

桥梁超高性能水泥基复合材料组合加固 技术规范

Technical specification for bridges strengthened using ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material (UHPFRC) composite reinforcement technique

2022 - 10 - 12 发布

2022 - 11 - 12 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.....	2
4 符号.....	2
5 材料.....	6
6 基本规定.....	7
7 中小跨径混凝土梁桥组合加固.....	8
8 大跨度混凝土箱梁桥组合加固.....	19
9 混凝土拱桥组合加固.....	21
10 混凝土斜拉桥组合加固.....	22
11 下部结构组合加固.....	24
12 加固施工.....	30
13 质量检验.....	32

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。

本文件由陕西省交通运输厅提出。

本文件由陕西省交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：长安大学、中交第一公路勘察设计研究院有限公司、中交基础设施养护集团有限公司、宁夏交通建设股份有限公司、铜川市交通运输局。

本文件主要起草人：王春生、王茜、段兰、侯旭、战昂、夏兴佳、文一平、田晓锋、沈建成、赵涛、吴江、任更锋、贺丹丹、张洋。

本文件由长安大学负责解释。

本文件首次发布。

联系信息如下：

单位：长安大学

电话：029-82334830

地址：西安市碑林区南二环中段长安大学

邮编：710064

桥梁超高性能水泥基复合材料组合加固技术规范

1 范围

本文件规定了桥梁超高性能水泥基复合材料组合加固的材料、加固设计、施工及质量检验的要求。本文件适用于中小跨径混凝土梁桥、大跨度混凝土箱梁桥、混凝土拱桥、混凝土斜拉桥和下部结构加固。

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 175 通用硅酸盐水泥
- GB 8076 混凝土外加剂
- GB/T 21120 水泥混凝土和砂浆用合成纤维
- GB/T 27690 砂浆和混凝土用硅灰
- GB/T 39147 混凝土用钢纤维
- GB/T 41054 高性能混凝土技术条件
- GB/T 50107 混凝土强度检验评定标准
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
- GB 50367 混凝土结构加固设计规范
- JGJ 52 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准
- JGJ 63 混凝土用水标准
- JGJ 145 混凝土结构后锚固技术规程
- JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
- JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范
- JTG 5220 公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超高性能水泥基复合材料 ultra-high performance fibre reinforced cementitious composite material

由水泥、砂、硅灰、减水剂、纤维等材料制备，具有抗压、抗拉及抗弯拉强度高特点的水泥基复合工程材料，简称UHPFRC。

3.2

UHPFRC组合加固 UHPFRC composite reinforcement

在原结构混凝土表面植筋，并浇筑UHPFRC的加固方法。

3.3

钢板-UHPFRC组合加固 steel plate and UHPFRC composite reinforcement

在原结构混凝土表面植筋，加固钢板上焊接栓钉，并在原结构与钢板间浇筑UHPFRC的加固方法。

3.4

预应力UHPFRC组合加固 prestressed UHPFRC composite reinforcement

在原结构混凝土表面植筋，并在UHPFRC内配置有粘结或无粘结预应力钢筋的加固方法。

3.5

钢板-预应力UHPFRC组合加固 steel plate- prestressed UHPFRC composite reinforcement

在钢板-UHPFRC组合加固层内配置有粘结或无粘结预应力钢筋的加固方法。

3.6

纤维取向系数 fiber orientation coefficient

纤维分布和取向效应对UHPFRC受拉开裂后力学性能的影响系数。

4 符号

下列符号适用于本文件。

4.1 材料性能有关符号

E_c —混凝土的弹性模量。

E_p —无粘结预应力筋的弹性模量。

$E_{p,e}$ —原构件预应力钢筋的弹性模量。

$E_{p,i}$ —组合加固区预应力钢筋的弹性模量。

E_s —钢筋的弹性模量。

E_{sp} —加固钢板的弹性模量。

E_U —UHPFRC的弹性模量。

f_{cd1} —原构件混凝土轴心抗压强度设计值。

- $f_{cu,k}$ —原梁混凝土立方体抗压强度标准值。
- f_{pd} —弯起预应力筋的抗拉强度设计值。
- $f_{pd,i}$ —原构件预应力筋的抗拉强度设计值。
- $f_{pd,e}$ —组合加固区预应力筋的抗拉强度设计值。
- f_{sd} —原构件普通钢筋抗拉强度设计值。
- f_{sd2} —构件达到承载能力极限状态时，新增纵向普通钢筋的抗拉强度设计值。
- f_{sdc2} —原构件截面受拉侧纵向普通钢筋抗拉强度设计值。
- f_{sdU2} —构件达到承载能力极限状态时，受拉侧 UHPFRC 层新增纵向普通钢筋的抗拉强度设计值。
- f_{spd} —加固钢板抗拉强度设计值。
- f_{sv} —箍筋的抗拉强度设计值。
- f_{sw} —沿截面高度方向新增 UHPFRC 层内均匀布置的纵向普通钢筋的强度设计值。
- f_{Ucd} —UHPFRC 的抗压强度设计值。
- f_{Utud} —UHPFRC 的抗拉强度设计值。
- f'_{sd1} —原构件受压区纵向钢筋的抗压强度设计值。
- f'_{sdc1} —原构件截面受压较大边纵向普通钢筋抗压强度设计值。
- f'_{sdU} —UHPFRC 加固层内钢筋抗压强度设计值。
- f'_{sdU1} —构件达到承载能力极限状态时，压应力较大边 UHPFRC 层新增纵向普通钢筋的抗压强度设计值。

4.2 作用效应和抗力有关符号

- M_d —相应于轴向力的弯矩设计值。
- M_{sw} —沿截面高度方向新增 UHPFRC 层内钢筋的内力对受拉边或受压较小边均匀布置的纵向普通钢筋重心的力矩。
- N_d —轴向力设计值。
- N_{sw} —沿截面高度方向新增 UHPFRC 层内均匀布置的纵向普通钢筋所承担的轴向力。
- V_d —加固后构件验算截面处的剪力设计值。
- $\Delta\varepsilon_{p,e}$ —加固后组合加固区预应力筋的应变增量。
- $\Delta\varepsilon_{p,i}$ —加固后原梁预应力筋的应变增量。
- $\Delta\sigma$ —加固后结构应力变化值。
- ε_{cc} —原构件受压区边缘混凝土的应变。
- ε_{cp} —无粘结预应力筋处混凝土应变。
- ε_{cu} —混凝土极限应变。
- ε_{i0} —原结构加固后承担的可变荷载引起的应变。
- ε_{i1} —原结构状态下的恒载、有效预应力引起的应变。
- ε_{i2} —加固用材料自重、加固预应力引起的应变效应。
- $\varepsilon_{p,e}$ —组合加固区预应力筋应变。
- $\varepsilon_{p,i}$ —原构件预应力应变。
- ε_{sc1} —原构件受压区混凝土中纵向钢筋的应变。
- ε_{sc2} —原构件受拉区混凝土中纵向钢筋的应变。
- ε_{sp} —加固钢板应变。
- ε_{spi} —加固钢板滞后应变。
- ε_{spy} —加固钢板的屈服应变。

- $\varepsilon_{\text{spc}2}$ —原构件受拉区纵向钢筋的屈服应变。
- ε_{sU} —UHPFRC 加固层内钢筋应变。
- ε_{sUi} —UHPFRC 加固层内受压钢筋滞后应变。
- ε_{Uc} —UHPFRC 加固层顶面压应变。
- ε_{Uci} —UHPFRC 加固层顶面滞后应变。
- ε_{Ucu} —UHPFRC 极限压应变。
- σ —加固前结构应力。
- σ_{pe} —无粘结预应力筋初始有效预加应力。
- σ_{pu} —无粘结预应力筋极限应力。
- $\sigma_{\text{sc}1}$ —极限状态原构件受压区纵向钢筋的应力。
- $\sigma_{\text{sc}2}$ —构件达到承载能力极限状态时，受拉边或受压较小边原构件纵向普通钢筋的应力。
- σ_{sU} —极限状态受压区 UHPFRC 加固层内钢筋的应力。
- $\sigma_{\text{sU}2}$ —构件达到承载能力极限状态时，受拉边或受压较小边 UHPFRC 层新增纵向普通钢筋的应力。
- σ_{sw} —构件达到承载能力极限状态时，受拉边或受压较小边原构件纵向普通钢筋的应力。
- $\sigma_{\text{U}2}$ —构件达到承载能力极限状态时，受压较小边 UHPFRC 的应力。

4.3 几何参数有关符号

- A —原构件普通混凝土圆形截面面积。
- A_{n} —新加UHPFRC和侧向钢板换算得到的混凝土面积之和。
- $A_{\text{p,e}}$ —组合加固区预应力筋截面面积。
- $A_{\text{p,i}}$ —原构件预应力筋截面面积。
- A_{r} —新加UHPFRC换算成原混凝土的面积。
- A_{s} —原构件内全部纵向普通钢筋截面面积。
- A_{sb} 、 A_{pb} —同一平面内的弯起普通钢筋、弯起预应力筋的截面面积。
- $A_{\text{sc}1}$ —原构件受压区混凝土纵向钢筋的截面面积。
- $A_{\text{sc}2}$ —原构件受拉区混凝土纵向钢筋的截面面积。
- A_{sp} —加固钢板的计算截面积，腹板加固钢板按面积的一半进行折减。
- A_{sU} —UHPFRC加固层内受压钢筋截面面积。
- $A_{\text{sU}2}$ —受拉边或受压较小边 UHPFRC 层新增纵向普通钢筋截面面积。
- A_{sw} —沿截面高度方向新增 UHPFRC 层内均匀布置的纵向普通钢筋截面面积。
- $A_{\text{s}1}$ —原梁斜截面纵向普通钢筋和预应力钢筋面积之和。
- $A_{\text{s}2}$ —新加UHPFRC外包底面钢板的面积。
- A_{U} —UHPFRC 层截面面积。
- A_0 —原混凝土的截面面积。
- $A_{\text{sU}1}$ —受压较大边 UHPFRC 层新增纵向普通钢筋截面面积。
- a_{sw} —沿截面高度方向新增 UHPFRC 层内受拉边或受压较小边均匀布置的纵向普通钢筋重心至加固后截面受压较大边的距离。
- $a_{\text{s}2}$ —原构件截面受拉边或受压较小边纵向普通钢筋和新增纵向普通钢筋的合力作用点至加固后截面受拉边或受压较小边的距离。
- $a_{\text{sc}1}$ —原构件纵向普通钢筋重心至加固后截面受压较大边的距离。
- $a_{\text{sU}1}$ —新增纵向普通钢筋重心至加固后截面受压较大边的距离。
- a_{sw} —沿截面高度方向新增 UHPFRC 层内受压较大边均匀布置的纵向普通钢筋重心至加固后截面受压较大边的距离。

- B —加固后截面的宽度。
- b —原构件截面的宽度。
- b'_r —上翼缘顶板宽度。
- $d_{p,e}$ —组合加固区预应力筋合力点至截面受拉边缘的距离。
- $d_{p,i}$ —原构件预应力合力点至截面受拉边缘的距离。
- d_{sc} —原构件受拉区混凝土中纵向钢筋合力点至截面受拉边缘的距离。
- $d_{sc,c}$ —原构件受压区钢筋合力点至截面受拉边缘的距离。
- d_{sp} —组合加固钢板合力点至截面受拉边缘的距离。
- d_{sU} —UHPFRC加固层内钢筋合力点至截面受拉边缘的距离。
- e_{s2} —轴向力作用点至加固后截面受拉边或受压较小边纵向钢筋合力点的距离。
- e_0 —轴向力对加固后截面重心轴的偏心距离。
- h —加固后截面高度。
- h_p —无粘结预应力筋合力点至截面受压边缘的距离。
- h_U —增设的 UHPFRC 层厚度。
- h_{U1} —受压区增设的 UHPFRC 层厚度。
- h_{U2} —受拉区增设的 UHPFRC 层厚度。
- h_0 —截面的有效高度。
- h_2 —加固后截面的高度。
- L —相邻锚具间无粘结预应力筋长度或简支梁全长。
- l_0 —构件的计算长度或高度。
- r_c —原构件圆形截面的半径。
- r_s —原构件内纵向普通钢筋重心所在圆周的半径（等效钢环半径）。
- r_{sU} —UHPFRC 层内增设的纵向普通钢筋重心所在圆周的半径（等效钢环半径）。
- x —截面受压区 UHPFRC 的等效矩形应力图高度。
- x_{bUc} —受拉钢筋屈服时的界限受压区高度。
- $x_{bUc,s}$ —受拉钢筋先屈服时的界限受压区高度。
- $x_{bUc,sp}$ —钢板先屈服时的界限受压区高度。
- x_c —截面受压区高度。
- θ_s —斜截面上弯起普通钢筋的切线与构件纵轴线的夹角。
- θ_p —斜截面上弯起弯起预应力筋的切线与构件纵轴线的夹角。
- ξ_{bUc} —受拉钢筋屈服时的相对界限受压区高度。
- $\xi_{bUc,s}$ —受拉钢筋先屈服时的相对界限受压区高度。
- $\xi_{bUc,sp}$ —钢板先屈服时的相对界限受压区高度。

4.4 计算系数及其他有关符号

$\bar{r} = \bar{r} = r/(r+1)$ ，其中 r 为剪力连接程度，应取新老混凝土之间的剪力连接程度和侧向钢板和新加混凝土之间连接程度的最小值。

α —对应于圆形截面受压区混凝土和增设 UHPFRC 层截面面积的圆心角 (rad) 与 2π 的比值。

α_{sU1} —构件达到承载能力极限状态时，受拉边或受压较小边新增纵向钢筋的强度利用系数，取 0.8。

α_{sU2} —构件达到承载能力极限状态时，受拉侧新增纵向钢筋的强度利用系数，取 0.8。

α_t —原构件中纵向受拉普通钢筋和增设 UHPFRC 层中纵向受拉普通钢筋的截面面积与全部纵向普通钢筋截面面积的比值，当 α 大于 0.625 时， α_t 取为 0。

- α_U —构件达到承载能力极限状态时，UHPFRC 层的强度利用系数，取 0.6。
- α_{Uj} —构件达到承载能力极限状态时，受拉边或受压较小边 UHPFRC 的强度利用系数，对于小偏心受压构件，取 0.5；对于大偏心受压构件，取 0.6。
- α_{Us} —构件达到承载能力极限状态时，新增纵向钢筋的强度利用系数，取 0.8。
- α_{U1} —构件达到承载能力极限状态时，受拉边或受压较小边 UHPFRC 的强度利用系数，取 0.6。
- α_{ut} —UHPFRC 层截面中，受拉区与全部截面面积的比值，取值同 α_t 。
- α_1 —异号弯矩影响系数。
- α_3 —受压翼缘影响系数。
- β —等效矩形应力图形换算系数。
- γ_0 —桥梁结构的重要性系数。
- Δ —等效塑性区段内无粘结预应力筋位置处混凝土的伸长值。
- ζ_1 —荷载偏心率对截面曲率的影响系数。
- ζ_2 —构件长细比对截面曲率的影响系数，不小于 0.85。
- η —偏心受压构件轴向力偏心距增大系数。
- λ —等效塑性区长度 (L_0) 与破坏截面中性轴高度 (x_c) 的比值，取 9.5。
- μ —加固后结构的应力水平指标。
- P —加固后计算截面斜裂缝范围纵向钢筋的配筋百分率。
- ρ_{sv} —箍筋的配筋率。
- Ψ_{cs} —与原梁斜裂缝有关的修正系数。

5 材料

- 5.1 组成超高性能水泥基复合材料的水泥、砂、硅灰、水、减水剂、纤维，应符合下列要求：
- a) 水泥应符合现行国家标准 GB 175 的规定，宜采用 42.5 级以上的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥；
 - b) 砂应采用经筛分、清洗、晾干的河砂，粒径不超过 0.5 mm，并符合 JGJ 52 的规定；
 - c) 硅灰粒径为 0.1 μm ~0.15 μm ，比表面积为 15 m^2/g ~27 m^2/g ，并符合 GB/T 27690 的规定；
 - d) 水应符合 JG J63 的规定；
 - e) 减水剂宜选用高性能减水剂，减水剂的添加量宜为胶凝材料（水泥+硅灰）的 3.3 %，并符合 GB 8076 和 GB 50119 的规定；
 - f) 纤维应满足 GB/T 39147、GB/T 21120 的规定。
- 5.2 UHPFRC 的抗压强度等级应根据 100 mm 立方体抗压强度标准值划分，强度等级划分为 UC120、UC140、UC160、UC180、UC200。
- 5.3 UHPFRC 的轴心抗拉强度等级应根据标准试件轴拉试验的弹性极限抗拉强度划分，强度等级划分为 UT7、UT8、UT9。
- 5.4 UHPFRC 轴心抗压强度标准值 f_{Uck} 和轴心抗压强度设计值 f_{Ucd} 应按表 1 的规定采用，UHPFRC 轴心抗拉强度标准值 f_{Utk} 和轴心抗拉强度设计值 f_{Utd} 按表 2 的规定采用。

表1 UHPFRC 轴心抗压强度

强度等级	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
f_{Uck} (MPa)	84	98	112	126	140
f_{Ucd} (MPa)	58	68	77	87	97

表2 UHPFRC 轴心抗拉强度

强度等级	UT7	UT8	UT9
f_{Utk} (MPa)	7	8	9
f_{Utd} (MPa)	$5.6/K$	$6.4/K$	$7.2/K$

注1: K 为纤维取向系数,可根据实际测定。测定时采用相同尺寸的标准试件与实体构件中切出的试件,用两者的实际抗弯强度之比确定。

注2: 若无实测数据,整体纤维取向系数 K_{global} 可取1.25 (K_{global} =标准试件的平均抗弯强度/实体切出的所有试件的平均抗弯强度),局部纤维取向系数 K_{local} 可取1.75 (K_{local} =标准试件的平均抗弯强度/实体切出的所有试件的最小抗弯强度)。

注3: 整体纤维取向系数适用于整体效应分析(如板或梁的抗弯和抗剪强度等问题),局部纤维取向系数适用于局部效应分析(如桥面板的冲切等问题)。

5.5 钢材、锚固件、胶粘剂、钢板用涂料应满足 JTG 3362、JTG/T 3650、JTG/T 3651 的规定。

6 基本规定

6.1 UHPFRC 组合加固适用于提升混凝土桥梁承载能力、刚度、耐久性和抗震性能。

6.2 组合加固应确保界面连接可靠,加固部分与原构件混凝土变形协调、共同受力。

6.3 加固设计计算应考虑结构损伤、材料劣化、新旧材料的结合性能及材料差异。材料、几何参数宜采用实测结果。

6.4 上部结构加固应考虑恒载增加对下部结构、基础及地基的影响,必要时应进行验算。

6.5 UHPFRC 组合加固设计应制订必要的加固施工工序。

6.6 UHPFRC 组合加固效应计算时,应结合施工方法,考虑二次受力的影响,满足以下规定:

- 支架施工时,超高性能水泥基复合材料未达到强度设计值之前的荷载由支架承担,卸架后的新增恒载、活载和附加荷载由加固后的组合截面承担;
- 无支架施工时,施工荷载和新增恒载由原结构截面承担,活载和附加荷载由加固后的组合截面承担。

6.7 UHPFRC 组合加固应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态计算,并根据需要,进行抗震极限状态设计与计算。

6.8 UHPFRC 组合加固计算应满足下列规定:

- 截面变形符合平截面假定;
- UHPFRC 受压和受拉的应力-应变关系均取为理想弹塑性模型;
- 抗弯承载力计算不计受拉区混凝土和 UHPFRC 的作用;
- 加固混凝土与原梁混凝土界面、钢板与加固层界面之间无相对滑移;
- 钢板应力沿板厚均匀分布;
- 顶板受压区 UHPFRC 的边缘压应变达到极限压应变时,结构进入极限状态。

6.9 受弯构件和受压构件正截面受压区 UHPFRC 压力计算应满足下列规定:

- 正截面受压区 UHPFRC 的应力图简化为等效的矩形应力图;
- 矩形应力图高度与实际受压区高度的比值 β ,按表 3 取用;
- 矩形应力图的压应力取 UHPFRC 的轴心抗压强度设计值 f_{Ucd} 。

表3 系数 β 取值

UHPFRC 强度等级	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
β	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78

6.10 偏心受压构件正截面受拉区 UHPFRC 拉力按等效矩形应力图计算,拉应力取抗拉强度设计值 f_{Utd} 的 0.5 倍。

7 中小跨径混凝土梁桥组合加固

7.1 一般规定

7.1.1 中小跨径混凝土空心板、T 梁、预制装配式箱梁、整体式混凝土箱梁桥可采用 UHPFRC 组合加固方法进行抗弯、抗剪加固。

7.1.2 原结构构件混凝土强度的实测值应符合下列要求:

- 钢筋混凝土受压构件不应低于 C25, 受弯构件不应低于 C30;
- 预应力混凝土构件不应低于 C40。

7.1.3 对中小跨径混凝土梁桥进行横向整体性加固时, 应满足下列规定:

- 空心板桥的顶板、铰缝可采用 UHPFRC 进行加固, 加固构造示意如图 1 所示;
- 空心板可根据加固需求, 在梁底铰缝处进行纵向钢板-UHPFRC 组合加固、钢板-预应力 UHPFRC 组合加固, 或在梁底进行横向钢板-UHPFRC 组合加固、钢板-预应力 UHPFRC 组合加固, 亦可采用纵横向混合加固法。加固构造示意如图 2 所示;
- 肋梁桥横向整体加固时, 可对顶板进行 UHPFRC、预应力 UHPFRC 横向整体加固; 对横隔板进行钢板-UHPFRC 组合加固。加固构造如图 3 所示。

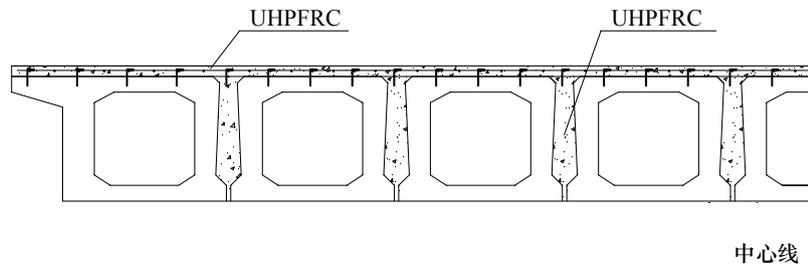


图1 空心板铰缝加固构造示意

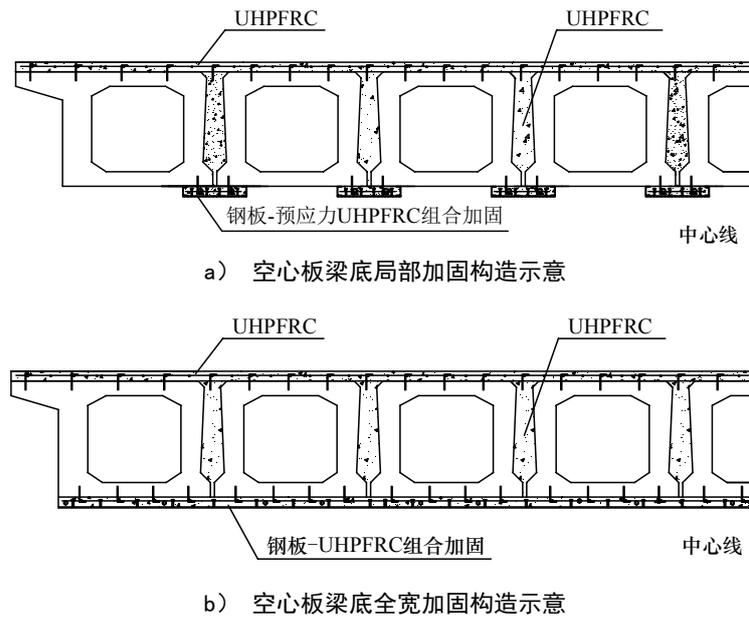


图2 空心板加固构造示意

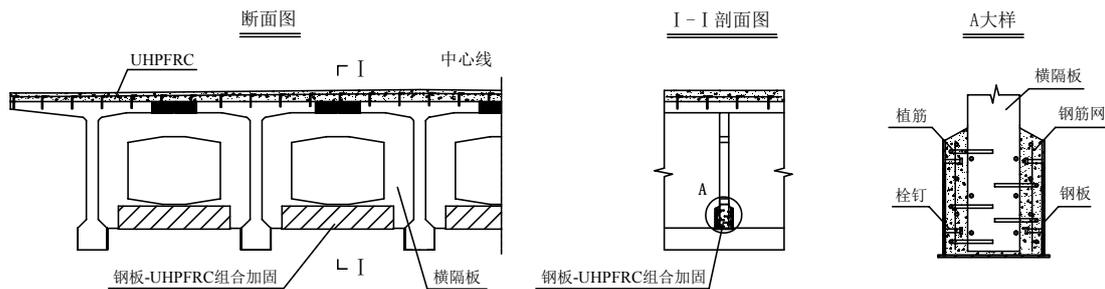


图3 肋梁横向整体加固示意

7.2 混凝土 T 梁桥组合加固

7.2.1 一般规定

7.2.1.1 混凝土 T 梁桥可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC 加固顶板，钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固腹板进行抗弯或抗剪加固。

7.2.1.2 腹板加固应根据抗弯、抗剪加固需要采用不同的组合加固高度。T 梁加固立面布置如图 4 所示。采用 UHPFRC 加固顶板、钢板-预应力 UHPFRC 组合加固腹板的 T 梁抗弯加固构造示意如图 5 所示，抗剪加固构造示意如图 6 所示。

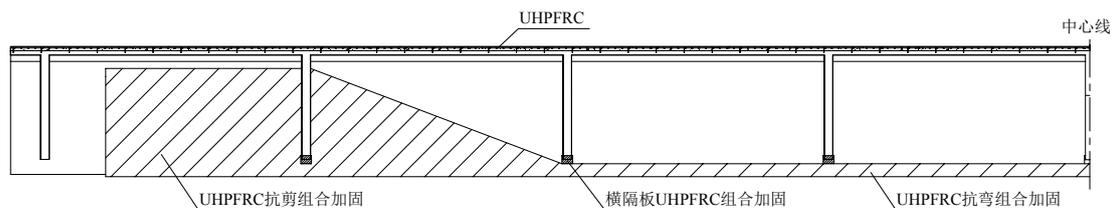


图4 混凝土 T 梁加固立面布置示意

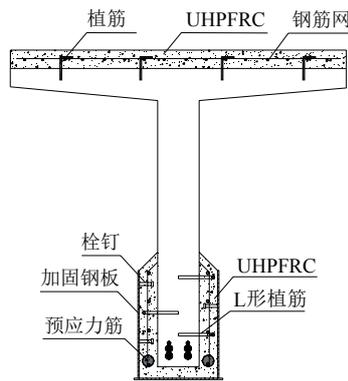


图5 混凝土 T 梁抗弯加固构造示意

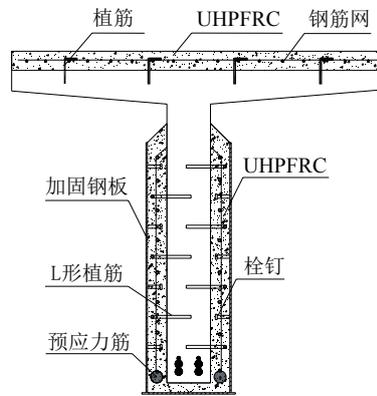


图6 混凝土 T 梁抗剪加固构造示意

7.2.1.3 UHPFRC 组合加固后的主梁应为适筋梁。

7.2.2 抗弯加固

7.2.2.1 采用钢板-UHPFRC 组合加固或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法对混凝土 T 梁桥进行抗弯加固时，加固高度、厚度和长度应满足构件截面抗弯承载力和抗弯刚度的要求。

7.2.2.2 采用 UHPFRC 加固顶板，钢板-预应力 UHPFRC 组合加固腹板时，截面抗弯极限状态为 UHPFRC 组合层应变达到极限压应变，梁下缘钢板、原梁钢筋、预应力筋受拉屈服，截面相对受压区高度 $\xi_c = x_c/h$ 应满足本文件第 7.2.2.5 条适筋梁界限破坏条件。

7.2.2.3 抗弯承载力计算时顶板钢筋应变需按平截面假定确定，受拉区腹板加固钢板按面积的一半进行折减，同时不考虑受拉区混凝土的作用。截面抗弯承载力计算图式如图 7 所示，预应力混凝土 T 梁正截面抗弯承载力应按照式 (1) 进行计算，UHPFRC 受压区高度应按式 (2) 进行计算。

$$\gamma_0 M_d \leq f_{Ucd} b'_f x \left(h - \frac{x}{2} \right) + \sigma_{sU} A_{sU} d_{sU} + \sigma_{sc1} A_{sc1} d_{sc} - f_{pd,i} A_{p,i} d_{p,i} - f_{sd} A_{sc2} d_{sc} - f_{pd,e} A_{p,e} d_{p,e} - f_{spd} A_{sp} d_{sp} \quad \dots \quad (1)$$

$$f_{Ucd} b'_f x + \sigma_{sU} A_{sU} + \sigma_{sc1} A_{sc1} = f_{pd,i} A_{p,i} + f_{pd,e} A_{p,e} + f_{sd} A_{sc2} + f_{spd} A_{sp} \quad \dots \quad (2)$$

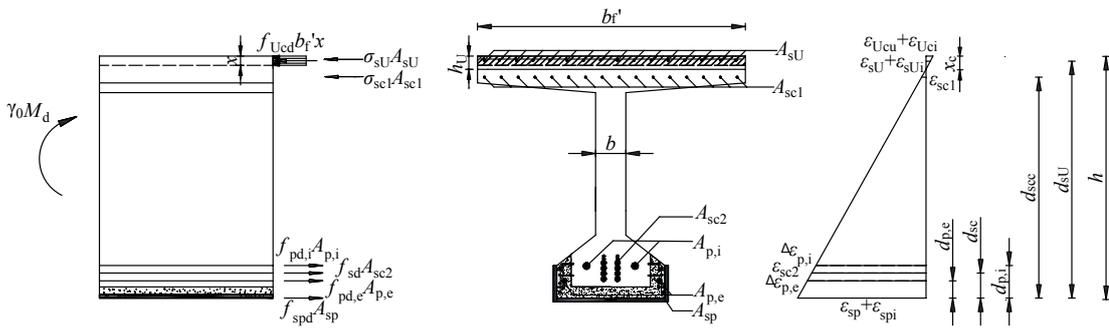


图7 截面抗弯承载力计算图式

7.2.2.4 应根据受拉钢筋、加固钢板的屈服顺序，确定不同的界限破坏状态和截面相对受压区高度应满足的条件。

7.2.2.5 当受压区 UHPFRC 达到极限压应变时，受拉钢筋与加固钢板均屈服，加固梁发生适筋破坏，截面相对受压区高度应满足下列规定：

a) 截面相对受压区高度需按照受拉钢筋与加固钢板的屈服顺序分情况确定。受拉钢筋与加固钢板屈服顺序的判定按照本文件 7.2.2.6 条规定执行：

1) 受拉钢筋先于加固钢板屈服：

界限破坏状态为：受压区 UHPFRC 达到极限压应变的同时，钢筋已进入塑性阶段，加固钢板达到屈服，则 $\xi_c < \xi_{bUc,s}$ ，计算图式见图8。

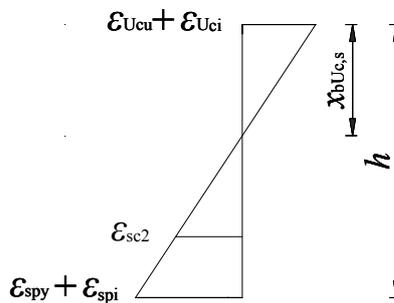


图8 界限破坏状态平截面假定计算图式（受拉钢筋先屈服）

根据平截面假定，此时相对界限受压区高度按式（3）计算：

$$\xi_{bUc,s} = \frac{x_{bUc,s}}{h} = \frac{\epsilon_{Ucu} + \epsilon_{Uci}}{\epsilon_{spy} + \epsilon_{Ucu} + \epsilon_{spi} + \epsilon_{Uci}} \dots\dots\dots (3)$$

2) 加固钢板先于受拉钢筋屈服：

界限破坏状态为：受压区 UHPFRC 达到极限压应变的同时，加固钢板已进入塑性阶段，钢筋达到屈服，则 $\xi_c < \xi_{bUc,sp}$ ，计算图式见图9。

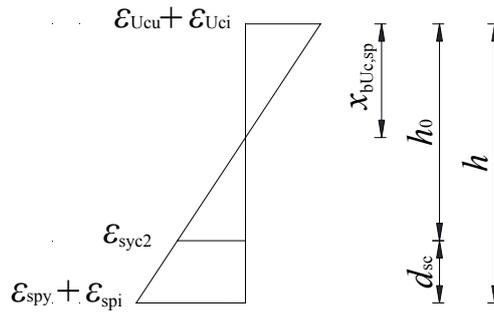


图9 界限破坏状态平截面假定计算图式（钢板先屈服）

根据平截面假定，此时相对界限受压区高度按式（4）计算：

$$\xi_{bUc,sp} = \frac{x_{bUc,sp}}{h} = \frac{h - d_{sc}}{h} \cdot \frac{\varepsilon_{Ucu} + \varepsilon_{Uci}}{\varepsilon_{syc2} + \varepsilon_{Ucu} + \varepsilon_{Uci}} \dots \dots \dots (4)$$

b) 若不考虑二次受力影响，应按一次受力计算，结构的滞后应变 $\varepsilon_i(\varepsilon_{Uci}, \varepsilon_{spi}) = 0$ 。

7.2.2.6 受拉主筋与加固钢板的屈服顺序可根据平截面假定，按照下列规定确定：

a) 应力水平指标计算：

加固后结构的应力水平指标可按式（5）计算：

$$\mu = \left| \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right| \dots \dots \dots (5)$$

按实际加固施工工序计算结构应力水平指标，当 $\mu \leq 5\%$ 时，二次受力的影响很小，按一次受力情况计算，即 $\varepsilon_i = 0$ ；当 $\mu > 5\%$ 时，则必须考虑二次受力的影响。

b) 加固钢板与受拉钢筋屈服顺序的判定：

当钢板达到屈服应变 ε_{sPY} 时，截面受压区高度为 x_c ，则截面任一位置处的应变均可根据平截面假定求得，计算图式如图10所示。

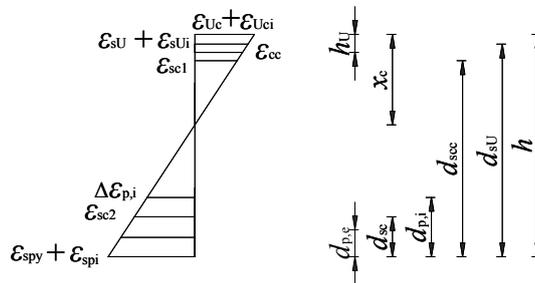


图10 平截面假定计算图式

截面受压区高度按式（6）计算：

$$\begin{aligned} & (\varepsilon_{Uc} + \varepsilon_{cc})E_U h_U b / 2 + \varepsilon_{cc} E_c (x_c - h_U) b / 2 + E_s \varepsilon_{sU} A_{sU} + E_s \varepsilon_{sc1} A_{sc1} \\ & = E_{p,e} \varepsilon_{p,e} A_{p,e} + E_{p,i} \varepsilon_{p,i} A_{p,i} + E_s \varepsilon_{sc2} A_{sc2} + E_{sp} \varepsilon_{sPY} A_{sp} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

由式（6）求出截面受压区高度 x_c 后，按照下列规定判断加固钢板与受拉钢筋的屈服顺序：

若 $x_c < h - \frac{d_{sc}(\varepsilon_{spy} + \varepsilon_{spi})}{\varepsilon_{spy} - \varepsilon_{syc2} + \varepsilon_{spi}}$ ，则钢筋先于钢板屈服；

若 $x_c = h - \frac{d_{sc}(\varepsilon_{spy} + \varepsilon_{spi})}{\varepsilon_{spy} - \varepsilon_{syc2} + \varepsilon_{spi}}$ ，则钢筋与钢板同时屈服；

若 $x_c > h - \frac{d_{sc}(\varepsilon_{spy} + \varepsilon_{spi})}{\varepsilon_{spy} - \varepsilon_{syc2} + \varepsilon_{spi}}$ ，则钢板先于钢筋屈服。

7.2.2.7 采用无粘结预应力时，可采用基于等效塑性区长度方法计算无粘结预应力筋的极限应力，计算按下列规定执行：

- a) 计算基本假定除满足本文件第 6 章规定外，还应符合以下要求：
 - 1) 截面应变除无粘结预应力筋外，仍然符合平截面假定；
 - 2) 忽略无粘结预应力筋可能存在的微量摩擦；
 - 3) 无粘结预应力筋处混凝土应变主要集中在塑性区内，忽略塑性区之外应变。
- b) 无粘结筋的极限应力按式（7）计算：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + E_p \Delta / L \dots\dots\dots (7)$$

- c) 由平截面假定，无粘结预应力筋处的混凝土应变按式（8）计算，计算图式如图 11 所示：

$$\varepsilon_{cp} = \frac{h_p - x_p}{x_c} \varepsilon_{cu} \dots\dots\dots (8)$$

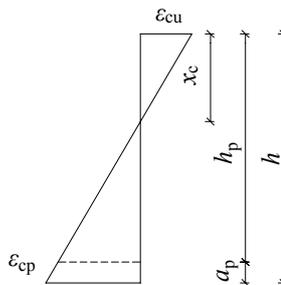


图11 平截面假定计算图式

- d) 等效塑性区内无粘结筋处混凝土变形按式（9）计算，等效塑性区计算图式如图 12 所示：

$$\Delta = \varepsilon_{cp} \cdot L_0 = \frac{h_p - x_p}{x_c} \varepsilon_{cu} \cdot \lambda x_c = \lambda \varepsilon_{cu} (h_p - x_c) \dots\dots\dots (9)$$

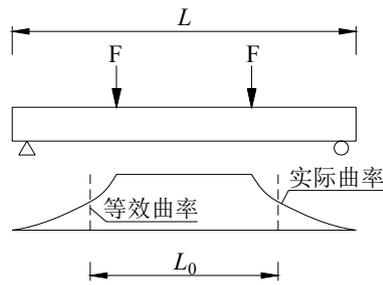


图12 等效塑性区长度

e) 无粘结预应力筋的极限应力按式 (10) 计算:

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + \lambda E_p \varepsilon_{cu} (h_p - x_c) / L \dots\dots\dots (10)$$

7.2.2.8 采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 组合加固方法时, 可参照本节规定, 进行加固后结构的抗弯承载力计算与验算。

7.2.3 抗剪加固

7.2.3.1 采用钢板-UHPFRC 组合加固或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法对混凝土 T 梁桥进行抗剪加固时, 组合加固区域的高度、厚度及纵向长度应满足构件截面抗剪承载力和抗剪刚度要求。

7.2.3.2 采用 UHPFRC 组合加固对钢筋混凝土或预应力混凝土 T 梁进行抗剪加固, 加固后受剪截面应满足式 (11) 的规定:

$$\gamma_0 V_0 \leq (0.51 \times 10^{-3}) \sqrt{f_{cu,k}} (A_0 + A_r) \dots\dots\dots (11)$$

7.2.3.3 采用 UHPFRC 组合加固方法对钢筋混凝土 T 梁及预应力混凝土 T 梁进行抗剪加固, 应按照式 (12) 对主梁斜截面抗剪承载力进行验算:

$$\begin{aligned} \gamma_0 V_d \leq & \alpha_1 \alpha_3 (1.964 - \frac{0.964}{1 + 12.807r^{2.168}}) \sqrt{(2 + 0.6p) \sqrt{f_{cu,k}} \rho_{sv} f_{sv} (0.43 \times 10^{-3} A_0 \Psi_{cs} + 0.45 \times 10^{-3} A_n)} \dots\dots\dots (12) \\ & + 0.75 \times 10^{-3} f_{sd} \sum A_{sb} \sin \theta_s + 0.75 \times 10^{-3} f_{pd} \sum A_{pb} \sin \theta_p \end{aligned}$$

7.2.3.4 采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 组合加固方法组合加固方法时, 可参照本节规定, 进行加固后结构的抗剪承载力计算与验算。

7.3 混凝土空心板桥组合加固

7.3.1 钢筋混凝土空心板桥和预应力钢筋混凝土空心板桥可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 及钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法进行抗弯加固。钢板-预应力 UHPFRC 组合加固底板构造示意如图 13 a) 所示。

7.3.2 混凝土空心板桥的顶板可采用 UHPFRC 进行加固, 加固构造示意如图 13 b) 所示。

7.3.3 采用 UHPFRC 组合加固混凝土空心板桥, 正截面抗弯承载力计算可参照本文件 7.2.2 的规定执行。

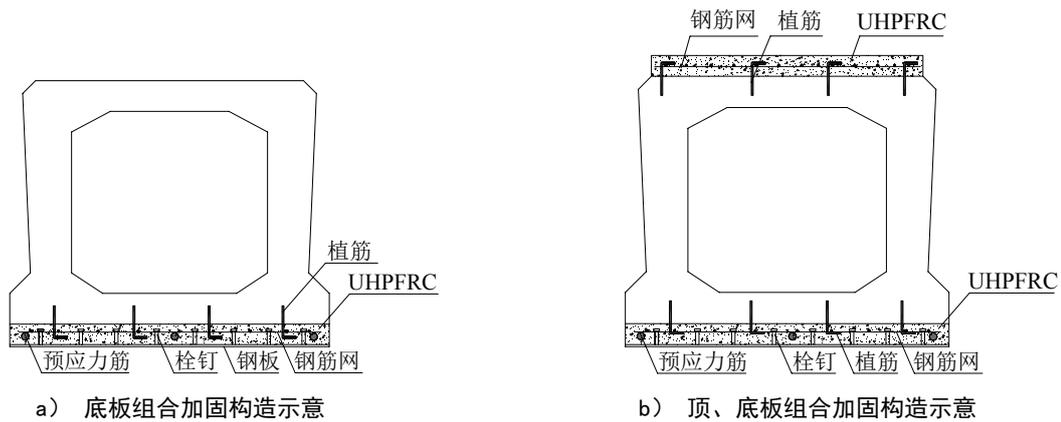


图13 钢筋混凝土空心板加固构造示意

7.4 装配式预应力混凝土组合箱梁桥组合加固

7.4.1 一般规定

7.4.1.1 装配式预应力混凝土组合箱梁桥可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC 加固顶板、钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固腹板及底板进行抗弯、抗剪加固。

7.4.1.2 腹板加固应根据抗弯、抗剪加固需要采用不同的组合加固高度。装配式预应力混凝土组合箱梁桥的加固立面布置如图 14 所示。

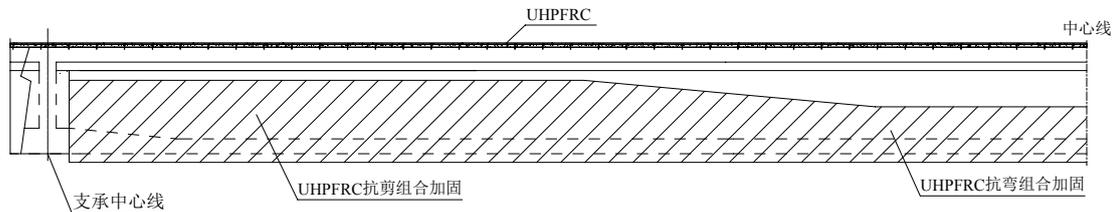


图14 装配式预应力混凝土组合箱梁立面布置示意

7.4.2 抗弯加固

7.4.2.1 采用钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法对装配式预应力混凝土组合箱梁桥进行抗弯加固时，加固高度、厚度及长度应满足构件截面抗弯承载力和抗弯刚度的要求。同时采用 UHPFRC 与钢板-UHPFRC 组合加固法对装配式预应力混凝土组合箱梁桥进行抗弯加固的构造示意如图 15 所示。

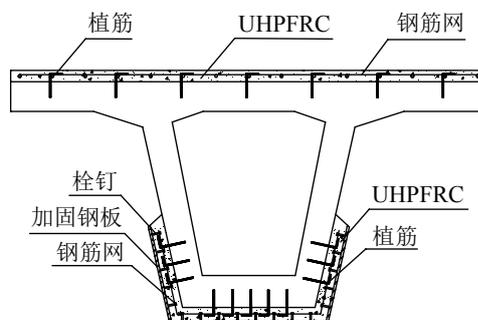


图15 装配式预应力混凝土组合箱梁抗弯加固构造示意

7.4.2.2 采用 UHPFRC 组合加固装配式预应力混凝土组合箱梁，正截面抗弯承载力计算可参照本文件 7.2.2 的规定执行。

7.4.3 抗剪加固

7.4.3.1 采用钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法对装配式预应力混凝土组合箱梁桥进行抗剪加固时，加固高度、厚度及长度应满足构件截面抗剪承载力和抗剪刚度的要求。同时采用 UHPFRC 与钢板-UHPFRC 组合加固法对装配式预应力混凝土组合箱梁桥进行抗剪加固的构造示意如图 16 所示。

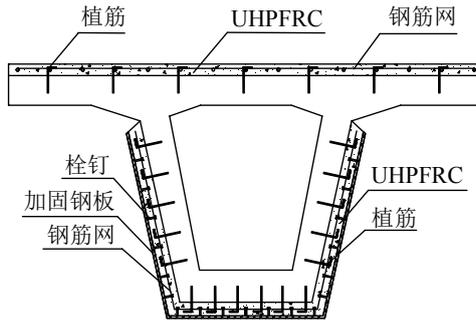


图16 装配式预应力混凝土组合箱梁抗剪加固构造示意

7.4.3.2 采用 UHPFRC 组合加固装配式预应力混凝土组合箱梁桥，斜截面抗剪承载力验算可参照本文件 7.2.3 的规定执行。

7.5 整体式混凝土箱梁桥组合加固

7.5.1 抗弯加固

7.5.1.1 整体式混凝土箱梁桥可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法对主梁进行抗弯加固。同时采用 UHPFRC 与钢板-预应力 UHPFRC 组合加固法对整体式混凝土箱梁桥进行抗弯加固的构造示意如图 17 所示。

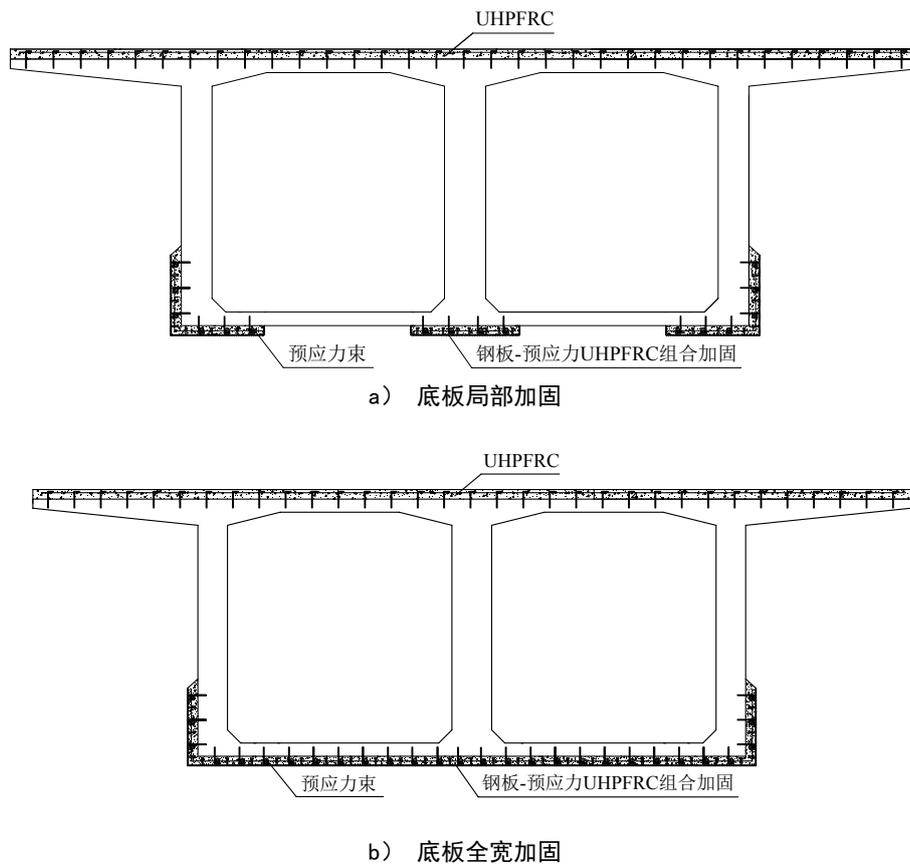


图17 混凝土整体箱梁抗弯加固构造示意

7.5.1.2 采用钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法对整体式混凝土箱梁桥进行抗弯加固时，可在梁底腹板处增设组合加固纵肋，组合加固纵肋的宽度、长度应根据计算确定。

7.5.1.3 采用 UHPFRC 组合加固整体式混凝土箱梁桥，其正截面抗弯承载力计算可参照本文件 7.2.2 的规定执行。

7.5.2 抗剪加固

7.5.2.1 整体式混凝土箱梁桥可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法对主梁进行抗剪加固。采用钢板-UHPFRC 组合加固法对整体式混凝土箱梁桥进行抗剪加固的构造示意如图 18 所示。

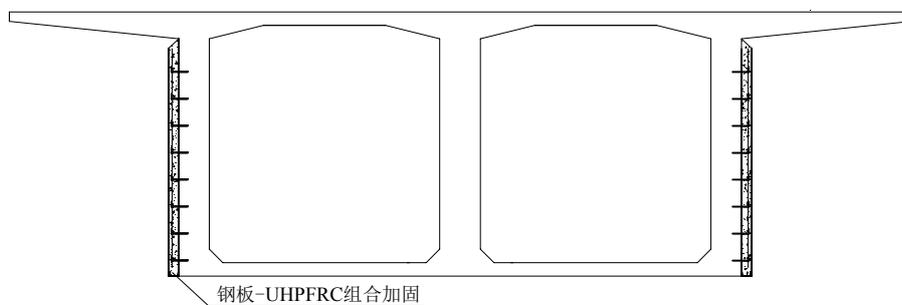


图18 混凝土整体箱梁抗剪加固构造示意

7.5.2.2 采用钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法对整体式混凝土箱梁桥进行抗剪加固时，组合加固区域应沿腹板高度方向布置，加固高度、厚度及长度应满足构件截面抗剪承载力和抗剪刚度的要求。

7.5.2.3 采用 UHPFRC 组合加固整体式混凝土箱梁桥，其斜截面抗剪承载力验算可参照本文件 7.2.3 的规定执行。

7.6 构造要求

7.6.1 厚度

UHPFRC组合层的厚度宜取40 mm~100 mm。

7.6.2 植筋

7.6.2.1 植筋孔深可根据受力和构造要求确定。

7.6.2.2 植筋沿梁的纵向应交错布置。

7.6.2.3 植筋沿梁纵向的最大间距不宜大于 500 mm，弯钩宜为 90 度且长度宜为 5 倍植筋直径。

7.6.2.4 钻孔孔径、植筋直径、植筋与混凝土边缘距离等构造应满足 GB 50367、JGJ 145 的规定，并结合构造要求共同确定。

7.6.2.5 植筋孔底距构件边缘距离不应小于植筋直径的 2 倍。

7.6.3 钢筋

7.6.3.1 UHPFRC 内配置的钢筋直径取 6 mm~12 mm。

7.6.3.2 采用 UHPFRC 或预应力 UHPFRC 加固时，普通钢筋和预应力钢筋的净保护层厚度应不小于 15 mm。

7.6.4 钢板

7.6.4.1 钢板厚度宜选用 4 mm~6 mm。

7.6.4.2 钢板-UHPFRC 组合部分或钢板-预应力 UHPFRC 组合部分沿梁纵向的加固长度应根据受力计算确定，并应考虑锚固区长度和张拉预应力的空间要求。

7.6.5 预应力锚固装置

7.6.5.1 预应力锚固装置可用型钢焊接而成，也可用钢板加焊加劲肋制成。锚板厚度不宜小于 16 mm。锚固装置与原结构间的局部受压承载力应满足 JTG 3362、JGJ 145 的规定。

7.6.5.2 预应力锚固装置应通过锚栓与原结构紧密连接，连接构造应满足 GB 50367 的规定。

7.6.5.3 锚固装置宜设置于横隔板等易于锚固与传力处。梁底、横隔板和梁端的预应力锚固装置示意分别如图 19~图 21 所示。

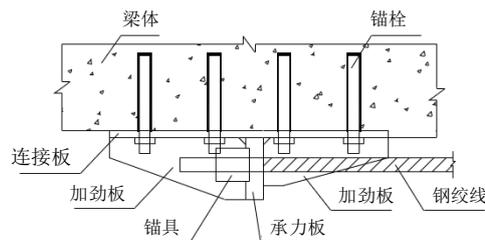


图19 梁底预应力锚固构造示意

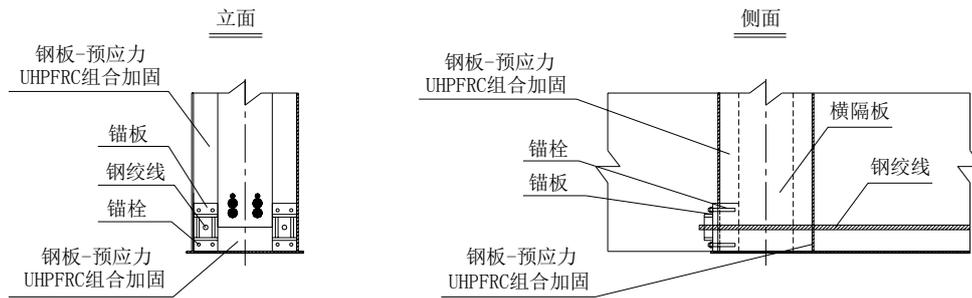


图20 横隔板预应力锚固构造示意

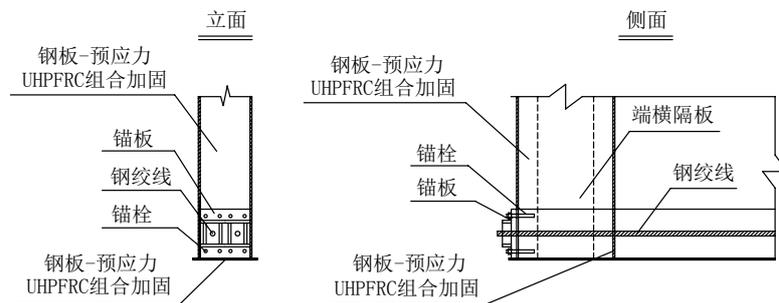


图21 梁端预应力锚固构造示意

8 大跨度混凝土箱梁桥组合加固

8.1 一般规定

大跨度混凝土箱梁桥可采用UHPFRC、预应力UHPFRC、钢板-UHPFRC或钢板-预应力UHPFRC组合加固方法恢复或提升结构的强度、刚度、抗裂性及耐久性。

8.2 主梁组合加固计算

8.2.1 抗弯加固计算

8.2.1.1 大跨度混凝土箱梁桥主梁抗弯加固计算可参照本文件 7.2.2 的规定执行。

8.2.1.2 大跨度混凝土箱梁正弯矩区同时采用 UHPFRC 加固顶板，预应力 UHPFRC 组合加固底板时，适筋梁相对受压区高度应按下列规定判定：

- a) 界限破坏状态为：受压区 UHPFRC 达到极限压应变的同时，受拉钢筋达到屈服，则 $\xi_c < \xi_{bUc}$ ，

计算图式见图 22；

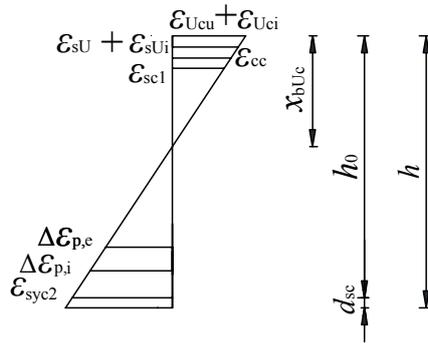


图22 界限破坏状态平截面假定计算图式

b) 根据平截面假定，此时相对界限受压区高度按式（13）计算。

$$\xi_{bUc} = \frac{x_{bUc}}{h - d_{sc}} = \frac{\epsilon_{Ucu} + \epsilon_{Uci}}{\epsilon_{syc2} + \epsilon_{Ucu} + \epsilon_{Uci}} \dots \dots \dots (13)$$

8.2.1.3 采用 UHPFRC 组合加固方法对大跨度混凝土箱梁负弯矩区进行加固后，其抗弯承载力应按照本文件 7.2.3 的方法进行计算。

8.2.2 抗剪加固计算

8.2.2.1 采用 UHPFRC 组合加固方法对大跨混凝土箱梁进行抗剪加固，截面抗剪验算可参照本文件 7.2.3 的规定执行。

8.2.2.2 采用 UHPFRC 组合加固方法对大跨混凝土箱梁进行抗剪加固后，应参照本文件 7.2.3 的规定，对主梁斜截面抗剪承载力进行验算。

8.3 主梁组合加固构造

8.3.1 大跨度混凝土箱梁桥因主梁腹板刚度不足发生下挠时，可采用钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固腹板内壁。加固构造示意如图 23 所示。

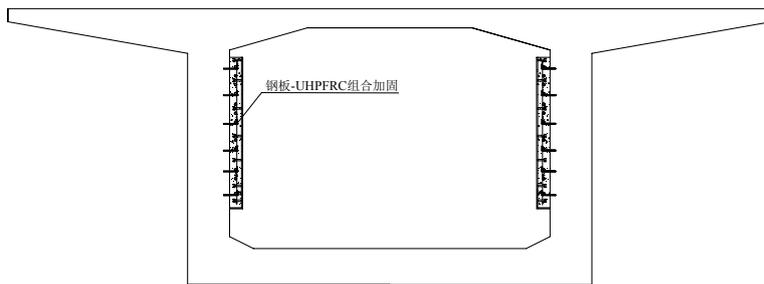


图23 大跨混凝土箱梁抗剪加固构造示意

8.3.2 大跨度混凝土箱梁桥抗弯、抗剪承载性能不足时，可采用 UHPFRC 或预应力 UHPFRC 加固技术对箱室内壁进行加固，也可采用钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固腹板内壁。

8.3.3 大跨度混凝土梁桥顶板、底板发生开裂时，可采用 UHPFRC 或预应力 UHPFRC 加固。

8.3.4 箱梁齿板局部承压不足引起齿板破坏或锚固区箱梁局部开裂时，可采用 UHPFRC 或钢板-UHPFRC 组合加固技术进行局部加固。

8.3.5 大跨度混凝土箱梁正、负弯矩区抗弯加固时，加固区域应靠近箱梁腹板，加固构造示意如图 24 所示。

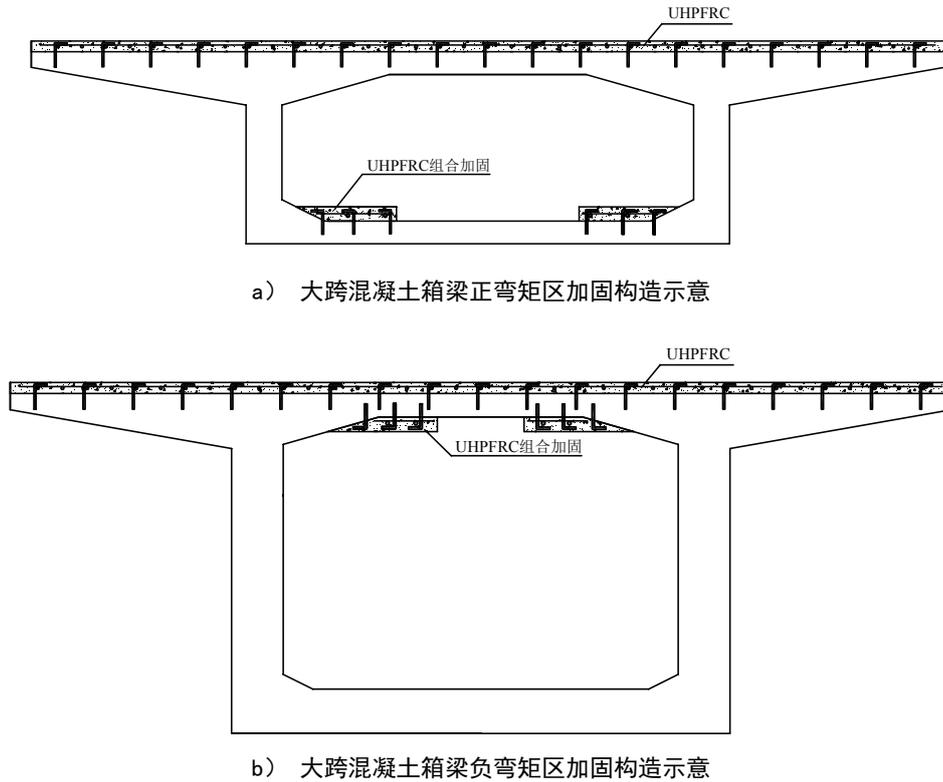


图24 大跨混凝土箱梁抗弯加固构造示意

8.3.6 大跨度混凝土箱梁桥组合加固构造应满足本文件 7.6 的规定。

9 混凝土拱桥组合加固

9.1 一般规定

9.1.1 钢筋混凝土双曲拱桥、肋拱桥及箱拱桥可采用 UHPFRC、钢板-UHPFRC 组合加固法对主拱进行加固。

9.1.2 拱上立柱和行车道板可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法进行加固。行车道板加固可参考本文件第 7 章规定执行，立柱加固可参考本文件第 11 章规定执行。

9.2 主拱组合加固

9.2.1 钢筋混凝土拱桥可采用 UHPFRC 或钢板-UHPFRC 组合加固方法对主拱圈或横系梁进行加固。钢筋混凝土箱拱和肋拱的加固构造示意如图 25 所示。

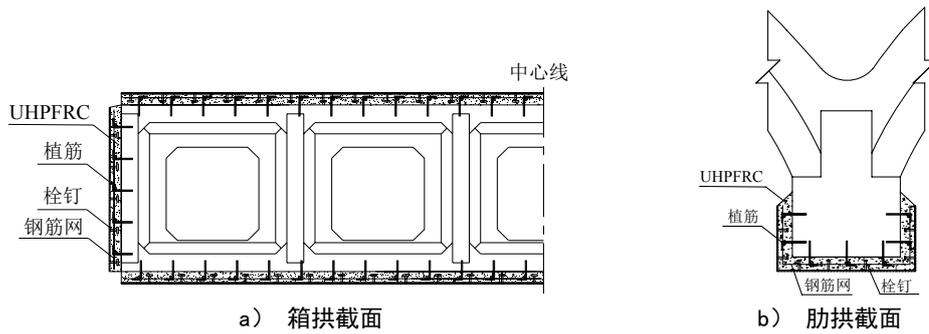


图25 主拱截面加固示意

9.2.2 UHPFRC 组合加固主拱圈时，计算应符合下列要求：

- 采用 UHPFRC 组合加固增大主拱圈或构件截面，应分阶段计算受力；
- UHPFRC 组合加固主拱截面时，应根据平截面假定计算原拱圈和新增拱圈部分的应力；
- 在拱腹采用 UHPFRC 组合加固时，支架方式新增的主拱圈截面恒载应由加固后的组合截面拱圈承担；吊架方式新增的主拱圈截面恒载以及模板系统临时恒载应由既有拱圈承担；
- 在拱背采用 UHPFRC 组合加固时，新增的主拱圈截面恒载应由既有拱圈承担；
- 卸载加固时，恢复后的恒载及活载应由加固后的组合截面拱圈承担；
- 计算内容及截面除应满足 JTG 3362 的规定外，还应对控制截面进行验算。

9.2.3 在顶板加固箱板拱时，应符合下列要求：

- 新增 UHPFRC 的厚度需满足设置构造钢筋及保护层厚度要求；
- 新增 UHPFRC 内应设置纵桥向主筋、横桥向构造钢筋；
- 新增 UHPFRC 内设置的钢筋在拱上横墙或立柱底梁处应保持连续；
- 拱背面应植剪力筋，并应与其他新增钢筋形成整体。

9.2.4 在底板加固箱板拱时，应符合下列要求：

- 新增加固部分沿拱腹横向可设为肋型结构；
- 新增 UHPFRC 内应设置纵桥向主筋、横桥向构造钢筋。

9.2.5 加固钢板与 UHPFRC 的连接方式，植筋等构造应满足本文件 7.6 的规定。

10 混凝土斜拉桥组合加固

10.1 一般规定

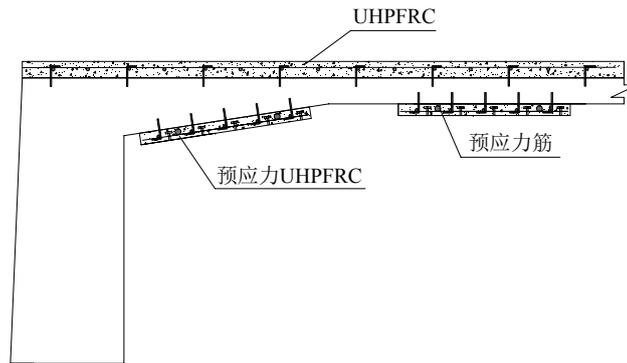
混凝土斜拉桥主梁和桥塔可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法进行整体或局部加固。

10.2 主梁加固

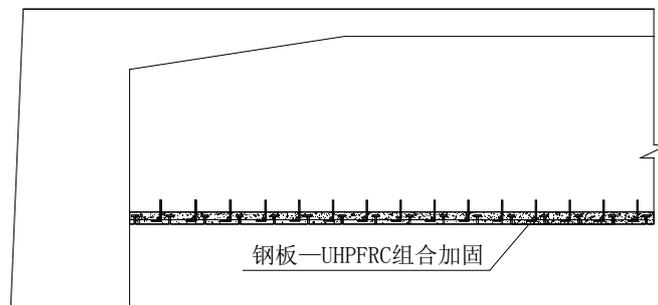
10.2.1 π 型梁加固

10.2.1.1 π 型梁顶板上表面、下表面出现纵、横向开裂，可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法进行加固。 π 型梁顶板加固构造示意如图 26 所示。

10.2.1.2 采用 UHPFRC 或预应力 UHPFRC 加固 π 型梁腹腋开裂部位的构造示意如图 26 所示。

图26 混凝土 π 型梁顶板、梗腋加固构造示意

10.2.1.3 采用 UHPFRC、钢板-UHPFRC 对 π 型梁腹板、或腹板与横梁连接处的开裂部位进行加固的构造示意如图 27 所示。

图27 混凝土 π 型梁横梁加固构造示意

10.2.1.4 主梁拉索锚固区可采用 UHPFRC 或钢板-UHPFRC 进行加固。

10.2.2 箱梁加固

10.2.2.1 箱梁顶、底板的纵、横向开裂区域可采用 UHPFRC 或钢板-UHPFRC 组合加固方法进行加固。箱梁加固构造示意如图 29 所示。

10.2.2.2 箱梁腹板可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法进行加固。加固构造示意如图 28 所示。

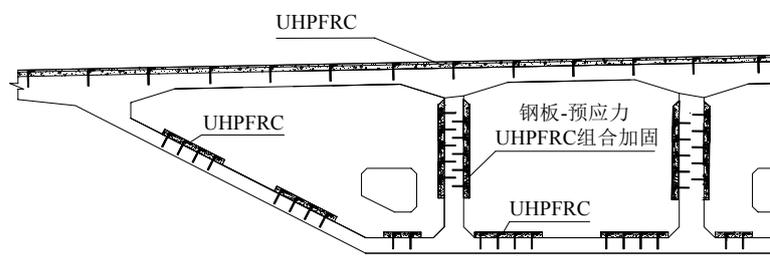


图28 混凝土箱梁加固构造示意

10.2.3 加固构造要求

10.2.3.1 选用 UHPFRC 组合加固斜拉桥混凝土主梁时，可布置多条加固纵肋。

10.2.3.2 对箱梁底板加固时，加固纵肋应靠近腹板布置。

10.2.3.3 加固部分与混凝土主梁的连接方式，UHPFRC 内部钢筋网、植筋等设置以及预应力锚固装置等构造应满足本文件 7.6 的规定。

10.3 桥塔加固

10.3.1 混凝土桥塔可采用 UHPFRC 或钢板-UHPFRC 组合加固进行全截面加固或部分截面加固。全截面加固构造示意如图 29 所示。

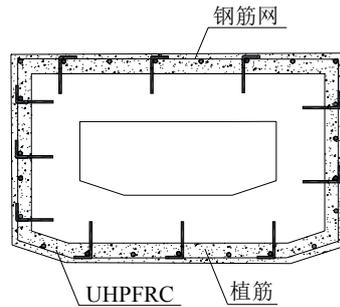


图29 UHPFRC 加固塔柱构造示意图

10.3.2 桥塔锚固区可采用 UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法进行加固。

10.3.3 加固桥塔的强度、刚度及抗裂性计算和验算，应满足 JTG 3362 的规定。

10.3.4 桥塔加固结构与原塔柱的连接方式、植筋等构造应满足本文件 7.6 的规定。

11 下部结构组合加固

11.1 一般规定

11.1.1 UHPFRC 组合加固可用于下部结构的强度、刚度、耐久性及抗震性能的恢复与提升。

11.1.2 下部结构加固可采用 UHPFRC、预应力 UHPFRC、钢板-UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法。

11.1.3 采用 UHPFRC 组合加固下部结构，抗震要求应满足 JTG/T 2231-01 的规定。

11.2 盖梁加固

11.2.1 盖梁可采用预应力 UHPFRC 或钢板-预应力 UHPFRC 组合加固方法进行加固。

11.2.2 应根据盖梁的受力情况和裂缝位置合理选择加固部位，正弯矩区宜在盖梁底面加固，负弯矩区宜在盖梁顶面及侧面加固。盖梁加固构造示意如图 30 所示。

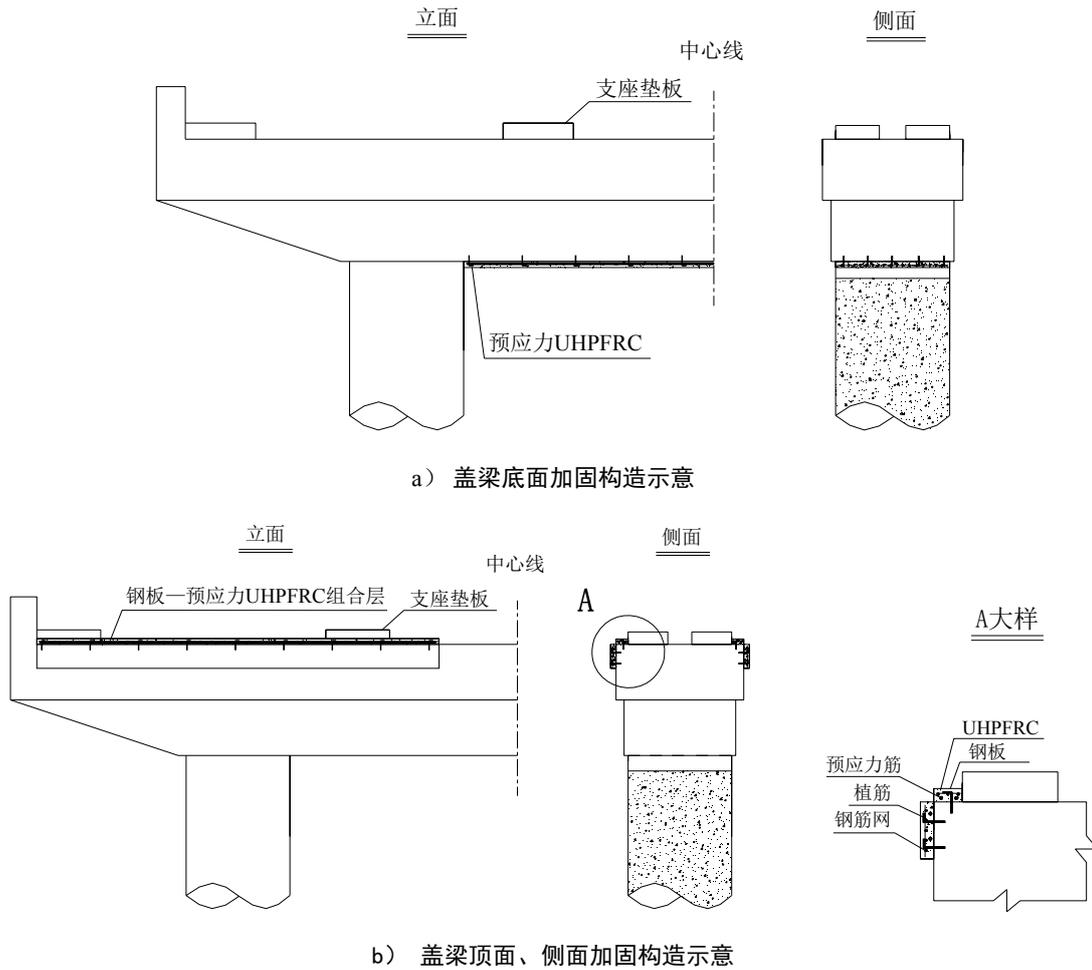


图30 UHPFRC 组合加固盖梁构造示意

11.3 墩柱加固

11.3.1 墩柱可采用 UHPFRC 或钢板-UHPFRC 组合加固方法进行加固。

11.3.2 圆形墩柱可在环向进行加固，矩形墩柱可在横桥向或纵桥向进行单向加固或双向加固。墩柱组合加固构造示意如图 31 所示。

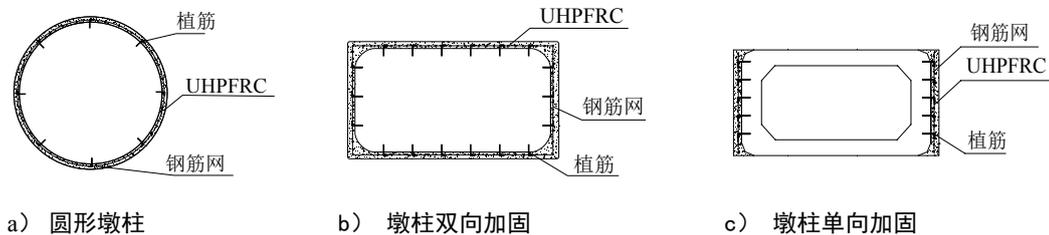


图31 UHPFRC 组合加固墩柱构造示意

11.3.3 当原构件截面压应力较大边缘的混凝土压应变达到极限压应变 0.0033 时，认为构件达到承载能力极限状态。

11.3.4 矩形截面墩柱采用 UHPFRC 进行加固后，应根据大、小偏心受压构件进行正截面承载力验算。

11.3.4.1 矩形截面墩柱单向加固后小偏心受压构件的计算图示如图 32 所示，正截面承载力应按照式 (14)～式 (16) 计算。

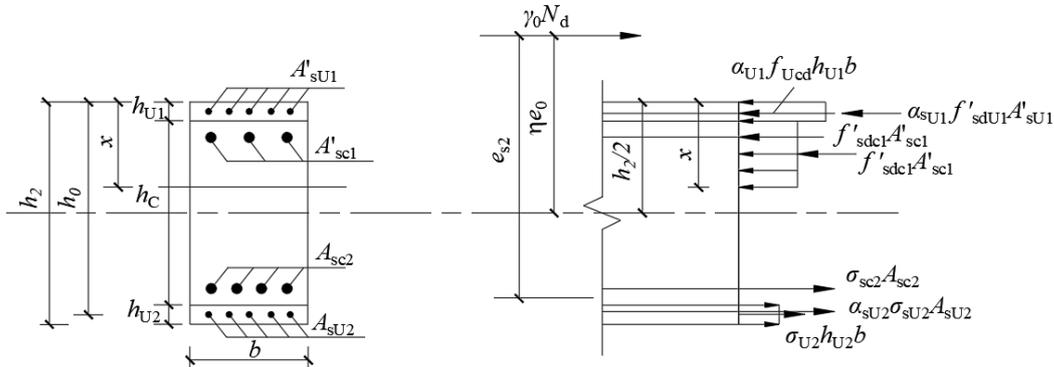


图32 矩形截面墩柱单向加固后小偏心正截面抗压承载力计算图示

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd1} b(x - h_{U1}) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} + f'_{sdc1} A'_{sc1} + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} - \sigma_{sc2} A_{sc2} - \alpha_{sU2} \sigma_{sU2} A_{sU2} - \sigma_{U2} h_{U2} b \quad (14)$$

$$\gamma_0 N_d e_{s2} \leq f_{cd1} b(x - h_{U1}) \left(h_0 - \frac{x + h_{U1}}{2} \right) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} \left(h_0 - \frac{h_{U1}}{2} \right) + f'_{sdc1} A'_{sc1} (h_0 - a'_{sc1}) + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} (h_0 - a'_{sU1}) + \sigma_{U2} h_{U2} b \left(a_{s2} - \frac{h_{U2}}{2} \right) \quad (15)$$

$$e_{s2} = \eta e_0 + \frac{h_2}{2} - a_{s2} \quad (16)$$

11.3.4.2 矩形截面墩柱单向加固后大偏心受压构件的计算图示如图 33 所示，正截面承载力应按照式 (17)～式 (18) 计算。

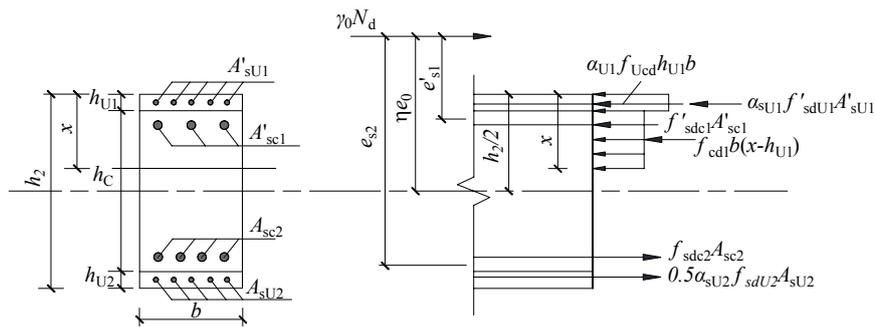


图33 矩形截面墩柱单向加固后大偏心正截面抗压承载力计算图示

$$\gamma_0 N_d \leq f_{cd1} b(x - h_{U1}) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} + f'_{sdc1} A'_{sc1} + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} - f'_{sdc2} A_{sc2} - 0.5 \alpha_{sU2} f'_{sdU2} A_{sU2} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e_{s2} \leq & f_{cd1} b(x - h_{U1}) \left(h_0 - \frac{x + h_{U1}}{2} \right) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} \left(h_0 - \frac{h_{U1}}{2} \right) \dots\dots\dots (18) \\ & + f'_{sdc1} A'_{sc1} (h_0 - a'_{sc1}) + 0.5 \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} (h_0 - a'_{sU1}) \end{aligned}$$

11.3.4.3 矩形截面墩柱双向加固后小偏心受压构件的计算图式如图 34 所示，正截面承载力应按照式 (19) ~ 式 (23) 计算。

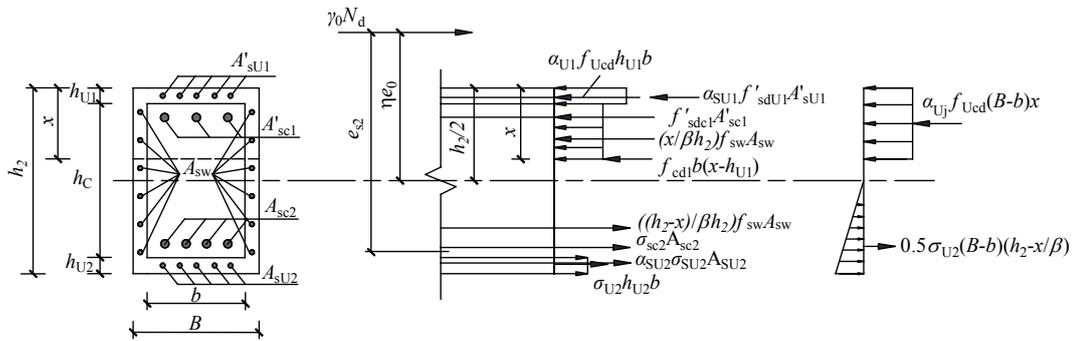


图34 矩形截面墩柱双向加固后小偏心正截面抗压承载力计算图式

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d \leq & f_{cd1} b(x - h_{U1}) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} + f'_{sdc1} A'_{sc1} + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} \\ & - \sigma_{sc2} A_{sc2} - \alpha_{sU2} \sigma_{sU2} A_{sU2} - \sigma_{U2} h_{U2} b + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b)x \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

$$- \frac{1}{2} \sigma_{U2} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta} \right) + N_{sw}$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e_{s2} \leq & f_{cd1} b(x - h_{U1}) \left(h_0 - \frac{x + h_{U1}}{2} \right) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} \left(h_0 - \frac{h_{U1}}{2} \right) \\ & + f'_{sdc1} A'_{sc1} (h_0 - a'_{sc1}) + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} (h_0 - a'_{sU1}) + \sigma_{U2} h_{U2} b \left(a_{s2} - \frac{h_{U2}}{2} \right) \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

$$+ \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b)x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) - \frac{1}{2} \sigma_{U2} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta} \right) \left(\frac{h_2 - x/\beta}{3} - \alpha_{s2} \right)$$

$$+ M_{sw}$$

$$N_{sw} = \frac{x}{\beta h_2} f_{sw} A_{sw} - \frac{h_2 - x}{\beta h_2} \sigma_{sw} A_{sw} \dots\dots\dots (21)$$

$$M_{sw} = \left(\frac{x}{\beta h_2} \right) f_{sw} A_{sw} (h_2 - a'_{sw} - a'_{sc1}) - \left(\frac{h_2 - x}{\beta h_2} \right) \sigma_{sw} A_{sw} (a_{sw} - a'_{sc1}) \dots\dots\dots (22)$$

$$e_{s2} = \eta e_0 + \frac{h_2}{2} - a_{s2} \dots\dots\dots (23)$$

11.3.4.4 矩形截面墩柱双向加固后大偏心受压构件的计算图式如图 35 所示，正截面承载力应按照式 (24) ~ 式 (26) 计算。

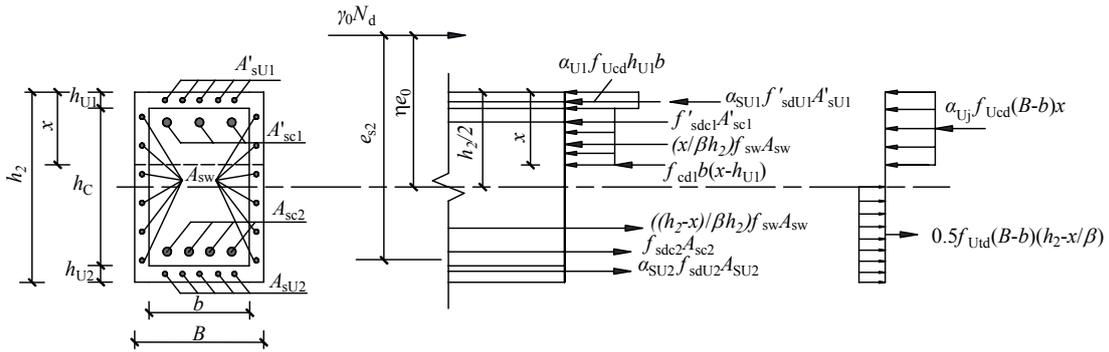


图35 矩形截面墩柱双向加固后大偏心正截面抗压承载力计算图示

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d \leq & f_{cd1} b(x - h_{U1}) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} + f'_{sdc1} A'_{sc1} + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} \\ & + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b)x - f_{sdc2} A_{sc2} - \alpha_{sU2} f_{sdU2} A_{sU2} - 0.5 f_{Utd} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta} \right) \dots \dots \dots (24) \\ & + N_{sw} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_u e_{s2} \leq & f_{cd1} b(x - h_{U1}) \left(h_0 - \frac{x + h_{U1}}{2} \right) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} \left(h_0 - \frac{h_{U1}}{2} \right) \\ & + f'_{sdc1} A'_{sc1} (h_0 - a'_{sc1}) + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} (h_0 - a'_{sU1}) + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b)x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \dots \dots \dots (25) \\ & - 0.5 f_{Utd} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta} \right) \left(\frac{h_2 - x/\beta}{2} - \alpha_{s2} \right) + M_{sw} \end{aligned}$$

$$M_{sw} = \left[\left(\frac{x}{\beta h_2} \right) (h_2 - a'_{sw} - a'_{sc1}) - \left(\frac{h_2 - x}{\beta h_2} \right) (a_{sw} - a'_{sc1}) \right] f_{sw} A_{sw} \dots \dots \dots (26)$$

11.3.5 沿周边均匀配筋的圆形截面墩柱采用 UHPFRC 进行加固后，计算图式如图 36 所示，正截面承载力应按照式 (27) ~ 式 (32) 计算。

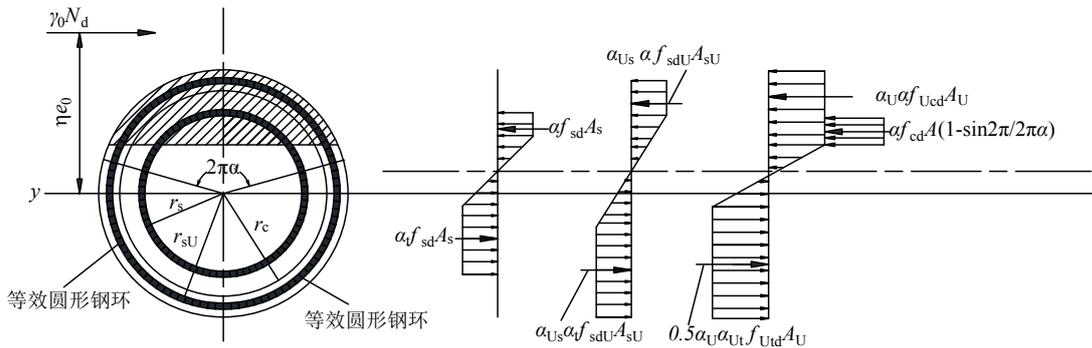


图36 圆形截面桥墩大小偏心正截面抗压承载力计算图示

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d \leq & \alpha f_{cd} A \left(1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha}\right) + (\alpha - \alpha_t) f_{sd} A_s \\ & + \alpha_U \alpha f_{Ucd} A_U - 0.5 \alpha_U \alpha_{Ut} f_{Utd} A_U \dots\dots\dots (27) \\ & + \alpha_{Us} (\alpha - \alpha_t) f_{sdU} A_{sU} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d \eta e_0 \leq & \frac{2}{3} f_{cd} A_r r_c \frac{\sin^3 \pi\alpha}{\pi} + f_{sd} A_s r_s \frac{\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t}{\pi} + \dots\dots\dots (28) \\ & \alpha_U f_{Ucd} A_U r_u \frac{\sin \pi\alpha}{\pi} + 0.5 \alpha_U f_{Utd} A_U r_u \frac{\sin \pi\alpha_{ut}}{\pi} \\ & + \alpha_{Us} f_{sdU} A_{sU} r_{sU} \frac{\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t}{\pi} \end{aligned}$$

$$\alpha_t = 1.25 - 2\alpha \geq 0 \dots\dots\dots (29)$$

$$\eta = 1 + \frac{1}{1300(e_0/h_0)} \left(\frac{l_0}{h_0}\right)^2 \zeta_1 \zeta_2 \dots\dots\dots (30)$$

$$\zeta_1 = 0.2 + 2.7 \frac{e_0}{h_0} \leq 1.0 \dots\dots\dots (31)$$

$$\zeta_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h_0} \leq 1.0 \dots\dots\dots (32)$$

11.4 系梁加固

系梁可采用UHPFRC进行单向加固或双向加固。加固构造示意如图37所示。

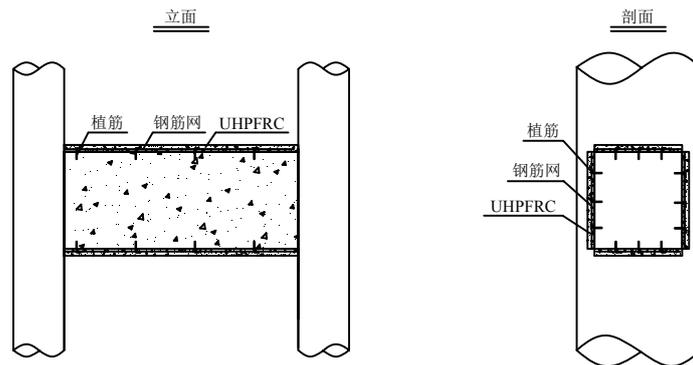


图37 UHPFRC组合加固系梁构造示意

11.5 承台加固

承台可采用UHPFRC在顶面、侧面进行加固。加固构造示意如图38所示。

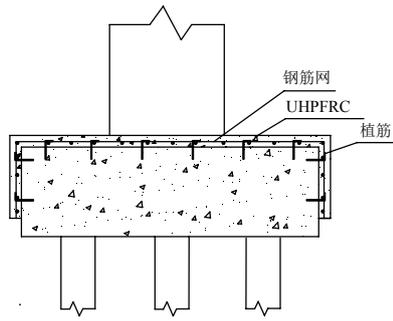


图38 UHPFRC 组合加固承台构造示意

11.6 构造要求

- 11.6.1 UHPFRC 组合层的厚度可取 50 mm~120 mm。
- 11.6.2 植筋间距应不大于 500 mm。
- 11.6.3 UHPFRC 内配置普通钢筋时，钢筋直径取 10 mm~20 mm。
- 11.6.4 钢板厚度可取 6 mm~10 mm。
- 11.6.5 其他构造要求应满足本文件 7.6 的规定。

12 加固施工

12.1 一般规定

- 12.1.1 UHPFRC 组合加固桥梁的施工应编制专项施工方案。
- 12.1.2 对拟加固结构的设计文件、技术评估报告等应进行现场复核。

12.2 加固施工工序

12.2.1 UHPFRC 组合加固主要施工工序如图 39 所示。

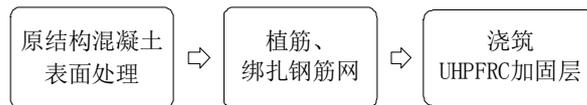


图39 UHPFRC 组合加固施工工序

12.2.2 预应力 UHPFRC 组合加固主要施工工序如图 40 所示。

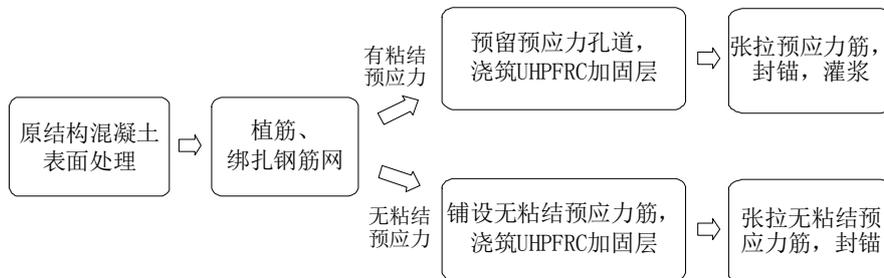


图40 预应力 UHPFRC 组合加固施工工序

12.2.3 钢板-UHPFRC 组合加固主要施工工序如图 41 所示。

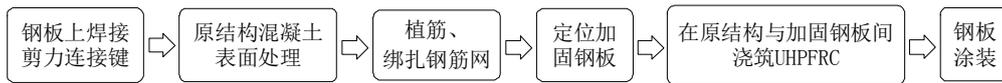


图41 钢板-UHPFRC 组合加固施工工序

12.2.4 钢板-预应力 UHPFRC 组合加固主要施工工序如图 42 所示。

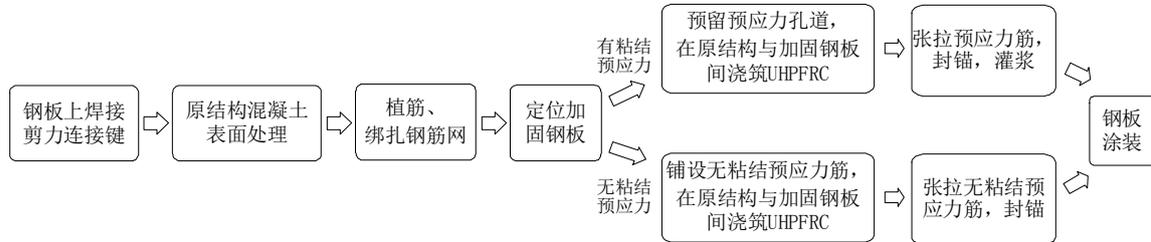


图42 钢板-预应力 UHPFRC 组合加固施工工序

12.3 施工要求

12.3.1 UHPFRC 制备

12.3.1.1 UHPFRC 在制备之前，需进行配合比实验，并将实验结果上报管理单位及监理，确认满足技术要求后方可进行 UHPFRC 的制备。

12.3.1.2 UHPFRC 的制备应符合下列要求：

- UHPFRC 宜采用干混料集中湿拌或现场加水拌和；
- 应采用具有计量系统的强制式搅拌设备拌和。搅拌机的电机功率应满足 UHPFRC 拌和能力；
- 搅拌前应确保搅拌设备清洁、干燥。搅拌第一盘拌合料前，应湿润搅拌机且不得留有明水；
- 钢纤维应均匀加入搅拌仓内，防止成团。持续搅拌至钢纤维均匀分布，停止搅拌；
- UHPFRC 有足够的流动性，扩展度为 550 mm~850 mm。

12.3.2 植筋

12.3.2.1 植筋前，应对原混凝土表面进行凿毛处理，原构件表面应凿毛成凹凸不小于 6 mm 的粗糙面。

12.3.2.2 在钻孔前应探明钢筋位置，并做标记，当钻孔与钢筋位置冲突时，应适当调整孔位。

12.3.2.3 植筋前应进行清孔。

12.3.2.4 植筋胶的各项性能应满足 GB 50367、JGJ 145 的规定，加固施工时植筋胶实际用量与预算用量应基本一致，单个孔内应使植筋胶均匀填充于钢筋或锚栓四周。

12.3.2.5 待植筋胶完全固化，形成强度后，将钢筋网与植筋邦扎就位。若使用植筋焊接定位钢筋网，则应注意焊点离胶面不小于 10 cm，且不能对一根植筋连续焊接。

12.3.3 栓钉焊接

12.3.3.1 不得使用无出厂合格证、无标志或未经进场检验的栓钉。

12.3.3.2 瓷环应按产品的规定烘干使用。

12.3.3.3 焊接作业区域的相对湿度不得大于 90%，严禁雨雪天气露天施工。

12.3.3.4 栓钉根部焊脚应均匀、全部熔合并 360°施焊。

12.3.3.5 每工班开始生产前或更改焊接条件时，应按规定的焊接工艺试焊 2 个圆柱头焊钉，进行外观和弯曲 30°角检验，检验合格后方可进行正式焊接。

12.3.4 钢板加工

12.3.4.1 钢板运输、吊装过程中应防止构件变形、碰撞或损坏漆面，严禁在工地安装具有变形的钢材，应按照规定程序进行安装。

12.3.4.2 连接接触面和焊缝边缘每边 30~50mm 范围内的铁锈、毛刺、污垢、冰雪等应清理干净，露出金属光泽。

12.3.4.3 钢板的焊接应满足 JTG/T 3650 的规定。

12.3.5 UHPFRC 浇筑

12.3.5.1 浇筑前，应对原结构与 UHPFRC 的结合面进行润湿处理。

12.3.5.2 UHPFRC 应沿模板或加固钢板内侧浇筑，浇筑宜连续且一次性完成。

12.3.5.3 浇筑 UHPFRC 时，不得使用振捣棒振捣。

12.3.5.4 浇筑完成后，应及时对 UHPFRC 外露面用薄膜覆盖进行保湿养生，但不得有积水。养生时间不应少于 7 天。

12.3.6 预应力张拉及锚固

12.3.6.1 有粘结预应力或无粘结预应力的张拉及锚固施工应满足 JTG/T 3650 的规定。

12.3.6.2 预应力筋的锚固装置应具有足够的强度，构造应符合本文件 7.6.5 的要求。

12.3.6.3 用于锚固预应力筋的钢锚板与梁体间可配合使用粘钢胶进行连接。粘钢胶的各项性能应满足 GB 50367 的规定。

12.3.7 钢板涂装

加固钢板涂装应满足 JTG/T 3650 的规定。

13 质量检验

13.1 一般规定

UHPFRC 组合加固的材料及施工质量要求应满足 JTG/T 3650、JTG F80-1、JTG 5220 的规定。

13.2 植筋

13.2.1 植筋检验的基本要求应满足 JTG 5220 的规定。

13.2.2 植筋实测项目如表 4 所示。

表4 植筋实测项目

序号	检查项目	规定值或允许偏差 (mm)	检查方法和频率
1	孔深 (mm)	+10, 0	尺量: 按植筋总数 10% 抽查, 且不少于 5 根
2	直径 (mm)	+3, 0	
3	间距 (mm)	±5	
4	垂直度 (°)	≤5	测角仪: 按植筋总数 10% 抽查, 且不少于 5 根
5	抗拔力 (kN)	在合格标准内	按植筋总数 3% 抽取, 并不少于 5 根

13.2.3 植筋表面无铁锈、裂痕以及油污。植筋胶应填充饱满，无孔隙。

13.3 栓钉焊接

13.3.1 栓钉焊接的基本要求应满足 JTG/T 3650 的规定。

13.3.2 栓钉焊接的实测项目如表 5 所示。

表5 栓钉焊接实测项目

序号	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	栓钉位置 (mm)	横向偏位	±3	尺量：按栓钉总数 10%抽查
		纵向偏位	±3	
2	外观	焊缝外形尺寸	满足 GB50205 规定	目测、尺量、焊缝量规：按栓钉总数 10%抽查
		焊缝缺陷	无气孔、夹渣、裂纹等缺陷	目测、放大镜：全部检查
		焊缝咬边 (mm)	咬边深度≤0.5 mm, 且最大长度不得大于 1 倍栓钉直径	尺量、焊缝量规：按栓钉总数 10%抽查
		栓钉焊后高度 (mm)	±2	尺量：按栓钉总数 10%抽查
		栓钉焊后倾斜角度 (°)	±5	尺量、量角器：按栓钉总数 3%抽查
3	焊缝完整性	弯曲试验	沿原轴线弯曲 30°焊接部位无裂纹	锤击：按栓钉总数 1%抽查，且不少于 5 根。

13.3.3 栓钉焊缝均应平滑，无裂纹、未溶合、夹渣、未填满弧坑、焊瘤等外观缺陷。

13.4 钢板加工

13.4.1 钢板加工的基本要求应满足 JTG/T 3650 的规定。

13.4.2 钢板加工的实测项目如表 6 所示。

表6 钢板加工实测项目

序号	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	长度(mm)		±5	尺量：全部钢板
2	高度(mm)		±2	尺量：全部钢板
3	宽度(mm)		±3	尺量：全部钢板
4	连接	焊缝尺寸	符合设计要求	量规：检查全部
		焊缝探伤		超声：检查全部
				射线：按设计规定，设计无规定时按 10%抽查

13.4.3 钢板加工外观要求如下：

- 钢板外表面不得有凹陷、划痕、焊疤、电弧擦伤等缺陷，外露边缘应无毛刺；
- 焊缝均应平滑，无裂纹、未溶合、夹渣、未填满弧坑、焊瘤等外观缺陷，预焊件的装焊符合设计要求；
- 钢板线形平顺，无明显折变。

13.5 UHPFRC 施工

13.5.1 UHPFRC 施工的基本要求应满足 GB/T 41054 的规定。

13.5.2 UHPFRC 浇筑和 UHPFRC 层施工质量检验的实测项目如表 7 和表 8 所示。其他桥面指标及最终验收标准应满足 JTG F80/1 的规定。

表7 UHPFRC 浇筑实测项目

序号	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	UHPFRC 强度 (MPa)	在合格标准范围内	满足GB/T 41054的规定
2	断面尺寸 (mm)	+5, 0	丈量: 每构件检查 3 个断面

表8 UHPFRC 层实测项目

序号	项目	规定值或允许偏差值	检查方法和频率
1	厚度 (mm)	+10, -5	丈量: 以同桥面板产生相同挠度变形的点为基准点, 测量桥面铺装施工前后相对高差; 长度不大于 100 m 每车道测 3 处, 每增加 100 m 每车道增加 2 处
2	平整度	σ (mm)	≤ 1.32
		IRI(m/km)	≤ 2.2
		最大间隙 h(mm)	≤ 3
3	抗滑构造深度(mm)	± 1	铺砂法: 长度不大于 200 m 时测 5 处, 每增加 100 m 增加 1 处
注: 表中为平整度仪测定的标准差; IRI 为国际平整度指数; h 为 3m 直尺与面层的最大间隙。			

13.5.3 UHPFRC 外观要求如下:

- a) UHPFRC 表面平整, 均匀完好、色泽一致, 无蜂窝麻面、龟裂和收缩裂缝;
- b) 不同浇筑期接缝等位置应衔接良好, 无脱空、台阶现象。

13.6 钢板涂装

13.6.1 钢板涂装的基本要求应满足 JTG F80/1 的规定。

13.6.2 钢板涂装实测项目如表 9 所示。

表9 钢板防护涂装实测项目

序号	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	除锈清洁度		符合设计要求；设计未要求时，热喷锌或铝 Sa3.0，无机富锌底漆及其他 Sa2.5 (St3)	比照板目测：100 %
2	粗糙度(μm)	外表面	70~100	按设计要求检查；设计未要求时，用粗糙度仪检查，每段检查6点，取平均值
3	总干膜厚度(μm)		符合设计要求	按设计要求检查；设计未要求时，用漆膜测厚仪检查：抽查20%，每10 m ² 测10点，且不少于10点
4	附着力(MPa)		符合设计要求	划格或拉力试验：按设计要求频率检查；设计未要求时，抽查5%

13.6.3 钢板涂层表面完整光洁，均匀一致，无破损、气泡、裂纹、针孔、凹陷、麻点、流挂和皱皮等缺陷，涂后的漆膜颜色一致。