

DB61

陕 西 省 地 方 标 准

DB 61/T XXXXX—XXXX

超高性能混凝土中小跨径装配式梁桥设计与施工技术规范

Technical Specification for Design and Construction of Ultra-High Performance
Concrete Small and Medium Span Prefabricated Girder Bridges

(征求意见稿)

陕西省市场监督管理局 发 布

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

目 次

前 言 1

1 范围 2

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 4

4 符号和缩略语 5

5 材料 8

6 上部结构设计 11

7 下部结构设计 23

8 预制场作业 28

9 现场作业 32

10 质量检验 35

附录 A 超高性能混凝土轴拉性能试验方法 39

附录 B 混凝土涂装材料 42

附录 C 下部结构预制构件连接构造细节 44

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由陕西省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：陕西凯达交通集团有限公司、陕西省交通规划设计研究院有限公司、陕西交控科技发展集团股份有限公司。

本文件主要起草人：李春轩、姚 军、魏家乐、吕剑锋、毕伟涛、郝继锋、杨继承、周波、山颖获、刘 青、贺润斌、刘泽宇、武 萌、宁伟伟、祁 峰、杨 凯、赵 昕、傅 震、杨欣、刘 琳、安永强、吕玉缀、王晨阳、王 旭

本文件首次发布。

本文件由陕西凯达交通集团有限公司负责解释。

联系信息：

单位：陕西凯达交通集团有限公司

电话：15002286369

地址：陕西省西安市高新区科技二路65号清华科技园A座510室

邮编：710075

超高性能混凝土中小跨径装配式梁桥设计与施工技术规范

1 范围

为规范超高性能混凝土中小跨径装配式组合梁桥设计与施工，统一质量检验标准，按照技术先进、安全可靠、耐久适用、经济合理的原则，制定本标准。

本标准适用于公路与市政超高性能混凝土中小跨径装配式组合梁桥上部结构与下部结构的设计、施工及质量检验。

超高性能混凝土中小跨径装配式组合梁桥的设计、施工、检验与验收除应符合本标准的规定外，尚应符合国家、行业及陕西省现行有关标准的规定。

2 规范性引用文件

GB 175	通用硅酸盐水泥
GB/T 700-2006	碳素结构钢
GB/T 714-2015	桥梁用结构钢
GB/T 1499.1-2017	钢筋混凝土用钢第 1 部分热轧光圆钢筋
GB/T 1499.2-2018	钢筋混凝土用钢第 2 部分热轧带肋钢筋
GB/T 1591-2018	低合金高强度结构钢
GB/T 5224-2023	预应力混凝土用钢绞线
GB 8076	混凝土外加剂
GB/T 8077	混凝土外加剂匀质性试验方法
GB/T 10171	建筑施工机械与设备混凝土搅拌站（楼）
GB/T 31387	活性粉末混凝土
GB/T50010-2010（2024 版）	混凝土结构设计标准
GB/T 50080	普通混凝土拌合物性能试验方法标准
GB/T 50081	混凝土物理力学性能试验方法标准
GB/T 50082	混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
GB 50119	混凝土外加剂应用技术规范
GB 50164	混凝土质量控制标准
GB 50204	混凝土结构工程施工质量验收规范
GB/T 50476	混凝土结构耐久性设计标准
HG/T 5176-2017	钢结构水性防腐涂料
JG/T 565	工厂预制混凝土构件质量管理标准
JGJ/T 10	混凝土泵送施工技术规程
JGJ 63	混凝土用水标准
JT/T 695	混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件
JT/T 722-2023	公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
JTG/T 2231-01-2020	公路桥梁抗震设计规范
JTG 3362-2018	公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG 3420	公路工程水泥及水泥混凝土试验规程
JTG/T 3650	公路桥涵施工技术规范
JTG/T 3654	公路装配式混凝土桥梁施工技术规范
JTG D60	公路桥涵设计通用规范
DBJ/T 15-244-2022	装配式超高性能混凝土市政桥梁结构技术规程
T/CCES 27-2021	超高性能混凝土梁式桥技术规程
T/CECS 728-2020	装配式城市桥梁工程技术规程

3 术语和定义

3.1

高性能混凝土

以建设工程设计、施工和使用对混凝土性能特定要求为总体目标,选用优质常规原材料,合理掺加外加剂和矿物掺合料,采用较低水胶比并优化配合比,通过预拌和绿色生产方式以及严格的施工措施,制成具有优异的拌合物性能、力学性能、耐久性能和长期性能的混凝土。

3.2

超高性能混凝土

由水泥、超高性能混凝土剂、集料、钢纤维和外加剂等材料或由上述材料制成的干混料加水拌和,经凝结硬化后形成的一种具有超高强度、超高韧性和超高耐久性的水泥基复合材料,简称UHPC。

3.3

超高性能混凝土剂

由膨胀组分、矿物掺合料以及其他微纳米功能性材料等混合而成,可与工程所在地的地材试配,配置出满足工程使用要求的超高性能混凝土,具有良好的地材适应性。

3.4

工形组合梁

由预制工形梁与现浇钢筋混凝土桥面板组合而成,共同受力的梁。

3.5

湿连接

混凝土构件的预制节段之间采用现浇混凝土连接的节点。

3.6

干连接

混凝土构件的预制节段之间只采用焊接或机械连接的节点。

4 符号和缩略语

4.1 材料性能相关符号

- $f_{cu,k}$ —— 超高性能混凝土的立方体抗压强度标准值；
- f_{cd} —— 超高性能混凝土轴心抗压强度设计值；
- f_{ck} —— 超高性能混凝土轴心抗压强度标准值；
- $[f_{fd}^f]$ —— 钢筋超高性能混凝土疲劳名义弯拉应力容许值；
- f_{fk} —— 超高性能混凝土抗折强度标准值；
- f_{pd} 、 f'_{pd} —— 纵向预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值；
- $f_{pd,i}$ 、 $f'_{pd,i}$ —— 纵向体内预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值；
- f_{sd} 、 f'_{sd} —— 纵向普通钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值；
- f_{sk} —— 箍筋抗拉强度标准值；
- f_{sv} —— 箍筋抗拉强度设计值；
- f_{td} —— 超高性能混凝土轴心抗拉强度设计值。

4.2 作用和作用效应相关符号

- M_u —— 构件正截面抗弯承载力；
- M_{y0} —— 墩底截面初始屈服弯矩；
- V_c —— 构件斜截面上超高性能混凝土基体受剪承载力设计值；
- V_{c0} —— 墩底剪力设计值；
- V_{c0s} —— 下部预制构件连接节点位置实心截面的剪力设计值。
- V_d —— 基本组合剪力设计值；
- V_f —— 构件斜截面上纤维受剪承载力设计值；
- V_{1Gd} —— 第一阶段预制构件和现浇混凝土层自重产生的剪力设计值；
- V_{2Gd} —— 第二阶段桥面系自重产生的剪力设计值；
- V_{2Qd} —— 第二阶段可变作用组合产生的剪力设计值；
- V_p —— 构件斜截面上预应力弯起钢筋受剪承载力设计值；
- V_s —— 构件斜截面上抗剪钢筋受剪承载力设计值；
- V_u —— 斜截面抗剪承载力；
- $\sigma_{ct,max}^f$ —— 疲劳验算时混凝土截面受拉区边缘纤维的超高性能混凝土拉应力；

- σ_f —— 纤维增强截面的残余抗拉强度；
- σ_{kc} —— 由作用标准值产生的超高性能混凝土法向压应力；
- σ_p —— 由作用标准值产生的纵向预应力钢筋应力；
- σ_{pe} —— 放张时预应力的有效预应力值；
- $\sigma'_{p,i0}$ —— 截面受压区纵向预应力钢筋合力点处超高性能混凝土法向应力等于零时预应力钢筋的应力；
- $\sigma'_{p,i0i}$ —— 第 i 层纵向预应力钢筋截面重心处混凝土法向应力等于零时，预应力钢筋中的应力；
- σ_{pt} —— 由预加力产生的超高性能混凝土法向拉应力；
- σ_{si} 、 σ_{pi} —— 第 i 层纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力。

4.3 几何参数有关符号

- a —— 构件受拉区普通钢筋和预应力钢筋合力点至受拉区边缘的距离；
- a' —— 构件受压区普通钢筋和预应力钢筋合力点至受压区边缘的距离；
- A_{fv} —— 纤维作用面积；
- $A_{p,i}$ —— 斜截面内弯起体内预应力钢筋的截面面积；
- $A_{p,i}$ 、 $A'_{p,i}$ —— 受拉区、受压区纵向体内预应力钢筋的截面面积；
- a_s 、 $a_{p,i}$ —— 受拉区普通钢筋合力点、体内预应力钢筋合力点至受拉区边缘的距离；
- a'_s 、 $a'_{p,i}$ —— 受压区普通钢筋合力点、体内预应力钢筋合力点至受压区边缘的距离；
- A_s 、 A'_s —— 受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；
- A_{sv} —— 同一截面内箍筋的总截面面积；
- b'_f —— 工形组合梁截面受压区的翼缘宽度；
- H —— 悬臂墩的高度或塑性铰截面到反弯点的距离；
- H_2 —— 墩柱随桩基预制部分高度；
- h_0 —— 截面有效高度；
- h'_f —— 工形组合梁截面受压翼缘厚度；
- L_p —— 等效塑性铰长度；
- L_{p1} —— 根据纵向钢筋确定的等效塑性铰长度；
- L_{p2} —— 根据截面尺寸确定的等效塑性铰长度；

s_v ——沿构件长度方向的箍筋间距；
 x ——受压区等效矩形应力图的高度；
 x_t ——受拉区等效矩形应力图的高度。

4.4 计算参数及其他相关符号

k ——基体抗剪承载能力折减系数；
 C_f ——圆形截面抗推刚度；
 α ——剪力增大系数；
 α_1 ——异号弯矩影响系数；
 γ_0 ——桥梁结构重要性系数；
 φ_p ——等效塑性铰长度折减系数；
 φ_v ——接缝抗剪承载力折减系数；
 φ_y ——截面等效屈服曲率。

5 材料

5.1 超高性能混凝土

5.1.1 原材料

5.1.1.1 水泥宜采用《通用硅酸盐水泥》GB 175 要求的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，强度等级不低于 42.5。当采用其他种类的水泥时，应通过试验验证，满足超高性能混凝土设计性能要求时方可使用。

5.1.1.2 超高性能混凝土剂匀质性指标应满足表 5.1.1 的要求。

表 5.1.1 超高性能混凝土剂匀质性指标

试验项目	性能指标
含水率/%	≤ 3.0
细度/%	≤ 8.0
氯离子含量/%	≤ 0.06

5.1.1.3 超高性能混凝土所用骨料宜为石英砂和石英粉，石英砂和石英粉的性能应符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定。

5.1.1.4 外加剂宜选用高性能减水剂，其性能应符合《混凝土外加剂》GB 8076 和《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119 的规定，且应通过试验验证，满足超高性能混凝土设计性能要求时方可使用。减水率不应低于 32%，且需与胶凝材料体系相容性良好。外加剂的掺量应根据超高性能混凝土剂、当地地材、水胶比及施工环境通过试验确定。

5.1.1.5 超高性能混凝土用钢纤维应符合 GB/T 31387 的规定。

5.1.1.6 拌合用水应符合《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

5.1.2 工作性能

5.1.2.1 超高性能混凝土工作性能应采用坍落扩展度（USF）表征，试验方法应符合《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的规定。

5.1.2.2 超高性能混凝土的扩展度分级应符合表 5.1.2 规定。

表 5.1.2 超高性能混凝土扩展度分级

分类	USF1	USF2
扩展度（mm）	$S < 700$	$S \geq 700$

5.1.3 力学性能

5.1.3.1 超高性能混凝土抗压强度性能等级见表 5.1.3-1。

表 5.1.3-1 超高性能混凝土抗压强度性能指标

等级	立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ (MPa)	轴心抗压强度标准值 f_{ck} (MPa)	轴心抗压强度设计值 f_{cd} (MPa)
UC100	100	70	48
UC120	120	84	58
UC140	140	98	68
UC160	160	112	77
UC180	180	126	87

5.1.3.2 超高性能混凝土抗拉强度性能分为 UT6、UT7、UT8、UT9，每一级根据拉伸试验过程中出现应变硬化的程度，分为应变软化型（代号为 R）、应变稳定型（代号为 W）、应变高强型（代号为 G），试验及判定方法见附录 A。具体指标见表 5.1.3-2。

表 5.1.3-2 超高性能混凝土抗拉性能指标

混凝土等级	抗拉强度标准值 f_{tk} (MPa)	轴心抗拉强度设计值 f_{td} (MPa)	极限抗拉强度标准值 f_{tu} (MPa)	极限拉应变 ε_{tu} ($\mu\epsilon$)
UT6R	6	4.2/K	4.2	1000
UT6W			6	1500
UT6G			6.6	1500

UT7R	7	5.6/K	4.9	1000
UT7W			7	1500
UT7G			7.7	1500
UT8R	8	6.4/K	5.6	1000
UT8W			8	1500
UT8G			8.8	1500
UT9R	9	7.2/K	6.3	1500
UT9W			9	2000
UT9G			10.8	2000

备注：K 为整体纤维取向系数，整体取向系数为 1.25，局部纤维取向系数为 1.75。

5.1.3.3 超高性能混凝土的抗折强度等级应根据 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 棱柱体试件弯拉强度标准值确定，强度等级可划分为 UF12、UF14、UF18、UF22、UF24。具体指标见表 5.1.3-3。

表 5.1.3-3 超高性能混凝土抗折强度性能指标

等级	抗折强度标准值 f_{tk} (MPa)
UF12	12
UF14	14
UF18	18
UF22	22
UF24	24

注：当对超高性能混凝土的韧性或延性有特殊要求时，等级可由抗折强度决定，但抗压强度不应低于的 100MPa。

5.1.3.4 超高性能混凝土弹性模量性能 E_c 指标见表 5.1.3-4。

表 5.1.3-4 超高性能混凝土弹性模量

强度等级	弹性模量 E_c ($\times 10^3\text{MPa}$)
UC100	39.0
UC120	41.9
UC140	44.3
UC160	46.2
UC180	47.9

注：1.弹性模量测试按照 GB/T 50081 进行；

2.无试验数据时，弹性模量 E_c 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的关系可按 $105/(1.5+106.1/f_{cu,k})$ (MPa) 计算。

5.1.3.5 超高性能混凝土泊松比 μ_c 可取 0.2，线膨胀系数 α_c 可取 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

5.1.3.6 超高性能混凝土的收缩应变、徐变系数取值依据表 5.1.3-5 进行。

表 5.1.3-5 超高性能混凝土的收缩应变和徐变系数

养护条件	收缩应变 ($\mu\epsilon$)	徐变系数
蒸汽养护	0	0.2
自然养护	700	0.8

5.1.3.7 超高性能混凝土的剪切变形模量 G_c 取 5.1.3.4 条 E_c 值的 0.4 倍。

5.1.3.8 钢筋超高性能混凝土结构容重取值不宜小于 26kN/m^3 。

5.1.4 耐久性

5.1.4.1 超高性能混凝土耐久性能采用抗氯离子渗透性能 (UD) 表征，抗氯离子渗透性能应按表 5.1.4 进行分级。

表 5.1.4 超高性能混凝土抗氯离子渗透性能分级

等级	UD1	UD2
$D_{RCM} (\times 10^{-13}\text{m}^2/\text{s})$	$2.0 < D_{RCM} \leq 5.0$	$D_{RCM} \leq 2.0$

5.1.5 配合比设计

5.1.5.1 超高性能混凝土配合比设计应符合 GB/T 31387 的规定。

5.1.5.2 超高性能混凝土配合比可采用绝对体积法，并基于最紧密堆积方法进行设计。

5.1.5.3 超高性能混凝土的水胶比应小于 0.22，水泥用量不宜小于胶凝材料用量的 50%，钢纤维体积率应不小于 1.5%。

5.1.5.4 当工程采用超高性能混凝土剂时，应使用厂家的推荐掺量，与工程所用水泥、骨料、外加剂、水等当地地材进行适配试验，并通过强度验证，结果满足工程设计使用要求后方可使用。

5.1.6 试验要求

5.1.6.1 超高性能混凝土的搅拌及试件成型宜按《活性粉末混凝土》GB/T 31387 进行，自然养护应按《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 进行，蒸汽养护应按《活性粉末混凝土》GB/T 31387 要求进行。

5.1.6.2 超高性能混凝土的扩展度、扩展度经时损失、扩展时间试验应符合《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的规定。

5.1.6.3 超高性能混凝土的抗压强度试验、弯拉强度试验、弹性模量、泊松比、线膨胀系数试验应符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387 规定。

5.1.6.4 超高性能混凝土的抗拉强度试验按照本规范附录 A 进行。

5.1.6.5 超高性能混凝土抗氯离子渗透性能试验按照《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 规定的快速氯离子迁移系数法（RCM 法）进行。

5.2 高性能混凝土

5.2.1 原材料

高性能混凝土原材料应符合表 5.2.1 的规定。

表 5.2.1 高性能混凝土原材料

序号	原材料	执行标准
1	水泥	GB 175
2	粉煤灰	GB/T 1596
3	矿粉	GB/T 18046
4	硅灰	GB/T 27690
5	砂	GB/T 14684
6	碎石	GB/T 14685
7	外加剂	GB 8076、GB50119
8	拌和用水	JGJ 63

5.2.2 强度等级

高性能混凝土强度等级按立方体抗压强度等级划分为：C60、C65、C70、C75、C80、C85、C90、C95、C100。

5.2.3 性能要求

高性能混凝土工作性能、力学性能、耐久性应满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362、《高性能混凝土技术条件》GB/T 41054 的规定。

5.3 钢材

5.3.1 带肋钢筋的技术标准应符合《钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB-T1499.2 的规定，光圆钢筋应符合《钢筋混凝土用钢 第 1 部分：热轧光圆钢筋》GB/T 1499.1 的要求。

5.3.2 钢绞线相关力学性能应符合《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 中的要求。

5.3.3 其他钢材

其他钢材性能应符合《低合金高强度结构钢》GB/T1591-2018、《桥梁用结构钢》GB/T 714-2015、《碳素结构钢》GB/T 700-2006 的要求。

5.4 接缝材料

湿接缝用超高性能混凝土性能应符合《超高性能混凝土梁式桥技术规程》T/CCES 27 中的要求。

6 上部结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 工形组合梁预制部分宜采用超高性能混凝土，强度等级不低于 UC100，UT6。

6.1.2 本规范第 6 章相关规定适用于工形组合梁，T 形组合梁、矩形组合梁、箱型组合梁计算参照执行。

6.1.3 工形组合梁宜采用先张法超高性能混凝土简支结构，跨径布置宜根据工程实际采用 20m、25m、30m、35m、40m。

6.1.4 工形组合梁截面形式为先张法超高性能混凝土简支梁与现浇钢筋混凝土铺装层通过抗剪钢筋相连，主梁之间横向设置超高性能混凝土搭板，搭板充当铺装层混凝土浇筑模板，不参与结构受力。

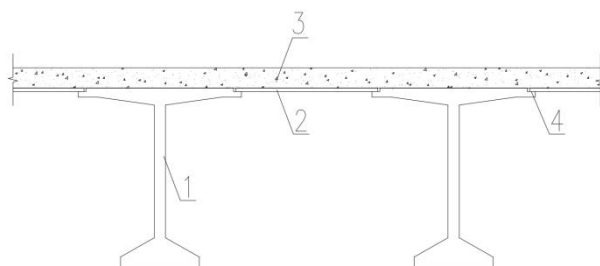


图 6.1.4 工形组合梁截面

1.先张法超高性能混凝土梁 2.超高性能混凝土搭板 3.现浇钢筋混凝土铺装层

4.超高性能混凝土搭板预留槽

6.1.5 工形组合梁应设置横隔板，增强结构横向刚度及稳定性。横隔板宜采用超高性能混凝土，厚度不小于 80mm。

6.1.6 先张法超高性能混凝土工形组合梁桥主梁应进行承载能力极限状态及正常使用极限状态设计。

6.1.7 先张法超高性能混凝土工形组合梁宜按 A 类构件设计。

6.1.8 工形组合梁的作用效应按下列两个阶段进行计算：

第一阶段：现浇混凝土层达到强度标准值前，作用应考虑预制构件自重、现浇混凝土层自重及施工时附加的其他作用。

第二阶段：现浇混凝土层达到强度标准值后，工形组合梁按整体计算，作用应计算组合构件自重、桥面系自重及使用阶段可变作用。

6.1.9 工形梁与现浇钢筋混凝土铺装层结合面应进行抗剪验算，并采取有效措施保证新老混凝土有效结合并共同受力。

6.1.10 超高性能混凝土搭板厚度应根据施工阶段搭板承载能力计算确定。

6.1.11 超高性能混凝土搭板应计算施工阶段刚度，在现浇层混凝土自重（计湿重）作用下，搭板挠度不应大于 $L/400$ （其中 L 为搭板的计算跨径）。

6.1.12 现浇钢筋混凝土桥面板的计算，应明确板的受力方向，按简支板、整体单向板、悬臂板计算。

6.1.13 现浇钢筋混凝土桥面板的计算应符合现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定。

6.1.14 本规范未明确规定的结构设计事宜应符合现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定。

6.2 工形组合梁承载能力极限状态设计

6.2.1 一般规定

6.2.1.1 工形组合梁桥宜采用空间杆系模型分析结构刚度分配及受力。

6.2.1.2 对于配筋装配式超高性能混凝土构件的持久状况设计应按照承载能力极限状态的要求，对构件进行承载能力及稳定计算，必要时应对结构进行倾覆和滑移的验算。承载能力极限状态验算的作用效应（其中汽车荷载应计入冲击系数）应采用其基本组合设计值，构件承载力设计值采用材料强度设计值计算。

6.2.1.3 构件正截面的承载力计算采用下列基本假定：

- a) 截面应满足平截面假定，即截面纤维应变与到中性轴的距离成线性关系。
- b) 超高性能混凝土受压的应力-应变关系、受拉的应力-应变关系按本规范第5章规定确定。
- c) 纵向受力钢筋的应力取钢筋应变与其弹性模量的乘积，但其值应符合下列要求。

$$f'_{sd} \leq \sigma_{si} \leq f_{sd} \quad (6.2.1-1)$$

$$\sigma'_{p,ioi} - f'_{pd} \leq \sigma_{pi} \leq f_{pd} \quad (6.2.1-2)$$

式中： σ_{si} 、 σ_{pi} —— 第 i 层纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力，负值表示压应力（ N/mm^2 ）；

f_{sd} 、 f'_{sd} —— 纵向普通钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值，应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 规定取值（ N/mm^2 ）；

f_{pd} 、 f'_{pd} —— 纵向预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值，应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 规定取值（ N/mm^2 ）；

$\sigma'_{p,ioi}$ —— 第 i 层纵向预应力钢筋截面重心处混凝土法向应力等于零时，预应力钢筋中的应力，应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 规定取值（ N/mm^2 ）。

d) 纵向受拉钢筋的极限拉应变取为 0.01。

6.2.1.4 受弯构件正截面受压区超高性能混凝土压应力计算应符合下列规定：

- a) 正截面受压区超高性能混凝土的应力图可简化为等效的矩形应力图。
- b) 矩形应力图高度与实际受压区高度的比值 β 应按表 6.2.1-1 规定取值。
- c) 矩形应力图的抗压强度应取超高性能混凝土的轴心抗压强度设计值 f_{cd} 。

表 6.2.1-1 系数 β 值

超高性能混凝土强度	UC100	UC120	UC140	UC160	UC180
β	0.78	0.76	0.73	0.71	0.70

6.2.1.5 受弯构件正截面受拉区超高性能混凝土拉应力计算应符合下列规定：

- a) 正截面受拉区超高性能混凝土的应力图可简化为等效的矩形应力图。
- b) 受拉区等效矩形应力图高度 x_t 可按下列公式计算：

$$x_t = h - x / \beta \quad (6.2.1-3)$$

式中： h —— 截面高度（mm）；

x —— 受压区等效矩形应力图的高度（mm）；

β —— 受弯构件受压区矩形应力图高度与实际受压区高度的比值，应按本标准表 6.2.1-2 规定取值。

- c) 受拉区等效矩形应力图的抗拉强度可取 0.5 倍抗拉强度设计值 f_{td} 。

6.2.2 工形组合梁正截面抗弯承载力计算

6.2.2.1 第一阶段正截面抗弯承载力计算

a) 翼缘位于受压区的工形截面超高性能混凝土受弯构件，其正截面抗弯承载力应按下列规定进行计算：

1) 当符合下列条件时：

$$\begin{aligned} & f_{sd}A_s + f_{pd,i}A_{p,i} + 0.5f_{td}b(h-h'_f/\beta) + 0.5f_{td}h_f(b_f-b) \\ & \leq f_{cd}b'_fh'_f + f'_{sd}A'_s + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i} \end{aligned} \quad (6.2.2-1)$$

式中： A_s 、 A'_s —— 受拉区、受压纵向普通钢筋的截面面积 (mm^2)；

f_{cd} —— 超高性能混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm^2)；

$f_{pd,i}$ 、 $f'_{pd,i}$ —— 纵向体内预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值；

$A_{p,i}$ 、 $A'_{p,i}$ —— 受拉区、受压区纵向体内预应力钢筋的截面面积 (mm^2)；

f_{td} —— 超高性能混凝土轴心抗拉强度设计值 (N/mm^2)；

h'_f 、 b'_f —— 工形组合梁截面受压翼缘厚度和宽度 (mm)；

h_f 、 b_f —— 工形组合梁截面受拉区翼缘厚度和宽度 (mm)；

$\sigma'_{p,i0}$ —— 截面受压区纵向预应力钢筋合力点处超高性能混凝土法向应力等于零时预应力钢筋的应力。

受压区应取宽度为 b'_f 的矩形截面 (图 6.2.2-1a)，同时应考虑受拉区腹板超高性能混凝土的抗拉作用，其正截面抗弯承载力应按下列规定计算：

$$\begin{aligned} M_u &= f_{cd}b'_fx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s) + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i} \\ &\quad A'_{p,i}(h_0 - a'_{p,i}) - 0.5f_{td}bx_t\left(\frac{x_t}{2} - a\right) - 0.5f_{td}h_f(b_f - b)(h_f - a) \end{aligned} \quad (6.2.2-2)$$

式中： M_u —— 构件正截面抗弯承载力 ($\text{N}\cdot\text{m}$)；

h_0 —— 截面有效高度 (mm)；

a'_s 、 $a'_{p,i}$ —— 受压区普通钢筋、体内预应力钢筋至受压区边缘的距离 (mm)；

a —— 受拉区普通钢筋和预应力钢筋合力点至截面近边的距离 (mm)。

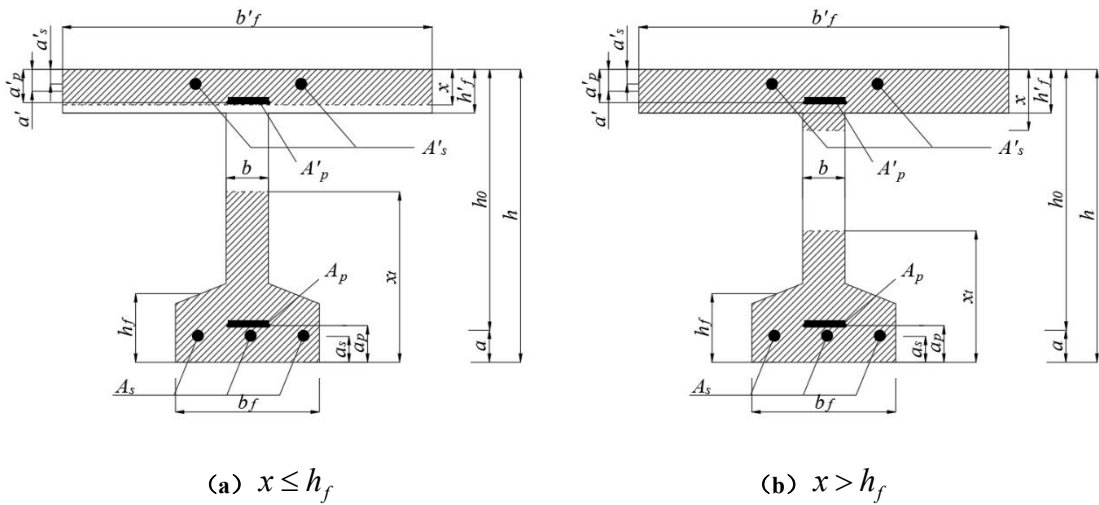


图 6.2.2-1 工形截面超高性能混凝土受弯构件正截面承载力计算

2) 当不符合式 (6.2.2-1) 的条件时，计算中应考虑截面腹板受压的作用，其正截面抗弯承载力应按下列规定计算 (图 6.2.2-1b)：

$$\begin{aligned}
M_u = & f_{cd} \left[bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \right] \\
& + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0}) A'_{p,i} (h_0 - a'_{p,i}) \\
& - 0.5 f_{td} b x_t \left(\frac{x_t}{2} - a \right) - 0.5 f_{td} h_f (b_f - b) (h_f - a)
\end{aligned} \quad (6.2.2-3)$$

此时，受压区高度 x 应按下列公式计算，并应符合本规范式（6.2.2-5）、式（6.2.2-6）、式（6.2.2-7）的要求。

$$\begin{aligned}
& f_{sd} A_s + f_{pd,i} A_{p,i} + 0.5 f_{td} b x_t + 0.5 f_{td} h_f (b_f - b) \\
& = f_{cd} \left[bx + (b'_f - b) h'_f \right] + f'_{sd} A'_s + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0}) A'_{p,i}
\end{aligned} \quad (6.2.2-4)$$

式中： h'_f —— 工形截面受压翼缘厚度（mm）；

b'_f —— 工形截面受压翼缘有效宽度，应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTC 3362 相关规定取值（mm）。

截面受压区高度应符合下列要求：

$$x \leq \zeta_b h_0 \quad (6.2.2-5)$$

当截面受压区配有纵向普通钢筋和预应力钢筋，且预应力筋受压时

$$x \geq 2a' \quad (6.2.2-6)$$

当截面受压区配有纵向普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受压时

$$x \geq 2a'_s \quad (6.2.2-7)$$

b) 当计算中考虑受压区纵向钢筋但不符合本规范式（6.2.2-4）、（6.2.2-5）的条件时，主梁正截面抗弯承载力的计算应符合下列规定：

1) 当受压区配有纵向普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受压时

$$\begin{aligned}
M_u = & f_{pd,i} A_{p,i} (h - a_{p,i} - a') + f_{sd} A_s (h - a_s - a') \\
& + 0.5 f_{td} b x_t (h - x_t / 2 - a') + \dots
\end{aligned} \quad (6.2.2-8)$$

式中 a_s 、 $a_{p,i}$ —— 构件受拉区普通钢筋合力点、体内预应力钢筋合力点至受拉区边缘的距离；

2) 当受压区仅配有纵向普通钢筋或配有普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受拉时

$$\begin{aligned}
M_u = & f_{pd,i} A_{p,i} (h - a_{p,i} - a'_s) + f_{sd} A_s (h - a_s - a'_s) \\
& - (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0}) A'_{p,i} (a'_{p,i} - a'_s) + 0.5 f_{td} b x_t (h - x_t / 2 - a'_s) \\
& + 0.5 f_{td} h_f (b_f - b) (h - h_f / 2 - a'_s)
\end{aligned} \quad (6.2.2-9)$$

6.2.2.2 第二阶段正截面抗弯承载能力计算

第二阶段构件正截面的承载力计算采用下列基本假定：

a) 预制组合梁全截面混凝土应变分布符合平截面假定，即正截面应变线性分布，其中UHPC与RC具有相同的应变。

b) UHPC受压的应力分布曲线参考《混凝土结构设计标准》GB/T 50010中3.1.8条规定，等效为矩形分布的应力图。

c) 预制组合梁截面内RC板的压应力分布曲线亦可等效为矩形分布的应力图。

d) 组合截面超高性能混凝土应力应变示意图如图6.2.2-2所示。

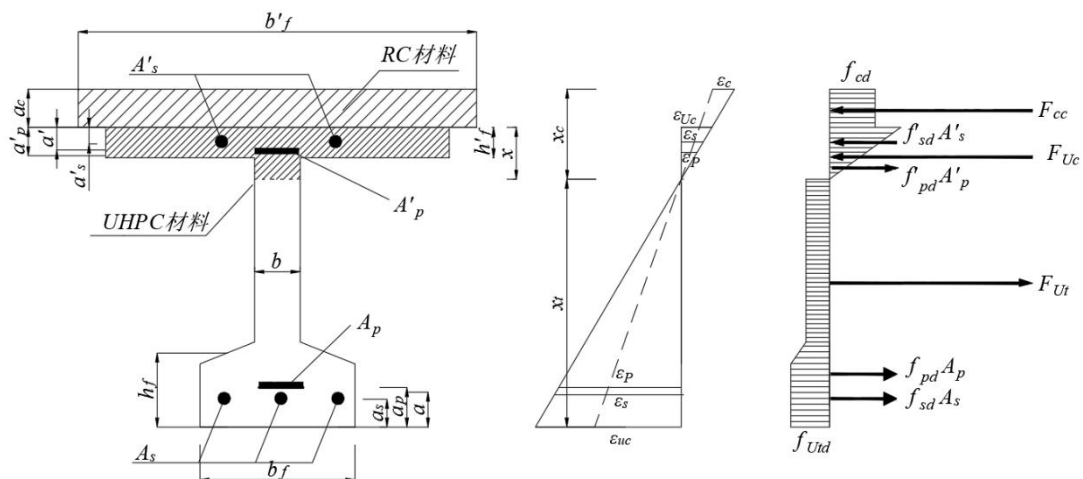


图 6.2.2-2 组合截面超高性能混凝土应力应变图

计算超高性能混凝土主梁正截面的抗弯承载力计算时，可参照本规范第 6.2.2.1 条中相关规定进行计算，将公式中构件截面高度 h 替换为 $h_{to}=h+h_c$ ，公式中 b'_f 截面受压区的翼缘高度替换为等效后的高度 b'_{df} 。

6.2.3 工形组合梁斜截面抗剪承载力计算

6.2.3.1 第一阶段抗剪承载力计算

a) 超高性能混凝土受弯构件斜截面抗剪承载力验算应采用下式：

$$\gamma_0 V_d \leq \varphi_v V_u \quad (6.2.3-1)$$

式中： V_d —— 基本组合剪力设计值 (N)；

φ_v —— 抗剪承载力折减系数，非接缝处取 1；

V_u —— 斜截面抗剪承载力 (N)。

b) 工形截面的超高性能混凝土受弯构件，其斜截面抗剪承载力应按下列公式计算：

$$V_u \leq \alpha_l (V_c + V_f) + V_s + V_p \quad (6.2.3-2)$$

式中： V_u —— 斜截面抗剪承载力 (N)；

α_l —— 异号弯矩影响系数，计算简支梁和连续梁近边支点梁段的抗剪承载力时，可取 1.0；计算连续梁和悬臂梁近中间支点梁段的抗剪承载力时，可取 0.9；

V_c —— 构件斜截面上超高性能混凝土基体受剪承载力设计值 (N)；

V_f —— 构件斜截面上纤维受剪承载力设计值 (N)；

V_s —— 构件斜截面上抗剪钢筋受剪承载力设计值 (N)；

V_p —— 构件斜截面上预应力弯起钢筋受剪承载力设计值 (N)。

1) 超高性能混凝土基体受剪承载力设计值 V_c 应按下式计算：

$$V_c = k \sqrt{f_{ck}} b h_0 \quad (6.2.3-3)$$

式中： k —— 基体抗剪承载力折减系数，素超高性能混凝土梁取 0.15，钢筋超高性能混凝土梁取 0.18，预应力超高性能混凝土梁取 0.23；

f_{ck} —— 超高性能混凝土轴心抗压强度标准值 (N/mm²)；

h_0 —— 构件截面有效高度 (mm)；

2) 纤维受剪承载力设计值应按下列公式计算：

$$V_f = \frac{A_{fv}\sigma_f}{\tan \theta} \quad (6.2.3-4)$$

式中： σ_f —— 纤维增强截面的残余抗拉强度 (N/mm²)，符合应变稳定型超高性能混凝土可取 $0.5f_{tk}$ ；

A_{fv} —— 纤维作用面积 (mm)，对于工形截面，可取 $A_{fv}=0.9bh_0$ ；

θ —— 主压应力与梁轴线间夹角，宜取 $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 。

3) 抗剪钢筋受剪承载力设计值应按下列公式计算：

$$V_s = 0.9 \frac{A_{sv}}{s_v} h_0 f_{sv} \cot \theta \quad (6.2.3-5)$$

式中： A_{sv} —— 配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积；

s_v —— 沿构件长度方向的箍筋间距；

f_{sv} —— 箍筋的抗拉强度设计值；

θ —— 主压应力与梁轴线间夹角，宜取 $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 。

4) 预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值：

$$V_p = 0.75 f_{pd,i} \sum A_{p,i} \sin \theta_{p,i} \quad (6.2.3-6)$$

式中： $f_{pd,i}$ —— 体内预应力钢筋抗拉强度设计值 (N/mm²)；

$A_{p,i}$ —— 斜截面内弯起体内预应力钢筋的截面面积 (mm²)；

$\theta_{p,i}$ —— 体内预应力钢筋弯起钢筋的切线与水平线夹角。

c) 工形截面的超高性能混凝土受弯构件，其抗剪截面尺寸应符合下列规定：

$$\gamma_0 V_d \leq 0.6 b h_0 f_{ck}^{2/3} \quad (6.2.3-7)$$

式中： b —— 腹板厚度 (mm)；

f_{ck} —— 超高性能混凝土抗压强度标准值 (N/mm²)。

6.2.3.2 第二阶段抗剪承载能力计算

根据材料等效与几何等效，按章节6.2.3.1中公式进行计算，将公式中 h 构件截面高度替换为 $h_0 = h + h_c$ ；式中 b'_f 工形截面受压区的翼缘高度替换为等效后的高度 b'_{df} ； h_0 截面有效高度替换为 $h_{d0} = h_0 + h_c$ 。

组合式受弯构件及其预制构件应按第 6.2.3.1 的规定计算斜截面抗剪，剪力设计值按下列规定采用：

对组合构件

$$V_d = V_{1Gd} + V_{2Gd} + V_{2Qd} \quad (6.2.3-8)$$

式中： V_{1Gd} —— 第一阶段预制构件和现浇混凝土层自重产生的剪力设计值，取作用标准值乘以作用分项系数 1.2；

V_{2Gd} —— 第二阶段桥面系自重产生的剪力设计值，取作用标准值乘以作用分项系数 1.2；

V_{2Qd} —— 第二阶段可变作用组合产生的剪力设计值，其作用分项系数按现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 采用。

6.2.3.3 结合面抗剪承载能力计算

计算超高性能混凝土结合面抗剪承载能力计算时，可参照行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362-2018 的 8.1.6-8.1.7 中相关规定进行结合面抗剪承载力计算，将公式中 h 构件截面高度替换为 $h_0 = h + h_c$ ；式中 b'_f 工形截面受压区的翼缘高度

替换为等效后的高度 b'_{df} ； h_0 截面有效高度替换为 $h_{d0} = h_0 + h_c$ 。

6.2.4 工形组合梁斜截面抗弯承载力计算

6.2.4.1 工形组合梁斜截面抗弯承载力按照现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 相关规定进行计算。

6.2.5 工形组合梁受冲切承载力计算

6.2.5.1 工形组合梁受冲切承载力按照现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 相关规定进行计算。

6.2.6 工形组合梁局部受压承载力计算

6.2.6.1 工形组合梁局部受压承载力按照现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 相关规定进行计算。

6.2.7 工形组合梁疲劳验算

6.2.7.1 超高性能混凝土梁式桥疲劳验算时，应对超高性能混凝土桥面板的正截面受拉区边缘混凝土弯拉应力进行验算。

6.2.7.2 疲劳应力计算应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 考虑荷载作用，各项荷载应取用标准值。

6.2.7.3 超高性能混凝土桥面板疲劳验算时，超高性能混凝土应力计算可采用名义应力法，按线弹性状态计算。

6.2.7.4 钢筋超高性能混凝土疲劳名义弯拉应力容许值宜通过试验确定。

6.2.7.5 超高性能混凝土桥面板疲劳验算时，受拉区边缘超高性能混凝土弯拉应力应按下列公式进行验算：

$$\sigma_{ct,max}^f < [f_{fd}^f] \quad (6.2.7-1)$$

式中： $\sigma_{ct,max}^f$ —— 疲劳验算时混凝土截面受拉区边缘纤维的超高性能混凝土拉应力（N/mm²）；

$[f_{fd}^f]$ —— 钢筋超高性能混凝土疲劳名义弯拉应力容许值（N/mm²）。

6.3 工形组合梁持久状况正常使用极限状态设计

6.3.1 一般规定

6.3.1.1 工形组合梁持久状况设计应按正常使用极限状态的要求采用作用频遇组合、作用准永久组合或作用频遇组合并考虑作用长期效应的影响，对构件的抗裂、挠度进行验算，各项计算值不应超过本规范规定的相应的限值。在上述各种组合中，汽车荷载不计冲击作用。

6.3.1.2 预应力混凝土构件中预应力钢筋的张拉控制应力应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362-2018 第 6.1.4 条相关规定。

6.3.1.3 正常使用极限状态计算中，应考虑相关因素引起的预应力损失。

6.3.1.4 各项预应力损失值宜根据工程具体条件由试验确定，当无试验条件时，可参照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 中的相应参数和计算式予以确定。

6.3.1.5 对先张法预应力 UHPC 构件端部区段进行正截面、斜截面抗裂验算时，预应力传递长度 l_{tr} 范围内预应力钢筋的实际应力值，在构件端部取为零，在预应力传递长度末端取有效预应力值 σ_{pe} ，预应力钢筋的预应力传递长度按下式进行计算：

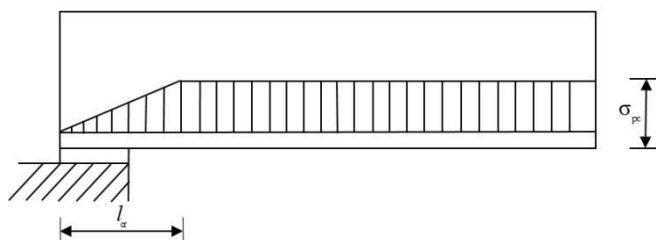


图 6.3.1 预应力钢筋传递长度内有效应力值

$$l_{tr} < \beta \frac{\sigma_{pe}}{f_{tk}} d \quad (6.3.1-1)$$

式中：\$\sigma_{pe}\$ —— 放张时预应力的有效预应力值；

\$\beta\$ —— 预应力钢筋外形系数，7 股钢绞线，\$\beta=0.28\$；螺旋肋钢丝，\$\beta=0.25\$；

\$d\$ —— 预应力钢丝、钢绞线的公称直径，当采用束筋时取等效直径 \$\sqrt{nd}\$，\$n\$ 为单筋根数，\$d\$ 为单根预应力钢丝、钢绞线直径。

6.3.2 正截面抗裂

6.3.2.1 第一阶段抗裂验算

a) 预应力超高性能混凝土受弯构件正截面拉应力应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362-2018 第 6.3.1 条规定进行正截面抗裂验算。

b) 预应力超高性能混凝土受弯构件的法向拉应力、主拉应力和主压应力按行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362-2018 第 6.3.2 条、第 6.3.3 条计算。

6.3.2.2 第二阶段抗裂验算

计算第二阶段正截面抗裂验算时，按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 第 6.3.1 条规定进行正截面抗裂验算计算，将式中的各种组合作用值替换为《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 中 8.1.8 节中等效截面后的荷载组合作用值。

6.3.2 斜截面抗裂

6.3.2.1 第一阶段斜截面抗裂验算

a) 预应力超高性能混凝土受弯构件斜截面主拉应力应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 第 6.3.1 条规定进行斜截面抗裂验算。

b) 预应力超高性能混凝土受弯构件的法向拉应力、主拉应力和主压应力按行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 第 6.3.2 条、第 6.3.3 条计算。

6.3.2.2 第二阶段斜截面抗裂验算

计算第二阶段正截面抗裂验算时，按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 第 6.3.1 条规定进行斜截面抗裂验算计算，将式中的各种组合作用值替换为《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 中 8.1.8 节中等效截面后的荷载组合作用值。

6.3.3 挠度验算

6.3.3.1 组合式受弯构件在正常使用极限状态下的挠度，可根据给定的刚度用结构力学的方法计算。在作用频遇组合下组合式受弯构件的刚度，可按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362-2018 中第 8.1.13 条刚度计算方法确定。

6.3.3.2 预应力超高性能混凝土受弯构件的刚度，可按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362 进行计算，其中开裂截面抗弯刚度 \$B_{cr}\$ 计算宜考虑超高性能混凝土抗拉作用。

6.3.3.3 预应力受弯构件在使用阶段的挠度应考虑荷载长期效应的影响，即按荷载频遇组合和本规范第 6.3.3.2 条规定刚度计算的挠度值，乘以挠度长期增长系数 η_θ ，并应符合下列规定：

a) 挠度长期增长系数可取 $\eta_\theta = 1 + \varphi(t - t_0)$ ，式中 $\varphi(t - t_0)$ 为加载龄期 t_0 ，计算考虑龄期 t 的超高性能混凝土徐变系数，应参照《超高性能混凝土梁式桥技术规程》(T/CCES 27-2021) 附录 C 进行计算。

b) 钢筋超高性能混凝土和预应力超高性能混凝土受弯构件按上述规定计算的长期挠度值，由不计冲击力的汽车荷载和人群荷载频遇组合在梁式桥主梁产生的最大挠度不应超过计算跨径的 1/600；在梁式桥主梁的悬臂端产生的最大挠度不应超过悬臂长度的 1/300。

6.4 工形组合梁持久状况和短暂状况设计

6.4.1 持久状况构件应力计算

6.4.1.1 预应力超高性能混凝土组合式受弯构件持久状况应力计算，应考虑组合结构的受力特点，按本规范 6.4 条文进行。

6.4.1.2 预应力超高性能混凝土受弯构件在进行持久状况设计时，应计算其使用阶段正截面超高性能混凝土的法向压应力、受拉区钢筋拉应力和斜截面超高性能混凝土主压应力，并不得超过本节规定的限值，尚应符合下列规定：

- a) 计算时作用应取其标准值，汽车荷载应考虑冲击系数。
- b) 应考虑预加力效应，预加力的分项系数取为 1.0。

6.4.2.2 使用阶段预应力超高性能混凝土受弯构件正截面超高性能混凝土的压应力和预应力钢筋的拉应力限值应符合下列规定：

- a) 受压区超高性能混凝土的最大压应力

$$\sigma_{kc} + \sigma_{pt} \leq 0.5f_{ck} \quad (6.4.1-1)$$

- b) 受拉区预应力钢筋的最大拉应力

$$\sigma_{pe} + \sigma_p \leq 0.65f_{pk} \quad (6.4.1-2)$$

式中： σ_{pe} —— A 类预应力超高性能混凝土受弯构件，受拉区预应力钢筋扣除全部预应力损失后的有效预应力 (N/mm²)；

σ_{pt} —— 由预加力产生的超高性能混凝土法向拉应力 (N/mm²)；

σ_{kc} —— 由作用标准值产生的超高性能混凝土法向压应力 (N/mm²)；

σ_p —— 由作用标准值产生的纵向预应力钢筋应力 (N/mm²)。

注：预应力超高性能混凝土受弯构件受拉区的普通钢筋，可不必验算。

6.4.2.3 使用阶段预应力超高性能混凝土受弯构件斜截面超高性能混凝土的主压应力和箍筋设置应符合下列规定：

- a) 超高性能混凝土的主压应力应符合下式规定：

$$\sigma_{cp} \leq 0.6f_{ck} \quad (6.4.1-3)$$

- b) 根据计算所得的超高性能混凝土主拉应力，应按下列规定设置箍筋：

1) 在 $\sigma_{tp} \leq 0.40f_{tk} / K_{global}$ 的区段，可不设置箍筋。

2) 在 $\sigma_{tp} > 0.40f_{tk} / K_{global}$ 的区段，箍筋的间距 s_v 可按下列公式计算。

$$s_v = \frac{f_{sk} A_{sv}}{\sigma_{tp} b} \quad (6.4.1-4)$$

式中： f_{sk} —— 箍筋抗拉强度标准值 (N/mm²)；

A_{sv} —— 同一截面内箍筋的总截面面积 (mm²)；

6.4.2 短暂状况构件应力计算

6.4.2.1 超高性能混凝土梁式桥构件在进行短暂状况设计时，应计算其在制作、运输及安装等施工阶段，由自重、施工荷载等引起的正截面和斜截面的应力，并不应超过本节规定的限值，施工荷载除有特别规定外均采用标准值，当有组合时，不考虑荷载组合系数，即组合系数取 1.0。

6.4.2.2 对构件施加预加力时，超高性能混凝土的立方体强度不应低于设计强度等级的 80%，且弹性模量不应低于超高性能混凝土的 28d 弹性模量的 80%。

6.4.2.3 预应力超高性能混凝土受弯构件，在预应力和构件自重等施工荷载作用下截面边缘超高性能混凝土的法向应力应符合下列规定：

a) 压应力 σ_{cc}^t 应按下列式计算：

$$\sigma_{cc}^t \leq 0.70f_{sk}' \quad (6.4.2-5)$$

b) 拉应力 σ_{ct}^t 应符合下列规定：

- 1) 当 $\sigma_{ct}^t \leq 0.35f_{tk}' / K_{global}$ 时，预拉区可不配置纵向钢筋。
- 2) 当 $\sigma_{ct}^t \leq 0.70f_{tk}' / K_{global}$ 时，配置于预拉区的纵向普通钢筋的配筋率不应低于 0.1%。
- 3) 当 $\sigma_{ct}^t \leq 1.15f_{tk}' / K_{global}$ 时，配置于预拉区的纵向普通钢筋的配筋率不应低于 0.2%。
- 4) 当 $0.35f_{tk}' / K_{global} < \sigma_{ct}^t \leq 0.7f_{tk}' / K_{global}$ 时，配置于预拉区的纵向普通钢筋的配筋率可按第 1) 项和第 2) 项直线内插取用。
- 5) 当 $0.70f_{tk}' / K_{global} < \sigma_{ct}^t \leq 1.15f_{tk}' / K_{global}$ 时，配置于预拉区的纵向普通钢筋的配筋率可按第 2) 项和第 3) 项直线内插取用。
- 6) 拉应力不应超过 $1.15f_{tk}' / K_{global}$ 。
- 7) 当采用节段预制拼装的施工方法时，接缝截面不得出现拉应力。

上述配筋率为 A_s' / A ； A_s' 为预拉区普通钢筋截面面积； A 为构件毛截面面积。预拉区的纵向普通钢筋宜采用 HRB400 带肋钢筋，其直径不宜大于 14mm，沿预拉区的外边缘均匀布置。

6.5 构造要求

6.5.1 梁体构造要求

6.5.1.1 超高混凝土工形梁承载能力计算满足设计要求时，可不配置普通钢筋。

6.5.1.2 箍筋的末端应做成弯钩，弯曲角度可取 135°。弯钩的弯曲直径应大于被箍的受力主钢筋的直径，且 HPB300 钢筋不应小于箍筋直径的 2.5 倍，HRB400 钢筋不应小于筋直径的 5 倍。弯钩平直段，一般结构不应小于箍筋直径的 4 倍，抗震结构不应小于箍筋直径的 8 倍。

6.5.1.3 工形组合梁梁间距宜为 1600mm~2500mm。

6.5.1.4 先张法超高性能混凝土工形梁，裸梁梁高宜为标准跨径的 1/15~1/20。

6.5.1.5 超高性能混凝土搭板跨径宜采用 600mm~1200mm，搭板顶宜与预制梁翼缘顶齐平，且采取有效措施搭接，搭接长度不小于 50mm。

6.5.1.6 工形截面超高性能混凝土梁的腹板宽度、翼缘板最小厚度、横隔板最小厚度均不小于 80mm。

6.5.1.7 普通钢筋和预应力钢筋的超高性能混凝土保护层厚度应满足下列要求：

a) 普通钢筋保护层厚度应取钢筋外缘至超高性能混凝土表面的距离，不应小于钢筋公称直径；当钢筋为束筋时，保护层厚度不应小于束筋的等代直径。

b) 先张法构件中预应力钢筋的保护层厚度应取钢筋外缘至超高性能混凝土表面的距离，不应小于钢筋公称直径。

c) 普通钢筋和预应力钢筋的保护层厚度不应小于 1.5 倍钢纤维长度。当掺入纤维长度

不等的混杂纤维时，钢纤维长度应取较大值。

d) 超高性能混凝土结构最外侧钢筋的保护层厚度不应小于表 6.5.1-1 的规定值。

e) 对钢筋和超高性能混凝土有特殊防腐措施处理的，保护层最小厚度可将表 6.5.2 中相应数值减小 5mm，但不得小于 15mm。

f) 对工厂预制的超高性能混凝土构件，其保护层最小厚度可将表 6.5.1-1 中相应数值减小 5mm，但不得小于 15mm。

表 6.5.1-1 混凝土保护层最小厚度

环境类别	超高性能混凝土梁、板最小保护层厚度(mm)
I类-一般环境	15
II类-冻融环境	20
III类-近海或海洋氯化物环境	25
IV类-除冰盐等氯化物环境	20
V类-盐结晶环境	20
V类-化学腐蚀环境	25
VII类-磨蚀环境	25

注：表中数值是针对各环境类别的最低作用等级、钢筋和超高性能混凝土无特殊防腐措施规定的。

6.5.1.8 普通钢筋和预应力钢筋的净距应满足下列要求：

a) 普通钢筋净距不应小于1.5倍钢筋公称直径，不应小于1.5倍钢纤维长度，且不应小于20mm。

b) 先张法构件中预应力钢筋的钢筋净距不应小于1.5倍钢筋公称直径，不应小于1.5倍钢纤维长度，且不应小于30mm。

6.5.1.9 当计算中充分考虑普通钢筋的强度时，其最小锚固长度应符合表6.5.2的规定，并应符合下列规定：

a) 对于受压束筋和等代直径 d_e 不大于28mm的受拉束筋的锚固长度，应以等代直径按表6.5.2值确定，束筋的各单根钢筋可在同一锚固终点截断；对于等代直径 d_e 大于28mm的受拉束筋，束筋内各单根钢筋，应自锚固起点开始，以表6.5.2内规定的单根钢筋的锚固长度的1.5倍，呈阶梯形逐根延伸后截断，即自锚固起点开始，第一根延伸1.3倍单根钢筋的锚固长度，第二根延伸3.0倍单根钢筋的锚固长度，第三根延伸4.5倍单根钢筋的锚固长度。

b) 当超高性能混凝土在硬化过程中易受扰动时，锚固长度应在表6.5.1-2值基础上增加25%。

c) 当带肋钢筋的公称直径大于25mm时，锚固长度应在表6.5.1-2值基础上增加25%。当钢筋位于现浇接缝区域时，锚固长度应在表6.5.1-2值基础上增加25%。

表 6.5.1-2 钢筋最小锚固长度

钢筋种类		HPB300	HRB400.HRBF400.RRB400	HRB500
直端受压钢筋		14d	8d	11d
受拉钢筋	直端	16d	10d	13d
	弯钩端	14d	8d	11d

注：1 d 为钢筋公称直径(mm)。

2 当受拉钢筋末端采用弯钩时，锚固长度为包括弯钩在内的投影长度。

6.5.2 耐久性设计

6.5.2.1 UHPC 桥梁应根据结构特点、使用年限、环境条件、施工条件等进行耐久性设计。耐久性设计应包括下列内容：

a) 确定结构所处的环境类别。

b) 提出对 UHPC 材料的耐久性基本要求。

c) 确定构件中钢筋的 UHPC 保护层厚度。

- d) 不同环境条件下的耐久性技术措施。
- e) 提出结构使用阶段的检测和维护要求。

6.5.2.2 UHPC 桥梁所处环境类别应按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 规定确定。

6.5.2.3 UHPC 材料耐久性应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定。

6.5.2.4 UHPC 梁式桥结构及构件应采取下列耐久性技术措施：

- a) 预应力 UHPC 结构中的预应力体系根据具体情况采用相应的多重防护措施。
- b) 有抗渗要求的结构，UHPC 的抗渗等级符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的要求。

c) 严寒和寒冷地区的潮湿环境中，UHPC 应满足抗冻要求，UHPC 抗冻等级符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的要求。

6.5.2.5 UHPC 桥梁结构的形状、布置和构造应阻挡或减轻环境对结构的作用，有利于避免水、水气和有害物质在 UHPC 表面的积聚。

6.5.2.6 UHPC 梁式桥宜根据需要提出使用过程中需进行的监测、监控、检测、维修或更换要求，宜根据需要设置必要的用于检测维修的通道、空间和装置。

7 下部结构设计

7.1 一般规定

7.1.1 桥梁下部宜采用装配式结构形式，装配化设计时应考虑构件预制、运输、安装的技术可行性和施工条件，综合实际情况合理确定墩柱形式、盖梁尺寸、系梁设置和连接构造。

7.1.2 预制墩柱、预制系梁、预制盖梁的钢筋间距、保护层厚度应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)的要求。

7.1.3 下部结构预制构件宜采用高性能混凝土，混凝土强度等级不低于 C60。预制构件间采用湿连接时，湿接部位宜采用超高性能混凝土，抗压、抗拉强度等级分别不低于 UC100、UT6。

7.1.4 墩高 10m 及以下的预制墩柱，宜采用圆形空心截面；10~20m 时，可采用圆形空心截面或板式墩，若采用圆形空心截面，应至少设置一道系梁。

7.1.5 预制盖梁宜采用 T 形截面。盖梁采用上下分层建造时，下层预制构件与上层现浇之间可不使用剪力键，但结合面应进行凿毛或粗糙面处理；采用竖向分段拼装建造时，预制构件的拼接面宜采用剪力键方式。

7.1.6 装配式桥墩计算应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)、《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05)的要求，具体应包括持久状况下的结构承载能力极限状态、正常使用极限状态以及持久状况、短暂状况和地震状况构件的应力四部分内容：

a) 在进行持久状况承载能力极限状态计算时，作用效应应采用基本组合，墩柱应作为压弯构件进行承载能力计算，盖梁应作为受弯构件进行承载能力计算。

b) 在进行持久状况正常使用极限状态计算时，应采用频遇组合、永久组合或短期效应组合并考虑长期效应组合的影响，对结构进行抗裂、裂缝宽度和挠度验算。

c) 在进行持久状况和短暂状况构件的应力计算时，作用除有特别规定外均采用标准值，汽车荷载应考虑冲击系数，对墩柱和盖梁进行持久状况和短暂状况的应力验算。

d) 在进行地震状况构件的应力计算时应进行承载能力极限状态设计。

7.1.7 对涉水桥墩，应按照《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02)进行船舶、漂流物等偶然作用下的抗撞性能验算。空心预制墩水面以下宜灌实，否则应对桥墩进行实体有限元碰撞分析，确保局部性能满足要求。

7.2 连接设计

7.2.1 装配式下部结构构件间主要连接方式及适用范围可根据结构形式、施工、运输、拼装等因素按下表综合确定：

表 7.2.1-1 装配式下部结构构件间主要连接方式及适用范围

序号	施工工艺	连接方式	适用范围
1	干连接	焊接	墩柱节段间（非塑性铰区）
2		啮合式连接	墩柱节段间（非塑性铰区）
3	湿连接	法兰+后浇 UHPC 连接	墩柱与承台、墩柱节段间
4		啮合式+后浇 UHPC 连接	墩柱与承台、墩柱节段间
5		焊接+后浇 UHPC 连接	墩柱与承台、墩柱节段间、墩柱与盖梁
6		湿接缝连接	墩柱与承台、墩柱节段间、墩柱与盖梁

注：a) 下部结构连接按施工工艺不同分为干连接、湿连接；

b) 干连接采用焊接、啮合式连接，无后浇混凝土，连接面抗弯、抗剪承载力由焊缝或

预埋件提供；

c) 湿连接采用必要的工艺连接定位后浇超高性能混凝土形成整体，连接面承载力由混凝土、焊缝、螺栓或预埋件等共同提供；

d) 各连接方式具体构造细节见附录 C。

7.2.2 连接位置的刚度、强度应按大于非连接段设计，接头强度应按施工、使用过程中可能产生的不利工况进行验算，必要时可采用试验方法验证其性能。

7.2.3 应根据桥梁运营和所处环境要求进行预制构件及其连接位置的耐久性设计，相关要求按《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310)、《混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件》(JT/T 695) 执行。

7.2.4 对涉水桥墩，墩身拼接位置宜避开水位变动区。

7.3 抗震设计

7.3.1 本规范适用于基本地震动峰值加速度为 0.2g 及以下地区装配式混凝土桥梁的抗震设计。

7.3.2 装配式混凝土桥梁抗震分析方法应符合《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 的规定。

7.3.3 装配式混凝土桥梁在 E1 和 E2 地震作用下的抗震分析，应按照《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 的规定建立桥梁结构的动力计算模型，并应对连接位置的力学特性进行模拟。

7.3.4 装配式混凝土桥墩的墩柱、系梁应按延性构件设计，盖梁、承台、基础、墩柱抗剪应按能力保护原则设计。

7.4 抗震验算

7.4.1 E1 地震作用下，装配式墩柱在弹性范围内工作，基本不损伤，应校核其强度，强度验算应符合现行《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05) 的规定。

7.4.2 E2 地震作用下，装配式墩柱可发生损伤产生弹塑性变形，墩柱的塑性铰区域应具有足够的塑性变形能力。塑性铰区域塑性转动能力、塑性铰区域最大容许转角的验算应符合《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 的要求；墩顶位移验算时，墩柱容许位移可按本规范第 7.4.3 条的规定计算。

7.4.3 预制单柱墩的容许位移应按下列公式计算：

$$\Delta u = \frac{1}{3} H^2 \times \varphi_y + (H - \frac{L_p}{2}) \times \theta_u + \frac{V_{c0}}{C_f} \quad (7.4.3-1)$$

$$L_{p1} = 0.08H + 0.022f_y d_s \geq 0.044f_y d_s \quad (7.4.3-2)$$

$$L_{p2} = \frac{2}{3} b \quad (7.4.3-3)$$

$$L_p = \min(L_{p1}; L_{p2}) / \varphi_p \quad (7.4.3-4)$$

式中：H —— 悬臂墩的高度或塑性铰截面到反弯点的距离 (cm)；

H_2 —— 墩柱随桩基预制部分高度 (cm)；

V_{c0} —— 桥墩剪力设计值，根据本规范公式 7.4.4-1 计算；

φ_y —— 截面等效屈服曲率 (1/cm)，可按现行《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 的规定计算；

θ_u —— 塑性铰区域的最大容许转角 (rad)；

- L_p —— 等效塑性铰长度 (cm) ;
- C_f —— 圆形截面抗推刚度: $C_f = 3EI / H_2^3$;
- L_{p1} —— 根据纵向钢筋确定的等效塑性铰长度 (cm) ;
- L_{p2} —— 根据截面尺寸确定的等效塑性铰长度 (cm) ;
- b —— 矩形截面的短边尺寸或圆形截面的直径 (cm) ;
- f_y —— 纵向钢筋抗拉强度标准值 (MPa) ;
- d_s —— 纵向钢筋的直径 (cm) ;
- φ_p —— 等效塑性铰长度折减系数, 一般情况 $\varphi_p = 1.0$ 。

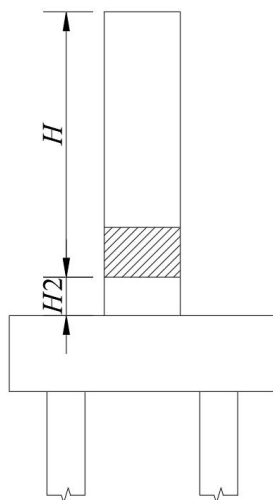


图 7.4.3-1 装配式混凝土单柱墩容许位移计算示意图

7.4.4 当盖梁、基础、支座和墩柱抗剪作为能力保护构件设计时, 其弯矩和剪力设计值应按能力保护原则计算, 应取与墩柱塑性铰区域截面超强弯矩所对应的弯矩和剪力值。

a) 墩柱塑性铰区域截面超强弯矩应按《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 计算。

b) 单柱墩沿顺桥向和横桥向的剪力设计值应取与墩柱塑性铰区域截面超强弯矩所对应的剪力值。对于简支梁桥和连续梁桥, 单柱墩只在底部形成一个塑性铰, 此时剪力计算公式如下:

$$V_{c0} = M_n / H_n \quad (7.4.4-1)$$

式中: M_n —— 单柱墩墩底塑性铰区域截面超强弯矩 (kN·m);

H_n —— 墩顶到墩底塑性铰中心的距离 (m)。

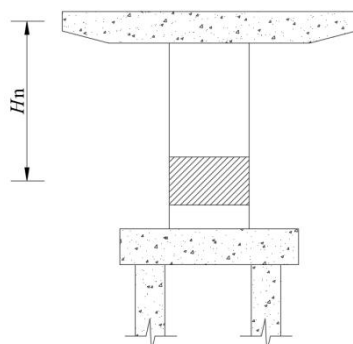


图 7.4.4-1 装配式混凝土单柱墩剪力计算示意图

c) 双柱墩及多柱墩塑性铰区域截面顺桥向超强弯矩和剪力设计值按现行《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 中规定计算, 横桥向超强弯矩和剪力设计值采用迭代法计算。计算时墩顶塑性铰中心到墩底塑性铰中心的距离应避开连接段位置, 按下图取值。

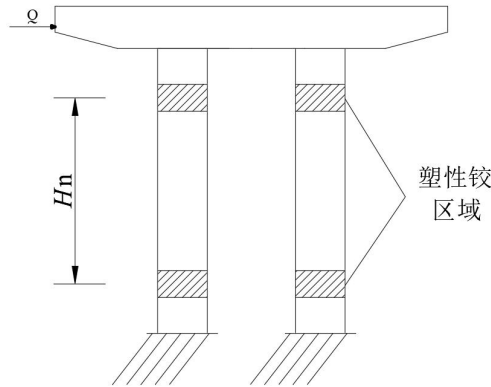


图 7.4.4-2 装配式混凝土双柱墩横桥向超强弯矩和剪力设计值计算示意图

7.4.5 墩柱节段连接位置处的刚度、强度应按大于非连接段设计, 并应额外进行抗剪、抗弯验算。

a) 抗剪强度验算

墩柱连接位置沿顺桥向和横桥向的斜截面抗剪强度应按《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 的规定计算, 同时墩柱连接位置剪力设计值应满足下式要求:

$$V_{\text{cos}} > \max(\alpha V_{\text{c0}}, 1.15V_u, 1.15V_{\text{ck}}) \quad (7.4.5-1)$$

式中: V_{cos} —— 下部预制构件连接位置实心截面的剪力设计值 (kN), 根据本规范 7.4.4 计算;

V_u —— 预制空心墩斜截面抗剪承载能力 (kN);

α —— 剪力增大系数, 抗震设防烈度 6 度及以下可取 1.1; 7 度可取 1.2; 8 度可取 1.3。

V_{ck} —— 按 M_u/h 计算, 其中 M_u 为墩底塑性铰顶部预制空心墩截面通过配筋计算得到的截面实际抗弯极限承载能力。

b) 抗弯强度验算

预制空心墩底截面抗弯承载能力应满足下式要求:

$$M_{y0} > \max(V_{\text{c0}}h, 1.15M_u) \quad (7.4.5-2)$$

式中: M_{y0} —— 墩底截面初始屈服弯矩 (kN·m);

V_{c0} —— 桥墩剪力设计值 (kN);

M_u —— 墩底塑性铰顶部预制空心墩截面通过配筋计算得到的截面实际抗弯极限承载能力 (kN·m)。

7.4.6 装配式混凝土桥梁采用延性设计时, 应按现行《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01) 的规定进行支座厚度、滑移稳定性验算。

7.5 构造要求

7.5.1 装配式下部结构构件间可采用表 7.2.1-1 中的连接方式拼装, 各连接应符合如下构造要求:

a) 采用焊接或啮合式连接时, 应保证墩柱纵向钢筋、连接销和端板可有效传力, 单墩上的连接不宜超过两处;

b) 采用除湿接缝连接的其余三种湿连接方式连接时,预埋件宜采用 Q355 级钢,按《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010)考虑压、弯、剪共同作用进行预埋件设计;

c) 采用法兰-后浇 UHPC 连接,法兰外边缘距墩柱最外侧混凝土距离不小于 60mm;

d) 采用湿接缝连接时,宜加设临时抱箍来辅助定位、浇筑。连接处钢筋预留长度应大于自身锚固长度,钢筋直径不小于 12mm,间距不大于 200mm。

e) 当采用超高性能混凝土湿连接时,预制构件之间预留高度不应小于 600mm。

7.5.2 空心截面墩柱的钢筋构造,应符合下列要求:

a) 应配置内外两层纵筋,配筋率限值与普通截面墩柱相同;

b) 应至少配置内外两层闭合环形箍筋,并配置多个闭合箍筋或拉结筋;

c) 箍筋的配置应满足现行《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01)的要求。

7.5.3 桥梁抗震措施等级及对应措施细节按《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01)中规定执行:

a) 一级抗震措施时,梁端至墩、台帽或盖梁边缘应有一定的距离,最小值不应小于 60cm。

b) 二级抗震措施时,梁式桥应在横桥向和纵桥向设置防止上部结构落梁的挡块或抗震锚栓。

c) 三级抗震措施时,应采用合理的限位装置,防止结构相邻构件产生过大的相对位移;

d) 四级抗震措施时,梁桥各片梁间必须加强横向连接,以提高上部结构的整体性;

e) 对于双柱式或排架墩,未设置盖梁且高度大于 7m 的排架桩墩应设置墩顶系梁;墩高在 10m 至 20m 之间时,宜至少设置一道柱间系梁。

8 预制场作业

8.1 一般规定

8.1.1 预制构件的生产应符合设计文件的规定。

8.1.2 预制构件生产前，应由建设单位组织设计单位、施工单位及生产企业等对设计文件进行交底和会审。

8.1.3 预制构件生产前，应根据构件的结构特点、受力特性、环境条件等编制专项施工方案。

8.1.4 预制构件应标识构件产品信息。

8.2 预制场

8.2.1 预制场选址应符合下列要求：

- a) 预制工场应不受塌方、落石、滑坡、洪涝等灾害的影响。
- b) 具备便利的陆运交通条件和通电、通水、通讯条件。
- c) 周围无污染源。
- d) 符合国家及地方规定的土地使用审批要求。

8.2.2 场区道路在满足生产需求的同时，需满足物流畅通有序。场区主干道构成环状路网，各路相通。场区交通应实现人、物分流。场区道路可采用水泥混凝土路面，主干道宽度不宜小于 7m，次干道宽度不宜小于 5m。存梁区出梁道路转弯半径不得小于运梁车长的 1.5 倍~2.0 倍。

8.2.3 梁预制场的场区按总体功能可划分为生产区、办公区、生活区和附属设施区，区域之间相互隔离、合理衔接；生产区布局应符合流水作业流程要求。

8.2.4 预制场平面布局应根据流水路径布置，依次按照钢筋加工与绑扎、构件浇筑、构件养护与存放的工艺顺序设置流水车间，各流水线宜采用并行模式。各流水作业之间、构件养护存放区与构件出场道路之间应设置相应的搬运通道及搬运设备。原材料储存区、混凝土拌合站（拌合楼）等可根据预制场场地限制、自动布料机运输距离等进行布置。

8.2.5 原材料的接收、贮存、转运、使用场所等应与办公和生活服务设施分离，易产生污染的设施应远离办公区和生活区。

8.2.6 制梁区生产线数量、制梁台座数量应与预制工期、生产进度需求相匹配。

8.2.7 制梁区应设置构件整修区域，空间大小应满足构件质量检验、修补、粗糙面处理、表面装饰处理的作业要求。

8.2.8 存梁区场地应根据产品种类、存梁方式等因素进行硬化处理，满足承载能力要求，不得产生严重沉降和变形。

8.2.9 预制构件存放区规模的设置应计入制梁周期、存梁时间、架梁进度等因素的影响。

8.2.10 龙门吊、台座基础应进行专项设计。

8.2.11 钢筋加工区域的设置应符合下列规定：

a) 钢筋加工应设置钢筋加工车间，完成钢筋原材的调直、切断、弯曲成型、绑扎、成品储存等工序，为预制区供应钢筋半成品及成品。

b) 钢筋加工生产线应采用自动化数控设备，如数控钢筋调直切断机、数控钢筋弯曲机、钢筋网成型机、钢筋连接接头加工机械、钢筋冷加工等设备及自动桁架钢筋生产线等。

c) 应根据钢筋加工及绑扎速率，按照构件的生产速率需求，合理确定钢筋加工设备及钢筋绑扎台座数量，并据此计算钢筋加工及绑扎区的占地面积。

d) 钢筋应根据种类、规格、型号分类存放，存放场地应为硬质地坪，且设有相应排水和防潮措施。

e) 钢筋存放应遵循不使钢筋锈蚀、确保钢筋性能满足使用要求的原则，尽量满足同一

炉号、同一批号、同一验收批使用到同一跨梁的要求。

f) 钢筋笼吊运应使用专用吊架、吊具。

8.2.12 混凝土拌合区域的设置应符合以下规定：

a) 混凝土拌合区域包括原材料储存区、混凝土生产区与中控室，应采用全封闭车间生产模式。

b) 粗骨料可自然堆放于储存区，但不得露天堆放，其堆场应为硬质地坪，且设有排水系统。

c) 水泥等粉状物料应采用筒仓储存，外加剂应采用具有耐腐蚀和防沉淀功能的箱体储存。

d) 宜采用自动化混凝土拌合设备，根据生产进度和需求，选择合理浇筑方式。

8.2.13 预应力材料存放下料区布设应符合下列规定：

a) 预应力材料制作区宜紧邻制梁台座和存梁台座布置，且周边排水应顺畅。

b) 预应力材料制作区应满足预应力筋下料和存放要求，并应防雨雪、防潮，通风应良好。

8.2.14 预制构件台座的设置应符合下列规定：

a) 台座设置数量应根据预制梁的类型、大小、数量、预制场的生产规模及工期确定。

b) 预制梁台座的强度应满足张拉要求，反拱度的设置应满足设计要求。

c) 预制墩的底座应满足构件重量、密封性的要求，变形钢筋骨架及模板的翻转要求。

8.3 模板

8.3.1 模板和支架应有足够的强度、刚度和稳定性，能承受施工过程中所产生的各种荷载。

8.3.2 预制构件模板宜采用钢模板，钢模板表面应进行防腐、除锈处理，可在模板内侧粘贴其它材料改善构件外观质量。

8.3.3 进行超高性能混凝土预制构件生产时，模板与超高性能混凝土接触面应清理干净并应涂刷隔离剂，隔离剂不得污染钢筋和超高性能混凝土表面，一般宜涂水性脱模剂。

8.3.4 模板拆除应在同养试块强度达不低于 40MPa 后方可拆除。

8.4 钢筋及预应力筋施工

8.4.1 钢筋与预应力筋施工除应现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T3650 的相关规定。

8.4.2 先张法预应力筋的放张应符合设计规定，设计未规定时，宜在超高性能混凝土梁蒸汽养护完成后放张。

8.5 超高性能混凝土浇筑及养护

8.5.1 超高性能混凝土拌合

8.5.1.1 超高性能混凝土拌合方案应包括拌合能力、施工配合比、计量偏差、拌合时间、出机均匀性和工作性的检查。拌合机的上水计量精度应控制在 1%以内。

8.5.1.2 超高性能混凝土拌合宜采用变频式立轴行星式强制拌合机，拌合机的转速不宜低于 40r/min，加水、撒布钢纤维及添加减水剂等宜采用自动化系统。

8.5.1.3 超高性能混凝土拌合时间从加水开始计时，低速（40r/min~45r/min）拌合待物料流化后，投入钢纤维，再高速（55r/min~60r/min）拌合 3 分钟。当采用全自动化系统时，总拌合时间不少于 8 分钟；当采用人工撒布钢纤维、添加减水剂时，总拌合时间不少于 12 分钟。

8.5.2 超高性能混凝土

8.5.2.1 超高性能混凝土拌合物宜采用泵送方式浇筑，采用泵送方式浇筑时，应符合现行行

业标准《混凝土泵送施工技术规范》GJ/T10 的规定。

8.5.2.2 超高性能混凝土浇筑前，应检查模板支撑的稳定性以及接缝的密闭性，并应保证模板在浇筑过程中不失稳、不跑模和不露浆。

8.5.2.3 超高性能混凝土宜连续分层浇筑，分层厚度不宜超过 30cm，也可结合所采用的材料工作性能及振捣方法通过试验综合确定。

8.5.2.4 超高性能混凝土宜采用平板振捣器或附着式振捣器振捣成型，所采用的振捣机械和振捣方法除应保证构件密实外，尚应避免过振、拌合物离析、分层以及钢纤维外露。当选用频率 50Hz，激振力为 3.5kN 的附着式振捣器时，附着式振捣器布置间距宜选用 1m~1.5m，振捣器时间宜为 15s~20s。

8.5.2.5 基于超高性能混凝土材料结皮特性，如在露天干燥、高温环境下作业，由于不确定因素导致停歇而出现层间冷缝需要进行破皮处理，破皮方式可采用插入式振捣器，但需试验确定相关参数，并确保钢纤维不分层。

8.5.3 超高性能混凝土养护

超高性能混凝土预制构件浇筑完成后采用蒸汽养护时应符合国家标准 GB/T 31387 的相关规定。

8.6 高性能混凝土浇筑及养护

8.6.1 高性能混凝土浇筑前，预埋件及预留钢筋的外露部分宜采取防止污染的保护措施。

8.6.2 混凝土浇筑应连续进行，浇筑过程中应观察模具、预埋件等的变形和移位，变形与移位超出本规程规定的允许偏差时应采取补强和纠正措施。

8.6.3 应根据混凝土性能、环境条件、水泥品种、加剂等要求制定具养护方案，构件预制完成后应及时覆盖养护，养护应符合现行《公路桥涵施工技术规范》JTG/T3650 的相关规定。

8.7 特殊气候条件下施工

8.7.1 雨期、热期和冬期的超高性能混凝土梁式桥的施工应根据不同季节特点制定相应的施工技术方案，施工前应及时掌握气温、雨雪、风暴、汛情等预报，采取针对性措施并制定应急预案，做好安全防范工作，避免发生事故。超高性能混凝土浇筑现场若遇有下列情况时，不得进行浇筑施工：

- a) 现场降雨或下雪。
- b) 风力达到 6 级或 6 级以上的强风天气。
- c) 现场气温高于 40℃，或拌合物入模温度高于 35℃。
- d) 施工现场环境温度低于 5℃。

8.7.2 超高性能混凝土的雨期施工除应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 的相关规定之外，尚应符合下列规定：

- a) 应关注天气情况，超高性能混凝土浇筑应安排在天气良好时段进行，应避开大风、大雨天气施工。
- b) 雨期施工时，应准备足量的防雨棚、帆布和塑料布或塑料膜等防雨器材和材料，防雨棚支架宜采用方便安装和拆卸的钢结构。
- c) 超高性能混凝土浇筑过程中遭遇降雨，当降雨影响超高性能混凝土表面质量时应停止施工，并对已浇部分超高性能混凝土层进行防雨遮挡，等待雨停后继续施工；若需不停顿继续进行浇筑施工，应搭设防雨棚，保证超高性能混凝土浇筑不受下雨影响。
- d) 施工过程中若遭遇未预料大雨情况，必须在中途停止本次浇筑时，应停止施工，并宜将已浇筑超高性能混凝土清除。

8.7.3 超高性能混凝土的大风天气施工除应符合现行《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650

的相关规定之外，尚应符合下列规定：

a) 在日照较强、空气干燥的春秋多风季节或山区，超高性能混凝土浇筑完成后，应及时进行养护，防止刚浇筑完成的超高性能混凝土表面发生塑性收缩开裂。

b) 养护过程中，应有专人负责巡视和检查。

8.7.4 超高性能混凝土的热期施工除应符合现行《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 的相关规定之外，尚应符合下列规定：

a) 热期宜选择在早晨、傍晚或夜间施工，避开中午高温时段施工。夜间施工应有良好的操作照明，并确保施工安全。

b) 施工中应随时检测气温，以及干混料、搅拌水和拌合物温度，监控超高性能混凝土表面温度，温度过高时应及时采取防高温和降温措施。

c) 热期施工时，应控制混凝土拌合物的入模温度在 25°C 以内。

8.7.5 超高性能混凝土的冬期施工除应符合现行《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 的相关规定之外，尚应符合下列规定：

a) 当施工气温处于 $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 时，超高性能混凝土施工应采取适当的保温覆盖措施施工，施工时应随时检测气温和混合料、拌合水的温度。

b) 冬期施工时，超高性能混凝土入模温度不应低于 5°C 。

8.8 构件存放

8.8.1 预制构件调离台座、移运、堆放前应进行试吊装；起吊时，混凝土抗压强度应满足吊点和构件的受力安全，构件吊装强度不宜低于设计强度的85%；构件在翻身时应采取防止出现裂缝的措施。

8.8.2 应按照构件刚度及受力情况制定相应的存放方案，应按不同规格分别存放，堆放的形式和层数应安全可靠，堆放时应设置垫木，并避免产生纵向变形和局部压曲变形。

8.8.3 墩柱采用立式存放时，应验算其在最不利荷载下的稳定性；如不满足要求，应采取防倾覆措施。

8.8.4 构件的预留钢筋应采取有效的防锈保护措施。

8.8.5 预制构件验收合格后方能出场，出场前应在表面明显位置进行标识。

9 现场作业

9.1 一般规定

- 9.1.1 安装作业前，应进行技术、质量、环保、安全文明等进行施工交底。
- 9.1.2 安装前，龙式起重机等大型吊装设备应进行专项检测并出具有效安全检验合格证；使用前，应检查机具的维修、使用、检验记录。
- 9.1.3 预制构件安装应制订专项施工方案，其施工方法、施工工艺、临时设施和设备等宜根据结构的构造特点和施工环境条件综合确定，对施工中使用的受力装置和受力临时结构应进行专门设计和验算。
- 9.1.4 下部结构安装前，应对拼接面的坐标、高程、平整度和预埋件定位等进行复核，其精度应符合现行行业标准《公路装配式混凝土桥梁施工技术规范》JTG/T 3654 的相关规定。
- 9.1.5 下部结构安装前，应对接头高性能混凝土进行凿毛处理，应对预埋的钢构件及外露钢筋进行除锈处理。
- 9.1.6 构件安装前应在现场进行试安装。

9.2 吊装及运输

- 9.2.1 吊具，吊架应定期进行检查和维护；吊装设备应符合使用要求，使用前，应检查机具的维修使用、检验记录。
- 9.2.2 构件运输前应编制运输专项方案和支承保护方案，支承保护方案应包括构件运输方向支承点设置、外露钢筋的保护等内容。运输前应按支承方案进行检查，确保构件运输方向准确及支承措施牢固可靠。
- 9.2.3 应根据预制构件参数、道路运输条件、限制条件等，实地勘察并优选运输路线、备用路线及运输车辆。
- 9.2.4 在装卸和运输过程中，不应使构件产生损伤和变形。

9.3 上部结构安装

- 9.3.1 主梁安装之前，支撑结构的混凝土强度和预埋件尺寸、高程及平面位置应符合设计要求，且应对支座型号进行复核检查。
- 9.3.2 装配式梁（板）汽车式起重机架梁应符合下列规定：
- a) 施工现场内运输通道应畅通，吊装场地应平整、坚实在电力架空线路附近作业时，应采取相应的安全技术措施。大雨、大雪、大雾、沙尘暴和风力六级等恶劣天气，不得进行吊装。
 - b) 起重机工作半径和高度的范围内不得有障碍物。
 - c) 起重机不得斜拉、斜吊，轮胎起重机不得吊重物行驶。
 - d) 使用双机抬吊同一构件时，吊车臂杆应保持一定距离，并应设专人指挥，每一单机应按降效25%作业。
- 9.3.3 装配式梁（板）门式吊梁车架梁应符合下列规定：
- a) 吊梁车吊重能力应大于1/2梁重，轮距应为主梁间距的2倍。
 - b) 导梁长度不得小于桥梁跨径的2倍另加5m~10m引梁，导梁高度宜小于主梁高度。在墩顶应设垫块使导梁顶面与主梁顶面保持水平。
 - c) 构件堆放场或预制场宜设在桥头引道上。桥头引道应填筑到主梁顶高，引道与主梁或导梁接头处应砌筑坚实平整。
 - d) 吊梁车起吊或落梁时应保持前后吊点升降速度一致，吊梁车负载时应慢速行驶，保持平稳，在导梁上行驶速度不宜大于5m/min。

9.3.4 拼装过程中涉及主梁的提升环节，均应满足下列要求：

a) 应根据设计要求选择主梁提升方式；设计无要求时，可根据现场施工环境结构特征选择合理的主梁提升方式，并应取得设计认可后方可实施。

b) 主梁提升应缓慢、匀速，提升速度宜限制在2m/min内。

c) 提升或旋转作业时，应暂时封闭作业影响范围内的道路交通。开放交通时，主梁底部最低点应满足净空要求。

9.3.5 进行主梁间搭板拼装时应在次确定高程及平面位置，根据搭板重量和现场条件选择合理吊装设备，并应按设计要求进行拼装。

9.4 下部结构接头临时连接

9.4.1 采用焊接连接时应符合下列规定：

a) 焊接除满足设计要求外，应满足国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661和《钢结构工程施工规范》GB 50755的相关规定。

b) 现场高空焊接作业应搭设稳固的操作平台和防护棚。

c) 焊接时应先定位焊接，后进行正式焊接，且定位焊缝与正式焊缝应具有相同的焊接工艺和焊接质量要求。

9.4.2 采用啮合式连接时应符合下列规定：

a) 拼装前应将连接处的上下端板清理干净，并将连接销孔内杂物清理干净，并应调整好连接销的方位和高度。

b) 吊起上节段时，上节段下端板连接销与下节段带槽端板上各连接槽口对准后，利用上节段自重将连接销全部插入下节段的连接槽内，加压使上下节段的端板紧接。

c) 当采用电焊封闭接缝时，宜在桩四周对称焊接，焊缝沿周边一圈闭合，厚度不应少于3mm，焊缝质量应符合现行国家标准的有关规定。

9.4.3 采用法兰连接时应符合下列规定：

a) 优先选用高强度螺栓（螺柱），不得使用低强度螺栓（螺柱）。

b) 清除螺栓和螺母的螺纹处以及螺母与法兰接触面的任何杂质，确保螺母和螺栓之间自由转动。

c) 螺栓和螺母的螺纹应无变形以及裂纹等损伤，如发现应进行替换。

d) 法兰应正确对中（轴向和径向），法兰密封面的平行度和对中的允许偏差应满足设计要求。

9.5 下部结构湿接缝连接

9.5.1 采用湿接缝进行连接时，可采用抱箍连接方式进行临时固定，且临时结构（抱箍）应满足受力要求。

9.5.2 在进行钢筋搭接时应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650的相关规定。

9.6 超高性能混凝土现场浇筑及养护

9.6.1 超高性能混凝土现场搅拌应保证拌合物的均匀性，出机拌合物中不应有肉眼可见的钢纤维结团。

9.6.2 拌合物出机后不得加水。

9.6.3 浇筑前，应检查模板支撑的稳定性和接缝的密封情况，模内不得有积水。应保证模板在浇筑过程中不移位、不胀模和不漏浆。

9.6.4 超高性能混凝土浇筑抹面完成后，应立即用薄膜覆盖或喷洒养护剂进行保湿养护。

9.7 涂装

9.7.1 为提升高性能混凝土、超高性能混凝土构件表观质量及耐久性，可进行表面防护涂装，涂装材料的技术及工艺指标应符合附录 B 的规定。

9.7.2 大面积施工前应按工序要求进行试验，以确定施工工艺的可行性，以及确定施工工艺参数、涂料用量等。试验段应选择典型部位。

10 质量检验

10.1 原材料

10.1.1 一般规定

原材料质量检验应首先获得原材料厂家、品牌、规格、数量等信息，取得证明原材料质量合格的检测报告。原材料进场后应按照设计文件要求和相关标准进行性能检验，满足要求后方可使用。

10.1.2 质量检验要求

超高性能混凝土剂、水泥、骨料、外加剂、钢纤维、拌合用水等超高性能混凝土原材料质量检验及评定应符合表10.1.2要求。

表 10.1.2 超高性能混凝土原材料质量检验要求

项次	原材料名称	检测项目	检验频率	检验方法
1	超高性能混凝土剂	含水率、细度、氯离子含量	200t/次	GB/T 8077
2	水泥	标准稠度用水量、细度、凝结时间、强度	20t/次	GB175
3	骨料	颗粒级配、含泥量	30t/次	JGJ 52
4	外加剂	含固量、减水率	10t/次	GB/T 8077、GB50119
5	钢纤维	抗拉强度、长度合格率、直径合格率	10t/次	GB/T 31387
6	拌合用水	pH 值、不溶物含量、可溶物含量、氯化物含量、硫酸盐含量及碱含量	地表水每 6 月一次、地下水每年一次	JGJ 63

10.2 超高性能混凝土拌合物

10.2.1 一般规定

超高性能混凝土拌合物应按照设计文件要求和相关标准进行性能检验，满足要求后方可使用。超高性能混凝土拌合物的性能应分批进行检验。一个检验批的混凝土应由力学性能等级相同、试验龄期相同、生产工艺条件和配合比基本相同的混凝土组成。

10.2.2 质量检验要求

超高性能混凝土拌合物的质量检验应符合表10.2.2要求。

表 10.2.2 超高性能混凝土拌合物质量检验要求

项次	性能分类	检测项目	检验频率	检验方法
1	工作性能	扩展度	每 50m ³ 相同配合比检验一次，不足 50m ³ 按 50m ³ 计算	GB/T 50080
		扩展度经时损失		
		扩展时间		
2	力学性能	抗压强度	连续浇筑≤300m ³ ，每 50m ³ 检验一次，不足 50m ³ 按 50m ³ 计算；	GB/T 50081
		抗弯拉强度	连续浇筑>300m ³ ，超出部分每增加 100m ³ 检验一次，不足 100m ³ 按 100m ³ 计算。	
		弹性模量	连续浇筑≤600m ³ ，每 200m ³ 检验一次，不足 200m ³ 按 200m ³ 计算；	
		抗拉性能	连续浇筑>600m ³ ，超出部分每增加 400m ³ 检验一次，不足 400m ³ 按 400m ³ 计算。	附录 A

3	耐久性指标	抗氯离子渗透性能	按照设计要求检验一次，当原材料或配合比发生重大变化时，应再次检验	GB/T 50082
4	对收缩性能有要求时	收缩性能		

10.3 高性能混凝土原材料及拌合物

10.3.1 质量检验要求

高性能混凝土原材料及拌合物的质量检验应符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204的规定。

10.4 钢材

10.4.1 质量检验要求

钢材的质量检验应符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204要求。

10.5 预制、安装检验

10.5.1 预制构件的混凝土强度及结构性能检验应符合设计文件及现行国家标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTG F80/1 的有关规定。

10.5.2 预制构件出模后应对外观质量进行全数目测检查。预制构件外观质量的限制缺陷应符合表 10.5.2 的规定。

表 10.5.2 预制构件外观质量的限制缺陷

名称	现象	限制缺陷	
露筋	钢筋未被混凝土材料包裹而形成外露	存在露筋	
蜂窝	表面缺失水泥浆形成的局部蜂窝样	主要受力部位:存在蜂窝; 其他部位:单个蜂窝面积大于 0.02 m ² ,或蜂窝总面积超过所在面面积的 1%,或深度超过 10mm 及 1/2 保护层厚度的蜂窝	单个蜂窝面积大于 0.04 m ² ,或蜂窝总面积超过所在面面积的 2%或深度超过 15mm 及 1/2 保护层厚度的蜂窝
孔洞	深度超过保护层的空穴	存在孔洞	
夹渣	混凝土材料中夹有杂物	存在夹渣	
疏松	由离析、振捣不足而形成的局部不密实	存在疏松	
裂缝	缝隙从混凝土表面延伸至混凝土内部	存在裂缝	
麻面	混凝土材料表面局部缺浆、粗糙或密集小凹坑	麻面总面积超过所在面面积的 2%	
外形缺陷	棱线不直、翘曲不平、飞边凸肋、啃边、崩角	影响结构使用功能或构件安来的外形缺陷,深度超过 1/2 保护层厚度的啃边、崩角	
其他表面缺陷	掉皮、起砂、污染	缺陷超过所在面面积的 2%	

10.5.3 预制构件不应有影响结构性能、安装和使用功能的尺寸偏差。对超过尺寸允许偏差且影响结构性能和安装、使用功能的部位应经设计单位认可，按技术处理方案进行处理，并重新检查验收。

10.5.4 预制构件模具尺寸允许偏差和检验方法应符合表 10.5.4 的规定。

表 10.5.4 预制构件模具尺寸允许偏差和检验方法

序号	检验项目、内容		允许偏差 (mm)	检验方法
1	长度	≤6m	1, -2	用钢尺量平行构件高度方向，取其中偏差绝对

		<6m 且 ≤12m	2, -4	值最大处。
		>12m	3, -5	
2	宽度、高 (厚)度	墩(柱)、台、 梁	1, -2	用钢尺测量两端或中部, 取其中偏差绝对值最大处
3		其他构件	2, -4	
4	底模表面平整度		2	用 2m 靠尺和塞尺量
5	对角线差		3	用钢尺量纵、横两个方向对角线
6	侧向弯曲		L/1500 且 ≤5	拉线, 用钢尺量测侧向弯曲最大处
7	翘曲		L/1500	对角拉线测量交点间距离值的两倍
8	组装缝隙		1	用塞尺量测, 取最大值
9	端模与侧模高低差		1	用钢尺量

注: L—预制构件长度。

10.5.5 预埋件应定位准确、固定牢固, 安装允许偏差和检验方法应符合表 10.5.5 的规定。

表 10.5.5 预埋件、预留孔洞安装允许偏差和检验方法

序号	检验项目		允许偏差 (mm)	检验方法
1	预埋钢板	中心线位置	3	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 记录其中较大值
		平面高差	±2	钢直尺和塞尺检查
2	吊环	中心线位置	3	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 记录其中较大值
		外露长度	+5, 0	用尺量测
3	预埋螺栓	中心线位置	2	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 记录其中较大值
		外露长度	+5, 0	用尺量测
4	预留洞	中心线位置	3	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 记录其中较大值
		尺寸	+3, 0	用尺量测纵横两个方向尺寸, 取其最大值
5	预留插筋	中心线位置	2	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 记录其中较大值
		外露长度	±5	用尺量测

10.5.6 预制构件尺寸偏差和检验方法应符合表 10.5.6 的规定。

表 10.5.6 预制构件尺寸偏差和检验方法

序号	检查项目		允许偏差（mm）	检验方法
1	规格尺寸	长度	≤6m	用尺量两端及中间部，取其中偏差绝对值较
≥6m			±10	
2		宽度	±5	用尺量两端及中间部，取其中偏差绝对值较大值
3		高度	±5	用尺量板四角和四边中部位共 8 处，取其中偏差绝对值较大值
4	表面平整度		3	用 2m 靠尺安放在构件表面上，用楔形塞尺量测靠尺与表面之间的最大缝隙
5	梁柱的侧向弯曲		L/750 且 ≤20mm	拉线，钢尺量最大弯曲处

10.5.7 下部结构拼装接头质量要求应符合设计文件的相关要求。

10.5.7 墩柱、盖梁拼装完成后允许偏差应符合表 10.5.7 规定。

表 10.5.7 墩柱、盖梁拼装允许偏差

项目	规定值或允许偏差	检验方法
倾斜度	±0.1%且 ≤6mm	全站仪或吊线
节段间错台 (mm)	0, 2	尺量
轴线偏位 (mm)	3	全站仪
顶面高程 (mm)	±3	水准仪
相邻墩、柱间距 (mm)	±5	尺量

10.2.8 主梁的施工质量应符合现行《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 的要求。

附录 A 超高性能混凝土轴拉性能试验方法

A.1 一般规定

本方法适用于确定施工配合比、原材料或配合比发生重大变化时，超高性能混凝土轴拉性能的测定。

A.2 试件尺寸和数量

A.2.1 轴拉试件平面尺寸见图 A.1，厚度采用 50mm。

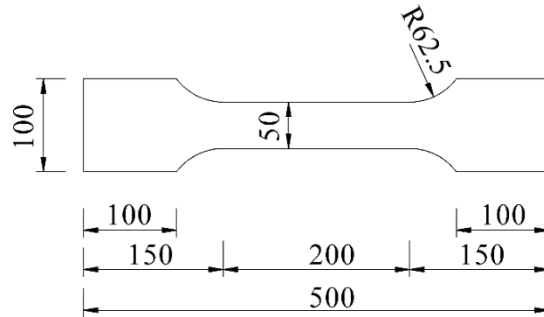


图 A.1 单轴拉伸试验的试件尺寸（尺寸单位：mm）

A.2.2 每组试件数量为 6 个。

A.3 试件制作

A.3.1 试件的浇筑、成型和养护应按 GB/T 31387 的规定进行。

A.3.2 宜在试件变截面段侧面粘贴碳纤维布，亦可采取其它可靠措施强化变截面段受力，碳纤维布宜伸入等截面段 15mm。

A.4 试验仪器设备

A.4.1 拉力试验机的性能要求除应符合《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的有关规定，应可按位移控制模式进行加载。

A.4.2 用于微变形测量的仪器装置应符合下列规定：

a) 用于微变形测量的仪器宜采用位移传感器，也可采用千分表、激光测长仪、引伸仪等。采用位移传感器或千分表时应备有微变形测量固定表架，试件的变形通过微变形测量固定架传递到位移传感器或千分表。采用位移传感器或千分表测量试件变形时，应备有数据自动采集系统；条件许可时，可采用荷载和位移数据同步采集系统；

b) 当采用位移传感器或千分表时，其测量精度应为 $\pm 0.001\text{mm}$ ；当采用激光测长仪或引伸仪时，其测量精度应为 $\pm 0.001\%$ ；

c) 微变形测量仪的标距宜为 200mm。

A.5 试验步骤

A.5.1 到达试验龄期前，将试件在规定的试验环境中自然干燥 1 天后，量测试件等截面区的截面尺寸。试件厚度的取值应取试件不同位置的 6 个数值的平均值，沿长轴方向每边等间距选取 3 个位置量测。当实测尺寸与公称尺寸之差不超过 1mm 时，可按公称尺寸进行计算。试件承压面的不平整度误差不应超过边长的 0.05%，承压面域相邻面的不垂直度不应超过 $\pm 5^\circ$ 。

A.5.2 将试件放置于试验机上下夹具中，上下夹具连接件应与混凝土试件的中轴线一致并对中。在试件弧形段与夹具接触部位可放置 0.5mm~1mm 厚的橡胶垫片或铝垫片。将试件下端与试验机下夹头固定，升降拉力试验机至合适高度，调节试件方向，将试件上端固定。

A.5.3 当采用位移传感器或千分表测量变形时，应将位移传感器或千分表固定在变形测量架，并由标距定位杆进行定位，然后将变形测量架通过紧固螺钉固定在试件中部。

A.5.4 开动试验机进行预拉，预拉荷载为弹性极限荷载的 15%~20%。预拉时，应测量应变

值，计算偏心率，计算方法应符合 GB/T 50081 的规定。当偏心率大于 15% 时，应对试件重新进行对中调整。

A.5.5 预拉完毕后，应重新调整测量仪器，进行正式测试。拉伸试验时，对试件进行连续、均匀加荷，宜采用位移控制加载，加荷速率宜取 0.2mm/min。当采用位移传感器测量变形时，试件测量标距内的变形应由数据采集系统自动记录，绘制荷载-变形曲线。试件初裂前，数据采集频率不宜小于 2Hz；试件初裂后，数据采集频率不宜小于 5Hz。

A.5.6 当满足下列条件之一时，应终止加载，停止试验：

- a) 试件进入拉伸应变软化阶段后拉应力低于峰值荷载的 30% 时。
- b) 试件的拉应变达到 10000×10^{-6} 时。
- c) 试件拉断。

A.6 结果计算和确定

A.6.1 弹性极限点的选取应符合下列规定：

a) 宜取位移传感器和数据采集系统绘制的荷载-变形曲线中，由线性段转为非线性段的点作为弹性极限点；

b) 当荷载-变形曲线中线性段转为非线性段的点不明显时，可取拉应变为 200×10^{-6} 对应的曲线上的点作为弹性极限点。

A.6.2 弹性极限抗拉强度和应变应按照公式 (A.6.2-1) 和公式 (A.6.2-2) 进行计算：

$$f_{te} = \frac{F_A}{b_m h_m} \quad (\text{A.6.2-1})$$

$$\varepsilon_{te} = \frac{l_{te}}{L} \quad (\text{A.6.2-2})$$

式中： f_{te} —— 弹性极限抗拉强度 (MPa)，计算结果精确至 0.01MPa；

F_A —— 弹性极限荷载 (N)，取弹性极限点处的荷载；

b_m 、 h_m —— 轴拉试件中部截面的宽度、厚度 (mm)；

ε_{te} —— 弹性极限拉应变，计算结果精确至 10×10^{-6} ；

l_{te} —— 弹性极限点处拉伸变形 (mm)；

L —— 测试标距 (mm)。

A.6.3 极限抗拉点的选取：按表 5.1.3-2 规定的极限拉应变的取值作为依据选取极限抗拉点，用来确定极限抗拉强度，同时判定应变硬化类型。

A.6.4 极限抗拉强度和应变应按公式 (A.6.4-1) 和公式 (A.6.4-2) 进行计算：

$$f_{tu} = \frac{F_B}{b_m h_m} \quad (\text{A.6.4-1})$$

$$\varepsilon_{tu} = \frac{l_{tu}}{L} \quad (\text{A.6.4-2})$$

式中： f_{tu} —— 极限抗拉强度，计算结果精确至 0.01MPa；

F_B —— 极限抗拉荷载 (N)；

ε_{tu} —— 极限拉应变，计算结果精确至 10×10^{-6} ；

l_{tu} —— 极限抗拉点处的拉伸变形 (mm)。

A.6.5 试验结果的处理：有效轴拉试件的开裂位置应位于标距内，有效轴拉试件数量不应小于 6 个。当有效轴拉试件的数量小于 6 个时，该组试件无效，应重新进行试验。根据所有有效轴拉试件测值的标准值确定弹性极限抗拉强度和极限抗拉强度的最终试验结果。

A.6.6 超高性能混凝土抗拉强度标准值可按公式 (A.6.6-1) 和公式 (A.6.6-2) 进行计算：

$$f_{tk} = f_{te, m-t} S_n \quad (\text{A.6.6-1})$$

$$f_{tu}=f_{tu, m}-tS_n \quad (\text{A.6.6-2})$$

式中: $f_{te, m}$ —— 弹性极限抗拉强度平均值 (MPa), 计算结果精确至0.01MPa;

f_{tk} —— 极限抗拉强度标准值 (MPa), 计算结果精确至0.01MPa;

$f_{tu, m}$ —— 极限抗拉强度平均值 (MPa), 计算结果精确至0.01MPa;

f_{tu} —— 极限抗拉强度标准值 (MPa), 计算结果精确至 0.01MPa;

t —— 检验系数, 可按表A.6.6规定取值;

S_n —— n 组试件的标准差, 计算结果精确至 0.01MPa;

表 A.6.6 检验系数 t 值

试件组数	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	.. .	>30	.. .	∞
t 值	2.92 0	2.35 3	2.13 2	2.10 5	1.94 3	1.89 5	1.86 0	1.83 3	1.81 2	1.79 6	.. .	1.70 0	.. .	1.64 5

A.6.7 抗拉性能是超高性能混凝土的关键性能指标。和普通混凝土不同, 由于钢纤维的存在, 超高性能混凝土在应力超过弹性抗拉强度 f_{te} 后不会立即降为零, 基体开裂后纤维开始承受拉力。随着裂缝继续扩大, 纤维逐渐被拔出, 抗拉性能才明显降低。参考《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》及湖南大学试验结果, 将超高性能混凝土的极限拉应变设计值偏安全地取为 $1500\mu\epsilon$ (UT6-UT8) 或 $2000\mu\epsilon$ (UT9)。按达到极限拉伸应变 ϵ_{tu} 时极限抗拉强度 f_{tu} 与材料弹性抗拉强度 f_{te} 的关系, 将超高性能混凝土材料分为应变软化型 ($f_{tu}/f_{te} \geq 0.7$), 见图 A.2 (a)、应变稳定型 ($f_{tu}/f_{te} \geq 1$), 见图 A.2 (b)、应变高强型 ($f_{tu}/f_{te} \geq 1.1$ 、1.2), 见图 A.2 (c)。

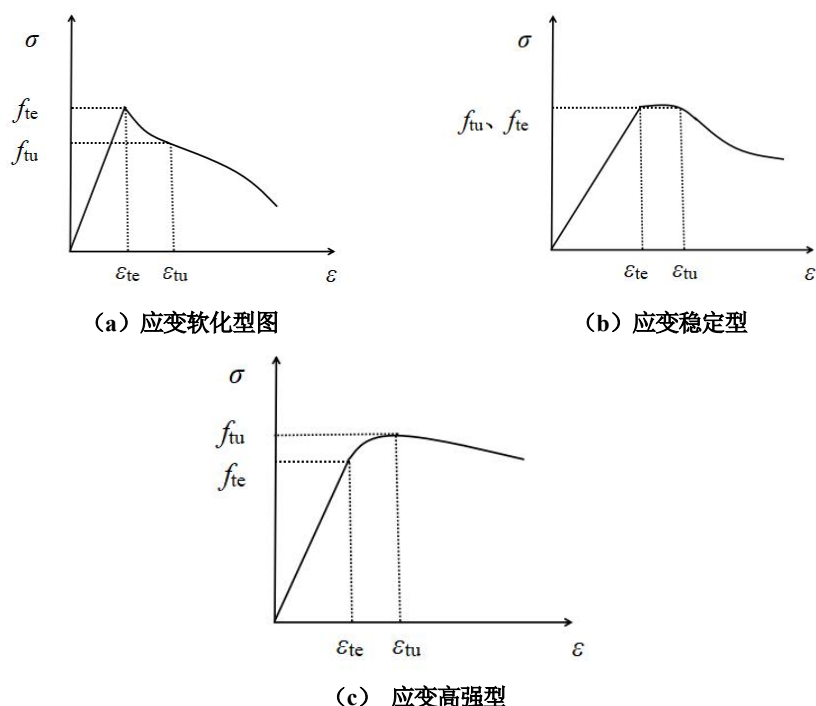


图 A.6.7 超高性能混凝土材料受拉性能图示

附录 B 混凝土涂装材料

涂装体系应由底漆和面漆组成，或由底漆、中间漆和面漆组成。每道涂层均承担特定功能，通过涂层体系的协同作用实现最优保护效果。

B.1 涂装材料底漆

涂装材料底漆技术要求和试验方法见表 B.1。

表 B.1 涂装材料底漆技术要求和试验方法

项目		技术指标	试验方法
在容器中状态		搅拌混合后无硬块，呈均匀状态	目测
冻融稳定性(3 次循环)		不变质	GB/T9268-2008 中 A 法
不挥发物含量/%		商定	GB/T1725-2007
密度/(g/mL)		商定值±0.05	GB/T6750-2007
施工性		施涂无障碍	HG/T5176-2017
涂膜外观		正常	HG/T5176-2017
闪锈抑制性		正常	HG/T5176-2017
干燥时间/h	表干	≤4	GB/T1728-2020
	实干	≤24	GB/T1728-2020
早期耐水性		无异常	HG/T5176-2017
划格试验/级		≤1	GB/T9286-2021
附着力(拉开法)/MPa		≥3	GB/T5210-2006

B.2 涂装材料中间漆

涂装材料中间漆技术要求和试验方法见表 B.2。

表 B.2 涂装材料中间漆技术要求和试验方法

项目		指标	试验方法
在容器中状态		搅拌混合后无硬块，呈均匀状态	目测
冻融稳定性(3 次循环)		不变质	GB/T9268-2008 中 A 法
不挥发物含量/%		商定	GB/T1725-2007
密度/(g/mL)		商定值±0.05	GB/T6750-2007
施工性		施涂无障碍	HG/T5176-2017
涂膜外观		正常	HG/T5176-2017
干燥时间/h	表干	≤4	GB/T1728-2020
	实干	≤24	GB/T1728-2020
耐冲击性/cm		≥40	GB/T1732-2020
划格试验/级		≤1	GB/T9286-2021
早期耐水性		无异常	GB/T1733-1993 中甲法

B.3 涂装材料面漆

涂装材料面漆技术要求和试验方法见表 B.3。

表 B.3 涂装材料面漆技术要求和试验方法

项目		指标	试验方法
在容器中状态		搅拌混合后无硬块，呈均匀状态	目测
冻融稳定性(3 次循环)		不变质	GB/T9268-2008 中 A 法
不挥发物含量/%		商定	GB/T1725-2007
密度/(g/mL)		商定值±0.05	GB/T6750-2007

挥发性有机化合物(VOC)含量/(g/L)		≤250	GB/T23986.2-2023
施工性		施涂无障碍	HG/T5176-2017
涂膜外观		正常	HG/T5176-2017
干燥时间/h	表干	≤4	GB/T1728-2020
	实干	≤24	GB/T1728-2020
弯曲试验/mm		≤3	GB/T6742-2007
耐冲击性/cm		≥40	GB/T1732-2020
划格试验/级		≤1	GB/T9286-2021
光泽（60°）/单位值		商定	GB/T9754-2007
早期耐水性		无异常	GB/T1733-1993 中甲法

B.4 超高性能混凝土涂装材料工艺要求

B4.1 施工环境

施工环境温度应为 5℃~35℃且空气相对湿度不大于 80%；在有雨、雾、雪、大风和较大灰尘的条件下，禁止户外施工。

B4.2 表面处理

a) 超高性能混凝土表面应干燥清洁，对于表面的油污和灰尘，建议使用专门的清洁剂进行低压喷洗或使用软刷轻轻刷洗，随后用淡水枪彻底冲洗以去除所有残留物。

b) 对表面缺陷区域采用腻子进行修复。

B4.3 涂装准备

a) 使用前要确认品牌、型号、颜色、批号等信息，并做好记录

b) 使用动力搅拌装置对涂料进行充分搅拌，确保均匀后再进行施工。应先将各组份单独搅拌至均匀，然后再按照指定比例混合并搅拌至均匀状态。

c) 将混合好的双组份涂料按照产品说明书的指导进行熟化处理（预反应）。

d) 根据施工方法和现场环境的不同，对涂料施工的黏度进行适当调整。调整黏度时，必须使用涂料配套的稀释剂，或者采用制造商推荐的稀释剂。稀释剂的使用量应严格控制，不得超过产品说明书所规定的最大限量。

e) 配制好的涂料应在产品说明书规定的有效期内使用。

B4.5 涂装方法

a) 对于大面积的喷涂，推荐使用高压无气喷涂技术。

b) 对于细长、小面积以及形状复杂的构件，适宜采用空气喷涂或手工刷涂。

c) 对于难以喷涂到的部位，应先采用刷涂法进行预涂装，或在涂装第一道底漆后进行补涂。

B4.6 涂层质量控制

a) 底漆的涂覆必须均匀，确保没有任何未覆盖的区域。对于蜂窝状或边角等难以涂装的部位，应采用刷涂法进行预先涂装或补涂。

b) 中间漆涂膜应无漏涂、裂纹、气泡等瑕疵，允许存在局部少量的流挂现象，且涂膜厚度需符合规定要求。

c) 面漆涂膜必须平整光滑，色泽均匀一致，严禁出现漏涂、裂纹、气泡等缺陷，且厚度应符合规定。当同一工作面需使用同一颜色时，必须采用相同批号的涂料。

附录 C 下部结构预制构件连接构造细节

C.1 连接适用范围

C.1.1 下部结构预制构件连接分为干连接、湿连接两类，各接头形式适用范围应符合本规范 7.2 节要求。

C.2 干连接构造细节

C.2.1 干连接-焊接细部构造：在预制墩柱端头外壁预留凹槽，凹槽内外包钢管，上下墩柱端头的外包钢管采用搭接钢管焊接，搭接钢管上下缘分别与上下钢管围焊。焊接完成后，采用高性能复合砂浆抹面。

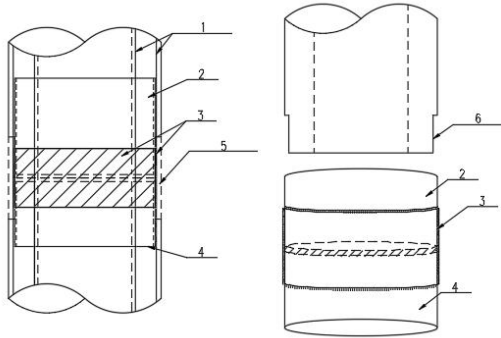


图 C.1 干连接—焊接

1-墩柱纵向钢筋；2-上钢管；3-搭接钢管；4-下钢管；5-高性能复合砂浆；
6-墩柱端头预留凹槽

C.2.2 干连接-啮合式连接细部构造：在预制墩柱端头预埋啮合式端板，上端板带孔，连接鞘通过螺栓孔安装在上端板上，下端板上带连接槽，上墩柱吊装定位后，通过自重将连接鞘插入连接槽内，实现上下墩柱连接，连接段墩柱外表面采用高性能复合砂浆抹面。

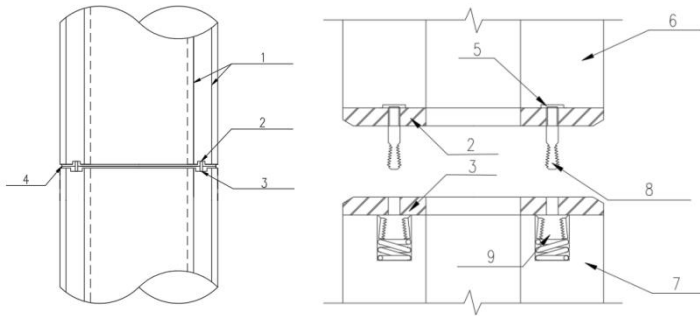


图 C.2 干连接—啮合式连接

1-墩柱纵向钢筋；2-预埋啮合式带孔端板；3-预埋啮合式带槽端板；4-高性能砂浆；
5-螺栓孔；6-上节墩；7-下节墩；8-连接鞘

C.3 湿连接构造细节

C.3.1 湿连接-法兰+后浇 UHPC 连接细部构造：在预制墩柱端头设置实心段，实心段外包钢管，钢管外侧焊接加劲肋，端头焊接钢端板，端板上预留有螺栓孔，上下墩柱定位后采用螺栓连接固定，连接段后浇 UHPC，墩柱内侧纵向钢筋焊接在端板上，外侧纵向钢筋在后浇段内锚固。

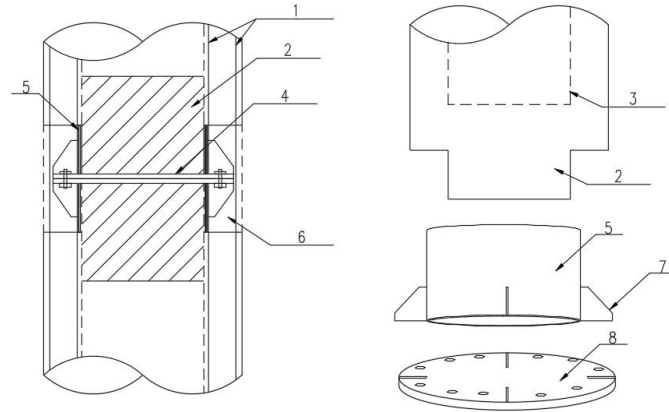


图 C.3 湿连接—法兰+后浇 UHPC 连接

1-墩柱纵向钢筋；2-实心段；3-空心段；4-螺栓连接端钢板；5-钢管；6-后浇 UHPC；
7-加劲肋；8-端板

C.3.2 湿连接-啮合式+后浇 UHPC 连接细部构造：在预制墩柱端头设置实心段，实心段端头预埋啮合式端板，上下墩柱通过啮合式端板连接后，连接段后浇 UHPC 混凝土，墩柱纵向钢筋在后浇段内锚固。

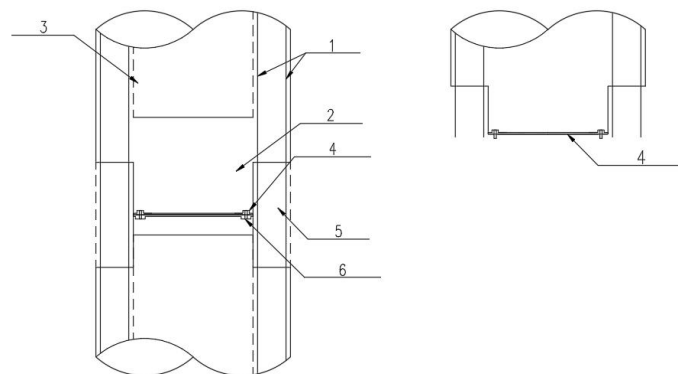


图 C.4 湿连接—啮合式+后浇 UHPC 连接

1- 墩柱纵向钢筋；2-实心段；3-空心段；4-预埋啮合式带孔端板；5-后浇 UHPC；
6-预埋啮合式带槽端板

C.3.3 湿连接-焊接+后浇 UHPC 连接细部构造：在预制墩柱端头设置实心段，上墩柱端头实心段中上部外包钢管，同时在上墩柱实心段下缘预留凹槽，下墩柱实心段预埋钢管形成承插槽，钢管上预留孔，上墩柱实心段插入下钢管中，实心段预留凹槽与钢管预留孔对齐，通过预留孔调整墩柱垂直度，上下墩柱临时定位后，连接段后浇 UHPC 混凝土，墩柱纵向钢筋在后浇段内锚固。

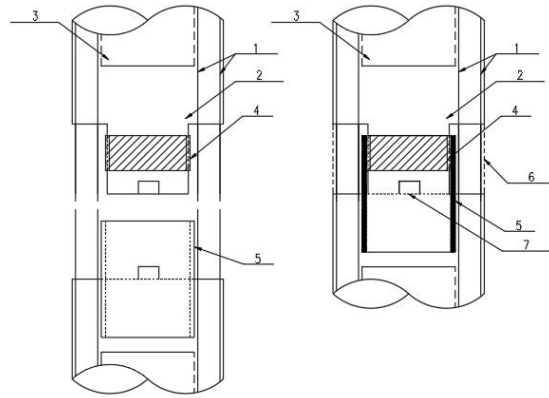


图 C.5 湿连接—焊接+后浇 UHPC 连接

1-墩柱纵向钢筋; 2-实心段; 3-空心段; 4-上钢管; 5-下钢管; 6-后浇 UHPC;
7-调平槽口

C.3.4 湿连接-湿接缝连接细部构造: 采用抱箍实现上下墩柱临时定位后, 连接段后浇混凝土, 墩柱纵向钢筋在后浇段内锚固。

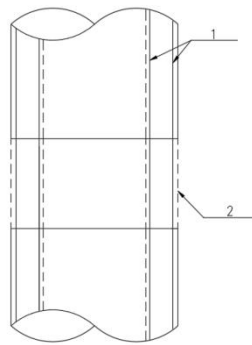


图 C.6 湿连接—后浇 UHPC 连接 (抱箍辅助定位)

1-墩柱纵向钢筋; 2-后浇 UHPC