

ICS 91.100.30

CCS Q13

T/TMAC 团体标准

T/TMAC ×××—202X

超高性能混凝土制备与应用技术规范

Technical specification for preparation and application of ultra high performance
concrete

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中国技术市场协会 发布

中国技术市场协会（TMAC）是科技领域内国家一级社团，以宣传和促进科技创新，推动科技成果转移转化，规范交易行为，维护技术市场运行秩序为使命。为满足市场需要，做大做强科技服务业，依据《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》，中国技术市场协会有序开展标准化工作。本团体成员和相关领域组织及个人，均可提出修订TMAC标准的建议并参与有关工作。

TMAC标准按《中国技术市场协会团体标准管理办法》《中国技术市场协会团体标准工作程序》制定和管理。

TMAC标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议多数专家、成员的同意，方可予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料反馈至中国技术市场协会，以便修订时参考。

本文件著作权归中国技术市场协会所有。除了用于国家法律或事先得到

中国技术市场协会正式授权或许可外，不许以任何形式复制本文件。

中国技术市场协会地址：北京市丰台区万丰路68号银座和谐广场1101B

邮政编码：100036 电话：010-68270506 传真：010-68270453

网址：www.ctm.org.cn 电子信箱：1361620447@qq.com

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中铁大桥科学研究院有限公司提出。

本文件由中国技术市场协会归口。

本文件起草单位：××××××××、×××××××××××。

本文件主要起草人：×××、×××、×××、×××、×××、×××、×××。

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	2
3 UHPC制备	7
3.1 胶凝材料	7
3.2 骨料	7
3.3 外加剂	9
3.4 纤维	9
3.5 混凝土用水	10
3.6 配合比设计	10
3.7 材料储存与计量	11
4 性能与分级	13
4.1 工作性能	13
4.2 力学性能	13
4.3 耐久性能	20
5 承载能力极限状态计算	21
5.1 一般规定	21
5.2 受弯构件	21
5.3 受剪构件	27
5.4 受冲切构件	30
6 正常使用极限状态计算	32
6.1 裂缝宽度计算	32
6.2 挠度计算	38
7 施工	38
7.1 一般规定	38
7.2 搅拌与运输	39
7.3 模板、支架施工	40
7.4 浇筑	41
7.5 养护	43
7.6 特殊气候条件下施工	44
8 检验与验收	46

8.1 一般规定	46
8.2 钢筋、预应力筋及管道压浆	46
8.3 UHPC 工程	49
附录A UHPC轴心受拉试验方法	52
附录B UHPC受压受拉本构关系	55
附录C UHPC收缩应变和徐变系数计算	58
附录D UHPC纤维取向系数的确定及取值	60
本标准用词说明	61

1 总则

- 1.0.1 为促进超高性能混凝土（UHPC）在工程中的应用，做到技术先进、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UHPC材料的制备及新建结构的设计、施工与验收。
- 1.0.3 超高性能混凝土制备与应用技术规范用UHPC材料技术要求、结构设计、施工、检验与验收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。

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 含粗骨料的超高性能混凝土 ultra-high performance Concrete with coarse aggregate (UCA)

通过在UHPC体系中掺入5~10mm粗骨料配制而成，简称UCA。

2.1.3 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。

2.1.4 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。

2.1.5 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转折点对应的拉应力，也称为初裂抗拉强度。

2.1.6 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。

2.2 符号

2.2.1 材料性能有关符号

UC120	——	边长100mm的立方体抗压强度标准值为120MPa的常规UHPC；
UCA100	——	边长100mm的立方体抗压强度标准值为100MPa的UCA；
E_c 、 G_c	——	UHPC弹性模量、剪切变形模量；
E_s 、 E_p	——	普通钢筋、预应力钢筋弹性模量；
μ_c	——	UHPC泊松比；
$f_{cu,k}$	——	UHPC立方体抗压强度标准值；

f_{ck} 、 f_{cd}	——	UHPC轴心抗压强度标准值、设计值；
$f_{t0,k}$ 、 $f_{t0,d}$	——	UHPC轴心抗拉初裂强度标准值、设计值；
f_{tk} 、 f_{td}	——	UHPC轴心抗拉强度标准值、设计值；
f_{te} 、 f_{tu}	——	UHPC弹性极限抗拉强度、极限抗拉强度；
ε_0 、 ε_{cu}	——	UHPC受压峰值应变、极限压应变；
ε_{te} 、 ε_{tu}	——	UHPC弹性极限拉应变、极限拉应变；
$f_{0.15}$	——	软化阶段变形达到0.15%时材料残余的拉伸强度；
D_{Cl}	——	氯离子扩散系数；
f_{sd} 、 f_{sv}	——	普通钢筋、箍筋抗拉强度设计值；
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}	——	集中反力设计值；
M_d	——	弯矩设计值；
M_u	——	正截面抗弯承载力；
M_s	——	按作用频遇组合计算的弯矩值；
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	——	构件斜截面预应力弯起钢筋受剪承载力设计值；
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；
$\sigma'_{p,i0}$	——	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>i</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；
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_{st} 、 σ_{ck}	——	荷载标准组合（短期效应组合）下抗裂验算边缘的混凝土法向应力；
σ_{pc}	——	扣除预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力；
$\sigma_{pc,m}$	——	预加力引起的混凝土板有效平均压应力；
ε_c 、 σ_c	——	抗裂计算时受压区混凝土边缘应变、应力；
ε_s 、 σ_{ss}	——	抗裂计算时受拉钢筋应变、应力；
ε_t	——	抗裂计算时受拉边缘UHPC的应变；
C_{UHPC}	——	抗裂计算时受压区UHPC压力合力；
T_{UHPC1}	——	抗裂计算时受拉区UHPC受拉弹性区拉力合力；
T_{UHPC2}	——	抗裂计算时受拉区UHPC受拉塑性区拉力合力；
T_s	——	抗裂计算时受拉区钢筋合力；
B_{cr}	——	UHPC构件开裂截面抗弯刚度。

2.2.3 几何参数有关符号

l_f	——	钢纤维长度；
d_f	——	钢纤维直径；
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>i</i> 层钢筋截面重心的距离；
A_e	——	UHPC有效受拉面积；
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与中性轴高度的比值；
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_{svu}	——	与冲切破坏锥体斜截面相交的全部箍筋截面面积；
A_{sbu}	——	与冲切破坏锥体斜截面相交的全部弯起钢筋截面面积；
s_v	——	箍筋间距；
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；
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；
w_{\max}	——	按荷载标准组合（短期效应组合）并考虑长期影响的最大裂缝宽度计算值；
w_{\lim}	——	最大裂缝宽度限值；
l_{cr}	——	平均裂缝间距；
A_{fv}	——	纤维作用面积；
d	——	钢筋或预应力筋直径；
d_{te}	——	纵向受拉钢筋等效直径；
c	——	混凝土保护层厚度；
φ	——	截面曲率；

- U_m —— 距集中反力作用面 处破坏锥体截面面积的周长；
 α —— 弯起钢筋与梁轴线的夹角；
 $\varepsilon_{cs}(t)$ —— 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；
 $\phi(t, t_0)$ —— 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；
 t —— 计算时考虑时刻的 UHPC 龄期；
 t_0 —— 加载时 UHPC 龄期。

2.2.4 计算符号及其他有关符号

- 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；
 α_{c1} —— 棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值；
 α_{c2} —— 脆性折减系数；
 γ —— 材料分项系数；
 γ_0 —— 桥梁结构的重要性系数；
 λ_f —— 钢纤维特征含量数；
 ρ_f —— 钢纤维体积掺量；
 α_f —— 钢纤维对抗拉强度的影响系数；
 m —— 承载力计算时抗拉强度折减系数；
 k —— 抗裂计算时抗拉强度折减系数；
 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；
 α_{cr} —— 考虑构件受力特征的裂缝宽度扩大系数
 ψ —— 裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数；
 k_N —— 荷载或预应力提高系数；
 β_h —— 截面高度尺寸效应系数；
 β_f —— 钢纤维对UHPC抗冲切强度的影响系数；
 ρ_{eff} —— 有效配筋率。

3 UHPC制备

3.1 胶凝材料

3.1.1 水泥宜采用GB 175标准要求的硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥。当采用其他种类或标号的水泥时，应通过试验验证。

3.1.2 矿物掺合料应满足《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003的要求，当采用其他种类的矿物掺合料时，应通过试验验证。

3.1.3 硅灰应符合《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%，28d活性指数不应低于90%。

3.1.4 粉煤灰应符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596的规定，宜为I级粉煤灰，且45 μm方孔筛筛余细度不应高于12%，活性指数不应低于95%。

3.2 骨料

3.2.1 骨料宜优先选用最大粒径不超过1.25mm的单粒级石英砂，也可选用天然砂或人工砂（机制砂）。

3.2.2 石英砂宜采用以石英为主的颗粒材料，石英砂应分为粗粒径砂(1.25mm~0.63mm)、中粒径砂(0.63mm~0.315mm)和细粒径砂(0.315mm~0.16mm)三个粒级，且应符合表3.2.2要求。

表 3.2.2 石英砂质量要求

项目	技术要求
1.25mm~0.63mm 粒级≥1.25mm 的颗粒比例 (%)	≤5
1.25mm~0.63mm 粒级<0.63mm 的颗粒比例 (%)	≤5
0.63mm~0.315mm 粒级≥0.63mm 的颗粒比例 (%)	≤5
0.63mm~0.315mm 粒级<0.315mm 的颗粒比例 (%)	≤5
0.315mm~0.16mm 粒级≥0.315mm 的颗粒比例 (%)	≤5
0.315mm~0.16mm 粒级<0.16mm 的颗粒比例 (%)	≤5
SiO ₂ 含量 (%)	≥97
云母含量 (%)	≤0.5
硫化物及硫酸盐含量 (%)	≤0.5
氯离子含量 (%)	≤0.02

3.2.3 石英粉宜采用以含石英为主的粉状材料，且应符合表3.2.3要求。

表 3.2.3 石英粉质量要求

项目	技术要求
<0.16mm 粒径的颗粒比例 (%)	≥95
SiO ₂ 含量 (%)	≥97
云母含量 (%)	≤0.5
硫化物及硫酸盐含量 (%)	≤0.5
氯离子含量 (%)	≤0.02

3.2.4 天然砂应满足《建设用砂》GB/T 14684的规定，宜采用细度模数为2.3~3.0的中砂或1.6~2.2的细砂且应符合表3.2.4要求。

表 3.2.4 天然砂质量要求

项目	技术要求
>4.75mm 粒径的颗粒比例 (%)	<1
含泥量 (%)	≤0.5

3.2.5 人工砂应满足《人工砂混凝土应用技术规程》JGJ/T 241的规定，宜采用细度模数为2.3~3.0的中砂或1.6~2.2的细砂，且应符合表3.2.5要求。

表 3.2.5 人工砂质量要求

项目	技术要求
>4.75mm 粒径的颗粒比例 (%)	<1
母岩强度 (MPa)	≥100

3.2.6 当需选用粗骨料制作UCA100及以上等级的超高性能混凝土时，粗骨料宜为天然岩石、卵石或矿山废石经机械破碎、筛分制成的碎石颗粒，不宜为天然形成的卵石。粗骨料应符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》GB/T 14685和现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52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10mm。超高性能混凝土中粗骨料的体积掺量宜控制在0.5%~2.5%。

3.3 外加剂

3.3.1 减水剂应符合《混凝土外加剂》GB 8076和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119的规定。宜选用高性能减水剂，减水剂的减水率宜大于30%。

3.3.2 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，不得采用含硫铝酸钙组分的膨胀剂。

3.3.3 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。不得使用与水泥、矿物掺合料及其水化产物发生化学反应的减缩剂。

3.3.4 其它外加剂应符合国家现行有关标准的规定，与水泥和矿物掺合料有良好的适应性，并应通过试验验证，在满足设计要求后方可使用。

3.4 纤维

3.4.1 宜选用高强度微细钢纤维，其性能指标应符合表3.4.1的要求。

表 3.4.1 钢纤维性能指标

项目	技术要求
抗拉强度 (MPa)	≥2000
长度 (mm)	6~25
直径 (mm)	0.10~0.25

3.4.2 选用聚乙烯醇、聚丙烯腈等有机合成纤维或经试验验证的其他合成纤维，单掺或与钢纤维复掺用于超高性能混凝土中。

3.4.3 用于超高性能混凝土的纤维的产品性能应符合国家有关标准的规定。

3.5 混凝土用水

3.5.1 拌合用水和养护用水应满足现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63的规定。

3.5.2 大体积超高性能混凝土制备时可使用冰水混合物作为拌合用水。

3.5.3 超高性能混凝土冬期施工时，可考虑加热拌合用水，水温不宜超过60°。

3.5.4 未经淡化处理的海水不得作为拌合用水。

3.6 配合比设计

3.6.1 超高性能混凝土的配合比设计宜综合考虑结构形式特点、设计要求、施工工艺以及施工环境等因素。先根据设计要求的混凝土工作性能、力学性能、耐久性、体积稳定性及其他指标初步计算配合比。再对设计配合比进行试配、调整得到满足相关性能要求的基准配合比，后经坍落度、强度、收缩徐变等技术指标复核后确定。

3.6.2 当需要改善超高性能混凝土的体积稳定性，宜调整膨胀剂和粗骨料的掺量；当需要改善拌合物的工作性能，宜调整减水剂的掺量。

3.6.3 基于最大堆积密实度原理进行配合比设计，超高性能混凝土的配制强度参照《活性粉末混凝土》GB/T 31387要求。

3.6.4 不同强度等级的超高性能混凝土的水胶比、胶凝材料用量、钢纤维掺量和粗骨料体积掺量宜符合下表 3.6.4规定。若掺入合成纤维时，其掺量不宜大于1.5kg/m³，且不宜明显降低拌合物工作性能。

表 3.6.4 超高性能混凝土的水胶比及组分掺量要求

等级	水胶比	胶凝材料用量/(kg/m ³)	钢纤维（体积）掺量/%	粗骨料（体积）掺量/%
UC120	≤0.20	≤900	≥1.2	-
UC140	≤0.18	≤950	≥1.7	-
UC160	≤0.16	≤1000	≥2.0	-
UC180	≤0.14	≤1000	≥2.5	-

UC200	≤ 0.13	≤ 1000	≥ 2.8	-
UCA100	≤ 0.22	≤ 850	≥ 0.5	≤ 2.5
UCA120	≤ 0.20	≤ 900	≥ 1.0	≤ 2.0
UCA140	≤ 0.18	≤ 950	≥ 1.3	≤ 1.5
UCA160	≤ 0.16	≤ 1000	≥ 1.5	≤ 1.0

3.6.5 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%。

3.7 材料储存与计量

3.7.1 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。

3.7.2 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。

3.7.3 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。

3.7.4 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。

3.7.5 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 3.7.5规定的范围，并应每班检查 1 次。

表 3.7.5 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输运车中各盘混凝土的每种材料计量和的偏差。

4 性能与分级

4.1 工作性能

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

条文说明：UHPC拌合物的良好工作性能体现在其具有适宜的流动性、良好粘聚性和优异的保水性，能保证UHPC在自重或机械振捣的作用下，能产生流动，并均匀密实地填满模板，不发生分层和离析、钢纤维结团现象，不产生严重泌水现象。

4.1.2 UHPC拌合物工作性能应采用坍落扩展度（ SF ）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。USF1级拌合物性能，可由用户根据实际需要自行规定。

表 4.1.2 UHPC 拌合物工作性能及分级

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

4.2 力学性能

4.2.1 由于常规UHPC与含粗骨料的UHPC强度、韧性、应变硬化性能有所差异，将常规UHPC和粗骨料UHPC按两个强度体系进行划分和分级。

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

4.2.3 粗骨料UHPC的抗压强度等级应根据100mm立方体抗压强度划分，强度等级划分为UCA100、UCA120、UCA140、UCA160。

条文说明：（1）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100mm的立方体试件。为此，本规范建议UHPC的强度等级应根据100mm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100mm立方体试件，在28d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。

(2) 立方体抗压强度为 86.2MPa~151.1MPa、钢纤维掺量为 1.5%~3%的活性粉末混凝土立方体抗压强度尺寸效应试验结果表明：活性粉末混凝土立方体抗压强度的尺寸效应不明显。边长 150mm 立方体试块的抗压强度约为边长 100mm 立方体试件的 96%~99%，立方体抗压强度标准值的测定采用边长 100mm 的立方体试件作为标准试件。

4.2.4 UHPC 轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和 UHPC 轴心抗压强度设计值 f_{cd} 应按表 4.2.4 采用。

表 4.2.4 UHPC 轴心抗压强度取值 (MPa)

UHPC 强度等级					
强度取值	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
$f_{cu,k}$	120	140	160	180	200
f_{ck}	84	98	112	126	140
f_{cd}	58	68	77	87	97
UCA 强度等级					
强度取值	UCA100	UCA120	UCA140	UCA160	
$f_{cu,k}$	100	120	140	160	
f_{ck}	66	79	93	106	
f_{cd}	45	55	64	73	

条文说明：(1)轴心抗压强度标准值：根据《混凝土结构设计规范》GB 50010，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：

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k}$$

式中系数 α_{c1} 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。系数 α_{c2} 为脆性折减系数。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 $\alpha_{c1}=0.80$ 。同时，常规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。粗骨料UHPC中钢纤维掺量较低，偏于安全考虑对其脆性折减系数 $\alpha_{c2}=0.95$ 。

(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： $f_{cd}=0.88\times 0.80\times f_{cu,k}/1.45$ 。

4.2.5 UHPC轴心抗拉初裂强度标准值 $f_{t0,k}$ 宜由试验确定，当无试验数据时，近似按表 4.2.5采用。

表 4.2.5 UHPC轴心抗拉初裂强度标准值 (MPa)

UHPC强度等级					
强度取值	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
$f_{t0,k}$	6.0	7.0	8.0	8.5	9.0
UCA强度等级					
强度取值	UCA100	UCA120	UCA140	UCA160	
$f_{t0,k}$	5.0	5.5	6.0	7.0	

条文说明：（1）本规范规定UHPC轴心抗拉时基体的抗拉强度为其抗拉初裂强度、峰值强度为其轴心抗拉强度，取95%保证率的强度值作为标准值。

（2）由于实际工程中所采用钢纤维、基体材料品种和养护方法较多，难以标准化，且抗拉强度测试时的离散性较大，故这里规定活性粉末混凝土抗拉强度宜根据所工程所采用的材料由试验确定，对符合《活性粉末混凝土》GB/T 31387配合比设计要求的UHPC材料在无试验数据情况时，可近似按表 4.2.5 采用。

4.2.6 UHPC的轴心抗拉性能等级应根据附录 A 的狗骨头轴拉试验的轴心抗拉初裂强度 $f_{t0,k}$ 、极限抗拉强度 f_{tu} 划分，在钢纤维掺量0.5%~6%的情况下，常规UHPC强度等级划分为UCT6、UCT7、UCT8、UCT9；在钢纤维掺量0.5~3%的情况下，含粗骨料的UHPC强度等级划分为UCAT5、UCAT6、UCAT7、UCAT8，分级要求见表 4.2.6。

表 4.2.6 UHPC的轴心抗拉强度分级

参数	要求			
	UCT6	UCT7	UCT8	UCT9
$f_{t0,k}/\text{MPa}$	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9
$f_{t0.15}/\text{MPa}$	≥ 3.5	-	-	-
$f_{tu}/f_{t0,k}$	-	≥ 1.1	≥ 1.1	≥ 1.2
ϵ_{tu}	-	$\geq 1500\mu\epsilon$		$\geq 2000\mu\epsilon$
类型	应变软化	低应变硬化		高应变硬化
	UCAT5	UCAT6	UCAT7	UCAT8
$f_{t0,k}/\text{MPa}$	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8
$f_{t0.15}/\text{MPa}$	≥ 2.0	≥ 3.0	-	-
$f_{tu}/f_{t0,k}$	-	-	≥ 1.1	≥ 1.2
ϵ_{tu}			$\geq 1500\mu\epsilon$	$\geq 2000\mu\epsilon$
类型	应变软化		低应变硬化	高应变硬化

注： $f_{t0.15}$ 表示软化阶段变形达到0.15%时材料残余的拉伸强度。

条文说明：（1）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5~12MPa，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可有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。常规UHPC轴心抗拉强度等级划分为UCT6、UCT7、UCT8、UCT9四级，UCA轴心抗拉强度等级划分为UCAT5、UCAT6、UCAT7、UCAT8，大体可以覆盖UHPC和UCA对不同抗拉性能的应用需求。

（2）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，其分类依据 f_{tu}/f_{te} 的比值。

4.2.7 UHPC轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 宜由试验确定，当无试验数据时，可近似按下式计算。

$$f_{tk} = f_{t0,k} (1 + \alpha_f \lambda_f) \dots \dots \dots (4.2.7-1)$$

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \dots \dots \dots (4.2.7-2)$$

式中：

f_{ik} ——UHPC轴心抗拉强度标准值；

$f_{i0,k}$ ——UHPC轴心抗拉初裂强度标准值，即基体抗拉强度标准值，按条文4.2.5取值；

α_f ——钢纤维对抗拉强度的影响系数，可按表 4.2.7-1取值。

λ_f ——钢纤维含量特征参数；

ρ_f ——钢纤维体积掺量；

l_f ——钢纤维长度；

d_f ——钢纤维直径。

表 4.2.7- 1 钢纤维对抗拉强度的影响系数 α_f 取值

ρ_f	$0.5\% \leq \rho_f < 2.0\%$	$2.0\% \leq \rho_f < 3.0\%$	$\rho_f \geq 3.0\%$
α_f	0.11	0.13	0.15

典型参数下UHPC轴心抗拉强度标准值见附表 4.2.7-2和表 4.2.7-3。

表 4.2.7- 2 典型参数下UHPC轴心抗拉强度标准值（MPa，纤维长径比65）

钢纤维掺量 强度等级		1.5%	2.0%	2.5%	3.0%	4.0%
		UHPC	UC120	6.6	7.0	7.3
UC140	7.7		8.2	8.5	9.0	9.7
UC160	8.9		9.3	9.7	10.3	11.1
UC180	9.4		10.0	10.3	11.0	11.8
UC200	10.1		10.5	10.9	11.6	12.5

表 4.2.7- 3 典型参数下UCA轴心抗拉强度标准值（MPa，纤维长径比65）

钢纤维掺量 强度等级		0.5%	1.0%	1.5%	2.0%
		UCA	UCA100	5.2	5.4
UCA120	5.7		5.9	6.1	6.4
UCA140	6.2		6.4	6.7	7.0
UCA160	7.3		7.5	7.8	8.2

条文说明：（1）由于实际工程中所采用钢纤维的品种较多，难以标准化，

因此这里规定活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 宜由试验确定，当无试验数据时，可近似按式4.2.7-1计算。

(2) 根据UHPC现有抗拉试验数据经统计，121组活性粉末混凝土抗拉试件的立方体抗压强度分布区间为 98.7MPa~237.3MPa、轴心抗拉强度分布区间为 5.9MPa~16.9MPa、钢纤维掺量为1.5~6%。对钢纤维影响系数偏安全取值。

(3) 轴心抗拉强度设计值：考虑材料分项系数的抗拉强度设计值，记为 f_{td} ，用于构件设计。对于混凝土材料，材料分项系数取为 $\gamma=1.45$ ，因此轴心抗拉强度设计值为： $f_{td}=f_{tk}/1.45$ 。

4.2.8 UHPC轴心抗拉初裂强度设计值 $f_{t0,d}$ 应按表 4.2.8-1的规定采用；典型参数下UHPC轴心抗拉强度设计值 f_{td} 应按表 4.2.8-2和的规定采用。

表 4.2.8- 1 UHPC轴心抗拉初裂强度设计值 $f_{t0,d}$ (MPa)

UHPC强度等级					
强度取值	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
$f_{t0,d}$	4.1	4.8	5.5	5.9	6.2
UCA强度等级					
强度取值	UCA100	UCA120	UCA140	UCA160	
$f_{t0,d}$	3.4	3.8	4.1	4.8	

表 4.2.8- 2 典型参数下UHPC轴心抗拉强度设计值 (MPa, 纤维长径比65)

钢纤维掺量 强度等级		1.5%	2.0%	2.5%	3.0%	4.0%
		UHPC	UC120	4.6	4.8	5.0
UC140	5.3		5.7	5.9	6.2	6.7
UC160	6.1		6.4	6.7	7.1	7.7
UC180	6.5		6.9	7.1	7.6	8.1
UC200	7.0		7.2	7.5	8.0	8.6

表 4.2.8-3 典型参数下UCA轴心抗拉强度设计值 (MPa, 纤维长径比65)

钢纤维掺量		强度等级			
		0.5%	1.0%	1.5%	2.0%
UCA	UCA100	3.6	3.7	3.9	4.1
	UCA120	3.9	4.1	4.2	4.4
	UCA140	4.3	4.4	4.6	4.8
	UCA160	5.0	5.2	5.4	5.7

条文说明：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： $f_{t0,d}=f_{t0,k}/1.45$ 。

4.2.9 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 4.2.9采用。

表 4.2.9 UHPC弹性模量 ($\times 10^3$ MPa)

UHPC 强度等级					
强度取值	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
E_c	41.9	44.3	46.2	47.8	49.2
UCA 强度等级					
强度取值	UCA100	UCA120	UCA140	UCA160	
E_c	43.7	44.1	45.5	47.1	

4.2.10 UHPC 的剪切变形模量 G_c 可按本规范第4.2.9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 。

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 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

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。

表 4.2.13 UHPC 的收缩应变和徐变系数

养护条件	收缩应变 ($\mu\varepsilon$)	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 (温度10~40℃, 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。

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、除冰盐等其他氯化物环境、盐结晶环境、化学腐蚀环境。	氯离子扩散系数
磨蚀环境	耐磨性能

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。

表 4.3.2 UHPC抗渗性能分级

等级	UD100	UD20	UD02
$D_{Cl} (\times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s})$	$20 \leq D < 100$	$2 \leq D < 20$	$D < 2$

5 承载能力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.1 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。
- 3 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：

$$-f_{sd}' \leq \sigma_{si} \leq f_{sd}$$

$$-(f_{pd}' - \sigma_{p0i}) \leq \sigma_{pi} \leq f_{pd}$$

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，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010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，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010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，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010规定取值。

4 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：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。

5.2 受弯构件

5.2.1 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 5.2.1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 5.2.1 系数 β 值

UHPC 强度	UC120	UC140	UC160	UC180	UC200
β	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78

5.2.2 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_1 可按 $x_1 = h - x/\beta$ 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 5.2.1 取用。

3 受拉区等效矩形应力图的抗拉强度取 $m f_{td}$ 。对于应变硬化UHPC， m 取0.5，对于应变软化UHPC， m 取0.2。

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。我公司试验研究和工程经验表明，对于应变硬化UHPC构件，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。对于应变软化UHPC构件，考虑0.2倍的UHPC抗拉强度设计值较合适。

5.2.3 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 5.2.3 取值。

表 5.2.3 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。

5.2.4 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：

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

2 钢绞线和钢丝：

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

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5.2.1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，按本规范附录B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。

5.2.5 UHPC受弯构件正截面抗弯承载力验算应采用下式：

$$\gamma_0 M_d \leq \phi_t M_u$$

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_t ——接缝抗弯承载力折减系数，按本规范表 5.2.3规定取值；

M_u ——正截面抗弯承载力，按本规范第5.2.6~5.2.9条规定计算。

5.2.6 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：

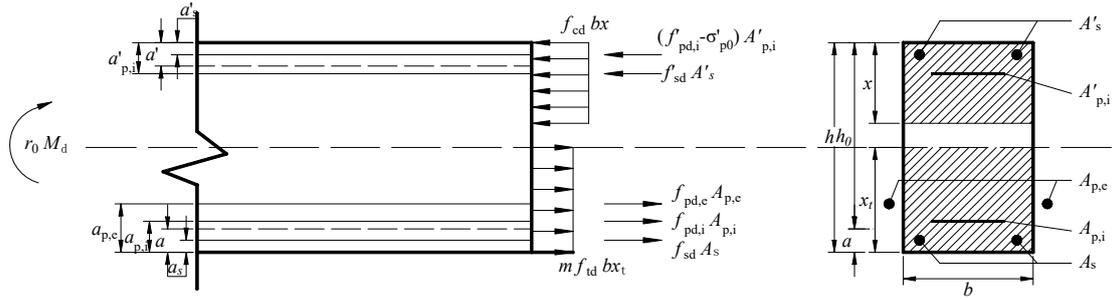


图 5.2.6 矩形截面 UHPC 受弯构件正截面承载力计算

$$M_u = f_{cd}bx(h_0 - x/2) + f_{sd}'A_s'(h_0 - a_s') + (f_{pd,i}' - \sigma_{p,i0}')A_{p,i}'(h_0 - a_{p,i}') - mf_{td}'bx_t(x_t/2 - a)$$

UHPC截面受压区高度 x 应按下式计算：

$$f_{sd}A_s + f_{pd,i}A_{p,i} + f_{pd,e}A_{p,e} + mf_{td}'bx_t = f_{cd}bx + f_{sd}'A_s' + (f_{pd,i}' - \sigma_{p,i0}')A_{p,i}'$$

截面受压区高度应符合下列要求：

$$x \leq \xi_b h_0$$

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：

$$x \geq 2a'$$

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：

$$x \geq 2a_s'$$

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，按现行标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010）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，按现行标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010）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，按现行标准《混凝土结构设计规范》GB 50010相关规定计算。

5.2.7 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

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

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：

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

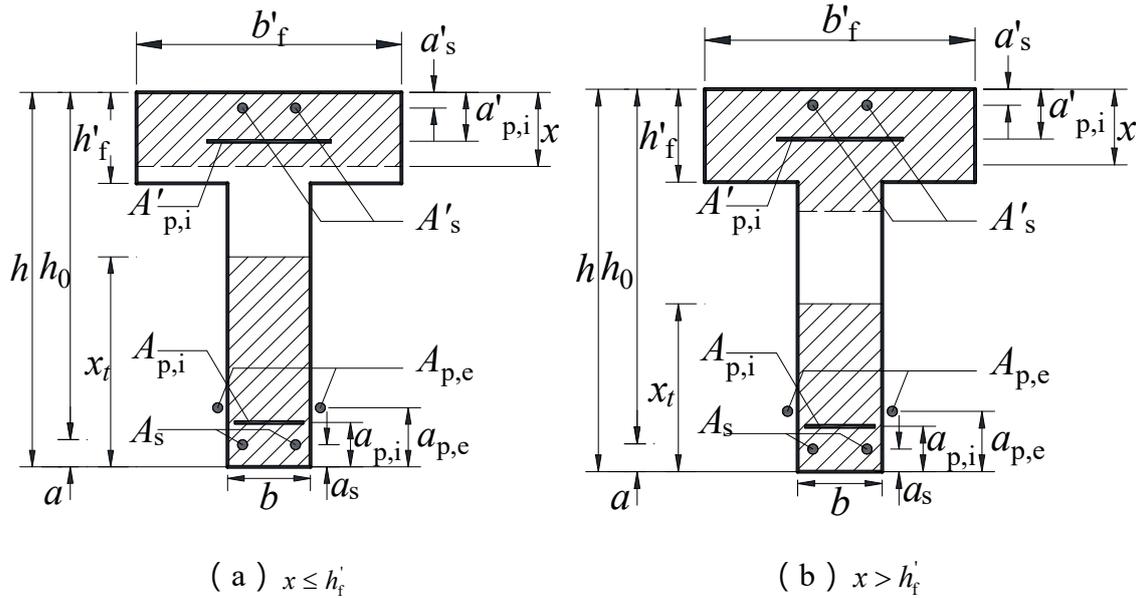


图 5.2.7 T形截面UHPC受弯构件正截面承载力计算

2 当不符合上式的条件时，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：

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

此时，受压区高度 x 应按下列公式计算：

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

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，可按现行标准《混凝土结构设计规范》

GB 50010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。

5.2.8 箱形截面受弯构件的正截面抗弯承载力可参照本规范第5.2.7条计算。

5.2.9 当计算中考虑受压区纵向钢筋但不符合本规范第5.2.6条受压区高度的条件时，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

$$M_u = f_{pd,i}A_{p,i}(h - a_{p,i} - a') + f_{pd,e}A_{p,e}(h - a_{p,e} - a') + f_{sd}A(h - a_s - a') + mf_{td}bx_t(h - x_t/2 - a')$$

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

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

式中符号的相关意义见本规范第5.2.6条。

5.3 受剪构件

5.3.1 UHPC受弯构件斜截面抗剪承载力验算应采用下式：

$$\gamma_0 V_d \leq \phi_v V_u$$

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 5.2.3规定取值；

V_u ——斜截面抗剪承载力，按本规范第5.3.2条规定计算。

5.3.2 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：

$$V_u = V_c + V_f + V_s + V_p$$

式中：

V_u ——构件斜截面抗剪承载力；

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

$$V_c = 0.14 k_N f_{ck}^{0.5} b h_0$$

2) 预应力UHPC截面， V_c 按下式计算

$$V_c = 0.16 k_N f_{ck}^{0.5} b z$$

3) 素UHPC截面, V_c 按下式计算

$$V_c = 0.12k_N f_{ck}^{0.5} b h$$

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 $h_0 = 7/8h$ (mm);

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

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 (mm²)。

2 纤维受剪承载力设计值 V_f

$$V_f = \frac{A_{fv} \sigma_f}{\tan \theta}$$

式中:

σ_f ——纤维增强截面的残余抗拉强度 (MPa), 应变软化型UHPC可取 $0.4 f_{tk}$,

低应变硬化型和高应变硬化型UHPC可取 $0.6 f_{tk}$;

A_{fv} ——纤维作用面积 (mm), 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

仅设置箍筋

$$V_s = \frac{A_{sv}}{s_v} z f_{sv} \cot \theta$$

设置箍筋与弯起钢筋

$$V_s = \frac{A_{sv}}{s_v} z f_{sv} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$$

式中:

A_{sv} ——抗剪箍筋截面面积 (mm²);

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）；

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

$$V_p = 0.75 f_{pd,i} \sum A_{p,i} \sin \theta_{p,i}$$

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）；

$\theta_{p,i}$ ——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

$$V_p = 0.75 \sum f_{pd,e} A_{p,e} \sin \theta_{p,e}$$

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）；

$\theta_{p,e}$ ——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。

5.3.3 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：

仅设置箍筋

$$\gamma_0 V_d \leq 1.3 b z f_{ck}^{2/3} \tan \theta$$

设置箍筋与弯起钢筋

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

式中：

b ——腹板厚度 (mm)；

z ——弯矩作用下构件的内力臂，取 $z = 0.9h_0$ (mm)；

f_{ck} ——抗压强度标准值 (MPa)。

5.4 受冲切构件

5.4.1 在集中反力作用下不配置抗冲切钢筋的UHPC板，其抗冲切承载力可按下列式计算：

$$\gamma_0 F_{ld} \leq [0.7\beta_h f_{td}(1 + \beta_f \lambda_f) + 0.15\sigma_{pc,m}] U_m h_0$$

$$\lambda_f = l_f V_f / d_f$$

式中：

F_{ld} ——最大集中反力设计值。当计算由墩柱支承的板的抗冲切承载力时，可取墩柱所承受的最大轴向力设计值减去柱顶冲切破坏锥体范围内的荷载设计值 (kN)；

$\sigma_{pc,m}$ ——设有预应力钢筋的板的截面上，由预加力引起的混凝土有效平均压应力 (MPa)；

β_h ——截面高度尺寸效应系数，当 $h \leq 300$ mm，取 $\beta_h = 1.0$ ；当 $h \geq 800$ mm 时，取 $\beta_h = 0.85$ ，其间按线性内插处理，此处， h 为板的高度；

U_m ——距集中反力作用面 $h_0/2$ 处破坏锥体截面面积的周长，当墩柱为圆形截面时，可将其换算为边长等于0.8倍直径的方形截面墩柱再取 U_m (mm)；

h_0 ——板的有效高度 (mm)；

f_{td} ——UHPC轴心抗拉强度设计值 (MPa)；

β_f ——钢纤维对UHPC抗冲切强度的影响系数，取 $\beta_f = 0.4$ ；

λ_f ——钢纤维含量特征值；

l_f ——钢纤维长度 (mm)；

d_f ——钢纤维直径 (mm)；

V_f ——钢纤维体积掺量。

条文说明：UHPC板的抗冲切承载能力计算采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362的计算模式，并在其基础上，对UHPC抗拉强度项考

考虑局部纤维取向系数进行折减，并引入了纤维增强项 $(1 + \beta_f \lambda_f)$ 。

5.4.2 在集中反力作用下，当抗冲切承载力不满足本规范5.4.1条的要求且板厚受到限制时，可配置抗冲切钢筋，此时，受冲切截面应符合下列条件：

$$\gamma_0 F_{ld} \leq 1.05 \beta_h f_{td} (1 + \beta_f \lambda_f) U_m h_0$$

UHPC板配置抗冲切钢筋时的抗冲切承载力，可按下列规定计算：

1 当配置箍筋时

$$\gamma_0 F_{ld} \leq [0.35 \beta_h f_{td} (1 + \beta_f \lambda_f) + 0.15 \sigma_{pc,m}] U_m h_0 + 0.75 f_{sv} A_{svu}$$

2 当配置弯起钢筋时

$$\gamma_0 F_{ld} \leq [0.35 \beta_h f_{td} (1 + \beta_f \lambda_f) + 0.15 \sigma_{pc,m}] U_m h_0 + 0.75 f_{sd} A_{sbu} \sin \alpha$$

A_{svu} ——与冲切破坏锥体斜截面相交的全部箍筋截面面积（ mm^2 ）；

A_{sbu} ——与冲切破坏锥体斜截面相交的全部弯起钢筋截面面积（ mm^2 ）；

f_{sv} ——箍筋抗拉强度设计值（MPa）；

f_{sd} ——弯起钢筋抗拉强度设计值（MPa）；

α ——弯起钢筋与板底面的夹角。

6 正常使用极限状态计算

6.1 裂缝宽度计算

6.1.1 抗裂验算原则：钢筋UHPC和预应力UHPC构件，应按下列规定进行受拉边缘应力或正截面抗裂验算：

1) 一级裂缝控制等级构件，在荷载标准组合下，受拉边缘不允许出现拉应力，并应符合下列规定：

$$\sigma_{st}-0.85\sigma_{pc}\leq 0$$

2) 二级裂缝控制等级构件，在荷载标准组合下，受拉边缘应力允许出现拉应力，且符合下列规定：

$$\sigma_{ck}-\sigma_{pc}\leq 0.7f_{tk}$$

3) 三级裂缝控制等级时，钢筋UHPC构件的最大裂缝宽度可按荷载准永久组合并考虑长期作用影响的效应计算；预应力UHPC构件在结构自重作用下控制截面受拉边缘不得消压，在荷载作用下，最大裂缝宽度可按荷载标准组合并考虑长期作用影响的效应计算，且裂缝宽度应满足下式的要求。

$$w_{max}\leq w_{lim}$$

式中：

$\sigma_{st}(\sigma_{ck})$ ——荷载标准组合（短期效应组合）下抗裂验算边缘的混凝土法向应力（MPa）；

σ_{pc} ——扣除预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力（MPa）；

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度（MPa）；

w_{max} ——按荷载标准组合（短期效应组合）并考虑长期影响的最大裂缝宽度计算值（mm）；

w_{lim} ——最大裂缝宽度限值（mm）。

条文说明：

1. 本规范中仍采用《混凝土结构设计规范》GB50010中裂缝控制等级的划分方式。由于《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362对应力水平控制更严，因此，本规范采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362中的抗裂验算条件。

2. 扣除预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力 σ_{pc} 参考《公路钢筋

混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362。

6.1.2 UHPC构件的最大裂缝宽度不宜超过表 6.1.2的限值。

表 6.1.2 UHPC构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值 (mm)

环境类别	UHPC 构件		预应力 UHPC 构件	
	裂缝控制等级	w_{lim}	裂缝控制等级	w_{lim}
一	三级	0.30 (0.40)	三级	0.20
二 a		0.20		二级
二 b			一级	
三				—
四				0.15
五		0.05	—	

注：1. 环境类别为：一：室内正常环境；二 a：室内潮湿环境，温暖或寒冷地区的一般大气环境，与无侵蚀性得水或土囊接触的环境；二 b：严寒和寒冷地区的露天环境，使用除冰盐环境，严寒和寒冷地区冬季水位变动的环境；三：滨海室外环境；四：海水环境；五：受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境。

2. 对处于年平均相对湿度小于60%地区一类环境下的受弯构件，其最大裂缝宽度限值可采用括号内的数值。

条文说明：

(1) 表 6.1.2中环境类别是综合《混凝土结构设计规范》GB50010和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计规范》JTG 3362 中定义的环境类别给出的。

(2) UHPC构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值综合考虑《混凝土结构设计规范》GB50010和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计规范》JTG 3362中的限值给出。

(3) 对于掺钢纤维的UHPC，由于UHPC基体具有良好的材料匀质性、高密实度以及孔隙率少等特征，使UHPC具有优异的耐久性，且UHPC中乱向纤细钢纤维会挠乱裂缝处钢筋电化锈蚀的通路，降低锈蚀程度。当钢筋产生“锈胀”时，由于钢纤维的约束，其危害会降低。因此，本规范规定最大裂缝宽度“不宜”而非“不应”超过表 6.1.2 的裂缝宽度限值。当有可靠依据并经专门论证，表 6.1.2 中的裂缝宽度限值可适当放宽。

6.1.3 计算假定

(1) 平截面假定，UHPC梁受弯变形后，截面上各点的混凝土和钢筋纵向

应变沿截面的高度方向呈直线变化。

(2) 考虑受拉区UHPC的抗拉强度对开裂的抑制作用，由于整个开裂过程是逐渐发展的，受拉区UHPC开裂前期应力可以达到 f_t ，待开裂一定程度后，受拉边缘纤维承载力会下降。此外，由于钢纤维分布的离散性，需要考虑纤维取向系数对于强度的折减。

(3) 受拉区UHPC简化为矩形分布，将受拉区UHPC的抗拉强度设为 kf_t ，其中 k 为抗拉强度折减系数，初裂发生时 k 可视为1，随着开裂的发展， k 会减小至一定范围。

(4) 受压区不考虑架立筋的抗压贡献，开裂后受压区UHPC处于弹性工作阶段，应力应变呈三角形分布，最大能发展到UHPC的极限压应变，取 $3000\mu\epsilon$ 。

6.1.4 裂缝宽度计算公式：在矩形、T形、倒T形和 π 形截面的钢筋混凝土受拉、受弯和偏心受压构件及预应力混凝土轴心受拉和受弯构件中，按荷载标准组合或准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度可按下列公式计算：

$$W_{\text{fmax}} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{ss}}}{E_s} l_{\text{cr}} \dots\dots\dots (6.1.4-1)$$

$$\psi = 1 - \frac{0.08 f_{\text{tk}}}{\rho_{\text{te}} \sigma_{\text{ss}}} \dots\dots\dots (6.1.4-2)$$

$$\rho_{\text{te}} = \frac{A_s}{A_{\text{te}}} \dots\dots\dots (6.1.4-3)$$

$$l_{\text{cr}} = 1.51c + 0.08 \frac{d_{\text{te}}}{\rho_{\text{te}}} \dots\dots\dots (6.1.4-4)$$

$$d_{\text{te}} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i d_i} \dots\dots\dots (6.1.4-5)$$

式中：

α_{cr} ——考虑构件受力特征的裂缝宽度扩大系数，对于配筋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（MPa）；

σ_{ss} ——钢筋应力（MPa）；

ρ_{te} ——纵向受力钢筋有效配筋率，当 $\rho_{te}>0.1$ 时，取 $\rho_{te}=0.1$ ，当 $\rho_{te}<0.01$ 时，取 $\rho_{te}=0.01$ ；

A_s ——纵向受力钢筋面积（ mm^2 ）；

A_{te} ——有效受拉UHPC截面面积（ mm^2 ），对于受弯构件取 $2a_s b$ ， a_s 为纵向钢筋合力点至受拉边缘距离， b 为截面宽度；

l_{cr} ——平均裂缝间距（ mm ）；

c ——最外侧纵向钢筋保护层厚度（ mm ）；

d_{te} ——纵向受拉钢筋等效直径， d_i 为每根受拉钢筋直径， n 为同种受拉钢筋数量（ mm ）。

上述计算公式中，仅有纵向受拉钢筋的应力 σ_{ss} 为未知量，求解 σ_{ss} 采用力与弯矩平衡公式。

基于平截面假定，截面的应力、应变、合力分布如图 6.1.1所示。

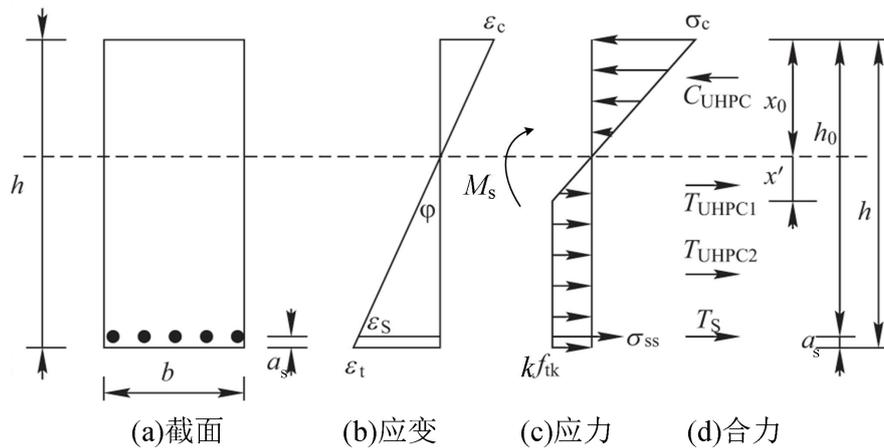


图 6.1.1 初裂后截面应力-应变分布

图中：

h_0 ——截面有效高度（ mm ）；

a_s ——纵向钢筋合力点至受拉边缘距离（ mm ）；

x_0 ——混凝土受压高度（ mm ）；

x' ——UHPC受拉未开裂区域高度（ mm ）；

$\varepsilon_s, \sigma_{ss}$ ——受拉钢筋应变、应力；

ε_c, σ_c ——受压区混凝土边缘应变、应力；

ε_t ——受拉边缘UHPC的应变；

f_t ——UHPC轴心抗拉强度标准值（ MPa ）；

k ——UHPC区域抗拉强度折减系数；

C_{UHPC} ——受压区UHPC压力合力（kN）；

T_{UHPC1} ——受拉区UHPC受拉弹性区拉力合力（kN）；

T_{UHPC2} ——受拉区UHPC受拉塑性区拉力合力（kN）；

T_s ——受拉区钢筋合力（kN）；

M_s ——截面弯矩（计算弯矩）（kN*m）；

h_0 ——截面有效高度（mm）。

上述计算公式中，仅有纵向受拉钢筋的应力 σ_{ss} 为未知量，求解 σ_{ss} 采用力与弯矩平衡公式，如下式，式中各参数见图 6.1.1。

$$\sum N=0, C_{UHPC} = T_{UHPC1} + T_{UHPC2} + T_s \dots\dots\dots (6.1.4-7)$$

$$\sum M=0, C_{UHPC} \cdot \frac{2}{3} x_0 + T_{UHPC1} \cdot \frac{2}{3} x' + T_{UHPC2} \left(\frac{h-x_0-x'}{2} + x' \right) + T_s (h_0 - x_0) = M_s \dots (6.1.4-8)$$

对于矩形UHPC梁：

$$C_{UHPC} = \frac{1}{2} \sigma_c x_0 b$$

$$T_{UHPC1} = \frac{1}{2} k f_t b x'$$

$$T_{UHPC2} = k f_t b (h - h_0 - x')$$

$$x' = \frac{k f_t x_0}{\sigma_c}$$

$$\sigma_{ss} = \frac{(h_0 - x_0) \varepsilon_c}{x_0} E_s = (h_0 - x_0) \frac{\sigma_c}{E_c x_0} E_s$$

将上式代入计算公式（6.1.4-7）、（6.1.4-8）中即可得到特定计算弯矩 M_s 对应的一个二元非线性方程组，方程组未知量 x_0 （混凝土受压高度）和 σ_c （受压区混凝土边缘应力），方程无解析解，通过迭代求解可得到数值解，即可求得钢筋应力。

（2）关于UHPC抗拉强度折减系数 k ，可按表 6.1.4-1推荐取值。

表 6.1.4- 1 UHPC抗拉强度折减系数 k 取值

参数	类别			
	UCT6	UCT7	UCT8	UCT9

f_{tk}/MPa	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9
k	0.75	0.80	0.82	0.85
	UCAT5	UCAT6	UCAT7	UCAT8
f_{tk}/MPa	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8
k	0.40	0.50	0.60	0.70

条文说明：

(1) UHPC的抗拉强度贡献可以一定程度减小裂缝宽度，采用JTG 3362和GB50010的计算方法计算UHPC梁受弯裂缝宽度偏于保守。

(2) 裂缝计算参考GB50010的计算方法，即基于开裂综合理论计算方法，对考虑构件受力特征的裂缝宽度扩大系数 α_{cr} 、裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数 ψ 、平均裂缝间距 l_{cr} 进行修正，修正后的计算公式与试验实测对比如表6.1.4-2所示。

表 6.1.4- 2 试验结果对比

试件	裂缝实测值	裂缝计算值	计算值/实测值
U-1	0.1	0.10	1.03
	0.14	0.13	0.96
	0.18	0.17	0.92
	0.21	0.18	0.87
	0.25	0.22	0.87
U-2	0.11	0.11	0.99
	0.13	0.13	0.97
	0.16	0.15	0.92
	0.17	0.17	0.99
	0.20	0.19	0.95
	0.22	0.21	0.96
U-3	0.11	0.13	1.22
	0.14	0.15	1.05
	0.15	0.16	1.07
	0.17	0.18	1.06
	0.19	0.20	1.03
	0.21	0.21	1.02

U-4	0.10	0.13	1.30
	0.12	0.14	1.20
	0.14	0.16	1.13
	0.16	0.17	1.11
	0.17	0.19	1.10
平均值	-	-	1.03
标准差	-	-	0.11
变异系数	-	-	0.11

(3) 关于受弯构件钢筋应力的计算方法，《混凝土结构设计规范》GB 50010中给出得计算方法：

$$\sigma_{ss} = \frac{M}{0.87h_0A_s}$$

其中钢筋的合力点至受压混凝土简化中心的距离取为 $0.87h_0$ ，此情况下，混凝土受压区高度约为 $0.3h_0$ ，普通混凝土的钢筋应力值偏大，对应的裂缝宽度计算结果偏于安全。已有研究表明：UHPC初裂阶段可分担一部分钢筋拉力，混凝土受压高度远大于 $0.3h_0$ ，若仍采用普通混凝土受弯构件开裂后钢筋应力计算方法计算UHPC受弯构件，计算结果比实际值偏大许多。

6.2 挠度计算

钢筋 UHPC 构件和预应力 UHPC 受弯构件的挠度验算除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。

7 施工

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于桥涵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UHPC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UHPC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： UHPC拌合物粘稠、无泌水，表面易出现塑性收缩裂缝；UHPC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 搅拌与运输

7.2.1 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 0.5min~2min，再加入减水剂和水湿拌 2min~5min，最后加入纤维搅拌 2min~4min（含纤维投入时间 1min~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。

7.2.2 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。

7.2.3 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。

7.2.4 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程》JGJ/T 10的规定。

7.3 模板、支架施工

7.3.1 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。

7.3.2 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。

7.3.3 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。

7.3.4 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。

7.3.5 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。

7.4 浇筑

7.4.1 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 宜采用平板振捣或模外振捣器振捣成型。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。

7.4.2 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。

2 施工前应将浇筑 UHPC 的范围内的梁板表层 UHPC 凿去 2~5mm，直至钢纤维裸露表面，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。

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。

7.5 养护

7.5.1 UHPC 养护方式可以采取蒸汽养护和自然养护。

7.5.2 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。

7.5.3 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。

7.5.4 当日平均温度在10℃以上，日最低温度在5℃以上，应按如下步骤进行一般保湿养护：

1 UHPC振捣抹平完成后应将塑料薄膜覆盖在表面；

2 浇筑完成后至24h内，应覆盖上塑料薄膜养护，且不定期往塑料薄膜上喷水（以喷水雾的方式喷洒）。24h后应往UHPC表面喷水（以喷水雾的方式喷洒），再覆盖上塑料薄膜；

3 UHPC应带模养护7d,如受施工工期等原因影响需缩短带模养护时间时，UHPC最短养护时间应不短于3d；

4 拆除模板后UHPC应继续进行养护，总养护时间宜控制在28d,如受其它原因影响需缩短养护时间时，养护时间不短于14d；

5 UHPC养护期间，塑料薄膜应完好无损，彼此搭接完整，搭接位置应用质量较轻的木块或其它物品覆盖，搭接宽度应大于20cm,内表面应具有凝结水珠。

7.5.5 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℃以上时，养护时间不应少于 48h。养护温度恒定在 80℃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℃/h；养护结束后，以不超过 15℃/h 的降温速度将温度逐渐降至现场气温。

7.6 特殊气候条件下施工

7.6.1 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℃，或拌合物浇筑温度高于 35℃。
- 4 施工现场环境温度低于 0℃。

7.6.2 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，应避免大风、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。

7.6.3 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。

7.6.4 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。

7.6.5 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℃。

8 检验与验收

8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于桥涵 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 表 8.2.2-1~表 8.2.2-3的规定。

表 8.2.2- 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 8.2.2- 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 $\leq 20\text{m}$ 时，每个构件检查 2 个断面；长度 $> 20\text{m}$ 时， 每个构件 检查 3 个断面
		同排	梁、板	
2	箍筋、横向水平钢筋、螺旋筋间 (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 8.2.2- 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	

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 8.2.4-1 和表 8.2.4-2 的规定。

表 8.2.4- 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	≤L/5000 及 5	尺量：每加工批测 2 束
		6m≤L≤20m	≤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±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		≤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 8.2.4- 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±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

8.2.5 预应力管道压浆和封锚实测项目应满足表 8.2.5-1 的规定。

表 8.2.5-1 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 8.3.6-1~表 8.3.6-3 的规定。

表 8.3.6-1 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/T28: 每 200t 检验一次	
2	力学性能	抗压强度	在合格标准内	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	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		
掺量或重量(%)	±5	《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T283: 每200t 检验一次			

表 8.3.6-2 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	每 50m ³ 检验一次
2	抗弯强度	在合格标准内	每 50m ³ 检验一次
3	轴心抗拉强度	在合格标准内	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	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: 50m ³ 检验一次

表 8.3.6- 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) 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轴心受拉试验方法

A.1 试件设计

采用狗骨头轴拉试件进行轴心受拉试验，平行段长度为200mm，在后续的试验中取中间150mm长度作为标段，试件纯拉段截面尺寸为50mm×100mm。

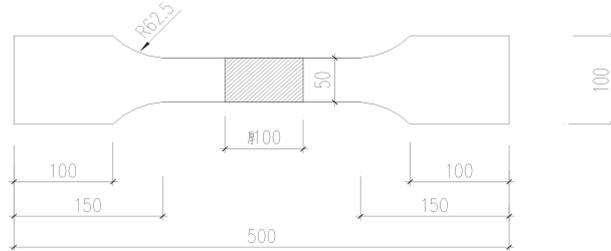


图 A.1 狗骨头试件尺寸示意图

A.2 试验装置

整个试验装置包括：多功能试验机及其配套力传感器、狗骨头试件夹具、位移计支架。狗骨头试件夹具设计成铰接形式，拉杆和夹具配合处可微小转动。试件变截面处贴有碳纤维布，增强局部受力能力。每个试件在纯拉段中间设置标距150mm的标段，在标段正中心沿拉伸方向布置混凝土应变片（四个表面）。在标段两端架设位移计支架，并在试件四个侧面各安装一个高精度位移传感器。混凝土应变片用于测量UHPC初裂前的应变，位移传感器测量混凝土开裂后标段变形伸长量。

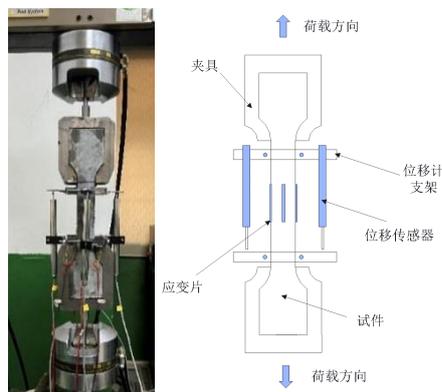


图 A.2 狗骨头试件轴拉试验示意图

A.3 加载制度

在正式试验前，对轴拉试件进行预加载，按预计最大荷载的20%进行加载（10kN），检验试验装置和采集设备是否正常工作，并检查试件偏心率，保证偏心率不超过15%。

正式试验时，为保证试件、试验工装、试验机各部件之间连接紧密，对试验机设置预拉力1kN，再开始匀速率拉伸。整个试验拉伸过程均按位移控制，位移拉伸速率为0.05mm/min。

A.4 有效拉伸试件判定

裂纹落在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。

A.5 结果整理

A.5.1 弹性极限拉伸强度 f_{te}

在应变片记录的应力-应变曲线中，取由线性转为非线性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。

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。

A.5.2 抗拉弹性模量 E 和弹性极限拉应变 ϵ_{te}

由各应变片记录的应力-应变曲线，按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，取中间值作为该被测试件的抗拉弹性模量。由各应变片记录的应力-应变曲线，按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，取中间值作为该被测试件的抗拉弹性模量。

由A.5.1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。

A.5.3 抗拉强度 f_t 与峰值拉应变 ϵ_{tu}

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GB/T 50081中轴向拉伸试验方法的规定，由应力-应变关系曲线或荷载-位移曲线确定并计算试件的抗拉强度和峰值拉应变。

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。

取有效拉伸试件的抗拉强度、峰值拉应变的平均值作为该组混凝土的抗拉强度和峰值拉应变。

附录B UHPC受压受拉本构关系

B.1 受压本构

B.1.1 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，受压应力-应变关系按双折线考虑。

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

$$\varepsilon_0 = f_{cd} / E_c$$

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

B.2 受拉本构

B.2.1 应变硬化类型

对于轴心受拉试验得到的应变硬化类型曲线形状如图 B.2.1 所示。

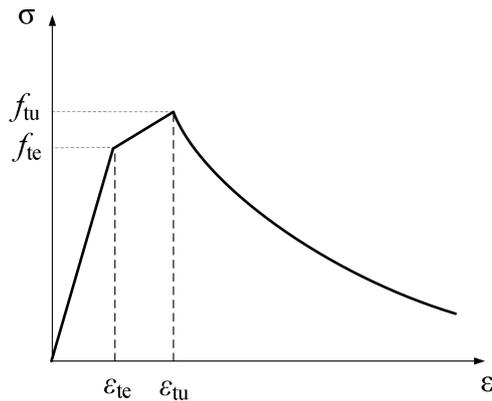


图 B.2.1 应变硬化型本构曲线

1) 弹性段 ($\varepsilon < \varepsilon_{te}$) 采用直线模拟:

$$\sigma = \frac{f_{te}}{\varepsilon_{te}} \varepsilon$$

2) 应变强化段 ($\varepsilon_{te} < \varepsilon < \varepsilon_{tu}$) 采用直线模拟:

$$\sigma = f_{te} + \frac{f_{tu} f_{te}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{te}} (\varepsilon - \varepsilon_{te})$$

3) 应变软化阶段 ($\varepsilon > \varepsilon_{tu}$), 采用分式函数拟合应力-应变关系。

$$\sigma = \frac{f_{tu}}{\alpha \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{tu}} - 1 \right)^\beta + 1}, \text{ 其中 } \alpha、\beta \text{ 为拟合参数, 由试验得到。}$$

当 α 、 β 无试验参考时，可按表 B.2.1取值。

表 B.2.1 α 、 β 拟合参数取值

参数	取值			
	UCT6	UCT7	UCT8	UCT9
α				
β				
f_{tu}/f_{te}	-	≥ 1.1	≥ 1.1	≥ 1.2
类型	应变软化	低应变硬化		高应变硬化
	UCAT5	UCAT6	UCAT7	UCAT8
α				
β				
f_{tu}/f_{te}	-	-	≥ 1.1	≥ 1.2
类型	应变软化		低应变硬化	高应变硬化

B.2.2 应变软化类型

对于轴心受拉试验得到的应变软化类型曲线形状如图 B.2.2 所示。

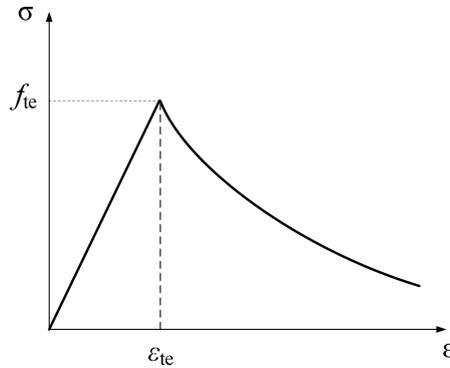


图 B.2.2 应变硬化型本构曲线

- 1) 弹性段 ($\varepsilon < \varepsilon_{te}$) 采用直线模拟:

$$\sigma = \frac{f_{te}}{\varepsilon_{te}} \varepsilon$$

- 2) 应变软化阶段 ($\varepsilon > \varepsilon_{te}$)，采用分式函数拟合应力-应变关系:

$$\sigma = \frac{f_{te}}{\alpha \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{te}} - 1 \right)^\beta + 1}$$

其中 α 、 β 为拟合参数，由试验得到。当 α 、 β 无试验参考时，可按表取值。

附录C UHPC收缩应变和徐变系数计算

C.1 收缩应变

C.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。

C.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：

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

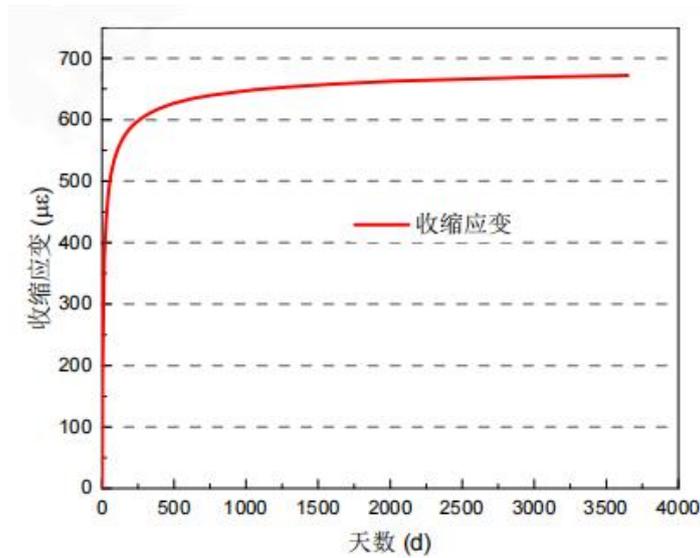
式中： $\varepsilon_{cs}(t)$ ——计算考虑的龄期为 t 时的收缩应变；

$\varepsilon_{cs,0}$ ——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C.1.2所示。



图C.1.2 收缩应变时间历程曲线

C.2 徐变系数

C.2.1 当压力小于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：

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

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 C.2.1 取值；

t ——计算考虑时刻的 UHPC 龄期(d)；

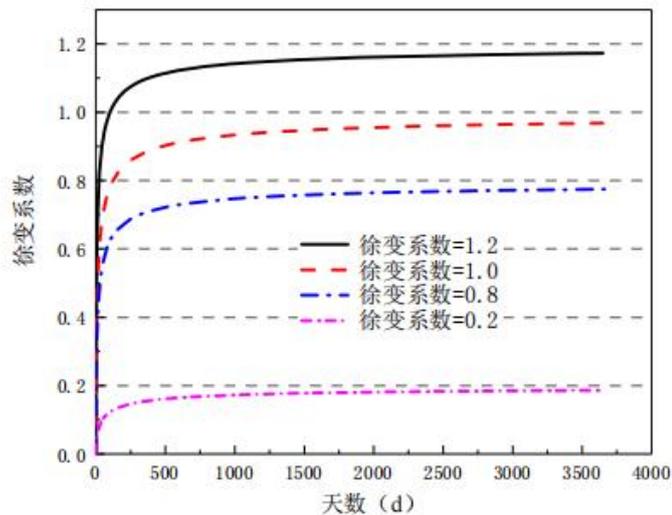
t_0 ——加载时 UHPC 龄期(d)；

a, b ——拟合系数，可按表 C.2.1 取值

表C. 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C.2.1所示。



图C. 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D UHPC纤维取向系数的确定及取值

D.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。

D.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。

D.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： $1.0 \leq K_{global} \leq 2.0$ ）。

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： $1.0 \leq K_{local} \leq 2.5$ ）。

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

D.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 $h \leq 50$ mm 时， $K_{global} = 1.0$ 。

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

$K_{global} = 1.25$ 。

D.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D.0.4、D.0.5进行取值。

本标准用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1) 表示很严格,非这样做不可的: 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: 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,在条件允许时首先这样做的: 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,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名称

- 1 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》 GB/T 1596
- 2 《混凝土外加剂》 GB 8076
- 3 《水泥包装袋》 GB 9774
- 4 《集装袋》 GB/T 10454
- 5 《建设用砂》 GB/T 14684
- 6 《建设用卵石、碎石》 GB/T 14685
- 7 《混凝土膨胀剂》 GB/T 23439
- 8 《砂浆和混凝土用硅灰》 GB/T 27690
- 9 《活性粉末混凝土》 GB/T 31387
- 10 《混凝土外加剂应用技术规范》 GB 50119
- 11 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》 GB/T 50080
- 12 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 13 《混凝土质量控制标准》 GB 50164
- 14 《组合钢模板技术规范》 GB 50214
- 15 《矿物掺合料应用技术规范》 GB/T 51003
- 16 《混凝土泵送施工技术规程》 JGJ/T 10
- 17 《纤维混凝土应用技术规程》 JGJ/T 28
- 18 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》 JGJ 52
- 19 《混凝土用水标准》 JGJ 63
- 20 《纤维混凝土应用技术规程》 JGJ/T 221
- 21 《人工砂混凝土应用技术规程》 JGJ/T 241
- 22 《纤维混凝土应用技术规程》 JGJ/T 283
- 23 《砂浆、混凝土用减缩剂》 JC/T 2361
- 24 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG 3362
- 25 《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T 3650
- 26 《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》 JTG F80/1