结面面积 (mm^2)。

C.3.2 试验结果的表示应符合下列规定：

C.3.2.1 破坏形式应分为下列类型：

- 1) 混凝土破坏：混凝土试块破坏，以 AF 表示；
- 2) 层间破坏：树脂与混凝土间符合涂层界面破坏，以 BF 表示；
- 3) 复材片材破坏：复材片材内部破坏，以 CF 表示；
- 4) 粘结失效：复材片材与钢标准块之间的界面破坏，以 DF 表示。

C.3.2.2 每组取 3 个被测试样，以算术平均值作为该组正拉粘结强度的试验结果；

C.3.2.3 试验结果应包括破坏形式、3 个试样的正拉粘结强度值和每组正拉粘结强度的试验平均值。

C.3.3 施工质量的判定应符合下列规定：

- 1 当破坏形式为 AF 时，施工质量判定为合格；
- 2 当破坏形式为 BF、CF、DF 时，当符合每组试样的正拉粘结强度试验平均值大于或等于 2.5 N/mm^2 ，且其中单个试样的正拉粘结强度最小值大于或等于 2.25 N/mm^2 的规定时，施工质量应判定为合格；

3 当破坏形式为 BF、CF 时，不能符合每组试样的正拉粘结强度试验平均值大于或等于 2.5 N/mm^2 ，且其中单个试样的正拉粘结强度最小值大于或等于 2.25 N/mm^2 的要求，施工质量判定为不合格，或根据实际工程情况加大样本数量重新检验；

4 当破坏形式为 DF 时，如不能满足每组试样的正拉粘结强度试验平均值大于或等于 2.5 N/mm^2 ，且其中单个试样的正拉粘结强度最小值大于或等于 2.25 N/mm^2 的规定时，应重新制备试样和检验。

征求意见稿

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词：
- 2) 正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。
- 3) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：
- 4) 正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。
- 5) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的用词：
- 6) 正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。
- 7) 表示有选择，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

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

- 1 《纤维增强复合材料工程应用技术标准》 GB 50608
- 2 《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》 T/CECS 10107
- 3 《超高性能混凝土试验方法标准》 T/CECS 864
- 4 《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》 GB 50728
- 5 《水泥胶砂干缩试验方法》 JC/T603
- 6 《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》 GB 21120
- 7 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 8 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG 3362-2018
- 9 《公路桥梁加固设计规范》 JTG/T J22
- 10 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60-2015
- 11 《公路钢结构桥梁设计规范》 JTG D64
- 12 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 13 《钢结构加固设计标准》 GB 51367-2019
- 14 《混凝土结构加固设计规范》 GB 50367
- 15 《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》 T/CECS 146
- 16 《结构工程用纤维增强复合材料筋》 GB/T 26743
- 17 《结构工程用纤维增强复合材料网格》 GB/T 36262
- 18 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》 CJJ2
- 19 《建筑施工模板安全技术规范》 JGJ162

- 20 《桥梁结构加固修复用纤维粘结树脂》 JT/T 989
- 21 《色漆、清漆和色漆与清漆用原材料 取样》 GB/T 3186

征求意见稿

中国工程建设标准协会标准

公路桥梁纤维增强复合材料加固技术规程

T/CECS ×××-202X

条文说明

征求意见稿

1 总则

1.0.1 本条规定了制定本规程的目的和要求，并提出了纤维增强复合材料在公路桥梁工程结构加固中需遵循的原则。

1.0.2 本条规定了本标准的适用范围。本规程适用于纤维增强复合材料在公路桥梁加固中的设计、施工与质量检验。

征求意见稿

2 术语和符号

本章仅将本标准出现的、人们比较生疏的术语列出。术语的解释，其中部分是国际公认的定义，但大部分是概括性的涵义，并非国际或国家公认的定义。术语的英文名称不是标准化名称，仅供引用时参考。

征求意见稿

3 基本规定

3.0.1 公路桥梁经评估认定确系不能正常使用的，应及时进行加固处理，以免引起大的事故；具体加固时应分清主次，优先对影响结构承载能力的主要承重构件进行加固，其次再考虑次要构件的加固。

3.0.3 依据交公路发【2013】321号文件，加固改造类桥梁，设计荷载不得低于原标准，原设计荷载等级低于公路—II级的，原则上采用公路—II级或以上标准。

3.0.5 桥梁的加固主要是通过新增构件与原构件有效组合、共同受力，会对原结构造成不同程度的损伤。具体设计时应采取措施尽量降低对原结构造成的损伤，并对其影响进行评估，使桥梁的加固设计在可控的范围内实施。

3.0.6 抗震加固设计不得造成因局部加强或刚度突变产生新的薄弱部位；同时还应考虑结构刚度增大而导致地震作用效应增大的影响。

3.0.7 我国桥梁的分布区域较广，处在不良环境下的桥梁众多，因此加固设计时应考虑地域及使用环境特点，在选择加固时机、工艺、材料方面应有所区别，以保证加固效果。

3.0.8 桥梁加固设计时应采取可靠措施确保新、旧构件的有效连接，形成整体，共同参与受力，并分析论证加固措施对桥梁其他结构、构件和地基基础的影响，影响较大且无法避免时，应一并进行加固处治。

3.0.9 桥梁加固前恒载、不能完全卸载的活荷载造成结构存在初始应力，复材加固的粘结固化过程中，新老结构存在受力不同步的问题。在不同的受力阶段，应采取相应的结构截面进行计算。

3.0.10 在加固设计时应首先考虑原结构的绝对安全，对于一些可能出现的不利因素应进行充分的分析论证，提出切实可行的措施进行预防性处理，最大限度降低事故出现概率。

3.0.13 桥梁加固工程施工是对在役桥梁缺陷和病害的处理，与新、改建相比，情况更复杂，动态施工在加固工程中尤为重要。必须加强施工前的复查和施工中的观测与检查，及时反馈信息指导施工。

5 加固设计

5.1 一般规定

5.1.1 复材加固桥梁结构达到承载能力极限状态时可能有两种情况，一是截面内材料应力达到设计强度，二是材料应变到达设计允许值，设计时都应考虑并计算。正常使用极限状态的验算主要包括裂缝和变形验算。

5.1.2 由于环境影响、防护失效、火灾等原因，可能导致复材片材与混凝土粘结界面的粘结强度降低导致加固失效或复材片材的强度不能充分发挥，此时被加固构件仍应具有足够的剩余承载力，以避免被加固构件的严重破坏。

5.1.3 复材片材的纤维通常为单向，故应与加固要求所需要的受力方向一致，才能充分发挥复材片材的强度。当纤维方向与计算受力方向不一致时，应考虑复材片材的纤维在计算受力方向的折减贡献。

5.1.4 在受弯构件受拉面和梁侧面粘贴复材片材加固后的受弯承载力计算理论和方法与现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010)钢筋混凝土构件受弯承载力的计算理论和方法一致，为避免受弯承载力极限状态时变形过大，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010)的规定受拉钢筋的应变不超过 0.01。

5.2 受压构件加固

5.2.1 采用环向围束法加固受压构件是最为有效的方法，特别是对于圆形截面的受压构件。环向围束对混凝土起到约束作用，使其抗压强度得到提高，其原理与配置螺旋箍筋的轴心受压构件相同。

5.2.2 当受压柱长细比过大时，易发生失稳破坏。长细比的增加也会削弱复材的约束作用。若矩形截面尺寸过大或边长差异过大或，会使纤维复合材料对混凝土的约束作用明显降低。此外，当矩形截面柱缠绕纤维复合材料时，截面棱角必须经过圆化打磨，以防纤维复合材料因应力集中而破坏。故本条规定了此加固方法的适用范围。

5.2.3 采用环向围束法加固后，轴心构件的核心混凝土处于三向约束状态，抗压强度得到提高。环向围束混凝土强度增量 f_{ci} 的计算方法参照 ACI440、CEB-FIP 及我国台湾省的公路规程和工业技术研究院设计实录等制定。环向围束对不同形状的截面有不同

的约束效果，本规程通过环向围束内被约束混凝土的有效面积来加以考虑。

5.2.4 纤维复材为承拉材料，应将纤维复材沿受拉方向粘贴

5.2.5 本条计算公式的计算原理是参照现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》的规定，由力及力矩平衡方程推导获得，与现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》配套使用。

5.3 受拉构件加固

5.3.1 计算轴心受拉构件的承载力时，可不考虑混凝土的抗拉作用，仅计钢筋及粘贴纤维的抗拉作用。

5.4 受弯构件加固

5.4.2-5.4.3 国内外的试验研究表明，在抗弯构件的受拉面粘贴纤维复合材料进行抗弯加固时，截面应变分布仍符合平截面假定。计算时，忽略纤维复合材料厚度及胶层对承载能力的影响，即认为纤维中心到受压边缘混凝土距离为梁高 h 。

采用粘贴纤维复合材料进行抗弯加固时，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，此时纤维复合材料未达到拉应变设计值 ε_{fd} ；

(2) 受拉钢筋先达到屈服，然后纤维复合材料达到其拉应变设计值 ε_{fd} ，此时受压区混凝土尚未压坏；

(3) 因配筋量过大，在受拉钢筋达到屈服前受压区混凝土先压坏；

(4) 纤维复合材料与混凝土发生剥离破坏。

对正截面加固，按前两种破坏形态进行设计计算，对第 3 种破坏形态，可通过控制加固量上限来避免发生。第 5.4.4 条第 1 款规定的受压区高度 x 不大于 $0.8\xi_b h_0$ ，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，此时纤维复合材料中的应力很小，必须避免，一般通过构造或锚固措施予以保证。

由于被加固混凝土结构的强度等级一般较低，故本规程对抗弯承载力计算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。

5.4.4 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。为了控制加固后构件的裂缝宽度和变形，本规程对加固后正常使用阶段的钢

筋应力作了控制。

5.4.6 采用纤维复合材料对钢筋混凝土适筋截面进行抗弯加固时，加固构件斜截面抗剪的截面尺寸限制条件应满足现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定。公式（5.4.6）引入了截面翼缘扩大系数是用来考虑截面翼缘对截面的抗剪贡献。本条规定的目的是为了防止钢筋混凝土梁的斜裂缝开展过宽或出现斜压破坏，在计算中如不能满足该公式的要求，就不应采用粘贴复材的方式进行加固，而应增大梁的截面尺寸。

5.4.10-5.4.11 采用预应力复材进行抗弯加固时，其抗弯承载力的计算公式与非预应力复材加固的公式是一致的，区别仅在于达到抗弯承载力极限状态时复材拉应力的计算公式不一致，采用预应力复材进行加固时，应考虑预应力的影响。

采用预应力复材进行抗弯加固时，同样规定受压区高度 x 不大于 $0.8\xi_b h_0$ 来避免因配筋量过大，在受拉钢筋达到屈服前受压区混凝土先压坏；且应通过构造或锚固措施保证预应力复材不发生剥离。

5.5 受剪构件加固

5.5.4 （1）粘贴复材对混凝土梁、柱进行抗剪加固修复的形式，应包括封闭粘贴、U形粘贴或侧面粘贴，其中宜采用封闭粘贴的形式。

（2）粘贴复材对混凝土梁、柱进行抗剪加固时，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现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 中第 6.3.1 条即第 6.3.11 条的有关规定。

（3）粘贴复材对混凝土梁、柱进行抗剪加固时，应符合下列规定：

- 1.对梁进行抗剪加固时，可采用 U 形粘贴和侧面粘贴加固形式。复材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，且复材片材宜采用在轴向连续的粘贴形式。当采用复材板进行抗剪切加固时，宜采用双 L 形板形成 U 形粘贴。
- 2.当复材片材采用条带布置时，复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》GB50010 规定的最大箍筋间距的 0.7 倍。
- 3.对于 U 形粘贴形式，宜在上端粘贴纵向复材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复材片材压条或采用机械锚固措施。

- 4.对柱的抗剪加固应采用封闭粘贴形式，且复材片材的纤维方向应与柱轴线垂直。

5.7 钢构件抗疲劳加固

5.7.1 根据现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64)，对于公路桥涵钢结构中承受动应力的结构构件或连接件，判断是否符合疲劳强度的要求。由于碳纤维复材比其他纤维复材弹性模量高，疲劳加固效果更好，所以宜采用碳纤维复材对钢结构进行疲劳加固。英国指南 *Strengthening Highway Structures Using Externally Bonded Fiber Reinforced Polymer (BD 85/08)*指出带裂纹的金属结构不能用复材进行加固，除非获得行业主管部门的批准。尽管复材加固能减缓甚至阻止钢结构既有疲劳裂纹的扩展，但现阶段复材加固钢结构疲劳裂纹处的应力集中和疲劳裂纹扩展规律的定量分析研究还不多，加固效果的理论依据尚不充分，因此，在构件存在能观测或检测到的疲劳裂纹时，应对裂纹进行局部处理后，再利用复材进行加固。而受拉疲劳敏感区一旦发现可见疲劳裂纹，该结构构件基本上被认为疲劳寿命已经殆尽，已经发生疲劳破坏。对于发现可见疲劳裂纹的构件采用复材加固，应非常慎重，除非已进行过专门研究，并经过充分试验验证工作。

5.7.2 国内外的研究表明采用复材板进行双面加固对提高钢构件的疲劳性能最为有效。因此，当加固面平整，并可以在加固部位钢板的两面进行加固时，宜采用复材板进行双面粘贴加固。当加固面不平整时，采用纤维布进行加固更能适应形状的要求，达到加固目的。

5.7.3 局部应力集中处的主拉应力是引起疲劳裂纹萌生或扩展的驱动力，而碳纤维复材纤维方向的弹性模量和强度均是最大的。因此，当粘贴的碳纤维纤维方向与主拉应力方向平行时，阻止疲劳裂纹萌生和扩展的效果最好。已有疲劳加固试验表明，碳纤维复材的弹性模量越高，加固效果越好，因此应尽量采用高弹性模量的碳纤维复材。

5.7.4 在目前复材加固钢结构的疲劳实验研究还不够充分时，可采用现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 规定的疲劳公式进行疲劳验算。其中计算应力幅采用加固后计算部位降低后的应力幅，容许应力幅根据构件和连接分类，采用现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 规定。容许应力幅未考虑复材粘贴加固改善应力集中部位的

应力场对钢构件疲劳性能的提高，也未考虑复材对疲劳裂纹扩展的抑制作用，该疲劳验算结果偏于安全。当被加固构件受力复杂时，被加固构件的应力幅不能通过条文中所列公式获得，可采用有限元方法进行计算。

5.7.5 为避免加固后的钢结构裂缝的进一步扩展，需对加固后钢结构裂缝尖端的应力强度因子进行有限元模拟计算评估。对于底部翼缘裂穿的工字梁，其应力强度因子可参照文献（Guo et al. 2022）的公式进行计算：

Guo D, Gao W-Y, Dai J-G. Effects of temperature variation on intermediate crack-induced debonding and stress intensity factor in FRP-retrofitted cracked steel beams: An analytical study. *Composite Structures*. 2022;279:114776

5.7.6 碳纤维复材的疲劳强度高于高强钢丝，其疲劳极限较高，约为静荷强度的 70%~80%，复材本身的疲劳破坏一般不会成为加固后钢结构中的主要考虑因素，加固后结构中复材中的拉应力应明显低于其疲劳极限。

但是，钢结构缺陷截面处（如裂缝开口处）碳纤维复材和钢结构粘接界面之间可能会发生剥离，为防止疲劳荷载作用下的界面破坏，应对碳纤维复材中的最大拉应力进行控制。

碳纤维复材和钢材的界面粘结取决于粘结胶的力学特性和表面处理方式，应参照 GB 51367-2019《钢结构加固设计标准》采取合适的结构胶及钢材表面处理方式确保界面的破坏发生在胶层。公式 5.7.6-2 未考虑实际加固构件中钢材中存在的拉伸变形，对界面剥离强度的预测趋于保守。

参考文献：Gao W, Teng J, Dai J-G. Effect of temperature variation on the full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints. *Journal of Composites for Construction*. 2012;16:671-83.

5.7.7 粘贴碳纤维复合材料进行疲劳加固时，宜在碳纤维复材端部采用适当构造措施以抑制端部界面剥离（参照图 5.9.5-1）或对复材端部进行楔形处理，即在板端逐渐降低纤维复材的厚度（参照图 5.9.5-2）。

5.8 复材网格加固

5.8.2 本条规定的复材网格加固混凝土受弯构件的受弯承载力计算公式与现行国家标准《混凝土结构设计标准》（GB 50010）是统一的。网格加固后，为简化考虑，不计算

加固层中水泥基材料对构件受弯承载力的提高作用，仅考虑网格的作用。此外，试验和分析表明，当被加固构件的配筋率较大时，即未加固构件的受压区高度较大时，受弯承载力加固提高幅度有限，且延性较小，因此不宜进行抗弯加固。为此，若要进行抗弯加固，一般要求未加固构件的受压区高度不大于界限受压区高度的 0.8 倍。

对于复材网格加固混凝土构件，当采取可靠锚固措施时（相关锚固措施可参考《纤维增强复合材料工程应用技术标准》（GB 50608），可不考虑剥离破坏。因此，受弯承载力极限状态时复材网格的拉应力设计值应取以下两种情况下网格拉应力的较小值：

(1) 复材网格的抗拉强度设计值 f_{fd} ；

(2) 受压边缘混凝土达到极限压应变 ε_{cu} 时复材网格的有效拉应变 ε_{fm} 与其弹性模量 E_f 的乘积。

对于上述第2种情况，受压区混凝土可按现行国家标准《混凝土结构设计标准》（GB 50010）的规定等效为矩形应力图计算。而当第1种情况的 f_{fd}/E_f 小于按第2种情况计算的 ε_{fm} 时，受压边缘混凝土压应变未达到极限压应变 ε_{cu} ，此时受压区混凝土应力图的等效矩形应力图形系数小于现行国家标准《混凝土结构设计标准》（GB 50010）的规定值，因此引入系数 ω 考虑这一差别对受弯承载力所产生的降低影响。

本条受弯承载力计算公式适用于混凝土强度等级不大于C50的情况，对于混凝土强度等级大于C50的受弯构件，本条的计算公式应按照现行国家标准《混凝土结构设计标准》（GB 50010）矩形应力图形系数进行调整。对于矩形截面，取受压翼缘高度 h'_f 等于零、受压翼缘宽度 b'_f 等于截面宽度 b 计算。对于单向板，取宽度 b 等于1000mm，高度等于 h ，按矩形截面计算。

5.8.3 本条系根据受压边缘混凝土达到极限压应变时的截面受力平衡条件和截面应变平截面假定联立求解，得到受弯承载力极限时的复材网格有效拉应变 ε_{fm} 。本条计算公式仅适用于当受压边缘混凝土达到极限压应变时受压钢筋已经屈服的情况。

5.8.4 根据国内外试验研究分析，采用复材网格增强水泥基材料对混凝土梁进行抗剪加固时，抗剪承载力可认为是被加固混凝土梁的抗剪贡献与达到受剪承载力极限状态时复材网格的抗剪贡献的叠加。加固层的水泥基材料虽然对抗剪承载力有一定贡献，但相对较小，因此实际工程中可以忽略。

5.8.5 复材网格抗剪加固混凝土梁中网格应变值达到某一范围时加固层与混凝土界面极易发生剥离破坏。据相关试验数据统计，对于碳纤维复材网格与玄武岩纤维复材网格，该应变值范围分别为 0.001~0.003 与 0.003~0.005。为此，本条规定受剪承载力极限状态时，复材网格的有效拉应变应取 ε_{fd} 与 ε_f 中的较小值，其中对于碳纤维复材网格， ε_f 取 0.001，而对于玄武岩纤维复材网格， ε_f 取 0.003。

5.9 构造要求

5.9.1 针对本小节纤维复合材料粘贴的规定作如下说明：

1 随着纤维复合材料加固量的增加，加固效果亦会提高，但并非线性增长，即随加固量的增加，纤维复合材料的利用率逐渐降低。若所规定的层数不能满足加固目标要求，应寻求其他加固方式。

2 试验研究表明，当单位面积纤维质量不超过 450g/m^2 ，且纤维复合材料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。当单位面积纤维质量超过 450g/m^2 时，尚应通过试验研究确定纤维复合材料搭接长度。纤维复合材料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，纤维复合材料的断裂或破坏一般不会发生在搭接处。

3 研究表明，当多层粘贴时，内短外长构造优越性更突出。在粘贴多层纤维布进行加固时，分层截断是科学合理的。截断点之间要留有一定的距离，以免端头锚固传力在混凝土基层表面处形成叠加，造成粘结失效。内短外长再加端部 U 形箍可以增强最外端头纤维布的抗剥离能力。

4 纤维复合材料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。对于弹性模量较高的纤维复合材料，如要求纤维复合材料强度不受影响，转角处的曲率半径应该更大，但其曲率半径的大小与纤维复合材料的弹性模量高低有关。

5 此构造规定系根据长安大学的试验研究结果和工程经验提出，并参照了现行的中华人民共和国国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367、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》T/CECS 146 及 ACI440 的有关规定。

5.9.6 图 5.9.6-1 为证实有效的三种针对工字型钢的碳纤维复材端部锚具。（a）和（c）均通过在钢梁翼缘钻孔来安装锚具系统，（b）通过采用额外钢压板分别在翼缘上下表

面通过螺栓施加预压力进行固定。(b) 锚具施工效率更高,同时可避免翼缘钻孔缺陷引发的疲劳失效,但是因其作用原理主要依赖钢压板和纤维复材之间的粘结和摩擦,长周期疲劳载荷会减弱其有效性,该效应同样会导致(a)锚具系统中,钢压板和纤维复材之间的相互作用减弱。(c)锚固系统中,锚栓直接连接碳纤维和钢结构基体,避免了界面应力损失,但该种锚栓只能在采用双向纤维复材时发挥其全部性能,对于单向纤维复材效能减弱,在进行加固设计时,应结合工程需要选择合适的锚具构造。

征求意见稿

6 加固施工

6.1 一般规定

6.1.1 如果原结构混凝土强度过低，它与纤维复材的粘结强度也必然会很低，易发生脆性的剥离破坏，纤维复材不能充分发挥作用。同理，两端锚固区的混凝土强度过低，也会影响植筋与混凝土的粘结性能，导致锚固失效。因此本条规定了被加固结构、构件的混凝土等级。

6.1.2 低温会使胶黏剂变脆，影响其粘结性能。温度过高或过低会影响胶黏剂的固化速度，从而对施工效率造成影响。

6.2 粘贴复材片材加固

6.2.1 由于混凝土表面薄弱松散受腐蚀的部分强度较低，在该薄弱层粘贴碳纤维复材板很容易破坏，所以混凝土表面的薄弱层和杂质必须凿除并清理干净，才能进行修补。水对胶体的粘结作用影响很大，如果有渗水现象，必须进行处理，待混凝土表面完全干燥后才能施工。

6.3 预应力碳纤维复材板加固

6.3.3 按设计图的螺栓孔位置在被加固构件钻孔时，为避免钻孔损伤原构件钢筋（及预应力钢束），可用钢筋探测仪确定钢筋位置，为了避开内部钢筋容许适当移动孔眼位置。植螺栓施工工艺应参照《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T J23-2008）附录 B 确定和执行。加固用锚栓主要性能指标应符合《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T J22-2008）表 4.4.3 的要求。

6.3.7 胶体固化后应尽快准备张拉预应力，长时间将胶体暴露在空气中，会影响粘贴效果。胶体如长期暴露，必须将碳板和模腔表面一层原胶打磨清理干净，然后重新涂抹。

6.3.8-6.3.11 张拉过程中除了应按设计张拉应力进行张拉外，还需要对被加固结构的挠度变化进行监测，如发现数据异常挠度过大的情况，应及时进行处理。张拉结束后应缓慢卸载千斤顶，严禁快速对千斤顶进行减压，行程速度可控制在20mm/分钟以内。

6.4 复材筋及复材网络加固

6.4.3 复材筋及复材网格表面纤维受到损伤后，复材的抗拉强度会降低。

6.4.5 保证加固层与原混凝土表面良好粘结是达到修复效果的关键，因此施工时需采取必要措施保证加固层与原混凝土层的整体性。

6.4.8 清洁湿润的原混凝土表面可以保证加固层水泥基材料与原混凝土的粘结。复材筋及复材网格表面附着污染物可能降低复材与防护层材料之间的粘结，影响加固效果。

征求意见稿

7 加固质量检验

7.3 粘贴复材片材加固

7.3.3 目前虽然有各种纤维加固质量的检测方法研究，但迄今尚未获得应用。在这种情况下，敲击检测法仍是最简便易行的方法，其有效性也已通过工程实践的检验，适用于各种条件下使用。但需要指出的是，敲击检测法易受人为偏差的影响。

7.3.4 结构胶黏剂粘贴纤维复合材料与基材混凝土的正拉粘结强度检验，主要是用以综合评估胶液的固化质量、胶液对纤维织物的湿润、浸渍程度以及碳纤维复合材料与原构件混凝土的粘结强度等，因此非常重要。

7.4 预应力碳纤维复材板加固

7.4.5 针对本小节加固质量验收的规定作如下说明：

1 近几年来，虽有不少人在研发各种仪器探测方法，但迄今尚未获得大量应用。在这种情况下，锤击检查法仍是最简便易行的方法，况且其有效性也已通过工程实践的检验，故可在各种条件下使用。但应指出的是，本方法易受人为偏差的影响。因此，为了提高本方法检测结果的可信性，对重要结构的锤击检查，可由检测机构派出两组人员，各自独立地进行检测，然后取其平均值作为检测结果。若两组检测结果相差较大（例如大于 15%），可分为再重复检测一次，并取 4 个值中较接近的 3 个值的平均值作为检测结果。

2 结构胶黏剂粘贴碳纤维复材板与基材混凝土的正拉粘结强度检验，主要是用以综合评估胶液的固化质量、胶液对纤维织物的湿润、浸渍程度以及碳纤维复材板与原构件混凝土的粘结强度，因此非常重要。然而，这是一种破坏性检验方法。在粘贴碳纤维复材板加固工程中选择测点时，应避免受力的重要部位。检验完毕后，应对复材板被切割处进行修补。修补时，其搭接长度应符合第 7.3.2 节的要求。