

JTG

中华人民共和国行业标准

JTG xxx—20xx

公路桥涵超高性能混凝土应用规范

Specification for Application of Highway Ultra High Performance
Concrete Bridge and Culverts

(征求意见稿)

20xx-xx-xx发布

20xx-xx-xx施行

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国行业标准

公路桥涵超高性能混凝土应用规范

Specification for Application of Highway Ultra High
Performance Concrete Bridge and Culverts

(征求意见稿)

主编单位：

批准部门：

实施日期日期：20××年×月×日

XXX 出版社

前 言

根据交通运输部交公函〔2019〕427号《交通运输部关于下达2019年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》的要求，由湖南大学作为主编单位承担《公路桥涵超高性能混凝土应用规范》的制订工作。

为有效规范公路桥涵超高性能混凝土的应用，统一技术标准，编制组通过广泛调查研究，总结国内外相关的超高性能混凝土工程经验和技术标准，对UHPC材料的原材料要求、性能等级、配合比、结构设计、施工工艺、质量控制、检验与验收等做出相关规定，形成公路桥涵超高性能混凝土应用规范，指导公路超高性能混凝土桥涵的材料制备、结构设计、施工和质量验收。

本规范共分为8章和5个附录，分别是：1总则、2术语与符号；3原材料、4性能与分级、5配合比、6结构设计、7施工、8质量检验与评定；附录A、附录B、附录C、附录D和附录E。

本规范由 负责起草第1章， 负责起草第2章， 负责起草第3章， 负责起草第4章， 负责起草第4章， 负责起草第5章，负责起草第6章， 负责起草第7章， 负责起草第8章， 负责起草附录A， 负责起草附录B， 负责起草附录C， 负责起草附录D， 负责起草附录E。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理者，联系人：邱明红（地址：湖南省长沙市岳麓区湖南大学土木工程学院，邮编：410082；电话：15074996614，传真： ；电子邮箱：qiuminghong@hnu.edu.cn），以便修订时参考。

主 编 单 位：

参 编 单 位：

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

：

征求意见稿

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	原材料	7
3.1	水泥	7
3.2	矿物掺合料	7
3.3	骨料	8
3.4	外加剂	8
3.5	纤维	9
3.6	混凝土用水	9
3.7	UHPC 干混料	9
4	性能与分级	11
4.1	拌合物性能	11
4.2	力学性能	11
4.3	耐久性能	18
5	配合比	20
5.1	一般规定	20
5.2	配合比	20
6	结构设计	23
6.1	一般规定	23
6.2	耐久性设计	23
6.3	持久状况承载能力极限状态计算	24
6.4	正常使用极限状态计算	40
6.5	构造规定	50
7	施工	56
7.1	一般规定	56
7.2	材料储存与计量	56
7.3	搅拌与运输	58
7.4	模板、支架施工	59
7.5	浇筑	61
7.6	养护	62

7.7	特殊气候条件下施工.....	63
8	质量检验与评定	66
8.1	一般规定.....	66
8.2	钢筋、预应力筋及管道压浆.....	67
8.3	UHPC 工程	69
附录 A	UHPC 轴拉性能试验方案	72
附录 B	UHPC 收缩应变和徐变系数计算	76
附录 C	UHPC 纤维取向系数的确定方法及取值	79
附录 D	UHPC 抗压、抗弯、轴心抗拉强度及轴拉性能分级评定	80
附录 E	UHPC 氯离子扩散系数试验方法.....	83
	本规范用语用词说明	90

征求意见稿

1 总 则

1.0.1 为规范公路超高性能混凝土（UHPC）桥涵工程用 UHPC 材料技术要求、结构设计、施工、质量检验和评定，确保其技术先进、安全可靠、耐久使用、经济合理，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于采用超高性能混凝土（UHPC）材料的新建或改扩建的桥梁的设计、施工与验收。

1.0.3 公路超高性能混凝土（UHPC）桥涵工程用 UHPC 材料技术要求、结构设计、施工、质量检验和评定除应符合本规范规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

征求意见稿

2 术语和符号

2.1 术语

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

由水泥、矿物掺合料、细集料、钢纤维和减水剂等材料加水拌和，经凝结硬化后形成的一种具有高强度、高韧性、高耐久性的水泥基复合材料，简称 UHPC。

2.1.2 干混料 dry mix

由水泥、矿物掺合料、细集料和/或钢纤维以及根据性能确定的其他组份，按颗粒级配和规定性能要求，在专业生产厂经计量、混合而成的混合物，在使用地点按规定比例加水或配套组份拌和使用。

2.1.3 纤维体积率 steel fiber volume fraction

纤维所占超高性能混凝土的体积百分比。

2.1.4 弹性极限抗拉强度 elastic limit tensile strength

单轴拉伸试样达到弹性极限时对应的拉应力，即由线弹性转变为非线性时的转折点所对应的拉应力，也称为初裂抗拉强度。

2.1.5 极限抗拉强度 elastic limit tensile strength

单轴拉伸为应变硬化时所对应的最大拉应力，或单轴拉伸为应变软化时，达到规定应变或变形量时所对应的拉应力。

2.1.6 纤维取向系数 fiber orientation coefficient

表示纤维分布和取向效应对 UHPC 受拉开裂后力学性能影响的系数。

2.2 符号

2.2.1 材料性能有关符号

- UC 120 ——边长 100mm 的立方体抗压强度标准值为 120MPa 的超高性能混凝土；
- E_c 、 G_c ——超高性能混凝土混凝土弹性模量、剪切变形模量；
- E_s 、 E_p ——普通钢筋、预应力钢筋的弹性模量；
- μ_c ——超高性能混凝土泊松比；
- α_c ——超高性能混凝土温度线膨胀系数；
- $f_{cu,k}$ 、 $f_{cu,0}$ ——边长 100mm 的超高性能混凝土立方体抗压强度标准值、配置强度；
- f_{ck} 、 f_{cd} ——超高性能混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；
- f_{tk} 、 f_{td} ——超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；
- f_{te} ——超高性能混凝土弹性极限抗拉强度；
- f_{tu} ——超高性能混凝土极限抗拉强度；
- f_{tk} ——超高性能混凝土抗弯强度标准值；
- ε_0 、 ε_{cu} ——超高性能混凝土受压峰值应变、极限压应变；
- ε_{el} 、 ε_{tu} ——超高性能混凝土受拉弹性极限拉应变（初裂应变）、极限拉应变；
- D_{Cl} ——超高性能混凝土氯离子扩散系数；
- f'_{cu} ——边长为 100mm 的施工阶段超高性能混凝土立方体抗压强度；
- f'_{ck} 、 f'_{tk} ——短暂状况施工阶段的超高性能混凝土轴心抗压、抗拉强度标准值；
- f_{sk} 、 f_{sd} ——普通钢筋抗拉强度标准值、设计值；
- f_{pk} 、 f_{pd} ——预应力钢筋抗拉强度标准值、设计值；
- f'_{sd} 、 f'_{pd} ——普通钢筋、预应力钢筋抗压强度设计值；
- $f_{pd,i}$ 、 $f'_{pd,i}$ ——体内预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值
- $f_{pd,e}$ ——体外预应力钢束极限应力设计值。

2.2.2 作用和作用效应有关符号

- F_{ld} ——集中反力或局部压力设计值；
- M_d ——弯矩设计值；
- M_u ——构件正截面抗弯承载力；
- M_s ——按作用频遇组合计算的弯矩值；
- M'_k ——由临时的施工荷载标准值产生的弯矩值；
- N_{Ed} ——基本组合下轴力设计值；
- 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 ——构件斜截面上预应力弯起钢筋受剪承载力设计值。
 V_k^t ——由临时的施工荷载标准值产生的剪力值；
 $\sigma_{pe,e}$ ——体外预应力束的永存预应力；
 $\sigma'_{p,i0}$ ——截面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；
 σ_f ——纤维增强截面残余抗拉强度；
 σ_{si} 、 σ_{pi} ——第 i 层纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力；
 σ_{con} ——预应力钢筋的张拉控制应力；
 w_s ——钢筋埋置深度处的裂缝宽度；
 w_t ——UHPC 表面裂缝宽度；
 σ_{ss} ——裂缝位置的钢筋应力；
 σ_p ——由作用标准值产生的纵向预应力钢筋应力；
 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预压应力；
 σ_{pe} ——截面受拉区纵向预应力钢筋的有效预应力；
 $\sigma_{pe,ex}$ ——使用阶段体外预应力钢筋扣除预应力损失后的有效应力；
 σ_{st} 、 σ_{lt} ——在作用（或荷载）频遇组合、长期效应组合下，构件抗裂边缘混凝土的法向拉应力；
 σ_{tp} 、 σ_{cp} ——构件混凝土中的主拉应力、主压应力；
 σ_{pt} ——由预加应力产生的混凝土法向拉应力；

2.2.3 几何参数有关符号

- b ——矩形截面宽度，T 形或 I 形截面腹板宽度；
 x ——截面受压区等效矩形应力图的高度；
 x_0 ——受压区高度；
 x' ——截面受拉不开裂高度；
 x_t ——受拉区等效矩形应力图的高度；
 h ——截面高度；
 h_0 ——截面有效高度；
 h_{0i} ——受压区边缘至受拉区第 i 层钢筋截面重心的距离；

- A_{te} ——UHPC 有效受拉面积；
 $h_{c,eff}$ ——UHPC 有效受拉高度；
 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 ——UHPC 有效受拉高度范围内的预应力钢筋面积；
 $A_{p,e}$ ——体外预应力水平束的截面面积；
 $A_{p,i}$ 、 $A'_{p,i}$ ——构件受拉区、受压区纵向体内预应力钢筋的截面面积；
 a_s 、 $a_{p,i}$ 、 $a_{p,e}$ ——构件受拉区普通钢筋合力点、体内预应力钢筋、体外预应力钢筋合力点至受拉区边缘的距离；
 a'_s 、 $a'_{p,i}$ ——构件受压区普通钢筋合力点、体内预应力钢筋合力点至受压区边缘的距离；
 $\sigma'_{p,i0}$ ——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；
 $A_{p,e}$ ——构件受拉区纵向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；
 β ——受弯构件受压区矩形块高度 x 与中性轴高度 x_0 的比值；
 b'_f ——T 形或 I 形截面受压区的翼缘宽度；
 h'_f ——T 形或 I 形截面受压区的翼缘厚度；
 A_{sv} ——同一截面内箍筋各肢的总截面面积；
 A_c ——构件混凝土截面面积；
 A_b ——局部受压时的计算底面积；
 A_l ——局部受压面积；
 A_{cor} ——钢筋网、螺旋筋或箍筋范围以内的 UHPC 核芯面积；
 s_v ——箍筋的间距；
 z ——弯矩作用下构件的内力臂，即纵向受拉钢筋合力点至混凝土受压区合力点之间的距离；
 z_0 ——受压区合力点至受拉钢筋合力点的距离，按受压区应力图形为三角计算确定；
 θ ——构件主压应力与梁轴线间的夹角；
 $\theta_{p,i}$ ——体内预应力钢筋弯起钢筋（在斜截面受压端正截面处）的切线与水平线夹角。
 ω_{max} ——最大裂缝宽度限值；
 A_{fv} ——纤维作用面积；

- d ——钢筋或预应力筋直径；
 d_{cor} ——螺旋形间接钢筋内表面范围内 UHPC 核芯面积的直径；
 c ——混凝土保护层厚度；
 $\varepsilon_{cs}(t)$ ——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；
 φ ——截面曲率；
 I_{cr} ——开裂截面换算截面惯性矩；
 t ——计算时考虑时刻的 UHPC 龄期；
 t_0 ——加载时 UHPC 龄期。

2.2.4 计算系数及其他有关符号

- 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；
 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；
 ξ_b ——构件正截面相对界限受压区高度；
 γ_c ——UHPC 材料分项系数；
 γ_E ——安全系数；
 k_N ——荷载或预应力提高系数；
 α_{cc} ——荷载长期效应系数；
 γ_c ——混凝土材料分项系数；
 β_h ——截面高度尺寸效应系数；
 η_f ——UHPC 局部承压修正系数；
 λ_f ——钢纤维特征含量；
 β ——混凝土局部承压强度提高系数；
 β_{cor} ——配置间接钢筋时局部承压承载力提高系数；
 η_θ ——构件挠度长期增长系数；
 α_{ES}, α_{EP} ——普通钢筋弹性模量、预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；
 ρ_{eff} ——有效配筋率。
 k_t ——荷载特征系数；
 k_N ——荷载或预应力提高系数；

3 原材料

3.1 水泥

3.1.1 通用硅酸盐水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175)的规定。

3.1.2 中热、低热硅酸盐水泥应符合现行国家标准《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥》(GB/T 200)的规定；

3.1.3 抗硫酸盐硅酸盐水泥应符合现行国家标准《抗硫酸盐硅酸盐水泥》(GB/T 748)的规定；

3.1.4 白色硅酸盐水泥应符合现行国家标准《白色硅酸盐水泥》(GB/T 2015)的规定。

3.2 矿物掺合料

3.2.1 硅灰应符合现行国家标准《砂浆和混凝土用硅灰》(GB/T 27690)的规定，且二氧化硅含量不应低于 90%。

条文说明

二氧化硅是硅灰中的活性成分，配制超高性能混凝土对硅灰的质量要求较高。

3.2.2 粉煤灰、磨细矿渣、磨细天然沸石和偏高岭土应符合现行国家标准《高强高性能混凝土用矿物外加剂》(GB/T 18736)的规定。

3.2.3 石灰石粉、复合矿物掺合料应符合现行国家标准《矿物掺合料应用技术规范》(GB/T 51003)的规定。

3.2.4 当用其他矿物掺合料时，应通过试验进行验证，确定 UHPC 性能满足工程应用要求后方可使用，其放射性应符合现行国家标准《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566)的规定。

3.3 骨料

3.3.1 细骨料应符合现行国家标准《建设用砂》（GB/T 14684）的规定，其中含泥量、石粉含量、泥块含量、有害物质含量、坚固性应达到 I 类的要求。

3.3.2 当需选用粗骨料时，粗骨料应符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》（GB/T 14685）的规定，其中含泥量、泥块含量、针片状颗粒含量、有害物质含量、坚固性、强度、吸水率应达到 I 类的要求，且最大粒径不应大于 10 mm。

条文说明

粗骨料最大粒径是影响混凝土强度和耐久性的重要因素，国内外有关超高性能混凝土的研究表明，采用含粗骨料的超高性能混凝土时，骨料最大粒径一般为 8mm，结合我国骨料标准，最大粒径定为 10mm。

3.4 外加剂

3.4.1 减水剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》（GB 8076）的规定，其中减水率宜不小于 30%。

条文说明

超高性能混凝土的水胶比很低，一般为 0.22 以下，为保证超高性能混凝土的工作性，要求要采用高减水率的减水剂。

3.4.2 膨胀剂应符合现行国家标准《混凝土膨胀剂》（GB/T 23439）的规定，宜采用氧化钙类膨胀剂。

条文说明

国内外有关试验表明，只有采用氧化钙类膨胀剂，并保证早期超高性能混凝土内有足够的水分，膨胀剂才能产生膨胀作用。

3.4.3 减缩剂应符合现行行业标准《砂浆、混凝土用减缩剂》（JC/T 2361）的规定。

3.5 纤维

3.5.1 纤维应采用高强度微细纤维，其性能指标应符合表3.4.1的规定，钢纤维的性能检验应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)的规定。

表 3.4.1 钢纤维的性能指标

项目	性能指标
抗拉强度 (MPa)	≥ 2000
直径合格率 (%)	≥ 90
重量合格率 (%)	≥ 85 单纤维检验
	≥ 90 纤维组检验
杂质含量、表面污染和锈蚀状况 (%)	0

3.5.2 当有防火性能或抗爆性能等要求时，可掺入合成纤维，并应符合现行国家标准《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》(GB/T 21120)的规定。

3.6 混凝土用水

3.6.1 拌合用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》(JGJ 63)的规定，并不得采用海水。

3.6.2 养护用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》(JGJ 63)的规定。

3.7 UHPC 干混料

3.7.1 UHPC 干混料原材料的基本质量要求应符合本规范的要求。

3.7.2 UHPC 干混料产品的拌合物性能应符合本规范第 4.1 节的规定，力学性能应符合本规范第 4.2 节的规定，耐久性能应符合本规范第 4.3 节的规定。

3.7.3 UHPC 干混料应选用匀质且性能长期稳定的工厂化产品。

3.7.4 UHPC 干混料的外观应干燥和色泽均匀，无结块和受潮现象。

3.7.5 UHPC 干混料中包含钢纤维时，应确保其均匀分散，无纤维结团现象。

3.7.6 UHPC 干混料厂家宜提供干混料的产品说明书、使用方法和干混料

拌制 UHPC 产品的性能检验报告。

征求意见稿

4 性能与分级

4.1 拌合物性能

4.1.1 UHPC 拌合物应具有良好的工作性，不得离析和泌水，无纤维结团和基体结块。

4.1.2 UHPC 拌合物性能应采用坍落扩展度（USF）表征，试验方法应符合现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》（GB/T 50080）的规定，按表 4.1.2 的规定进行分级。

表 4.1.2 UHPC 拌合物工作性及分级

等级	USF1	USF2	USF3	USF4
SF	$SF < 550$	$550 \leq SF < 650$	$650 \leq SF < 750$	$750 \leq SF < 850$

条文说明

与普通混凝土拌合物相比，UHPC 泌水和浆骨离析的趋势较小，钢纤维的离析和沉降趋势较大。为保证超高性能混凝土内纤维的随机分布，需要避免使用振动棒进行内部振捣，需要振捣时一般是采用外部振捣。选用 UHPC 扩展度与浇筑密实方法，重点要考虑对纤维分布的影响，特别对关键部位、关键受拉方向纤维分布和取向性的影响。目前国内外 UHPC 应用案例通常采用自密实混凝土。

4.1.3 USF1 级拌合物性能，可由用户根据实际需要自行规定。

条文说明

表面振动或振动台振捣成型时，坍落扩展度可以低于 550mm。

4.2 力学性能

4.2.1 UHPC 的抗压强度等级应根据 100 mm 立方体抗压强度划分，强度等级划分为 UC120、UC140、UC160、UC180、UC200。

条文说明

立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 是 UHPC 各项力学性能指标的基本代表值。现行

国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）规定，活性粉末混凝土立方体抗压强度试验的标准试件采用 100 mm 的立方体试件。为此，本规范建议 UHPC 的强度等级应根据 100 mm 立方体抗压强度标准值划分。本规范定义 UHPC 立方体抗压强度标准值是指按标准方法制作、养护的边长为 100 mm 立方体试件，在 28 d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度值。在现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）强度等级划分的基础上，结合桥梁结构实际应用需求确定本规范 UHPC 强度等级划分。

4.2.2 UHPC 的轴心抗拉强度等级应根据附录 A 的狗骨头轴拉试验的弹性极限抗拉强度划分，强度等级划分为 UT7、UT8、UT9。

条文说明

根据国内外已有试验结果，掺入钢纤维的 UHPC 初裂强度（弹性极限抗拉强度）一般在 5~12 MPa，主要由 UHPC 基体性质决定，而 UHPC 极限抗拉强度与钢纤维性质（掺量、类型、长径比）等密切相关。对于同一抗压性能分级，UHPC 可多个极限抗拉强度取值。为此，本规范的 UHPC 轴心抗拉强度按狗骨头轴拉试验的 UHPC 初裂强度（弹性极限抗拉强度）标准值划分。UHPC 轴心抗拉强度等级划分为 UT7、UT8、UT9 三级，大体可以覆盖 UHPC 对不同抗拉性能的应用需求。

4.2.3 UHPC 轴心受拉性能分为应变软化型、低应变硬化型和高应变硬化型，其分类应符合表 4.2.3 的规定。

表 4.2.3 UHPC 拉伸性能分类表

轴拉性能分类	弹性极限抗拉强度 f_{te}	极限抗拉强度 f_{tu}	极限拉应变 ϵ_{tu}
应变软化型	$f_{te}/f_{tk} \geq 1.0$	$f_{tu}/f_{tk} \geq 0.7^*$	-
低应变硬化型	$f_{te}/f_{tk} \geq 1.0$	$f_{tu}/f_{tk} \geq 1.1$	$\epsilon_{tu} \geq 1500 \mu\epsilon$
高应变硬化型	$f_{te}/f_{tk} \geq 1.0$	$f_{tu}/f_{tk} \geq 1.2$	$\epsilon_{tu} \geq 2000 \mu\epsilon$
备注：*指按附录 A 方法拉伸应变达到 1500 $\mu\epsilon$ 或裂缝宽度为 0.3 mm 时，残余抗拉强度不低于 0.7 f_{tk} 。			

条文说明

抗拉性能是 UHPC 的关键技术性能指标。用弹性极限抗拉强度 f_{te} 、极限抗拉强度 f_{tu} 和极限拉伸应变 ϵ_{tu} 三个参数表征，并用极限抗拉强度与弹性极限抗拉

强度比值 f_{tu}/f_{te} 来表征 UHPC 拉伸应变软化与应变硬化水平。结合国内 UHPC 工程经验，并参考瑞士 UHPC 设计指南《Recommendation: Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based Composites (UHPFRC): Construction material, dimensioning and application》(SIA 2052, 2016) (以下简称“《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》”)的规定，将 UHPC 轴心受拉性能划分为应变软化型、低应变硬化型和高应变硬化型。

4.2.4 UHPC 的抗弯强度等级应根据 $400\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 棱柱体抗弯强度划分，强度等级划分为 UF22、UF25、UF28。

条文说明

结合现行国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387) 规定，UHPC 抗弯强度等级根据 $400\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 棱柱体抗弯强度标准值划分。为便于 UHPC 质量控制和检验，结合国内 UHPC 工程经验，将 UHPC 抗弯强度等级划分为 UF22、UF25 和 UF28 三级，大体可以覆盖 UHPC 对不同受弯韧性的应用需求。

4.2.5 UHPC 纤维取向系数 K 宜通过附录 C 的方法进行测定。若无实测数据，整体纤维取向系数 K_{global} 可取 1.25，局部纤维取向系数 K_{local} 可取 1.75。

条文说明

国内外的相关研究表明，纤维取向对 UHPC 抗拉力学性能有显著的影响，尤其是对 UHPC 裂后抗拉性能。在浇注过程中混凝土的流动可能使得纤维按流动方向排列，受纤维指向的影响，裂后强度 $\sigma_f(w)$ 与浇注过程密切相关。在距离模板不大于纤维长度的范围内，靠近模板的纤维会趋向平行模板排列；构件厚度越接近纤维长度，纤维平面分布的趋势对抗拉强度的影响越大。理论模型中假设 UHPC 结构内纤维呈空间随机分布，认为材料的受拉特性各向同性；但是，实际结构中纤维的分布和取向受多种因素影响，表现出受拉各向异性；因此，用纤维取向系数 K 反映这种受拉各向异性特征。

为了考虑纤维取向对 UHPC 抗拉性能的影响，本条文规定引入纤维取向系数 K 对 UHPC 力学性能指标进行折减，在没有开展现场模型试验时，参考法国

UHPC 结构设计规范《National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)》(NF P 18-710, 2016, 以下简称“《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》”)相关条文规定,取整体纤维取向系数 K_{global} 为 1.25,局部纤维取向系数 K_{local} 为 1.75。局部纤维取向系数适用于局部效应分析(如预应力锚固区、桥面板冲切等问题),整体纤维取向系数适用于整体效应分析(如板或梁的抗弯、抗剪强度等问题)。

4.2.6 UHPC 轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和轴心抗压强度设计值 f_{cd} 应按表 4.2.6-1 的规定采用, UHPC 轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 和轴心抗拉强度设计值 f_{td} 应按表 4.2.6-2 的规定采用。其中 UHPC 轴心抗拉强度应按附录 A 进行测定。

表 4.2.6-1 UHPC 轴心抗压强度取值

强度等级	U 120	U 140	U 160	U 180	U 200
$f_{\text{cu,k}}$	120	140	160	180	200
f_{ck}	84	98	112	126	140
f_{cd}	58	68	77	87	97

表 4.2.6-2 UHPC 轴心抗拉强度取值

强度等级	UT 7	UT 8	UT 9
f_{tk}	7	8	9
f_{td}	5.6/K	6.4/K	7.2/K

注: 1 K 为纤维取向系数, 按第 4.2.5 条规定取值。

条文说明

对 UHPC 轴心强度的标准值和设计值, 现说明如下:

1 轴心抗压强度标准值: 根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362), 轴心抗压强度标准值为棱柱体抗压强度, 记为 f_{ck} , 其与混凝土强度等级(立方体抗压强度标准值)的关系为

$$f_{\text{ck}} = 0.88\alpha f_{\text{cu,k}} \quad (4.2.6a)$$

式中系数 α 为棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值, 与混凝土的强度等级有关, C50 以下混凝土取为 0.76; C55-C80 取为 0.78-0.82。湖南大学统计国内外总计 142 组强度范围在 77 MPa ~ 189 MPa 范围内的 UHPC 立方体抗压强度和

棱柱体抗压强度试验结果, 结果表明 UHPC 棱柱体抗压强度和立方体抗压强度的比值约在 0.76~1.01 间, 平均值为 0.890, 标准差为 0.055, 95%保证率的数值为 0.800, 因此本规范取 $\alpha=0.80$ 。同时, 由于 UHPC 中掺有钢纤维, UHPC 的受压脆性得到显著改善, 可不考虑脆性折减系数。

2 轴心抗压强度设计值: 考虑材料分项系数的抗压强度设计值, 记为 f_{cd} , 用于构件设计。对于混凝土材料, 材料分项系数取为 $\gamma=1.45$, 因此轴心抗压强度设计值为: $f_{cd}=0.88 \times 0.80 \times f_{cu,k}/1.45$ 。

3 轴心抗拉强度标准值: 根据轴心抗拉强度等级划分, 依次取 7MPa、8MPa 和 9MPa。

4 轴心抗拉强度设计值: 考虑材料分项系数和纤维取向系数 K 的抗拉强度设计值, 记为 f_{td} , 用于构件承载能力极限状态设计。对于混凝土材料, 材料分项系数取为 $\gamma=1.45$, 因此承载能力极限状态轴心抗拉强度设计值为: $f_{td}=f_{tk}/1.45/K$ 。

4.2.7 UHPC 弹性模量 E_c 宜根据现行国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)的规定进行测试。若无实测数据, UHPC 弹性模量 E_c 可按表 4.2.7 采用。

表 4.2.7 UHPC 的弹性模量

强度等级	U 120	U 140	U 160	U 180	U 200
$E_c (\times 10^3 \text{MPa})$	41.9	44.3	46.2	47.9	49.2

条文说明

本条文规定的 UHPC 弹性模量试件尺寸参考国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)的相关条文。湖南大学统计国内总计 280 组 UHPC 立方体抗压强度和弹性模量试验结果, 强度范围在 100 MPa~205 MPa 之间, 弹性模量范围在 32.9GPa~58.1GPa 之间, 采用最小二乘法回归得到下列公式。当无试验资料时, UHPC 弹性模量可根据下列公式计算取值。

$$E_c = \frac{10^5}{1.5 + \frac{106.1}{f_{cu,k}}} (\text{MPa}) \quad (4.2.7a)$$

4.2.8 承载能力极限状态 UHPC 设计受压应力-应变关系应按下列公式确定, 设计受压应力-应变曲线如图 4.2.8 所示。

$$\begin{cases} \sigma_c = f_{cd} \times \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) & (\varepsilon \leq \varepsilon_0) \\ \sigma_c = f_{cd} & (\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (4.2.8-1)$$

$$\varepsilon_0 = f_{cd} / E_c \quad (4.2.8-2)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0034 + (f_{cu,k} - 120) \times 10^{-5} \quad (4.2.8-3)$$

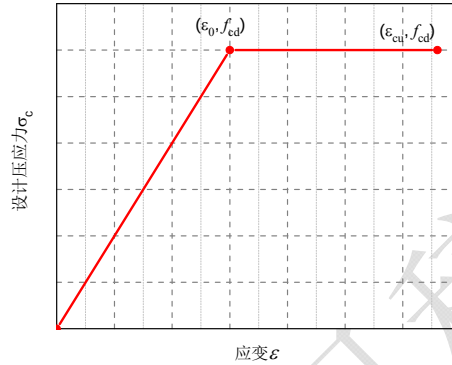


图 4.2.8 承载力极限状态 UHPC 设计受压应力-应变曲线

条文说明

综合对比《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》、《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》、日本 UHPC 结构设计和施工指南《Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)》(JSCE, 2006)（以下简称“日本 UHPC 结构设计和施工指南 JSCE 2006”）、澳大利亚 Ductal 预应力梁设计指南《Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams》(UNSW, 2000)（以下简称“澳大利亚 Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000”）中关于 UHPC 设计受压应力-应变曲线的规定，各国 UHPC 指南（规范）对于 UHPC 设计受压应力-应变曲线普遍采用简化的双折线模型和三折线模型。综合考虑，本规程采用《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》的双折线模型。其中峰值压应变 $\varepsilon_0 = f_{cd} / E_c$ ，极限压应变 ε_{cu} 偏安全取 0.0034~0.0042。

4.2.9 承载力极限状态和正常使用极限状态 UHPC 设计轴拉应力-应变关系应按下列公式确定，设计受拉应力-应变曲线如图 4.2.9 所示。

$$\begin{cases} \sigma_t = f_{td} \times \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{el}} \right) & (\varepsilon \leq \varepsilon_{el}) \\ \sigma_c = f_{td} & (\varepsilon_{el} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}) \end{cases} \quad (4.2.9-1)$$

$$\varepsilon_{el} = f_{td} / E_c \quad (4.2.9-2)$$

$$\varepsilon_{tu} = 0.0025 \quad (4.2.9-3)$$

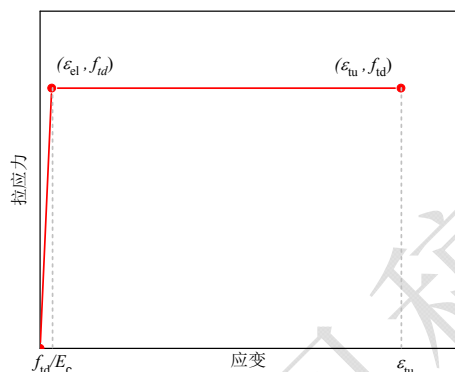


图 4.2.9 UHPC 设计轴拉应力-应变曲线

4.2.10 UHPC 的剪切变形模量 G_c 可按本规范第 4.2.7 条规定 E_c 值的 0.4 倍采用。

4.2.11 钢筋 UHPC 的重度取值不宜小于 26 kN/m^3 。

条文说明

常规的配筋混凝土结构容重常取 $25 \sim 26 \text{ kN/m}^3$ ，而 UHPC 中一般掺入了 1.5% ~ 3.5% 的钢纤维，因此计算时建议取值不小于 26 kN/m^3 。

4.2.12 UHPC 的泊松比 μ_c 应取 0.2；UHPC 的温度线膨胀系数 α_c 应取 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

条文说明

对比各国 UHPC 指南(规范)，关于泊松比和线膨胀系数取值。各国 UHPC 指南、规范对于泊松比的规定较为统一，均为 0.2，因此本规范 UHPC 泊松比取 0.2。

对于温度线膨胀系数，各国 UHPC 指南(规范)规定值介于 $1.0 \sim 1.35 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 间。一般认为，UHPC 材料温度线膨胀系数大的水泥基材料含量高，线膨胀系数

小的粗骨料含量低或不含，故其线膨胀系数应高于普通混凝土（ $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ），且低于钢材（ $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ），并结合国内相关试验研究，本规范 UHPC 线膨胀系数取 $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

4.2.13 不同的养护条件下，UHPC 的收缩应变和徐变系数应按表 4.2.13 取值，计算方法可按本规范附录 B 执行。

表 4.2.13 UHPC 的收缩应变和徐变系数

养护条件	收缩应变 ($\mu\epsilon$)	徐变系数
90℃高温蒸汽养护 2d 或 80℃高温蒸汽养护 3d	0	0.2
自然养护（相对湿度 50%~70%）	700	0.8

条文说明

UHPC 材料的收缩主要有干燥收缩和自收缩。根据《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》规定，若养护成型的过程中水分有保证，UHPC 材料的收缩将主要为自收缩。在温度低于 65℃ 以下的热养护条件下，自收缩部分完成；若采用 90℃ 的蒸汽养护条件，可近似认为养护结束后将不会产生后期收缩变形。

普通混凝土结构在长期荷载作用下的徐变效应非常明显，而 UHPC 材料因基体致密和纤维含量较高，使得其徐变系数远小于普通混凝土和高强混凝土。国内外大量的试验研究表明 UHPC 材料的徐变主要受养护条件、加载龄期、持荷时间及加载应力水平等的影响。根据《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》规定，UHPC 材料若未经热养护，则其徐变类似于高性能混凝土；但是，若采用蒸汽养护，则其徐变系数将显著降低。

对比各国 UHPC 指南（规范），本规范综合参考了《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》和《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》的规定。

4.3 耐久性能

4.3.1 UHPC 耐久性能设计指标包括氯离子扩散系数和耐磨性能。不同环境类别下，UHPC 的耐久性能设计指标宜按表 4.3.1 的规定选用。

表 4.3.1 UHPC 耐久性能

环境类别名称	耐久性设计指标
一般环境、冻融环境、近海或海洋氯化物环境、	氯离子扩散系数

除冰盐等其他氯化物环境、盐结晶环境、化学腐蚀环境	
磨蚀环境	耐磨性能

条文说明

UHPC 的耐久性好,大部分普通混凝土和高性能混凝土的耐久性能指标(如抗水渗透性、抗冻性、碳化性、抗硫酸盐腐蚀性)和试验方法已不适用于对超高性能混凝土耐久性的评价,由于影响水泥基材料耐久性的关键因素是材料的渗透性,目前,国内外均是以某种渗透性反映 UHPC 的耐久性,如法国规范有氯离子扩散系数和透气性等,考虑到公路桥涵的特点,采用氯离子扩散系数作为超高性能混凝土的耐久性指标。

4.3.2 UHPC 的氯离子扩散系数应按表 4.3.2 的规定进行分级,试验方法应符合本规范附录 E 的规定。

表 4.3.2 UHPC 抗渗性能分级

等级	UD 1	UD 2
$D_{Cl} (\times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s})$	$D_{Cl} \leq 20$	$20 < D_{Cl} \leq 50$

4.3.3 磨蚀环境下, UHPC 的耐磨性能应通过专门的实验研究确定。

4.3.4 不同环境类别和作用等级下,设计使用年限为 100 年的 UHPC 桥涵结构和构件,其耐久性能指标应符合表 4.3.4 的规定。

表 4.3.4 UHPC 耐久性能设计指标(设计使用年限 100 年)

环境名称	环境作用等级	要求
一般环境	I -A; I -B; I -C;	UD2
冻融环境	II -C; II -D	UD2
	II -E	UD1
近海或海洋氯化物环境	III -C; III -D	UD2
	III -E; III -F	UD1
除冰盐等其他氯化物环境	IV -C; IV -D	UD2
	IV -E	UD1
盐结晶环境	V -D	UD2
	V -E; V -F	UD1
化学腐蚀环境	IV -C;	UD2
	IV -D; IV -E; IV -F	UD1
磨蚀环境	VII -C; VII -D; VII -E; VII -F	实验确定

5 配合比

5.1 一般规定

5.1.1 UHPC 应根据工程结构形式、施工工艺以及环境因素进行配合比设计，宜采用绝对体积法。

5.1.2 UHPC 水胶比不宜大于 0.22，纤维体积率不应小于 1.5%。

条文说明

国外有关研究表明 UHPC 水胶比低于 0.22 后，内部的毛细孔基本处于不连通状态，从国内外的 UHPC 实践经验看，UHPC 的水胶比绝大部分在 0.22 以下，为保证 UHPC 优异的耐久性，规定水胶比的上限值。

钢纤维掺量是 UHPC 的必需组分，纤维的加入是为了提高 UHPC 的韧性，使得 UHPC 的抗压强度能充分利用，目前，国内外 UHPC 材料和结构性能的研究成果均是基于钢纤维的体积率不低于 1.5% 的 UHPC 得到的，因此，规定了钢纤维的纤维体积率的下限，对于某些结构（如钢管混凝土结构），需要考虑降低纤维体积率，则需进行专门的论证或其他技术规范确定。

5.1.3 骨料与胶凝材料各组分的相对比例宜按照颗粒紧密堆积理论进行设计。

5.1.4 当需改善 UHPC 的密实性时，宜增加粉体材料用量；当需要改善拌合物的黏聚性和流动性时，宜调整减水剂的掺量。

5.1.5 UHPC 配合比应在综合考虑 UHPC 工作性能、强度、耐久性以及其他必要性能要求的基础上，计算初始配合比，经试验室试配、调整，得出满足工作性要求的基准配合比，经强度等技术指标复核后确定设计配合比。

5.2 配合比

5.2.1 UHPC 的配制强度应按下式计算：

$$f_{cu,0} \geq 1.15 f_{cu,k} \quad (5.2.1)$$

5.2.2 硅灰用量不宜小于胶凝材料用量的 10%，水泥用量不宜小于胶凝材料用量的 50%。

5.2.3 骨料体积的计算应为混凝土总体积减去水、胶凝材料和钢纤维的体积，以及含气量得到。骨料的总用量应由骨料体积乘以骨料的密度得到。

5.2.4 骨料各个粒级的相对比例宜遵循最密实堆积理论，并经过试配，确认拌合物的工作性满足要求后确定。必要时可掺加适量石英粉，改善硬化混凝土的密实性。

5.2.5 UHPC 试配、配合比调整与确定应符合下列规定：

1 试配时应采用工程实际使用的原材料，每盘混凝土的最小搅拌量不宜小于 15L。

2 试配时，首先应进行试拌，检查拌合物的工作性。当试拌所得拌合物的工作性不能满足要求时，应在水胶比不变、胶凝材料用量和外加剂用量合理的原则下，调整胶凝材料用量、外加剂用量或不同粒级砂的体积分数等，直到符合要求为止。根据试拌结果，提出 UHPC 强度试验用的基准配合比。

3 UHPC 强度试验时应至少采用三个不同的配合比。当采用不同的配合比时，其中一个应为本规范 5.2.5 条中第 2 款确定的基准配合比，另外两个配合比的水胶比宜较基准配合比分别增加和减少 0.01；用水量与基准配合比相同，砂的体积分数可分别增加和减少 1%。

4 制作 UHPC 强度试件时，应验证拌合物工作性能是否达到设计要求，并以该结果代表相应配合比的 UHPC 拌合物性能指标。

5 UHPC 强度试验时每种配合比应至少制作一组试件，按规定的条件养护到要求的龄期时试压。如有耐久性要求时，还应制作相应的试件并检测相应的指标。

- 6 根据试配结果对基准配合比进行调整，确定的配合比为设计配合比。
- 7 对于应用条件特殊的工程，宜对确定的设计配合比进行模拟试验。

征求意见稿

6 结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 本规范 UHPC 结构设计采用以概率理论为基础、按分项系数表达的极限状态设计方法进行设计。

条文说明

本条参考了现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)的相关条文:极限状态设计采用了分项系数的表达方式,其中,作用设计值由作用标准值乘以相应的作用分项系数表示,此两值在现行标准《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)中作出了规定:材料强度设计值由本规范直接给出,其来源为材料强度标准值除以相应的抗力(材料)分项系数,抗力(材料)分项系数在本规范有关条文说明中给出。

6.1.2 公路 UHPC 桥涵应进行下列两类极限状态设计:

1 承载能力极限状态:对应于结构及其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位的状态。

2 正常使用极限状态:对应于结构及其构件达到正常使用的某项限值的状态。

6.1.3 本规范未明确规定的结构设计事项,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。

条文说明

本规范主要针对公路 UHPC 桥涵结构与普通混凝土桥涵结构设计的不同点进行规定,相同之处按普通混凝土桥涵的有关标准和规范执行。

6.2 耐久性设计

6.2.1 公路 UHPC 桥涵结构及构件的设计使用年限应符合现行行业标准

《公路工程技术标准》（JTG B01）的规定。

6.2.2 公路 UHPC 桥涵结构及构件所处环境类别应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）和《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T 3310）的规定确定。

6.2.3 UHPC 材料耐久性能应符合本规范第 4.3 节的规定。

6.2.4 公路 UHPC 桥涵结构设计应满足耐久性的构造要求，并遵循可检查、可维修的基本原则，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）的规定外，其中 UHPC 保护层最小厚度应符合本规范第 6.5.1 条的规定。

6.3 持久状况承载能力极限状态计算

6.3.1 公路 UHPC 桥涵结构及构件的持久状况设计应按承载能力极限状态的要求，对构件进行承载能力及稳定计算，必要时尚应进行结构的倾覆和滑移验算。在进行承载能力极限状态计算时，作用的效应（其中汽车荷载应计入冲击系数）应采用其组合设计值，结构材料性能应采用其强度设计值。

6.3.2 当采用内力的形式表达时，UHPC 桥涵构件的承载能力计算应采用下表达式：

$$\begin{aligned} \gamma_0 S &\leq R \\ R &= R(f_d, a_d) \end{aligned} \quad (6.3.2)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构的重要性系数，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；

S ——作用组合（其中汽车荷载应计入冲击作用）的效应设计值；
按现行行业标准《公桥涵设计通用规范》（JTG D60）的规定，对持久状况应按照作用基本组合计算；当进行连续梁等超静结构的承载能力极限状态计算时，上式中的作用效应改为 $\gamma_0 S + \gamma_p S_p$ ，其中 S_p 为预应力（扣除全部预应力损失）引起的次效应； γ_p 为预应力分项系数，预应力效应对结构有利时，

取 1.0，对结构不利时取 1.2；

R ——构件承载力设计值；

$R(\cdot)$ ——构件承载力函数；

f_d ——材料强度设计值；

a_d ——几何参数设计值，当无可靠数据时，可采用几何参数标准值 a_k ，即设计文件规定值。

6.3.3 UHPC 构件正截面的承载力应按下列基本假定进行计算：

1 构件弯曲后，其截面仍保持为平面，即符合平截面假定。

2 所有接缝截面（干接缝、胶接缝、湿接缝），构件验算时不应考虑 UHPC 的抗拉作用；除接缝截面之外，构件验算时应考虑 UHPC 的抗拉作用，并符合本规范第 6.3.5 条的规定。

3 UHPC 受压的应力与应变关系应按本规范第 4.2.8 条的规定取用。

4 纵向体内钢筋的应力等于钢筋应变与其弹性模量的乘积，但其值应符合下列规定：

$$-f'_{sd} \leq \sigma_{si} \leq f_{sd} \quad (6.3.3-1)$$

$$-(f'_{pd} - \sigma_{p0i}) \leq \sigma_{pi} \leq f_{pd} \quad (6.3.3-2)$$

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

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）规定取值；

f_{pd} 、 f'_{pd} ——纵向预应力钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值，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）规定取值；

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）规定取值。

5 干接缝和胶接缝处截面不应考虑普通钢筋作用，湿接缝处截面应考虑普通钢筋作用。

条文说明

采用节段预制拼装施工，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 UHPC 抗拉强度。其余假定与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第 5.1.3 条规定相同。

6.3.4 受弯构件正截面受压区 UHPC 压应力计算应符合下列规定：

- 1 正截面受压区 UHPC 的应力图简化为等效的矩形应力图。
- 2 矩形应力图高度与实际受压区高度的比值 β ，按表 6.3.4 取用。
- 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} 。

表 6.3.4 系数 β 值

UHPC 强度	U 120	U 140	U160	U 180	U 200
β	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78

条文说明

矩形应力图高度 x 与实际受压区高度 x_0 的比值 β ，采用本规范建议的 UHPC 设计受压应力-应变关系，并根据受压区合力相等和作用点相同的条件，可得

$$\beta = 2 - (1 - \frac{\varepsilon_0^2}{3\varepsilon_{cu}^2}) / (1 - \frac{\varepsilon_0}{2\varepsilon_{cu}})。$$

6.3.5 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 的应力图简化为等效的矩形应力图。
- 2 受拉区等效矩形应力图高度 x_t 可按 $x_t = h - x / \beta$ 计算，式中 h 为构件截面高度， x 为受压区等效矩形应力图高度， β 按表 6.3.4 取用。
- 3 受拉区等效矩形应力图的抗拉强度取 0.5 倍抗拉强度设计值 f_{td} 。

条文说明

考虑截面受拉区 UHPC 对承载力的贡献是 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。本条文规定受拉区 UHPC 的应力图简

化为等效矩形应力图。极限状态时，受拉区 UHPC 可能已进入受拉应变软化阶段，截面受拉边缘附近拉应力较大区域的部分钢纤维可能被拉断或拔出。受拉区 UHPC 考虑 1 倍的抗拉强度参与计算可能会对 UHPC 受弯构件承载力产生过高地估计。已有试验研究和工程经验表明，考虑 0.5 倍的 UHPC 抗拉强度设计值可较好且偏安全地计算 UHPC 构件的抗弯承载力。

6.3.6 UHPC 构件的正截面抗弯承载力和抗剪承载力应考虑接缝的折减作用，折减系数可按表 6.3.6 取值。

表 6.3.6 承载力折减系数

类型	符号	非接缝截面	接缝截面	
			体内预应力体系	体外预应力体系
抗弯折减系数	ϕ_f	1.0	A 类接缝 0.95	A 类接缝 0.90；B 类接缝 0.85
抗剪折减系数	ϕ_v	1.0	A 类接缝 0.90	A 类接缝 0.85；B 类接缝 0.85

注：湿接缝、环氧树脂接缝为 A 类接缝；干接缝为 B 类接缝。

6.3.7 主梁受弯构件的纵向受拉钢筋屈服和受压区混凝土破坏同时发生（即界限破坏）时，构件的正截面相对受压区高度 ξ_b 应按以下公式计算：

1 热轧普通钢筋

$$\xi_b = \frac{\beta}{1 + \frac{f_y}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (6.3.7-1)$$

2 钢绞线和钢丝：

$$\xi_b = \frac{\beta}{1 + \frac{0.002}{\varepsilon_{cu}} + \frac{f_{pd} - \sigma_{p0}}{\varepsilon_{cu} E_p}} \quad (6.3.7-2)$$

式中： 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，按本规范第 6.3.4 条规定取用；

f_{sd} 、 f_{pd} ——普通钢筋和预应力钢筋的抗拉强度设计值；

ε_{cu} ——受弯构件受压边缘 UHPC 极限压应变，按本规范第 4.2.8 条规定取值；

σ_{p0} ——受拉区纵向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。

6.3.8 UHPC 受弯构件正截面抗弯承载力验算应采用下式：

$$\gamma_0 M_d \leq \phi_f M_u \quad (6.3.8)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；
 M_d ——基本组合弯矩设计值；
 ϕ_f ——接缝抗弯承载力折减系数，按本规范表 6.3.6 规定取值；
 M_u ——正截面抗弯承载力，按本规范第 6.3.9~6.3.12 条规定计算。

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

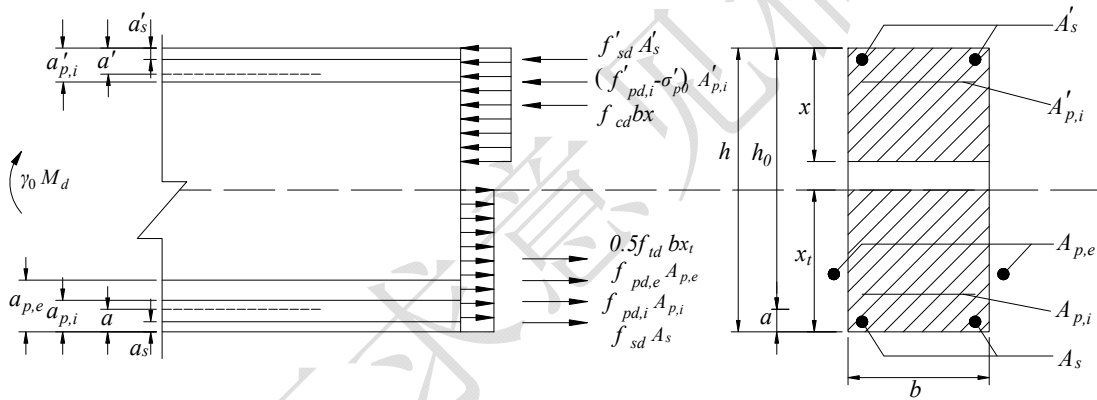


图 6.3.9 矩形截面 UHPC 受弯构件正截面承载力计算

$$M_u = f_{cd}bx(h_0 - x/2) + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s) + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i}(h_0 - a'_{p,i}) - 0.5f_{td}bx_t(x_t/2 - a) \quad (6.3.9-1)$$

UHPC 截面受压区高度 x 应按下式计算：

$$f_{sd}A_s + f_{pd,i}A_{p,i} + f_{pd,e}A_{p,e} + 0.5f_{td}bx_t = f_{cd}bx + f'_{sd}A'_s + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i} \quad (6.3.9-2)$$

截面受压区高度应符合下列要求：

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (6.3.9-3)$$

当截面受压区配有纵向普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受压，即

$(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$ 为正值时

$$x \geq 2a' \quad (6.3.9-4)$$

当截面受压区仅配普通钢筋或配有纵向普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受拉，即 $(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$ 为负值时

$$x \geq 2a'_s \quad (6.3.9-5)$$

式中： M_d ——弯矩组合设计值；
 f_{cd} ——UHPC 轴心抗压强度设计值；
 f_{td} ——UHPC 轴心抗拉强度设计值；
 f_{sd} 、 f'_{sd} ——纵向普通钢筋的抗拉强度设计值和抗压强度设计值，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）取值；
 $f_{pd,i}$ 、 $f'_{pd,i}$ ——纵向预应力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）取值；
 $f_{pd,e}$ ——纵向体外预应力钢筋极限应力设计值，按使用阶段的有效预应力取值；
 A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积
 $A_{p,i}$ 、 $A'_{p,i}$ ——受拉区、受压区纵向体内预应力钢筋的截面面积；
 $A_{p,e}$ ——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， $h_0=h-a$ ，此处 h 为截面全高；
 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 、 $a_{p,i}$ 、 $a_{p,e}$ ——受拉区普通钢筋、体内预应力钢筋和体外预应力钢筋至受拉区边缘的距离；
 a'_s 、 $a'_{p,i}$ ——受压区普通钢筋、体内预应力钢筋至受压区边缘的距离；

$\sigma'_{p,i0}$ ——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）相关规定计算。

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

1 当符合下列条件时

$$f_{sd}A_s + f_{pd,i}A_{p,i} + f_{pd,e}A_{p,e} + 0.5f_{td}b(h - h'_f / \beta) \leq f_{cd}b'_fh'_f + f'_{sd}A'_s + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i} \quad (6.3.10-1)$$

受压区应取宽度为 b'_f 的矩形截面（图 6.3.10（a）），同时应考虑受拉区腹板 UHPC 的抗拉作用，其正截面抗弯承载力应按下列规定计算：

$$M_u = f_{cd}b'_fx(h_0 - \frac{x}{2}) + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s) + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i}(h_0 - a'_{p,i}) - 0.5f_{td}bx_t(\frac{x_t}{2} - a) \quad (6.3.10-2)$$

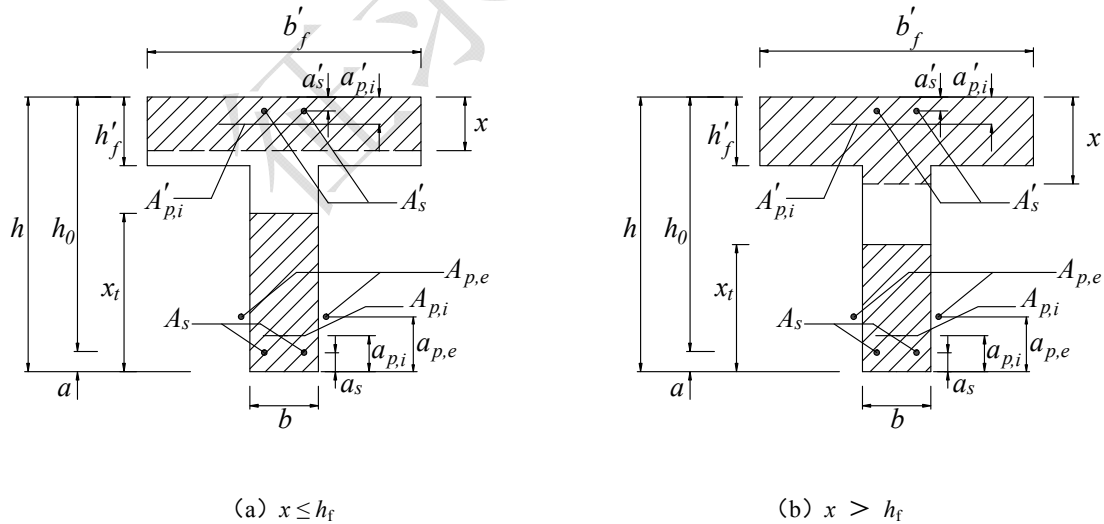


图 6.3.10 T 形截面 UHPC 受弯构件正截面承载力计算

2 当不符合式(6.3.10-1)的条件时，计算中应考虑截面腹板受压的作用，其正截面抗弯承载力应按下列规定计算（图 6.3.10（b））：

$$M_u = f_{cd}[bx(h_0 - \frac{x}{2}) + (b'_f - b)h'_f(h_0 - \frac{h'_f}{2})] + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s) \\ + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i}(h_0 - a'_{p,i}) - 0.5f_{td}bx_t(\frac{x_t}{2} - a) \quad (6.3.10-3)$$

此时，受压区高度 x 应按下列公式计算，并符合本规范式(6.3.9-3)、式(6.3.9-4)、式(6.3.9-5)的要求。

$$f_{sd}A_s + f_{pd,i}A_{p,i} + f_{pd,e}A_{p,e} + 0.5f_{td}bx_t = f_{cd}[bx + (b'_f - b)h'_f] + f'_{sd}A'_s + (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i} \quad (6.3.10-4)$$

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) 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。

6.3.11 箱形截面受弯构件的正截面抗弯承载力可参照本规范第 6.3.10 条计算。

6.3.12 当计算中考虑受压区纵向钢筋但不符合本规范式(6.3.9-4)、式(6.3.9-5)的条件时，主梁正截面抗弯承载力的计算应符合下列规定：

1 当受压区配有纵向普通钢筋和预应力钢筋，且预应力钢筋受压时

$$M_u = f_{pd,i}A_{p,i}(h - a_{p,i} - a') + f_{pd,e}A_{p,e}(h - a_{p,e} - a') + f_{sd}A_s(h - a_s - a') \\ + 0.5f_{td}bx_t(h - x_t / 2 - a') \quad (6.3.12-1)$$

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

$$M_u = f_{pd,i}A_{p,i}(h - a_{p,i} - a'_s) + f_{pd,e}A_{p,e}(h - a_{p,e} - a'_s) + f_{sd}A_s(h - a_s - a'_s) \\ - (f'_{pd,i} - \sigma'_{p,i0})A'_{p,i}(a'_{p,i} - a'_s) + 0.5f_{td}bx_t(h - x_t / 2 - a'_s) \quad (6.3.12-2)$$

式中符号的相关意义见本规范第 6.3.9 条。

6.3.13 计算主梁受弯构件斜截面抗剪承载力时，计算位置和斜截面水平投影长度应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）规定确定。

6.3.14 UHPC 受弯构件斜截面抗剪承载力验算应采用下式：

$$\gamma_0 V_d \leq \phi_v V_u \quad (6.3.14)$$

式中： γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；
 V_d ——剪力组合设计值；
 ϕ_v ——接缝抗剪承载力折减系数，按本规范表 6.3.6 规定取值；
 V_u ——斜截面抗剪承载力，按本规范第 6.3.15 条规定计算。

6.3.15 矩形、T 形和 I 形截面的 UHPC 受弯构件，其斜截面抗剪承载力应按下列公式计算：

$$V_u = \alpha_1 (V_c + V_f) + V_s + V_p \quad (6.3.15-1)$$

式中： V_u ——构件斜截面抗剪承载力；
 α_1 ——异号弯矩影响系数，计算简支梁和连续梁近边支点梁段的抗剪承载力时， $\alpha_1 = 1.0$ ；计算连续梁和悬臂梁近中间支点梁段的抗剪承载力时， $\alpha_1 = 0.9$ ；
 V_c ——构件斜截面上 UHPC 基体受剪承载力设计值；
 V_s ——构件斜截面上抗剪钢筋受剪承载力设计值；
 V_f ——构件斜截面上纤维受剪承载力设计值；
 V_p ——构件斜截面上预应力弯起钢筋受剪承载力设计值。

1 UHPC 基体受剪承载力设计值 V_c

1) 钢筋 UHPC 截面， V_c 按下式计算

$$V_c = 0.14 k_N f_{ck}^{0.5} b h_0 \quad (6.3.15-2)$$

2) 预应力 UHPC 截面， V_c 按下式计算

$$V_c = 0.16k_N f_{ck}^{0.5} bz \quad (6.3.15-3)$$

3) 素 UHPC 截面, V_c 按下式计算

$$V_c = 0.12k_N f_{ck}^{0.5} bh \quad (6.3.15-4)$$

式中: f_{ck} ——UHPC 轴心抗压强度标准值 (MPa);
 b ——矩形截面宽度或 T 形截面腹板宽度 (mm);
 z ——弯矩作用下构件的内力臂, 取 $z=0.9h_0$ (mm);
 h_0 ——截面受压边缘到纵向受拉钢筋的距离, 取 $h_0=7/8 h$ (mm);

$$k_N \text{ ——荷载或预应力提高系数, 取 } k_N = 1 + \begin{cases} 3 \frac{N_{Ed}}{f_{ck} A_c} & N_{Ed} \geq 0 \\ 0.7 \frac{N_{Ed}}{f_{ctk,0.05} A_c} & N_{Ed} < 0 \end{cases};$$

N_{Ed} ——荷载基本组合下轴力设计值(N), 受压为正;

A_c ——构件截面面积 (mm^2)。

2 纤维受剪承载力设计值 V_f

$$V_f = \frac{A_{fv} \sigma_f}{\tan \theta} \quad (6.3.15-5)$$

式中: σ_f ——纤维增强截面的残余抗拉强度 (MPa), 符合表 4.2.2 规定的应变软化型 UHPC 可取 $0.45f_{tk}$, 低应变硬化型和高应变硬化型 UHPC 可取 $0.55f_{tk}$;

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 $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$;

3 抗剪钢筋受剪承载力设计值 V_s

$$\text{仅设置箍筋} \quad V_s = \frac{A_{sv}}{S_v} z f_{sv} \cot \theta \quad (6.3.15-6)$$

$$\text{设置箍筋与弯起钢筋} \quad V_s = \frac{A_{sv}}{S_v} z f_{sv} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (6.3.15-7)$$

式中： A_{sv} ——抗剪箍筋截面面积（ mm^2 ）；
 s_v ——抗剪箍筋间距（ mm ）；
 z ——弯矩作用下构件的内力臂，取 $z=0.9h_0$ （ mm ）；
 f_{sv} ——抗剪箍筋抗拉强度设计值（ MPa ）；
 θ ——主压应力与梁轴线间夹角，建议 $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ；
 α ——弯起钢筋与梁轴线间夹角。

4 预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值 V_p

1) 对于体内预应力弯起钢筋

$$V_p = 0.75 f_{pd,i} \sum A_{p,i} \sin \theta_{p,i} \quad (6.3.15-8)$$

式中： $f_{pd,i}$ ——体内预应力钢筋抗拉强度设计值（ MPa ）；
 $A_{p,i}$ ——斜截面内弯起体内预应力钢筋的截面面积（ mm^2 ）；
 $\theta_{p,i}$ ——体内预应力钢筋弯起钢筋（在斜截面受压端正截面处）的切线与水平线夹角。

2) 对于体外预应力弯起钢筋

$$V_p = 0.75 \sum f_{pd,e} A_{p,e} \sin \theta_{p,e} \quad (6.3.15-9)$$

式中： $f_{pd,e}$ ——体外预应力钢筋抗拉强度设计值（ MPa ），按使用阶段有效预应力取值；
 $A_{p,e}$ ——斜截面内弯起体外预应力钢筋的截面面积（ mm^2 ）；
 $\theta_{p,e}$ ——体外预应力钢筋弯起钢筋（在斜截面受压端正截面处）的切线与水平线夹角。

条文说明

已有试验研究和工程实践表明，《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》可较好且偏安全地预测 UHPC 构件的抗剪承载力。本条文规定参考《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》相关条文规定对 UHPC 抗剪承载能力进行验算。需要说明的是《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》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。本规范参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的相关

条文规定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和考虑了异号弯矩影响系数。

6.3.16 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下列规定：

$$\text{仅设置箍筋} \quad \gamma_0 V_d \leq 1.3 b z f_{ck}^{2/3} \tan \theta \quad (6.3.15-1)$$

设置箍筋与弯起钢筋

$$\gamma_0 V_d \leq 1.3 b z f_{ck}^{2/3} \left[\frac{V_s (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta} + V_f \tan \theta \right] \left[\frac{1}{V_s + V_f} \right] \quad (6.3.15-2)$$

式中： b ——腹板厚度（mm）；

z ——弯矩作用下构件的内力臂（mm），取 $z=0.9h_0$ ；

f_{ck} ——抗压强度标准值（MPa）；

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

6.3.17 在集中力作用下，不配置抗冲切钢筋的 UHPC 板的抗冲切承载力计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）的有关规定，其中的 UHPC 轴心抗拉强度设计值为 $f_{td} = f_{tk} / (K_{local} \gamma_c)$ ，纤维取向系数取 $K_{local}=1.75$ 。

条文说明

对比各国 UHPC 指南、规范中关于不配置抗冲切钢筋的 UHPC 板的抗冲切承载能力的规定，并化作平均剪切应力的形式（不考虑板平面内的预应力），均为 αf_t 的形式，结果表明：《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》和《日本 UFC 结构设计与施工指南 JSCE 2006》关于抗冲切承载力计算相差较大，国内《纤维混凝土结构技术规程》（CECS38-2004）规定的抗冲切承载力与之相比更高，偏于危险，而《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）规定（与《混凝土结构设计规范》（GB50010）规定相同）与《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》接近，且偏于安全。为此，本节规定偏安全地按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）规定执行，并在其基础上，对 UHPC 抗拉强度项考虑局部纤维取向系数进行折减。

6.3.18 在集中力作用下，当抗冲切承载力不满足本规范 6.3.17 条的要求且板厚受到限制时，可配置抗冲切钢筋，且受冲切截面和抗冲切承载力计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）的有关规定，其中的 UHPC 轴心抗拉强度设计值为 $f_{td} = f_{tk} / (K_{\text{local}} \gamma_c)$ ，纤维取向系数取 $K_{\text{local}}=1.75$

6.3.19 配置间接钢筋的 UHPC 构件，其局部受压区的截面尺寸应满足下列要求（图 6.3.19）：

$$\gamma_0 F_{ld} \leq 1.3 \eta_f \beta_1 f_{cd} A_{ln} \quad (6.3.19-1)$$

$$\eta_f = \begin{cases} 0.25 \lambda_f + 0.60 & \lambda_f \leq 1.6 \\ 1.0 & \lambda_f > 1.6 \end{cases} \quad (6.3.19-2)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \quad (6.3.19-3)$$

式中： F_{ld} ——局部受压面积上的局部压力设计值，对后张法构件的锚头局压区，应取 1.2 倍张拉时的最大压力；

f_{cd} ——UHPC 轴心抗压强度设计值；

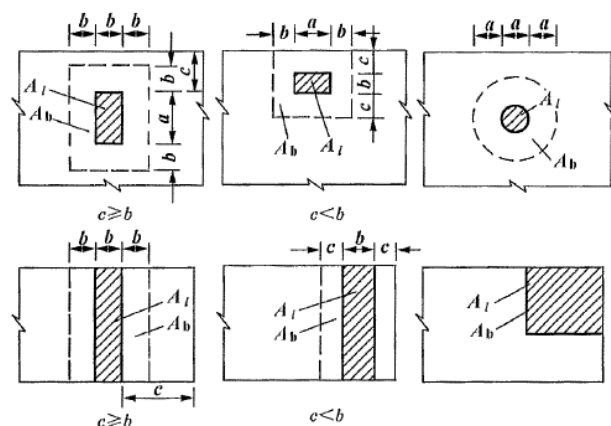
η_f ——UHPC 局部承压修正系数；

λ_f ——钢纤维特征含量， $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ ，其中 ρ_f 为钢纤维的体积掺量， l_f 为钢纤维长度或等效长度， d_f 为钢纤维直径或等效直径；

β_1 ——UHPC 局部承压强度提高系数；

A_b ——局部受压时的计算底面积，可按图 6.3.19 确定；

A_{ln} 、 A_l ——UHPC 局部受压面积，当局部受压面有孔洞时， A_{ln} 为扣除孔洞后的面积， A_l 为不扣除孔洞的面积。当受压面设有钢垫板时，局部受压面积应计入在垫板中按 45°刚性角扩大的面积；对于具有喇叭管并与垫板连成整体的锚具， A_{ln} 可取垫板面积扣除喇叭管尾端内孔面积。

图 6.3.19 局部承压时计算底面积 A_b 的示意图

条文说明

基于国内已有的 177 个 UHPC 局部承压试验结果，湖南大学建立了本规范给出的 UHPC 局部受压承载力计算公式，并将局部抗压承载力试验结果与按本规程规定计算得到的局部抗压承载力结果对比。结果表明：按本规程规定计算 UHPC 局部抗压承载力可较好地预测 UHPC 构件的局部抗压承载力，计算值与试验值比值的平均值为 0.995，标准差为 0.177。考虑 95% 保证率的折减系数为 $0.995 - 1.645 \times 0.177 = 0.7 \approx 1/1.45$ 。因此，当 UHPC 强度取值采用考虑 1.45 的材料分项系数的设计值时，可保证该公式具有 95% 的保证率。

6.3.20 配置间接钢筋的局部受压构件，其局部抗压承载力应按下列规定计算：

$$\gamma_0 F_{ld} \leq 0.9(\eta_f \beta_l f_{cd} + 2\rho_v \beta_{cor} f_{sd}) A_{ln} \quad (6.3.20-1)$$

$$\beta_{cor} = \sqrt{\frac{A_{cor}}{A_l}} \quad (6.3.20-2)$$

间接钢筋体积配筋率（核心面积 A_{cor} 范围内单位混凝土体积所含间接钢筋的体积）按下列公式计算：

1 方格网

$$\rho_v = \frac{n_1 A_{s1} l_1 + n_2 A_{s2} l_2}{A_{cor} s} \quad (6.3.20-3)$$

此时，在钢筋网两个方向的钢筋截面面积相差不应大于 50%。

2 螺旋筋

$$\rho_v = \frac{4 A_{ss1}}{d_{cor} s} \quad (6.3.20-4)$$

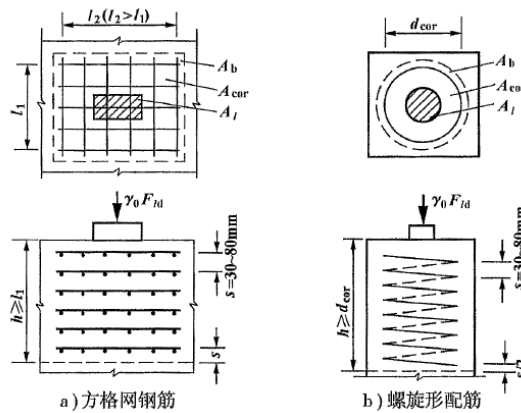


图 6.3.20 局部承压配筋图

式中： β_{cor} ——配置间接钢筋时局部抗压承载力提高系数，当 $A_{cor} > A_b$ 时，应取 $A_{cor} = A_b$ ；

A_{cor} ——方格网或螺旋形间接钢筋内表面范围内的 UHPC 核芯面积，其重心应与 A_l 的重心相重合，计算时按同心、对称原则取值；

n_1 、 A_{s1} ——方格网沿 l_1 方向的钢筋根数、单根钢筋的截面面积；

n_2 、 A_{s2} ——方格网沿 l_2 方向的钢筋根数、单根钢筋的截面面积；

A_{ss1} ——单根螺旋形间接钢筋的截面面积；

d_{cor} ——螺旋形间接钢筋内表面范围内 UHPC 核芯面积的直径；

s ——方格网或螺旋形间接钢筋的层距。

注：方格网钢筋不应少于 3 层，螺旋形钢筋不应少于 3 圈；带喇叭管的锚具垫板，板下螺旋筋圈数的长度不应小于喇叭管长度。

6.3.21 公路 UHPC 桥涵疲劳验算时，应对 UHPC 桥面板的弯拉应力，即正截面受拉区边缘的 UHPC 弯拉应力，进行验算，并应符合下列规定：

- 1 疲劳应力计算应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)考虑荷载作用,各项荷载应取用标准值。
- 2 UHPC 应力计算可采用名义应力法,按线弹性状态计算。
- 3 UHPC 桥面板疲劳验算时,受拉区边缘 UHPC 弯拉应力应不大于钢筋 UHPC 名义疲劳弯拉应力允许值。
- 4 钢筋 UHPC 名义疲劳弯拉应力允许值可取 $[f_{fd}^f]=0.5\times[f_{fd}]$,其中钢筋 UHPC 名义静力弯拉应力容许值 $[f_{fd}]$ 取裂缝宽度为 0.05mm 时钢筋 UHPC 构件对应的名义弯拉应力,裂缝宽度按本规范第 6.4.12 条规定计算。

条文说明

UHPC 梁式桥中 UHPC 桥面板厚度较薄,一般厚度为 12~25cm,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。

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,荷兰代尔夫特理工大学的 E.S. Lappa 等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 6.3.21a),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。与此同时,《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》规定受弯钢筋 UHPC 构件的疲劳折减系数为 0.5。综合考虑,本规程偏保守地将 UHPC 板弯拉强度的疲劳折减系数取为 0.5。

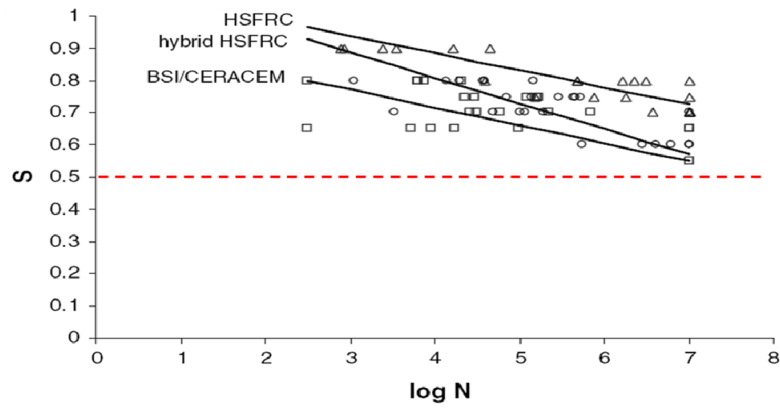


图 6.3.21a 局部承压配筋图

6.4 正常使用极限状态计算

6.4.1 公路 UHPC 桥涵的持久状况设计应按正常使用极限状态的要求，采用作用频遇组合、作用准永久组合或作用频遇组合并考虑作用长期效应的影响，对构件的抗裂、裂缝宽度和挠度进行验算，并使各项计算值不超过本规范规定的各相应限值。在上述的各种组合中，汽车荷载效应可不计冲击系数。

6.4.2 预应力 UHPC 构件可根据桥梁使用、所处环境的要求和施工方法，进行下列构件设计：

1 公路 UHPC 桥涵采用节段预制拼装施工方法时，应按全预应力混凝土设计。此类构件在作用频遇组合下控制截面受拉边缘不允许出现拉应力。

2 公路 UHPC 桥涵采用整体预制或现浇施工方法时，可按 A 类部分预应力混凝土设计。此类构件在作用频遇组合下控制截面受拉边缘可出现拉应力，并对拉应力加以限制。

条文说明

采用节段预制拼装施工方法时，节段梁的接缝因超载等原因开展后，可能会影响其使用要求，因此规定节段梁按全预应力构件设计。同时，考虑到目前国内 UHPC 梁式桥应用处于起步阶段，且已有工程案例均按全预应力或 A 类预应力构件设计。因此，出于安全和耐久性考虑，本规程规定其他 UHPC 梁式桥构件按 A 类预应力构件设计。

6.4.3 预应力 UHPC 构件中, 预应力钢筋的张拉控制应力值 σ_{con} 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。

6.4.4 当计算预应力 UHPC 构件的弹性阶段应力时, 构件截面性质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。

6.4.5 由预加力产生的 UHPC 法向应力及相应阶段预应力钢筋的应力、预应力钢筋和普通钢筋的合力及合力偏心距应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 的规定计算。

6.4.6 对先张法预应力 UHPC 构件端部区段进行正截面、斜截面抗裂验算时, 预应力传递长度 l_{tr} 范围内预应力钢筋的实际应力值, 在构件端部取为零, 在预应力传递长度末端取有效预应力值 σ_{pe} , 两点之间按直线变化取值 (图 6.1.7)。预应力钢筋的预应力传递长度应按表 6.4.6 采用。

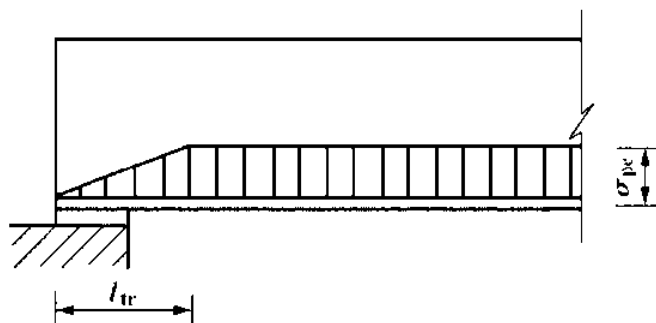


图 6.4.6 预应力钢筋传递长度内有效应力值

表 6.4.6 预应力钢筋的预应力传递长度 l_{tr} (mm)

预应力钢筋种类	混凝土强度等级			
	U 120	U 140	U 160	$\geq$ U 180
1×7 钢绞线, $\sigma_{\text{pe}} = 1000\text{MPa}$	50 d	45 d	40 d	35 d
螺旋肋钢丝, $\sigma_{\text{pe}} = 1000\text{MPa}$	45 d	40 d	35 d	30 d

注: 1 预应力传递长度应根据预应力钢筋放松时 UHPC 立方体抗压强度 f_{cu} 确定, 当 f_{cu} 在表列 UHPC 强度等级之间时, 预应力传递长度按直线内插取用。

- 2 当预应力钢筋的有效预应力值 σ_{pe} 与表值不同时，其预应力传递长度应根据表值按比例增减。
- 3 当采用骤然放松预应力钢筋的施工工艺时， l_{tr} 应从离构件末端 $0.25l_{tr}$ 处开始计算。
- 4 d 为预应力钢筋的公称直径。

条文说明

在先张法预应力 UHPC 构件的端部锚固区段（不计图 6.4.6 中端部失效部分），由于受预应力钢筋锚固传递应力的影响，预应力钢筋的实际应力是按曲线规律变化的，但可以近似地假定在钢筋传递长度范围内按直线变化。本条表 6.4.6 中预应力钢筋的传递长度 l_{tr} （mm）系按下列公式计算求得：

$$l_{tr} = \beta \frac{\sigma_{pe}}{f_{tk}} d \quad (6.4.6a)$$

式中： σ_{pe} ——放张时预应力的有效预应力值；

β ——预应力钢筋外形系数，按《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》规定修正为，七股钢绞线， $\beta=0.28$ ，螺旋肋钢丝， $\beta=0.25$ ；

f_{tk} ——UHPC 轴心抗拉强度标准值；

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

表 6.4.6 中的预应力传递长度是按该表给定的 UHPC 强度等级和有效预应力 σ_{pe} 求得，实际工程中当预应力钢筋放张时 UHPC 强度等级不是表列值时，可采用线性插值法取值。当有效预应力值也不是表列值时，则其预应力传递长度应在插入求出的基础上再按实际的 σ_{pe} 与表列的 σ_{pe} 比例增减。

6.4.7 在正常使用极限状态计算中，预应力 UHPC 构件应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）规定考虑相关因素引起的预应力损失。

6.4.8 各种因素引起的预应力损失除应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）有关规定计算之外，尚应符合下列规定：

- 1 先张法预应力 UHPC 构件自然养护后（时间不低于 48h）放张预应力，再采用高温蒸汽养护时，可不考虑预应力钢筋与台座之间温差引起的预应力损失。

2 计算 UHPC 收缩、徐变引起的预应力损失时, UHPC 的徐变系数和收缩应变应按本规范附录 B 规定取值。

6.4.9 预应力 UHPC 构件各阶段的预应力损失值应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 规定进行组合。

6.4.10 预应力 UHPC 受弯构件的正截面和斜截面抗裂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。

6.4.11 钢筋 UHPC 构件应按作用频遇组合并考虑长期效应的影响验算裂缝宽度, 并应符合下列规定:

1 当钢筋 UHPC 构件的拉应力不大于 f_{tk}/K_{global} 时, 可不验算钢筋 UHPC 构件裂缝宽度; 当钢筋 UHPC 构件拉应力大于 f_{tk}/K_{global} , 应验算钢筋 UHPC 构件裂缝宽度。

2 UHPC 构件的裂缝宽度验算是指验算 UHPC 表面裂缝宽度, 各类环境中 UHPC 最大裂缝宽度限值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) 规定。

条文说明

1 本规范规定 UHPC 构件按全预应力构件或 A 类预应力构件设计, 不用进行裂缝宽度验算。钢筋 UHPC 构件设计, 应进行裂缝宽度验算。当 UHPC 构件拉应力小于 f_{tk}/K_{global} 时, 认为 UHPC 基体没有开裂, 不用验算钢筋 UHPC 构件裂缝宽度; 当钢筋 UHPC 构件拉应力大于 f_{tk}/K_{global} 时, 认为 UHPC 基体已开裂, 应验算裂缝宽度。

2 由于 UHPC 内掺量大量的钢纤维, 而钢纤维对其受力性能十分关键。因此 UHPC 裂缝宽度验算应控制表面裂缝从而保证钢纤维的耐久性。

6.4.12 UHPC 表面最大裂缝宽度 w_{tmax} 可按式计算并满足:

$$w_{tmax} = w_{smax} \cdot (h - x_0 - x') / (h_0 - x_0 - x') \leq w_{max} \quad (6.4.12)$$

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 $0 \sim f_{tk}/K$ 之间）；
 $w_{\max}$ ——最大裂缝宽度限值；
 $w_{s\max}$ ——钢筋位置处最大裂缝宽度，按本规范第 6.4.13 条规定计算；
 $w_{t\max}$ ——UHPC 表明最大裂缝宽度。

6.4.13 钢筋 UHPC 受弯构件，钢筋位置处最大裂缝宽度 $w_{s\max}$ 可按下列公式计算：

$$w_{s\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{ss}}{E_s} (1.51c + 0.08 \frac{d}{\rho_{te}}) \quad (6.4.13-1)$$

$$\psi = 1 - \frac{0.4(f_{tk} - f_{tk}/K_{global})}{\rho_{te} \sigma_{ss}} \quad (6.4.13-2)$$

$$d = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i d_i} \quad (6.4.13-3)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}} \quad (6.4.13-4)$$

- 式中： $w_{s\max}$ ——钢筋位置处最大裂缝宽度；
 α_{cr} ——构件受力特征系数，对于钢筋 UHPC 受弯构件，取 2.1；
 ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数：当 $\psi < 0.4$ 时，取 $\psi = 0.4$ ；
 当 $\psi > 1.0$ 时， $\psi = 1.0$ ；
 f_{tk} ——UHPC 轴心抗拉强度标准值；
 K_{global} ——UHPC 整体纤维取向系数，按本规范第 4.2.5 条规定取值；
 σ_{ss} ——由作用频遇组合下的裂缝位置的钢筋应力，按第 6.4.14 条规定计算；
 E_s ——钢筋弹性模量；
 c ——最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底部的距离；
 d ——纵向受拉钢筋直径，采用不同直径的钢筋时， d 改用换算直径 d_e ，

$$d_e = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i d_i} \quad \text{式中 } n_i \text{ 为受拉区第 } i \text{ 中钢筋的根数，} d_i \text{ 为受拉区第 } i$$

中钢筋的直径，按表 6.3.12 取值

- ρ_{te} ——纵向受拉钢筋的有效配筋率 当 $\rho_{te} > 0.1$ 时，取 $\rho_{te} = 0.1$ ；当 $\rho_{te} < 0.01$ 时，取 $\rho_{te} = 0.01$ ；

- A_{te} ——有效受拉 UHPC 截面面积，对于受弯构件取 $2a_s b$ ；

a_s ——受拉钢筋重心至受拉边缘的距离；

b ——对矩形截面， b 为截面宽度，对翼缘位于受拉区的 T 形、I 形截面，为受拉区有效翼缘宽度。

表 6.4.13 受拉区钢筋直径 d_i

受拉区钢筋种类	单根普通钢筋	普通钢筋的束筋	钢绞线束	钢丝束
d_i 取值	公称直径 d	等代直径 d_{se}	等代直径 d_{pe}	

注：1、 $d_{se} = \sqrt{nd}$ ， n 为组成束筋的普通钢筋根数， d 为单根普通钢筋公称直径；

2、 $d_{pe} = \sqrt{nd_p}$ ， n 为钢丝束中钢丝根数或钢绞线束中钢绞线根数， d_p 为单根钢丝或钢绞线公称直径。

条文说明

与普通混凝土或普通钢纤维混凝土相比，由于 UHPC 的抗压强度较高，钢纤维与 UHPC 基体的粘结强度大大提高，UHPC 开裂后，钢纤维在裂缝处的桥接作用分担部分拉力而减小裂缝处钢筋应力，同时，裂缝处 UHPC 的残余抗拉强度可减小所需的传递长度而缩短了裂缝间距。直接将普通混凝土活普通纤维混凝土的裂缝宽度计算公式用于配筋 UHPC 结构会过于保守。为此，规程编制组开展了钢筋 UHPC 受弯构件裂缝宽度试验研究，基于综合分析理论，在《混凝土结构设计规范》(GB 50010) 的基础上，对裂缝间距、裂缝不均匀系数、构件受力特征系数等公式进行修正，给出钢筋 UHPC 受弯构件的裂缝宽度计算公式。

6.4.14 作用频遇组合下，钢筋 UHPC 受弯构件纵向受拉钢筋的应力 σ_{ss} 可按以下步骤计算（以工字型断面为例）：

1 基本假定：截面应变分布满足平截面假定；考虑受拉区 UHPC 参与截面受力，UHPC 应力应变曲线按本规范第 4.2.8 条规定取值；UHPC 受压及钢筋受拉的应力应变均取线弹性。

2 假设中和轴位于工字型截面腹板处，在已知作用频遇组合计算弯矩值 M_s 条件下，获得外荷载作用下截面的轴力平衡方程和弯矩平衡方程：

$$\sum N = 0, \quad C_{UHPC} = T_{UHPC1} + T_{UHPC2} + T_s \quad (6.4.14-1)$$

$$\sum M = M_s, \quad M_s = C_{\text{UHPC}} \cdot \frac{2}{3} x_0 + T_{\text{UHPC1}} \cdot \frac{2}{3} x' + T_{\text{UHPC2}} \left(\frac{h - x_0 - x'}{2} + x' \right) + T_s (h_0 - x_0) \quad (6.4.14-2)$$

3 求解第（2）步所得轴力平衡方程与弯矩平衡方程，确定截面曲率大小 φ 与中和轴位置 x_0 ，进而根据截面分布求解获得钢筋应力 $\sigma_{ss} = (h_0 - x_0)\varphi E_s$ 。

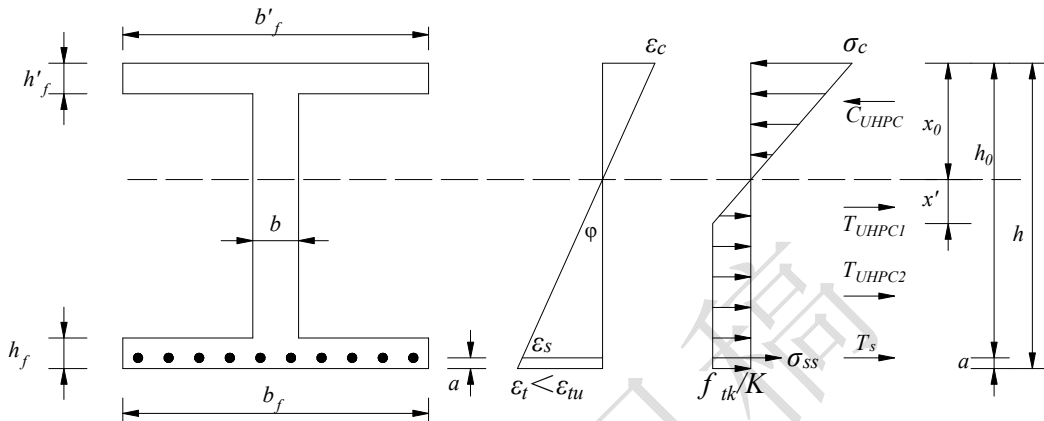


图 6.4.14 UHPC 构件正常使用极限状态中和轴和曲率计算图示

图中：
 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 $0 \sim f_{\text{ctm,el}}$ 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。

6.4.15 钢筋 UHPC 构件和预应力 UHPC 受弯构件的挠度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，

还应符合下列规定：

1 受弯构件的刚度计算时，开裂截面抗弯刚度 B_{cr} 应考虑 UHPC 拉应力的贡献。

2 挠度长期增长系数取 $\eta_0 = 1 + \phi(t - t_0)$ ，式中加载龄期为 t_0 ，计算考虑龄期为 t 时的 UHPC 徐变系数，按附录 B 计算。

条文说明

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018)第 6.5.3 规定挠度长期增长系数 η_0 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。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 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以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，本规范也采用引入徐变系数来考虑挠度长期增长系数，即 $\eta_0 = 1 + \phi$ 。

6.4.16 预应力 UHPC 受弯构件持久状况和短暂状况构件的应力计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，还应符合下列规定：

1 根据计算所得的 UHPC 主拉应力，预应力 UHPC 受弯构件按下列规定设置箍筋：

- 1) 在 $\sigma_{tp} \leq 0.40 f_{tk}/K_{global}$ 的区段，可不设置箍筋；
- 2) 在 $\sigma_{tp} > 0.40 f_{tk}/K_{global}$ 的区段，箍筋的间距 s_v 可按下列公式计算：

$$s_v = \frac{f_{sk} A_{sv}}{\sigma_{tp} b} \quad (6.4.16)$$

式中： 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。

UHPC 构件设计箍筋用量取本条规定计算的箍筋用量和本规范第 5.3 节规定计算的箍筋用量中的较大值。

2 钢筋 UHPC 受弯构件中性轴处的主拉应力 σ_{tp}^t 应符合下列规定：

1) 若满足 $\sigma_{tp}^t \leq 0.25f_{tk}'/K_{global}$ 的条件，该区段的主拉应力全部由 UHPC 承受，此时可不设置抗剪钢筋；

2) 若不满足 $\sigma_{tp}^t \leq 0.25f_{tk}'/K_{global}$ 的条件，该区段的主拉应力全部由 UHPC 和箍筋共同承受，箍筋的间距满足 $s_v \leq [\sigma_s^t]A_{sv}/(\sigma_{tp}^t b)$ 的要求，其中 $[\sigma_s^t]$ 、 A_{sv} 分别为短暂状况时钢筋的应力限值、同一截面内箍筋总截面面积；

3) 按本条计算的箍筋用量少于按斜截面抗剪承载力计算的箍筋用量时，箍筋用量采用两者较大值。

3 对构件施加预加力时，UHPC 的立方体强度不应低于设计强度等级的 80%，且弹性模量不应低于表 4.2.7 中弹性模量数值的 80%。

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载面边缘 UHPC 的法向拉应力应符合下列规定：

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

2) 当 $\sigma_{ct}^t = 0.70f_{tk}'/K_{global}$ 时，配置于预拉区的纵向钢筋的配筋率不低于 0.1%；

3) 当 $\sigma_{ct}^t = 1.15f_{tk}'/K_{global}$ 时，配置于预拉区的纵向钢筋的配筋率不低于 0.2%；

4) 当 $0.35f_{tk}'/K_{global} < \sigma_{ct}^t \leq 0.7f_{tk}'/K_{global}$ 时，配置于预拉区的纵向钢筋的配筋

率按第 1) 项和第 2) 项直线内插取用；

5) 当 $0.70f'_{tk}/K_{global} < \sigma_{ct}^t \leq 1.15f'_{tk}/K_{global}$ 时，配置于预拉区的纵向钢筋的配筋率按第 2) 项和第 3) 项直线内插取用；

6) 拉应力 σ_{ct}^t 不应超过 $1.15f'_{tk}/K_{global}$ 。

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。

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、安装各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。

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

条文说明

1 国内外已有 UHPC 桥梁工程实践表明，由于 UHPC 中掺有大量的钢纤维，使得取消箍筋成为可能。因此本条款在《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018) 第 7.1.6 条的基础上，适当考虑 UHPC 的抗拉强度及纤维取向，偏安全地规定，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 $0.40f_{tk}/K_{global}$ 时，可不配置箍筋，当腹板主拉应力大于 $0.40f_{tk}/K_{global}$ 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。将参照本条规定计算的箍筋用量与参照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。

2 本条款在《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018) 第 7.2.6 条的基础上，适当考虑 UHPC 的抗拉强度及纤维取向。

4 本条款在《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG

3362-2018)第 7.2.8 条的基础上,适当考虑 UHPC 的抗拉强度及纤维取向。

6.5 构造规定

6.5.1 普通钢筋和预应力钢筋的混凝土保护层厚度应满足下列要求:

- 1 普通钢筋保护层厚度取钢筋外缘至混凝土表面的距离,不应小于钢筋公称直径;当钢筋为束筋时,保护层厚度不应小于束筋的等代直径。
- 2 先张法构件中预应力钢筋的保护层厚度取钢筋外缘至混凝土表面的距离,不应小于钢筋公称直径;后张法构件中预应力钢筋的保护层厚度取预应力管道外缘至混凝土表面的距离,不应小于其管道直径的 1/2。
- 3 普通钢筋和预应力钢筋的保护层厚度应不小于 1.5 倍钢纤维长度。
- 4 最外侧钢筋的混凝土保护层厚度应不小于表 6.5.1 的规定值。

表 6.5.1 混凝土保护层最小厚度

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

注: 1 表中数值是针对各环境类别的最低作用等级、钢筋和 UHPC 无特殊防腐措施规定的。

2 对钢筋和 UHPC 有特殊防腐措施处理的,保护层最小厚度可将表中相应数值减小 5mm,但不得小于 15mm。

3 对工程预制的混凝土构件,其保护层最小厚度可将表中相应数值减小 5mm,但不得小于 15mm。

条文说明

由于 UHPC 具有致密的微观结构,因而具有良好的耐久性。对比《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》、《日本 UFC 结构设计与施工指南 JSCE 2006》、《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》、《美国 UHPC 华夫板设计指南 FHWA 2013》和《澳大利亚 Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000》中关于最小保护层厚度的规定,并综合考虑粘结力的可靠传递、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。

6.5.2 普通钢筋和预应力钢筋的混凝土钢筋净距应满足下列要求：

- 1 普通钢筋净距不应小于 1.5 倍钢筋公称直径，不应小于 1.5 倍钢纤维长度，且不应小于 20mm。
- 2 先张法构件中预应力钢筋的钢筋净距不应小于 1.5 倍钢筋公称直径，不应小于 1.5 倍纤维长度，且不应小于 30mm。
- 3 后张法构件中预应力钢筋管道的管道净距不应小于 0.5 倍管道直径，不应小于 1.5 倍纤维长度，且不应小于 40mm。

条文说明

对比《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》、《日本 UFC 结构设计与施工指南 JSCE 2006》、《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》、《美国 UHPC 华夫板设计指南 FHWA 2013》和《澳大利亚 Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000》中关于最小钢筋净距的规定，并综合考虑粘结力的可靠传递、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。

6.5.3 当计算中充分考虑普通钢筋的强度时，其最小锚固长度应符合表 6.5.3 的规定。

表 6.5.3 钢筋最小锚固长度

钢筋种类		HPB300	HRB400、HRBF400、RRB400	HRB500
混凝土强度等级		$\geq \text{U120}$	$\geq \text{U120}$	$\geq \text{U120}$
受压钢筋（直端）		$14d$	$8d$	$11d$
受拉 钢筋	直端	$16d$	$10d$	$13d$
	弯钩端	$14d$	$8d$	$11d$

注：1 d 为钢筋公称直径（mm）。

2 对于受压束筋和等代直径 $d_e \leq 28\text{mm}$ 的受拉束筋的锚固长度，应以等代直径按表值确定，束筋的各单根钢筋可在同一锚固终点截断；对于等代直径 $d_e > 28\text{mm}$ 的受拉束筋，束筋内各单根钢筋，应自锚固起点开始，以表内规定的单根钢筋的锚固长度的 1.3 倍，呈阶梯形逐根延伸后截断，即自锚固起点开始，第一根延伸 1.3 倍单根钢筋的锚固长度，第二根延伸 2.6 倍单根钢筋的锚固长度，第三根延伸 3.9 倍单根钢筋的锚固长度。

3 当 UHPC 在凝固过程中易受扰动时，锚固长度应增加 25%。

4 当带肋钢筋的公称直径大于 25mm 时，锚固长度应增加 25%。

5 当受拉钢筋末端采用弯钩时，锚固长度为包括弯钩在内的投影长度。

条文说明

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。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362-2018）第 9.1.4 条的条文说明，钢筋最小锚固长度 l_a 按下列公式计算得出：

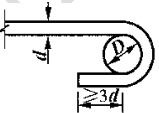
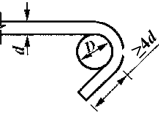
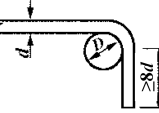
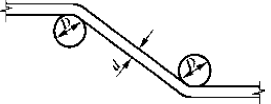
$$l_a = f_{sk} \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{1}{\pi d \tau} = \frac{f_{sk} d}{4\tau} \quad (6.5.3-1)$$

$$\tau = \eta \delta f_{tk} / \gamma_c \quad (6.5.3-2)$$

根据计算，不同强度等级 UHPC 中钢筋锚固长度为 $5d \sim 15d$ ，与普通混凝土的 $30d \sim 40d$ 相比大幅减小。为简化设计锚固长度的要求，本条规定锚固长度偏安全地按 U120 计算确定。与此同时，考虑到制作和安装偏差，本条规定的钢筋最小锚固长度在计算锚固长度的基础上，考虑 $1.5d$ 的制作和安装偏差作为锚固长度储备。受压钢筋锚固长度在受拉钢筋锚固长度基础上减去 $2d$ 。

6.5.4 受拉钢筋的末端弯钩和钢筋的中间弯折应符合表 6.5.4 的规定。

表 6.5.4 受拉钢筋的末端弯钩和钢筋的中间弯折

弯曲部位	弯曲角度	形状	钢筋	弯曲直径(D)	平直段长度
末端弯钩	180°		HPB300	$\geq 2.5d$	$\geq 3d$
	135°		HRB400、HRB500、 HRBF400、RRB400	$\geq 5d$	$\geq 4d$
	90°		HRB400、HRB500、 HRBF400、RRB400	$\geq 5d$	$\geq 8d$
中间弯折	$\leq 90^\circ$		各种钢筋	$\geq 20d$	-

条文说明

本条文在《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的

基础上,考虑了钢纤维对钢筋与混凝土粘结强度的有利影响,适当降低了受拉钢筋末端的平直段长度。

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

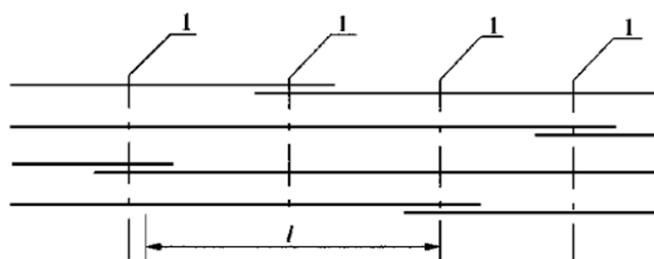
条文说明

本条文在《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)的基础上,考虑了钢纤维对钢筋与混凝土粘结强度的有利影响,适当降低了箍筋弯钩平直段的长度。

6.5.6 钢筋连接宜设置在受力较小的区段,并应错开布置。接头可采用焊接接头、机械连接接头(套筒挤压接头、墩粗直螺纹接头)和绑扎接头。钢筋焊接接头和机械连接接头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,钢筋绑扎接头应符合下列要求:

1 受拉钢筋绑扎接头的搭接长度应不小于表 6.5.6 的规定;受压钢筋绑扎接头的搭接长度应不小于表 6.5.6 规定的受拉钢筋绑扎接头搭接长度的 0.7 倍;

2 在任一绑扎接头中心至搭接长度 l_s 的 1.3 倍长度区段 l 内,同一根钢筋不得有两个接头;在该区段内有绑扎接头的受力钢筋截面面积占受力钢筋总截面面积的百分数,受拉区不宜超过 25%,受压区不宜超过 50%。超过上述规定时,应按表 6.5.6 的规定取值。



1-绑扎接头搭接长度中心(图中所示 l 区段内有接头的钢筋截面面积按两根计)

图 6.5.6 受力钢筋绑扎接头

表 6.5.6 受拉钢筋绑扎接头搭接长度

钢筋种类	HPB300			HRB400、HRBF400、RRB400			HRB500		
纵向搭接钢筋接头面积百分率	≤25	50	100	≤25	50	100	≤25	50	100
搭接长度	16d	23d	26d	12d	15d	20d	13d	18d	23d

注：1 当带肋钢筋直径 d 大于 25mm 时，其受拉钢筋的搭接长度应按表值增加 $3d$ 采用。

2 当 UHPC 在凝固过程中易受扰动时，搭接长度应增加 $3d$ 。

3 在任何情况下，受拉钢筋的搭接长度不应小于 $12d$ ，且不小于 160mm。

4 当带肋钢筋的公称直径大于 25mm 时，锚固长度应增加 25%。

5 当受拉钢筋末端采用弯钩时，锚固长度为包括弯钩在内的投影长度。

6.5.7 钢筋呈交错布置时，应符合下列要求：

- 1 交错布置钢筋的锚固长度应符合 6.5.3 条规定。
- 2 交错布置钢筋的重叠长度不应小于 0.75 倍的钢筋锚固长度。
- 3 交错布置钢筋的净距不应小于 1.5 倍纤维长度，且不应大于钢筋重叠长度。
- 4 交错布置钢筋的保护层厚度不应小于 2 倍钢筋公称直径，且不应大于 3 倍钢筋公称直径。

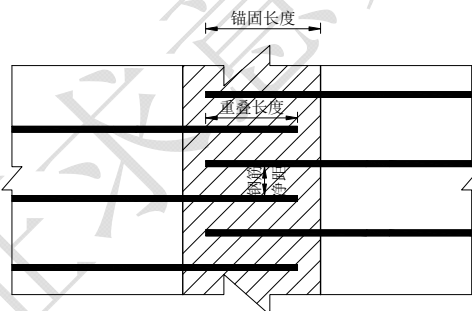


图 6.5.7 受力钢筋交错布置接头

6.5.8 当 UHPC 抗拉性能符合表 4.2.3 规定、疲劳性能和裂缝宽度验算满足本规范规定时，对钢筋 UHPC 受弯构件中纵向受力钢筋的最小配筋率不作要求。

6.5.9 当 UHPC 抗拉性能符合表 4.2.3 规定、疲劳性能和抗裂验算满足本规范规定时，预应力 UHPC 受弯构件对普通受拉钢筋的最小截面面积不作要求，但最小配筋率应满足下列条件：

$$\frac{M_{ud}}{M_{cr}} \geq 1.0 \quad (6.5.9)$$

式中: M_{ud} ——受弯构件正截面抗弯承载力设计值;

M_{cr} ——受弯构件正截面开裂弯矩值。

6.5.10 当UHPC抗拉性能符合表4.2.3规定、抗剪承载力和抗裂验算满足本规范规定时,对钢筋 UHPC 受弯构件和预应力 UHPC 受弯构件的箍筋的最小配箍率不作要求。

6.5.11 在满足最小保护层厚度、钢筋布置要求的条件下,钢筋 UHPC 板应满足结构承载力、刚度及局部稳定等要求,且板的最小厚度不应小于 50 mm。

6.5.12 T形、I形、箱形截面 UHPC 梁的腹板宽度,未配置箍筋时不应小于 75mm,配置箍筋时不应小于 100 mm。当腹板厚度有变化时,其过渡段长度不宜小于 12 倍腹板宽度差。

6.5.13 UHPC 梁式桥中现浇湿接缝的构造应进行必要的强化处理。湿接缝预埋钢筋直径不应小于 12mm,间距不应大于 200mm。钢筋的保护层厚度和锚固长度应分别满足本规范第 6.5.1 和 6.5.3 条的规定。

条文说明

UHPC 现浇湿接缝因为钢纤维不连续,抗裂强度被削弱,应通过增大截面、设置加强钢板等措施强化处理现浇接缝构造。

7 施工

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于公路桥涵 UHPC 工程的施工。

7.1.2 UHPC 材料供应方式可分为干混料供应方式和原材料供应方式两大类，由供需双方协商确定，宜优先选用干混料供应方式。若采用原材料供应要求，应采取必要措施确保其性能稳定。

条文说明

影响超高性能混凝土的因素多，对原材料的要求高，水胶比低，因此，对原材料的性能波动十分敏感，采用干混料供应时，可以在干混料出厂前，做好有关性能检验，有利于超高性能混凝土的质量控制，保证工程质量。

7.1.3 根据 UHPC 的早期收缩和水化热特点，应采取必要措施防止 UHPC 早期开裂。

条文说明

超高性能混凝土拌合物粘稠、无泌水，表面易出现塑性收缩裂缝；超高性能混凝土的水胶比低，早期自收缩大，且水泥用量和胶凝材料用量高，水化热温升大，在结构受约束时，由于早期自缩和温缩大的原因，容易出现早期开裂

7.1.4 本规范未明确规定的施工事项应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定。

7.2 材料储存与计量

7.2.1 采用原材料供应方式时，UHPC 原材料（胶凝材料、骨料、外加剂、钢纤维、拌合用水）储存要求应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）的规定。

7.2.2 采用干混料供应方式时，UHPC 干混料产品宜采用防潮包装袋包装，并应符合下列规定：

1 小包装袋（包装重量不超过 50kg）应符合现行国家标准《水泥包装袋》（GB 9774）的规定；集装袋（包装重量介于 500~3000kg）应符合现行国家标准《集装袋》（GB/T 10454）的要求。

2 袋装 UHPC 干混料每袋净含量不应少于其标识质量的 99%。随机抽取 20 袋，总质量（含包装袋）应不少于标识质量的总和。

3 袋装 UHPC 干混料包装袋上应标志标明产品名称、标记、商标、加水量范围、净含量、使用说明、储存条件及保质期、生产日期或批号、生产单位、地址和电话等。

7.2.3 UHPC 干混料在储存过程中不应受潮和混入杂物，并应符合下列规定：

1 不同品种、规格型号和批号的 UHPC 干混料应分别储存，不应混杂，且宜先存先用。

2 袋装 UHPC 干混料应储存于干燥环境中，应有防雨、防潮、防扬尘措施。储存过程中，包装袋不应破损。

3 袋装 UHPC 干混料的保质期自生产日期起为 3 个月。当存放时间超过 3 个月或对 UHPC 干混料有怀疑或受潮时，应重新取样复验，只有复验合格后方可使用。

7.2.4 UHPC 干混料的运输应符合下列规定：

1 UHPC 干混料运输时，应有防雨、防潮、防扬尘措施，避免受潮，不应污染环境。

2 袋装 UHPC 干混料可采用交通工具运输。运输过程中，不得混入杂物。

3 袋装 UHPC 干混料搬运时，不应摔包，不应自行倾卸。

7.2.5 UHPC 原材料和干混料的计量应符合下列规定：

1 固体原材料、干混料应按质量计量，水和液体外加剂可按体积计量。

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。混凝土生产单位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 7.2.5 规定的范围，并应每班检查 1 次。

表 7.2.5 UHPC 原材料计量允许偏差

原材料品种	水泥*	掺合料*	钢纤维	外加剂	骨料*	水	干混料*
每盘计量允许偏差（%）	±2	±2	±1	±1	±3	±1	±2
累计计量允许偏差（%）**	±1	±1	±1	±1	±2	±1	±1
* 当 UHPC 供应方式为干混料供应时，水泥、掺合料、骨料的计量替换为干混料的计量；							
** 累计计量允许偏差是指每一运输车中各盘混凝土的每种材料计量和的偏差。							

7.3 搅拌与运输

7.3.1 UHPC 宜采用干混料集中湿拌或现场加水搅和，并应符合下列规定：

- 1 搅和前，应检查搅拌设备状态，并应严格按施工配合比进行拌和。
- 2 设备搅拌能力应大于现场浇筑能力。
- 3 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。
- 4 对于未掺入钢纤维的干混料或现场拌制的 UHPC，搅拌系统中宜设置防止纤维结团的下料装置。
- 5 应采用具有计量系统的强制式搅拌设备拌和，搅拌时间不宜少于 8min；待 UHPC 流化后继续搅拌 2min。
- 6 搅拌应保证拌合物质量均匀，出机拌合物中不得有纤维结团和下沉现象。
- 7 同一盘 UHPC 的均质性除应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》（GB 50164）的规定之外，对同一盘 UHPC 中纤维含量随机进行检测，检测方法应符合现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》（JGJ/T 221）的规定，检测次数不少于三次，所有测值与设计钢纤维含量的相对误差均不应大于 5%。

8 搅拌结束后，应及时清洗搅拌设备。

条文说明

3 干混料（或水泥、矿物掺合料、骨料）干拌 0.5~2min，再加入减水剂和水湿拌 2~5min，最后加入纤维搅拌 2~4min（含纤维投入时间 1~2min）。总搅

拌时间不宜小于 5min。对于已掺纤维的干混料，可按照厂家产品说明书要求进行搅拌。

7.3.2 UHPC 运输宜采用搅拌运输车，或在条件允许时采用泵送方式输送；若采用吊斗或其他方式运输时，应保证 UHPC 的连续浇筑。

7.3.3 采用混凝土搅拌车运输时，应符合下列规定：

- 1 混凝土搅拌车的性能必须良好，其运输能力应大于现场浇筑能力。
- 2 接料前应确保混凝土搅拌车罐已清洗干净，并排净罐内的积水，接料后严禁向搅拌车罐内的 UHPC 加水。
- 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 20s 以上后再卸料；卸料后，应及时清洗干净。
- 5 UHPC 拌合物从搅拌机卸入搅拌车至卸料时的时间不宜长于 90min，如需延长运送时间，应采取有效技术措施，并通过试验验证。
- 6 对于寒冷、严寒或炎热的气候情况，混凝土搅拌运输车应有保温或隔热措施。

7.3.4 采用泵送方式输送时，应符合现行行业标准《混凝土泵送施工技术规范》（JGJ/T 10）的规定。

7.4 模板、支架施工

7.4.1 模板及支架的设计应满足下列规定：

- 1 模板宜采用标准化的组合钢模板，组合钢模板的拼装应符合现行国家标准《组合钢模板技术规范》（GB 50214）的规定；支架宜采用钢材或常备式定型钢材构件等材料制作。
- 2 模板应能适应构件的高温蒸汽养护，对于钢模板表面还应进行防腐防锈处理。
- 3 应根据振动器的作用范围，在模板上交错布置附着式振动器。

4 预应力构件的模具应根据设计要求设置预拱度。

5 对于现场接缝浇筑施工也可采用木模进行，但应保证模具的强度、刚度。

7.4.2 模板及支架应具有足够的承载力、刚度和稳定性，应能可靠地承受施工过程中所产生的各类荷载，并符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的规定。新浇筑 UHPC 对模板的最大侧压力应按下式计算：

$$F=\gamma_c H \quad (7.4.2)$$

式中： F ——新浇筑 UHPC 对模板的最大侧压力（ kN/m^2 ）；

γ_c ——UHPC 的重力密度（ kN/m^3 ）；

H ——UHPC 侧压力计算位置处至新浇 UHPC 顶面的总高度（m）。

7.4.3 模板的制作与安装除应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的规定之外，还应符合下列规定：

- 1 模板组装应连接牢固、缝隙严密，不漏浆，并有防漏浆措施。
- 2 斜坡面 UHPC 的外斜坡表面应支设模板，并采取可靠措施防止其偏位。
- 3 对于中空结构的梁体，对芯模应有防止上浮和偏位的可靠措施。
- 4 浇筑面积较大、形状复杂或封闭模板空间内 UHPC 时，应在模板上适当部位设置排气口和浇筑观察口。
- 5 模板与混凝土接触面应清理干净并应涂刷脱模剂，脱模剂不得污染钢筋和混凝土表面。
- 6 固定在模板上的预埋件、预留孔洞均不得遗漏，且应安装牢固、位置准确。
- 7 宜选择合适的脱模剂，减少 UHPC 表面的气孔。

7.4.4 支架的制作与安装应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的规定。

7.4.5 模板、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 3650）的相关规定，还应符合下列规定：

- 1 模板、支架的拆除期限和拆除程序等应严格按施工图设计要求进行，设计未要求时，应在同条件养护 UHPC 试件抗压强度达到 40MPa 及以上方可拆除。

- 2 拆模时，构件表面温度与环境温度的温度差不应大于 15℃。
- 3 拆模后，应及时对构件转角处露出的钢纤维进行处理。

7.5 浇筑

7.5.1 UHPC 拌合物浇筑应保证纤维分布的均匀性和结构的整体性，并应符合下列规定：

1 浇筑前要检查模板及其支架、钢筋以及保护层厚度、预埋件位置、尺寸，确认无误后，方可进行浇筑。浇筑的混凝土应填充到钢筋、埋设物周围及模板内各角落。

2 UHPC 浇筑应连续，宜一次浇筑完成；若采用分层浇筑，宜采取水平分层、斜向推进的方式浇筑，每层的厚度不应大于 300mm，各层间混凝土的间隔浇筑时间不应超过 10min，层间不应出现冷缝。

3 UHPC 可采用平板振捣或模外振捣器振捣成型，不得采用插入式振捣器。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、分层以及纤维下沉或露出构件表面。

4 UHPC 拌合物浇筑倾落的自由高度不应超过 1.5m，当倾落高度大于 1.5m 时，应加串筒、斜槽、溜管等辅助工具，避免钢纤维从水泥浆中离析或结团。

5 采用布料机浇筑时，应由一端开始均匀连续进行。

6 在浇筑 UHPC 过程中，应随机抽样制作同条件试件。同条件试件应在与结构或构件相同环境条件下成型与养护。

7.5.2 预制 UHPC 梁、板间的 UHPC 湿接缝施工应符合下列规定：

1 湿接缝用 UHPC 宜采用补偿收缩型 UHPC，且拌合物性能等级宜为 USF3 级及以上。

2 施工前应将浇筑 UHPC 的范围内的梁板表层 UHPC 凿去 2~5mm，清洗干净，保持表面润湿，并不得有积水。

3 湿接缝处的模板应具有足够的强度和刚度，与梁（板）体的接触面应密贴并具有一定的搭接长度，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。

4 湿接缝 UHPC 应在一天中气温相对较好的时段浇筑，且一联中的全部湿接缝应一次浇筑完成，浇筑过程中可采用钢筋插捣方式辅助密实，不得采用插入式振捣棒。

5 湿接缝浇筑完毕后，应尽早覆盖保湿薄膜，宜保湿养护 7d 以上，并采取必要措施防止出现收缩裂缝。同条件养护试件的抗压强度达到 40MPa 后方可拆模。

6 养护时环境平均温度宜高于 10℃，当环境平均气温连续 5d 低于 5℃时，应按冬季施工过程处理，采取保温措施。

7.6 养护

7.6.1 UHPC 养护方式可以采取蒸汽养护和自然养护，宜优先采用蒸汽养护；如采用自然养护或其他养护方式，需通过材料适应性和工艺适应性试验确定养护条件。

7.6.2 UHPC 蒸汽养护包括浇筑后的保湿养护（静停）和终凝后的高温蒸汽养护。

7.6.3 UHPC 浇筑完成后，应及时进行保湿养护（静停），并应符合下列规定：

1 宜覆盖节水保湿薄膜进行保湿养护。养护过程中，应加强巡查力度，发现有缺水部位时，应及时补水养护。

2 养护过程中不得对 UHPC 构件进行扰动。

3 养护时间不宜少于 24 小时，且同条件养护试件的抗压强度达到 40MPa 后方可拆模。

7.6.4 UHPC 构件拆模后应及时进行蒸汽养护，并应符合下列规定：

1 应根据构件规格、尺寸及养护要求确定蒸汽养护棚搭设、锅炉布置及养护方案。

2 蒸汽养护棚应具有足够的强度、刚度、稳定性和密封性；养护棚不得与构

件表面接触。

3 养护棚内蒸汽不宜直接喷在构件表面，应使蒸汽向下喷；构件上表面需覆盖塑料薄膜，防止养护棚内冷凝水直接滴在构件表面。

4 高温蒸汽养护过程分为升温、恒温、降温三个过程，宜采用温度自动控制系统对养护棚内的升温、恒温、降温过程进行控制。

5 高温蒸汽养护时的恒温阶段，养护温度恒定在 90°C 以上时，养护时间不应少于 48h。养护温度恒定在 80°C 以上时，养护时间不应少于 72h；养护过程中蒸汽养护棚内的相对湿度不低于 95%。

6 高温蒸汽养护时的升温阶段，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。

7.7 特殊气候条件下施工

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

- 1 现场降雨或下雪。
- 2 风力达到 6 级或 6 级以上的强风天气。
- 3 现场气温高于 40°C ，或拌合物浇筑温度高于 35°C 。
- 4 施工现场环境温度低于 0°C 。

7.7.2 UHPC 的雨期施工应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定，并应符合下列规定：

1 关注天气情况，UHPC 浇筑应安排在天气良好时段进行，应避开大风、大雨天气施工。

2 雨期施工时，应准备足量的防雨篷、帆布和塑料布或塑料膜等防雨器材和材料，防雨棚支架宜采用方便安装和拆卸的钢结构。

3 UHPC 浇筑过程中遭遇降雨，当降雨影响 UHPC 表面质量时应停止施工，

并对已浇部分 UHPC 层进行防雨遮挡，等待雨停后继续施工；若需不停顿继续进行浇筑施工，应搭设防雨棚，保证 UHPC 浇筑不受下雨影响。

4 施工过程中若遭遇未预料大雨情况，必须在中途停止本次浇筑时，应停止施工，并宜将已浇筑 UHPC 清除。

5 对已被雨水冲刷的 UHPC 应及时修补、整平，保证其质量满足要求。对局部破坏较严重区域，应在 UHPC 尚未初凝前铲除重浇。

7.7.3 UHPC 的大风天气施工应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定，并应符合下列规定：

1 在日照较强、空气干燥的春秋多风季节或山区、沿海经常刮风地区，要做好防护措施，防止刚浇筑完成的 UHPC 表面发生塑性收缩开裂。

2 UHPC 浇筑完成后，应及时覆盖养生薄膜进行保湿养护。养护膜表面应采取防风稳固措施，防止节水保湿膜被大风吹破或掀起。

3 养护过程中，应有专人负责巡视和检查，发现养护膜有被风掀起或吹破的情况，应重新洒水，并恢复覆盖。

7.7.4 UHPC 的热期（昼夜平均气温高于 30℃）施工应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定，并应符合下列规定：

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

2 施工中应随时检测气温，以及干混料、搅拌水和拌合物温度，监控 UHPC 表面温度，温度过高时应及时采取防高温和降温措施。

3 热期施工时，应控制混凝土拌合物的出料温度低于 30℃，入模温度应控制在 30℃ 以内。

4 保湿养护时，应控制养生水温与 UHPC 表面的温差不大于 12℃。不得采用冰水或冷水养生。

7.7.5 UHPC 的冬期（室外昼夜日平均气温连续 5d 低于 5℃）施工应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定，并应符合

下列规定：

- 1 当施工气温处于 5~10℃时，UHPC 施工应采取适当的保温覆盖措施施工，施工时应随时检测气温和混合料、拌和水的温度。
- 2 冬期施工时，UHPC 入模温度应不低于 5℃。

征求意见稿

8 质量检验与评定

8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于公路桥涵 UHPC 工程的质量检验与评定。

8.1.2 UHPC 工程一般属于桥涵单位工程的一个部分，其分部工程、分项工程的划分应按现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定执行。

8.1.3 分项工程应按基本要求、实测项目、外观质量和质量保证资料等检验项目分别检查。

8.1.4 分项工程质量应在符合下列规定的前提下，方可进行检验评定：

- 1 所使用的原材料、半成品、成品及施工控制要点等符合设计和规范要求的规定，检验结果应经监理工程师检查认可。
- 2 无外观质量限制缺陷且质量保证资料真实、齐全。

8.1.5 分项工程基本要求检查、实测项目检验、检查项目合格判定、外观质量检验和质量保证资料要求应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定，检验项目评定为不合格的，应进行整修或返工处理直至合格。

8.1.6 工程质量等级分为合格与不合格，分项工程、分部工程、单位工程质量评定应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定，评定为不合格的分项工程、分部工程，应返工、加固、补强或调测，满足设计要求后，可重新进行检验评定。

8.1.7 本规范未明确规定的检验与评定事项，应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定。

8.2 钢筋、预应力筋及管道压浆

8.2.1 钢筋加工及安装的基本要求和外观质量应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定。

8.2.2 钢筋加工和安装的实测项目应满足表 11.4.2-1~表 11.4.2-3 的规定。

表 11.4.2-1 钢筋加工实测项目

项次	项目	允许偏差（mm）	检验方法和频率
1	受力钢筋顺长度方向全长的净尺寸	±10	尺量：按每个工作日同一类型钢筋、同一加工设备抽查 3 件
2	弯起钢筋的弯折	±20	
3	箍筋内净尺寸	±5	

表 11.4.2-2 钢筋安装实测项目

项次	项目			允许偏差	检验方法和频率
1	受力钢筋 间距（mm）	两排以上排距		±5	尺量：长度≤20m 时，每个构件检查 2 个断面；长度＞20m 时，每个构件检查 3 个断面
		同排	梁、板	±10	
2	箍筋、横向水平钢筋、螺旋筋间距（mm）			±10	尺量：每构件测 10 个间距
3	钢筋骨架 尺寸（mm）	长		±10	尺量：按骨架总数 30%抽检
		宽、高或直径		±5	
4	弯起钢筋位置（mm）			±20	尺量：每骨架抽查 30%
5	保护层厚度（mm）	梁		±4	尺量：每构件各立模板面每 3m ² 检查 1 处，且每侧面不少于 5 处
		板		±3	

表 11.4.2-3 钢筋网实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	网的长、宽（mm）		±10	尺量：逐边测
2	网眼尺寸（mm）		±10	尺量：测 5 个网眼
3	网眼对角线差（mm）		±15	尺量：测 5 个网眼
4	网的安装位置（mm）	平面内	±15	尺量：测每网片边线中点
		平面外	±3	

条文说明

与普通钢筋混凝土板件相比，钢筋 UHPC 板件更加轻薄，因此在现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）基础上，提

高了钢筋保护层厚度、钢筋网安装位置的要求。

8.2.3 预应力筋加工及安装的基本要求和外观质量应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 的相关规定。

8.2.4 预应力筋加工和张拉实测项目应满足表 11.5.2-1 和表 11.5.2-2 的规定。

表 11.5.2-1 钢丝、钢绞线先张法实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	锚头钢丝同束长度相对差 (mm)	$L > 20m$	$\leq L/5000$ 及 5	尺量：每加工批测 2 束
		$6m \leq L \leq 20m$	$\leq L/3000$ 及 5	
		$L < 6m$	≤ 2	
2	张拉应力值		满足设计要求	查油压表读数：每根（束）检查
3	张拉伸长率		满足设计要求，设计未要求时 $\pm 6\%$	尺量：每根（束）检查
4	同一构件内断丝根数不超过钢丝总数的百分数		$\leq 1\%$	目测：每根（束）检查
5	预应力筋张拉后在横断面上的坐标 (mm)		± 3	尺量：测 2 个断面
6	无黏结段长度 (mm)		± 10	尺量：每根（束）检查

表 11.5.2-2 后张法实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	管道坐标 (mm)	梁长方向	± 30	尺量：每构件抽查 30% 的管道。 每个曲线段测 3 点，直线段每 10m 测 1 点，锚固点及连接点全部测
		梁宽方向	± 7	
		梁高方向	± 7	
2	管道间距 (mm)	同排	± 10	尺量：每构件抽查 30% 的管道， 测 2 个断面
		上下层	± 10	
3	张拉应力值		满足设计要求	查油压表读数：每根（束）检查
4	张拉伸长率		满足设计要求，设计未要求时 $\pm 6\%$	尺量：每根（束）检查
5	断丝滑丝数		每束一根，且每断面总数不超过钢丝总数的 1%	目测：每根（束）检查

条文说明

与普通预应力混凝土板件相比，预应力 UHPC 板件更加轻薄，因此在现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 基础上，提高了预应力筋横断面坐标、预应力管道坐标和间距的要求。

8.2.5 预应力管道压浆和封锚的基本要求和外观质量应符合现行行业标准

《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 的相关规定。

8.2.6 预应力管道压浆和封锚实测项目应满足表 11.5.4 的规定。

表 11.5.4 预应力管道压浆及封锚实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	浆体强度 (MPa)	在合格标准内	《公路桥涵施工技术规范》 (JTG/T 3650)
2	压浆压力值 (MPa)	满足施工技术规范规定	查油压表读数: 每管道检查
3	稳压时间 (s)	满足施工技术规范规定	计时器: 每管道检查

8.3 UHPC 工程

8.3.1 UHPC 材料的质量检验与评定分为出厂检验和交货检验。

8.3.2 出厂检验的项目由供需双方协商确定, 出厂检验的取样和试验工作应由供方承担。

8.3.3 交货检验的检验项目由供需双方协商确定, 但至少应包括 UHPC 的抗压强度、抗弯强度、轴心抗拉强度和轴拉性能分级。交货检验的取样和试验工作应由需方承担, 当需方不具备试验与人员的技术资质时, 供需双方可协商确定和委托有检验资质的单位承担。

8.3.4 交货检验试验结果应在试验检验龄期后 5 个工作日内或协议约定的时间内书面通知供方。

8.3.5 UHPC 质量验收应以交货检验结果作为依据。

8.3.6 UHPC 材料的检验与评定应符合下列要求:

1 UHPC 材料应符合下列基本要求。

1) UHPC 原材料的质量要求应符合本规范的要求。

2) UHPC 采用干混料供应方式时, 应检查干混料的产品使用说明和质量证明文件, 同生产厂家、同批号、同品种、同强度等级、同出厂日期且连续进场的干混料, 检验批量不应大于 200t。不同批次或非连续供应的不足一个检验批量的 UHPC 干混料应作为一个检验批。

3) UHPC 采用原材料供应方式时, UHPC 的配合比应符合本规范的规定, 原材料(包括胶凝材料、钢纤维、外加剂、骨料和拌合用水)的检验与评定应满足现行国家标准和行业标准。

4) UHPC 的弹性模量、氯离子扩散系数等, 在确定施工配合比时, 应使用实际生产所用原材料, 在实验室内拌制 UHPC, 制作试样, 按设计要求的性能项目检验一组。在原材料或配合比发生重大变化时应再次检验上述项目。检验与评定方法应满足现行国家标准和行业标准。

5) UHPC 浇筑完, 应及时覆盖塑料养生薄膜, 并应洒水保湿养生。

6) 高温蒸汽养护前, 应对养护设备、供热管道及保温棚进行安装和调试。

2 UHPC 材料的实测项目应符合表 11.6.6-1~表 11.6.6-3 的规定。

表 11.6.6-1 干混料实测项目

项次	项目		规定值或允许偏差	检验方法和频率
1	坍落扩展度		在合格标准内	《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283): 每 200t 检验一次
2	力学性能	抗压强度	在合格标准内	附录 D: 每 200t 检验一次
		抗弯强度	在合格标准内	
		轴心抗拉强度	在合格标准内	附录 A: 每 200t 检验一次
		轴拉性能分级	在合格标准内	
3	钢纤维	抗拉强度 (MPa)	≥ 2000	《活性粉末混凝土》(GB/T 31387): 每 200t 检验一次
		直径合格率 (%)	≥ 90	
		重量合格率 (%)	≥ 85 单纤维检验	
			≥ 90 纤维组检验	
		杂质含量 (%)	0	《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283): 每 200t 检验一次
		掺量或重量 (%)	± 5	

表 11.6.6-2 UHPC 基本性能指标实测项目

项次	项目	规定值	检验方法和频率
1	抗压强度	在合格标准内	附录 D: 每 50m ³ 检验一次
2	抗弯强度	在合格标准内	附录 D: 每 50m ³ 检验一次
3	轴心抗拉强度	在合格标准内	附录 D: 确定施工配合比、材料或配合比发生重大变化时检验一次
4	轴拉性能分级	在合格标准内	附录 A: 确定施工配合比、材料或配合比发生重大变化时检验一次

5	坍落扩展度 (mm)	在合格标准内	《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283): 每 50m ³ 检验一次
---	---------------	--------	--

表 11.6.6-3 UHPC 高温蒸汽养护实测项目

项次	项目	规定值或允许偏差	检验方法和频率
1	养护膜内温度	+5℃	温度传感器: 每小时检查 2 次
2	养护膜内湿度	+5%	湿度传感器: 每小时检查 2 次
3	养护时间	+1h	计时器: 每小时检查 2 次

3 UHPC 材料的外观质量应符合下列规定:

- 1) UHPC 干混料应无结团和受潮现象。
- 2) 浇筑过程中, UHPC 应色泽正常, 无发干或发亮现象。
- 3) UHPC 流动性好, 倾倒至模板内时, 应能自然流动至钢筋网间。
- 4) 振捣充分和保湿养护后, UHPC 应均匀完好, 且不应有龟裂现象。
- 5) 蒸汽养护完成后, UHPC 层应均匀完好, 且应无收缩裂纹。
- 6) 混凝土层边角处、不同浇筑时期接缝处等位置应衔接良好, 无脱空、台阶现象。
- 7) 接缝区域先浇段 UHPC 侧面凿毛处理后, 表面粗糙, 断面上有大量钢纤维裸露在外。

附录 A UHPC 轴拉性能试验方案

A.1 范围

A.1.1 适用于确定施工配合比、原材料或配合比发生重大变化时，UHPC轴拉性能的测定。

A.2 说明

A.2.1 UHPC的荷载-位移响应详细记录了当残余力达到20%的最大荷载时或测量区域的平均拉伸长度比最大纤维长度的一半大20%时的荷载-位移曲线。测试高应变硬化型UHPC时可在残余力达到50%时停止加载。

A.2.2 平均位移定义为通过两个附着在构件两边的电感式位移传感器测量的伸长量平均值。

A.2.3 应力定义为测量的力与试件中心位置截面面积的比值。

A.2.4 弹性阶段和强化阶段的应变分别定义为：平均位移与传感器测量的距离 L (取150mm)的比值。

A.2.5 弹性阶段和强化阶段的特征强度及特征应变分别定义为：线弹性段极限的横坐标为弹性极限应变 ε_{te} ，对应的应力为弹性极限抗拉强度 f_{te} ，将峰值应力定义为极限强度 f_{tu} ，所对应的应变为极限应变 ε_{tu} 。

A.3 原理

A.3.1 拉伸试验的仪器施加的力的范围是0-300kN。加载方式宜采用夹头位移控制或外装的位移传感器控制。测试仪器采用十字头的位移控制或位移传感器测定的数值控制。

A.3.2 哑铃状试件由上下两个特制夹具固定住，避免偏心及二次弯矩。中间纯拉段固定有两个矩形金属架，两者之间距离即为试件的测试标距 L ，本规范定为150 mm。

A.3.3 两个金属架用来安装精度为0.0001 mm的四个（或两个）线性可变位移计

(LVDT)，可全方位量测支架段内试件变形，并转化为试件的应变值。

A.4 试验设备

A.4.1 试验设备包括一个能测量抗压及抗拉强度的测试仪器，其测量力的误差范围在 ，位移传感器误差在 $\pm 5 \sim \pm 30\text{mm}$ ，线性最大偏移量为 $\pm 0.2\%$ ，测量长度和厚度的工具的允许误差要求不得超过 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

A.5 原理

A.5.1 每个试验系列采用6个试件，其试件尺寸参照图A.5.1，需要依次浇筑。对于高触变UHPC（坍落度 $<400\text{mm}$ ），浇筑过程采取与上述同样的方式，但不用设置沟槽。

A.5.2 试件养护方式应与UHPC梁式桥构件养护方式相同，并符合本规范10.4节的规定。

A.5.3 每个试件的尺寸应当进行测量（包括中心线的长度和宽度）。试件厚度的取值应取自试件不同位置的6个数值的平均值，3个位置要求沿纵向等间隔取。

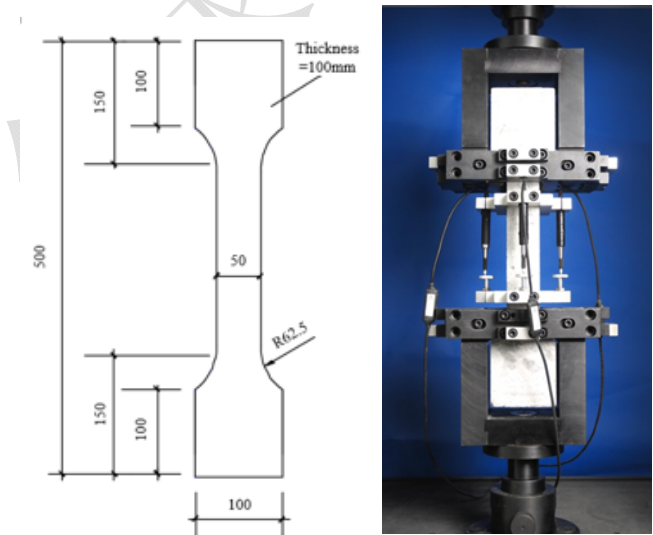


图 A.5.1 单轴拉伸试验试件尺寸（单位：mm）

A.6 原理

A.6.1 每个试件承受单调荷载，试验前需进行0.5kN的预加载，证实试验按照位移速度0.05mm/分钟施加，直至试件拉应力小于峰值应力的20%结束试验。测试应变强化型UHPC时可在残余力达到80%时停止加载。

A.6.2 六根试件中可能会出现试件拉伸断在标距外的情况，即轴拉荷载-位移曲线出现倒缩现象，但测试得到的应变强化段部分可认为有效。

A.7 原理

A.7.1 试验结果的评估应该包含以下数据内容：

1 对于每个测试试件：

- 1) 完整的应力-应变图；
- 2) 弹性阶段应力的最大值 f_{te} 以及对应的应变 ε_{te} ；
- 3) 最大极限应力 f_{tu} 和极限应变 ε_{tu} ；
- 4) f_{tu}/f_{te} 比值。

2 对于 A.6.1 条提到的构件：

- 1) 根据 A.6.1 条的试验算出的弹性极限抗拉强度 f_{te} 、极限抗拉强度 f_{tu} 以及 f_{tu}/f_{te} ，确定其平均值；
- 2) 对于所有试件，明确其抗拉强度以及达到抗拉强度时的应变值；
- 3) 按照表 3.1.7 对 UHPC 进行分类，取弹性极限抗拉强度的标准值作为 UHPC 抗拉强度的标准值 f_{tk} 。
- 4) 六根试件中至少出现三根以上符合特定受拉曲线特性的试件，即判定该组试件为有效试件，并进行数据分析，反之则判定为不合格试件，应重新进行试验。

A.8 强度和变形的确定

A.8.1 线弹性段极限对应的力为弹性极限强度 F_A 。

A.8.2 弹性极限抗拉强度定义为：

$$f_{te} = \frac{F_A}{b_m h_m} \quad (\text{A.8.2})$$

A.8.3 极限抗拉强度的确定采取下式：

$$f_{tu} = \frac{F_B}{b_m h_m} \quad (\text{A.8.3-1})$$

如果该UHPC出现应变强化阶段， F_B 是指该试验中所能达到的最大力。强化应变 ε_{tu} 为 F_B 对应的应变。如果该UHPC不出现应变强化阶段， F_B 所对应的力的大小是指在软化阶段，当裂缝开口达到0.3mm或极限拉应变达到1500 $\mu\varepsilon$ 时对应的力的平均值。力的平均值的计算采用式（A.8.3-2）进行计算，其中 $A_{0.3}$ 指的是荷载-位移曲线中，位移达到0.3mm或极限拉应变达到1500 $\mu\varepsilon$ 时对应的面积。

$$F_B = \frac{A_{0.3}}{0.3mm} \text{ 或 } F_B = \frac{A_{0.3}}{1500\mu\varepsilon} \quad (\text{A.8.3-2})$$

A.8.4 UHPC轴心抗拉强度代表值取线弹性极限抗拉强度：

$$f_t = \frac{F_A}{b_m h_m} \quad (\text{A.8.4})$$

附录 B UHPC 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℃高温养护2d或80℃高温养护3d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，其收缩应变可按下列公式计算：

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

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 $700\mu\varepsilon$ ；

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， $c=-2.48$ ， $d=-0.86$ 。

根据上述公式，可以得到UHPC收缩应变随时间发展曲线，如图B.1.2所示。

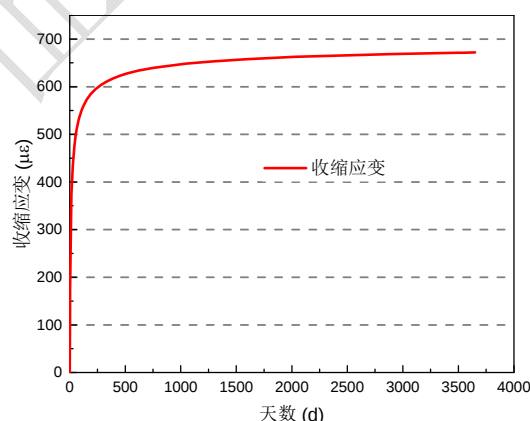


图 B.1.2 收缩应变时间历程曲线

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：

$$\phi(t, t_0) = \phi_0(t_\infty, t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^a}{(t - t_0)^a + b} \quad (\text{B.2.1})$$

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

$\phi_0(t_\infty, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 时的 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.2.1 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 $\phi_0(t_\infty, t_0)$	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℃蒸汽养护 2d 或 80℃蒸汽养护 3d	0.2	0.6	10

根据上述公式，可以得到UHPC徐变系数随时间发展曲线，如图B.2所示。

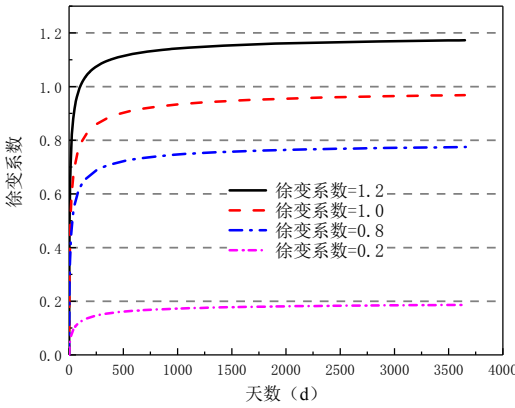


图 B.2.1 徐变系数时间历程曲线

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。

附录 C UHPC 纤维取向系数的确定方法及取值

C.0.1 采用相同尺寸的标准实际抗弯强度/实体构件中切出的抗弯实际强度的比值来确定纤维取向对混凝土抗弯性能的影响系数。

C.0.2 实体切出试件取向应至少考虑两个纤维取向，即平行于浇筑方向和垂直于浇筑方向。

C.0.3 纤维取向影响系数包括平均值和最大值两个指标，其计算方法分别为：

K_{global} = 标准试件的平均抗弯强度/实体切出的所有试件的平均抗弯强度（通常： $1.0 \leq K_{\text{global}} \leq 2.0$ ）。

K_{local} = 标准试件的平均抗弯强度/实体切出的所有试件的最小抗弯强度（通常： $1.0 \leq K_{\text{local}} \leq 2.5$ ）

C.0.4 若无测试数据时，可取 $K_{\text{global}}=1.25$ ， $K_{\text{local}}=1.75$ 。

C.0.5 当考虑构件厚度 h 对纤维取向的影响时，可按以下方法进行取值：

- 1 当 $h \leq 50 \text{ mm}$ 时， $K_{\text{global}}=1.0$ 。
- 2 当 $50 < h < 100 \text{ mm}$ 时， $K_{\text{global}}=1.0 \sim 1.25$ 。
- 3 当 $h \geq 100 \text{ mm}$ 时， $K_{\text{global}}=1.25$ 。

C.0.6 当考虑纤维取向对实体构件抗拉强度的影响时，亦可按C.0.4、C.0.5进行取值。

附录 D UHPC 抗压、抗弯、轴心抗拉强度及轴拉性能分级评定

D.0.1 UHPC的抗压强度、抗弯强度、轴心抗拉强度应分批进行检验评定。一个检验批的UHPC应由力学性能等级相同、试验龄期相同、生产工艺条件和配合比基本相同的UHPC组成。

D.0.2 采用蒸汽养护方式养护，UHPC试件应在成型后7d时进行试验；采用标准条件（环境温度 $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于95%）养护，UHPC试件应在成型后28d时进行试验。

D.0.3 UHPC的取样、抗压强度试验、抗弯强度试验应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）的规定。

D.0.4 UHPC的轴心抗拉强度试验应符合本规范附录A的规定。

D.0.5 UHPC抗压强度的合格判定应符合下列规定：

1 同批试件组数大于或等于 10 组时，应以数理统计方法评定，并满足下述条件：

$$m_{fu} \geq f_{cu,k} + 1.1S_n \quad (\text{D.0.5-1})$$

$$f_{cu,min} \geq 0.95f_{cu,k} \quad (\text{D.0.5-2})$$

式中： m_{fu} ——同批试件强度的平均值（MPa），精确到 0.1MPa；

S_n ——同批试件强度的标准差（MPa），精确到 0.01MPa，当时 $S_n < 2.5\text{MPa}$ 时，取 $S_n = 2.5\text{MPa}$ ；

$f_{cu,k}$ ——UHPC 设计抗压强度（MPa）；

$f_{cu,min}$ ——试件中强度最低一组的值（MPa），精确到 0.1MPa。

2 同批试件组数小于 10 组时，可用非数理统计方法评定，并满足下述条件：

$$m_{fu} \geq 1.1f_{cu,k} \quad (D.0.5-3)$$

$$f_{cu,min} \geq 0.95f_{cu,k} \quad (D.0.5-4)$$

式中： m_{fu} ——同批试件强度的平均值（MPa），精确到 0.1MPa；

$f_{cu,k}$ ——UHPC 设计抗压强度（MPa）；

$f_{cu,min}$ ——试件中强度最低一组的值（MPa），精确到 0.1MPa。

D.0.6 UHPC抗弯强度的合格判定应满足下述条件：

$$f_{f,m} \geq 1.05f_{f,k} \quad (D.0.6-1)$$

$$f_{f,min} \geq 0.95f_{f,k} \quad (D.0.6-2)$$

式中： $f_{f,m}$ ——同批试件抗弯、抗拉强度的平均值（MPa），精确到 0.1MPa；

$f_{f,k}$ ——UHPC 设计抗弯、抗拉强度（MPa）；

$f_{f,min}$ ——试件中抗弯、抗拉强度最低一组的值（MPa），精确到 0.1MPa。

D.0.7 UHPC抗拉强度的合格判定应满足下述条件：

$$f_{t,m} \geq 1.1f_{t,k} \quad (D.0.7-1)$$

$$f_{t,min} \geq 0.95f_{t,k} \quad (D.0.7-2)$$

式中： $f_{t,m}$ ——同批试件抗拉强度的平均值（MPa），精确到 0.1MPa；

$f_{t,k}$ ——UHPC 设计抗拉强度（MPa）；

$f_{t,min}$ ——试件中抗拉强度最低一组的值（MPa），精确到 0.1MPa。

D.0.8 同批试件的UHPC轴拉性能指标（ f_{te}/f_{tk} 、 f_{tu}/f_{te} 和 ϵ_{tu} ）应均符合本规范表4.2.3的规定，则评定为轴拉性能分级合格；若有一项性能不满足要求，则评定为不合格。

D.0.9 检查项目中，UHPC抗压强度、抗弯强度、轴心抗拉强度和轴拉性能分级评为不合格时，相应分项工程为不合格。

征求意见稿

附录 E UHPC 氯离子扩散系数试验方法

E.0.1 本方法适用于以快速氯离子迁移系数法（或称 RCM 法）测定氯离子在超高性能混凝土基体中非稳态迁移的迁移系数来确定超高性能混凝土的抗渗性能。

E.0.2 试验所用仪器设备、溶液和指示剂应符合下列规定：

1 试剂应符合下列规定：

- 1) 溶剂应采用蒸馏水或去离子水。
- 2) 氢氧化钠、氯化钠、硝酸银、氢氧化钙均应为化学纯。

2 仪器设备应符合下列规定：

- 1) 切割试件的设备应采用水冷式金刚石锯或碳化硅锯。
- 2) 真空容器应至少能够容纳 3 个试件。
- 3) 真空泵应至少能容纳 3 个试件。

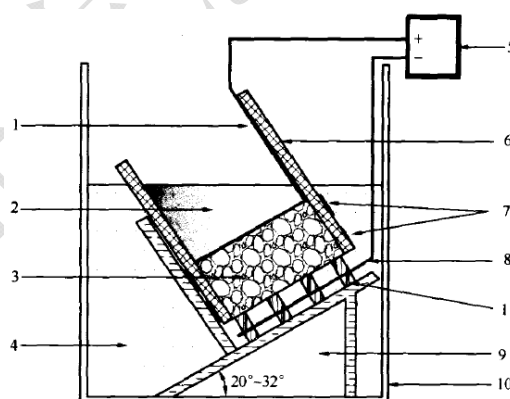


图 E.0.2 RCM 试验装置示意图

1—阳极板；2—阳极溶液；3—试件；4—阴极溶液；5—可调直流电源；

6—有机硅橡胶套；7—环箍；8—阴极板；9—支架；10—阴极试验槽；11—支撑头

- 4) RCM 试验装置采用的有机硅橡胶套的内径和外径应分别为 100mm 和 115mm，长度应为 150mm。夹具应采用不锈钢环箍，其直径范围应为（105~115）mm、跨度应为 20mm。阴极试验槽可采用尺寸为

370mm×370mm×280mm 的塑料箱。阴极板应采用厚度为 (0.5 ± 0.1) mm、直径不小于 100mm 的不锈钢板。阳极板应采用厚度为 0.5mm、直径为 (98 ± 1) mm 的不锈钢网或带孔的不锈钢板。支架应由硬塑料板制成。处于试件和阴极板之间的支架头高度应为 $(15 \sim 20)$ mm。RCM 试验装置还应复合现行行业标准《混凝土氯离子扩散系数测定仪》JG/T 262 的有关规定。

5) 电源应能稳定提供 $(0 \sim 90)$ V 的可调直流电，精度应为 ± 0.1 V，电流应为 $(0 \sim 10)$ A。

6) 电表的精度应为 ± 0.1 mA。

7) 温度计或热电偶的精度应为 ± 0.2 °C。

8) 喷雾器应适合喷洒硝酸银溶液。

9) 游标卡尺的精度应为 ± 0.1 mm。

10) 尺子的最小刻度应为 1mm。

11) 水砂纸的规格应为 $(200 \sim 600)$ 号。

12) 细锉刀可为备用工具。

13) 扭矩扳手的扭矩范围应为 $(20 \sim 100)$ N·m，测量允许误差为 $\pm 5\%$ 。

14) 电吹风的功率应为 $(1000 \sim 2000)$ W。

15) 黄铜刷可为备用工具。

16) 真空表或压力计的精度应为 ± 665 Pa (5mmHg 柱)，量程应为 $(0 \sim 13300)$ Pa $(0 \sim 100)$ mmHg 柱)。

17) 抽真空设备可由体积在 1000mL 以上的烧杯、真空干燥器、分液装置、真空表等组合而成。

3 溶液和指示剂应符合下列规定：

1) 阴极溶液应为 10%质量浓度的 NaCl 溶液，阳极溶液应为 0.3mol/L 摩

尔浓度的 NaOH 溶液。溶液应至少提前 24h 配制，并应密封保存在温度为 (20~25) °C 的环境中。

2) 显色指示剂应为 0.1mol/L 浓度的 AgNO₃ 溶液。

E.0.3 试件制作应符合下列规定：

1 RCM 法测抗氯离子渗透性试验应采用直径为 (100±1) mm，高度为 (30±2) mm 的圆柱体试件，每组试件数量应为 3 块。

2 在试验室制作试件时，宜采用 Φ100mm×200mm 试模。

3 试件应在终凝后一天内拆模，然后，浸没于标准养护室的水池中，试件的养护龄期宜为 28d，也可根据设计要求选用 56d 或 90d 养护龄期；采用热养护时，试件热养护后，浸没于标准养护室的水池中，试件的总养护龄期为 28d。

4 应在抗氯离子渗透试验前 7d 加工成标准尺寸的试件。应先将试件从正中间切成相同尺寸的两部分 (Φ100mm×100mm)，然后从两部分中各切取一个高度为 (30±2) mm 的试件，并应将第一次的切口面作为暴露于氯离子溶液中的测试面。

5 试件加工后应采用水砂纸和细锉刀打磨光滑，加工好的试件应继续浸没于水中养护至试验龄期。

E.0.4 RCM 法试验应按下列步骤进行：

1 首先应将试件从养护池中取出来，并将试件表面的碎屑刷洗干净，擦干时间表面多余的水分。然后应采用游标卡尺测量试件的直径和高度，测量应精确到 0.1mm。应将试件在饱和面干状态下置于真空容器中进行真空处理。应在 5min 内将真空容器中的气压减少至 (1~5) kPa，并应保持该真空度 3h，然后在真空泵仍然运转的情况下，将用蒸馏水配制的饱和氢氧化钙溶液注入容器，溶液高度应保证将试件浸没。在试件浸没 1h 后恢复常压，并应继续浸泡 (96±2) h。

2 试件安装在 RCM 试验装置前应采用电吹风冷风档吹干，表面应干净，无油污、灰砂和水珠。

3 RCM 试验装置的试验槽在试验前应用室温凉开水冲洗干净。

4 试件和RCM试验装置准备好以后，应将试件装入橡胶套内的底部，应在与试件齐高的橡胶套外侧安装两个不锈钢环箍（图E.0.4），每个箍高度应为20 mm，并应拧紧环箍上的螺栓至扭矩 $(30 \pm 2) \text{ N} \cdot \text{m}$ ，使试件的圆柱侧面处于密封状态。

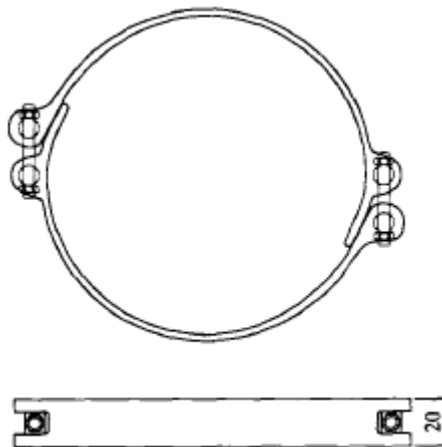


图 E.0.4 不锈钢环箍

5 应将装有试件的橡胶套安装到试验槽中，并安装好阳极板。然后应在橡胶套中注入约300mL浓度为0.3mol/L的NaOH溶液，并应使阳极板和试件表面均浸没于溶液中。应在阴极试验槽中注入12L质量浓度为10%的NaCl溶液，并应使其液面与橡胶套中的NaOH溶液的液面齐平。

6 试件安装完成后，应将电源的阳极（又称正极）用导线连至橡胶筒中阳极板，并将阴极（又称负极）用导线连至试验槽中的阴极板。

E.0.5 电迁移试验应按下列步骤进行：

1 首先应打开电源，将电压调整到 $(30 \pm 2) \text{ V}$ ，并应记录通过每个试件的初始电流。

2 后续试验应施加的电压（表6.6.6第二列）应根据施加30V电压时测量得到的初始电流值所处的范围（表E.0.5第一列）决定。应根据实际施加的电压，记录新的初始电流。应按照新的初始电流值所处的范围（表E.0.5第三列），确定试验应持续的时间（表E.0.5第四列）。

表 E.0.5 初始电流、电压与试验时间的关系

初始电流 I_{30V} (用30V电压)(mA)	施加的电压 U (调整后)(V)	可能的新初始电 流 I_n (mA)	试验最少持续时 间 t (h)
$I_0 < 2.5$	90	$5 \leq I_0 < 10$	168
$2.5 \leq I_0 < 5$	60	$5 \leq I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$I_0 \geq 10$	60	$I_0 \geq 20$	24

3 应按照温度计或者电热偶的显示读数记录每一个试件的阳极溶液的初始温度。

4 试验结束时，应测定阳极溶液的最终温度和最终电流。

5 试验结束后应及时排除试验溶液。应用黄铜刷清除试验槽的结垢或沉淀物，并应用饮用水和洗涤剂将试验槽和橡胶套冲洗干净，然后用电吹风的冷风档吹干。

E.0.6 氯离子渗透深度测定应按下列步骤进行：

1 试验结束后，应及时断开电源。

2 断开电源后，应将试件从橡胶套中取出，并应立即用自来水将试件表面冲洗干净，然后应擦去试件表面多余水分。

3 试件表面冲洗干净后，应在压力试验机上沿轴向劈成两个半圆柱体，并应在劈开的试件断面立即喷涂浓度为0.1mol/L的 $AgNO_3$ 溶液显色指示剂。

4 指示剂喷洒约15min后，应沿试件直径断面将其分成10等份，并应用防水笔描出渗透轮廓线。

5 然后应根据观察到的明显的颜色变化，测量显色分界线（图5.5.7）离试件底面的距离，精确至0.1mm。

6 当某一测点被骨料阻挡，可将此测点位置移动到最近未被骨料阻挡的位置进行测量，当某测点数据不能得到，只要总测点数多于5个，可忽略此测点。

7 当某测点位置有一个明显的缺陷，使该点测量值远大于各测点的平均值，可忽略此测点数据，但应将这种情况在试验记录和报告中注明。

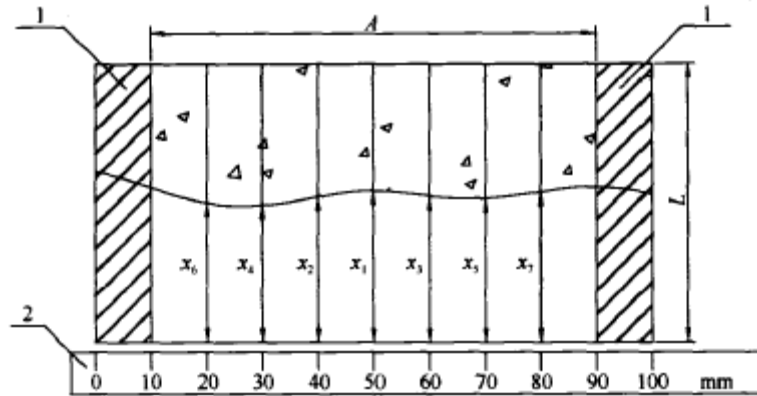


图 E.0.4 显色分界线位置编号

1—试件边缘部分；2—尺子；A—测量范围；L—试件高度

E.0.7 试验结果计算及处理应符合下列规定：

1 超高性能混凝土的非稳态氯离子迁移系数应按下式进行计算：

$$D_{RCM} = \frac{0.0239 \times (273 + T)L}{(U - 2)t} (X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}}) \quad (E.0.7)$$

式中： D_{RCM} ——超高性能混凝土的非稳态氯离子迁移系数，精确到 $0.01 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ；

U ——所用电压的绝对值（V）；

T ——阳极溶液的初始温度和结束温度的平均值（℃）；

L ——试件厚度（mm），精确到0.1mm；

X_d ——氯离子渗透深度的平均值（mm），精确到0.1mm；

t ——试验持续时间（h）。

2 超高性能混凝土的非稳态氯离子迁移系数应按下式进行计算：

1) 计算 3 个试样氯离子扩散系数的算术平均值；

- 2) 当氯离子扩散系数的计算平均值小于 $10 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ 时, 直接取 3 个试样氯离子扩散系数的中间值作为该组试件的氯离子扩散系数测定值。
- 3) 当氯离子扩散系数的计算平均值在 $10 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s} \sim 30 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ 之间时, 若最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 20%, 应取中间值作为测定值; 若最大值和最小值均超过中间值的 20%, 取其中最大值作为测定值。
- 4) 当氯离子扩散系数的计算平均值大于 $30 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ 时, 若最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 20%, 应取中间值作为测定值; 若最大值和最小值均超过中间值的 20%, 应重新制样进行试验。

本规范用语用词说明

1 本规范执行严格程度的用词，采用下列写法：

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 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。

2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。

3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本规范第×章的有关规定”、“应符合本规范第×. ×节的有关规定”、“应符合本规范第×. ×. ×条的有关规定”或“应按本规范第×. ×. ×条的有关规定执行”。