备案号 J15074-2020

DB

四川省工程建设地方标准

P

DBJ51/ T138-2020

四川省城镇节段预制超高性能混凝土梁桥技术标准

Technical standards for UHPC Girder Bridge with Segmental Precast Method for Sichuan Province

2020-01-10 发布　　2020-04-01 实施

四川省住房和城乡建设厅　　发布

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

四川省工程建设地方标准

四川省城镇节段预制超高性能混凝土梁桥技术标准

Technical standards for UHPC Girder Bridge with Segmental Precast Method for Sichuan Province

DBJ51/T 138－2020

主编部门：四川省住房和城乡建设厅
批准部门：四川省住房和城乡建设厅
施行日期：2020年4月1日

西南交通大学出版社

2020 成都

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

四川省工程建设地方标准

四川省城镇节段预制超高性能混凝土梁桥技术标准

Technical standards for UHPC Girder Bridge with Segmental Precast Method for Sichuan Province

DBJ51/T 138－2020

*

西南交通大学出版社出版、发行

（四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼）

各地新华书店、建筑书店经销

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸：140 mm×203 mm　　印张：5　　字数：127 千

2020 年 5 月第 1 版　　2020 年 5 月第 1 次印刷

定价：**36.00** 元

统一书号：155643·74

版权所有　盗版必究（举报电话：028-87600562）

图书如有印装质量问题，本社负责退换

（邮政编码　610031）

网　　址：http://www.xnjdcbs.com

网上书店：https://xnjtdxcbs.tmall.com

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

关于发布工程建设地方标准的通知

川建标发〔2020〕14号

各市州及扩权试点县住房城乡建设行政主管部门，各有关单位：

经我厅组织专家审查通过，现批准以下8项为四川省推荐性工程建设地方标准（见附件）。

四川省住房和城乡建设厅

2020年1月10日

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

附件

序号	地方标准名称	主编单位	标准号	实施时间	负责技术内容解释单位
1	四川省城市轨道交通工程整体预制简支箱梁施工技术标准	中铁二十三局集团有限公司	DBJ51/T133-2020	2020.4.1	中铁二十三局集团有限公司
2	四川省城镇污水处理厂运行管理标准	四川省城镇供水排水协会、成都市兴蓉环境股份有限公司	DBJ51/T134-2020	2020.4.1	四川省城镇供水排水协会
3	四川省混凝土结构居住建筑装配式装修工程技术标准	成都市土木建筑学会、成都建工集团有限公司	DBJ51/T135-2020	2020.4.1	成都市土木建筑学会
4	四川省房屋建筑和市政基础设施建设工程质量监督标准	成都衡泰工程管理有限责任公司、四川省建设工程质量安全总站	DBJ51/T136-2020	2020.4.1	成都衡泰工程管理有限责任公司
5	四川省塔式起重机装配式基础技术标准	四川省装配式建筑产业协会、四川鑫塔塔机基础设备有限责任公司	DBJ51/T137-2020	2020.4.1	四川省装配式建筑产业协会
6	四川省城镇节段预制超高性能混凝土梁桥技术标准	四川西南交大土木工程设计有限公司	DBJ51/T138-2020	2020.4.1	四川西南交大土木工程设计有限公司
7	四川省玻璃幕墙工程技术标准	四川省建筑设计研究院有限公司、中国建筑西南设计研究院有限公司	DBJ51/T139-2020	2020.4.1	四川省建筑设计研究院有限公司
8	四川省不透水土层地下室排水卸压抗浮技术标准	四川省建筑科学研究院有限公司、四川省建筑设计研究院有限公司	DBJ51/T140-2020	2020.4.1	四川省建筑科学研究院有限公司

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

前　言

本标准根据四川省住房和城乡建设厅《关于下达工程建设地方标准〈四川省城镇节段预制超高韧性混凝土梁桥技术标准〉编制计划的通知》（川建标发〔2018〕240号）的要求，由四川西南交大土木工程设计有限公司会同有关单位共同编制完成。

标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国际和国内有关先进标准，并在广泛征求意见的基础上，多次讨论、修改和完善，制定本标准。

本标准共分 8 章，主要内容是：1　总则；2　术语和符号；3　基本规定；4　材料；5　设计；6　施工；7　检验与验收；8　管养与维护。

本标准由四川省住房和城乡建设厅负责管理，由四川西南交大土木工程设计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，请寄送四川西南交大土木工程设计有限公司（地址：成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 2002；邮编：610000；电话：028-87600952；E-mail：jdtm@jdtm.com.cn），以便今后修订时参考。

主 编 单 位： 四川西南交大土木工程设计有限公司

参 编 单 位： 西南交通大学

四川省交通勘察设计研究院有限公司

广东冠粤路桥有限公司

广东冠生土木工程技术股份有限公司

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

中国水利水电第七工程局有限公司

中国五冶集团有限公司

成都交投建筑工业化有限公司

成都建工工业化建筑有限公司

成都市城市道路桥梁管理处

主要起草人： 谢尚英　何　畏（以下按姓氏笔画排列）

王朝伦　王　欢　代小强　冯身强

任清顺　刘建国　闫兴非　李兴林

李福海　张　锐　陈　刚　陈　宁

李自坤　李　丽　郑爱华　周晓夫

罗建林　周志敏　周　迅　苟　超

夏维学　黄　燕　彭友松　黎志忠

魏英杰

主要审查人： 马庭林　李建民　董武斌　罗进元

田　波　段　政　张仕忠

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

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 …… 8

3.1　设　计 …… 8

3.2　施　工 …… 8

3.3　检验与验收 …… 9

3.4　管　养 …… 9

4　材　料 …… 10

4.1　超高性能混凝土 …… 10

4.2　其他材料 …… 14

5　设　计 …… 17

5.1　一般规定 …… 17

5.2　持久状况承载能力极限状态计算 …… 19

5.3　持久状况正常使用极限状态计算 …… 32

5.4　持久状况和短暂状况构件的应力计算 …… 39

5.5　疲劳验算 …… 43

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.6 耐久性设计 ……46
5.7 构件计算 ……48
5.8 构造要求 ……54
6 施 工 ……62
6.1 一般规定 ……62
6.2 原材料准备及储存 ……62
6.3 模板与支架 ……63
6.4 节段预制 ……64
6.5 节段移运与堆放 ……69
6.6 逐跨拼装施工 ……71
6.7 悬臂拼装施工 ……75
6.8 拼装设备 ……77
6.9 湿接缝施工 ……78
7 检验与验收 ……79
7.1 一般规定 ……79
7.2 原材料进场检验 ……79
7.3 质量检验 ……80
7.4 质量验收 ……87
8 管养与维护 ……89
8.1 一般规定 ……89
8.2 管理养护 ……89
8.3 维护与维修 ……90

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

附录 A　UHPC 用钢纤维性能检验方法 ····· 91
附录 B　UHPC R120 收缩应变和徐变系数计算 ····· 94
附录 C　UHPC 拉伸本构模型 ····· 97
附录 D　UHPC 抗拉性能试验方法 ····· 99
本标准用词说明 ····· 105
引用标准名录 ····· 107
附　条文说明 ····· 109

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

Contents

1 General ····· 1

2 Terms and notations ····· 2

2.1 Definition of terms ····· 2

2.2 Notations ····· 3

3 Basic requirements ····· 8

3.1 Design ····· 8

3.2 Construction ····· 8

3.3 Acceptance ····· 9

3.4 Management and maintenance ····· 9

4 Materials ····· 10

4.1 Ultra-high performance concrete ····· 10

4.2 Other materials ····· 14

5 Design ····· 17

5.1 General requirement ····· 17

5.2 Verification of ultimate limit state ····· 19

5.3 Verification of serviceability limit state ····· 32

5.4 Calculation of stresses under long-term and short-term loads ····· 39

5.5 Verification of Fatigue ····· 43

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.6 Design of durability ····· 46
5.7 Design of construction joint ····· 48
5.8 Structural details ····· 54
6 Construction ····· 62
6.1 General requirement ····· 62
6.2 Preparation and storage ····· 62
6.3 Formwork and brackets ····· 63
6.4 Segment precast ····· 64
6.5 Transportation and stacking ····· 69
6.6 Span by span construction ····· 71
6.7 Balanced cantilever construction ····· 75
6.8 Assembly equipment ····· 77
6.9 Construction for wet joints ····· 78
7 Inspection and quality acceptance ····· 79
7.1 General requirement ····· 79
7.2 Raw material entrance inspection ····· 79
7.3 Construction quality inspection ····· 80
7.4 Quality acceptance ····· 87
8 Management and maintenance ····· 89
8.1 General requirement ····· 89
8.2 Management and maintenance ····· 89
8.3 Repairing work ····· 90

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

Appendix A Performance test for steel fiber in UHPC ····· 91
Appendix B Calculation for shrinkage and creep coefficient of UHPC R120 ····· 94
Appendix C Constitutive model for UHPC in tension ····· 97
Appendix D Performance test for UHPC in tension ····· 99
Explanation of wording in this standard ····· 105
List of quoted standards ····· 107
Addition: explanation of provisions ····· 109

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

1 总 则

1.0.1 为规范城镇节段预制超高性能混凝土梁桥的设计、施工与质量验收，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建的城镇节段预制超高性能混凝土梁桥的设计、施工、验收与管养。

1.0.3 城镇节段预制超高性能混凝土梁桥的设计、施工、管养维护应遵循安全、适用、耐久、环保、经济的原则。

1.0.4 节段预制超高性能混凝土梁桥结构的设计、施工、管养维护除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 超高性能混凝土 ultra-high performance concrete

由水泥、细集料、矿物掺合料、短纤维、外加剂和水等材料组成的超高强增韧的水泥基复合材料，简称 UHPC。

2.1.2 预拌合料 premix mixture

由水泥、细集料、矿物掺合料及外加剂等按照确定的配合比组成，经干拌均匀后的混合物。

2.1.3 纤维体积率 fiber volume fraction

在超高性能混凝土中，纤维所占的体积百分比。

2.1.4 纤维取向系数 fiber orientation coefficient

纤维混凝土结构中纤维实际沿某一特定方向分布的取值系数，即实际纤维分布与假定空间随机分布的力学特征值之比。

2.1.5 高温蒸汽养护 high temperature steam treating

超高性能混凝土构件成型后在高温蒸汽环境中持续养护一段时间后达到强度等级，这一养护过程称为高温蒸汽养护。

2.1.6 剪力键 shear key

预制节段拼接缝两侧表面用于抵抗剪力、凹凸密接匹配的多重键块（槽）。

2.1.7 基于超细颗粒最大堆积理论的材料 material of theory of densified System with ultra-fine Particles

基于用充分分散的超细颗粒（硅灰）填充在水泥颗粒堆积体

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

系的空隙中，实现颗粒堆积致密化理论的材料，简称 DSP 材料。

2.2 符　号

2.2.1 材料性能

$f_{cu,k}$——边长 100 mm 的超高性能混凝土立方体抗压强度标准值；

f_{ck}、f_{cd}——超高性能混凝土的轴心抗压强度标准值、设计值；

E_c——超高性能混凝土的抗压/抗拉弹性模量；

f_{tk}、f_{td}——超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；

ε_0、ε_{cu}——超高性能混凝土受压峰值应变、极限压应变；

ε_{tu}——超高性能混凝土极限拉应变；

$f_{flexura,d}$——超高性能混凝土板名义弯拉应力设计值；

τ_{cd}——超高性能混凝土抗剪强度设计值；

G_c——超高性能混凝土剪切模量；

μ_c——超高性能混凝土泊松比；

α_c——超高性能混凝土温度膨胀系数；

$f_{pd,e}$——纵向体外预应力钢束极限应力设计值；

$f_{pk,i}$、$f_{pd,i}$——纵向体内预应力钢筋抗拉强度标准值、设计值；

$f^f_{flexura,d}$——超高性能混凝土板名义疲劳弯拉强度设计值；

Δf^f_{sd}——普通钢筋疲劳应力幅限值；

Δf^f_{pd}——预应力钢筋疲劳应力幅限值；

f_{sd}、f_{pd}——普通钢筋、预应力钢筋抗拉强度设计值；

f'_{sd}、f'_{pd}——普通钢筋、预应力钢筋抗压强度设计值；

f_{sv}——抗剪箍筋抗拉强度设计值；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

E_s、E_p——普通钢筋、预应力钢筋的弹性模量。

2.2.2 作用和作用效应

$\sigma_{pe,p}$——体外预应力筋有效预应力；

$\Delta\sigma_p$——体外预应力筋的预应力增量；

M_d——弯矩组合设计值；

M_u——构件正截面抗弯承载力；

$\sigma_{pi,0}$、$\sigma'_{pi,0}$——截面受拉区、受压区纵向预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时预应力钢筋的应力；

V_d——剪力组合设计值；

V_u——构件斜截面抗剪承载力；

V_c——构件斜截面 UHPC 受剪承载力设计值；

V_s——构件斜截面箍筋受剪承载力设计值；

V_f——构件斜截面纤维受剪承载力设计值；

V_p——与斜截面相交的预应力弯起钢筋受剪承载力设计值；

N_{Ed}——基本组合下轴力设计值；

$\Delta\sigma_s^f$——受拉区普通钢筋应力幅；

$\Delta\sigma_p^f$——受拉区预应力钢筋应力幅；

w_t、w_{tl}——UHPC 表面裂缝宽度；

f_{ctfm}——UHPC 最大开裂应力平均值；

$f_{ctm,el}$——UHPC 弹性阶段极限拉应力平均值；

σ_{si}、σ_{pi}——第 i 层纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力；

σ_{pc}——扣除全部预应力损失后的预加力在构件抗裂验算边缘产生的 UHPC 预压应力；

σ_{pe}、σ'_{pe}——截面受拉区、受压区纵向预应力钢筋的有效预应力；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

σ_{st}——在作用（或荷载）频遇组合下构件抗裂验算边缘 UHPC 的法向拉应力；

σ_{tp}——在作用（或荷载）频遇组合和预加力产生的 UHPC 主拉应力；

σ_{kc}、σ_{kt}——由作用（或荷载）标准值产生的混凝土法向压应力、拉应力

σ'_{cc}、σ'_{ct}——按短暂状况计算时截面预压区、预拉区边缘混凝土的压应力、拉应力。

2.2.3 几何参数

b_{mi}——截面有效宽度；

b——矩形截面宽度，T 形或 I 形截面腹板宽度；

x——受压区等效矩形应力图高度；

β——受压区等效矩形应力图高度与实际受压区高度的比值；

ξ_b——正截面相对界限受压区高度

x'——受拉弹性区高度；

h_0——截面有效高度；

A_s、A'_s——构件受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；

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

$A_{p,e}$——体外预应力钢筋的截面面积；

a、a'——构件受拉区、受压区普通钢筋和预应力钢筋合力点至截面近边的距离；

b_f、b'_f——T 形或 I 形截面受拉区、受压区的翼缘宽度；

h_f、h'_f——T 形或 I 形截面受拉区、受压区的翼缘厚度；

A_{sv}——同一截面内箍筋各肢的总截面面积；

ω_{lim}——最大裂缝宽度；

ω_u——抗弯极限状态下外露纤维位置大裂缝宽度；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

ω_{max}——最大裂缝宽度限值；

A_{fv}——纤维作用面积；

ε_u——抗弯极限状态下外露纤维位置极限拉应变；

ε_{lim}——最大允许应变；

ε_{el}——最大弹性拉应变；

ε_{max}——最大应变限值；

s——钢筋中心间距；

c——混凝土保护层厚度；

$S_{r,max,f}$——最大裂缝间距；

$\varepsilon_{sm,f}$——裂缝间钢筋的平均应变；

$\varepsilon_{cm,f}$——裂缝间 UHPC 的平均应变；

$h_{c,eff}$——UHPC 有效受拉高度；

l_0——保护层厚度对裂缝间距的影响；

l_t——传递长度；

l_f——钢纤维长度；

2.2.4 计算系数及其他

ξ_b——构件正截面相对界限受压区高度；

K、K_{global}、K_{local}——纤维取向系数、整体纤维取向系数、局部纤维取向系数；

γ_0——桥梁结构的重要性系数；

ϕ_f——抗弯承载力接缝折减系数；

ϕ_v——抗剪承载力接缝折减系数；

γ_{cf}——纤维安全系数；

γ_E——安全系数；

k_N——荷载或预应力提高系数；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

α_{cc}——荷载长期效应系数；

γ_c——混凝土材料分项系数；

η_s——混凝土局部承压修正系数；

k_t——荷载特征系数；

δ——钢筋对保护层厚度和粘结强度的增强系数；

k_2——开裂截面的应变分布影响系数；

η——钢筋粘结系数。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

3 基本规定

3.1 设 计

3.1.1 节段预制拼装 UHPC 梁桥设计应符合城乡规划要求，结合水文、地质、通航和环境等条件，考虑因地制宜、便于施工和养护等因素进行总体设计。在设计使用年限内应满足规定的正常通行需要。

3.1.2 节段预制拼装 UHPC 梁桥采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，桥梁结构的设计基准期为 100 年。

3.1.3 桥梁主体结构的设计使用年限不应低于 100 年；体外预应力钢索应可更换，设计使用年限不应低于 25 年。

3.1.4 节段预制拼装 UHPC 梁桥的预制节段接缝应采用胶接缝或现浇 UHPC 接缝；纵向接缝应采用现浇 UHPC 接缝，施加适当的横向预应力时也可采用胶接缝。

3.1.5 当桥梁宽度较大且设有分隔带时，节段预制拼装 UHPC 梁桥的横断面宜以分隔带为界分幅布置。

3.1.6 节段预制拼装 UHPC 梁的预制拼装单元宜采用箱形截面。

3.1.7 预制拼装 UHPC 梁桥应根据所采用结构的特点设置检修通道，其位置、尺寸应满足检修、养护及易损件更换所需的操作空间要求。

3.2 施 工

3.2.1 节段预制拼装 UHPC 梁施工前应根据技术特点编制专项施工方案，内容应包括构件制作、运输、安装方案、质量及安全

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

保障措施等。

3.2.2 节段预制拼装 UHPC 梁施工单位应具备相应的生产工艺设施、完善的质量管理体系和试验检测设施。

3.2.3 节段预制拼装 UHPC 梁施工应根据预制场地条件、设计要求、施工工艺等，确定采用短线法或长线法预制节段，节段宜采用工厂化生产。

3.2.4 UHPC 梁预制节段成型后宜进行蒸汽养护，养护要求应符合现行行业标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定。

3.3 检验与验收

3.3.1 施工中应按检验验收规定和设计文件的要求进行施工过程与成品质量控制，确保工程质量。

3.3.2 超高性能混凝土的性能检验分为全面性能检验和质保性能检验。原材料变更或配合比调整时，应重新进行全面性能检验。生产超高性能混凝土需日常进行的质保性能检验指标包括工作性、抗压强度、抗拉强度或抗弯强度。

3.4 管 养

3.4.1 节段预制拼装 UHPC 梁桥养护类别为Ⅰ类，养护等级为Ⅰ等。

3.4.2 节段预制拼装 UHPC 梁桥的管养应符合现行行业标准《城市桥梁养护技术标准》CJJ 99 的规定。

3.4.3 节段预制拼装 UHPC 梁桥应设立永久控制监测点，宜设置结构健康监测系统。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

4 材 料

4.1 超高性能混凝土

4.1.1 UHPC 的水胶比不宜大于 0.27，其细集料宜采用石英砂和石英粉。

4.1.2 短纤维宜采用由平直钢纤维和端钩钢纤维组成的混合纤维，钢纤维宜采用镀铜微细高强度钢纤维。

4.1.3 钢纤维体积率不应小于 2.0%，其性能指标应符合表 4.1.3-1 的规定，几何参数应符合表 4.1.3-2 的规定。

表 4.1.3-1 钢纤维的性能指标

项 目	性能指标
抗拉强度/MPa	≥2 000
长度合格率	≥96%
直径合格率	≥90%
形状合格率	≥96%
杂质含量	≤1.0%

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 4.1.3-2　钢纤维的几何参数

纤维类型	长度/mm	直径/mm
平直钢纤维	12 ~ 14	0.18 ~ 0.22
Ⅰ类端钩钢纤维	12 ~ 14	0.18 ~ 0.22

4.1.4　UHPC的强度等级应根据边长为100 mm立方体试件的抗压强度划分为UHPC R120、UHPC R150，其性能指标不应小于表4.1.4的规定。

表 4.1.4　UHPC 轴心抗压强度、抗拉强度取值

强度等级	抗压强度/MPa			轴心抗拉强度/MPa			极限拉伸应变 ε_{Utu}
	立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$	轴心抗压强度标准值 f_{ck}	设计值 f_{cd}	标准值 f_{tk}	*设计值 $f'_{td}=f_{tk}/(K\gamma_{cf})$		
					K=1.25	K=1.75	
UHPC R120	120	85	60	6.0	3.31	2.36	1.5‰
UHPC R150	150	105	75	7.5	4.13	2.95	1.5‰

注：*对纤维取向系数 K，整体纤维取向系数 K_{global} 取 1.25，局部纤维取向系数 K_{local} 取 1.75；γ_{cf} 取 1.45。

4.1.5　UHPC 受压应力-应变关系按式（4.1.5）确定，其中对于UHPC R120，峰值应变取 $\varepsilon_0 = 0.001\,5$，极限压应变取 $\varepsilon_{cu} = 0.003\,3$，其设计受压应力-应变曲线如图 4.1.5 所示。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$\begin{cases} \sigma_c = f_{cd} \times \left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) & (\varepsilon \leqslant \varepsilon_0) \\ \sigma_c = f_{cd} & (\varepsilon_0 \leqslant \varepsilon \leqslant \varepsilon_{cu}) \end{cases} \tag{4.1.5}$$

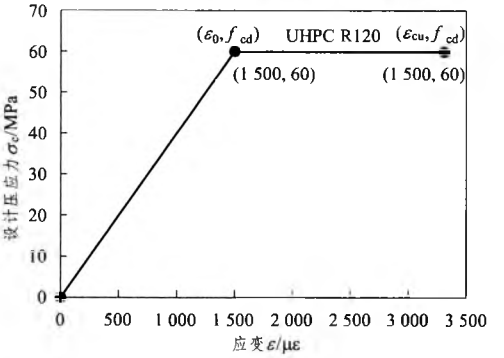
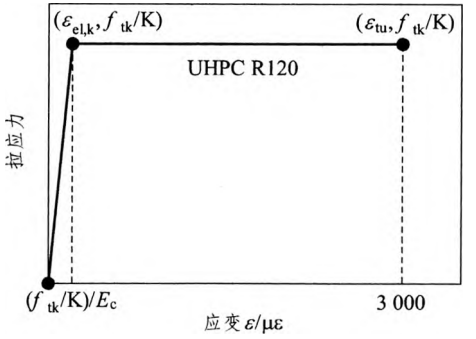


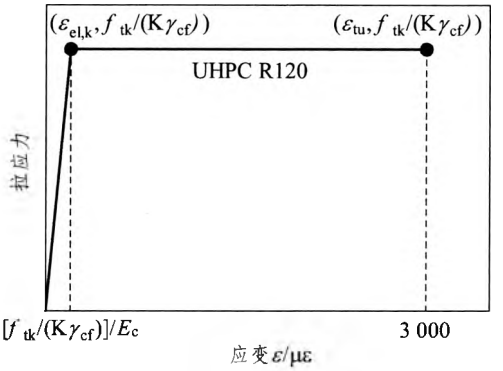
图 4.1.5　UHPC R120 设计受压应力–应变曲线

4.1.6　UHPC 具有轴拉应变硬化特性。UHPC R120 的承载能力极限状态和正常使用极限状态设计轴拉应力-应变曲线如图 4.1.6 所示，其中，UHPC R120 的极限拉应变设计值取ε_{tu} = 3 000 με，纤维曲线系数 K 和受拉材料分项系数γ_{cf}按本标准第 4.1.4 条取值。



（a）正常使用极限状态

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载



（b）承载能力极限状态

图 4.1.6　UHPC R120 设计轴拉应力–应变曲线

4.1.7　UHPC 的抗剪强度宜通过试验确定；当无试验资料时，可按 $\tau_{cd} = 0.095 f_{ck}$ 计算取值。

4.1.8　UHPC 的弹性模量宜采用 100 mm × 100 mm × 300 mm 的试件测定；当无试验资料时，UHPC R120 弹性模量可按 4.0×10^4 Mpa 取值。

4.1.9　UHPC 的剪切模量 G_c 取 $0.4E_c$。

4.1.10　配筋 UHPC 的容重取 27 kN/m^3。

4.1.11　UHPC 的泊松比 μ_c 取 0.2。UHPC 的温度线膨胀系数 α_c 取 1.1×10^{-5}/ °C。

4.1.12　在不同的养护条件下，UHPC 的收缩应变和徐变系数按表 4.1.12 取值，计算方法可按本标准附录 B 执行。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 4.1.12　UHPC 的收缩应变和徐变系数

养护条件	养护之后的后期收缩应变/με	徐变系数
90 °C 高温蒸汽养护 2 d 或 80 °C 高温蒸汽养护 3 d	0<且<10	0.2/0.3
自然养护 28 d（相对湿度 50% ~ 70%）	210	0.8/0.9

4.1.13　UHPC 扩展度不小于 600 mm，且应符合现行行业标准《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283 的规定。

4.1.14　UHPC 的耐久性应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的规定。

4.2　其他材料

4.2.1　预制节段拼装采用胶接缝时，其胶接缝材料宜采用缓凝型环氧树脂胶粘剂，适宜施工温度范围为+5 °C ~ +40 °C，其主要技术指标应满足表 4.2.1 的要求：

表 4.2.1　环氧树脂胶技术性能指标

性能项目		性能指标
胶体性能	抗拉强度/MPa	≥30
	受拉弹性模量/MPa	≥4 000
	伸长率	1.3%

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

续表

性能项目			性能指标
胶体性能	抗弯强度/MPa		≥45，且不得呈脆性破坏
	抗压强度/MPa	12 h	≥50
		1 d	≥80
		7 d	≥100
	压缩弹性模量/MPa		≥8 000
	触变性（抗流挂性能）		厚度最薄为 3 mm 时，无流挂
	抗剪强度（倾斜柱面测试）/MPa		≥15
	湿热老化测试		A 级胶（JTG/T J22）
粘接能力	与混凝土的正拉粘结强度/MPa		≥max[2.5，f_{tk}]
不挥发物含量（固体含量）/%			≥99%
凝胶时间/h			≥1
可胶接时间/h			≥6

4.2.2 体内预应力管道灌浆材料可采用 DSP 材料，采用 DSP 材料时其性能指标应满足表 4.2.2 的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 4.2.2　DSP 材料性能指标要求

项　目			性能指标
流动度/mm			≥200
竖向膨胀率	3 h		0.1 ~ 3.5
	24 h 与 3 h 的膨胀值之差		0.02 ~ 0.5
泌水率			0
抗压强度/MPa		3 d	45 ~ 90
		28 d	100 ~ 120
施工温度/°C			0 ~ 60

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5 设 计

5.1 一般规定

5.1.1 UPHC 桥梁结构应进行下列极限状态设计：

1 承载能力极限状态：应包括结构、构件和接缝的强度验算、疲劳验算，结构、构件的稳定、滑移及倾覆验算等。

2 正常使用极限状态：应包括影响结构、构件正常使用的变形验算，构件和接缝的应力验算，及影响结构耐久性的抗裂性验算和耐久性设计。

5.1.2 UHPC 桥梁结构设计应根据不同种类的作用及其对结构的影响、结构所处的环境条件，按下列四种设计状况进行极限状态设计：

1 持久状况应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计；

2 短暂状况应进行承载能力极限状态设计，可根据需要进行正常使用极限状态设计；

3 偶然状况应进行承载能力极限状态设计；

4 地震状况应进行承载能力极限状态设计。

5.1.3 UHPC 桥梁结构的设计安全等级应采用一级。

5.1.4 UHPC 桥梁结构作用效应计算应符合下列要求：

1 按弹性方法进行计算，当结构的二阶效应对结构受力不利时应计入；

2 计入施工方法及顺序的影响；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

3　计入 UHPC 收缩徐变、沉降及温度等因素及其次效应的影响；

4　汽车荷载作用效应宜采用空间模型计算，当采用平面杆系模型计算时应计入偏载效应。

5.1.5　UHPC 桥梁结构按线弹性方法计算时应采用下列基本假定：

1　UHPC 为理想线弹性体；

2　UHPC 桥梁结构弯曲时，截面符合平截面假定。

5.1.6　计算 UHPC 桥梁受弯构件承载能力和应力时，T 形、I 形及箱形截面梁的受压翼缘应取有效宽度；截面有效宽度 b_{mi} 应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的有关规定。

5.1.7　在施工和使用阶段，应根据 UHPC 箱梁桥的结构特点、施工方法和不同工况状态，对 UHPC 箱梁的顶板、底板和腹板进行稳定性验算。

5.1.8　节段预制拼装的 UHPC 箱形截面梁桥，应对接缝抗剪承载能力（包括接缝抗剪破坏承载力、接缝直剪承载力）进行验算，接缝抗剪承载力不应小于主梁斜截面抗剪承载力；结构复杂桥梁或条件允许时，接缝抗剪承载能力宜开展相关试验研究确定。

5.1.9　UHPC 桥梁结构的设计应包括下列内容：

1　结构设计方案，包括截面设计、结构选型及构件布置；

2　作用及作用效应分析；

3　结构及构件的极限状态设计；

4　结构及构件的构造设计、连接措施，接缝设计；

5　预制施工的便利性设计；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

6　结构及构件满足特殊要求的专项设计。

5.1.10　UHPC 桥梁结构的设计除应符合本标准的规定外，尚应符合现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11、《公路桥涵设计通用规范》JTG D60、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362、《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 的有关规定。

5.2　持久状况承载能力极限状态计算

5.2.1　UHPC 桥梁构件正截面承载能力应按下列基本假定计算：

1　构件截面保持平面，即符合平截面假定；

2　除干接缝和胶接缝处截面外，其余截面受拉 UHPC 应考虑抗拉强度的作用，按本标准 5.2.3 条的规定执行；

3　体内纵向钢筋应力等于钢筋应变与其弹性模量的乘积，但其值应符合下列要求：

$$-f'_{sd} \leqslant \sigma_{si} \leqslant f_{sd} \tag{5.2.1-1}$$

$$-(f'_{pd} - \sigma_{p0i}) \leqslant \sigma_{pi} \leqslant f_{pd} \tag{5.2.1-2}$$

式中：σ_{si}、σ_{pi}——第 i 层纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力，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》JTG 3362 的规定计算，正值表示拉应力、负值表示压应力；

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，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》JTG 3362 的规定采用；

f_{pd}、f'_{pd}——纵向预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

度设计值，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》JTG 3362的规定采用；

σ_{p0i}——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，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》JTG 3362的规定计算。

5.2.2 UHPC 受弯构件正截面受压区混凝土压应力计算应符合下列规定：

1 正截面受压区 UHPC 的压应力图形简化为等效的矩形应力图；

2 等效矩形应力图高度与实际受压区高度的比值β，本标准取值为 0.77；

3 矩形应力图的压力强度取UHPC的轴心抗压强度设计值 f_{cd}。

5.2.3 UHPC 受弯构件正截面受拉区 UHPC 拉应力计算应符合下列规定：

1 正截面受拉区 UHPC 的拉应力图形简化为等效的矩形应力图。

2 等效矩形应力图高度取实际受拉区的高度，受拉区等效矩形应力图高度 x_t 可按下式计算：

$$x_t = h - \frac{x}{\beta} \tag{5.2.3}$$

式中：h——截面高度；

x——受压区等效矩形应力图高度；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

β——受压区等效矩形应力图高度与实际受压区高度的比值。

3 矩形应力图的拉力强度取0.5倍的UHPC轴心抗拉强度设计值f_{td}。

5.2.4 预制节段拼装桥梁的正截面抗弯承载力和抗剪承载能力应考虑接缝的折减作用，折减系数可按表5.2.4取值。

表5.2.4 承载能力折减系数

类型	符号	折减系数	
		体内预应力体系	体外预应力体系
抗弯承载力接缝折减系数	ϕ_f	0.95	0.90
抗剪承载力接缝折减系数	ϕ_v	0.90	0.85

注：表中折减系数对应的接缝类型为湿接缝和环氧树脂接缝，不适用于干接缝。

5.2.5 主梁受弯构件的纵向受拉钢筋屈服和截面受压区混凝土破坏同时发生（即界限破坏）时，构件的正截面相对界限受压区高度ξ_b应按表5.2.5取值。

表5.2.5 相对界限受压区高度ξ_b

钢筋种类	ξ_b	备注
HRB400	0.48	1. 截面受拉区内配置不同种类钢筋的受弯构件，其ξ_b值应选用相应于各种钢筋的较小者； 2. $\xi_b = x_b / h_0$，x_b为纵向受拉钢筋和受压区UHPC同时达到其强度设计值时的受压区高度
钢绞线	0.36	

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.2.6 体外预应力钢束的极限应力设计值按式（5.2.6）计算。

$$f_{pd,e} = \sigma_{pe,e} - \Delta\sigma_p \tag{5.2.6}$$

式中：$f_{pd,e}$——体外预应力钢束极限应力设计值；

$\sigma_{pe,e}$——体外预应力有效预应力值；

$\Delta\sigma_p$——体外预应力束预应力增量，取 50 MPa。

5.2.7 节段预制 UHPC 箱梁结构正截面抗弯承载能力验算应按式（5.2.7）计算。

$$\gamma_0 M_d \leqslant \phi_f M_u \tag{5.2.7}$$

式中：M_d——基本组合弯矩设计值；

M_u——正截面抗弯承载能力，按本标准规定计算；

ϕ_f——抗弯承载力接缝折减系数，按表 5.2.4 规定取值。

5.2.8 矩形截面 UHPC 受弯构件，其正截面抗弯承载能力应符合下列规定：

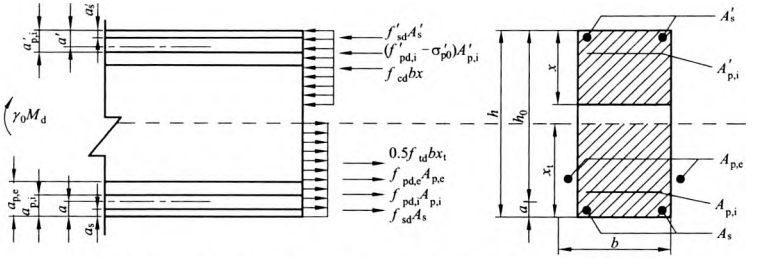


图 5.2.8 矩形截面 UHPC 受弯构件正截面承载力计算

$$M_u = f_{cd}bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s) + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i}(h_0 - a'_{p,i}) - 0.5f_{td}bx_t\left(\frac{x_t}{2} - a\right) \tag{5.2.8-1}$$

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

UHPC 截面受压区高度 x 应按下式计算：

$$f_{sd}A_s + f_{pd,i}A_{p,i} + f_{pd,e}A_{p,e} + 0.5f_{td}bx_t = f_{cd}bx + f'_{sd}A'_s + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i} \quad (5.2.8\text{-}2)$$

$$x_t = h - \frac{x}{\beta} \quad (5.2.8\text{-}3)$$

截面受压区高度应符合

$$x \leqslant \xi_b h_0 \quad (5.2.8\text{-}4)$$

当受压区配有纵向普通钢筋或预应力钢筋，且预应力钢筋受压即 $(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$ 为正时

$$x \geqslant 2a' \quad (5.2.8\text{-}5)$$

当受压区仅配纵向普通钢筋或配普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受拉即 $(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$ 为负时

$$x \geqslant 2a'_s \quad (5.2.8\text{-}6)$$

式中：f_{cd}——UHPC 轴心抗压强度设计值，按本标准取值；

f_{td}——UHPC 轴心抗拉强度设计值，按本标准取值，对于干接缝和胶接缝截面，取 $f_{td} = 0$；

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；

$f_{pd,i}$、$f'_{pd,i}$——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；

$f_{pd,e}$——纵向体外预应力钢筋极限应力设计值，按第 5.2.6 条规定取值；

A_s、A'_s——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积，对

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

于干接缝和胶接缝截面，不考虑受拉区普通钢筋作用，取 $A_s=0$；

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

$A_{p,e}$——受拉区纵向体外预应力钢筋的截面面积；

b——矩形截面宽度或T形截面腹板宽度；

h_0——截面有效高度，$h_0=h-a$；

h——截面全高；

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；

β——受弯构件受压区矩形块高度 x 与中性轴高度（实际受压区高度）x_0 的比值；

a、a'——受拉区、受压区普通钢筋和预应力钢筋（体内和体外预应力钢筋）的合力点至受拉区边缘、受压区边缘的距离；

a_s、a'_s——受拉区、受压区普通钢筋的合力点至受拉区边缘、受压区边缘的距离；

$a_{p,i}$、$a'_{p,i}$——受拉区、受压区体内预应力钢筋的合力点至受拉区边缘、受压区边缘的距离；

$a_{p,e}$——受拉区体外预应力钢筋的合力点至受拉区边缘的距离；

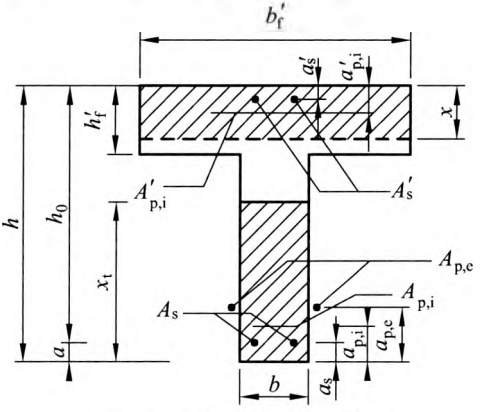
$\sigma'_{p,i0}$——受压区预应力钢筋合力点处UHPC法向应力等于零时预应力钢筋的应力，按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362相关规定计算。

5.2.9 翼缘位于受压区的T形截面UHPC受弯构件，其正截面抗弯承载能力应按下列规定进行计算：

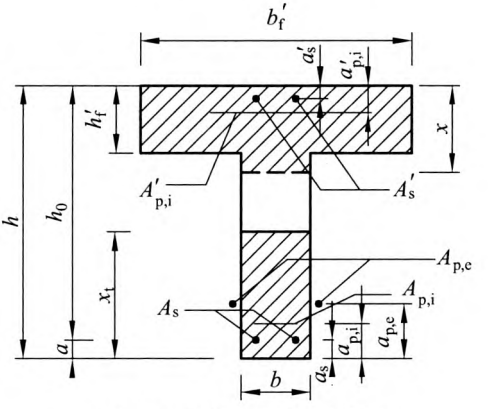
1 当符合

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$f_{sd}A_s + f_{pd,i}A_{p,i} + f_{pd,e}A_{p,e} + 0.5f_{td}b\left(h - \frac{h_f'}{\beta}\right) \leqslant f_{cd}b_f'h_f' + f_{sd}'A_s' + (f_{pd,i}' - \sigma_{p,i0}')A_{p,i}' \quad (5.2.9\text{-}1)$$



（a）$x \leqslant h_f'$ 按矩形截面计算



（b）$x > h_f'$ 按矩形截面计算

图 5.2.9　T 形截面 UHPC 受弯构件正截面承载力计算

时，受压区应取宽度为 b_f' 的矩形截面，同时应考虑受拉区腹板

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

UHPC 的抗拉作用，其正截面抗弯承载力：

$$M_u = f_{cd} b'_f x\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0}) A'_{p,i} (h_0 - a'_{p,i}) - 0.5 f_{td} b x_t \left(\frac{x_t}{2} - a\right) \quad (5.2.9\text{-}2)$$

2 当不符合式（5.2.9-1）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

$$M_u = f_{cd}\left[bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + (b'_f - b)h'_f\left(h_0 - \frac{h'_f}{2}\right)\right] + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0}) A'_{p,i} (h_0 - a'_{p,i}) - 0.5 f_{td} b x_t \left(\frac{x_t}{2} - a\right) \quad (5.2.9\text{-}3)$$

此时，受压区高度 x 应按公式（5.2.9-4）计算，并符合本标准式（5.2.8-4）～式（5.2.8-6）的要求。

$$f_{sd} A_s + f_{pd,i} A_{p,i} + f_{pd,e} A_{p,e} + 0.5 f_{td} b x_t = f_{cd}[bx + (b'_f - b)h'_f] + f'_{sd} A'_s + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0}) A'_{p,i} \quad (5.2.9\text{-}4)$$

式中：h'_f——T 形或 I 形截面受压翼缘厚度；

b'_f——T 形或 I 形截面受压翼缘有效宽度，可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定取值。

5.2.10 箱形截面受弯构件的正截面抗弯承载能力可按本标准第 5.2.9 条计算。

5.2.11 当计算中考虑受压区纵向钢筋但不符合本标准式（5.2.8-5）和式（5.2.8-6）的条件时，主梁正截面抗弯承载力的计

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

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：

$$M_u = f_{pd,i}A_{p,i}(h-a_{p,i}-a') + f_{pd,e}A_{p,e}(h-a_{p,e}-a') + f_{sd}A_s(h-a_s-a') + 0.5f_{td}bx_t\left(h-\frac{x_t}{2}-a'\right) \quad (5.2.11\text{-}1)$$

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：

$$M_u = f_{pd,i}A_{p,i}(h-a_{p,i}-a'_s) + f_{pd,e}A_{p,e}(h-a_{p,e}-a'_s) + f_{sd}A_s(h-a_s-a'_s) - (f'_{pd,i}-\sigma'_{p,i0})A'_{p,i}(a'_{p,i}-a'_s) + 0.5f_{td}bx_t\left(h-\frac{x_t}{2}-a'_s\right) \quad (5.2.11\text{-}2)$$

5.2.12 节段预制 UHPC 箱梁结构斜截面抗剪承载能力验算应按式（5.2.12）计算：

$$\gamma_0 V_d \leqslant \phi_v V_u \quad (5.2.12)$$

式中：V_d——基本组合剪力设计值，按斜截面剪压区对应正截面处取值；

V_u——斜截面抗剪承载能力，按本标准规定计算；

ϕ_v——抗剪承载力接缝折减系数，按表 5.2.4 规定取值。

5.2.13 矩形、T 形和 I 形截面的 UHPC 受弯构件，其斜截面抗剪承载能力应符合下列规定：

1 斜截面抗剪承载能力

$$V_u = V_c + V_s + V_f + V_p \quad (5.2.13\text{-}1)$$

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

式中：V_c——斜截面内 UHPC 基体受剪承载力设计值；

V_s——斜截面内箍筋受剪承载力设计值；

V_f——斜截面内纤维受剪承载力设计值；

V_p——与斜截面相交的预应力弯起钢筋受剪承载力设计值。

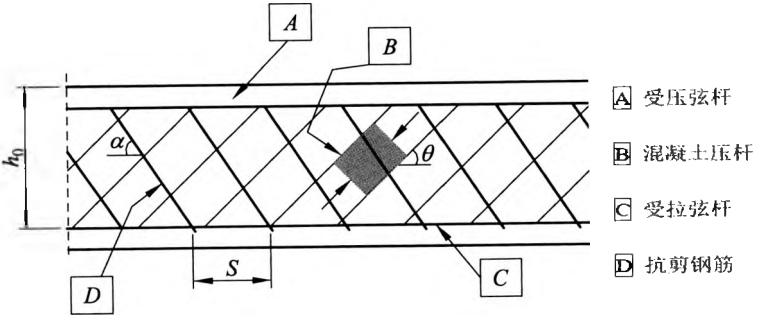


图 5.2.13　桁架模型图示

2　UHPC 基体受剪承载力设计值 V_c 应按式（5.2.13-2）~式（5.2.13-4）计算。

1）配筋 UHPC 截面，按下式计算：

$$V_c = \frac{0.21}{\gamma_{cf}\gamma_E} k_N f_{ck}^{0.5} b h_0 \qquad (5.2.13\text{-}2)$$

2）预应力 UHPC 截面：

$$V_c = \frac{0.24}{\gamma_{cf}\gamma_E} k_N f_{ck}^{0.5} b z \qquad (5.2.13\text{-}3)$$

3）素 UHPC 截面：

$$V_c = \frac{0.18}{\gamma_{cf}\gamma_E} k_N f_{ck}^{0.5} b h \qquad (5.2.13\text{-}4)$$

式中：f_{ck}——UHPC 轴心抗压强度标准值（MPa），按本标准取值；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

b ——矩形截面宽度或 T 形截面腹板宽度（mm）；

h ——截面高度（mm）；

z——弯矩作用下构件的内力臂，可取 $z=0.9h_0$（mm）；

h_0——截面受压边缘到纵向受拉钢筋的距离（mm）；

k_N——荷载或预应力提高系数，取 $k_N=1+3\dfrac{N_{Ed}}{f_{ck}A_c}$；

N_{Ed}——荷载基本组合下轴力设计值（N）；

A_c——构件截面面积（mm^2）；

γ_{cf}——承载能力极限状态验算时 UHPC 抗拉安全系数，取 1.45；

γ_E——安全系数，可取 $\gamma_{cf}\gamma_E$ 为 1.5。

3 箍筋受剪承载力设计值

$$V_s=\frac{A_{sv}}{S_v}zf_{sv}\cot\theta \qquad (5.2.13\text{-}5)$$

式中：f_{sv}——抗剪箍筋抗拉强度设计值（MPa）；

A_{sv}——抗剪箍筋截面面积（mm^2）；

S_v——抗剪箍筋间距（mm）；

θ——主压应力与梁轴线间夹角，建议 $30°\leqslant\theta\leqslant45°$。

4 纤维受剪承载力设计值

$$V_f=\frac{A_{fv}\sigma_f}{\tan\theta} \qquad (5.2.13\text{-}6)$$

1）对于应变软化或低应变硬化材料：

$$\sigma_f=\frac{1}{K\gamma_{cf}}\frac{1}{\omega_{lim}}\int_0^{\omega_{lim}}\sigma_f(\omega)\mathrm{d}\omega \qquad (5.2.13\text{-}7)$$

$$\omega_{lim}=\max(\omega_u,\omega_{max}) \qquad (5.2.13\text{-}8)$$

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

2）对于应变硬化材料：

$$\sigma_f = \frac{1}{K\gamma_{cf}} \frac{1}{\varepsilon_{lim} - \varepsilon_{el}} \int_{\varepsilon_{el}}^{\varepsilon_{lim}} \sigma_f(\omega) \mathrm{d}\omega \qquad (5.2.13\text{-}9)$$

$$\varepsilon_{lim} = \max(\varepsilon_u, \varepsilon_{max}) \qquad (5.2.13\text{-}10)$$

式中：σ_f——纤维增强截面的残余抗拉强度（MPa），$\sigma_f(\omega)$、$\sigma_f(\varepsilon)$可按本标准附录C确定；

A_{fv}——纤维作用面积（mm^2），对于矩形或T形截面，$A_{fv} = bz = 0.9bh_0$；

θ——主压应力与梁轴线间夹角，建议$30° \leqslant \theta \leqslant 45°$；

ω_{lim}——最大允许裂缝宽度（mm）；

ω_u——抗弯极限状态下外露纤维位置最大裂缝宽度（mm）；

ω_{max}——最大裂缝宽度限值（mm），取0.3 mm；

ε_{lim}——最大允许应变；

ε_{el}——最大弹性拉应变；

ε_u——抗弯极限状态下外露纤维位置的极限拉应变；

ε_{max}——最大应变限值；

K——纤维取向系数，取$K_{global} = 1.25$。

5 预应力弯起钢筋受剪承载力设计值V_p应按式（5.2.13-11）或式（5.2.13-12）计算。

1）对于体内预应力弯起钢筋

$$V_p = 0.75 f_{pd,i} \sum A_{p,i} \sin\theta_{p,i} \qquad (5.2.13\text{-}11)$$

2）对于体外预应力弯起钢筋

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$V_p = 0.75\sum \sigma_{pe,e} A_{p,e} \sin\theta_{p,e} \qquad (5.2.13\text{-}12)$$

式中：$f_{pd,i}$——体内预应力筋抗拉强度设计值（MPa）；

$\sigma_{pe,e}$——体外预应力筋抗拉强度设计值（MPa）；

$A_{p,i}$——斜截面内弯起体内预应力钢筋的截面面积（mm^2）；

$A_{p,e}$——斜截面内弯起体外预应力钢筋的截面面积（mm^2）；

$\theta_{p,i}$——体内预应力筋弯起钢筋（在斜截面受压端正截面处）的切线与水平线夹角；

$\theta_{p,e}$——体外预应力筋弯起钢筋（在斜截面受压端正截面处）的切线与水平线夹角。

5.2.14 矩形、T形和I形截面的UHPC受弯构件，其抗剪截面尺寸应符合式（5.2.14）规定。

$$\gamma_0 V_d \leqslant 2\times 1.14\frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} bzf_{ck}^{2/3}/(\cot\theta+\tan\theta) \qquad (5.2.14)$$

式中：α_{cc}——荷载长期效应系数，取0.85；

γ_c——混凝土材料分项系数，取1.45。

5.2.15 UHPC桥梁结构受冲切构件计算、局部承压构件验算应符合现行行业标准《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。在进行受冲切构件计算时UHPC抗拉强度设计值 $f_{td}=0.39f_{tk}$，其中纤维取向系数 K 取1.75，局部承压修正系数取0.44；在进行局部承压构件计算时间接钢筋影响系数取1.3。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.3 持久状况正常使用极限状态计算

5.3.1 采用节段预制拼装的 UHPC 梁体，纵向整体受力应按全预应力构件设计。此类构件在作用（或荷载）频遇组合下控制截面受拉边缘不允许出现拉应力。

5.3.2 预应力构件中预应力筋的张拉控制应力值 σ_{con} 应符合下列规定：

1 体内预应力钢绞线的张拉控制应力值

$$\sigma_{con} \leqslant 0.75 f_{pk} \tag{5.3.2-1}$$

2 体外预应力钢绞线的张拉控制应力值

$$\sigma_{con} \leqslant 0.70 f_{pk} \tag{5.3.2-2}$$

5.3.3 正常使用极限状态计算中，各种因素引起的预应力损失按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定计算，其中体外预应力钢束的摩擦系数按表 5.3.3-1 取值，锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值按表 5.3.3-2 取值，UHPC 的徐变系数和收缩应变按本标准附录 B 确定。

表 5.3.3-1 体外预应力钢束的摩擦系数

管道种类	管道每米局部偏差对摩擦的影响系数 k	预应力钢筋与管道壁的摩擦系数 μ
钢管穿无粘结钢绞线	0.004	0.09
钢管穿光面钢绞线	0.001	0.25
HDPE 穿光面钢绞线	0.002	0.13

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 5.3.3-2　锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值

锚具、接缝类型		Δl/mm	锚具、接缝类型	Δl/mm
夹片式锚具	有顶压时	4	干接缝	1.5
	无顶压时	6	胶接缝	1.0
带螺帽锚具的螺帽缝隙		1～3	湿接缝	0.5

注：带螺帽锚具采用一次张拉锚固时，Δl 宜取 2 mm～3 mm；采用二次张拉锚固时，Δl 可取 1 mm。

5.3.4　正截面抗裂应对构件正截面 UHPC 的拉应力进行验算，在作用（或荷载）频遇组合下，应满足下列规定：

1　预制节段、受拉侧配置体内预应力钢筋的胶接缝截面、配置体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，应满足

$$\sigma_{st} - 0.80\sigma_{pc} \leqslant 0 \qquad (5.3.4\text{-}1)$$

2　受拉侧无体内预应力钢筋的胶接缝截面、无连续体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，应满足

$$\sigma_{st} - 0.75\sigma_{pc} \leqslant 0 \qquad (5.3.4\text{-}2)$$

式中：σ_{st}——在作用（或荷载）频遇组合下构件抗裂验算边缘 UHPC 的法向拉应力，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》JTG 3362—2018 第 6.3.2 条规定计算；

σ_{pc}——扣除全部预应力损失后的预加力在构件抗裂验算边缘产生的 UHPC 预压应力，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》JTG 3362—2018 第 6.1.6 条规定计算。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.3.5 斜截面抗裂应对构件斜截面 UHPC 的主拉应力 σ_{tp} 进行验算，在作用（或荷载）频遇组合下，应满足

$$\sigma_{tp} \leqslant 0.4 f_{tk} \tag{5.3.5}$$

式中：σ_{tp}——在作用（或荷载）频遇组合和预加力产生的 UHPC 主拉应力，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》JTG 3362—2018 第 6.3.3 条规定计算；

f_{tk}——UHPC 的轴心抗拉强度标准值，按本标准表 4.1.4 采用。

5.3.6 UHPC 主梁横向受力为主的板件按配筋 UHPC 构件设计，当拉应力 $\leqslant f_{tk}/K$，可不验算板件裂缝宽度；当拉应力 $> f_{tk}/K$，应对其进行裂缝宽度验算。K 为 UHPC 纤维取向系数，按本标准规定取值。

5.3.7 UHPC 构件的裂缝宽度验算是指验算 UHPC 表面裂缝宽度，最大裂缝宽度限定为 0.05 mm。

5.3.8 UHPC 表面裂缝宽度 w_t 计算需考虑下列两种情况：

1 相邻钢筋中心间距不超过 $5(c+d/2)$ 时，最大表面裂缝宽度

$$w_t = w_s (h - x_0 - x') / (h_0 - x_0 - x') \leqslant w_{max} \tag{5.3.8-1}$$

式中：h——截面高度；

h_0——截面有效高度（受拉区钢筋合力点至受压区边缘距离）；

x_0——受压区高度；

x'——受拉弹性区高度（UHPC 拉应力在 0 ~ $f_{ctm,el}$ 之间）；

w_s——裂缝宽度计算处钢筋埋置深度处的裂缝宽度，按本标准第 5.3.9 条规定计算；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

w_{max}——最大裂缝宽度限值，取 0.05 mm。

2 相邻钢筋中心距在 $5(c+d/2)$ 到 $10(c+d/2)$ 之间时，最大表面裂缝宽度

$$w_{t1}=\left[1+0.015\alpha\beta\left(\frac{s}{c+d/2}\right)^2\right]w_t\leqslant w_{max} \qquad (5.3.8\text{-}2)$$

其中，

$$\alpha=1-0.5\left(\frac{f_{ctfm}}{f_{ctm,el}}\right)>0 \qquad (5.3.8\text{-}3)$$

$$\beta=\frac{100\rho_{eff}}{100\rho_{eff}+\dfrac{f_{ctfm}}{f_{ctm,el}}} \qquad (5.3.8\text{-}4)$$

式中：c——保护层厚度；

s——钢筋中心间距（mm）；

d——纵向受拉钢筋直径（mm）；

f_{ctfm}——UHPC 最大开裂应力平均值，本标准取 f_{tk}/K；

$f_{ctm,el}$——UHPC 弹性阶段极限拉应力平均值，本标准取 f_{tk}/K；

f_{tk}——UHPC 轴心抗拉强度标准值（MPa），按本标准取值；

K——UHPC 纤维取向系数，按本标准取值；

ρ_{eff}——有效配筋率，$\rho_{eff}=A_s/A_{c,eff}$；

$A_{c,eff}$——UHPC 有效受拉面积，如图 5.3.10 所示；

A_s——UHPC 有效受拉高度范围内的钢筋面积。

5.3.9 对于含有粘结钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的 UHPC 构件，为确保 UHPC 和钢筋之间的协同工作，裂缝宽度计算应针对最大受拉处的钢筋应力，钢筋埋置深度处的裂缝宽度 w_s 可按式（5.3.9）计算：

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$W_s = s_{r,max,f}(\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f}) \qquad (5.3.9)$$

式中：$S_{r,max,f}$——最大裂缝间距，按本标准第 5.3.11 条规定计算；

$\varepsilon_{sm,f}$——裂缝间钢筋的平均应变，考虑了滑移及裂缝间纤维的拉伸强化效应的影响；对于预应力钢筋，只有当附加拉应变超过了混凝土消压水平时发生的应变，才被考虑；

$\varepsilon_{cm,f}$——裂缝间 UHPC 的平均应变，为裂缝间钢筋与 UHPC 的应变差值，可按本标准第 5.3.10 条规定计算。

5.3.10 裂缝间钢筋与 UHPC 应变差 $(\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f})$ 可按式（5.3.10）计算。

$$\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f} = \frac{\sigma_{ss}}{E_s} - \frac{f_{ctfm}}{E_c} - \frac{k_t(f_{ctm,el} - f_{ctfm})\left(\dfrac{1}{\rho_{eff}} + \dfrac{E_s}{E_c}\right)}{E_s} \qquad (5.3.10)$$

式中：σ_{ss}——裂缝位置的钢筋应力；对于预应力筋，以 $\Delta\sigma_p$ 代替 σ_s，为 UHPC 应变消压时对应的附加钢筋应力；

E_s、E_c——钢筋与 UHPC 弹性模量；

$f_{ctm,el}$——UHPC 的线弹性抗拉强度平均值，可取 f_{tk}/K；

f_{ctfm}——UHPC 开裂后的应力最大值的平均值，可取 f_{tk}/K；

ρ_{eff}——有效配筋率，$\rho_{eff} = A_s / A_{c,eff}$；

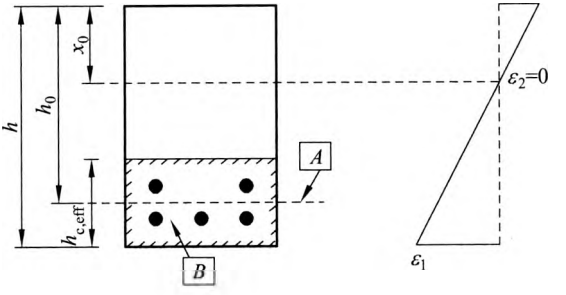
$A_{c,eff}$——UHPC 有效受拉面积，如图 5.3.10 所示；

$h_{c,eff}$——UHPC 有效受拉高度，等于 $\min\{2.5(h-h_0), h/2\}$；

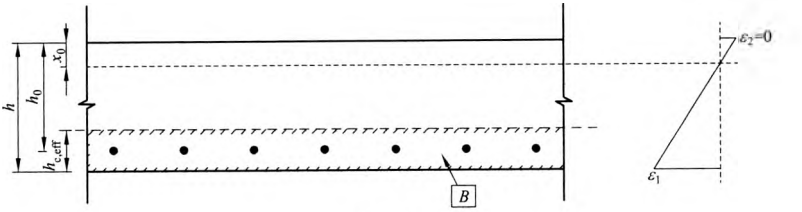
A_s、A_p——UHPC 有效受拉高度范围内的普通钢筋、预应力筋面积；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

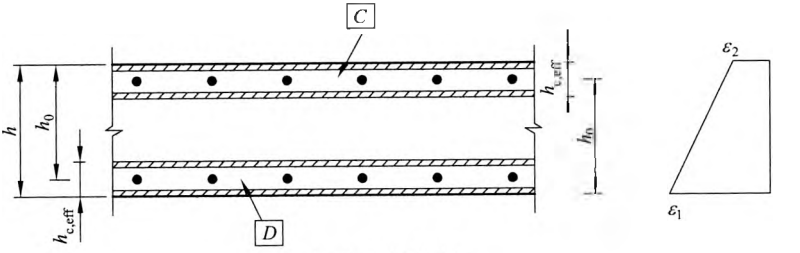
k_t——荷载特征系数；对短期荷载，可取 0.6；对长期荷载或高幅重复荷载，可取 0.4。



（a）梁



（b）板



（c）受拉构件

A—钢筋形心位置；*B*—UHPC 有效受拉面积；*C*—UHPC 上表面有效受拉面积；*D*—UHPC 下表面有效受拉面积。

图 5.3.10　典型有效受拉面积示意图

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.3.11 最大裂缝间距 $S_{r,\max,f}$ 可按式（5.3.11）计算：

$$S_{r,\max,f}=2.55(l_0+l_t) \tag{5.3.11-1}$$

$$l_0=1.33c/\delta \tag{5.3.11-2}$$

$$l_t=[0.3k_2(1-f_{ctfm}/f_{ctm,el})/\delta\eta](\phi/\rho_{eff})\geqslant l_f/2 \tag{5.3.11-3}$$

$$\delta=1+0.5(f_{ctfm}/f_{ctm,el}) \tag{5.3.11-4}$$

式中：l_0——保护层厚度对裂缝间距的影响；

l_t——传递长度；

c——钢筋或预应力筋保护层厚度；

δ——钢筋对保护层厚度和粘结强度的增强系数，反映了纤维对钢筋粘结强度的有利影响；

ϕ——截面曲率；

k_2——开裂截面的应变分布影响系数；纯弯时 $k_2=1$；受弯和受轴向力的部分受压截面 $k_2=0.2$；既受弯还受轴向拉力的全截面受拉截面，$k_2=(\varepsilon_1+\varepsilon_2)/2\varepsilon_1$；$\varepsilon_1$ 和 ε_2 分别为受拉截面不同边缘上较大和较小的拉应变值；

l_f——钢纤维长度；

d——钢筋或预应力筋直径；

η——钢筋的粘结系数，包括普通钢筋粘结系数 η_s、预应力钢筋粘结系数 η_p，可按表 5.3.11 取值。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 5.3.11　钢筋黏结系数取值表

钢筋类型		配筋 UHPC 或先张预应力 UHPC	后张预应力 UHPC
配筋 UHPC	螺纹钢筋	2.25	—
	光圆钢筋	1	—
预应力 UHPC	螺纹钢筋	1.8	0.55
	刻痕钢丝	1.6	0.5
	钢绞线	1.35	0.4
	光圆钢筋或钢丝	0.8	0.25

5.3.12　预应力受弯构件在使用阶段的挠度计算应考虑荷载长期效应的影响，挠度长期增长系数取 1.2。

5.3.13　预应力 UHPC 受弯构件当需计算施工阶段的变形时，可按构件自重和预加力产生的初始弹性变形乘以 $[1+\varphi(t-t_0)]$ 求得；此处 $\varphi(t-t_0)$ 为 UHPC 徐变系数，可根据加载龄期和计算所需龄期 t 按本标准附录 B 方法计算。

5.4　持久状况和短暂状况构件的应力计算

5.4.1　使用阶段全预应力 UHPC 受弯构件正截面 UHPC 的压应力和预应力钢筋的拉应力，应符合下列规定：

1　受压区 UHPC 的最大压应力应符合下列规定：

1）对于预制节段、受拉侧配置体内预应力钢筋的胶接缝截面、配置体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，应符合

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$\sigma_{kc}+\sigma_{pt}\leqslant 0.5f_{ck} \qquad (5.4.1\text{-}1)$$

2）对于受拉侧无体内预应力钢筋的胶接缝截面、无连续体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，应符合

$$\sigma_{kc}+\sigma_{pt}\leqslant 0.45f_{ck} \qquad (5.4.1\text{-}2)$$

2 受拉区体内、体外预应力钢筋的最大拉应力应符合下列规定：

1）体内预应力钢筋应符合

$$\sigma_{pe}+\sigma_{p}\leqslant 0.65f_{pk} \qquad (5.4.1\text{-}3)$$

2）体外预应力钢筋应符合

$$\sigma_{pe,e}\leqslant 0.60f_{pk} \qquad (5.4.1\text{-}4)$$

式中：σ_{kc}——由作用（或荷载）标准值产生的 UHPC 法向压应力；

σ_{p}——由作用（或荷载）标准值产生的纵向预应力筋应力；

σ_{pt}——由预加力产生的 UHPC 法向拉应力，按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 第 6.1.6-4 计算；

σ_{pe}——受拉区预应力钢筋扣除全部预应力损失后的有效预应力；

$\sigma_{pe,e}$——使用阶段体外预应力钢筋扣除预应力损失后的有效应力，按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 第 6.1.6-8 计算；

f_{ck}——UHPC 轴心抗压强度标准值；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

f_{pk}——预应力钢筋的抗拉强度标准值。

注：UHPC 受弯构件受拉区的普通钢筋，其使用阶段的应力很小，可不必验算。

5.4.2 使用阶段全预应力 UHPC 受弯构件斜截面 UHPC 的主压应力 σ_{tp} 和箍筋设置应符合下列规定：

1 UHPC 的主压应力 σ_{cp} 应符合下式规定：

1）对于预制节段、受拉侧配置体内预应力钢筋的胶接缝截面、配置体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，应符合

$$\sigma_{cp} \leqslant 0.6 f_{ck} \tag{5.4.2-1}$$

2）对于受拉侧无体内预应力钢筋的胶接缝截面、无连续体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，应符合

$$\sigma_{cp} \leqslant 0.55 f_{ck} \tag{5.4.2-2}$$

2 根据计算所得的 UHPC 主拉应力 σ_{tp}，按下列规定设置箍筋：

1）在 $\sigma_{tp} \leqslant 0.50 f_{tk}$ 的区段，可不设置箍筋；

2）在 $\sigma_{tp} > 0.50 f_{tk}$ 的区段，箍筋的间距：

$$s_v = \frac{f_{sk} A_{sv}}{\sigma_{tp} b} \tag{5.4.2-3}$$

式中：σ_{cp}——由作用（或荷载）标准值和预加力产生的 UHPC 的主压应力；

σ_{tp}——由作用（或荷载）标准值和预加力产生的 UHPC 的主拉应力；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

f_{sk}——箍筋抗拉强度标准值；

A_{sv}——同一截面内箍筋的总截面面积；

b——矩形截面宽度、T 形或 I 形截面的腹板宽度。

5.4.3 对构件施加预加力时，UHPC 的立方体抗压强度不得低于设计强度等级的 90%。

5.4.4 预应力 UHPC 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 UHPC 的法向应力应符合下列规定：

1 压应力：

1）对于预制节段、受拉侧配置体内预应力钢筋的胶接缝截面、配置体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，应符合

$$\sigma_{cc}^{t} \leqslant 0.7 f_{ck}' \qquad (5.4.4\text{-}1)$$

2）对于干接缝截面、受拉侧无体内预应力钢筋的胶接缝截面、无连续体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，应符合

$$\sigma_{cc}^{t} \leqslant 0.65 f_{ck}' \qquad (5.4.4\text{-}1)$$

2 拉应力：

1）当 $\sigma_{ct}^{t} \leqslant 0.35 f_{tk}'$ 时，预拉区可不配置纵向钢筋；

2）当 $\sigma_{ct}^{t} = 0.70 f_{tk}'$ 时，预拉区应配置其配筋率不低于 0.1% 的纵向钢筋。

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）；预拉区的纵向钢筋宜采用带肋钢筋，其直径不宜大于 14 mm，沿预拉区的外边缘均匀布置。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

式中：σ_{cc}^{t}、σ_{ct}^{t}——按短暂状况计算时截面预压区、预拉区边缘混凝土的压应力、拉应力；

f'_{ck}、f'_{tk}——与制作、运输、安装个施工阶段混凝土立方体抗压强度f'_{cu}相应的轴心抗压强度、轴心抗拉强度标准值。

5.5 疲劳验算

5.5.1 UHPC 桥面板应按本标准规定对 UHPC、普通钢筋、预应力钢筋进行疲劳验算。

5.5.2 疲劳荷载的选取应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 中规定的疲劳荷载计算模型Ⅲ，即单车模型，模型车轴载及分布规定如图 5.5.2 所示。

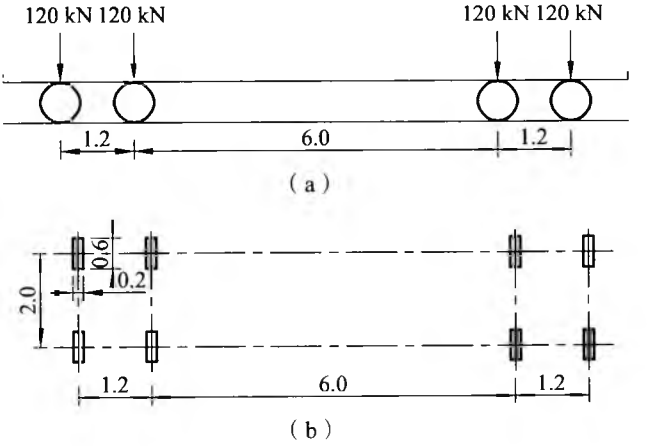


图 5.5.2 疲劳荷载模型Ⅲ（尺寸单位：m）

5.5.3 UHPC 桥面板的疲劳验算应采用容许应力幅法，应力采用

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

按弹性状态计算名义应力。

5.5.4 验算伸缩缝附近构件时，疲劳荷载应乘以额外的放大系数，放大系数 $\Delta\phi$ 应按下式取值：

$$\Delta\phi=\begin{cases}0.1\left(1-\dfrac{D}{6}\right) & (D\leqslant 6)\\ 0 & (D>0)\end{cases} \tag{5.5.4}$$

式中：D——验算截面到伸缩缝的距离（m）。

5.5.5 配筋 UHPC 名义弯拉疲劳强度设计值 $f^{f}_{flexure,d}$ 按配筋 UHPC 板名义弯拉应力设计值 $f_{flexure,d}$ 乘以疲劳强度修正系数确定，疲劳强度修正系数可取 0.5；条件允许时，配筋 UHPC 板名义弯拉应力设计值 $f_{flexure,d}$ 宜开展相关试验研究确定，当无条件开展实验研究时可按 $0.7f_{tk}$ 取值。

5.5.6 普通钢筋的疲劳应力幅限值 Δf^{f}_{sd} 和预应力筋的疲劳应力幅限值 Δf^{f}_{pd} 可按表 5.5.6 规定取值；钢筋的应力幅可按式（5.5.6）计算：

$$\Delta\sigma^{f}_{s}=\alpha_{f}\sigma_{sq} \tag{5.5.6-1}$$

$$\Delta\sigma^{f}_{p}=\alpha_{f}\sigma_{pq} \tag{5.5.6-2}$$

式中：$\Delta\sigma^{f}_{s}$——疲劳验算时截面受拉区纵向钢筋的应力幅；

$\Delta\sigma^{f}_{p}$——疲劳验算时截面受拉区最外层纵向预应力筋的应力幅；

σ_{sq}——由疲劳荷载所产生的普通钢筋应力；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

σ_{pq}——由疲劳荷载所产生的预应力钢筋应力；

α_f——考虑疲劳影响后的应力增大系数，对未出现拉应力的截面取 1.0，对出现拉应力的截面取 1.5。

表 5.5.6　普通钢筋和预应力筋疲劳应力幅限值

钢筋种类	应力幅限值/MPa
带肋钢筋	150
钢绞线	140

5.5.7　对于 UHPC 桥面板的疲劳验算，应按下列式子进行验算：

1　受拉区边缘纤维的混凝土拉应力

$$\sigma^{f}_{ct,max} \leqslant f^{f}_{flexure,d} \tag{5.5.7-1}$$

2　受拉区纵向普通钢筋的应力幅

$$\Delta\sigma^{f}_{s} \leqslant \Delta f^{f}_{sd} \tag{5.5.7-2}$$

3　受拉区纵向预应力筋的应力幅

$$\Delta\sigma^{f}_{p} \leqslant \Delta f^{f}_{pd} \tag{5.5.7-3}$$

式中：$\Delta\sigma^{f}_{s}$——疲劳验算时截面受拉区纵向钢筋的应力幅；

$\Delta\sigma^{f}_{p}$——疲劳验算时截面受拉区最外层纵向预应力筋的应力幅；

$\sigma^{f}_{ct,max}$——疲劳验算时预应力混凝土截面受拉区边缘纤维的混凝土拉应力；

$f^{f}_{flexure,d}$——UHPC 弯拉疲劳强度设计值，可按本标准第

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.5.5 条规定确定；

Δf_{sd}^{f} ——钢筋的疲劳应力幅限值，按本标准第 5.5.6 条规定确定；

Δf_{pd}^{f} ——预应力筋的疲劳应力幅限值，按本标准第 5.5.6 条规定确定。

注：当纵向受拉钢筋为同一钢种时，可仅验算最外层钢筋的应力幅。

5.5.8 UHPC 桥面板的疲劳验算除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行标准的规定。

5.6 耐久性设计

5.6.1 节段预制拼装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：

1 确定结构所处的环境类别；

2 提出对混凝土材料的耐久性基本要求；

3 确定构件中钢筋的混凝土保护层厚度；

4 不同环境条件下的耐久性技术措施；

5 接缝部位的耐久性技术措施；

6 提出施工质量验收要求；

7 提出结构使用阶段的检测与维护要求。

5.6.2 UHPC 梁桥主体结构及构件应根据其表面直接接触的环境按表 5.6.2 的规定确定所处环境类别。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 5.6.2　UHPC 梁桥主体结构及构件所处环境类别划分

环境类别	条件
Ⅰ类——般环境	仅受混凝土碳化影响的环境
Ⅱ类—冻融环境	受反复冻融影响的环境
Ⅳ类—除冰盐等其他氯化物环境	受除冰盐等氯盐影响的环境
Ⅴ类—盐结晶环境	受混凝土空隙中硫酸盐结晶膨胀影响的环境
Ⅵ类—化学腐蚀环境	受酸碱性较强的化学物质侵蚀的环境
Ⅶ类—磨蚀环境	受风、水流和水中夹杂物的摩擦、切削、冲击等作用的环境

5.6.3　UHPC 梁桥结构及构件应采取下列耐久性技术措施：

1　钢筋的混凝土保护层厚度满足本标准第 5.8.3 条的要求。

2　预应力混凝土结构中的预应力体系根据具体情况采用多重防护措施，且应按可更换设计；体内预应力锚头应采用与梁体同等级的 UHPC 封锚，体外预应力锚头应采用专用的防护罩封锚。

3　有抗渗要求的 UHPC 结构，UHPC 的抗渗等级符合现行国家标准《地下工程防水技术规范》GB 50108 的规定。

4　严寒和寒冷地区的潮湿环境中，UHPC 应满足抗冻要求，UHPC 抗冻性（抗冻耐久性指数 DF）应符合现行行业标准《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310 的规定。

5　节段预制拼装 UHPC 梁桥接缝采用的环氧胶接缝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　UHPC 梁桥表面采用涂装材料提高结构耐久性时，涂装材料应符合现行行业标准《混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件》

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

JT/T 695 的规定。

7　桥涵结构形式、结构构造有利于排水、通风、避免水汽凝聚和有害物质积聚。

5.6.4　体外预应力束钢制转向块和钢制锚固块应采取防锈措施，并应按防腐蚀年限进行定期维护。钢材的防锈和防腐蚀采用的涂料、钢材表面的除锈等级及防腐蚀对钢材的构造要求等，应满足现行国家标准《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB/T 8923 和行业标准《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》JT/T 722 的规定。在设计文件中应注明所要求的钢材除锈等级和所要用的涂料（或镀层）及涂（镀）层厚度。

5.6.5　体外预应力体系的耐火等级，不应低于既有结构构件的耐火等级，且不低于 2.0 h。

5.7　构件计算

5.7.1　桥面板作为局部结构体系计算时，宜计入体内预应力束管道对截面的削弱，并符合下列规定：

1　正截面抗弯承载能力验算：根据本标准第 5.2 节相关规定执行。

2　桥面板抗冲切承载能力验算：根据本标准第 5.2 节相关规定执行。

3　桥面板抗裂性能验算：综合考虑整体结构体系和局部结构体系受力，在作用（或荷载）频遇组合下，接缝处桥面板纵向应力不出现拉应力（不消压），其余位置桥面板纵向应力应小于 f_{tk}/K。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

4　横隔板抗裂性能验算：汽车轮载作用（不考虑冲击系数）下，横隔板横桥向应力宜小于 f_{tk}/K，若大于 f_{tk}/K，应按本标准第 5.3 节相关规定验算裂缝宽度。

5　疲劳验算：按本标准第 5.5 节规定执行。

5.7.2　箱梁横向接缝应进行以下验算：

1　承载能力极限状态抗剪承载能力验算：包括接缝抗剪破坏承载力验算和接缝直剪承载力验算。接缝抗剪承载力不应小于主梁斜截面抗剪承载力；条件允许下接缝抗剪承载能力宜开展相关试验研究确定。

2　顶板接缝处的纵向应力不出现拉应力（不消压）。

3　腹板接缝的主拉应力应符合本标准 5.3.5 条的规定。

5.7.3　体外预应力束 UHPC 转向装置的设计计算应遵循以下原则：

1　转向装置承载力计算时可忽略 UHPC 抗力的影响，转向力的竖向分力和水平分力均由箍筋承载。

2　转向装置的承载能力计算可分为抗拉承载能力计算和抗剪承载能力计算两部分。

3　转向装置在正常使用极限状态和承载能力极限状态下的应力状况需经计算确定。

4　可对转向块或转向肋位置的结构进行局部分析。

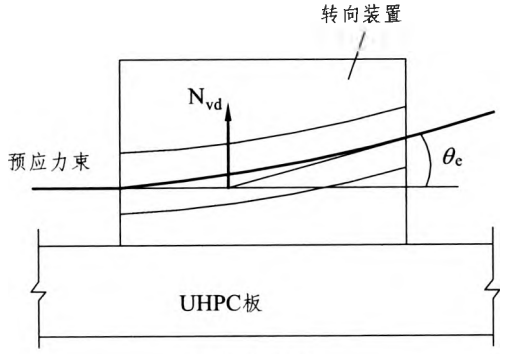
5.7.4　转向装置的作用效应取值应符合下列规定：

1　计算转向装置作用效应设计值时，不考虑可变荷载应力增量影响，取永存预加力，荷载分项系数取 1.3；

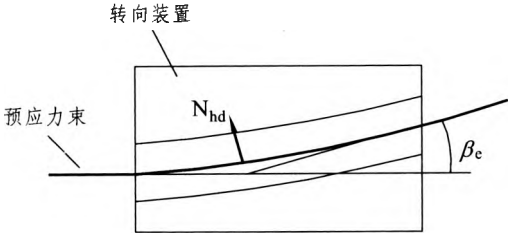
2　承受空间体外预应力作用的转向装置（图 5.7.4），在极限状态下其作用的水平力设计值 N_{hd} 和竖向力设计值 N_{vd} 由公式

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

（5.7.4）确定。



（a）立面图



（b）平面图

图 5.7.4　体外预应力束的竖直转角和水平转角示意图

$$N_{hd}=1.3N_{p,e}\sqrt{1-2\cos\theta_e\cos\beta_e+\cos^2\theta_e} \qquad (5.7.4\text{-}1)$$

$$N_{vd}=1.3N_{p,e}\sin\theta_e \qquad (5.7.4\text{-}2)$$

$$N_{p,e}=\sigma_{pe,e}A_{p,e} \qquad (5.7.4\text{-}3)$$

式中：N_{hd}——转向装置的水平作用设计值，即体外预应力束张拉时对转向装置的合力在水平面的分力设计值；

N_{vd}——转向装置的竖向作用设计值，即体外预应力束张拉

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

时对转向装置的合力在竖直面的分力设计值；

$N_{p,e}$——体外预应力束的永存预加力；

θ_e——体外预应力束在竖直平面内的弯起角度；

β_e——体外预应力束在水平面内的弯起角度；

$\sigma_{pe,e}$——体外预应力束的永存预应力；

$A_{p,e}$——体外预应力水平束的截面面积。

5.7.5 转向块承载力计算时，应计算其与 UHPC 板连接界面（图 5.7.5-1 中 *A*—*A* 截面）的抗剪承载力和抗拉承载力。

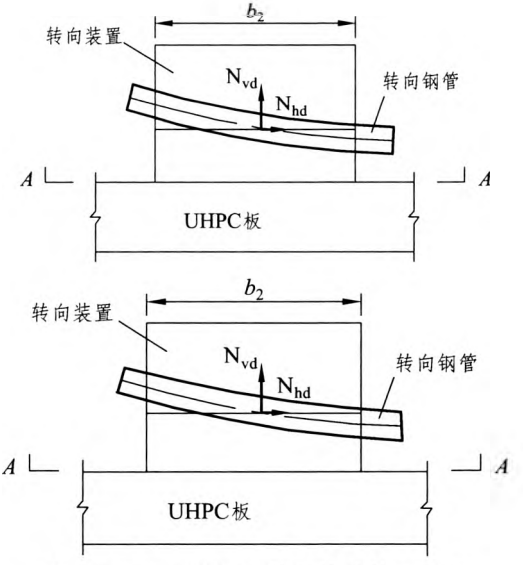


图 5.7.5-1 UHPC 转向块计算示意图

1 转向块抗剪承载力可按式（5.7.5-1）和式（5.7.5-2）计算。

$$\gamma_0 N_{hd} \leqslant \phi_v f_{sd} \sum A_s \qquad (5.7.5\text{-}1)$$

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$\phi_v = \frac{1}{\sqrt{3+(N_{vd}/N_{hd})^2}} \qquad (5.7.5\text{-}2)$$

式中：γ_0——结构重要性系数；

ϕ_v——剪拉组合作用引起的环向箍筋抗剪承载力降低系数；

f_{sd}——箍筋抗拉强度设计值；

$\sum A_s$——A—A 截面上箍筋截面面积之和。

2 转向块抗拉承载力可按式（5.7.5-3）和式（5.7.5-4）计算。

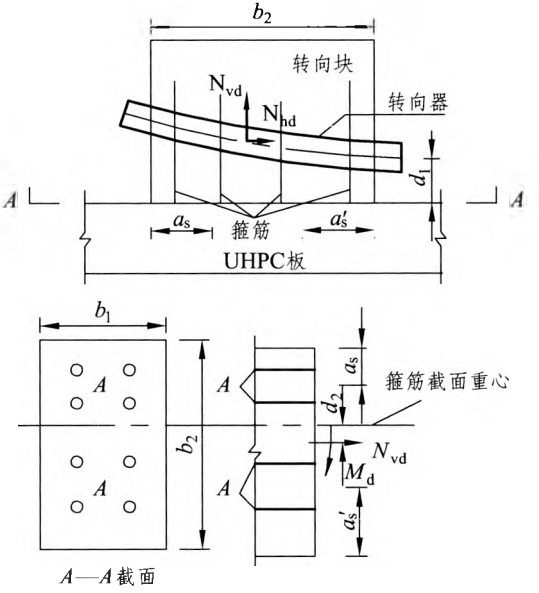


图 5.7.5-2 UHPC 转向块抗拉承载能力计算图示

$$\gamma_0 N_{vd} e_s \leqslant \phi_p f_{sd} A_s'(b_0 - a_s') \qquad (5.7.5\text{-}3)$$

$$\gamma_0 N_{vd} e_s' \leqslant \phi_p f_{sd} A_s(b_0' - a_s) \qquad (5.7.5\text{-}4)$$

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$\phi_p = \frac{1}{\sqrt{1+3(N_{hd}/N_{vd})^2}} \quad (5.7.5\text{-}5)$$

$$b_0 = b_2 - a_s \quad (5.7.5\text{-}6)$$

$$b_0' = b_2 - a_s' \quad (5.7.5\text{-}7)$$

$$e_s = \frac{b_2}{2} - e_0 - a_s \quad (5.7.5\text{-}8)$$

$$e_s' = \frac{b_2}{2} + e_0 - a_s' \quad (5.7.5\text{-}9)$$

$$M_d = N_{hd} d_1 + N_{vd} d_2 \quad (5.7.5\text{-}10)$$

$$e_0 = \frac{M_d}{N_{vd}} \quad (5.7.5\text{-}11)$$

式中：ϕ_p——由剪拉组合作用引起的环向箍筋抗拉承载力的降低系数；

a_s——受拉较大侧环向箍筋、锚固钢筋合力作用点到该侧UHPC边缘距离；

a_s'——受拉较小侧环向箍筋、锚固钢筋合力作用点到该侧UHPC边缘距离；

A_s——受拉较大侧环向箍筋、锚固钢筋的截面面积；

A_s'——受拉较小侧环向箍筋、锚固钢筋的截面面积；

d_1——钢管转向器形心距UHPC板表面的竖直距离；

d_2——钢管转向器形心距箍筋截面重心的水平距离，当转向块内箍筋沿纵桥向对称布置时，应取0；

b_1、b_2——转向块横桥向和纵桥向的平面尺寸；

d_1、d_2——偏心竖向力N_{vd}作用点距受拉较大边和受拉较小边钢筋重心的距离。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.7.6 UHPC 转向装置须进行锚下局部承压区的截面尺寸和局部抗压承载力验算，计算时按本标准第 5.2 节的规定执行。

5.7.7 UHPC 转向装置与 UHPC 板的交界面在永存张拉力 $N_{pe,e}$ 作用下除按偏心受拉构件验算其承载力之外，还需验算其裂缝宽度；在裂缝宽度验算时，转向装置的水平分力 N_{hc}、竖向分力 N_{vc} 和弯矩 M_c 分别按式（5.7.7）计算，并按本标准第 5.3 节规定计算和验算 UHPC 转向块根部截面的裂缝宽度。

$$N_{hc} = 1.1N_{pe,e}\sqrt{1-2\cos\alpha_e\cos\beta_e+\cos^2\theta_e} \qquad (5.7.7\text{-}1)$$

$$N_{vc} = 1.1N_{pe,e}\sin\theta_e \qquad (5.7.7\text{-}2)$$

$$M_c = N_{hc}d_1 + N_{vc}d_2 \qquad (5.7.7\text{-}3)$$

5.7.8 UHPC 桥梁支座处横隔梁计算、后张预应力 UHPC 锚固区计算按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定执行。

5.8 构造要求

5.8.1 UHPC 梁板件厚度不宜小于板跨径的 1/40，且不宜小于 150 mm。

5.8.2 当计算中充分利用钢筋的强度时，其最小锚固长度应不小于 15d。

5.8.3 普通钢筋和预应力筋的最小混凝土保护层厚度（钢筋外缘或管道外缘至混凝土表面的距离）不应小于钢筋公称直径，且不小于表 5.8.3 的规定值。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 5.8.3　混凝土保护层最小厚度

环境类别	保护层厚度/mm
Ⅰ类——般环境	20
Ⅱ类—冻融环境	25
Ⅳ类—除冰盐等其他氯化物环境	25
Ⅴ类—盐结晶环境	25
Ⅵ类—化学腐蚀环境	30
Ⅶ类—磨蚀环境	30

5.8.4　钢筋净距应不小于 1.5 倍纤维长度，且不小于 25 mm。

5.8.5　UHPC 梁桥采用的钢筋，其直径范围宜为 8 mm ~ 20 mm。

5.8.6　钢筋接头宜设置在受力较小的区段，宜采用钢筋机械连接；采用焊接或绑扎方式时，搭接长度不小于 20 倍钢筋直径。

5.8.7　最小配筋率宜符合下列规定：

1　当仅由纤维平衡荷载作用时，对于应变硬化的 UHPC，不必考虑最小配筋率；而当下列情况得到满足时，应变软化的也不必考虑最小配筋率。

1）最小纤维含量百分率满足本标准 5.8.7 条第 2 款的最小延性要求；

2）满足本标准 5.8.7 条第 3 款的要求，轴向应力作用下无脆性破坏发生；

3）最大裂缝宽度不超过 0.3 mm。

2　为保证应变软化或低应变硬化的材料在弯曲变形时拥有足够的延性，还需满足式（5.8.7）规定：

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$\frac{1}{W_{\text{lim}}}\int_{0}^{W_{\text{lim}}}\frac{\sigma(w)}{K_{\text{global}}}\mathrm{d}w \geqslant \max(0.4f_{\text{ctm,el}}3\ \text{MPa}) \qquad (5.8.7)$$

式中：W_{lim}——裂缝宽度限值，取为 0.3 mm；

$f_{\text{ctm,el}}$——弹性阶段极限拉应力平均值；

$\sigma(w)$——开裂应力特征值；

K_{global}——纤维取向系数，取 1.25。

3 确保承载能力极限状态所对应的荷载值高于开裂时所对应的荷载值，以保证构件不出现脆性破坏。

5.8.8 体内预应力钢筋的管道设置应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的相关规定。

5.8.9 对外形呈曲线且布置有曲线型的体内预应力钢筋的构件，其曲线平面内、外管道的最小保护层厚度及在弯曲平面内设置的箍筋应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的相关规定。

5.8.10 体外预应力索最小张拉控制应力不应小于 $0.4f_{\text{pk}}$。

5.8.11 体外索之间的净距不应小于 100 mm。

5.8.12 节段长度应综合考虑运输、存放、吊装、架设等因素，标准节段的长度不宜小于 2 m。

5.8.13 中墩顶节段接缝旁的竖向钢筋（箍筋）应予加强，并保证其两端锚固可靠，以承受剪力引起的下拉作用（图 5.8.13）。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

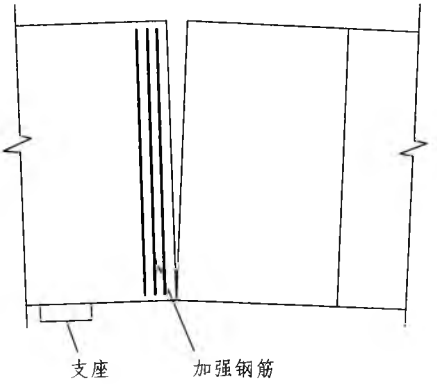


图 5.8.13　墩顶节段接缝旁的加强钢筋示意图

5.8.14　剪力较大及剪弯共同作用区段，节段接缝边的竖向钢筋（箍筋）应予加强，并保证其两端锚固可靠（图 5.8.14）；同时，节段底部（或顶部）的纵向普通钢筋也应与接缝边的竖向钢筋连接良好。

5.8.15　UHPC 梁桥的其他钢筋布置要求宜符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的相关规定。

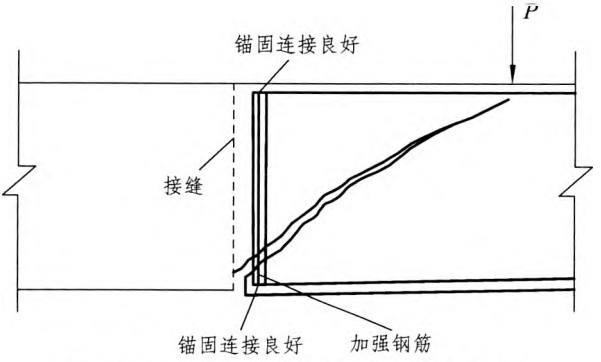


图 5.8.14　节段接缝边的加强钢筋示意图

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.8.16 节段预制拼装的 UHPC 结构，应满足下列构造要求：

1 体内外混合预应力、循环冻融及采用化学消冰的预制节段式梁，应采用环氧树脂胶结接缝；全体外预应力、不发生循环冻融和不用化学消冰的预制节段式梁，可采用表面不涂任何封闭粘结剂的干接缝。胶接缝拼接后接缝截面应保持约 0.3 MPa 的临时压应力，直至环氧树脂胶体固化。

2 预制节段接缝处应设置剪力键，剪力键宜按图 5.8.16-1 采用腹板剪力键、顶板剪力键、底板剪力键和加腋区剪力键。

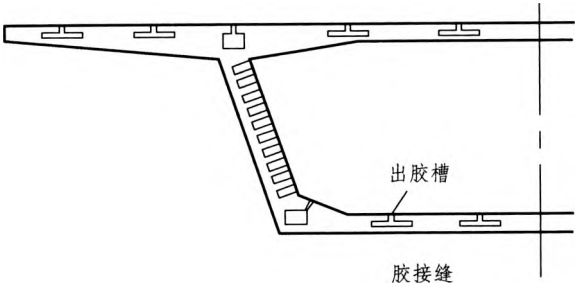


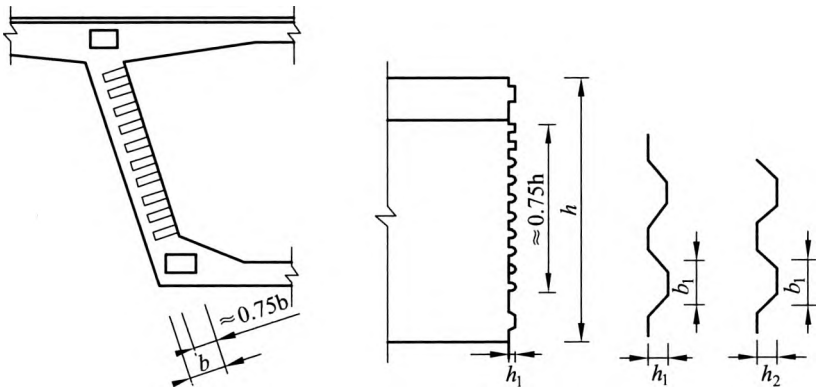
图 5.8.16-1 复合剪力键布置示意

3 复合剪力键的尺寸应满足下列规定（图 5.8.16-2）：

1）腹板剪力键的布置范围不宜小于梁高的 75%，剪力键的横向宽度宜为腹板宽度的 75%。

2）剪力键应采用梯形（倾角接近 45° ）或圆角梯形截面，剪力键的高度不应小于 35 mm，剪力键的高度与其平均宽度取为 1∶2。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载



（a）胶接缝正面　　（b）侧面　　（c）剪力键大样

图 5.8.16-2　复合剪力键尺寸示意

5.8.17　UHPC 主梁设有体内预应力筋时，宜采取下列措施确保箱梁横向接缝的密封性和耐久性：

1　采用预应力管道定位技术，提高相邻梁段同一管道的连接精度，并防止预制过程中，梁段分离时造成预应力管口损坏。

2　在管口处设置“○”形橡胶密封圈，阻止胶体进入预应力管道而造成管口四周胶体量不足；“○”形橡胶密封圈采用高压缩性的闭孔发泡聚乙烯材料制作，厚度在 3 mm ~ 6 mm。

3　对于胶接缝，应清理相邻梁段拼缝面，控制好接缝面环氧粘接剂的涂刷质量，对预应力管口处的涂刷厚度应严格控制，保持浆体饱满和接缝面密封。

4　对于干接缝，应设置桥面排水，宜对接缝位置处梁体的外表面涂覆耐久性保护涂料和密封胶。

5.8.18　转向构造的尺寸与钢束布置方式、转向器的尺寸有关；转向构造设计时应考虑添加备用钢束的可能性。转向装置应考虑

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

设置符合预应力束弯转角度的弧形转向钢管，其管口应适当扩大。转向钢管的最小半径应符合现行行业标准《公路桥梁加固设计规范》JTG/T J22 的规定。

5.8.19 体外预应力钢束的自由长度不宜大于 8.0 m。自由段与相接锚固段宜设置转角，定位构造设置应考虑设置减振材料以减小体外预应力钢束活载振动产生的不利影响。

5.8.20 转向块内应设有两种钢筋，即围住单个转向器的内环筋，沿转向块周边围住所有转向器的外封闭箍筋（图 5.8.20）。内环筋直径不宜小于 20 mm，内环筋和外封闭箍筋沿转向器纵向布置，纵向间距不宜大于 100 mm。

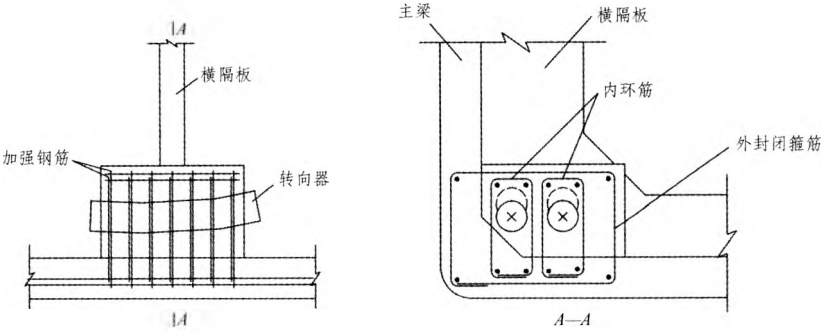


图 5.8.20 转向块构造配筋示意

5.8.21 体外预应力钢束应锚固在横梁上，锚固构造设计时宜考虑添加备用钢束的可能性。横梁的厚度应由锚具布置深度和钢束转向所需长度决定，锚固横梁的厚度不宜小于 1 000 mm。锚固横梁的平面尺寸由锚具布置尺寸、张拉空间尺寸等要求选定。

5.8.22 体外预应力钢束进入锚固构造后宜适当转向，以避免钢束拉力波动直接传至锚具夹片，并使张拉端处于施工便利的方位。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

钢束转向的弯曲半径不宜小于 6 m。

5.8.23 后张法预应力锚固齿块的构造及配筋应符合现行行业标准《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。

5.8.24 UHPC 预制主梁间顶板纵向 UHPC 现浇接缝宜采用钢筋搭接连接。桥面板横桥向预埋钢筋直径不应小于 12 mm，纵向间距不大于 200 mm。

5.8.25 纵向 UHPC 现浇接缝的钢纤维含量不低于 2.5%，并宜通过试验掺入适量的膨胀剂。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

6 施 工

6.1 一般规定

6.1.1 节段预制拼装 UHPC 梁桥的施工应选择具有类似工程经验的技术人员且具有专业施工设备的单位完成。

6.1.2 应建立健全安全施工管理体系，制定技术和组织保证措施，为施工中的技术安全和生产安全提供保障；根据其制定的安全操作细则，向施工人员进行安全技术交底。

6.1.3 施工前，应制订详细的施工组织设计，并做好各项准备工作，建立质量管理体系。拼装设备、支撑等临时结构的安装、调试、使用、拆除等应编制专项施工技术方案，并应制订相应的安全生产应急预案。

6.1.4 施工单位应建立各道工序的质量检查制度和检查项目，并应留有完整的检查记录。

6.1.5 节段预制拼装施工应制订包含节段预制阶段及节段拼装阶段在内的全过程测量控制方案。

6.2 原材料准备及储存

6.2.1 UHPC 原材料的质量要求及配合比设计应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的相关规定。

6.2.2 细集料应按品种、规格分别标识和贮存，避免混杂或污染。石英粉还应防潮、防雨。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

6.2.3 矿物掺合料应按品种、质量等级和产地分别标识和贮存，避免与水泥等其他粉状物混杂，并应防潮、防雨。

6.2.4 短纤维应按品种、规格和生产厂家分别标识和贮存，并应防潮、防锈。

6.2.5 外加剂应按品种和生产厂家分别标识和贮存。粉状外加剂还应防止受潮结块；出现结块时，应粉碎至全部通过 600 μm 筛孔，经检验合格后方可使用。液态外加剂应贮存在密闭容器内，并应配置防晒和防冻设施；出现沉淀等异常现象时，经检验合格后方可使用。

6.3 模板与支架

6.3.1 UHPC 梁预制节段应采用钢模板施工，并应进行专项设计。湿接缝等特殊部位可采用优质木模板。

6.3.2 新浇筑 UHPC 对模板的侧压力应按液体静压力来计算，无实测值时，容重可按 27 kN/m^3 计算。

6.3.3 模板与支架应根据工程结构形式、荷载情况、地基土类别、施工设备和材料性能等条件进行设计。

6.3.4 模板施工应符合下列规定：

1 模板及其支护应具有足够的承载能力、刚度和稳定性；

2 模板应根据节段外形的要求，具备调节空间姿态的功能，在安装过程中，必须设置防倾覆设施；

3 成型的模板应构造紧密、不漏浆，且模板间拼缝孔隙不得大于 2 mm，拼装后应进行密闭性检查；

4 底模的预拱度设置应符合设计要求；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5 底模及其支架拆除时的 UHPC 强度及弹性模量应符合设计要求；

6 已拆除的模板及其支架的结构，当施工荷载所占的效应比使用荷载的效应更不利时，必须经过验算并加设临时支撑；

7 有特殊要求部位的模板施工，应制定专项施工技术方案。

6.3.5 模板与支架的拆除除应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 的相关规定外，尚应符合下列规定：

1 模板与支架的拆除期限和拆除程序应满足设计要求，侧模等非承重模板可在 UHPC 强度达到 40 MPa 时拆除；

2 模板与支架的拆除应遵循后支先拆、先支后拆的原则进行；

3 拆除模板时，应采取措施防止混凝土表面产生裂缝；

4 拆除模板与支架时不得猛烈敲打、强拉和抛扔，拆除后，应维护整理，分类妥善存放。

6.4 节段预制

6.4.1 UHPC 原材料的计量应符合下列规定：

1 固体原材料应按质量计量，水和液体外加剂可按体积计量，液体外加剂浓度应满足规定。

2 原材料计量应采用电子计量设备。计量设备应具有法定计量部门签发的有效检定证书，并应定期检验。UHPC 生产每月应至少自检一次。每一工作班开始前，应对计量设备进行零点校准。

3 原材料的计量允许偏差不应大于表 6.4.1 规定的范围，并

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

应每班检查 1 次。

表 6.4.1 UHPC 原材料计量允许偏差

原材料品种	水泥	细集料	水	外加剂	掺合料	纤维
每盘计量允许偏差/%	±2	±3	±1	±1	±2	±1
累计计量允许偏差/%	±1	±2	±1	±1	±1	±1
注：累计计量允许偏差是指每一输运车中各盘混凝土的每种材料计量和的偏差。						

6.4.2 UHPC 宜采用干混料集中湿拌或现场加水搅和，并应通过试验确定投料顺序、数量及分段搅拌时间等工艺参数，且符合下列规定：

1 搅和前，应检查搅拌设备状态，并应按施工配合比进行拌和。

2 设备搅拌能力应大于预制场浇筑能力。

3 应采用具有计量系统的大方量强制式搅拌设备拌和，搅拌时间不宜少于 8 min，待 UHPC 流化后继续搅拌 2 min。

4 搅拌应保证拌合物质量均匀，出机拌合物中不得有钢纤维结团情况，同一盘混凝土的均质性应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。

5 搅拌结束后，应及时清洗搅拌设备。

6.4.3 UHPC 拌合料的坍落度应在入模浇筑前进行测试并满足设计要求。

6.4.4 UHPC 拌合料的场内运输可采用吊斗或泵送形式，长距离运输可采用混凝土运输车。运输过程不得使混凝土发生离析。

6.4.5 采用混凝土搅拌车运输时，应符合下列规定：

1 混凝土搅拌车的运输能力应大于预制场浇筑能力。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

2　接料前，应排净混凝土搅拌车罐内的积水。

3　在运输途中及等候卸料时，应保持混凝土搅拌车罐体正常转速，不得停转。

4　卸料前，混凝土搅拌车罐体宜快速旋转搅拌 20 s 以上后再卸料；卸料后，应及时采用清水清洗干净。

5　UHPC 拌合物从搅拌机卸入搅拌车至卸料入模的时间不宜大于 90 min；当运送时间大于 90 min 时，应采取有效技术措施，并通过试验验证。

6.4.6　采用泵送方式输送时，UHPC 泵送功率应大于普通混凝土泵送功率的 20%。

6.4.7　UHPC 拌合物浇筑应保证纤维分布的均匀性和结构的连续性，并应符合下列规定：

1　UHPC 应采用平板振捣或模外振捣器振捣成型，不得采用人工插捣。所采用的振捣机械和振捣方法除应保证密实外，还应避免拌合物离析、分层及纤维露出构件表面。

2　UHPC 拌合物浇筑倾落的自由高度不宜超过 0.5 m；当倾落高度大于 0.5 m 时，应加辅助工具，避免钢纤维从水泥浆中离析或结团。

3　UHPC 梁节段采用分层浇筑时，层间不应出现冷缝。

6.4.8　UHPC 预制节段养护包括浇筑后的养护和终凝后的养护。终凝后的养护宜采用高温蒸汽养护。

6.4.9　UHPC 浇筑完成后，应及时用养生薄膜覆盖进行保湿养护，并应符合下列规定：

1　保湿养护过程中，发现有缺水部位时，应及时补水养护。

2　UHPC 终凝后，应撤除养生薄膜和拆除模板并及时开始蒸

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

汽养护。

6.4.10 采用高温蒸汽养护时应符合下列规定：

1 养护前，应根据养护面积和体积计算锅炉功率、架子和保温棚的规格、数量，并根据现场或预制梁厂条件和养护要求确定架子搭设、锅炉布置及养护方案。

2 养护过程中的温度和湿度宜通过传感器调整蒸汽量的大小实现，温度传感器应紧贴梁体表面。

3 养护温度恒定在 80 °C ~ 90 °C 时，养护时间不应少于 72h；养护温度恒定在 90 °C 以上时，养护时间不应少于 48 h。养护过程中蒸汽养护棚内的相对湿度不低于 95%。

4 蒸汽高温养护时的升温阶段，升温速度不应大于 12 °C/h；养护结束后，以不超过 15 °C/h 的降温速度将温度逐渐降至现场气温。

6.4.11 当预制场连续 4 h 平均气温高于 30 °C 或日间最高气温高于 35 °C 时，UHPC 节段预制施工应采取下列措施：

1 宜选择在早晨、傍晚或夜间浇筑施工，避开中午高温时段。夜间施工应有良好的操作照明，并确保施工安全。

2 施工中应检测气温及干混料、拌合水、拌合物温度，监控 UHPC 温度，温度过高时应及时采取降温措施。

3 施工时应控制 UHPC 混凝土拌合物的出料温度低于 35 °C。

4 保湿养护时，应控制养生水温与 UHPC 层表面的温差不大于 12 °C。

6.4.12 当预制现场环境温度处于 5 °C ~ 10 °C 时，应采取保温覆盖措施，并检测气温及干混料、拌合水及 UHPC 的温度；当气

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

温在 5 °C 以下时，禁止施工。

6.4.13 预制台座的地基应具有足够的承载能力，并符合下列规定：

1 预制台座顶面的沉降应控制在 2 mm 以内，宜对台座地基进行特殊加固处理，限制不均匀沉降。

2 预制台座的间距应能满足施工作业的要求。台座表面应光滑、平整，在 2 m 长度上平整度的允许偏差应不超过 2 mm。

3 预制台座使用前应采用 1.5 倍梁段重量预压。

4 应根据设计提供的理论拱度值，结合施工的实际情况，正确预计梁体拱度的变化情况，在预制台座上按梁、板构件跨度设置相应的预拱度。当后张预应力混凝土梁预计的上拱度值较大时，可在预制台座上设置反拱。

6.4.14 台座上的预制 UHPC 梁节段施工准备，应符合下列规定：

1 端模应铅直、牢固，匹配节段移出就位时应根据梁体曲线精确定位，待浇节段的侧模及底模应符合节段的线形要求。

2 匹配节段应有可靠精确的空间调整装置。

3 模板应与匹配节段连接紧密、无漏浆，并应满足反复使用的质量要求。

4 模板与钢筋骨架间应设置 UHPC 垫块，其尺寸满足保护层厚度要求。

5 内模宜安装在可移动的台车支架上，做成可调整的模板系统，应保证其刚度满足节段预制的精度要求。

6 梁段间的定位销孔及其他预埋件应位置准确。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

6.4.15 UHPC 梁的脱模时间应符合设计规定；设计未规定时，应在 UHPC 强度达到设 40 MPa 及以上方可脱模并拆除。在拆模、拆除或移动节段时，应采取措施防止损伤节段的棱角和剪力键。

6.4.16 模板拆除后应及时对节段进行检查验收，测量其外形、预埋件的尺寸和位置，允许偏差不得超过设计规定，并标注编号、梁高及纵横轴线。

6.4.17 拆模后外观缺陷经监理确认后可进行局部整修。

6.4.18 构件移运时的吊点位置应按设计规定设置；设计无规定时，应根据计算确定。构件的吊环应采用未经冷拉的 HPB300 热轧钢筋制作，且应保持顺直；吊绳与起吊构件的交角小于 60°时，应设置吊架或扁担以保持垂直受力，并安装梁体保护装置。

6.4.19 UHPC 节段脱模后的整修工作应符合下列规定：

1 对各项预埋孔道进行清理，清除掉进孔道的杂物。

2 检查相邻孔道接头是否正位，错位超过允许偏差的应分别对两孔道各凿掉 1/2 偏差并满足穿束要求。

3 压水检查孔道有无串孔；当出现串孔时，应对串孔进行补救。

4 对胶接缝端面，应清除脱模剂，并清理干净，保持端面平整。

6.5 节段移运与堆放

6.5.1 UHPC 节段在预制场地内的移运、装车宜采用搬运机、龙门起重机等移动起吊装置，并应符合下列规定：

1 节段吊离台座、移运、堆放时，UHPC 的强度不应低于设

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

计要求，设计未规定时，应不低于 40 MPa。

2 节段吊装前必须对吊点进行全面检查，确保吊点的布置符合设计要求，并验算吊点和结构的局部受力，保证吊点的可靠和结构的安全。

3 节段的移运、吊放应匀速、缓慢，并应采取措施防止对节段产生冲击和碰撞。

6.5.2 UHPC 节段存放的场地应平整，承载力满足要求，节段堆放应符合下列规定：

1 存放台座应坚固稳定，且宜高出地面 200 mm 以上并有完善的防排水设施。

2 节段存放的支点应符合设计规定，支点可采用垫木支撑，不得将节段直接支撑在存放台座上。存放时 UHPC 养护期未满的，应继续养护。

3 节段应按其拼装的先后顺序编号存放。

4 节段叠放不应超过 3 层。叠放的支点应符合设计规定，支点可采用垫木，上下层垫木应在同一条竖直线上。

5 雨季或春季融冻期间，应采取有效措施防止因地面软化下沉而造成节段断裂及损坏。

6.5.3 UHPC 节段在预制场地外的移运应符合下列规定：

1 应根据运输道路条件、节段重量、节段尺寸选择合适的场外运输设备。

2 采用陆路运输时，线路上所经过的桥梁应能满足运输要求，车辆行驶应缓慢匀速。

3 采用船舶运输时，应事先与气象、港监、水务等相关部门联系。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

4　节段在运输过程中应采取保护、固定措施。节段支点的设置应避免运输设备振动对节段造成的不利影响。纵横向限位装置应根据运输路线上的最大纵横坡设置。

6.6　逐跨拼装施工

6.6.1　逐跨拼装施工可采用支架、架桥机或其他起重设备进行拼装。

6.6.2　采用支架逐跨拼装时，宜采用梁式支架，承重梁宜采用型钢、钢管、贝雷梁、万能杆件制作。立柱或临时墩可采用钢管桩、轻型钢框架或贝雷支墩。

6.6.3　预制节段的提升及悬挂应符合下列规定：

1　节段的提升应匀速、缓慢。

2　节段和提升附属装置的总质量必须在起重设备的安全范围内。

3　节段悬吊系统及装置的安全系数不应小于2。

4　悬挂状态下的节段之间应设置防止碰撞的垫块。

6.6.4　节段的拼接施工应符合下列规定：

1　节段拼接过程中，应逐块控制、复核节段的轴线和高程。

2　在接缝处孔道口应设置密封构造。密封构造的设置不应影响接缝的密贴。

3　采用架桥机施工时，架桥机的主梁应处在有约束的状态。

4　采用下行式架桥机施工时，应采取措施抵抗支承面倾斜时节段重量对装载小车产生的水平分力。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5　采用上行式架桥机施工时，应考虑节段预应力钢筋张拉后悬吊体系的内力重分布效应，并根据工况验算结果复核悬吊体系的安全系数。

6.6.5　节段的环氧胶接缝施工应符合下列规定：

1　应根据不同的使用环境，通过试验选定结构胶。

2　结构胶应采用机械拌和。涂抹方式应根据粘接剂的产品特性确定。粘接剂应涂抹均匀并覆盖整个匹配面，涂抹厚度以3 mm为宜。

3　结构胶涂抹时应采取措施对预应力钢筋管道口进行防护，防止施加临时预应力时粘结剂进入孔道内。

4　应确保在施加临时预应力后，结构胶能够在全断面均匀挤出。

5　待结合面上不得有自由水。

6.6.6　用于节段拼接的临时预应力应符合下列规定：

1　应根据节段的断面形式均匀布置临时预应力。

2　临时预应力钢筋的张拉力应符合设计要求，并应满足反复多次张拉的作业要求。节段拼接面的混凝土受压应力不得小于0.35 MPa。

3　临时预应力应在桥跨永久预应力张拉完成且支承在下部结构上之后，才能拆除。

6.6.7　永久预应力钢筋的施工应符合下列规定：

1　成品体外预应力钢束护套在运输及施工过程中应进行保护。

2　体内预应力钢束孔道采用真空压浆时，孔道内的负压不

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

应小于 0.06 MPa。

6.6.8 根据桥梁结构设计体系形式，支承结构可采用永久支座、临时支座或临时千斤顶，并应符合下列规定：

1 支承转换前应使梁底与支座间接触，但不应使支座受压。

2 连续梁的中支点宜采用临时支座。临时支座的安全系数不应小于 1.5。

6.6.9 预制节段拼装施工的桥梁，其支承转换应符合下列规定：

1 支承转换的顺序应通过计算确定。

2 当架桥机不具备支承转换的功能时，可在下部结构顶部的临时千斤顶顶升节段完成支承转换。

3 当采用上行式架桥机时，应在支承转换过程全部完成后，拆除节段悬吊体系。

6.6.10 逐跨拼装施工时，应根据设计图纸准确确定每跨内首节段的平面位置及高程，首节段安装误差应满足表 6.6.10 的规定。

表 6.6.10 每跨首节段吊装验收标准

项 目	验收标准
立面高程/mm	± 3
中心线偏位/mm	± 5
横向坡度/Rad	± 0.001
纵向坡度/Rad	± 0.003

6.6.11 逐跨拼装施工时，每个节段拼装完成后，应及时检测节段的高程与轴线，其误差标准应满足表 6.6.11 的规定，如误差超过规定时，应及时调整。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 6.6.11　节段吊装验收标准

项　目	验收标准
立面高程/mm	±10
中心线偏位/mm	±10
纵向长度/mm	±10
横向坡度/Rad	±0.001
纵向坡度/Rad	±0.003
拼缝错台/mm	3

6.6.12　逐跨节段拼装施工每联连续箱梁或每跨简支箱梁完成后，应及时进行检查验收，其质量标准应符合表 6.6.12 的规定：

表 6.6.12　逐跨拼装施工节段质量标准

项　目		规定值或允许偏差/mm
湿接头、合龙段混凝土强度		在合格标准内
轴线偏位	$L \leqslant 50$ m	10
	$L > 50$ m	$L/5\,000$
顶面高程	$L \leqslant 50$ m	±20
	$L > 50$ m	$\pm L/2\,500$
	相邻节段高差	10
同跨对称点高差	$L \leqslant 50$ m	20
	$L > 50$ m	$L/2\,500$

注：表中 L 表示跨径。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

6.7 悬臂拼装施工

6.7.1 悬臂拼装施工中的节段提升、拼接作业、胶接缝、临时预应力、永久预应力施工等应符合本标准 6.6 节的规定。

6.7.2 悬臂拼装施工应符合下列规定：

1 应采取有效的墩梁临时固结措施，确保悬臂结构整体稳定。

2 桥墩两侧的节段应对称提升。

3 施工中悬臂两侧最大不平衡力应满足设计规定。

6.7.3 拼装施工时，宜在待拼节段的端面外侧安置张拉作业平台。

6.7.4 节段提升、拼装施工采用桥面吊机或桥面提升架时，提升设备与节段的重量比不应大于 0.4，且提升设备在提升、拼接、行走时的抗倾覆安全系数、自锚固系统的安全系数、斜拉水平限位系统的安全系数均不应小于 2。

6.7.5 合龙和体系转换施工应符合下列规定：

1 合龙施工前应对两端悬臂节段的轴线和节段的偏移值进行观测，并应根据实际观测值进行合龙施工的计算，确定合龙程序和调整参数。

2 预应力钢筋管道连接应在合龙施工前进行，并应封堵波纹管与节段间缝隙。

3 应按设计文件规定的程序完成体系转换。

4 应按设计文件规定的程序完成合龙段预应力张拉。

6.7.6 悬臂拼装施工时，应根据设计图纸确定每跨墩顶块的平面位置及高程，墩顶块安装误差应满足表 6.7.6 的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 6.7.6　墩顶块安装验收标准

项　目	验收标准
立面高程/mm	± 5
中心线偏位/mm	± 5
横向坡度/Rad	± 0.001
纵向坡度/Rad	± 0.003

6.7.7　悬臂拼装施工时，每对节段拼装完成后，应及时检测节段的高程与轴线，高程与轴线误差应满足表 6.7.7-1 的规定，且预测合龙口高差满足表 6.7.7-2 的规定。

表 6.7.7-1　节段吊装验收标准

项　目	验收标准
立面高程/mm	± 10
中心线偏位/mm	10
纵向长度/mm	± 10
横向坡度/Rad	± 0.001
纵向坡度/Rad	± 0.003
拼缝错台/mm	3

表 6.7.7-2　合龙段两侧允许误差

项　目	允许误差/mm
立面高程	± 20
中心线偏位	± 10

6.7.8　悬臂拼装施工每联连续箱梁或每跨简支箱梁完成后，应及时进行检查验收，其质量标准应符合表 6.7.8 的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 6.7.8　悬臂拼装施工节段质量标准

项　目		规定值或允许偏差/mm
湿接头、合龙段混凝土强度		在合格标准内
轴线偏位	$L \leqslant 100$ m	10
	$L > 100$ m	$L/10\,000$
顶面高程	$L \leqslant 100$ m	±20
	$L > 100$ m	$\pm L/5\,000$
	相邻节段高差	10
同跨对称点高差	$L \leqslant 100$ m	20
	$L > 100$ m	$L/5\,000$

注：表中 L 表示跨径。

6.8　拼装设备

6.8.1　拼装施工的架桥机或其他起重拼装设备，在安装、调试完成后，必须进行荷载试验，并应符合下列规定：

1　逐跨拼装架桥机的试验荷载不应小于节段最大架设质量的 1.1 倍。

2　节段起重设备的试验荷载不应小于节段最大架设质量的 1.25 倍。

3　检查起重设备的荷载显示装置、刹车装置、钢丝绳缠绕装置、限位装置是否正常工作。

6.8.2　采用支架进行拼装施工时，支架应满足下列规定：

1　支架搭设施工前，应核查计算及审批手续。

2　支架支撑体系计算时，应进行地基承载力的验算，支撑

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

系统范围内的地基承载力应满足桥梁拼装施工时总荷载的要求。

3 支架的构造应满足节段安置后的防滑移要求及完成张拉作业后落架拆除的要求。

4 搭设的支架宜进行预压。

6.9 湿接缝施工

6.9.1 湿接缝施工前应将接口表层 UHPC 凿去 5 mm ~ 10 mm，并使钢纤维裸露，清洁干净，并保持表面润湿。

6.9.2 湿接缝处的模板应具有足够的强度和刚度，与梁体的接触面应密贴，搭接长度不小于 10 cm。各接缝应严密不漏浆，模板周围宜采用高强止浆橡胶条止浆。

6.9.3 湿接缝浇筑完毕后，应立即覆盖，保湿养护 7 d 以上，同条件养护试件的抗压强度达到 40 MPa 后方可拆模。养护时环境平均温度宜高于 10 °C；当环境稳定低于 10 °C 时，应按本标准 6.4.12 条执行。现场养护时需采取措施防止出现收缩裂缝。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

7 检验与验收

7.1 一般规定

7.1.1 节段预制拼装 UHPC 梁桥的检验与验收应根据全面质量管理要求，建立健全有效的质量保证体系，对于施工各工序的质量进行检查、监控，并应达到所规定的质量要求，确保施工质量。

7.1.2 所有原始记录均应如实保存。

7.1.3 节段预制拼装 UHPC 梁桥的检验与验收除应符合本标准外，尚应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 和行业标准《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2 的规定。

7.2 原材料进场检验

7.2.1 钢纤维按进场的批次和产品的抽样检验方案确定。同一工程、同一原材料来源、同一组生产设备生产的钢纤维，检验批量不应大于 50 t。UHPC 中钢纤维性能指标应符合本标准 4.1.2 规定，检验方法应符合本标准附录 A 的相关规定。

7.2.2 预拌合料进场检验应按进场的批次和产品的抽样检验方案确定。不同批次或非连续供应的不足一个检验批量的预拌合料应作为一个检验批。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

7.2.3 预拌合料进场检验除应按规定批次提供产品检验报告等质量证明文件外，还应进行外观检验和物理力学性能检验，并应符合下列规定：

1 散装预拌合料应外观均匀，无结块、受潮现象；

2 袋装预拌合料应包装完整，无破袋、受潮现象；

3 按推荐用水量拌制新拌混凝土，流动性应符合施工要求；

4 按推荐用水量拌制新拌混凝土，强度应大于相应强度等级标准值的 1.1 倍。

7.2.4 胶接材料的进场检验应按进场的批次和产品的抽样检验方案确定；同一工程、同一原材料来源、同一组生产设备生产的胶接材料，按进场批号，每批号取样 3 件，每件每组分称取 500 g。其主要技术指标应满足表 4.2.1 的要求。

7.3 质量检验

7.3.1 超高性能混凝土质量一般项目检验应符合下列规定：

1 UHPC 的配合比设计应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定。

2 UHPC 原材料每盘称量允许偏差应符合表 6.4.1 的规定。

3 在确定施工配合比时，UHPC 的坍落扩展度、弹性模量应使用实际生产所用原材料，并在实验室内拌制混凝土制作试样进行检验。在原材料或配合比发生重大变化时应再次检验。

4 UHPC 蒸汽养护过程中的实测项目应符合表 7.3.1 的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 7.3.1　UHPC 蒸汽养护实测项目允许偏差及检验方法

项　目	规定或允许偏差	检查频率	检查方法
养护膜内温度	+5 °C	每小时检查两次	温度传感器
养护膜内湿度	+5%	每小时检查两次	湿度传感器
养护时间	+1 h	每小时检查两次	计时器

7.3.2　超高性能混凝土质量主控项目检验应符合下列规定：

1　UHPC 的抗压强度、抗拉强度每 50 m^3 检验一次，批量不到 50 m^3，按 50 m^3 计算；每班次应至少检验一次，每次检验应至少留置两组试件；试件应随机取样制作；取样应从同一次搅拌或同一车运送的 UHPC 中取出，取样量不应小于试样需要量的 1.5 倍，且不宜小于 20 L。

2　预制节段 UHPC 试件应采取与预制节段相同的养护方式，成型后 7 d 时进行强度试验；现浇湿接缝 UHPC 试件应采用标准条件养护，成型后 28 d 时进行强度试验。

3　UHPC 的力学性能试验应符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的规定，并应符合下列规定：

1）抗压强度试验应采 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体试件，加载速率应为 1.2 MPa/s ~ 1.4 MPa/s。

2）弹性模量试验应采用 100 mm × 100 mm × 300 mm 棱柱体试件，加载速率应为 1.2 MPa/s ~ 1.4 MPa/s。

3）强度试验值均不应乘以尺寸换算系数。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

4　UHPC 的轴心抗拉强度试验应采用直接拉伸法，试验方法参见附录 D。

5　UHPC 的力学性能检验结果除应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定外，尚应符合本标准第 4.1.4 条的规定，坍落扩展度应符合本标准第 4.1.15 条的规定，耐久性应符合本标准第 4.1.16 条的规定。

7.3.3　模板与支架一般项目质量检验应符合下列规定：

1　应根据施工过程中的各种工况进行设计，应具有足够的承载力和刚度，并应保证其整体稳固性。

2　模板与支架制作及安装应符合施工技术方案的规定，且稳固牢靠，接缝严密，立柱基础有足够的支撑面和排水、防冻融措施。

7.3.4　模板与支架主控项目质量检验应符合下列规定：

1　模板制作允许偏差及检验方法应符合表 7.3.4-1 的规定。

表 7.3.4-1　模板制作允许偏差及检验方法

项　目		允许偏差/mm	检查频率		检验方法
			范围	点数	
木模板	模板长度和宽度	±5.0	每个建筑物或每个构件	4	用钢尺量
	不刨光模板相邻两板表面高低差	3.0			用钢尺和塞尺量
	刨光模板相邻两板表面高低差	1.0			
	平板模板表面最大局部不平（刨光模板）	3.0			用 2 m 钢尺和塞尺量

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

续表

项目			允许偏差/mm	检查频率		检验方法
				范围	点数	
木模板	平板模板表面最大局部不平（不刨光模板）		5.0	每个建筑物或每个构件	4	用2 m钢尺和塞尺量
	榫槽钳接紧密度		2.0		2	用钢尺量
钢模板	模板长度和宽度		0，－1.0		4	
	肋高		±5.0		2	
	面板端偏斜		0.5		2	用水平尺量
	链接配件（螺栓、卡子等的孔眼位置	孔中心与板面的间距	±0.3		4	用钢尺量
		板端孔中心与板端的间距	0，－0.5			
		沿板长度方向的孔	±0.6			
	板面局部不平		1.0			用2 m钢尺和塞尺量
	板面和板侧挠度		±1.0		1	用水准仪和拉线测量

2 模板与支架安装允许偏差及检验方法应符合表7.3.4-2的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 7.3.4-2　模板与支架安装允许偏差及检验方法

项　目			允许偏差/mm		检验频率		检验方法
					范围	点数	
相邻模板间隙			2		每个节段	8	用塞尺测量
相邻两板表面高低差			1			4	用钢尺测量
表面平整度			2			4	用 2 m 直尺量
垂直度			$H/1\,000$，且≤3			4	用经纬仪或垂线测量
模内尺寸		长度	0，－3			4	用钢尺测量
		宽度	+3，－2			2	
		高度	0，－2			4	
轴线偏移量			2			1	用经纬仪测量
匹配节段定位		纵轴线	2			1	用经纬仪测量
		高程	±2			4	用水准仪测量
预埋件	剪力键	位置	2		每个剪力键	10	用钢尺测量
		平面高差	2			10	用水准仪测量
	支座板、锚垫板等预埋钢板	位置	3		每个预埋件	1	用钢尺测量
		平面高差	2			1	用水准仪测量
	螺栓、锚筋等	位置	10			1	用钢尺测量
		外露尺寸	±10			1	用钢尺测量
吊孔		位置	2		每个预留孔洞	1	用钢尺测量
预留孔洞		预应力钢筋孔道位置	节段端部 10			1	用钢尺测量
		其他	位置	8		1	用钢尺测量
			孔径	0，10			
支架		纵轴平面位置	跨度的 1/2000 或 40		每个安装段	4	用经纬仪测量

注：H 为节段高度。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

7.3.5 UHPC 预制节段一般项目质量检验应符合下列规定：

1 进场时，应检查其质量证明文件和表面标示。预制节段的质量、标示应符合国家现行相关标准和设计的要求。

2 连接和拼缝应符合设计要求。对于承受内力的接头和接缝，当其混凝土强度未达到设计要求时，不得吊装上一层结构构件。

7.3.6 UHPC 预制节段主控项目质量检验应符合下列规定：

1 外观质量不应有严重缺陷及一般缺陷，且不应有影响结构性能和安装、使用功能的尺寸偏差，其质量应符合表 7.3.6-1 的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 7.3.6-1　UHPC 预制节段允许偏差及检验方法

项　目			规定值或允许偏差/mm	检验频率		检验方法
				范围	点数	
混凝土抗压强度			在合格标准内	每个节点		按现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107 和《活性粉末混凝土》GB/T 31387 要求进行
表面平整度			5		2	用 2 m 直尺量
长度			0，－2		4	用钢尺量
断面尺寸		宽度	+4，0		2	用钢尺量
		高度	±4		2	
		厚度	+4，0		8	
轴线偏移量		纵轴线	4		1	用经纬仪测量
		横隔梁轴线	4		1	
预埋件	支座板、铺垫板等预埋钢板	位置	10	每个预埋件	1	用钢尺量
		高程	±5		1	用水准仪测量
		平面高差	5		1	用水准仪测量
	螺栓、钢筋等	位置	10		1	用钢尺量
		外露尺寸	+10，0		1	用钢尺量
预留孔	预应力孔道位置	位置	5	每个预留孔洞	1	用钢尺量
			节段端部 10		1	
		孔径	+3，0		1	用卡尺测量

2　拼装允许偏差及检查方法应符合表 7.3.6-2 的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 7.3.6-2　UHPC 预制节段拼装允许偏差及检验方法

项　目	规定值或允许偏差/mm	检验频率		检验方法
		范围	点数	
轴线偏移量	+5	每个节段	4	有经纬仪测量
相邻节段间顶面接缝高差	+3	每条接缝	2	用钢尺量
节段间拼装立缝宽度	+3	每条接缝	2	用钢尺量
梁长	+10，－15	每跨	4	用钢尺量
支座轴线偏位	+5	每个支座	2	用钢尺量

7.4　质量验收

7.4.1　质量验收评定工作应在符合下列规定的前提下进行：

1　使用的原材料、半成品、成品及施工工艺应符合基本要求的规定，检验结果应经监理工程师检查认可。

2　无严重外观缺陷，且质量保证资料应真实齐全。

7.4.2　质量保证资料应包括下列内容：

1　所用原材料、半成品和成品的质量检验结果。

2　施工配合比、重要工序交接检查、UHPC 施工检查记录、钢筋施工检查记录、预应力施工检查记录和施工监控资料。

3　各项质量控制指标的试验数据和质量检验资料。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

4 施工过程中遇到的非正常情况记录及其对工程质量影响分析。

5 施工过程中如发生质量事故，经处理补救后，达到设计要求的认可证明文件。

7.4.3 工程质量验收不合格时，施工单位应进行修补或返工，完工后重新进行质量验收。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

8 管养与维护

8.1 一般规定

8.1.1 节段预制拼装UHPC梁桥应进行预防性和日常养护管理。

8.1.2 节段预制拼装 UHPC 梁桥的养护应根据其结构特点制定针对性的养护维修方案，建立数字化管养档案。

8.1.3 节段预制拼装 UHPC 梁桥养护应制定技术安全措施。

8.2 管理养护

8.2.1 节段预制拼装 UHPC 梁桥重点检查部位应包含：

1 预制节段的接缝。

2 体外预应力索体。

3 锚固块、转向架、锚固横梁。

8.2.2 节段预制拼装 UHPC 梁桥应每年进行一次结构裂缝和表面温度裂缝的检测。结构裂缝应重点检查受拉、受剪区域。

8.2.3 节段预制拼装 UHPC 梁桥的日常管理养护应符合下列规定：

1 建立完善的巡视检查制度和技术检测系统，逐步完善检查信息网络化，建立长期健康监测系统及定期质量检测，及时、准确地掌握结构状况及相关信息，科学客观地评定使用状况，有依据、有计划、有针对性地安排养护项目。

2 严格按照现行技术规范和标准进行养护作业，宜采取机

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

械化养护作业方式，迅速、优质、高效地处理各类结构损伤，确保运行质量。

8.3 维护与维修

8.3.1 节段预制拼装 UHPC 梁桥的维护应包括以下内容：

1 保持桥面泄水孔畅通，桥面不得积水。

2 保持梁体底板排水孔畅通，箱梁内不得有积水，泄水孔的排水不得污损梁体。

3 保持梁体内通风，发现通风孔堵塞，应立即清理疏通。

4 及时清理梁体内杂物，保持箱内清洁。

8.3.2 节段预制拼装 UHPC 梁桥出现以下病害时应跟踪观察、分析原因，对需要修补的裂缝，根据结构特点制定相应的维修方案。

1 全预应力构件出现横向或竖向裂缝。

2 节段接缝处开裂。

3 非全预应力构件裂缝宽度大于 0.1 mm。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

附录 A　UHPC 用钢纤维性能检验方法

A. 0. 1　钢纤维形状与尺寸检验应符合下列要求：

1　钢纤维形状合格率的检验应符合下列要求：

1）每批次钢纤维中用感量 0.1 g 的天平秤取 1 000 g 钢纤维，从中随机取 50 根钢纤维，肉眼逐根检查其形状。记录钢纤维形状呈弯曲和其他形状等的纤维根数 N_f。

2）钢纤维形状合格率按式（A.0.1-1）计算，计算结果精确至 0.1%。

$$P_f = \frac{50 - N_f}{50} \times 100 \qquad \text{（A.0.1-1）}$$

式中：P_f——形状合格率，单位为百分数（%）；

N_f——形状不符合要求的纤维根数，单位为根。

2　钢纤维长度和直径合格率的检验应符合下列要求：

1）每批次钢纤维中用感量 0.1 g 的天平秤取 1 000 g 钢纤维，从中随机取 50 根钢纤维，用游标卡尺（分辨率 0.01 mm）逐根测量其长度，用千分尺（分辨率 0.001 mm）测量其直径。记录长度不在 12 mm ~ 14 mm 或 6 mm ~ 8 mm 内的钢纤维根数和直径不在 0.18 mm ~ 0.22 mm 或 0.12 mm ~ 0.16 mm 内的钢纤维根数。

2）钢纤维长度和直径合格率按式（A.0.1-2）和（A.0.1-3）计算，计算结果精确至 0.1%。

$$P_l = \frac{50 - N_l}{50} \times 100 \qquad \text{（A.0.1-2）}$$

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

$$P_d = \frac{50 - N_d}{50} \times 100 \qquad (A.0.1\text{-}3)$$

式中：P_l——长度合格率，单位为百分数（%）；

N_l——长度不在 12 mm ~ 14 mm 或 6 mm ~ 8 mm 内的钢纤维根数，单位为根；

P_d——直径合格率，单位为百分数（%）；

N_d——直径不在 0.18 mm ~ 0.22 mm 或 0.12 mm ~ 0.16 mm 内的钢纤维根，单位为根。

A. 0. 2 杂质含量检验应符合：每批次钢纤维中用感量 0.01g 的天平称取 500g 钢纤维两份，分别对每份样品用肉眼观察钢纤维的表面是否污染，用人工挑拣出粘连的钢纤维束、锈蚀钢纤维以及其他杂质，并用感量 0.01 g 的天平称重。杂质含量按式（A.0.2）计算，计算结果精确至 0.1%。两次结果的平均值作为评定结果。

$$W = \frac{m}{500} \times 100 \qquad (A.0.2)$$

式中：W——杂质含量，单位为百分数（%）；

m——杂质质量，单位为克（g）。

A. 0. 3 抗拉强度试验应符合下列要求：

1 钢纤维抗拉强度采用母材大试样进行试验。每批次钢纤维随机取 600 mm 长的母材试样 5 根。

2 采用分辨率为 0.001 mm 千分尺，在试样的断面相互垂直方向测量试样的截面直径，取平均值计算圆形钢纤维的截面积 A（单位为 mm^2），计算时应保留到小数点后四位。

3 采用量程为 100 N ~ 200 N 的电子拉力试验机，加载速度（1 ± 0.2）mm/min，测得极限拉伸荷载 P_{max}；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

4 钢纤维的抗拉强度按式（A.0.3）计算：

$$f_u = \frac{P_{max}}{A} \qquad (A.0.3)$$

式中：f_u——钢纤维抗拉强度，单位为兆帕（MPa）；

P_{max}——钢纤维极限拉伸荷载，单位为牛顿（N）；

A——钢纤维截面面积，单位为平方毫米（mm^2）。

5 五根试样抗拉强度测定值的算术平均值作为评定结果，精确至 0.1 MPa。若 5 个测定值中有一个超出平均值的 ± 10%，应剔除该值，再以剩下 4 个测定值的平均值作为抗拉强度评定结果。若这 4 个测定值中再有超过它们的平均值 ± 10%的，则该组试验结果作废。单根试样的抗拉强度不应低于 1 600 MPa。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

附录 B　UHPC R120 收缩应变和徐变系数计算

B.1　收缩应变

B. 1. 1　高温养护 UHPC：对于进行 90 °C 高温养护 2 d 或 80 °C 高温养护 3 d 的 UHPC，其后期收缩应变为零。

B. 1. 2　标准养护 UHPC：对于没有进行高温养护的 UHPC，其收缩应变可按式（B.1.2）计算：

$$\varepsilon_{cs}(t)=\varepsilon_{cs,0}\cdot e^{\frac{c}{\sqrt{t+d}}} \tag{B.1.2}$$

式中：$\varepsilon_{cs}(t)$——计算考虑的龄期为 t 时的收缩应变；

$\varepsilon_{cs,0}$——名义终极收缩应变，取 550 με；

t——计算时考虑时刻的 UHPC 龄期（d）；

c，d——拟合系数，对于低收缩水泥，$c=-2.5$，$d=-0.5$。

根据上述公式，可以得到用 UHPC R120 收缩应变随时间发展曲线，如图 B.1.2 所示。

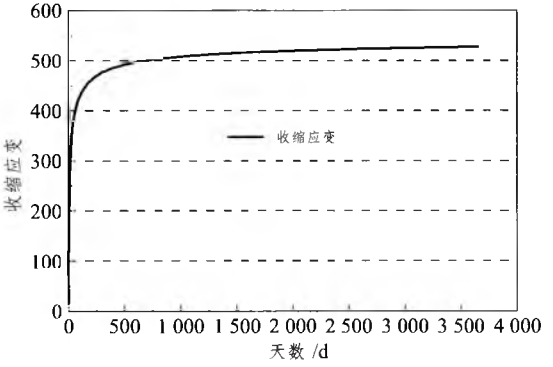


图 B.1.2　收缩应变时间历程曲线

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

B.2 徐变系数

B. 2. 1 当压应力小于 0.4 倍 UHPC 抗压强度值时，UHPC 为线性徐变，其徐变系数可按下列公式计算：

$$\varphi(t,t_0)=\varphi_0(t_\infty,t_0)\cdot\frac{(t-t_0)^a}{(t-t_0)^a+b} \qquad (B.2.1)$$

式中：$\varphi(t,t_0)$——加载龄期为 t_0，计算考虑龄期为 t 时的 UHPC 徐变系数；

$\varphi_0(t_\infty,t_0)$——加载龄期为 t_0，UHPC 终极徐变系数，可按表 B.2.1 取值；

t ——计算考虑时刻的 UHPC 龄期（d）；

t_0 ——加载时 UHPC 龄期（d）；

a，b ——拟合系数，可按表 B.1 取值。

表 B.2.1 UHPC 终极徐变系数和系数 a、b 取值表

加载龄期 t_0/d	养护制度	终极徐变系数 $\varphi_0(t_\infty,t_0)$	系数 a	系数 b
4	标准养护	1.2	0.6	3.2
7	标准养护	1.0	0.6	4.5
28	标准养护	0.8	0.6	10
—	90 °C 蒸汽养护 2 d 或 80 °C 蒸汽养护 3 d	0.2	0.6	10

根据上述公式，可以得到用 UHPC R120 徐变系数随时间发展曲线，如图 B.2.1 所示。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

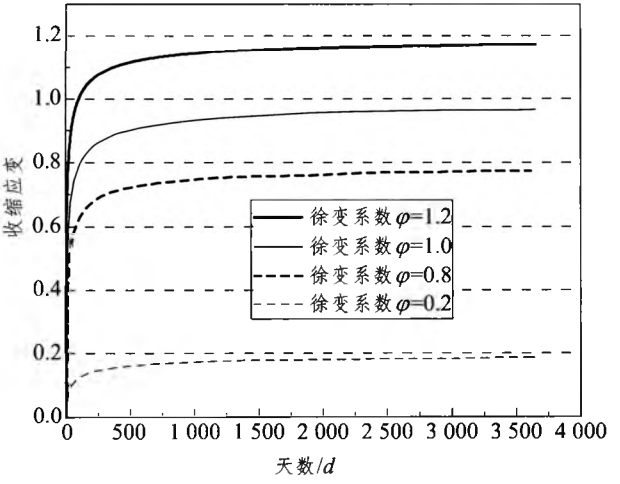


图 B.2.1　徐变系数时间历程曲线

当压应力大于 0.4 倍 UHPC 抗压强度值时，UHPC 为非线性徐变，其徐变系数宜通过试验确定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

附录 C　UHPC 拉伸本构模型

C. 0. 1　UHPC 受拉本构模型包含应变硬化应力-应变关系 $\sigma(\varepsilon)$ 和应力软化应力-裂缝宽度 $\sigma(w)$ 两个部分。

应变硬化段的应力-应变关系和应力软化段的应力-裂缝宽度关系均采用双线性函数表示，按下列公式确定，示意图如图 C.0.1 所示。

$$\text{应变硬化段}\quad \sigma(\varepsilon)=\begin{cases}\dfrac{f_{ct}}{\varepsilon_{ca}}\varepsilon, & 0<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{ca}\\ f_{ct}, & \varepsilon_{ca}<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{pc}\end{cases}\qquad\text{（C.0.2-1）}$$

$$\text{应力软化段}\quad \sigma(w)=\begin{cases}C_0, & w_{cb}<w\leqslant w_{pc}\\ C_1-C_2w, & w_{pc}<w\leqslant w_1\\ C_3-C_4w, & w_1<w\leqslant w_2\end{cases}\qquad\text{（C.0.2-2）}$$

式中：f_{ct}——UHPC 受拉应变硬化阶段平均应力；

ε_{ca}——UHPC 受拉线性偏离初裂应变；

ε_{pc}——UHPC 受拉极限应变；

ε——UHPC 受拉应变；

w——裂缝宽度；

w_{cb}——可视裂缝宽度，为 0.02 mm；

w_{pc}——UHPC 峰值应力时裂缝宽度；

σ_{w1}, w_1——UHPC 应力软化段反弯点应力和裂缝宽度；

σ_{w2}, w_2——UHPC 断裂时应力和裂缝宽度；

C_0——拟合参数，$C_0=f_{ct}$；

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

C_1——拟合参数，$C_1 = f_{ct}$；

C_2——拟合参数，$C_2 = \dfrac{(f_{ct} - \sigma_{w1})}{w_1}$；

C_3——拟合参数，$C_3 = \sigma_{w1} + \dfrac{(\sigma_{w2} - \sigma_{w1})}{w_1 - w_2} w_1$；

C_4——拟合参数，$C_4 = \dfrac{(\sigma_{w1} - \sigma_{w2})}{w_1 - w_2}$。

注：式中相关特征点参数可通过试验获得。

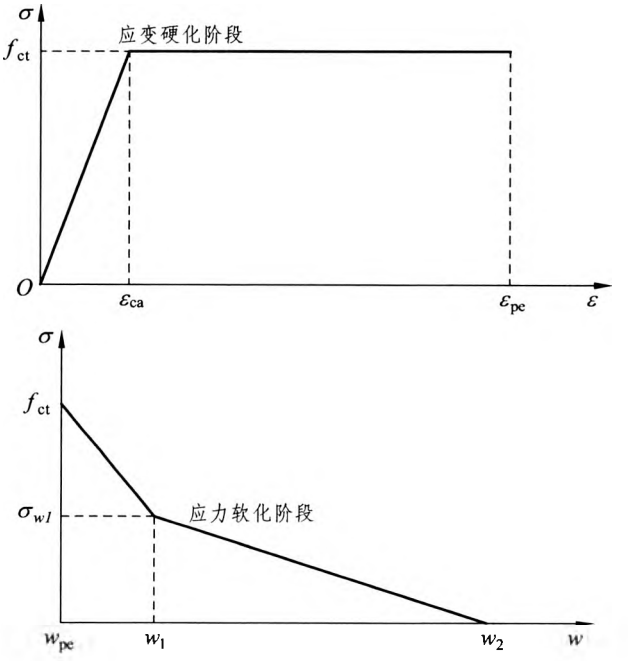


图 C.0.1　UHPC 拉伸本构关系模型

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

附录 D　UHPC 抗拉性能试验方法

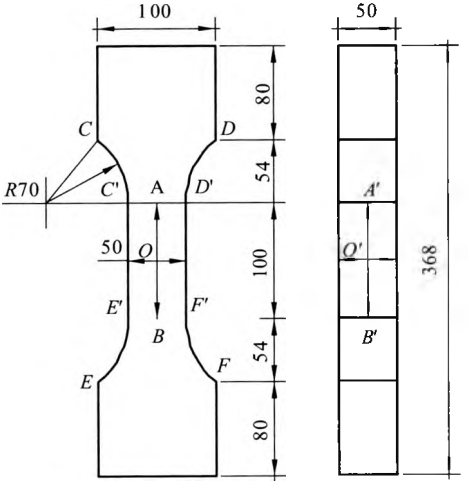
D.1　总　则

D. 1. 1　本附录规定了超高性能混凝土的抗拉性能试验方法。

D. 1. 2　本方法适用于超高性能混凝土的弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、抗拉强度、峰值拉应变和抗拉弹性模量的测定。

D.2　试件尺寸和数量

D. 2. 1　试件尺寸见图 D.2.1。



A'、B'—测量标距点，间距为 100 mm ± 0.1 mm；$C'D'CD$、$E'F'EF$—引伸仪固定架安装位置区域；O—成型试件底面的中心点；O'—成型试件侧面的中心点；A'、B' 点及其对称点位置为引伸仪测量位置；O、O' 点及其对称点为应变片粘贴位置；CC' 和 EE'、DD' 和 FF' 弧线分别与 $C'E'$、$D'F'$ 直线相切。

图 D.2.1　试件尺寸示意图

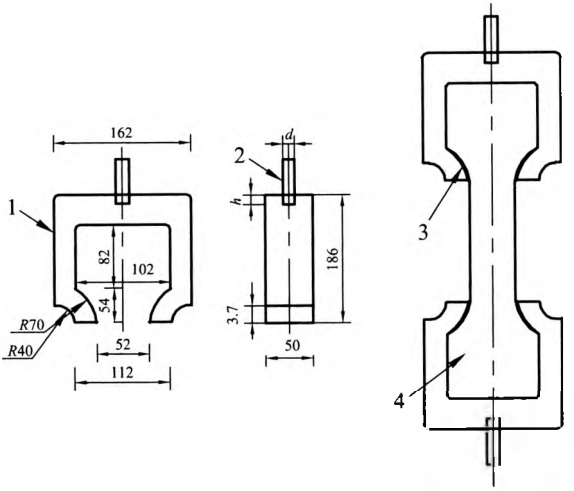
学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

D. 2. 2 试件数量：每组 6 个。

D.3 试件制作

D. 3. 1 试件的浇筑、成型、养护按本标准第 5 章中有关规定进行。

D. 3. 2 试件夹具的具体尺寸与试件的组装示意图如 D.3.2 所示。



1—试件夹具；2—试件夹具与试验机夹头的连接件，它与试件夹具 1 垂直固结；宜为螺杆或钢板；尺寸 d 和 h 根据试验机夹头要求而定；3—厚 0.7 mm～1.0 mm 的铝垫片；4—试件。

图 D.3.2 试件夹具及其与试件的组装示意图（单位:mm）

D.4 试件仪器

D. 4. 1 试验仪器应满足现行国家标准《普通混凝土力学性能试

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

验方法标准》GB/T 50081 中轴向拉伸试验方法的要求，其中拉力试验机可按位移控制模式进行加载。

D.5 试验步骤

D. 5. 1 应变片粘贴及引伸仪安装：宜于实验前将试件在规定试验环境中自然干燥 1 d。然后根据实验要求，按图 D.2.1 中的说明，用 502 或其他快干胶在试件两侧面和试件成型底面粘贴应变片；用固定架在试件两侧面安装引伸仪。

D. 5. 2 试件安装：如图 D.3.2 所示，将试件 4 放置于两试件夹具 1 中，保证两试件夹具的连接件 2 与试件 4 的中轴线一致并对中。在试件 4 与试件夹具 1 之间放置厚度为 0.7 mm～1.0 mm 的铝垫片 3；铝垫片 3 的尺寸和形状，与试件夹具 1 和试件 4 的接触面相同。

将如图 D.3.2 中组装好的待测试件上端与拉力试验机的上夹头固定，升降拉力试验机至合适高度，调整无预埋栓钉试件朝向，将组装好的待测试件下端固定。

D. 5. 3 偏心检查：首先确保各应变片、引伸仪正常工作，并调零；然后对试件施加小于 3 kN 的拉力，读取各应变片读数，计算试件偏心率，计算公式见现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的轴向拉伸试验方法；调整试件，使试件偏心率不超过 15%。

D. 5. 4 加载及拉伸程序设定应符合下列规定：

1 加载模式分为荷载控制加载、位移控制加载和混合分段加载：

1）荷载控制加载：试件对中后，以 0.1 MPa/s 的加载速

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

率加载至试件拉断。

2）位移控制加载：试件对中后，在试件开裂前，按0.06 mm/min 的加载速率进行加载；试件开裂后至最大拉力前，按 0.2 mm/min 的加载速率进行加载；达到最大拉力后，按0.5 mm/min 的加载速率进行加载，至试件拉断。

3）混合分段加载：试件对中后，按荷载控制加载模式加载至试件开裂，然后按试件开裂后的位移控制加载模式加载至试件拉断。

2 采用位移控制加载模式时，可先按 0.2 mm/min 的加载速率对一个试件加载至试件拉断；之后，按 D.6 节计算该试件的弹性极限抗拉强度，根据计算结果，设定其余试件的拉伸程序。

D. 5. 5 应力-应变及荷载-位移曲线记录。

采用电脑同步记录试件拉伸过程中的荷载、应变及拉伸仪的位移。试件开裂前，数据采样频率宜不小于 2 Hz；试件开裂后，数据采样频率宜不小于 5 Hz。

D. 5. 6 有效拉伸试件判定。

裂纹落在图 D.2.1 中 $A'B'$ 标距内的试件为有效拉伸试件。当有效拉伸试件数量不少于 3 个时，该组试验结果有效，取有效试件测定结果的平均值作为该组混凝土的测定值；否则，应重新进行试验。

D.6 结果计算

D. 6. 1 弹性极限抗拉强度应符合下列要求：

1 在应变片记录的应力-应变曲线中，取由线性转为非线性

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

的点作为弹性极限点，该点所对应的拉应力即为弹性极限抗拉强度。当弹性极限点不明显时，取200微应变对应的拉应力作为弹性极限抗拉强度。

2 取同一试件上各应变片测量结果的中间值作为该试件的测定值，取有效拉伸试件的平均值作为该组混凝土的测定值。

D.6.2 抗拉弹性模量和弹性极限拉应变应符合下列要求：

1 由各应变片记录的应力-应变曲线，按现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081轴向拉伸试验方法的规定，计算出每条曲线对应的弹性模量，取中间值作为被测试件的抗拉弹性模量。

2 取有效拉伸试件弹性模量的平均值作为该组混凝土的抗拉弹性模量。

3 由D.6.1得到的该组混凝土的弹性极限抗拉强度除以抗拉弹性模量即得该组混凝土的弹性极限拉应变。取200微应变确定弹性极限强度的，其弹性极限拉应变记为200微应变。

D.6.3 抗拉强度与峰值拉应变应符合下列要求：

1 试件的抗拉强度为最大拉力除以试验前测量的标距中心初始截面面积。对应抗拉强度的应变即为峰值拉应变。可按现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081中轴向拉伸试验方法的规定，由应力-应变曲线或荷载-位移曲线确定并计算试件的抗拉强度和峰值拉应变。

2 取各应力-应变曲线或荷载-位移曲线计算出的抗拉强度中间值作为被测试件的抗拉强度。取各峰值拉应变的中间值，作为被测试件的峰值拉应变。

3 取有效拉伸试件的抗拉强度、峰值拉应变的平均值作为

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

该组混凝土的抗拉强度和峰值拉应变。

D.7 试验报告

D.7.1 试验报告按现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》 GB/T 50081 的有关规定进行编制。

D.7.2 提供各试件测试中间值所对应的应力-应变或荷载-位移曲线，在曲线上标示出弹性极限抗拉强度和抗拉强度的取值点；标明加载模式。

D.7.3 提供被测混凝土的弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、抗拉强度、峰值拉应变和抗拉弹性模量。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

本标准用词说明

1 在执行本标准条文时区别对待，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：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2）表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，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”。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

引用标准名录

1 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
2 《地下工程防水技术规范》 GB 50108
3 《混凝土外加剂应用技术规范》 GB 50119
4 《工程结构可靠性设计统一标准》 GB 50153
5 《混凝土质量控制标准》GB 50164
6 《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》 GB 50728
7 《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》 GB/T 8923
8 《活性粉末混凝土》 GB/T 31387
9 《普通混凝土力学性能试验方法标准》 GB/T 50081
10 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082
11 《混凝土强度检验评定标准》 GB/T 50107
12 《混凝土结构耐久性设计规范》 GB/T 50476
13 《铁路桥涵混凝土结构设计规范》 TB 10092
14 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》 CJJ 2
15 《城市桥梁设计规范》 CJJ 11
16 《城市桥梁养护技术标准》 CJJ 99
17 《城市桥梁抗震设计规范》 CJJ 166
18 《公路桥涵设计通用规范》JTG D60
19 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG 3362
20 《自密实混凝土应用技术规程》 JGJ/T 283
21 《桥梁成品预应力钢绞线束》 JT/T 861

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

22 《无粘结预应力筋用防腐润滑脂》 JG/T 430

23 《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》 JTG/T 3310

24 《混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件》 JT/T 695

25《桥梁成品预应力钢绞线束》 JTT 861

26 《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》 JT/T 722

27 《公路桥梁加固设计规范》 JTG/T J22

28 《补偿收缩混凝土应用技术规程》 JGJ/T 178

20 《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T F50

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

四川省工程建设地方标准

四川省城镇节段预制超高性能混凝土梁桥技术标准

Technical standards for UHPC Girder Bridge with Segmental Precast Method for Sichuan Province

DBJ51/T 138 – 2020

条 文 说 明

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

制定说明

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，本标准编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

目　次

1　总　则…… 115

3　基本规定…… 116

3.1　设　计…… 116

3.3　检验与验收…… 116

4　材　料…… 117

4.1　超高性能混凝土…… 117

5　设　计…… 118

5.1　一般规定…… 118

5.2　持久状况承载能力极限状态计算…… 122

5.3　持久状况正常使用极限状态计算…… 130

5.4　持久状况和短暂状况构件的应力计算…… 135

5.5　疲劳验算…… 137

5.6　耐久性设计…… 139

5.7　构件计算…… 140

5.8　构造要求…… 141

6　施　工…… 146

6.2　原材料准备及储存…… 146

6.3　模板与支架…… 146

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

6.4 节段预制…… 146
6.5 节段移运与堆放…… 146
6.6 逐跨拼装施工…… 147
6.8 拼装设备…… 147
6.9 湿接缝施工…… 147

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

1 总 则

1.0.2 本标准适用于采用 UHPC 简支、连续和连续刚构体系梁桥上部构造的设计、施工、验收与管养，桥梁的基础、下部构造和附属结构的设计、施工、验收与管养，应符合国家现行有关标准的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

3 基本规定

3.1 设 计

3.1.5 非分隔带位置不宜设置纵向变形缝、伸缩缝或柔性接缝。如单幅宽度较大，为满足节段运输、拼装条件和便于施工，可横向再分条进行节段预制，分条间应设置可靠的横向连接系，桥面板应采用现浇 UHPC 纵缝连接，横向连接系和现浇桥面板纵缝的构造和设计应符合本标准的规定。

3.3 检验与验收

3.3.2 预制构件、预混料或现场浇筑构件，在设计阶段，均需进行全面性能检验，测试性能包括：(1) 工作性及初凝、终凝时间。(2) 抗渗性能。(3) 抗压强度：标准蒸汽养护后的抗压强度；常温下的抗压强度随龄期的发展，可包括 12 h、1 d、3 d、7 d、28 d 及其他规定龄期。(4) 抗拉性能：标准蒸汽养护后或常温养护 28 d 的弹性极限抗拉强度、抗拉强度、拉伸应力应变曲线。(5) 抗弯性能：抗弯强度、荷载挠度曲线。(6) 弹性模量。(7) 收缩特性：标准蒸汽养护后的收缩可忽略；常温下收缩发展规律。(8) 徐变。(9) 泊松比。(10) 热膨胀系数。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

4 材 料

4.1 超高性能混凝土

4.1.3 钢纤维的性能检验应符合本标准附录 A 的规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5 设　计

5.1　一般规定

5.1.1　根据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 规定，采用极限状态法进行设计。

5.1.2　根据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 规定结构设计应考虑持久设计状况、短暂设计状况、偶然设计状况和地震设计状况等四种设计状况。偶然设计状况只需作承载能力极限状态设计，地震设计状况应按照现行行业标准《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 进行抗震验算。

节段预制桥梁在预制、吊装、运输、安装等施工过程中，桥梁结构体系、所承受的荷载、支承条件等与使用阶段相比，都有可能有所不同，此时，设计要根据实际情况进行短暂状况的极限状态设计，除需进行承载能力极限状态设计外，亦可根据需要进行正常使用极限状态设计。

5.1.3　桥梁结构安全等级是根据结构的重要性及结构破坏后果，即危及人的生命、造成经济损失、对社会或环境产生影响等的严重程度所确定的。国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 附录 A.3.1 条规定划分了结构的三个安全等级以及对应的结构类型，本标准结合行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11—2011 中第 3.0.14 条规定，城市桥梁中除次干路和支路上的小桥设计安全等级为二级外，其余桥梁设计安全等级均为一级，而采用 UHPC 桥梁一般为特大桥和大桥居多，故结合行业标准《城

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

市桥梁设计规范》CJJ 11—2011 中的规定统一将桥梁的结构安全等级划分为一级。

5.1.4 桥梁在施工过程中存在体系转换，一般采用增量叠加法（分阶段计算结构的变形、内力和应力增量，逐阶段累加）计算作用效应。UHPC 收缩徐变效应，需考虑超静定结构的内力重分布和钢筋约束混凝土引起的应力重分布，由施工阶段混凝土结构的初始内力、初始龄期和施工时段，按本标准收缩徐变函数计算。

UHPC 桥梁的空间效应主要为剪力滞效应、汽车荷载的横向分布效应和箱梁的薄壁效应。结构空间效应分析不应盲目套用简化参数，应采用精细化的有限元模型。桥梁结构的实用精细化分析模型可参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定或采用实体有限元或板单元模型分析。

5.1.5 设计计算一般均采用简便的材料力学方法，基本假定是在满足设计精度的前提下，规范的公式可采用材料力学公式。通过对 UHPC 的弹性模量折减，使得计算时可将材料均视为弹性。

5.1.6 与现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 保持一致。

5.1.7 UHPC 优异的材料性能使其截面薄壁化，导致 UHPC 连续梁负弯矩区域底板承受的压力较大，底板可能存在局部屈曲的问题；同时负弯矩区弯矩、剪力均较大，腹板在弯矩和剪力共同作用下，也可能存在局部屈曲问题。因此，有必要对 UHPC 箱梁底板进行局部稳定性进行验算。要求底板和腹板的局部稳定的弹性稳定系数采用有限元分析软件等工具建立空间有限元模型进行计算。弹性稳定分析通过求解特征值，得到底板或腹板失稳临界

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

荷载与设计荷载的比值，即弹性稳定系数。

5.1.8 接缝抗剪是节段预制拼装桥梁的薄弱环节。对于节段预制拼装桥梁而言，在进行桥梁抗剪设计时需要对接缝抗剪承载力验算。若接缝抗剪承载力低于主梁斜截面抗剪承载力时，将会在接缝位置发生抗剪破坏，反之，将会发生主梁斜截面抗剪破坏。为此，需对接缝抗剪承载能力进行验算，为确保主梁受剪的破坏模式是主梁斜截面受剪破坏，而不是接缝位置受剪破坏，本标准建议接缝抗剪承载力不低于主梁斜截面抗剪承载力。目前，国内外关于节段式 UHPC 梁接缝受剪破坏的研究成果较少，尤其是在弯矩影响下对 UHPC 梁接缝抗剪承载力影响的研究。因此，本标准建议接缝抗剪承载能力宜开展相关试验研究确定。

本标准总结与接缝剪力键有关的科研成果，根据其抗剪承载力理论计算公式进行试算，以 60 m 简支梁为例，梁高 2 m，采用 R120 级 UHPC，剪力键布置形式如图 1 和图 2 所示，满足本标准 5.8 节的规定，计算结果如表 1 所示。

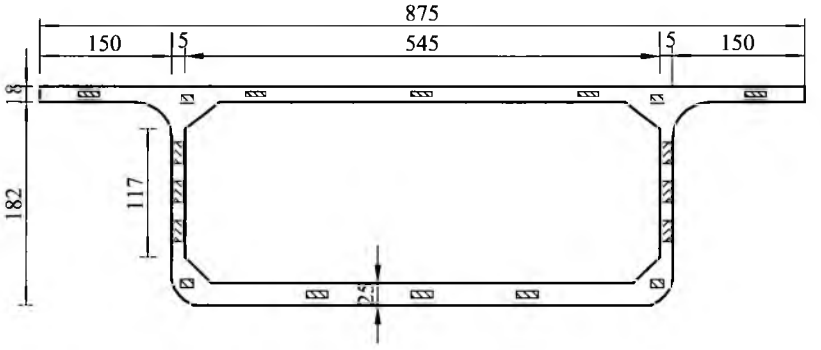


图 1　梁截面剪力键布置图（单位:cm）

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

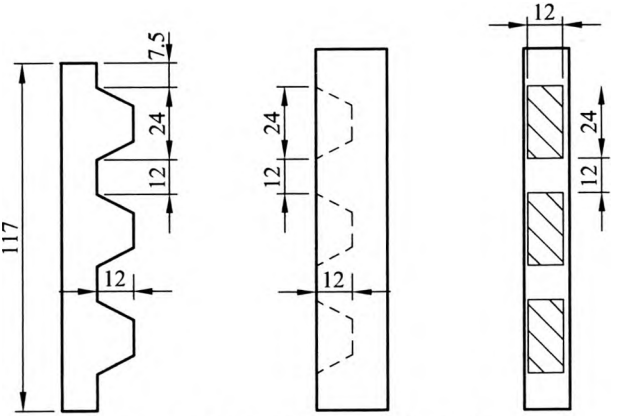


图 2　剪力键大样图（单位:cm）

表 1　侧向压力比为 0.02（侧向压应力 3 MPa）时胶接缝抗剪承载力

研究团队	理论公式	剪力键抗剪（占比）	平接缝抗剪（占比）	合计	应用的接缝类型
团队 1	$V_j = A_k\sqrt{f_c'}(1+0.18\sigma_n)+0.64_{sm}\sigma_n$	6 178.0 kN (55.6%)	4 926.0 kN (44.4%)	11 104.0 kN	干接缝胶接缝
团队 2	$V_j = A_k f_c'^{0.55}(0.485+0.12\sigma_n)+0.64_{sm}\sigma_n$	4 206 kN (46.1%)	4 926.0 kN (54.9%)	9 132.0 kN	胶接缝
团队 3	$V_j = \alpha\alpha_1 A_j(0.39 f_{cu}^{2/3}+1.51\sigma_n)$	3 264.0 kN (29.1%)	7 935.0 kN (70.9%)	11 199.0 kN	胶接缝
团队 4	$\tau = 0.55\sqrt{f_c'}+1.4\sigma_n$			9.0 MPa	胶接缝
团队 5	$\tau = 11.10\sqrt{f_c'}+1.2\sigma_n$(in psi)			11.6 MPa	胶接缝
按本标准计算的梁体斜截面抗剪承载力（仅计入斜截面内的 UHPC 和纤维抗剪承载能力）				6 508.0 kN	
按本标准计算的梁体斜截面抗剪承载力（计入斜截面内的 UHPC、纤维和预应力钢束抗剪承载能力）				10 867.0 kN	

根据表 1，胶接缝抗剪强度接近于整体浇筑构件，本标准要求采用全预应力混凝土构件以保证接缝位置的侧向压力比，从而保证接缝处的抗剪承载能力。UHPC 桥梁设计时可参考表 1 中各研究团队的研究成果对接缝抗剪承载能力进行试算。节段梁接缝

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

抗剪是直接影响工程质量的关键技术问题，加之目前超高性能混凝土尚处于推广阶段，需要大量的实际工程采集数据来为新工艺的发展做理论支撑。现阶段采用该工艺的项目往往为规模较大的桥梁项目，施工单位一般都具有较丰富的施工经验和较为先进的施工设备，有利于信息的采集，故建议对结构复杂桥梁或条件允许时对接缝抗剪承载能力开展相关试验研究。

5.1.10 UHPC 桥梁结构设计采用的可变作用中的设计汽车荷载与人群荷载应按现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的有关规定，其余作用及作用效应组合均应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的有关规定。

UHPC 梁体桥面板计算及计算连续梁中间支承处的负弯矩考虑支座宽度的折减影响应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的有关规定。

5.2 持久状况承载能力极限状态计算

5.2.1 本条关于构件正截面承载力计算的基本假定，基本沿用了行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 的规定：

1 仍维持平截面假定。试验表明，在纵向受拉钢筋的应力达到屈服强度之前以及达到屈服强度后的一定塑性转动范围内，截面的平均应变基本符合平截面假定。引用平截面假定可以将各种类型截面（包括周边配筋截面）在单向或双向受力情况下的正截面承载力计算贯穿起来，提高了计算方法的逻辑性和条理性，使计算公式具有明确的物理概念。目前，国际上的主要规范均采

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

用平截面假定。

2 采用干接缝和胶接缝施工的预制节段拼装桥梁，主梁钢筋和主梁 UHPC 在接缝处断开。为此，不考虑接缝处 UHPC 的抗拉强度和受拉区普通钢筋的作用，其余截面或情况可考虑受拉区普通钢筋作用和偏安全地考虑 50%的 UHPC 抗拉强度。

3 体内钢筋与混凝土和结性能良好，两者变形协调。

5.2.2 本条关于受弯构件和偏心受力构件正截面受压区 UHPC 压应力计算的基本假定，沿用现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 的规定：

1 受压区 UHPC 应力图形维持等效矩形应力块，β 值为矩形应力块高度 x 与实际受压区高度 x_0 之比。根据受压区合力相等和作用点相同的条件可得 $\beta = 1 - \varepsilon_0/(2\varepsilon_{cu}) = 0.773$，故本标准统一取 0.77。

2 矩形应力块的等效应力取 UHPC 的轴心抗压强度设计值。

5.2.3 本条关于受弯构件和偏心受力构件正截面受拉区 UHPC 拉应力计算的基本假定：

1 受拉区 UHPC 应力图形维持等效矩形应力块，受拉区等效矩形应力图的高度 x_t 为截面全高 h 与实际受压区高度 x_0 之差值。

2 矩形应力块的等效应力偏安全地取 UHPC 的轴心抗压强度设计值的 50%。

5.2.4 本条文参考《AASHTO Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges》（AASHTO，2012）相关条文制定。对于后张法来说，预应力体系是由全粘结预应力筋和无粘结预应力筋或部分粘结预应力筋组合而成。不同的粘结

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

条件所提供的预应力不同，截面强度折减系数主要考虑粘结条件。

5.2.5 本条文规定原理与行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 规定相同。主梁受弯构件的纵向受拉钢筋屈服和截面受压区混凝土破坏同时发生（即界限破坏）时，构件正截面相对界限受压区高度 $\xi_b(\xi_b/h_0)$，可根据平截面假定建立的下列公式求得：

1 对热轧普通钢筋 HRB400：

$$\xi_b=\frac{\beta}{1+\dfrac{f_{sd}}{\varepsilon_{cu}E_s}} \tag{1}$$

2 对钢绞线：

$$\xi_b=\frac{\beta}{1+\dfrac{0.002}{\varepsilon_{cu}}+\dfrac{f_{pd}-\sigma_{p0}}{\varepsilon_{cu}E_p}} \tag{2}$$

式中：β——受压区等效矩形应力图高度与实际受压区高度的比值；

f_{sd}、f_{pd}——纵向普通钢筋的和预应力钢筋抗拉强度设计值，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》JTG 3362 的规定采用；

ε_{cu}——受弯构件受压边缘 UHPC 极限压应变，按本标准规定取值；

σ_{p0}——受拉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，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》

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

JTG 3362 的规定计算。

公式（1）中所有计算参数均为已知，可以直接计算出 ξ_b 值。公式（2）中只有 σ_{p0} 为未知数，可以根据以往常规预应力混凝土构件的设计经验，对（$f_{pd}-\sigma_{p0}$）作一定范围的设定，计算出最大和最小的 ξ_b 值。最后确定本标准表 5.2.5 的数值时，选用了计算的最小值，尽可能使构件取得较好的延性。

5.2.6 体外预应力筋的应力设计值与无粘结预应力筋的设计值确定方法基本相似，国内外都采用了有效预应力值再加预应力增量的计算方法。本条文规定参考了国内外规范及工程经验，取体外预应力筋的增量为 50 MPa。

5.2.7 ~ 5.2.10 UHPC 受弯构件抗弯承载力的设计表达式是根据本标准第 5.2.1 ~ 5.2.3 条规定的基本假定及承载力计算的基本要求建立的，式中包含了配筋 UHPC 和预应力 UHPC 受弯构件所有设计参数，设计时可根据设计对象的具体情况选用。考虑截面受拉区对承载力的影响是 UHPC 受弯构件与普通钢筋混凝土受弯构件抗弯承载力计算的主要区别。考虑到极限状态时，截面受拉边缘附近拉应力较大区域的钢纤维可能被拉断或拔出，为此，本标准考虑 0.5 倍的抗拉强度设计值参与计算。

为防止受弯构件的超筋设计，本标准规定了截面受压区高度的限制条件 $x \leqslant \xi_b h_0$，其中相对受压区高度 ξ_b，通过计算已于本标准表 5.2.5 中列出。当给定钢筋种类可求得相应的受拉钢筋配筋率 ρ_b，这个 ρ_b 即为受弯构件界限（最大配筋率）。因此截面受压区高度的限制条件也就是限制受弯构件的配筋率。一般来说，当设计计算的受压区高度不能满足上述要求时，表明受拉区纵向钢筋配置过多或构件高度不足，需进行调整。但是，这个限制条

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

件只是从理论上得到保证，当 x 与 $\xi_b h_0$ 接近或相等时，受弯构件仍有可能发生具有明显脆性破坏特征的界限破坏。因此，在实际工程中应尽量避免出现两者接近或相等的情况。

5.2.11 在 UHPC 受弯构件正截面抗弯承载力的计算中，为了使配置在受压区的纵向钢筋达到其抗压强度设计值，规范规定了截面受压区高度 x 必须符合本标准第 5.2.8 条公式（5.2.8-5）或（5.2.8-6）的要求；当不符合要求时，则可按本条提供的公式近似地计算。该公式是假定受压区混凝土的压力点在受压纵向钢筋的合力点上，以该点为矩心取矩建立起来的，可用于一般情况（受压边缘设置一般厚度的保护层）下的承载力的计算。

5.2.12～5.2.13 条参考法国 UHPC 设计指南《Recommendation of Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete》（AFGC，2013）相关条文规定对 UHPC 抗剪承载能力进行验算。为了验证法国 UHPC 设计指南的可靠性，国内研究机构大量调研国内关于 UHPC 梁抗剪性能的相关试验结果，并将抗剪承载力试验结果与按法国 UHPC 设计指南条文规定得到的抗剪承载力计算结果对比，如图 3 所示。由图可知，法国 UHPC 设计指南可较好且偏安全地预测 UHPC 构件的抗剪承载力，并在此基础上，考虑了接缝对抗剪承载力的折减系数。需要说明的是法国 UHPC 设计指南中抗剪承载力计算并未包含弯起的预应力钢筋提供的抗剪承载能力项。为此，本标准参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）和《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T J22）的相关条文补充了体内预应力和体外预应力弯起钢筋的抗剪承载能力项。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

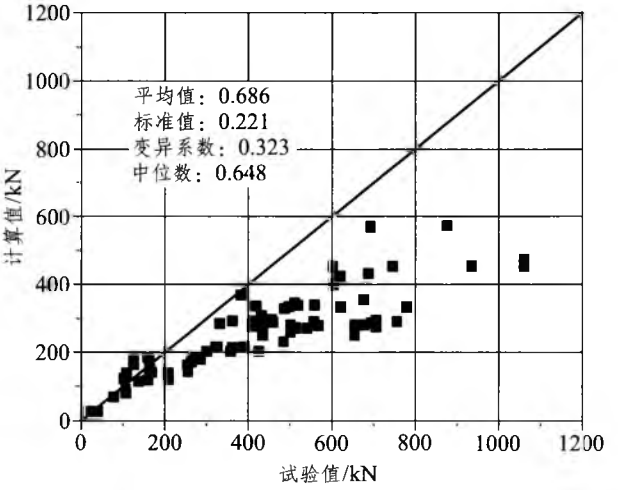


图 3　国内 UHPC 构件抗剪承载力试验值与法国 UHPC 指南抗剪承载力计算值对比

5.2.14　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 中对抗剪截面尺寸做出限定主要是为了防止钢筋混凝土梁斜裂缝开展过宽或出现斜压破坏。表 2 列出不同规范关于抗剪截面尺寸的规定，图 4 给出了不同规范关于抗剪截面尺寸应力限值的规定。需要说明的是，为便于比较，混凝土抗压强度取值方法与本标准相同。由图 4 可知，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 对于抗剪截面的尺寸要求最为严格，而《纤维混凝土结构技术规程》CECS38 的要求最为宽松，而法国 UHPC 设计指南和日本 UHPC 规范以及《混凝土结构设计规范》GB 50010 的要求较为接近。因此，本条文参考法国 UHPC 设计指南《Recommendation of Ultra High PerformanceFiber-Reinforced Concrete》（AFGC, 2013）相关条文规定对 UHPC 抗剪截面尺寸进行验算是合适的。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 2　不同规范关于抗剪截面尺寸的规定

规范名称	限值规定
《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362	$0.51\times10^{3}\sqrt{f_{\mathrm{cu,k}}}bh_0$
法国规范	$2\times1.14\dfrac{\alpha_{\mathrm{cc}}}{\gamma_{\mathrm{c}}}bz\sqrt[3]{f_{\mathrm{ck}}^2}/(\cot\theta+\tan\theta)$
日本规范	$0.84\sqrt[3]{f_{\mathrm{cd}}'^2}\sin(2\beta_{\mu})bd/\gamma_{\mathrm{b}}$
《混凝土结构设计规范》GB 50010（2015 版）	$\begin{cases}0.25\beta_{\mathrm{c}}f_{\mathrm{c}}bh_0 & \text{当}h_{\mathrm{w}}/b\leqslant4\text{时}\\ 0.20\beta_{\mathrm{c}}f_{\mathrm{c}}bh_0 & \text{当}h_{\mathrm{w}}/b\geqslant6\text{时}\\ \text{线性内插} & \text{当}4<h_{\mathrm{w}}/b<6\text{时}\end{cases}$
《纤维混凝土结构技术规范》CECS 38	$\begin{cases}0.25\beta_{\mathrm{c}}f_{\mathrm{c}}(1+\lambda_{\mathrm{f}})bh_0 & \text{当}h_{\mathrm{w}}/b\leqslant4\text{时}\\ 0.20\beta_{\mathrm{c}}f_{\mathrm{c}}(1+\lambda_{\mathrm{f}})bh_0 & \text{当}h_{\mathrm{w}}/b\geqslant6\text{时}\\ \text{线性内插} & \text{当}4<h_{\mathrm{w}}/b<6\text{时}\end{cases}$

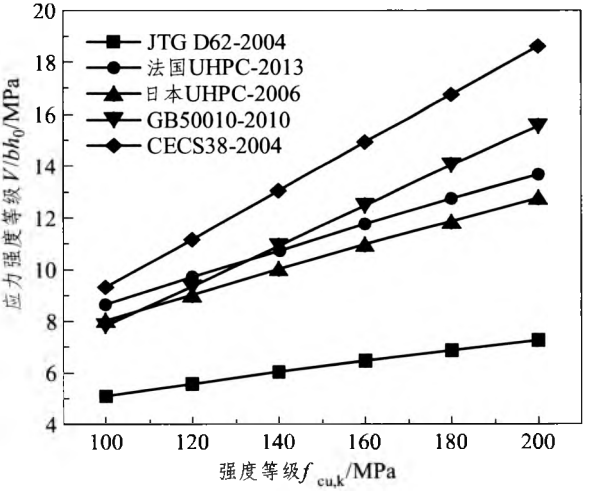


图 4　不同规范抗剪截面尺寸的应力限值要求

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

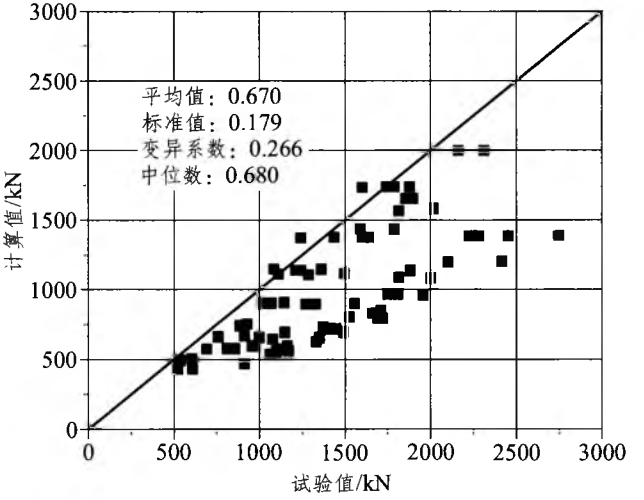


图 5　国内 UHPC 构件局部抗压承载力试验值与本标准局部抗压承载力计算值对比

5.2.15　本条规定偏安全地按行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 第 5.6～5.7 节规定执行。需要说明的是，传统的高强度混凝土，其局部承压强度提高系数，无论是极限承载力阶段还是开裂阶段，都比传统的普通强度混凝土要低，为此行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 中规定采用混凝土局部承压修正系数 η_s 来考虑随着混凝土等级（C50～C80）提高而降低的影响，对于 C50 及以下取 1.0，对于 C80 取 0.76，中间线性内插取值。但是对 UHPC，掺有大量钢纤维，受压脆性得到显著改善。本标准按原规定混凝土局部承压修正系数 η_s 线性外延至 C120 取值，即取 UHPC 局部承压修正系数 $\eta_s = 0.44$。国内某研究机构调研国内关于 UHPC 局部抗压性能的相关试验结果，并将局部抗压承载

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

力试验调研结果与按本标准规定计算得到的局部抗压承载力结果对比，如图 5 所示。由图可知，按本标准规定计算 UHPC 局部抗压承载能力可较好地预测 UHPC 构件的局部抗压承载力。间接钢筋影响系数 k 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》JTG 3362—2018 中规定线性内插取值。

在后张法构件的锚头局部受压区，宜进行端部锚固区段内的局部应力分析，并结合行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 的构造要求，配置闭合式箍筋。

5.3 持久状况正常使用极限状态计算

5.3.1 节段预制拼装混凝土桥梁的接缝是受力性能和耐久性能的较弱部位，即使采用多重剪力键环氧胶接缝，也可能因键块质量缺陷和键块内无普通钢筋而出现问题。因此，对于承受作用较为不利的节段预制拼装混凝土桥梁的上部结构，通常按全预应力构件设计，包括全体内、全体外及体内外混合预应力构件，以避免在接缝部位受拉或过早开裂及对抵抗环境腐蚀作用不利。当采用 A 类部分预应力混凝土构件设计时，宜配置接缝处连续的普通钢筋，尤其对采用砂浆压密接缝或现浇混凝土接缝的情况，在受力上应满足长期效应组合下截面边缘不消压的要求，以确保体内预应力钢筋的防腐蚀能力。

5.3.2 本条文规定体内预应力筋的张拉控制应力与现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 保持一致，体外预应力筋的张拉控制应力与现行行业标准《公路桥梁加固设计规范》JTG/T J22 保持一致。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.3.3 本条文规定与现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 相关条款规定相同。其中体外预应力钢束的摩擦系数取值、锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值参考现行行业标准《公路桥梁加固设计规范》JTG/T J22 相关条文规定。

5.3.4 本条文规定与行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362—2018 第 6.3 节规定相同。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》JTG 3362 相关条款编写。受拉侧无体内预应力钢筋的胶接缝截面、无连续体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，由于无连续体内钢筋通过接缝、接缝开展后存在应力集中问题，在计算正截面混凝土的拉应力时，对施加预应力产生的预压力进行了适当折减。

5.3.5 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 第 6.3.1 条规定对预应力混凝土桥梁的主拉应力做了较为严格的限制，全预应力构件限制在 $0.4f_{tk}$ 以确保预应力混凝土桥梁腹板不出现斜裂缝。做出这一严格限制的重要原因是：试验统计表明，普通混凝土抗拉强度的离散性很大，施工不十分重视混凝土质量，实际桥梁主拉应力超出规范限值的概率大大增加。而 UHPC 具有较高的抗拉强度和受拉应变硬化性能。调研国外 UHPC 规范关于主拉应力限值的规定，如表 3 所示。由表可知，对本标准的 UHPC R120 而言，按法国 UHPC 规范规定限值最低，为 4.2 MPa。综合考虑，结构的安全性和充分利用 UHPC 材料性能，本标准规定设计主拉应力 $\sigma_{tp} \leqslant 0.4f_{tk}$。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

表 3　各国 UHPC 规范主拉应力限值规定

规范名称	主拉应力限值	对于本标准 UHPC R120
澳大利亚规范	$\leqslant 5.0+0.13\sqrt{f_c'}$（MPa）	$\leqslant 5.0+0.13\sqrt{f_c'}$ $=5.0+0.13\sqrt{85}=6.2$ (MPa)
日本规范	不大于设计初裂强度（规范中规定设计初裂强度为 8 MPa）	4.8 MPa
法国规范	$\leqslant 0.6f_{tk}$	$\leqslant 0.6f_{tk}=0.6\times 7=4.2$ MPa

5.3.6～5.3.7　UHPC 主梁按全预应力构件设计，纵向整体受力不允许出现拉应力，不用进行裂缝宽度验算。横桥受力为主的板件（如横隔板上弦板）按配筋 UHPC 构件设计，应进行裂缝宽度验算。根据参考文献《Computer Modeling and Investigation on the Steel Corrosion in Cracked Ultra High Performance Concrete》（Rafiee A.，2015）的研究，当裂缝宽度不超过 0.05 mm 时，可认为裂缝对于超高性能混凝土的耐久性没有影响。因此本标准规定，在正常使用极限状态下，UHPC 的最大裂缝宽度不得超过 0.05 mm。

5.3.11　国内近年来开展了大量 UHPC 构件试验，试验结果表明按照法国 UHPC 设计指南《Recommendation of Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete》（AFGC，2013）给出的裂缝宽度计算方法可较好地预测 UHPC 结构的裂缝宽度，因此本标准参考法国 UHPC 设计指南给出裂缝宽度计算方法。

计算配筋 UHPC 构件的裂缝宽度时，应考虑受拉区 UHPC 参与工作，计算流程如图 6 所示。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

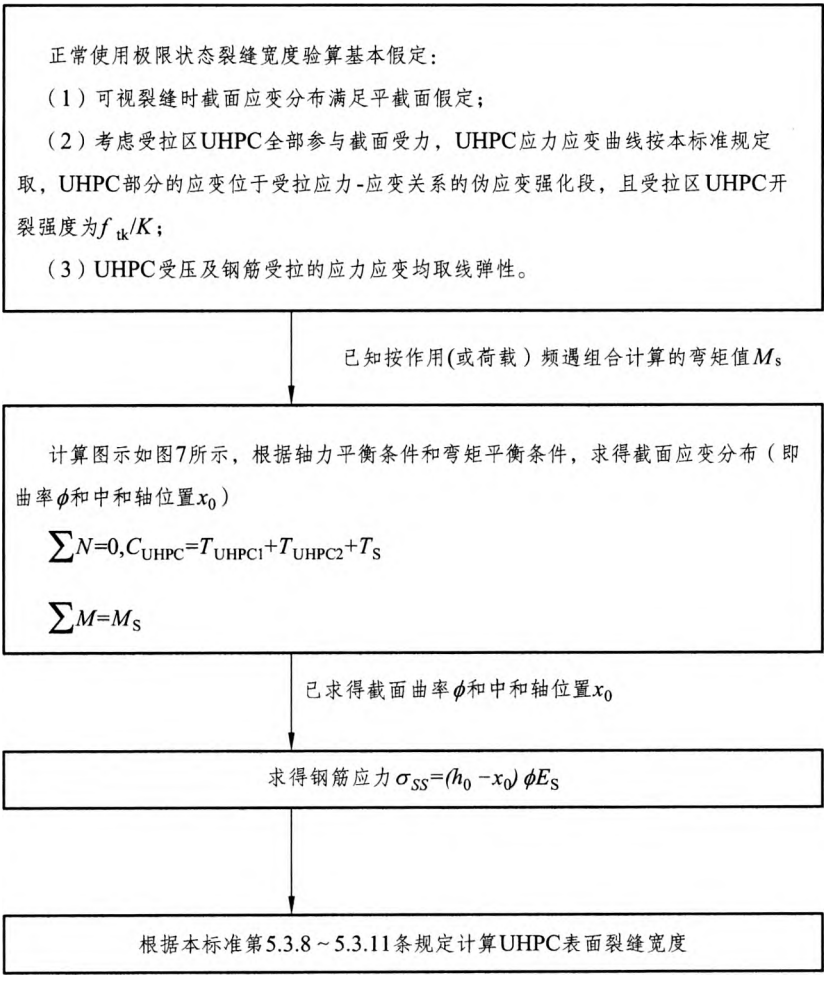


图 6　UHPC 构件裂缝宽度计算流程

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

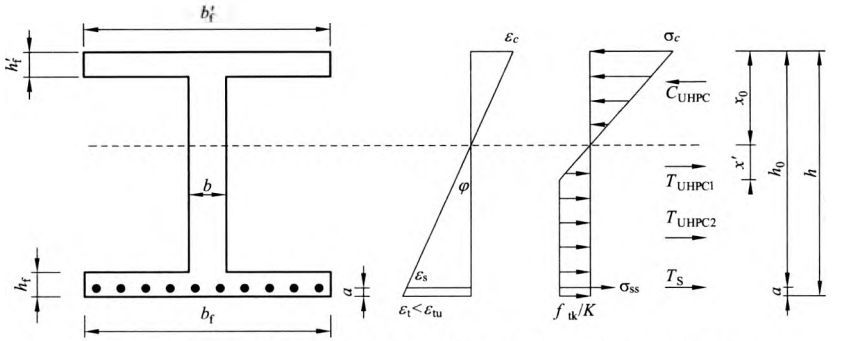


图 7　UHPC 构件正常使用极限状态中和轴和曲率计算图示

式中：h——截面高度；

h_0——截面有效高度，即受拉钢筋中心线到受压边缘的距离；

a——受拉区钢筋合力点至受拉边缘的距离；

x_0——截面受压区的高度或中和轴到受压边缘的距离；

x'——受拉不开裂高度（UHPC 拉应力在 0 ~ $f_{ctm,el}$ 之间）；

ε_c、σ_c——受压边缘 UHPC 的应变和应力；

ε_s、σ_{ss}——受拉区钢筋的应变和应力；

ε_t——受拉边缘 UHPC 的应变；

f_{tk}——UHPC 抗拉强度标准值；

K——UHPC 纤维取向系数；

C_{UHPC}——受压区 UHPC 压力合力；

T_{UHPC1}——受拉区 UHPC 受拉弹性区拉力合力；

T_{UHPC2}——受拉区 UHPC 受拉塑性区拉力合力；

T_s——受拉区钢筋拉力；

φ——截面曲率。

5.3.12　行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

范》JTG 3362—2018 第 6.5.3 规定挠度长期增长系数 η_θ 取值，对于 C40 以下混凝土，取 1.60，对于 C40～C80，取 1.45～1.35，中间强度等级按直线内插取用。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 做出这一规定的主要原因是：对于普通混凝土，受压区混凝土在长期应力作用下会发生徐变及受压区与受拉区混凝土收缩不一致导致构件曲率增大，从而导致随着时间的增长，构件刚度降低，挠度增大。与普通混凝土相比，UHPC 的徐变系数较低，高温养护后低至 0.2，后期收缩为 0，进而随着时间的增长，其后期变形应较低。各国 UHPC 规范（法国、日本、瑞士、澳大利亚）均是通过考虑徐变系数的影响来考虑后期挠度的增长效应。由于 UHPC 徐变系数低、后期收缩为 0，综合考虑，本标准也采用引入徐变系数来考虑挠度长期增长系数，即 $\eta_\theta = 1 + \phi$。对于高温养护的 UHPC，取 $\eta_\theta = 1.2$。

5.4 持久状况和短暂状况构件的应力计算

5.4.1 本条文作了以下两项规定：

1 关于使用阶段全预应力 UHPC 受弯构件正截面 UHPC 的压应力限值的规定。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》JTG 3362 相关条款编写。受拉侧无体内预应力钢筋的胶接缝截面、无连续体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，由于无连续体内钢筋通过接缝、接缝开展后存在应力集中问题。因此对其正截面混凝土的压应力限值进行了适当地折减。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

2　关于使用阶段全预应力 UHPC 受弯构件受拉区预应力钢筋的拉应力限值的规定。受拉区体内预应力钢筋的最大拉应力限值参照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 相关条款。受拉区体外预应力钢筋的最大拉应力限值参照现行行业标准《公路桥梁加固设计规范》JTG/T J22 相关条款。

5.4.2　本条文作了以下两项规定：

1　关于使用阶段全预应力 UHPC 受弯构件斜截面主压应力的计算及其限值的规定。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》JTG 3362 相关条款编写。受拉侧无体内预应力钢筋的胶接缝截面、无连续体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，由于无连续体内钢筋通过接缝、接缝开展后存在应力集中问题。因此对其斜截面混凝土的主压应力限值进行了适当地折减。

2　国外已有 UHPC 桥梁工程实践表明，由于 UHPC 中掺有大量的钢纤维，取消箍筋成为可能。因此本标准按弹性阶段计算构件腹板的主拉应力，当腹板主拉应力小于 $0.50f_{tk}$ 时，可不配置箍筋，当腹板主拉应力大于 $0.50f_{tk}$ 时按规定计算箍筋数量，作为构件斜截面抗剪承载力计算的补充。按本条计算的箍筋用量与斜截面抗剪承载力计算的箍筋用量进行比较，实际取用两者较多者。

5.4.3　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 第 7.2.3 条规定施加预应力时，混凝土强度不得小于混凝土强度等级的 80%。对于掺入早强剂的预制构件，还应兼顾混凝土弹性模量的增长情况，在混凝土浇筑完成后 5 d ~

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

7 d 再施加预应力为宜。本条文规定混凝土达到强度等级的 90% 方可张拉预应力。对于采用节段预制拼装施工工艺，该条件容易满足且能确保混凝土的强度和弹性模量达到要求。

5.4.4 预应力 UHPC 受弯构件，在预施应力阶段预压区和预拉区混凝土法向应力的限值。所谓预压区和预拉区系指施加预应力时形成的压应力区和拉应力区。

1 关于预压区边缘 UHPC 压应力限值的规定。本条文参照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 编写。受拉侧无体内预应力钢筋的胶接缝截面、无连续体内钢筋（普通钢筋或预应力钢筋）的湿接缝截面，由于无连续体内钢筋通过接缝、接缝开展后存在应力集中问题。因此对其正截面混凝土的压应力限值进行了适当地折减。

2 关于预拉区边缘 UHPC 拉应力限值的规定。由于 UHPC 中掺有大量的钢纤维，显著提高了 UHPC 的抗拉性能。本标准规定当 $\sigma_{ct}^{t}=0.35f'_{tk}$ 时，预拉区可不配置纵向钢筋。当 $\sigma_{ct}^{t}=0.7f'_{tk}$ 时，预拉区配置的纵筋率不低于 0.1%。预拉区配置的纵向钢筋，其直径尽可能地小些，有利于将裂缝均匀地分布。

5.5 疲劳验算

5.5.1 UHPC 主梁桥面板板厚较薄，在车轮荷载作用下应力较大，应对其疲劳性能进行验算。疲劳验算的目的是确保 UHPC 桥面板在设计寿命期内不会出现由疲劳开裂引起的安全问题。

5.5.4 受桥梁伸缩缝的影响，在疲劳验算时，应对靠近桥梁伸缩缝附近的截面考虑一个额外的放大系数。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.5.5 现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 中规定，普通混凝土（C15～C80）的受拉疲劳强度修正系数在 0.63～1.0 范围内。对于 UHPC，国外研究机构研究了三种系列超高性能混凝土（UHPC）的弯拉疲劳性能：Eiffage and Sika 公司开发的商用超高强度纤维增强混凝土（BSI/CERACEM）；代尔夫特理工大学配制的高强钢纤维增强混凝土（HSFRC）、高强混杂纤维增强混凝土（hybrid HSFRC）。疲劳试验结果表明（图 8），按荷载循环 1000 万次考虑，BIS 系列的 UHPC 抗弯拉疲劳强度折减系数大于 0.5，HSFRC 抗弯拉疲劳强度折减系数大于 0.7，hybrid HSFRC 抗弯拉疲劳强度折减系数大于 0.6。综合考虑将 UHPC 板弯拉强度的疲劳折减系数取为 0.5。

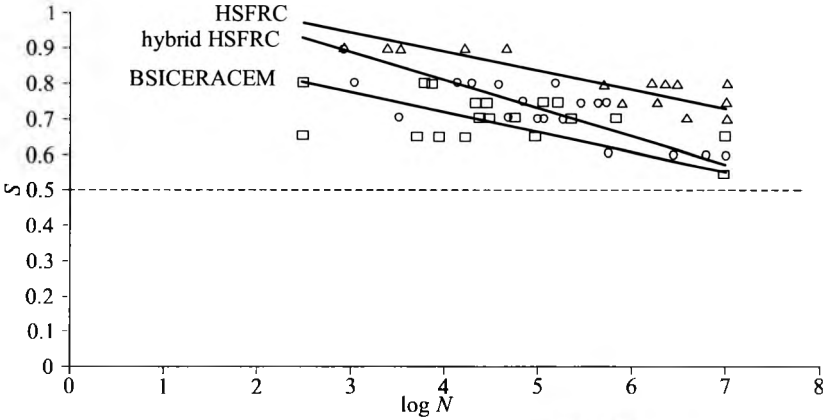


图 8　BIS、HSFRC、Hybrid HSFRC 三种系列 UHPC 的 S－N 曲线

5.5.6 本条文对普通钢筋和预应力钢筋的疲劳应力幅限值的规定以及钢筋应力幅的计算方法参考了现行行业标准《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092 相关条款规定。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.5.7 本条文规定参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和行业标准《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092 对混凝土受拉边缘拉应力、受拉区普通钢筋应力幅、受拉区纵向预应力筋应力幅进行验算。

5.6 耐久性设计

5.6.1 本条列出了 UHPC 桥梁的耐久性设计应包含的内容，具体可按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 和行业标准《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310 的规定进行。其中材料要求除应包含 UHPC 混凝土、普通钢筋、预应力钢筋外，还应对体外预应力体系进行专门的耐久性设计，在严重环境作用下还应提出合理的防腐蚀附加措施或多重防护策略。预制节段连接（拼接）节点是节段预制拼装桥梁的薄弱环节，应通过拼缝形式、连接构造、主筋连接方式、材料要求等设计，使拼缝部位达到与一般部位结构相同的耐久性设计目标。

5.6.2 与现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 保持一致。

5.6.3 预应力钢筋存在应力腐蚀、氢脆等不利于耐久性的弱点，且直径一般较细，对腐蚀比较敏感，破坏后果严重。因此，需对预应力钢筋、连接器、锚夹具、锚头等容易遭受腐蚀的部分采取有效的保护措施。体外预应力外套管可采用钢管或高密度聚乙烯（HDPE）管等，馆内应灌注专用的防腐油脂，专用的防腐油脂宜满足现行行业标准《无粘结预应力筋用防腐润滑脂》JGT 430 的

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

规定。预应力束建议采用成品的填充型环氧涂层钢绞线束或单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线束，成品预应力钢绞线束宜符合现行行业标准《桥梁成品预应力钢绞线束》JTT 861 的要求。

目前广泛采用的用于节段拼装桥梁的结构胶为环氧胶。由环氧基材料和固化剂组成的双组分环氧胶，其强度上升速度可通过材料组分的比例进行控制。合理控制环氧胶的固化时间是拼装施工的重要环节，既要确保有足够的涂抹、拼接可操作时间，也要保证拼装后的强度快速上升。预制节段拼装结构拼缝胶的国家标准尚在编制中，待国标正式发布后，本条文相关内容应按国标相关规定执行。

5.7 构件计算

5.7.1 桥面板既作为主梁整体结构体系受力，还直接承受轮载作为局部结构体系受力，因此桥面板还应作为局部结构体系进行受力分析，分析时应考虑以下作用效应：

1 结构重力：包括结构自重、桥面铺装、栏杆等二期恒载。

2 汽车轮载：根据现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的规定取值。

5.7.2 接缝是节段预制拼装桥梁的薄弱环节。本条文规定接缝在承载能力极限状态下，要满足抗剪承载能力的条件，在正常使用极限状态下，顶板接缝处不消压，控制腹板接缝处的主拉应力。

5.7.4～5.7.7 按普通混凝土考虑，与现行行业标准《公路桥梁加固设计规范》JTG/T J22 相关条款相同。

5.7.8 本条文规定后张预应力锚固区和横隔梁计算可按传统预

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

应力混凝土结构的预应力锚固区和横梁计算方法执行，并建议建立空间有限元模型，进行精细化分析。

5.8 构造要求

5.8.2 UHPC 与配筋材料（钢筋和钢绞线）之间的粘结性能很大程度上决定了应力传递过程和传递长度。鉴于 UHPC 材料的力学性能与普通混凝土有本质的差别，使用目前混凝土设计规范中的粘结性能及应力传递长度（钢筋最小锚固长度）对 UHPC 将显得过于保守。本条文中规定钢筋在 UHPC 内锚固长度的取值参考了美国华夫板设计指南《Design for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》（FHWA, 2013）的研究。

5.8.3 由于 UHPC 具有致密的微观结构，因而具有良好的耐久性。调研法国 UHPC 设计指南《Recommendation of Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete》（AFGC，2013）、日本 UHPC 设计指南《Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures （Draft）》（JSCE, 2006）、澳大利亚 Ductal PC 梁设计指南《Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams》（Prof. Gowripalan N and Prof. Ian R Gilbert，2000）和瑞士 UHPC 设计指南《Recommendation: Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based Composites （UHPFRC）: Construction material, dimensioning and application》（EFPL, 2016）关于最小保护层厚度的规定，并综合考虑黏结力的可靠传递、钢筋抗腐蚀、结构耐火性等因素，制定本条文所规定的保护层厚度的要求。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

5.8.4 调研法国 UHPC 设计指南《Recommendation of Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete»（AFGC, 2013）、日本 UHPC 设计指南《Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures（Draft）》（JSCE, 2006）、澳大利亚 Ductal PC 梁设计指南《Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams》（Prof.Gowripalan N and Prof. Ian R Gilbert, 2000）和瑞士 UHPC 设计指南《Recommendation:Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based Composites（UHPFRC）: Construction material, dimensioning and application》（EFPL, 2016）关于最小钢筋净距的规定，并综合考虑黏结力的可靠传递、可施工性等因素，制定本条文所规定的最小钢筋净距的要求。

5.8.7 本条文参考法国 UHPC 设计指南《Recommendation of Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete》（AFGC, 2013）规定了 UHPC 构件中最小配筋率的要求。

5.8.13 设置此加强钢筋是为了承受墩顶节段接缝开展后剪力传递而产生的下拉作用。

5.8.14 设置此加强钢筋能限制斜裂缝发展、满足剪力传递要求。

5.8.16 与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 保持一致。

5.8.17 主梁内有体内预应力钢束，拼装接缝处耐久性的应予以重点关注。为此，本条文规定了接缝处的密封性和耐久性的处理的相关措施。

5.8.18 转向构造应考虑添加备用索的可能性便于后期需要采用。转向钢管的弯曲半径必须满足预应力钢绞线的最小半径要

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

求。这主要是考虑到体外索转向过程中将产生弯曲应力，使钢绞线处于不利的受力状态。

5.8.19 为避免体外预应力钢束随梁体发生共振，应在钢束定位装置填充减振材料。单向预应力 UHPC 连续梁横隔板间距（钢束的支承长度）在 4 m 左右，可不用验算钢束的自振频率。

5.8.20 体外预应力钢束转向块的受力总体上比较明确，关键问题是在构造上确保受拉钢筋能够充分发挥设计要求的强度。转向块中内环筋作为转向块受力钢筋参与计算分析，而外封闭箍筋则作为构造钢筋不参与转向块承载力计算。

5.8.21 通长体外预应力钢束应锚固在端横梁上，并考虑备用索孔。端横梁构造尺寸应满足钢束布置要求。

5.8.22 图 9 中的锚固方式是一种“转弯”的锚固方式，即在锚固前先通过一次转向，这样做的优点是体外预应力钢束可以获得更大的弯起角度，从而可以为主梁支点附近区域提供更大的预剪力。同时由于体外预应力钢束的张拉方向是水平（如图的左端）或者往下（如图的右端），所以体外预应力钢束的张拉施工比较方便。而图 10 的锚固方式是一种“直穿”的锚固方式，即不使用梁端转向而直接锚固于梁端横梁上，这样做的最大优点是索型简洁，也可以节省梁端的转向装置，但缺点是获取的预剪力较小，同时钢束张拉锚固方向向上，由此会引起的施工难度增加。此外，对于如图 10 的“直穿”锚固方式，当梁体承受活载时，钢绞线与夹片之间会发生相对转动，这个转动又是跟着活载循环发生的，这个微小转动对夹片处钢绞线会有反复拉伸和弯曲的不利影响，称为钢绞线的微动磨损疲劳。显然，图 9 的“转弯”锚固方式由于在锚固之前通过了一次转向，钢绞线在活载作用下相对夹片产

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

生的微小转动可以完全“消化”在这次转向中，故这种锚固方式不存在微动磨损疲劳问题。这样从各方面综合来看，这种“转弯”的锚固方式应该优于“直穿”的锚固方式。当然，如果证明这个微小摆角并没有威胁到钢绞线的长期性能，则体外预应力钢束在锚固区的细部设计主要以构造和施工决定。

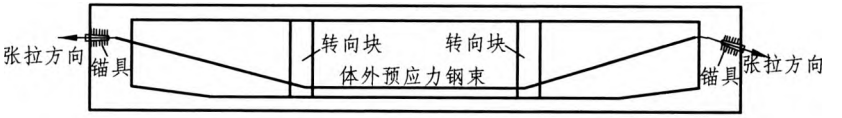


图 9 “转弯”锚固方式

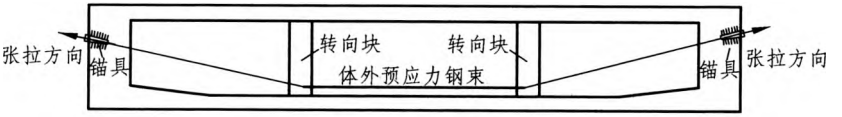


图 10 “直穿”锚固方式

5.8.24 UHPC 现浇湿接缝因为钢纤维不连续，抗裂强度倍削弱，应对现浇接缝构造做强化处理。本条文推荐接缝构造具有以下特点：

1 在顶面设置槽口，在下部设置企口，使得槽口构造处和企口构造处新旧超高性能混凝土的界面相互错开，有效提高了桥面板接缝处的抗剪承载力，降低了新旧超高性能混凝土界面的收缩应力，避免了接缝出现收缩裂缝，提高了桥梁接缝处的耐久性。

2 通过在桥面板拼接端底部局部加高形成底肋，增大了截面抵抗矩，降低了接缝处的弯曲应力。

3 由预制体桥面板横向拼装并精确定位后，无需任何现场的钢筋作业，施工非常简便，有利于实现快速化施工。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

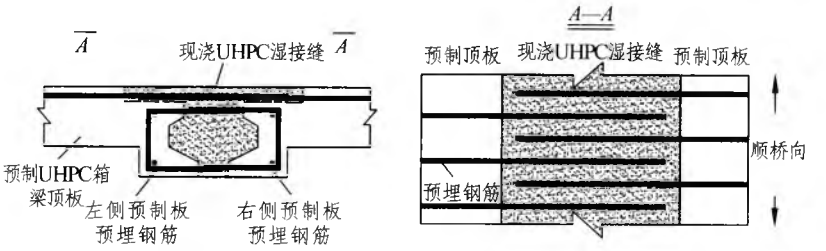


图 11　纵向现浇接缝构造

5.8.25　桥面板 UHPC 纵向现浇湿接缝是桥面板受力的薄弱环节，为此规定现浇湿接缝用的 UHPC 纤维掺量应不低于 2.5%。为避免新老 UHPC 界面出现收缩裂缝，宜掺入膨胀剂，并宜符合现行行业标准《补偿收缩混凝土应用技术规程》JGJ/T 178 和国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 的要求。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

6 施 工

6.2 原材料准备及储存

6.2.1～6.2.5 规定 UHPC 原材料的质量、储存方法等，应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定。

6.3 模板与支架

6.3.1 UHPC 预制构件制作精度要求高，且 UHPC 静水压力较大，对模板刚度要求高，故模板应采用钢材制作。

6.4 节段预制

6.4.1 参照现行行业标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 规定 UHPC 原材料的计量要求。

6.4.2～6.4.10 规定了 UHPC 搅拌、运输、浇筑、养护的施工要点。

6.5 节段移运与堆放

6.5.1～6.5.3 规定了超高性能混凝土预制梁移运、吊放、存梁的施工要点和注意事项。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

6.6 逐跨拼装施工

6.6.10～6.6.12 拼装线形控制主要有以下措施：

1 对模板设计、制作及使用进行严格控制，确保模板具有足够刚度和强度，保证箱梁节段的外形尺寸。

2 根据设计提供的成桥线形和各项参数，充分考虑各种因素的影响，确定施工时各节段控制点的坐标。

3 加强对现场具体情况的监测，以确定各方面因素对线形的影响并及时做出调整。

4 节段拼装时，采用胶接缝时，胶接层涂抹均匀，对称施加临时预应力，确保接缝胶接材料在 0.3 MPa 压力下固化；采用干接缝时，拼装节段需进行临时连接，临时连接应仅允许锁定相邻节段的竖向位移和横向位移，不能锁定轴向变形。

5 若安装时出现线形偏差，应分析原因，并及时进行调整。

6 梁段拼装时拼接面应完全密贴，不容许拼缝接触面脱空。

6.8 拼装设备

6.8.2 规定了采用支架法进行节段拼装的施工要点。

6.9 湿接缝施工

6.9.1～6.9.3 UHPC 现浇湿接缝是 UHPC 结构的薄弱环节，为此本条文规定了 UHPC 湿接缝的施工注意事项，需严格执行。

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

交大e出版
微信购书|数字资源

官方天猫店
上天猫 买正版

15563474
统一书号：155643·74
定　　价：36.00　元

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载