

上海市工程建设规范

桥梁工程高性能混凝土应用技术标准

Technical standard for application of ultra-high performance
concrete in bridges

DG/TJ 08—2401—2022
J 16324—2022

主编单位:上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司
上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司
上海市市政规划设计研究院有限公司
批准部门:上海市住房和城乡建设管理委员会
施行日期:2022年7月1日

同济大学出版社

2023 上海

上海市住房和城乡建设管理委员会文件

沪建标定〔2022〕103号

上海市住房和城乡建设管理委员会 关于批准《桥梁工程超高性能混凝土应用 技术标准》为上海市工程建设规范的通知

各有关单位：

由上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司、上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司、上海市市政规划设计研究院有限公司主编的《桥梁工程超高性能混凝土应用技术标准》，经我委审核，现批准为上海市工程建设规范，统一编号为DG/TJ 08—2401—2022，自2022年7月1日起实施。

本标准由上海市住房和城乡建设管理委员会负责管理，上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司负责解释。

上海市住房和城乡建设管理委员会

2022年2月15日

前 言

根据上海市住房和城乡建设管理委员会《关于印发〈2020 年上海市工程建设规范、建筑标准设计编制计划〉的通知》(沪建标定〔2019〕752 号)要求,标准编制组在充分总结以往经验,结合新的发展形势和要求,参考有关国家、行业及本市相关标准规范和文献资料,并在广泛征求意见的基础上,编制了本标准。

本标准的主要内容有:总则;术语和符号;超高性能混凝土材料;超高性能混凝土结构设计基本规定;超高性能混凝土构件设计;超高性能混凝土-钢组合桥面板构件设计;预制结构中超高性能混凝土连接设计;维修加固;施工及质量检验;附录 A;附录 B。

各有关单位及相关人员在执行本标准过程中,若发现问题或有意见和建议,请反馈至上海市交通委员会(地址:上海市世博村路 300 号 1 号楼;邮编:200125;E-mail:shjtbiaozhun@126.com),上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司(地址:上海市中山北二路 901 号;邮编:200092;E-mail:wangruilong@smedi.com),上海市建筑建材业市场管理总站(地址:上海市小木桥路 683 号;邮编:200032;E-mail:shgcbz@163.com),以便今后修订时参考。

主 编 单 位:上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司

上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司

上海市市政规划设计研究院有限公司

参 编 单 位:同济大学

主要起草人:马 翩 周 良 黄少文 王瑞龙 王俊颜

石雪飞 李雪峰 王 巍 肖汝诚 李建中

王 强 赵晓梅 黄 虹 段昕智 闫兴非

王 浩 苏 健 胡方健 何昌轩 卫 璞
杜林清
主要审查人:钱寅泉 刘 刚 李国平 陈世鸣 苏庆田
邓青儿 郑七振

上海市建筑建材业市场管理总站

上海市住房和城乡建设管理委员会信息公
示
浏览专用

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术 语	2
2.2	符 号	3
3	超高性能混凝土材料	8
3.1	材料组成	8
3.2	材料性能	9
4	超高性能混凝土结构设计基本规定	15
5	超高性能混凝土构件设计	18
5.1	一般规定	18
5.2	持久状况承载力极限状态计算	20
5.3	持久状况正常使用极限状态计算	36
5.4	持久状况和短暂状况构件应力计算	38
5.5	构造要求	39
6	超高性能混凝土-钢组合桥面板构件设计	41
6.1	一般规定	41
6.2	结构计算	42
6.3	构造要求	46
7	预制结构中超高性能混凝土连接设计	48
7.1	一般规定	48
7.2	上部结构连接	48
7.3	下部结构连接	49
8	维修加固	52
8.1	一般规定	52

8.2 受弯构件加固	53
8.3 受压构件加固	58
8.4 构造要求	67
9 施工及质量检验	69
9.1 一般规定	69
9.2 施工准备	69
9.3 模板和支架	70
9.4 搅 拌	70
9.5 运 输	71
9.6 浇 筑	71
9.7 养 护	71
9.8 高温期和冬期施工	72
9.9 质量检验	72
附录 A 拉伸试验	75
附录 B 超高性能混凝土拌合物中钢纤维分布均匀性的 检验方法	79
本标准用词说明	82
引用标准名录	83
条文说明	85

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	UHPC materials	8
3.1	Material composition	8
3.2	Material performance	9
4	Basic requirement for UHPC structure design	15
5	Design for UHPC component)	18
5.1	General requirement	18
5.2	Calculation of ultimate limit states in persistent situation	20
5.3	Calculation of serviceability limit states in persistent situation	36
5.4	Stress calculation in persistent and transient situation	38
5.5	Detailing requirement	39
6	Design for UHPC and steel composite bridge panel component	41
6.1	General requirement	41
6.2	Structural calculation	42
6.3	Detailing requirement	46
7	Design for UHPC connection in precast component	48
7.1	General requirement	48

7.2	Design for superstructure connection	48
7.3	Design for substructure connection	49
8	Maintenance and reinforcement	52
8.1	General requirement	52
8.2	Reinforcement for flexural component	53
8.3	Reinforcement for compressive component	58
8.4	Detailing requirement	67
9	Construction and quality inspection	69
9.1	General requirement	69
9.2	Construction preparation	69
9.3	Formwork and supports	70
9.4	Mixing	70
9.5	Transportation	71
9.6	Pouring	71
9.7	Curing	71
9.8	High temperature period and winter construction	72
9.9	Quality inspection	72
Appendix A	Tensile test	75
Appendix B	Test method for uniform distribution of steel fibers in UHPC mixtures	79
	Explanation of wording in this standard	82
	List of quoted standards	83
	Explanation of provisions	85

1 总 则

- 1.0.1 为指导桥梁工程 UHPC 结构的设计、施工、质量检验,做到安全可靠、适用耐久、技术先进、经济合理,制定本标准。
- 1.0.2 本标准适用于桥梁工程 UHPC 结构的设计、施工及质量检验。
- 1.0.3 桥梁工程 UHPC 结构的设计、施工及质量检验,除应符合本标准的规定外,尚应符合国家、行业和本市现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 桥梁工程用超高性能混凝土 ultra-high performance concrete for bridges (简称超高性能混凝土或 UHPC)

应用于桥梁工程中,由水泥、矿物掺合料、骨料、纤维、外加剂和水等原材料制成的具有高强、高韧、高耐久性的纤维增强水泥基复合材料。

2.1.2 UHPC 预混料 UHPC premix

由水泥、矿物掺合料、骨料按 UHPC 配合比配制的干混料,可包含粉状外加剂、纤维。

2.1.3 弹性抗拉强度 elastic tensile strength

应变硬化型和应变软化型 UHPC 的单轴拉伸试件由线弹性转变为非线性时的转折点所对应的拉伸应力。

2.1.4 抗拉强度 tensile strength

应变硬化型 UHPC 的单轴拉伸试件应力应变曲线上的拉应力峰值。

2.1.5 极限拉应变 ultimate tensile strain

应变硬化型 UHPC 的单轴拉伸试件应力应变曲线上的拉应力峰值对应的应变。

2.1.6 应变硬化 strain hardening

当拉应力超过弹性抗拉强度后,拉应力随应变增大而不立即下降的现象。

2.1.7 应变软化 strain softening

当拉应力超过弹性抗拉强度后,拉应力随应变增大而持续下

降的现象。

2.1.8 触变性 thixotropy

水泥基材料拌合物在剪力作用下的表观黏度减小,而当剪力撤除后,黏度又恢复的性质。

2.2 符号

2.2.1 材料性能相关符号

E_c ——普通混凝土的弹性模量;

E_s, E_p ——普通钢筋、预应力钢筋弹性模量;

E_{Uc} ——UHPC 的弹性模量;

G_u ——UHPC 的剪切变形模量;

UC120——立方体抗压强度标准值为 120 MPa 的 UHPC 抗压强度等级;

UT0——抗拉性能满足 0 级要求的 UHPC 抗拉性能等级;

f_{cd} ——普通混凝土的轴心抗压强度设计值;

f_d ——钢材的抗拉强度设计值;

f_{pk}, f_{pd} ——预应力钢筋的抗拉强度标准值、设计值;

f_{sk}, f_{so} ——普通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_{Ucd} ——UHPC 轴心抗压强度设计值;

f_{Uck} ——UHPC 轴心抗压强度标准值;

f'_{Uck} ——施工阶段的立方体 UHPC 轴心抗压强度标准值;

f_{Ucuk} ——UHPC 立方体抗压强度标准值;

f_{Ute} ——UHPC 弹性抗拉强度;

f_{Uted} ——UHPC 弹性抗拉强度设计值;

f_{Utek} ——UHPC 弹性抗拉强度标准值;

f_{Utu} —— UHPC 抗拉强度；
 f_{Utd} —— UHPC 抗拉强度设计值；
 f_{Utk} —— UHPC 抗拉强度标准值；
 f'_{Utk} —— 施工阶段的 UHPC 轴心抗拉强度标准值；
 f_{vd} —— 钢材的抗剪强度设计值；
 h_u —— UHPC 构件(层)的厚度；
 l_u —— UHPC 构件(层)的裂缝计算长度；
 t —— 龄期；
 t_0 —— 加载龄期；
 ϵ_{Ucc} —— UHPC 的徐变应变；
 ϵ_{Ucu} —— 非均匀受压时的 UHPC 极限应变；
 ϵ_{Uel} —— UHPC 的弹性应变；
 ϵ_{Us} —— UHPC 的总收缩值；
 $\epsilon_{\text{Us}\infty}$ —— UHPC 的最终收缩应变值；
 ϵ_{Utu} —— UHPC 的极限拉应变；
 μ —— UHPC 的泊松比；
 $\sigma_{\text{U,D}}$ —— UHPC 名义疲劳弯拉应力允许值；
 $\varphi_{\text{U},\infty}(t_\infty, t_0)$ —— UHPC 的最终徐变系数；
 w_w —— UHPC 裂缝宽度。

2.2.2 作用和作用效应有关符号

F_{cc} —— 受压区 RC 桥面板的压应力合力；
 F_{Uc} —— 受压区 UHPC 的压应力合力；
 F_{Ut} —— 受拉区 UHPC 的拉应力合力；
 M_d —— 弯矩设计值；
 N_d —— 轴向力组合设计值；
 R —— 构件承载能力设计值；
 S_{ud} —— 作用效应的组合设计值；
 V_d —— 剪力组合设计值；
 V_{Rd} —— 抗剪承载力设计值；

- $V_{Rd,c}$ ——普通混凝土的抗剪承载力设计值；
 $V_{Rd,U}$ ——UHPC基体的抗剪承载力；
 $V_{Rd,s}$ ——箍筋提供的抗剪承载力；
 $V_{Rd,p}$ ——预应力钢筋提供的抗剪承载力；
 V_{vd} ——组合梁截面竖向剪力设计值；
 V_{vu} ——组合梁截面竖向抗剪承载力；
 $\sigma_{p0}, \sigma'_{p0}$ ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋合力点处
UHPC法向应力等于0时预应力筋应力；
 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UHPC预压应力；
 σ_s, σ_p ——纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力；
 σ_{st} ——在作用频遇组合下构件抗裂验算边缘UHPC
的法向拉应力；
 σ_{tp} ——在作用频遇组合和预加力产生的UHPC主拉
应力；
 $\sigma_{t,max}^f$ ——疲劳验算时UHPC截面受拉区边缘纤维的最
大拉应力；
 σ_{Uc} ——截面达到抗弯承载力极限时，构件截面受压边
缘UHPC的应力；
 ϵ_t ——受拉区预应力钢筋屈服时，受拉区纵向预应力
钢筋合力点处UHPC的应变；
 ϵ'_s, ϵ'_p ——截面达到抗弯承载力极限时，构件受压区纵
向普通钢筋、纵向预应力钢筋合力点处UHPC的
应变；
 ϵ_{Uc} ——截面达到抗弯承载力极限时，构件截面受压边
缘UHPC的应变；
 ϵ_{Ut} ——受拉区预应力钢筋屈服时，构件截面受拉边缘
UHPC的应变。

2.2.3 几何参数有关符号

- A_U ——UHPC 构件的截面净面积；
 A_{Ut} ——UHPC 构件有效受拉区面积；
 A_p, A'_p ——构件受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面
 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_{sv} ——箍筋面积；
 A_w ——钢梁腹板的截面面积；
 W_{eff} ——截面抗弯模量；
 S_v ——箍筋的间距；
 a_c ——截面受压区 UHPC 压应力合力重心距离受压
 边缘的距离；
 a, a' ——构件受拉区、受压区普通钢筋和预应力筋合力
 点至截面近边的距离；
 a_s, a_p ——构件受拉区普通钢筋合力点、预应力筋合力点
 至受拉区边缘的距离；
 a'_s, a'_p ——构件受压区普通钢筋合力点、预应力筋合力
 点至受压区边缘的距离；
 a_e ——UHPC 构件有效受拉区合力重心距受拉边缘的
 距离；
 b ——矩形截面宽度, T 形或 I 形截面腹板宽度；
 b_f, b'_f ——T 形或 I 形截面受拉区、受压区的翼缘宽度；
 b'_{frc} ——RC 桥面板宽度；
 e_0 ——轴向力对截面重心轴的偏心距；
 h'_{frc} ——RC 桥面板高度；
 h ——截面高度；
 h_f, h'_f ——T 形或 I 形截面受拉区、受压区的翼缘厚度；
 h_0 ——截面有效高度, 纵向受拉钢筋合力点至截面受
 压边缘的距离；

h_{0i} ——受压区边缘至受拉区第 i 层钢筋截面重心的距离；

h'_0 ——纵向受压钢筋合力点至截面受拉边缘的距离；

x ——截面受压区高度；

x_c ——UHPC 构件截面受压区高度；

x_t ——UHPC 构件拉应变小于 $2.0\epsilon_{Utu}$ 的受拉区高度；

z ——外力杠杆臂；

ξ_b ——相对界限受压区高度；

x_b ——界限受压区高度。

2.2.4 计算参数及其他有关符号

γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；

η ——偏心受压构件轴向力偏心距增大系数；

η_θ ——挠度长期增长系数；

η_{hu} ——纤维分布方向上构件厚度的影响系数；

ξ_1 ——荷载偏心率对截面曲率的影响系数；

ξ_2 ——构件长细比对截面曲率的影响系数；

φ ——轴心受压构件稳定系数。

3 超高性能混凝土材料

3.1 材料组成

3.1.1 UHPC 用水泥宜采用比表面积为 $330 \text{ m}^2/\text{kg} \sim 390 \text{ m}^2/\text{kg}$ 的 42.5 级及以上硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥。硅酸盐水泥、普通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 UHPC 用矿物掺合料应满足下列要求：

1 矿物掺合料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。

2 当采用其他矿物掺合料时,矿物掺合料性能应符合国家现行标准的规定,且应通过试验验证。

3.1.3 UHPC 用细骨料宜满足现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 和现行行业标准《高性能混凝土用骨料》JG/T 568 的规定,且氯离子含量应符合现行上海市工程建设规范《预拌混凝土生产技术标准》DG/TJ 08—227 的规定。使用粗骨料时,其最大粒径不应大于 10 mm,且应通过试验验证。

3.1.4 UHPC 用外加剂应满足下列要求：

1 减水剂应符合现行国家标准《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,宜选用减水率不小于 30% 的高性能减水剂。

2 其他外加剂应符合国家现行标准的规定,且应通过试验验证。

3.1.5 UHPC 用钢纤维宜采用长度为 $6 \text{ mm} \sim 25 \text{ mm}$ 、直径为 $0.10 \text{ mm} \sim 0.25 \text{ mm}$ 、长径比为 $50 \sim 120$,且抗拉强度不低于

2 000 MPa 的微细钢纤维,钢纤维体积掺量宜为 1.0%~4.0%。

3.1.6 UHPC 用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。

3.1.7 UHPC 的配合比应通过试验验证,且满足设计性能要求后方可使用。

3.2 材料性能

3.2.1 UHPC 抗压强度等级应按边长为 100 mm 立方体试件的抗压强度标准值确定,UHPC 立方体抗压强度标准值 f_{Uck} 不应小于 120 MPa,并应按表 3.2.1 采用。

表 3.2.1 UHPC 立方体抗压强度标准值

强度等级	UC 120	UC 140	UC 160	UC 180	UC 200
f_{Uck} (MPa)	120	140	160	180	200

注:采用粗骨料时应乘以 0.95 折减系数。

3.2.2 UHPC 轴心抗压强度标准值 f_{Uck} 应按表 3.2.2 取值。

表 3.2.2 UHPC 轴心抗压强度标准值

强度等级	UC 120	UC 140	UC 160	UC 180	UC 200
f_{Uck} (MPa)	84	98	112	126	140

3.2.3 UHPC 轴心抗压强度设计值 f_{Ucd} 应按表 3.2.3 取值。

表 3.2.3 UHPC 轴心抗压强度设计值

强度等级	UC 120	UC 140	UC 160	UC 180	UC 200
f_{Ucd} (MPa)	58	68	77	87	97

3.2.4 UHPC 弹性抗拉强度 f_{Ute} 、抗拉强度 f_{Utu} 以及极限拉应变 ϵ_{Utu} 应按本标准附录 A 进行测定。

3.2.5 UHPC 抗拉性能等级应按表 3.2.5 进行划分, 弹性抗拉强度标准值 f_{Utek} 、抗拉强度标准值 f_{Ultuk} 以及极限拉应变 ϵ_{Ultu} 应同时满足表 3.2.5 的要求。

表 3.2.5 轴拉力学性能

抗拉性能等级	UT 0	UT I	UT II	UT III	UT IV
f_{Utek} (MPa)	7.0	7.0	7.0	8.0	10.0
f_{Ultuk} (MPa)	4.9*	7.0	7.7	9.6	12.0
f_{Ultuk}/f_{Utek}	0.7*	1.0	1.1	1.2	1.2
ϵ_{Ultu} (%)	0.15*	0.15	0.15	0.2	0.2

注: * 指按本标准附录 A 进行拉伸试验, 拉伸应变达到 0.15% 时, 对应的拉应力不应低于 0.7 倍 f_{Utek} 。

3.2.6 UHPC 按拉伸力学特性分为应变硬化和应变软化两种类型(图 3.2.6), 应采用下列规定进行表达:

- 1 采用双折线模型, 描述 UHPC 的弹性性能和硬化特征。
- 2 采用应力裂缝宽度模型, 描述 UHPC 的软化行为, 裂缝宽度与应变应符合下列规定:

$$\epsilon_{Ut} = \frac{w_{Ut}}{l_u} \quad (3.2.6-1)$$

$$l_u = \frac{2}{3}h_u \quad (3.2.6-2)$$

式中: l_u ——UHPC 构件或 UHPC 层的裂缝计算长度(mm);

h_u ——UHPC 构件或 UHPC 层的厚度(mm);

w_{Ut} ——UHPC 构件或 UHPC 层的裂缝张开宽度(mm),

$w_{Ut,max}$ 可取最长纤维长度的 1/2。

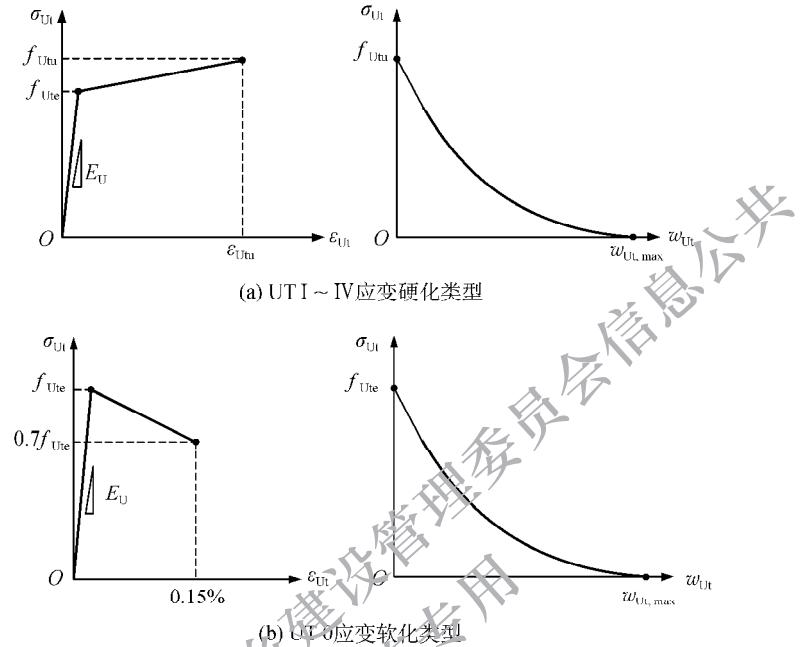


图 3.2.8 UHPC 应变硬化和应变软化特性

3.2.7 UHPC 的弹性抗拉强度设计值及抗拉强度设计值应按下列公式进行计算：

$$f_{Uted} = \frac{\eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utek}}{\gamma_U} \quad (3.2.7-1)$$

$$f_{Utd} = \frac{\eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utk}}{\gamma_U} \quad (3.2.7-2)$$

式中： f_{Uted} ——UHPC 弹性抗拉强度设计值(MPa)。

f_{Utek} ——UHPC 弹性抗拉强度标准值(MPa)。

f_{Utd} ——UHPC 抗拉强度设计值(MPa)。

f_{Utk} ——UHPC 抗拉强度标准值(MPa)。

η_k ——与构件尺寸和制造工艺相关的系数。采用 UHPC 进行整体计算分析时, $\eta_k = 1.0$; 采用 UHPC 进行局部计算分析时, $\eta_k = 0.85$ 。

γ_u ——分项系数。对于不配筋结构, $\gamma_u = 1.4$; 对于配筋 UHPC 和预应力 UHPC 结构, $\gamma_u = 1.3$ 。

η_{hu} ——纤维分布方向上构件厚度的影响系数, 按图 3.2.7 取值。

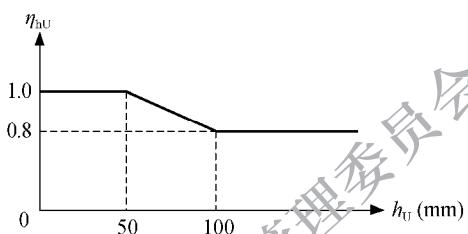


图 3.2.7 构件厚度的系数

3.2.8 UHPC 受压或受拉时的弹性模量宜按表 3.2.8 采用。当有可靠试验依据时, 可按实测数据确定, 试验方法应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定。

表 3.2.8 UHPC 弹性模量

强度等级	UC 120	UC 140	UC 160	UC 180	UC 200
E_{uc} ($\times 10^4$ MPa)	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4

3.2.9 UHPC 的剪切变形模量 G_u 可按表 3.2.8 中 E_{uc} 值的 0.4 倍采用, UHPC 泊松比 μ 可采用 0.2。

3.2.10 UHPC 徐变应变应符合下列规定:

1 当 UHPC 的压应力不大于 40% f_{ucuk} 或 UHPC 拉应力不大于 f_{ute} 时, 由于徐变产生的应变应按下列公式计算:

$$\epsilon_{uee}(t) = \varphi_u(t, t_0) \cdot \epsilon_{uel} \quad (3.2.10-1)$$

$$\varphi_U(t, t_0) = \varphi_{U,\infty}(t_\infty, t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^a}{(t - t_0)^a + b} \quad (3.2.10-2)$$

式中： ϵ_{Ucc} ——UHPC 的徐变应变；
 ϵ_{Uel} ——UHPC 的弹性应变；
 t_0 ——加载龄期(d)；
 t ——龄期(d)。

最终徐变系数 $\varphi_{U,\infty}(t_\infty, t_0)$ 和系数 a, b 可按表 3.2.10 采用。

表 3.2.10 最终徐变系数和系数 a, b

t_0 (d)	养护条件	$\varphi_{U,\infty}(t_\infty, t_0)$	a	b
4	常温养护	1.2	0.5	3.2
7		1.0	0.6	4.5
28		0.9	0.6	10
—	蒸汽养护	0.3	0.6	10

2 当 UHPC 的压应力大于 $40\% f_{Uck}$ 或 UHPC 拉应力大于 f_{Ute} 时，应考虑荷载水平对徐变的影响。

3.2.11 UHPC 的收缩应符合下列规定：

1 采用常温养护时，UHPC 总收缩值可根据龄期按下式计算：

$$\epsilon_{Us}(t) = \epsilon_{Us\infty} \cdot e^{-(\frac{2.48}{\sqrt{t}-0.86})} \quad (3.2.11-1)$$

式中： ϵ_{Us} ——UHPC 的总收缩值；
 $\epsilon_{Us\infty}$ ——UHPC 的最终收缩应变值，未采取收缩补偿措施时，可取 $0.6\% \sim 0.8\%$ ；
 t ——龄期(d)。

2 采用蒸汽养护时，UHPC 总收缩值可按下式计算：

$$\varepsilon_{Us}(t) = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{Us\infty}}{2} \cdot t & (t \leq 2) \\ \varepsilon_{Us\infty} & (t > 2) \end{cases} \quad (3.2.11-2)$$

式中: $\varepsilon_{Us\infty}$ ——UHPC 的最终收缩应变值, 可取 0.5%。

3.2.12 当采用外加剂或其他措施来降低 UHPC 收缩值时, UHPC 收缩值应根据实测值进行确定。

3.2.13 应变硬化 UHPC 在拉力作用下容许疲劳强度可按下式计算:

$$\sigma_{U,D} = 0.6 \times \left(\frac{f_{Utek} + f_{Utuk}}{2} \right) \quad (3.2.13)$$

式中: f_{Utek} ——UHPC 弹性抗拉强度标准值, 按表 3.2.5 取值;

f_{Utuk} ——UHPC 抗拉强度标准值, 按表 3.2.5 取值。

3.2.14 UHPC 的扩展度、触变性等工作性能指标应根据现场施工工艺要求确定, 应具有自密实性能, 并满足桥梁结构纵横坡成型的施工要求。

4 超高性能混凝土结构设计基本规定

4.0.1 本标准采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,应按分项系数的设计表达式进行设计。桥梁工程 UHPC 结构应进行承载能力极限状态及正常使用极限状态设计;两类极限状态设计要求及结构设计内容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。

4.0.2 作用效应计算宜采用弹性理论,并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。

4.0.3 桥梁工程 UHPC 结构的承载能力极限状态计算应采用下式:

$$\gamma_0 S_{ud} \leq R \quad (4.0.3)$$

式中: γ_0 ——桥梁的重要性系数,按结构设计安全等级,一级、二级、三级分别取用 1.1、1.0、0.9,结构设计安全等级应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定;

S_{ud} ——作用效应的组合设计值,对于汽车荷载效应应计入冲击系数;

R ——构件承载能力设计值。

4.0.4 对桥梁工程 UHPC 结构进行截面承载力、整体稳定计算时,作用(或荷载)的效应组合应采用现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的基本组合;当进行倾覆稳定性计算和疲劳验算时,作用的效应组合应采用标准组合。

4.0.5 受弯构件截面承载力验算应计人剪力滞效应的影响,

T 梁和箱梁翼缘的有效分布宽度应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定执行。

4.0.6 桥梁工程 UHPC 结构计算应计入材料收缩、徐变的影响。计算 UHPC 徐变时, 可假定徐变与 UHPC 应力呈线性关系。当缺乏符合当地实际条件的数据和计算方法时, 徐变系数可按本标准第 3.2.11 条取用; UHPC 的收缩应变, 可按本标准第 3.2.12 条取用。

4.0.7 UHPC 结构设计宜采用应变硬化类材料。结构计算时, 配筋 UHPC(UT I 级以上)材料的本构关系如图 4.0.7 所示。UHPC 的抗拉强度设计值应按本标准第 3.2.7 条计算。

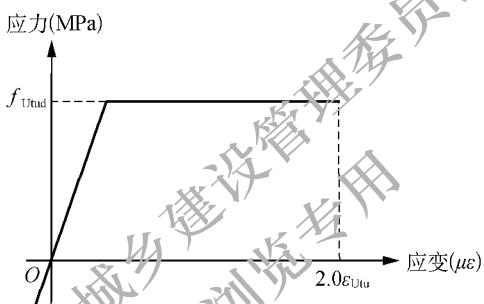


图 4.0.7 配筋 UHPC 本构关系图

4.0.8 桥梁工程 UHPC 结构计算应符合下列规定:

1 满足本标准材料性能和构造要求规定的桥梁工程 UHPC 结构可按普通钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁结构计算作用效应。持久设计状况、短暂设计状况和偶然设计状况应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 计算, 地震设计状况应按照现行行业标准《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231—01 或《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 计算。

2 UHPC 结构的承载力计算除计人受拉区钢筋及预应力钢

筋外,还应计入 UHPC 材料的贡献。计算受拉区 UHPC 材料承载力贡献值时,材料拉应力应按 f_{Uud} 计;当配筋 UHPC 材料拉应变超过 $2.0\epsilon_{Uu}$ 时,不应再计入 UHPC 材料的贡献。

3 UHPC 结构的承载力计算可采用本标准计算公式,也可采用计入材料非线性本构的有限元计算方法。

4 UHPC 结构受力分析时,无配筋 UHPC 材料的计算重度可取 26 kN/m^3 ,配筋 UHPC 材料计算重度应根据实际配筋率进行换算。

4.0.9 桥梁工程 UHPC 结构耐久性设计内容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。

4.0.10 桥梁工程 UHPC 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 E61 的规定。UHPC-钢组合桥面板结构中的 UHPC 层为结构层,设计使用年限应与桥梁主体结构一致。

4.0.11 桥梁工程 UHPC 结构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 的规定确定。

4.0.12 桥梁工程 UHPC 结构及构件耐久性技术措施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,但钢筋的保护层厚度应满足本标准第 5.5.1、6.3.2、7.1.3 和 8.4.2 条的规定。

5 超高性能混凝土构件设计

5.1 一般规定

5.1.1 桥梁工程 UHPC 结构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,作用的效应应采用组合设计值,结构材料性能应采用强度设计值。

5.1.2 桥梁工程 UHPC 结构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标准规定的各相应限值。在各种组合中,汽车荷载不计冲击系数。在预应力 UHPC 构件中,预应力应作为荷载计入,荷载分项系数取为 1.0。对连续梁等超静定结构,尚应计入由预应力、温度作用等引起的次效应。

5.1.3 UHPC 构件正截面承载力计算应基于下列基本假定:

- 1 构件弯曲后,截面仍应保持平面。
- 2 截面受拉区 UHPC 拉应变在不超过 2.0 倍极限拉应变 ($2.0\epsilon_{Utu}$) 内应按 f_{Utu} 计入抗拉强度;拉应变超过 $2.0\epsilon_{Utu}$ 的部分,不应计人抗拉强度对抗弯承载力的贡献。

- 3 UHPC 受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时,受压区 UHPC 的应力图形为三角形分布,顶缘压应力最大值不应超过 f_{Ucd} 。三角形分布的受压区高度 x_0 可由截面应变保持平面的假定的应变关系及内力平衡关系求出,且受压侧 UHPC 最大应变不超过极限压应变 $\epsilon_{Ucu} = 0.0033$ 。

- 4 UHPC 与普通钢筋混凝土组合截面中,不应计入受拉区

普通混凝土的抗拉强度；截面受压区普通混凝土压应力简化为矩形分布，极限状态压应力应为普通混凝土的抗压强度设计值。

5 纵向体内钢筋的应力等于钢筋应变与钢筋弹性模量的乘积，应力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 的规定。

5.1.4 UHPC 受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时，纵向受拉钢筋屈服与受压区 UHPC 破坏同时发生时的相对界限受压区高度 ξ_b 应按下列公式计算：

1 普通钢筋 UHPC 构件

$$\xi_b = \frac{1}{1 + \frac{f_{sd}}{E_s \varepsilon_{Ucu}^{\text{非均匀}}}} \quad (5.1.4-1)$$

2 预应力 UHPC 构件

$$\xi_b = \frac{1}{1 + \frac{0.002}{\varepsilon_{Ucu}} + \frac{f_{pd}}{E_p \varepsilon_{Ucu}}} \quad (5.1.4-2)$$

式中：
 ξ_b —— 相对界限受压区高度，取 x_b/h_0 ；
 x_b —— 界限受压区高度；
 h_0 —— 截面有效高度，纵向受拉钢筋合力点至截面受压边缘的距离；
 E_s, E_p —— 普通钢筋、预应力钢筋弹性模量；
 ε_{Ucu} —— 非均匀受压时的 UHPC 极限压应变，无进一步试验数据时，可取 0.0033；
 σ_{p0} —— 纵向预应力钢筋合力点处 UHPC 法向应力等于零时预应力筋应力，按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定取值。

5.1.5 UHPC 受弯构件、偏心受力构件纵向钢筋应力按下列规

定确定：

1 普通钢筋

$$\sigma_{si} = E_s \varepsilon_{Ucu} \left(\frac{h_{0i}}{x} - 1 \right) \quad (5.1.5-1)$$

2 预应力钢筋

$$\sigma_{pi} = E_p \varepsilon_{Ucu} \left(\frac{h_{0i}}{x} - 1 \right) + \sigma_{p0i} \quad (5.1.5-2)$$

3 按式(5.1.5-1)和式(5.1.5-2)计算的纵向钢筋应力应符合本标准第5.1.3条第5款的规定。

式中： h_{0i} ——第*i*层纵向钢筋截面重心至截面受压边缘的距离；

x ——UHPC受压区高度；

σ_{si} , σ_{pi} ——第*i*层纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力，正值代表拉应力，负值代表压应力；

σ_{p0i} ——第*i*层纵向预应力钢筋截面重心处UHPC法向应力等于零时，预应力钢筋中的应力。

5.2 持久状况承载力极限状态计算

I 轴心受力构件

5.2.1 UHPC轴心受拉构件的正截面抗拉承载力计算应符合下列规定：

1 仅设置普通钢筋的UHPC轴拉构件，正截面抗拉承载力应按下式计算：

$$\gamma_0 N_d \leq f_{sd} A_s + f_{Utd} A_U \quad (5.2.1-1)$$

2 同时设置预应力钢筋及普通钢筋的UHPC轴拉构件，正截面抗拉承载力应取下列两式的较大值：

$$\gamma_0 N_d \leq f_{sd} A_s + f_{pd} A_p \quad (5.2.1-2)$$

$$\gamma_0 N_d \leq f_{sd} A_s + \min(2.0 \epsilon_{utu} E_p + \sigma_{p0}, f_{pd}) A_p + f_{utud} A_u \quad (5.2.1-3)$$

式中: A_s , A_p , A_u ——普通钢筋、预应力钢筋的全部截面面积和UHPC构件的截面净面积。

II 受弯构件

5.2.2 矩形截面UHPC受弯构件的正截面抗弯承载力计算应符合下列规定:

1 矩形截面UHPC受弯构件仅配置纵向体内普通钢筋时,正截面抗弯承载力计算应符合图5.2.2-1的规定,构件抗弯承载力按式(5.2.2-1)计算:

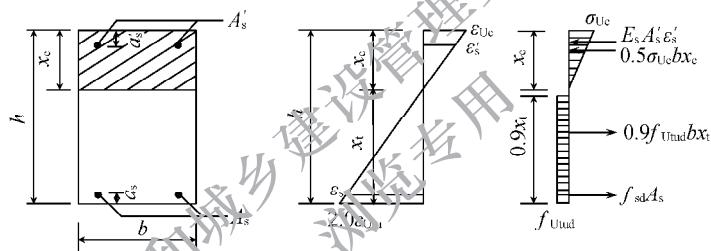


图5.2.2-1 配置纵向普通钢筋的矩形截面UHPC受弯构件正截面承载力计算

$$z_s M_d \leq f_{sd} A_s \left(h - a_s - \frac{x_c}{3} \right) + 0.9 f_{utud} b x_t \left(0.55 x_t + \frac{2x_c}{3} \right) + E_s A'_s \epsilon'_s \left(\frac{x_c}{3} - a'_s \right) \quad (5.2.2-1)$$

上式中UHPC截面受压区高度 x_c 应按下式计算:

$$F_{uc} + E_s A'_s \epsilon'_s = F_{ut} + f_{sd} A_s \quad (5.2.2-2)$$

其中:

$$F_{Uc} = 0.5\sigma_{Uc}bx_c \quad (5.2.2-3)$$

$$\sigma_{Uc} = E_{Uc}\epsilon_{Uc} \leq f_{Ucd} \quad (5.2.2-4)$$

$$F_{Ut} = 0.9f_{Utd}bx_t \quad (5.2.2-5)$$

$$\epsilon_{Uc} = \frac{x_c}{h - x_c} 2.0\epsilon_{Utu} \quad (5.2.2-6)$$

$$\epsilon'_s = \frac{x_c - a'_s}{h - x_c} 2.0\epsilon_{Utu} \quad (5.2.2-7)$$

$$x_t = h - x_c \quad (5.2.2-8)$$

截面受压区高度应符合下式要求：

$$x_c < \xi_b h_0 \quad (5.2.2-9)$$

2 矩形截面 UHPC 受弯构件同时配置纵向体内普通钢筋及预应力钢筋时, 正截面抗弯承载力计算应符合图 5.2.2-2 的规定, 构件抗弯承载力按式(5.2.2-10)计算。

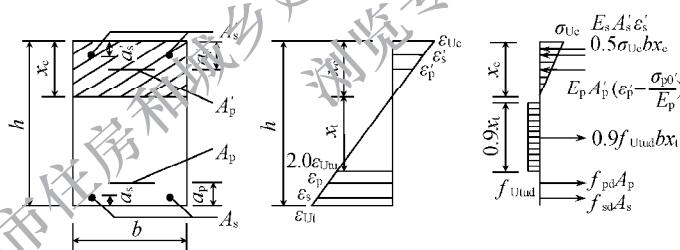


图 5.2.2-2 配置纵向普通钢筋及预应力钢筋的矩形截面 UHPC 受弯构件正截面承载力计算

$$\begin{aligned} \gamma_0 M_d &\leq f_{sd}A_s(h - a_s - a'_p) + f_{pd}A_p(h - a_p - a'_p) + \\ &0.9f_{Utd}bx_t(0.45x_t + x_c - a'_p) - \frac{1}{2}\sigma_{Uc}bx_c\left(\frac{1}{3}x_c - a'_p\right) - \\ &E_s A'_s \epsilon'_s (a'_s - a'_p) \end{aligned} \quad (5.2.2-10)$$

上式中 UHPC 截面受压区高度 x_c 应按下式计算：

$$F_{Uc} + E_s A'_s \varepsilon'_s + E_p A'_p \left(\varepsilon'_p - \frac{\sigma'_{p0}}{E_p} \right) = F_{Ut} + f_{pd} A_p + f_{sd} A_s \quad (5.2.2-11)$$

其中：

$$F_{Uc} = 0.5 \sigma_{Uc} b x_c \quad (5.2.2-12)$$

$$\sigma_{Uc} = E_{Uc} \varepsilon_{Uc} \leq f_{Ucd} \quad (5.2.2-13)$$

$$F_{Ut} = 0.9 f_{Utd} b x_t \quad (5.2.2-14)$$

$$\varepsilon_p = \frac{f_{pd} - \sigma_{p0}}{E_p} \quad (5.2.2-15)$$

$$\varepsilon_{Ut} = \frac{h - x_c}{h - x_c - a_p} \varepsilon_p \geq 2.0 \varepsilon_{Utu} \quad (5.2.2-16)$$

$$\varepsilon'_p = \frac{x_c - a_s}{h - x_c} \varepsilon_p \quad (5.2.2-17)$$

$$\varepsilon'_p = \frac{x_c - a_p}{h - x_c} \varepsilon_{Ut} \quad (5.2.2-18)$$

$$\varepsilon_{Uc} = \frac{x_c}{h - x_c} \varepsilon_{Ut} \quad (5.2.2-19)$$

$$x_t = \frac{2.0 \varepsilon_{Utu}}{\varepsilon_{Ut}} (h - x_c) \quad (5.2.2-20)$$

截面受压区高度应符合下式要求：

$$x_c < \xi_b h_0 \quad (5.2.2-21)$$

式中： γ_0 ——桥梁的重要性系数，按本标准第 4.0.3 条的规定采用；

M_d ——弯矩设计值；

- F_{Ue} ——受压区 UHPC 的应力合力；
 F_{Ut} ——受拉区 UHPC 的拉应力合力；
 f_{Utd} ——UHPC 的抗拉强度设计值；
 f_{Ucd} ——UHPC 的抗压强度设计值；
 ϵ_{Utu} ——UHPC 的极限拉应变；
 E_s ——普通钢筋的弹性模量；
 f_{sd} ——普通钢筋抗拉强度设计值；
 A_s, A'_s ——构件受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；
 b ——矩形截面宽度；
 x_c ——截面受压区高度；
 h ——截面高度；
 a_s, a'_s ——构件受拉区、受压区纵向普通钢筋重心的到截面受拉边缘的距离；
 x_t ——UHPC 构件拉应变小于 $2.0\epsilon_{Utu}$ 的受拉区高度；
 E_p ——纵向预应力钢筋的弹性模量；
 f_{pd} ——预应力钢筋抗拉强度设计值；
 A_p, A'_p ——构件受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积；
 a_p, a'_p ——构件受拉区、受压区纵向预应力钢筋合力点到截面受拉边缘的距离；
 ϵ_p ——受拉区预应力钢筋屈服时, 受拉区纵向预应力钢筋合力点处 UHPC 的应变；
 ϵ_{Ut} ——受拉区预应力钢筋屈服时, 构件截面受拉边缘 UHPC 的应变；
 ϵ_{Ue} ——截面达到抗弯承载力极限时, 构件截面受压边缘 UHPC 的应变；
 ϵ'_s ——截面达到抗弯承载力极限时, 构件受压区纵向普通钢筋合力点处 UHPC 的应变；
 ϵ'_p ——截面达到抗弯承载力极限时, 构件受压区纵向预

应力钢筋合力点处 UHPC 的应变；

σ_{p0} ——受拉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；

σ'_{p0} ——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；

σ_{Uc} ——截面达到抗弯承载力极限时，构件截面受压边缘 UHPC 的应力。

5.2.3 工字形截面 UHPC 受弯构件采用纵向体内普通钢筋及预应力钢筋时，正截面抗弯承载力计算应符合图 5.2.3 规定。

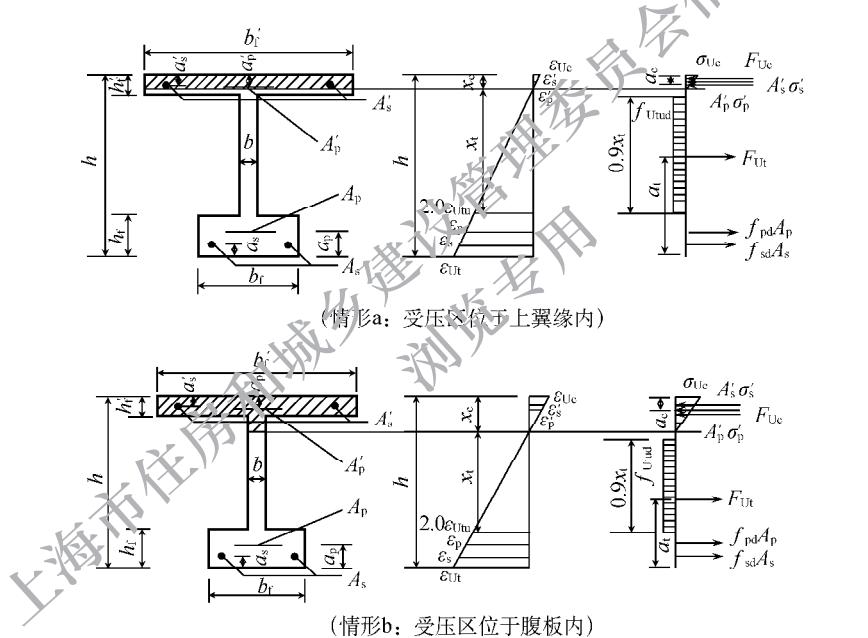


图 5.2.3 工字形截面 UHPC 受弯构件正截面承载力计算

1 情形 a: 受压区位于上翼缘内

$$\gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s (h - a_c - a_s) + f_{pd} A_p (h - a_c - a_p) +$$

$$f_{\text{Utu}} A_{\text{Ut}} (h - a_c - a_t) - \sigma'_s A'_s (a'_s - a_c) - \sigma'_p A'_p (a'_p - a_c) \quad (5.2.3-1)$$

UHPC 截面受压区高度 x_c 按下列公式计算：

$$F_{\text{Uc}} + \sigma'_s A'_s + \sigma'_p A'_p = F_{\text{Ut}} + f_{\text{pd}} A_p + f_{\text{sd}} A_s \quad (5.2.3-2)$$

其中：

$$F_{\text{Uc}} = 0.5 \sigma_{\text{Uc}} b'_f x_c \quad (5.2.3-3)$$

$$F_{\text{Ut}} = f_{\text{Utu}} A_{\text{Ut}} \quad (5.2.3-4)$$

有效受拉区位于腹板范围内：

$$A_{\text{Ut}} = 0.9 b x_t \quad (5.2.3-5)$$

有效受拉区位于受拉翼缘范围内：

$$A_{\text{Ut}} = 0.9 b x_t + (x_c + x_t + h_f - h) b_f \quad (5.2.3-6)$$

$$x_t = \frac{2.0 \epsilon_{\text{Utu}} E_p (h - a_p - x_c)}{f_{\text{pd}} - \sigma_{p0}} \leq h - x_c \quad (5.2.3-7)$$

$$\sigma_{\text{Uc}} = F_{\text{Uc}} \epsilon_{\text{Uc}} = F_{\text{Uc}} \cdot \frac{2.0 \epsilon_{\text{Utu}} x_c}{x_t} \leq f_{\text{Ucd}} \quad (5.2.3-8)$$

$$\sigma'_s = \frac{2.0 \epsilon_{\text{Utu}} E_s}{x_t} (x_c - a'_s) \quad (5.2.3-9)$$

$$\sigma'_p = \frac{2.0 \epsilon_{\text{Utu}} E_p}{x_t} (x_c - a'_p) - \sigma'_{p0} \quad (5.2.3-10)$$

式中： b ——工字形截面腹板宽度；

b_f ——工字形截面受拉翼缘宽度；

b'_f ——工字形截面受压翼缘宽度；

h_f ——工字形截面受拉翼缘高度；

h'_f ——工字形截面受压翼缘高度；

a_c ——截面受压区 UHPC 压应力合力重心距离受压边缘

的距离；

a_t ——UHPC 构件有效受拉区合力重心距受拉边缘的距离；

A_{Ut} ——UHPC 构件有效受拉区面积。

2 情形 b: 受压区位于腹板内

正截面抗弯承载力计算同式(5.2.3-1)所示, 构件 UHPC 截面受压区高度 x_c 应按式(5.2.3-2)计算, 其中 F_{Uc} 计算按式(5.2.3-3)进行, 其余分项计算同情形 a。

$$F_{Uc} = \frac{(b'_f - b)(2x_c - h'_f)\sigma_{Uc}}{2x_c} + 0.5bx_c\sigma_{Uc} \quad (5.2.3-11)$$

5.2.4 工字形截面 UHPC 与普通钢筋混凝土桥面板(简称 RC 桥面板)组成的 UHPC-RC 组合梁采用纵向体内普通钢筋及预应力钢筋时, 正截面抗弯承载力计算应符合图 5.2.4 规定。

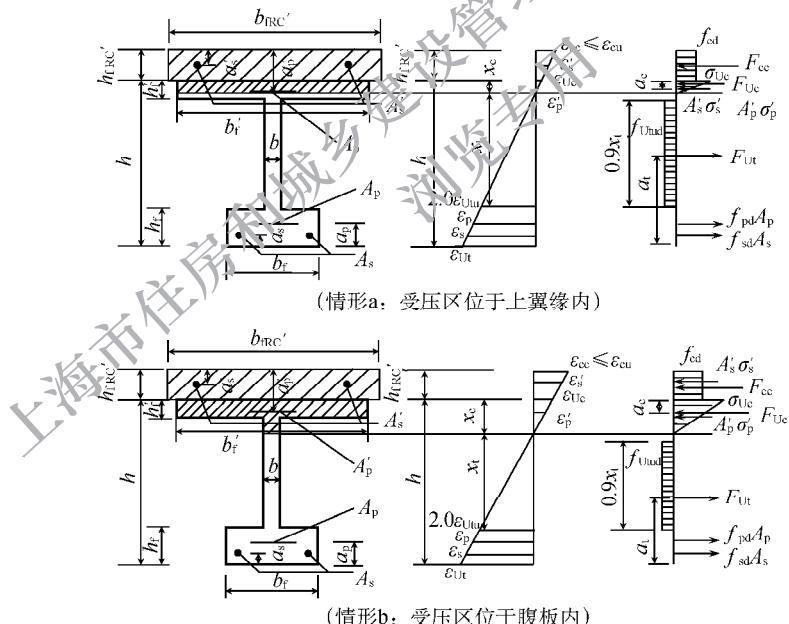


图 5.2.4 UHPC-RC 组合梁正截面承载力计算

1 情形 a: 受压区位于上翼缘内

$$\begin{aligned} \gamma_0 M_d \leq b'_{\text{frc}} h'_{\text{frc}} f_{cd} \left(\frac{h'_{\text{frc}}}{2} + a_c \right) + \sigma'_s A'_s (h'_{\text{frc}} - a'_s + a_c) - \\ \sigma'_p A'_p (a'_p - h'_{\text{frc}} - a_c) + f_{sd} A_s (h - a_c - a_s) + \\ f_{pd} A_p (h - a_c - a_p) + f_{Utd} A_{Ut} (h - a_c - a_t) \end{aligned} \quad (5.2.4-1)$$

组合截面受压区高度

$$x = h'_{\text{frc}} + x_c \quad (5.2.4-2)$$

其中 x_c 按下列公式计算:

$$F_{cc} + F_{Uc} + \sigma'_s A'_s + \sigma'_p A'_p = F_{Ut} + f_{pd} A_p + f_{sd} A_s \quad (5.2.4-3)$$

其中:

$$F_{cc} = f_{cd} b'_{\text{frc}} h'_{\text{frc}} \quad (5.2.4-4)$$

$$F_{Uc} = 0.5 \sigma_{Uc} b_f x_c \quad (5.2.4-5)$$

$$F_{Ut} = f_{Utd} A_{Ut} \quad (5.2.4-6)$$

有效受拉区位于腹板范围内:

$$A_{Ut} = 0.9 b x_t \quad (5.2.4-7)$$

有效受拉区位于受拉翼缘范围内:

$$A_{Ut} = 0.9 b x_t + (x_c + x_t + h_f - h) b_f \quad (5.2.4-8)$$

$$x_t = \frac{2.0 \epsilon_{Utu} E_p}{f_{pd} - \sigma_{p0}} (h - a_p - x_c) \leq h - x_c \quad (5.2.4-9)$$

$$\sigma_{Uc} = E_{Uc} \epsilon_{Uc} = E_{Uc} \frac{2.0 \epsilon_{Utu} x_c}{x_t} \leq f_{Ucd} \quad (5.2.4-10)$$

$$\sigma'_s = \frac{2.0\epsilon_{Utu}E_s}{x_t}(h'_{frc} + x_c - a'_s) \quad (5.2.4-11)$$

$$\sigma'_p = \frac{2.0\epsilon_{Utu}E_p}{x_t}(x_c - a'_p) - \sigma'_{p0} \quad (5.2.4-12)$$

式中： F_{cc} ——受压区 RC 桥面板的压应力合力；

f_{sd} ——受压区 RC 桥面板混凝土的抗拉强度设计值；

b'_{frc} ——RC 桥面板宽度；

h'_{frc} ——RC 桥面板高度；

x ——UHPC-RC 组合梁截面受压区高度；

a_c ——组合截面中 UHPC 梁受压区压应力合力重心距离
UHPC 梁受压边缘的距离；

a_t ——UHPC 构件有效受拉区合力重心距受拉边缘的
距离。

2 情形 b: 受压区位于腹板内

正截面抗弯承载力计算同式(5.2.4-10)所示，其中 F_{Uc} 计算
应按式(5.2.4-13)进行，其余分项计算同情形 a。

$$F_{Uc} = \frac{(b'_{frc} - b)(2x_c - h')c_{Uc}}{2x_c} + 0.5bx_c\sigma_{Uc} \quad (5.2.4-13)$$

5.2.5 UHPC 构件斜截面抗剪承载力应按下列公式计算：

$$V_{Rd} = V_{Rd,U} + V_{Rd,s} + V_{Rd,p} \quad (5.2.5-1)$$

$$V_{Rd,U} = \frac{b \cdot z \cdot 0.5(f_{Uted} + f_{Utd})}{\tan \alpha} \quad (5.2.5-2)$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sv}}{s_v} \cdot z \cdot f_{sd} \cdot (\cot \alpha + \cot \beta) \sin \beta \quad (5.2.5-3)$$

$$V_{Rd,p} = A_p \cdot f_{pd} \cdot \sin \gamma \quad (5.2.5-4)$$

式中： V_{Rd} ——抗剪承载力设计值；

$V_{Rd,U}$ ——UHPC 基体的抗剪承载力；

$V_{Rd,s}$ —— 箍筋提供的抗剪承载力；
 $V_{Rd,p}$ —— 预应力钢筋提供的抗剪承载力；
 b —— 腹板宽度；
 z —— 外力杠杆臂, 取 $z = 0.9 \times 7/8h, h$ 为试件高度；
 f_{Uted} —— UHPC 的弹性抗拉强度设计值；
 f_{Utud} —— UHPC 的抗拉强度设计值；
 α —— 应力场倾角, 近似等于裂缝发展方向与梁轴线的夹角, 取 $25^\circ \sim 45^\circ$ ；
 A_{sv} —— 箍筋面积；
 s_v —— 箍筋间距；
 A_p —— 预应力钢筋面积；
 f_{sd} —— 箍筋或纵筋强度设计值；
 f_{pd} —— 预应力钢筋强度设计值；
 β —— 箍筋或纵筋的倾角；
 γ —— 预应力钢筋的倾角。

III 偏心受力构件

5.2.6 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算应符合下列规定：

1 计算图示及公式如下：

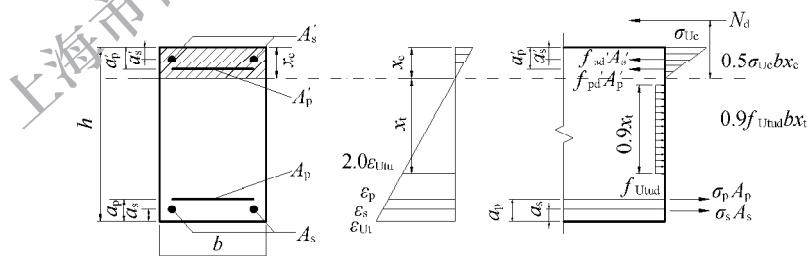


图 5.2.6 矩形截面偏心受压构件正截面抗压承载力计算

$$\gamma_0 N_d \leq 0.5 \sigma_{uc} b x_c + \sigma'_s A'_s + \sigma'_p A'_p - \sigma_p A_p - \sigma_s A_s - 0.9 x_t b f_{utd}$$

(5.2.6-1)

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e \leq & 0.5 \sigma_{uc} b x_c \left(h_0 - \frac{x_c}{3} \right) + \sigma'_s A'_s (h_0 - a'_s) + \\ & \sigma'_p A'_p (h_0 - a'_p) - 0.9 x_t b f_{utd} \left(h_0 - x_c - \frac{x_t}{2} \right) \end{aligned}$$

(5.2.6-2)

$$e = \eta e_0 + h/2 - a$$

(5.2.6-3)

2 按本条规定计算时,尚应符合下列要求:

1) 当相对受压区高度 $\xi = x_c/h_0$ 不大于 ξ_b 时,为大偏心受压构件,取 $\sigma_s = f_{sd}, \sigma'_p = f_{pd}, \sigma_{uc}, \sigma'_s, \sigma'_p, x_t$ 按式 (5.2.2-12)~式(5.2.2-20)计算,截面受压区高度 x_c 尚应符合下列规定:

(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,即 $(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$ 为正时

$$x_c \geq 2a'$$

(5.2.6-4)

(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,即 $(f'_{pd} - \sigma'_{p0})$ 为负时

$$x_c \geq 2a'_s$$

(5.2.6-5)

截面受拉区高度 x_t 应符合下式规定:

$$x_t \leq h - x_c$$

(5.2.6-6)

2) 当相对受压区高度 $\xi = x_c/h_0$ 大于 ξ_b 时,为小偏心受压构件,取 $\sigma_{uc} = f_{uc}, \sigma_s, \sigma_p$ 按本标准第 5.1.5 条计算;

σ'_s 、 σ'_p 、 x_t 应按下式计算：

$$x_t = \frac{2.0\epsilon_{cu}E_s}{\epsilon_{cu}}x_c \leq h - x_c \quad (5.2.6-7)$$

$$\sigma'_s = \frac{\epsilon_{cu}E_s}{x_c}(x_c - a'_s) \leq f'_{sd} \quad (5.2.6-8)$$

$$\sigma'_p = \frac{\epsilon_{cu}E_p}{x_c}(x_c - a'_s) - \sigma'_{p0} \quad (5.2.6-9)$$

3 对长细比 $l_0/i > 17.5$ 的构件,应计入偏心受压构件的轴向力承载能力极限状态偏心距增大系数 η , 按下式计算:

$$\eta = 1 + \frac{1}{1300e_0/h_0} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \xi_1 \xi_2 \quad (5.2.6-10)$$

$$\xi_1 = 0.2 + 2.7 \frac{e_0}{h_0} \leq 1.0 \quad (5.2.6-11)$$

$$\xi_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h} \leq 1.0 \quad (5.2.6-12)$$

式中: γ ——桥梁的重要性系数,按本标准第 4.0.3 条的规定采用;

N_d ——轴力设计值;

e_0 ——轴力对截面重心轴的偏心距, $e_0 = M_d/N_d$, 不小于 20 mm 和偏压方向构件截面最大尺寸的 1/30 二者之间的较大值;

e ——轴力作用点至截面受拉边或受压较小边纵向钢筋 A_s 和 A_p 合力点的距离;

x_t ——UHPC 构件拉应变小于 $2.0\epsilon_{Utu}$ 的受拉区高度;

M_d ——相应于轴力的弯矩设计值;

η ——偏心距增大系数；
 f_{Uud} ——UHPC 的抗拉强度设计值；
 f_{Ucd} ——UHPC 的抗压强度设计值；
 ϵ_{Utu} ——UHPC 的极限拉应变；
 f_{sd}, f'_{sd} ——普通钢筋抗拉、抗压强度设计值；
 f_{pd}, f'_{pd} ——预应力钢筋抗拉、抗压强度设计值；
 E_p ——构件受拉区纵向预应力钢筋的弹性模量；
 b ——矩形截面宽度；
 x_c ——截面受压区高度；
 h ——截面高度；
 h_0 ——截面有效高度；
 a'_p, a_p ——构件受压区、受拉区纵向预应力钢筋重心的到截面受压边缘、受拉边缘的距离；
 a'_s, a_s ——构件受压区、受拉区纵向普通钢筋重心的到截面受压边缘、受拉边缘的距离；
 A'_s, A_s ——构件受压区及受拉区纵向普通钢筋的截面面积；
 A'_p, A_p ——构件受压区及受拉区纵向预应力钢筋的截面面积；
 σ_s, σ_p ——受拉侧或受压较小侧普通钢筋、预应力钢筋应力值,按本标准第 5.2.6 条第 2 款的规定取用；
 $\sigma_{p0}, \sigma'_{p0}$ ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋合力点处 UHPC 法向应力等于零时预应力筋应力,按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范》JTG 3362 的规定取值；
 ξ_1 ——荷载偏心率对截面曲率的影响系数；
 ξ_2 ——构件长细比对截面曲率的影响系数。

5.2.7 矩形截面偏心受拉构件的正截面抗拉承载力应符合下列规定：

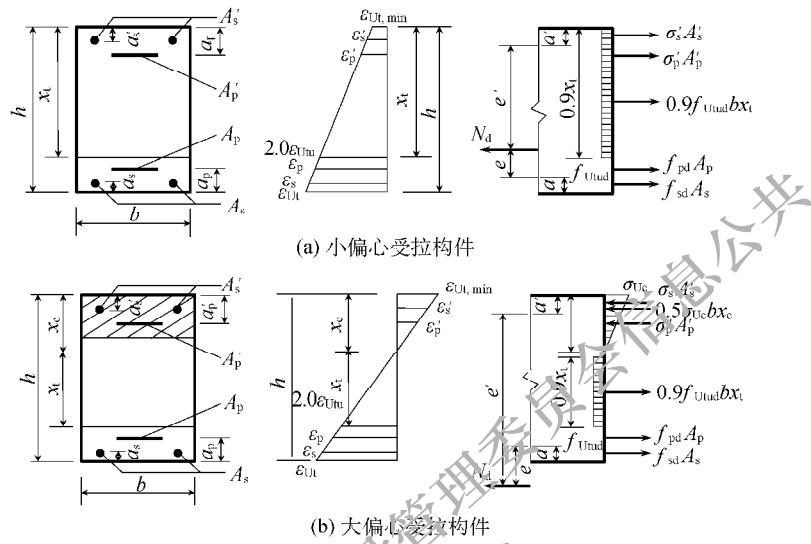


图 5.2.7 矩形截面偏心受拉构件正截面抗拉承载力计算

1 小偏心受拉构件

当轴向拉力作用在钢筋 A_s 、 A'_s 的合力点和 A_s' 、 A_p' 的合力点之间时：

$$\gamma_0 N_d \leq f_{sd} A_s + f_{pd} A_p + \sigma'_s A'_s + \sigma'_p A'_p + 0.9 x_t b f_{utud} \quad (5.2.7-1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e' &\leq f_{sd} A_s (h_0 - a_s) + f_{pd} A_p (h_0 - a_p) + \\ &0.9 x_t b f_{utud} \left(\frac{x_t}{2} - a' \right) \end{aligned} \quad (5.2.7-2)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e &\leq \sigma'_s A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma'_p A'_p (h_0 - a'_p) + \\ &0.9 x_t b f_{utud} \left(h_0 - \frac{x_t}{2} - a \right) \end{aligned} \quad (5.2.7-3)$$

2 大偏心受拉构件

当轴向拉力不作用在钢筋 A_s 、 A_p 的合力点和 A'_s 、 A'_p 的合力点之间时, UHPC 受压区的高度尚应满足本标准第 5.1.4 条的要求。

$$\gamma_0 N_d \leq f_{sd} A_s + f_{pd} A_p - \sigma'_s A'_s - \sigma'_p A'_p + 0.9 x_t b f_{Utd} - 0.5 b x_c \sigma_{Uc} \quad (5.2.7-4)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e' &\leq f_{sd} A_s (h'_0 - a_s) + f_{pd} A_p (h'_0 - a_p) + \\ &0.9 x_t b f_{Utd} (0.55 x_t - a') - \\ &0.5 \sigma_{Uc} b x_c \left(\frac{x_c}{3} - a' \right) \end{aligned} \quad (5.2.7-5)$$

式中: a , a' ——构件受拉区、受压区普通钢筋和预应力筋合力点至截面近边的距离;

h'_0 ——纵向受压钢筋合力点至截面受拉边缘的距离。

IV 疲劳强度验算

5.2.8 UHPC 构件疲劳验算, 应对正截面受拉区边缘纤维的 UHPC 拉应力进行验算; UHPC 应力计算可采用名义应力法, 按线弹性状态计算。疲劳荷载的计算模型应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。

5.2.9 UHPC 疲劳验算时, 受拉区边缘纤维的应力应按下式进行验算:

$$\sigma_{t,max}^f \leq \sigma_{U,D} \quad (5.2.9)$$

式中: $\sigma_{t,max}^f$ ——疲劳验算时 UHPC 截面受拉区边缘纤维的最大拉应力;

$\sigma_{U,D}$ ——UHPC 名义疲劳弯拉应力允许值, 按本标准第 3.2.14 条计算。

5.3 持久状况正常使用极限状态计算

I 预应力钢筋应力及损失计算

5.3.1 预应力 UHPC 构件,预应力钢筋的张拉控制应力值 σ_{con} (对后张法构件为梁体内锚下应力)应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定。

5.3.2 当计算构件由作用引起的应力或进行弹性阶段其他计算时,预应力钢筋对截面几何特征的影响应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定。

5.3.3 正常使用极限状态计算中,预应力损失的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。其中,收缩、徐变引起的预应力损失计算参数应符合本标准第 3.2.11 和第 3.2.12 条的规定。

II 抗裂验算及裂缝宽度验算

5.3.4 按持久状况设计的预应力 UHPC 受弯构件,应计算使用阶段正截面混凝土的法向压应力、受拉区钢筋的拉应力和斜截面混凝土的主压应力,其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 的规定,并将 f_{ck} 替换为 f_{ck} 。计算时,作用(荷载)取标准值,汽车荷载应计入冲击系数,并应计入预加力效应,预加力的分项系数取为 1.0。对连续梁等超静定结构,尚应计入预加力、温度作用等引起的次效应。

5.3.5 预应力 UHPC 受弯构件进行正截面拉应力计算应符合下列规定:

1 A 类预应力 UHPC 受弯构件截面受拉边缘的拉应力应按下式计算:

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leqslant 0.6 f_{Utek} \quad (5.3.5)$$

式中: σ_{st} ——在作用频遇组合下构件抗裂验算边缘 UHPC 的法向拉应力,按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定计算;

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

f_{Utek} ——UHPC 的弹性抗拉强度标准值。

2 B 类预应力 UHPC 受弯构件在结构自重作用下控制截面受拉边缘不得消压。

5.3.6 A 类和 B 类预应力 UHPC 受弯构件斜截面主拉应力应符合下列规定:

1 预制构件

$$\sigma_{tp} \leqslant 0.6 f_{Utek} \quad (5.3.6-1)$$

2 现场浇筑构件

$$\sigma_{tp} \leqslant 0.5 f_{Utek} \quad (5.3.6-2)$$

式中: σ_{tp} ——在作用频遇组合和预加力产生的 UHPC 主拉应力,按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定计算;

f_{Utek} ——UHPC 的弹性抗拉强度标准值。

5.3.7 按 B 类预应力构件标准控制应力的应变硬化型 UHPC 构件,以及不配预应力钢筋的应变硬化型 UHPC 构件,在正常使用极限状态频遇组合下受拉边缘 UHPC 的最大拉应变小于 ϵ_{Utu} 时,可不验算裂缝宽度。

5.3.8 按 B 类预应力构件标准控制应力的应变软化型 UHPC 构件,以及不配预应力钢筋的应变软化型 UHPC 构件,应按正常使用极限状态频遇组合并计人长期效应的影响验算裂缝宽度,最大裂缝宽度计算方法及控制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 的规定。

III 挠度验算

5.3.9 UHPC 受弯构件在正常使用极限状态下的挠度,可根据给定的构件刚度用结构力学的方法计算。

5.3.10 预应力 UHPC 受弯构件在使用阶段的挠度应计入荷载长期效应的影响,即按荷载频遇组合和本标准第 5.3.9 条计算的挠度值,乘以挠度长期增长系数 η_0 ,挠度长期增长系数取 $\eta_0=1+\varphi(t-t_0)$ 。

5.3.11 UHPC 受弯构件按前述计算的长期挠度值,由汽车荷载(不计冲击力)和人群荷载频遇组合,主梁最大挠度不应超过计算跨径的 1/500;主梁悬臂端的最大挠度不应超过悬臂长度的 1/300。

5.3.12 UHPC 受弯构件的预拱度、预应力 UHPC 受弯构件由预加力引起的反拱值,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 进行计算。

5.4 持久状况和短暂状况构件应力计算

I 持久状况预应力 UHPC 构件应力计算

5.4.1 预应力 UHPC 受弯构件在进行持久状况设计时,使用阶段正截面的 UHPC 法向压应力不超过 $0.4f_{ck}$,可按线性徐变理论进行设计。

5.4.2 预应力 UHPC 受弯构件在进行持久状况设计时,使用阶段的预应力钢筋拉应力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。

II 短暂状况构件的应力计算

5.4.3 UHPC 构件按短暂状况设计时,应计算构件在制作、运输

及安装等施工阶段由自重、施工荷载等引起的正截面和斜截面的应力，且不应超过本标准第 5.4.4 条规定的限值。施工荷载除有特别规定外，均采用标准值；当有组合时，不计人荷载组合系数。

当用吊机(车)行驶于桥梁进行安装时，对已安装就位的构件进行验算，吊机(车)荷载应乘以 1.15 的分项系数；但当吊机(车)产生的效应设计值小于按持久状况承载能力计算状态设计的作用效应设计值时，则可不必验算。

5.4.4 制作、运输等短暂设计工况下，UHPC 构件正截面及斜截面应力应符合下列规定：

1 受压区 UHPC 正截面验算边缘压应力不应超过 $0.8f'_{ck}$ (f'_{ck} 为施工阶段对应的立方体 UHPC 轴心抗压强度标准值)。

2 UHPC 受弯构件中性轴处主拉应力不应超过 f'_{utuk} (f'_{utuk} 为施工阶段对应的 UHPC 抗拉强度标准值)。

5.4.5 当进行构件运输和安装计算时，构件自重应乘以动力系数。动力系数应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D 60 的规定采用。

5.4.6 对构件施加预加力时，UHPC 的立方体抗压强度不得低于设计强度等级的 80%，弹性模量不应低于 UHPC 设计弹性模量的 80%。

5.5 构造要求

5.5.1 普通钢筋和预应力钢筋的 UHPC 保护层厚度取钢筋外缘至混凝土表面的距离，不应小于 15 mm 和钢纤维最大长度的较大值。

5.5.2 当计算中需充分发挥普通钢筋的强度时，UHPC 构件中普通钢筋的最小锚固长度应满足表 5.5.2 的规定。

表 5.5.2 钢筋最小锚固长度 l_a

钢筋种类		HRB400, HRBF400, RRB400	HRB500
受拉钢筋	直端	$12d$	$15d$
	弯钩端	$9d$	$11d$

注:1. d 为钢筋公称直径(mm)。

2. 当受拉钢筋末端采用弯钩时,锚固长度为包括弯钩在内的投影长度;受拉钢筋端部弯钩应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定。

5.5.3 应变软化型 UHPC 受弯构件最小配筋率应满足构件抗弯极限承载力设计值大于开裂弯矩的要求。

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

5.5.5 T 形、I 形、箱形截面 UHPC 梁的腹板宽度不应小于 80 mm。

5.5.6 当 UHPC 构件因预制或分段浇筑产生冷缝,且构件设计计算考虑接缝两侧 UHPC 抗拉能力时,应对接缝构造做配筋强化处理。接缝处补强钢筋间距宜为 75 mm~200 mm,补强钢筋面积按 UHPC 接缝截面抗拉等强进行设计。

6 超高性能混凝土-钢组合桥面板构件设计

6.1 一般规定

6.1.1 UHPC-钢组合桥面板结构应分别采用车道荷载、车辆荷载进行结构的整体和局部受力计算。

6.1.2 整体计算应符合现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64—01 的规定。局部计算可采用可靠的理论解析法或有限元方法等进行计算。

6.1.3 UHPC-钢组合桥面板结构的作用效应计算应符合下列规定：

1 应按线弹性方法计算，当极限状态下结构的变形不能被忽视时，应计入二阶效应。

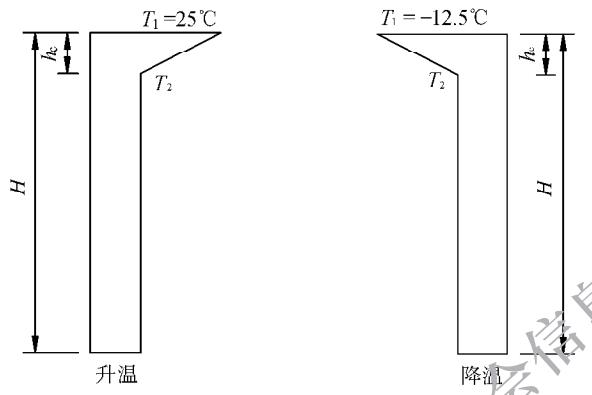
2 计算模型应准确模拟施工过程与顺序。

3 计算整体效应时，可不计人UHPC与钢顶板的层间滑移；计算局部效应时，应计人局部滑移效应，可不计人UHPC与钢顶板间的粘接力和摩阻力。

6.1.4 UHPC-钢组合桥面板结构温度效应的计算应符合下列规定：

1 UHPC-钢组合桥面板结构的整体温度效应应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTGD60 的规定。

2 UHPC-钢组合桥面板结构的温度梯度效应计算应采用竖向温度梯度分布形式(图 6.1.4)。



h_c —UHPC层厚度; H —组合截面全高

图 6.1.4 坚向温度梯度

温度梯度(T_2)取值应按下式计算:

$$\begin{cases} T_2 = 25 - \frac{25 - 6.7}{100} h_c & \text{升温} \\ T_2 = -12.5 - \frac{-12.5 + 3.3}{100} h_c & \text{降温} \end{cases} \quad (6.1.4)$$

6.1.5 UHPC-钢组合桥面板结构采用的UHPC抗拉强度等级不应低于UT III。

6.2 结构计算

6.2.1 抗弯计算应符合下列规定:

1 UHPC-钢组合桥面板结构抗弯承载力应符合下列公式规定:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \frac{M_{d,i}}{W_{\text{eff},i}} \quad (6.2.1-1)$$

$$\gamma_0 \sigma \leq f \quad (6.2.1-2)$$

式中： i —— 变量，表示不同的应力计算阶段。其中， $i = I$ 表示未形成 UHPC - 钢组合桥面板结构截面(钢梁)的应力计算阶段； $i = II$ 表示形成 UHPC - 钢组合桥面板结构之后的应力计算阶段。

$M_{d,i}$ —— 对应不同应力计算阶段，作用于钢梁或组合梁的弯矩设计值。

$W_{eff,i}$ —— 对应不同应力计算阶段，钢梁或组合梁的截面抗弯模量。

f —— 钢筋、钢梁或 UHPC 的强度设计值。

γ_0 —— 结构重要性系数。

2 UHPC - 钢组合桥面板的有效宽度，应按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64—01 的规定执行。

3 计算荷载效应时，负弯矩区 UHPC 层应按不开裂考虑。

6.2.2 抗剪计算应符合下列规定：

1 UHPC - 钢组合桥面板结构抗剪承载力应符合下列公式规定：

$$\gamma_0 V_{vd} \leq V_{vu} \quad (6.2.2-1)$$

$$V_{vu} = f_{vd} A_w \quad (6.2.2-2)$$

式中： V_{vd} —— 截面竖向剪力设计值；

V_{vu} —— 截面竖向抗剪承载力；

A_w —— 钢梁腹板截面面积；

f_{vd} —— 钢梁腹板抗剪强度设计值。

2 当 UHPC - 钢组合桥面板结构承受弯矩和剪力共同作用时，应计入二者耦合影响，腹板折算应力应按下式要求进行验算：

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leqslant 1.1 f_d \quad (6.2.2-3)$$

式中: σ , τ ——钢梁腹板上同时产生的正应力、剪应力;

f_d ——钢材抗拉强度设计值。

6.2.3 剪力连接件采用圆柱头焊钉时,纵向抗剪应符合现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64—01 的规定。

6.2.4 UHPC-钢组合桥面板结构的稳定计算应符合下列规定:

1 施工期间 UHPC-钢组合桥面板结构应具有足够的侧向刚度和侧向约束,以确保钢梁不发生整体失稳。钢梁稳定性验算应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTGD64 的规定。

2 UHPC-钢组合桥面板结构负弯矩区钢梁为箱型截面或下翼缘有可靠的横向约束,且腹板有加劲措施时,可不验算负弯矩区侧扭稳定性,否则应按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64—01 的规定对钢梁侧扭稳定性进行验算。

6.2.5 设计使用年限内,UHPC-钢组合桥面板结构中的钢结构、剪力钉和UHPC 层均不应发生疲劳破坏。

6.2.6 UHPC-钢组合桥面板结构中钢结构部分疲劳验算应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTGD64 的规定。

6.2.7 UHPC-钢组合桥面板结构中剪力连接件疲劳验算应符合现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64—01 的规定。

6.2.8 UHPC-钢组合桥面板结构中 UHPC 层的疲劳验算应符合下列规定:

$$\sigma_{st,max} \leqslant \sigma_{U,D} \quad (6.2.8)$$

式中: $\sigma_{st,max}$ ——UHPC 层在频遇组合下的最大拉应力,可按弹

性方法计算；

$\sigma_{U,D}$ ——UHPC 的容许疲劳强度,应符合本标准第 3.2.14 条的规定。

6.2.9 UHPC 层抗裂计算应同时考虑结构重力、收缩徐变等永久作用和汽车荷载、温度作用等可变作用,并应准确模拟 UHPC- 钢组合桥面板结构的施工顺序。

6.2.10 UHPC 层应建立局部模型分析验证抗裂性能,UHPC 层顶面的拉应力计算应包括下列内容:

- 1 主梁腹板或纵隔板顶面位置,沿横桥向应力。
- 2 横隔板顶面位置沿纵桥向应力。
- 3 纵肋腹板顶面位置-相邻横隔板跨中处,沿横桥向应力。
- 4 纵肋腹板顶面位置-横隔板断面处,沿横桥向应力。

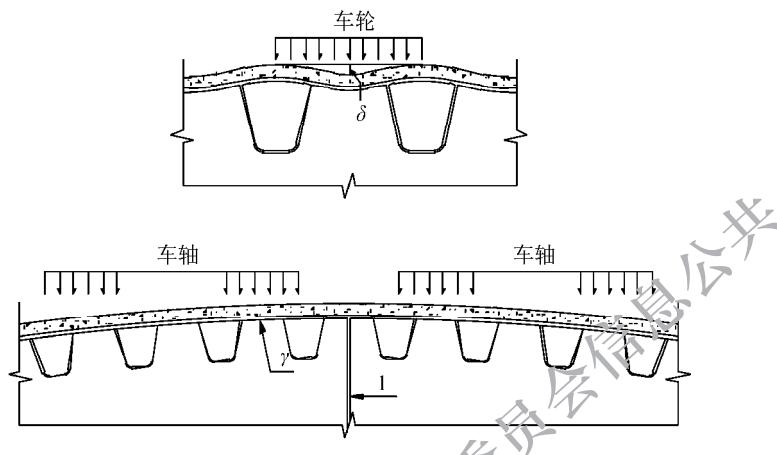
6.2.11 UHPC- 钢组合桥面板结构中 UHPC 层的抗裂验算应符合下列规定:

- 1 当 UHPC 层计算拉应力不大于 UHPC 弹性抗拉强度设计值时,可认为 UHPC 层不开裂。
- 2 当 UHPC 层拉应力大于 UHPC 弹性抗拉强度设计值时,应按本标准第 4.0.7 的材料本构关系进行非线性分析,UHPC 层计算拉应变应小于 UHPC 极限拉应变。

6.2.12 UHPC- 钢组合桥面板结构桥梁整体挠度应符合现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64—01 的规定。

6.2.13 UHPC- 钢组合桥面板结构局部挠度计算应符合下列规定(图 6.2.13):

- 1 桥面结构在纵肋间的相对挠度不应超过 0.2 mm。
- 2 UHPC- 钢组合桥面结构的变形曲率半径不应小于 40 m。



δ —相对挠度; γ —曲率半径; l —主梁腹板或纵隔板

图 6.2.13 局部挠度计算

6.3 构造要求

6.3.1 UHPC-钢组合桥面板结构中各层的厚度应符合下列规定:

- 1 钢桥面板厚度不宜小于 12 mm, 并不应小于焊钉直径的 0.5 倍。
- 2 UHPC-钢组合桥面板结构的 UHPC 层厚度不宜小于 30 mm, 且不宜大于 100 mm。

6.3.2 UHPC 层内钢筋网的设置应符合下列规定:

- 1 UHPC 保护层厚度不应小于 10 mm, 宜采用 15 mm。
- 2 钢筋直径不宜小于 10 mm。
- 3 钢筋接头宜设置在受力小的区段, 宜采用焊接或绑扎的方式, 绑扎搭接长度不应小于 20 倍钢筋直径。
- 4 钢筋应包含横桥向和纵桥向两层钢筋, 受力较大方向的

钢筋宜置于外层。

6.3.3 焊钉的设置应符合下列规定：

1 焊钉连接件的材料、机械性能以及焊接要求应符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的规定。

2 焊钉连接件的设置应符合现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64—01 的规定。

3 当焊钉间距大于 250 mm 时,应对桥面板外周一圈的焊钉加密 1 倍,即间距为桥面板内部间距的一半,且不大于 150 mm。

4 焊钉间距宜与钢筋间距模数匹配设置。

6.3.4 UHPC 装配化施工或分段浇筑时,宜将接缝设置在受压区。横向接缝宜设置在两横隔板之间,纵向接缝宜设置在两纵肋之间,并应符合下列规定:

1 横缝宜设置在相邻两道横隔板间的跨中断面前后 $S_d / 4$ 范围内(S_d 为横隔板的纵向间距)。

2 行车道区域设置主梁腹板或纵隔板,纵缝宜设置在相邻两道主梁腹板或纵隔板间的中间截面左右 $S_{wb} / 4$ 范围内(S_{wb} 为主梁腹板或纵隔板的横向间距)。

3 行车道区域未设置主梁腹板或纵隔板,纵缝宜设置在相邻两道纵向加劲肋中间断面左右 $S_{rb} / 4$ 范围内(S_{rb} 为加劲肋的横向间距)。

6.3.5 UHPC 层与其他结构连接,应设置边界连接构造。

6.3.6 UHPC 层与沥青磨耗层之间的防水粘结层应符合下列规定:

1 防水粘结层施工前,UHPC 层表面应采用抛丸粗糙化处理,并保持 UHPC 层表面干燥、洁净。

2 防水粘结层性能指标不应低于现行行业标准《道桥用防水涂料》JC/T 975 中关于 PB(I)型防水粘结层的技术指标,60℃ 剪切强度不应小于 0.6 MPa。

7 预制结构中超高性能混凝土连接设计

7.1 一般规定

7.1.1 UHPC 连接可用于上部结构连接,也可用于预制墩柱与承台、预制墩柱与盖梁、预制墩柱节段连接。

7.1.2 预制结构连接采用的 UHPC 抗拉强度等级应符合下列规定:

- 1 上部结构横向连接不应低于 UT I。
- 2 下部结构竖向连接不应低于 UT II。

7.1.3 UHPC 连接中钢筋的保护层厚度应符合下列规定:

- 1 最外侧钢筋的保护层厚度不应小于 20 mm。
- 2 主筋的保护层厚度不应小于钢筋公称直径。

7.1.4 UHPC 用于预制构件连接时,钢筋连接可采用搭接,最小搭接长度应满足下列要求:

- 1 当钢筋直径 $d \leq 25$ mm 时,最小搭接长度应 $\geq 10d$ 。
- 2 当钢筋直径 $d > 25$ mm 且 $d \leq 32$ mm 时,最小搭接长度应 $\geq 12d$ 。
- 3 当钢筋为束筋时,最小搭接长度应根据束筋的等代直径进行换算。

7.1.5 UHPC 用于预制构件连接时,搭接钢筋的净距不宜小于 20 mm。

7.2 上部结构连接

7.2.1 上部结构连接方式可采用平直缝、钻石企口缝等形式(图 7.2.1),接触界面处宜做粗糙处理。

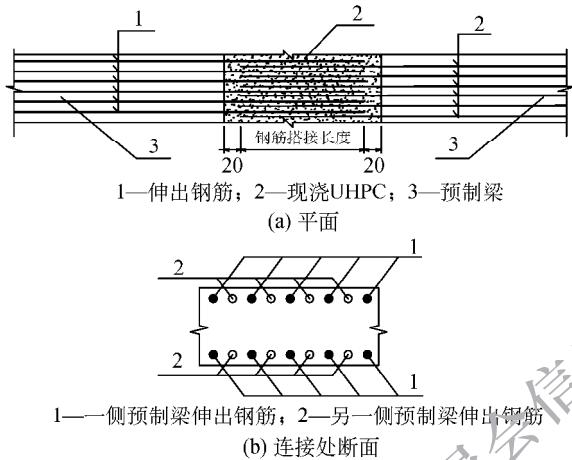
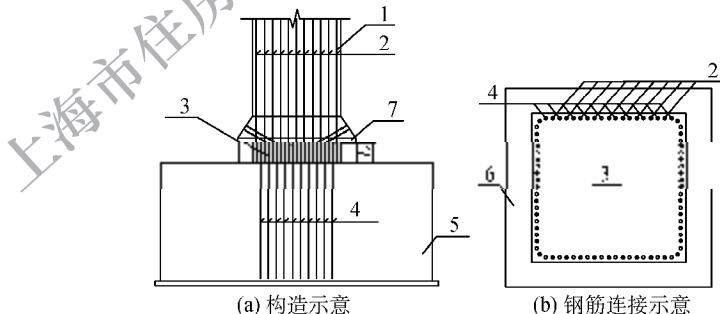


图 7.2.1 上部结构横向连接典型构造(mm)

7.2.2 UHPC 用于上部结构连接时, 现浇 UHPC 连接段的抗弯承载力不应小于预制梁段的抗弯承载力。

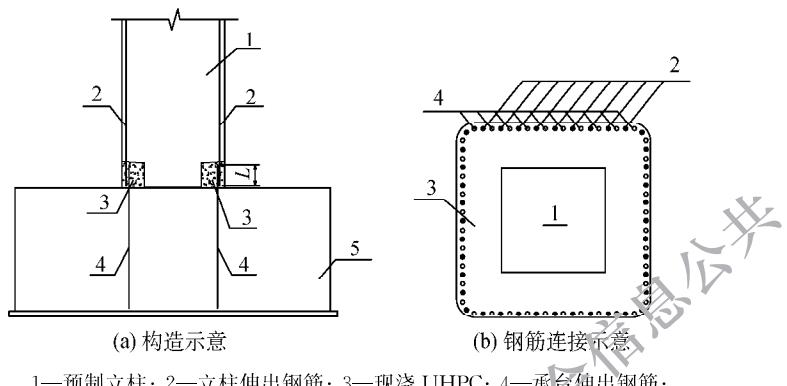
7.3 下部结构连接

7.3.1 预制墩柱与承台、预制墩柱与盖梁的连接方式可采用扩头式或环缝式(图 7.3.1-1、图 7.3.1-2)。



1—预制立柱；2—立柱伸出钢筋；3—现浇 UHPC；4—承台伸出钢筋；
5—现浇承台；6—墩底扩头；L—钢筋搭接长度

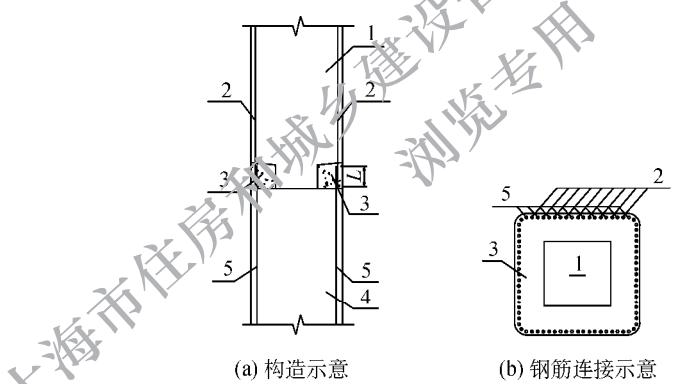
图 7.3.1-1 扩头式连接



1—预制立柱；2—立柱伸出钢筋；3—现浇 UHPC；4—承台伸出钢筋；
5—现浇承台； L —钢筋搭接长度

图 7.3.1-2 环缝式连接

7.3.2 预制墩柱节段的连接方式可采用环缝式(图 7.3.2)。



1—上节预制立柱；2—上节预制立柱伸出钢筋；3—现浇 UHPC；
4—下节预制立柱；5—下节预制立柱伸出钢筋； L —钢筋搭接长度

图 7.3.2 预制墩柱节段连接

7.3.3 满足本标准连接材料性能和构造要求规定的预制拼装桥墩，可按钢筋混凝土结构设计。

7.3.4 UHPC 用于下部结构连接时, 钢筋可采用束筋布置, 钢筋搭接长度应满足本标准第 7.1.4 条的相关要求。

7.3.5 UHPC 用于下部结构连接时, 应保证地震作用下破坏位置发生在预制墩柱区域, 并符合下列要求:

1 对于地震作用下发生弯曲破坏的高墩, 塑性铰位置位于预制墩柱区域, 应按现行行业标准《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 或《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231—01 进行地震位移的验算。

2 对于地震作用下发生弯剪破坏的矮墩, 应按现行行业标准《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 或《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231—01 进行桥墩抗弯和抗剪强度的验算。

7.3.6 在进行桥墩位移验算时, 墩柱高度应扣除 UHPC 连接段的高度。

7.3.7 UHPC 用于下部结构连接时, 连接段应作为能力保护构件设计, 按现行行业标准《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 或《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231—01 进行计算。其中, 计算时应计入 UHPC 抗拉强度的贡献, UHPC 实际承受的最大拉伸应变应小于 UHPC 的极限拉伸应变。

7.3.8 UHPC 用于下部结构连接时, 墩柱塑性铰区域内加密箍筋的配制应满足现行行业标准《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 或《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231—01 的要求, 但墩柱加密区分布长度应从预制段起计算。

8 维修加固

8.1 一般规定

8.1.1 采用 UHPC 对桥梁加固宜主要用于提高桥梁构件或结构的承载能力,也可用于提高桥梁构件的抗裂性。

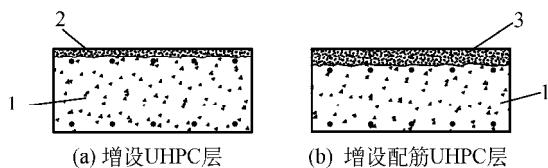
8.1.2 采用 UHPC 进行桥梁加固,应通过构造措施保证新增 UHPC 层与原结构的可靠连接。

8.1.3 采用 UHPC 进行桥梁加固,应按下列要求进行两阶段受力计算:

1 新浇 UHPC 层达到规定龄期的强度标准值前,按原构件截面进行计算。

2 新浇 UHPC 层达到规定龄期的强度标准值后,按加固后的整体截面进行计算。

8.1.4 UHPC 加固桥梁结构宜采用增设 UHPC 层或配筋 UHPC 层进行承载能力加固,如图 8.1.4 所示;采用增设的 UHPC 层时,厚度宜大于 25 mm;采用增设配筋 UHPC 层时,厚度宜大于 40 mm。加固方式宜采用在结构上表面进行摊铺,也可在结构下部或侧面支模后进行灌注施工。



1—原结构; 2—增设 UHPC 层; 3—增设配筋 UHPC 层

图 8.1.4 增设 UHPC 加固

8.1.5 在受拉区采用 UHPC 进行承载能力加固时,应采用应变硬化的 UHPC 材料,并宜采用配筋 UHPC 进行加固。

8.1.6 钢筋混凝土梁在承载能力不足时,可采用增设 UHPC 层或配筋 UHPC 层进行加固。在梁顶或梁底增设 UHPC 层,可提高构件的受弯承载力和斜截面受剪承载力;在腹板增设 UHPC 层,可提高构件的受剪承载力。

8.1.7 钢筋混凝土墩柱受压承载力不足时,可采用增设 UHPC 层或配筋 UHPC 层进行加固,增设方式应符合下列规定:

1 圆形立柱可采用环向增设方式进行加固。

2 矩形立柱可采用单侧结合或两侧增设方式进行加固。

8.2 受弯构件加固

8.2.1 在受拉区采用 UHPC 进行加固计算时,抗弯承载能力应按下式进行计算(图 8.2.1):

$$\begin{aligned}\gamma_0 M_d \leq & f_{sdU} A_{sU} (d_{sU} - d_{sc}) + f_{tud} h_U b (d_U - d_{sc}) + \\ & f_{sd} A_{sc} (d_{sc} - d_{sc}) - 0.85 f_{cdl} b x \left(\frac{0.85x}{2} - d_{sc} \right)\end{aligned}\quad (8.2.1-1)$$

$$x = \frac{f_{tud} h_U b + f_{sd} A_{sU} + f_{sd} A_{sc}}{0.85 f_{cdl} b} \quad (8.2.1-2)$$

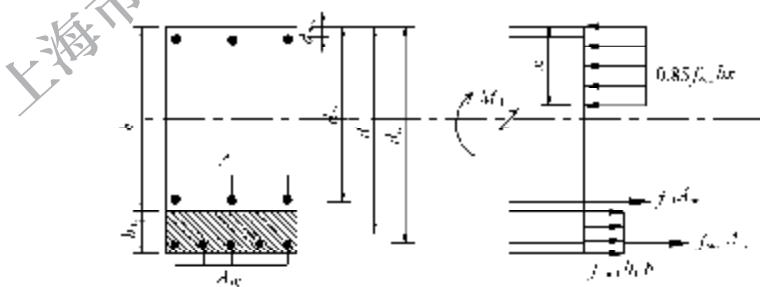


图 8.2.1 受拉区增设 UHPC 受弯构件的抗弯承载力计算

式中： γ_0 ——桥梁结构的重要性系数，按照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定采用；

f_{sd} ——原构件中普通钢筋的抗拉强度设计值(MPa)；

f_{cdl} ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)；

f_{Utd} ——UHPC 的抗拉强度设计值(MPa)；

A_{sU} ——加固后 UHPC 层中抗弯钢筋的横截面积(mm^2)；

A_{sc} ——原构件中混凝土受拉区钢筋的横截面积(mm^2)；

f_{sdU} ——UHPC 层中普通钢筋的抗拉强度设计值(MPa)；

h_U ——增设的 UHPC 层厚度(mm)；

h_c ——原构件截面的高度(mm)；

x ——加固后构件截面混凝土受压区计算高度(mm)；

b ——构件截面的宽度(mm)；

d_{sc} ——原构件受拉钢筋至受压区边缘的距离(mm)；

d_{sc} ——原构件受压钢筋至受压区边缘的距离(mm)；

d_{sU} ——加固后 UHPC 层中钢筋至受压区边缘的距离(mm)；

d_U ——增设的 UHPC 层截面重心至受压区边缘的距离(mm)。

8.2.2 在受压区采用 UHPC 进行加固时，抗弯承载能力应按下列公式进行计算(图 8.2.2)：

$$\gamma_0 M_d \leq \varepsilon_{cc} \cdot h_u \cdot E_u \cdot B \cdot \left(\frac{h_u}{2} + h_c - d_{sc} \right) +$$

$$+ \frac{(\varepsilon_{uc} - \varepsilon_{cc}) \cdot h_u \cdot E_u \cdot B}{2} \left(\frac{2h_u}{3} + h_c - d_{sc} \right) +$$

$$+ \frac{\varepsilon_{cc} \cdot (x - h_u) \cdot E_c \cdot B}{2} \left[\frac{2(x - h_u)}{3} + h_u + h_c - x - d_{sc} \right] +$$

$$\varepsilon_{su} \cdot E_s \cdot A_{su} (d_{su} - d_{sc}) + \varepsilon_{sc1} \cdot E_s \cdot A_{sc1} (d_{sc} - d_{sc})$$

(8.2.2-1)

$$x = \xi_b \cdot (h_u + h_c - d_{sc})$$

(8.2.2-2)

$$\varepsilon_{uc} = \frac{x \cdot \varepsilon_{sc}}{h_u + h_c - d_{sc} - x}$$

(8.2.2-3)

$$\varepsilon_{cc} = \frac{(x - h_u) \cdot \varepsilon_{sc}}{h_u + h_c - d_{sc} - x}$$

(8.2.2-4)

$$\varepsilon_{su} = \frac{[x - (h_u + h_c - d_{su})] \cdot \varepsilon_{sc}}{h_u + h_c - d_{sc} - x}$$

(8.2.2-5)

$$\varepsilon_{sc1} = \frac{[x - (h_u + h_c - d_{sc})] \cdot \varepsilon_{sc}}{h_u + h_c - d_{sc} - x}$$

(8.2.2-6)

$$\varepsilon_{sc} = \frac{f_{sd}}{E_s}$$

(8.2.2-7)

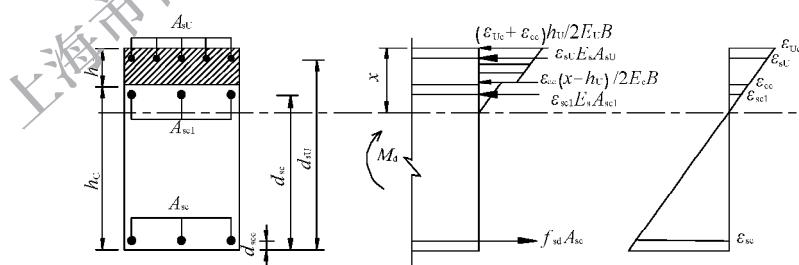


图 8.2.2 受压区增设 UHPC 层受弯构件的抗弯承载力计算

式中： ϵ_{cc} ——原构件受压区边缘混凝土的应变，应根据平截面假定进行计算；
 ϵ_{Uc} ——加固后新增 UHPC 的压应变，应根据平截面假定进行计算，并符合 $\epsilon_{Uc} \leq f_{Ucd}/E_U$ ；
 B ——加固后截面的宽度（mm）；
 f_{Ucd} ——UHPC 的抗压强度设计值（MPa）；
 E_U ——UHPC 的弹性模量（MPa）；
 E_s ——钢筋的弹性模量（MPa）；
 E_c ——原构件混凝土的弹性模量（MPa）；
 ϵ_{sU} ——加固后新增 UHPC 中钢筋的应变，应根据平截面假定进行计算，并符合 $\epsilon_{sU} \leq f_{sdU}/E_s$ ；
 f_{sdU} ——UHPC 层中普通钢筋的抗拉强度设计值（MPa）；
 ϵ_{sc1} ——原构件受压区混凝土中普通钢筋的应变，应根据平截面假定进行计算；
 ϵ_{sc2} ——原构件受拉区混凝土中钢筋的应变，应根据平截面假定进行计算；
 ϵ_{sc} ——原构件受拉区混凝土中钢筋的应变，应根据平截面假定进行计算；
 ξ_b ——受弯构件截面增大后的相对界限受压区高度，可根据原构件混凝土强度等级和截面受拉区钢筋种类，按照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 取用；
 A_{sU} ——加固后 UHPC 层中纵向钢筋的横截面积（ mm^2 ）；
 A_{sc1} ——原构件受压区混凝土中纵向钢筋的横截面积（ mm^2 ）；

A_{sc} ——原构件受拉区混凝土中纵向钢筋的横截面面积(mm^2)；

h_u ——增设的 UHPC 层厚度(mm)；

h_c ——原构件的截面高度(mm)；

x ——加固后构件截面混凝土受压区计算高度(mm)；

d_{sc} ——原构件混凝土受压区钢筋到受拉区边缘的距离(mm)；

d_{scs} ——原构件混凝土受拉区钢筋到受拉区边缘的距离(mm)；

d_{su} ——加固后 UHPC 层中钢筋到受压区边缘的距离(mm)。

8.2.3 截面受拉区和截面受压区同时增设 UHPC 层进行加固时,可根据平截面假定,按受力平衡计算得到。

8.2.4 加固后构件的抗剪承载能力,可按下列公式进行计算:

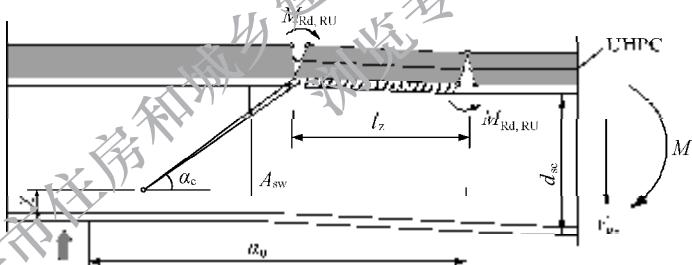


图 8.2.4 UHPC 层位于受拉区梁的抗剪模型

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,U} \quad (8.2.4-1)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{f_{ed} \cdot b_w}{2} \left[\frac{x}{\sin \alpha_c} \cdot (1 - \cos \alpha_c) \right] \quad (8.2.4-2)$$

$$V_{Rd,s} = A_{sw} \cdot f_{sc} \cdot \cot \alpha \quad (8.2.4-3)$$

$$V_{Rd,U} = \frac{2 \cdot M_{Rd} \cdot R_U}{l_z} \quad (8.2.4-4)$$

$$x = 0.9 \cdot w_m \cdot d_{eq} \quad (8.2.4-5)$$

$$w_m = \frac{A_{sc}f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}}{A_c f_{cd}} \quad (8.2.4-6)$$

$$d_{eq} = \frac{d_{sc}A_{sc}f_{sd} + d_U A_U f_{Utd} + d_{sU} A_{sU} f_{sUd}}{A_{sc}f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}} \quad (8.2.4-7)$$

$$l_z = a_0 - \frac{d_{sc}}{\tan \alpha_c} \quad (8.2.4-8)$$

式中： $V_{Rd,c}$ ——混凝土的极限抗剪承载力设计值(kN)；

$V_{Rd,s}$ ——纵向抗剪钢筋的极限抗剪承载力设计值(kN)；

$V_{Rd,U}$ ——配筋 UHPC 的极限抗剪承载力设计值(kN)；

x ——受压区高度；

w_m ——计算系数；

d_{eq} ——计算系数；

α_c ——原构件由弯矩和剪力引起的斜裂缝的倾角，通常情况下， $20^\circ \leq \alpha_c \leq 60^\circ$ ，近似取为 $\alpha_c = 35^\circ$ ；

l_z ——外力臂。

8.3 受压构件加固

8.3.1 对轴心受压构件，沿构件周边增设 UHPC 层进行加固，加固后构件的正截面受压承载力应按下式计算：

$$\gamma_0 N_d \leq 0.9 \varphi (\alpha_c f_{cd} A_{cl} + f'_{sd1} A'_{sl} + \alpha_U f_{Ucd} A_{U2} + \alpha_{s2} f'_{sd2} A'_{s2}) \quad (8.3.1)$$

式中： N_d ——作用组合的轴向力设计值(N)；

φ ——轴心受压构件稳定系数；

f_{cdl} ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)；
 f'_{sd1} ——原构件纵向钢筋抗压强度设计值(MPa)；
 A_{cl} ——原构件混凝土截面面积(mm^2)；
 A'_{sl} ——原构件中纵向普通钢筋的截面面积(mm^2)；
 A_{U2} ——新增 UHPC 的截面面积(mm^2)；
 A'_{s2} ——新增纵向普通钢筋的截面面积(mm^2)；
 f_{Ucd} ——UHPC 的抗压强度设计值(MPa)；
 f'_{sd2} ——新增 UHPC 层纵向钢筋抗压强度设计值(MPa)；
 α_c ——原构件混凝土强度提高系数,建议圆形截面取 $\alpha_c = 1.5$, 矩形截面取 $\alpha_c = 1.1$ ；
 α_u ——UHPC 强度利用程度的系数,建议取 0.6；
 α_{s2} ——新增纵向钢筋 A'_{s2} 的强度利用程度的系数,建议取 0.8。

8.3.2 对于周边增设 UHPC 层加固的矩形截面偏心受压构件, 加固后正截面承载力应按下列公式进行计算:

1 小偏压时

$$\gamma_0 N_d \leq \alpha_c f_{cdl} b(x - h_0) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} + f'_{sd1} A'_{sl} + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} - \sigma_{sc2} A_{sc2} - \alpha_{sU2} \sigma_{sU2} A_{sU2} - \sigma_{U2} h_{U2} b + \alpha_{U1} f_{Ucd} (B - b)x - \frac{1}{2} \sigma_{U2} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta_1} \right) \quad (8.3.2-1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e_{s2} &\leq \alpha_c f_{cdl} b(x - h_{U1}) \left(h_0 - h_{U1} - \frac{x}{2} \right) + \\ &\quad \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} \left(h_0 - \frac{h_{U1}}{2} \right) + f'_{sd1} A'_{sl} (h_0 - a'_{sl}) + \\ &\quad \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} (h_0 - a'_{sU1}) + \sigma_{U2} h_{U2} b \left(a_{s2} - \frac{h_{U2}}{2} \right) + \\ &\quad \alpha_{U1} f_{Ucd} (B - b)x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) - \frac{1}{2} \sigma_{U2} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta_1} \right) \left(\frac{h_2 - x/\beta_1}{3} - a_{s2} \right) \quad (8.3.2-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha_c f_{cdl} b (x - h_{U1}) \left(e_{s2} - h_0 + h_{U1} + \frac{x}{2} \right) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} \\
& \left(e_{s2} - h_0 + \frac{h_{U1}}{2} \right) + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b) x \left(e_{s2} - h_0 + \frac{x}{2} \right) \\
= & (\alpha_{sU2} \sigma_{sU2} A_{sU2} + \sigma_{sc2} A_{sc2}) e_{s2} - (\alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} + f'_{scd1} A'_{sc1}) \\
e'_{s1} + & \sigma_{U2} h_{U2} b \left(e_{s2} + a_{s2} - \frac{h_{U2}}{2} \right) + \frac{1}{2} \sigma_{U2} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta_1} \right) \\
\left(e_{s2} - \frac{h_2 - x/\beta_1}{3} + a_{s2} \right) & \quad (8.3.2-3)
\end{aligned}$$

$$e_{s2} = \eta e_0 + \frac{h_2}{2} - a_{s2} \quad (8.3.2-4)$$

$$e'_{s1} = \eta e_0 - \frac{h_2}{2} + a'_{s1} \quad (8.3.2-5)$$

式中： N_d ——作用组合的轴向力设计值(N)；

e_{s2} ——轴向力作用点至加固后截面受拉边或受压较小边纵向钢筋 A_{sU2} 和 A_{sc2} 合力点的距离(mm)；

e'_{s1} ——轴向力作用点至加固后截面受压较大边纵向钢筋 A'_{sU1} 和 A'_{sc1} 合力点的距离(mm)；

e_0 ——轴向力对加固后截面重心轴的偏心距(mm), $e_0 = M_d/N_d$ ；

M_d ——相当于轴向力 N_d 的弯矩设计值(N·mm)；

x ——加固后构件截面混凝土受压区计算高度(mm)；

f_{cdl} ——原构件混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)；

f_{Ucd} ——UHPC 的抗压强度设计值(MPa)；

f'_{scd1} ——原构件截面受压较大边纵向普通钢筋抗压强度设计值(MPa)；

f'_{sdU1} ——构件达到承载能力极限状态时, 受压较大边 UHPC 层新增纵向普通钢筋的抗压强度设计值

(MPa)；

A'_{sU1} ——受压较大边 UHPC 层新增纵向普通钢筋截面积
(mm^2)；

A_{sU2} ——受拉边或受压较小边 UHPC 层新增纵向普通钢筋
截面积(mm^2)；

σ_{sc2} ——构件达到承载能力极限状态时,受拉边或受压较小
边原构件纵向普通钢筋的应力值(MPa),按本标准
第 8.3.3 条规定计算, $\sigma_{sc2} \leq f_{sc2}$ ；

σ_{sU2} ——承载能力极限状态时,构件截面受拉边或受压较小
边 UHPC 层新增纵向普通钢筋的应力值(MPa),
按本标准第 8.3.3 条规定计算, $\sigma_{sU2} \leq f_{sdU2}$ ；

σ_{U2} ——承载能力极限状态时,构件截面受压较小边 UHPC
的应力值(MPa),按本标准第 8.3.3 条规定计算；

h_2 ——加固后截面的高度(mm)；

h_0 ——加固后构件截面受拉边或受压较小边纵向普通钢
筋 A_{sU2} 和 A_{sc2} 截面重心至受压较大边缘的距离
(mm), $h_0 = h_2 - a_{s2}$ ；

η ——偏心受压构件轴向力偏心距增大系数,按本标准第
8.3.4 条规定计算；

a'_{s1} ——原构件截面受压较大边边纵向普通钢筋 A'_{sc1} 和新
增纵向普通钢筋 A'_{sU1} 的合力作用点至加固后截面
受压较大边的距离(mm)；

a_{s2} ——原构件截面受拉边或受压较小边纵向普通钢筋
 A_{sc2} 和新增纵向普通钢筋 A_{sU2} 的合力作用点至加
固后截面受拉边或受压较小边的距离(mm)；

a'_{sU1} ——新增纵向普通钢筋 A'_{sU1} 重心至加固后截面受压
较大边的距离(mm)；

a'_{sc1} ——原构件纵向普通钢筋 A'_{sc1} 重心至加固后截面受压

较大边的距离(mm);
 α_{U1} ——构件达到承载能力极限状态时,受拉边或受压较小边的UHPC强度利用程度的系数,建议取0.6;
 α_{sU1} ——构件达到承载能力极限状态时,受拉边或受压较小边的新增的纵向钢筋 A'_{sU1} 的强度利用程度系数,建议取0.8;
 α_{sU2} ——构件达到承载能力极限状态时,受拉侧新增的纵向钢筋 A_{sU2} 的强度利用程度系数,建议取0.8;
 B, b ——加固后截面的宽度(mm)和原构件截面的宽度(mm);
 α_c ——原构件混凝土强度提高系数,矩形截面建议取
 $\alpha_c = 1.1$;
 α_{Uj}, β_1 ——等效矩形应力图形换算系数,取值见表8.3.2。

表8.3.2 等效矩形应力图形换算系数

强度等级 系数	U 120	U 140	U 160	U 180	U 200
α_{Uj}	0.93	0.92	0.90	0.87	0.85
β_1	0.76	0.73	0.71	0.70	0.68

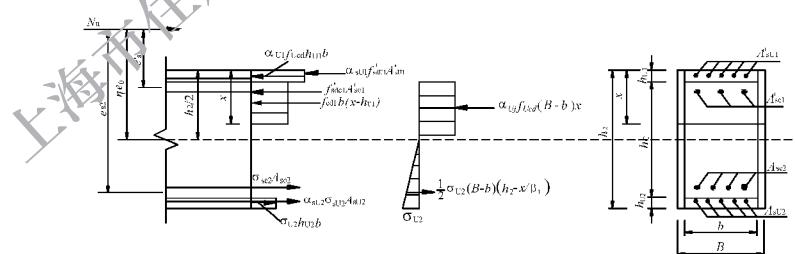


图8.3.2-1 周边增设UHPC层小偏心受压构件正截面抗压承载力计算

2 大偏压时

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d &\leq \alpha_c f_{cdl} b(x - h_{U1}) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} + f'_{sdcl} A'_{sc1} + \\ &\quad \alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b) x - f_{sdcl} A_{sc2} - \\ &\quad \alpha_{sU2} f_{sdU2} A_{sU2} - 0.25 f_{Utd} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta_1} \right) \end{aligned} \quad (8.3.2-6)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e_{s2} &\leq \alpha_c f_{cdl} b(x - h_{U1}) \left(h_0 - h_{U1} - \frac{x}{2} \right) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} \\ &\quad \left(h_0 - \frac{h_{U1}}{2} \right) + f'_{sdcl} A'_{sc1} \left(h_0 - a'_{sc1} \right) + \alpha_{sU1} f'_{sdU1} \\ &\quad A'_{sU1} \left(h_0 - a'_{sU1} \right) + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b) x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) - \\ &\quad 0.25 f_{Utd} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta_1} \right) \left(\frac{h_2 - x/\beta_1}{2} - a_{s2} \right) \end{aligned} \quad (8.3.2-7)$$

$$\begin{aligned} &\alpha_c f_{cdl} b(x - h_{U1}) \left(e_{s2} - h_0 + h_{U1} + \frac{x}{2} \right) + \alpha_{U1} f_{Ucd} b h_{U1} \\ &\quad \left(e_{s2} - h_0 + \frac{h_{U1}}{2} \right) + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b) x \left(e_{s2} - h_0 + \frac{x}{2} \right) \\ &= (f'_{sdcl} A_{sc2} + \alpha_{sU2} f_{sdU2} A_{sU2}) e_{s2} - (\alpha_{sU1} f'_{sdU1} A'_{sU1} + \\ &\quad f'_{sdcl} A'_{sc1}) e'_{s1} + 0.25 f_{Utd} (B - b) \left(h_2 - \frac{x}{\beta_1} \right) \\ &\quad \left(e_{s2} - \frac{h_2 - x/\beta_1}{2} + a_{s2} \right) \end{aligned} \quad (8.3.2-8)$$

式中: f_{sdcl} ——原构件截面受拉侧纵向普通钢筋抗拉强度设计值(MPa);

f_{sdU2} ——构件达到承载能力极限状态时,受拉侧 UHPC 层新增纵向普通钢筋的抗拉强度设计值(MPa);

f_{Utd} ——UHPC 的抗拉强度设计值(MPa)。

其余符号意义同式(8.3.2-1)~式(8.3.2-5)。

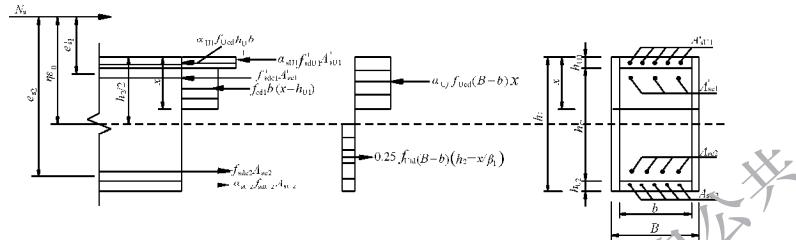


图 8.3.2-2 周边增设 UHPC 层大偏心受压构件正截面抗压承载力计算

3 当 $x \leq h_{U1}$ 时

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d &\leqslant \alpha_{U1} f_{Ucd} b x - f_{scd2} A_{sc2} - \alpha_{sU1} f_{sdU2} A_{sU2} + \\ &\quad \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b) x - 0.25 f_{Ucd} (B - b) \left(h_0 - \frac{x}{\beta_1} \right) \end{aligned} \quad (8.3.2-9)$$

$$\begin{aligned} \gamma_0 N_d e_{s2} &\leqslant \alpha_{U1} f_{Ucd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b) x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) - \\ &\quad 0.25 f_{Ucd} (B - b) \left(h_0 - \frac{x}{\beta_1} \right) \left(\frac{h_0 - x/\beta_1}{2} - a_{s2} \right) \end{aligned} \quad (8.3.2-10)$$

$$\begin{aligned} &\alpha_{U1} f_{Ucd} b x \left(e_{s2} - h_0 + \frac{x}{2} \right) + \alpha_{Uj} f_{Ucd} (B - b) x \left(e_{s2} - h_0 + \frac{x}{2} \right) \\ &= (f_{scd2} A_{sc2} - \alpha_{sU1} f_{sdU2} A_{sU2}) e_{s2} + 0.25 f_{Ucd} (B - b) \left(h_0 - \frac{x}{\beta_1} \right) \\ &\quad \times \left(e_{s2} - \frac{h_0 - x/\beta_1}{2} + a_{s2} \right) \end{aligned} \quad (8.3.2-11)$$

8.3.3 对于周边增设 UHPC 层加固的矩形截面偏心受压构件，构件截面受拉边或受压较小边原纵向受力钢筋的应力 σ_{sc2} 、新增纵向受力钢筋的应力 σ_{sU2} 以及 UHPC 层的应力 σ_{U2} 应按下列情况采用：

1 当 $\xi \leq \xi_b$ 时, 为大偏心受压构件, 此处, 相对受压区高度 $\xi = x/h_0$, $h_0 = h_2 - a_{s2}$, h_2 为加固后截面的高度, ξ_b 按原构件取值。这时, 取 $\sigma_{sc2} = f_{sd2}$, $\sigma_{su2} = f_{sdU2}$ 。

2 当 $\xi > \xi_b$ 时, 为小偏心受压构件, 纵向受力钢筋的应力可按下列公式计算:

$$\sigma_{sc2} = E_{sc2} \epsilon_{cu} \left[\frac{\beta(h_c + h_{U2} - a_{sc2})}{x} - 1 \right] \leq f_{sd2} \quad (8.3.3-1)$$

$$\sigma_{su2} = E_{su2} \epsilon_{cu} \left[\frac{\beta(h_c + h_{U2} - a_{su2})}{x} - 1 \right] \leq f_{sdU2} \quad (8.3.3-2)$$

$$\sigma_{U2} = E_{U2} \epsilon_{cu} \left[\frac{\beta \left(h_c + \frac{h_{U2}}{2} \right)}{x} - 1 \right] \leq f_{sdU2} \quad (8.3.3-3)$$

式中: ϵ_{cu} ——混凝土极限压应变, 取 0.0033;

E_{sc2} , E_{su2} , E_{U2} ——分别为原构件纵向受力钢筋、新增纵向受力钢筋以及 UHPC 的弹性模量 (MPa);

h_0 ——加固后构件截面受拉边或受压较小边纵向普通钢筋 A_{su2} 和 A_{sc2} 截面重心至受压较大边缘的距离 (mm);

a_{s2} ——原构件截面受拉边或受压较小边纵向普通钢筋 A_{sc2} 和新增纵向普通钢筋 A_{su2} 的合力作用点至加固后截面受拉边或受压较小边的距离 (mm);

h_c , h_2 ——原构件截面和加固后截面的高度 (mm);

f_{sd2} ——原构件截面受拉侧纵向普通钢筋抗拉强度设计值 (MPa);

f_{sdU2} ——构件达到承载能力极限状态时, 受拉侧 UHPC 层新增纵向普通钢筋的抗拉强

度设计值(MPa)；
 f_{Utu} ——UHPC 的抗拉强度设计值(MPa)；
 x ——加固后构件截面混凝土受压区高度
(mm)；
 β ——截面受压区矩形应力图高度与实际受
压区高度的比值, 取 $\beta = 0.8$ ；
 a_{sU2} ——新增纵向普通钢筋 A_{sU2} 重心至加固后截
面受拉边或受压较小边的距离(mm)；
 a_{sc2} ——原构件纵向普通钢筋 A_{sc2} 重心至加固后
截面受拉边或受压较小边的距离(mm)；
 h_{U1}, h_{U2} ——受压较大边、受拉边或受压较小边增设
的 UHPC 厚度(mm)。

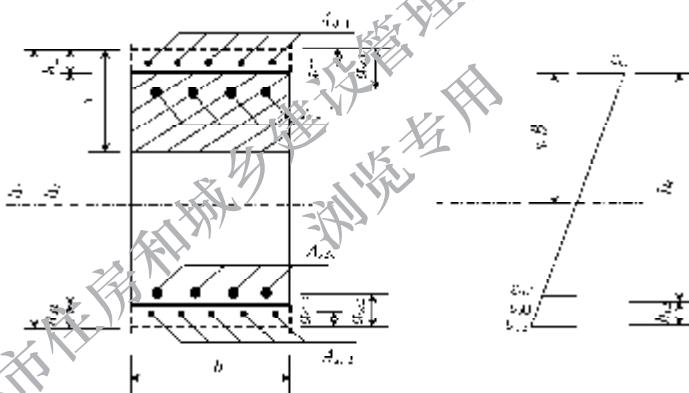


图 8.3.3 构件截面受拉边或受压较小边应力 σ_{sc2} 、 σ_{sU2} 和 σ_{U2} 计算

8.3.4 计算偏心受压构件正截面承载力, 当构件长细比 $l_0/i > 17.5$ 时, 应将轴向力对截面重心的偏心距 e_0 乘以偏心距增大系数 η , 其值按下列公式计算:

$$\eta = \left[1 + \frac{1}{1300e_0/h_0} \left(\frac{l_0}{h_0} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 \right] \psi_\eta \quad (8.3.4-1)$$

$$\zeta_1 = 0.2 + 2.7 \frac{e_0}{h_0} \leq 1.0 \quad (8.3.4-2)$$

$$\zeta_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h_2} \leq 1.0 \quad (8.3.4-3)$$

式中: l_0 ——构件的计算长度(mm),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 的规定选用。

ζ_1 ——荷载偏心率对截面曲率的影响系数。

ζ_2 ——构件长细比对截面曲率的影响系数。

ψ_η ——偏心距增大系数的修正系数,可按截面增大形式选用:采用对称形式的UHPC层加固,当 $e_0/h_2 \geq 0.3$ 时, $\psi_\eta = 1.1$;当 $e_0/h_2 < 0.3$ 时, $\psi_\eta = 1.2$;采用非对称形式的UHPC层加固,当 $e_0/h_2 \geq 0.3$ 时, $\psi_\eta = 1.2$;当 $e_0/h_2 < 0.3$ 时, $\psi_\eta = 1.3$ 。

8.4 构造要求

8.4.1 采用配筋UHPC进行加固时,受力主筋直径宜取 12 mm~28 mm,箍筋及构造钢筋直径宜取 8 mm~16 mm。

8.4.2 钢筋的最小净保护层厚度宜为 15 mm。

8.4.3 钢筋或预应力筋的净距应大于钢筋直径或 1.5 倍的纤维长度。

8.4.4 受拉区新增普通钢筋在 UHPC 中的锚固长度,应符合本标准第 5.5.2 条的规定。

8.4.5 承受疲劳荷载的构件中的钢筋应避免焊接。连接段应放置在低疲劳应力的区域。

8.4.6 增设 UHPC 层时,原构件的混凝土表面宜凿成凹凸差不小于 6 mm 的粗糙面,并宜采取种植钢筋或将加固层新增钢筋与原构件钢筋连接等措施。

8.4.7 植筋的计算和要求应符合现行行业标准《公路桥梁加固设计规范》JTG/T J22 的规定。

8.4.8 受弯构件采用底面增设 UHPC 层加固时,新增纵向受力钢筋宜采用直接焊接或短钢筋焊接方法与原纵向受力钢筋可靠连接在一起。当新增受力钢筋与原受力钢筋的连接采用短筋焊接时,短筋的直径不应小于 25 mm,长度不应小于直径的 5 倍,各短筋的中距不宜大于 500 mm。

8.4.9 对于受压构件加固,构造应符合下列规定:

1 采用两侧 UHPC 加固时,新增纵向受力钢筋中,靠近原纵向受力钢筋(角筋)应布置 1 根新增受力钢筋,并应与原受力钢筋采用短筋焊接。短筋的直径不应小于 20 mm,长度不应小于 $5d$ (d 为新增纵向受力钢筋和原纵向受力钢筋直径的较小值),各短筋的中距不应大于 500 mm。

2 采用周边 UHPC 加固(四周外包)时,应新增 U 形箍固定新增纵向受力钢筋,同一水平位置上的新增 U 形箍相互搭接并在搭接段焊接,单面焊的焊缝长度应为箍筋直径的 10 倍,双面焊的焊缝长度应为箍筋直径的 5 倍。

8.4.10 构造接缝应按照图 8.4.10 所示分两阶段进行处理。连接钢筋所占的比例不应小于接缝外 UHPC 截面面积 A_U (厚度为 h_U)的 2.4%。

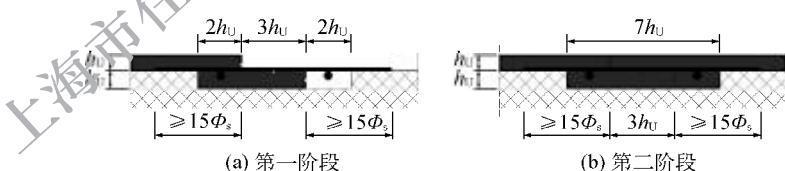


图 8.4.10 UHPC 层的接缝构造细节

9 施工及质量检验

9.1 一般规定

9.1.1 UHPC 的施工应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387、《混凝土质量控制标准》GB 50164 和现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650、《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2 的规定。

9.1.2 UHPC 的质量检验应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 和现行行业标准《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2 的规定。

9.2 施工准备

9.2.1 UHPC 施工前应制定详细的施工专项方案,施工专项方案应包括模板和支架、搅拌、运输、浇筑、养护等。

9.2.2 UHPC 预混料,钢纤维可预混入,也可另外掺加。预混料宜采用袋装形式包装,各原材料的计量偏差不应大于 1%,预混料的总计量偏差不应大于 2%。

9.2.3 UHPC 预混料运输过程中应密封防潮,储存于干燥、密闭、防潮、不受雨淋的场所,并应按品种、批号分别堆放,不得混堆。

9.2.4 UHPC 预混料自出厂之日起超过 3 个月时,应重新取样复验,复验合格后方可使用。

9.3 模板和支架

9.3.1 模板和支架应有足够的强度、刚度和稳定性,能承受UHPC施工过程中所产生的各种荷载。计算新浇筑UHPC对模板的最大侧压力时,UHPC的重力密度取 26 kN/m^3 。

9.3.2 UHPC采用蒸汽养护时,模板应采用钢模板。钢模板表面应进行防腐防锈处理。

9.3.3 模板表面宜涂覆水性脱模剂。

9.3.4 模板应在UHPC强度达到 40 MPa 后方可拆除,并应严格按照施工图设计的要求进行。

9.4 搅拌

9.4.1 UHPC搅拌方案应包括搅拌能力、施工配合比、计量偏差、搅拌时间、出机均匀性和工作性的检查。搅拌机的上水计量精度应控制在1%以内。

9.4.2 UHPC应采用强制式搅拌机搅拌,搅拌机的转速不宜低于 40 r/min 。

9.4.3 UHPC拌合前应根据施工配合比精确计量预混料和水的用量,用水量的允许偏差不应大于1%。

9.4.4 UHPC搅拌时间从加水开始计,拌合物流化后继续搅拌不宜少于 1 min ,总搅拌时间不宜少于 3 min 。UHPC搅拌完成后,应保证钢纤维不结团。

9.4.5 UHPC拌合物的扩展度应满足施工要求。当拌合物与浇筑地点相距较远时,尚应检验 1 h 扩展度, 1 h 扩展度的损失应控制在 100 mm 以内。当UHPC拌合物扩展度大于 650 mm 时,宜按照本标准附录B检验钢纤维分布均匀性,UHPC-钢组合桥面板中钢纤维离析程度应符合本标准附录B的SD.II及以上的要求。

9.5 运输

9.5.1 UHPC运输方案应包括运输方式、运输能力和前后工序的匹配性。

9.5.2 UHPC拌合物在运输过程应保证均匀,不产生分层、离析。

9.5.3 UHPC设备的运输能力应保证浇筑的连续性,UHPC加水拌合至浇筑的时间不宜超过120 min,气温超过30℃时不宜超过90 min,静置时间不得超过30 min。

9.6 浇筑

9.6.1 UHPC浇筑方案应包括界面清理、拌合物工作性的检查、浇筑顺序、振捣方式、施工缝的留设。

9.6.2 UHPC拌合物宜采用泵送方式浇筑,采用泵送方式浇筑时,应符合现行行业标准《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10的规定。

9.6.3 现场浇筑的UHPC应连续浇筑,浇筑过程应保证密实性,保持表面湿润,不应出现冷缝。

9.6.4 UHPC宜采用平板振捣器或模外振捣器振捣成型。当采用插入式振捣时,应试验确定对钢纤维分布无影响。浇筑和成型过程中应保证UHPC密实、钢纤维分布均匀以及构件的整体性,避免拌合物分层、离析以及钢纤维外露。

9.6.5 预制结构中的接缝界面处,应先对原结构表面混凝土进行凿毛并充分湿润,再浇筑UHPC。

9.7 养护

9.7.1 UHPC蒸汽养护时应符合现行国家标准《活性粉末混凝

土》GB/T 31387 的规定。

9.7.2 UHPC 常温养护应符合下列规定：

- 1 UHPC 浇筑完成后，应及时进行保湿养护和薄膜覆盖。
- 2 UHPC-钢组合桥面板，宜在覆膜前喷雾增湿，混凝土终凝前增加二次抹压过程。
- 3 UHPC 构件、预制构件连接及维修加固保湿养护不宜小于 7 d，UHPC-钢组合桥面板保湿养护不宜小于 14 d，且不应小于 7 d。

9.8 高温期和冬期施工

9.8.1 UHPC 高温期施工应符合下列规定：

- 1 UHPC 的施工宜避开中午高温的时间。
- 2 UHPC 预混料宜避光存放。
- 3 搅拌用水宜添加冰屑等，拌合用水温度不宜高于 20℃。

9.8.2 UHPC 冬期施工采用蓄热养护措施时，蓄热养护时间应保证 UHPC 抗压强度达到 40 MPa。

9.9 质量检验

9.9.1 UHPC 质量检验可分为原材料进场检验、施工前的配合比检验及施工过程中的现场抽检。

9.9.2 原材料进场检验应符合下列规定：

- 1 预混料的包装进场检验项目：是否受潮、是否漏料、保质期、合格证、包装规格，每 100 t 相同配比的预混料检验不应少于 5 次。
- 2 钢纤维不预混时，钢纤维的质量检验应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定，每 100 t 钢纤维检验不应少于 1 次。

9.9.3 施工前的配合比检验应符合下列规定：

- 1 配合比检验应采用工程实际使用的原材料。
- 2 力学性能和施工性能应检测表 9.9.3 中所列的项目,各项目指标应符合设计要求。

表 9.9.3 UHPC 配合比检验项目

序号	材料性能(28 d 标准养护)	试验方法
1	抗压强度(MPa)	《活性粉末混凝土》GB/T 31387
2	3 d 抗压强度(MPa)	
3	弹性段抗拉强度(MPa)	本标准附录 A
4	极限抗拉强度(MPa)	
5	极限抗拉强度/弹性段抗拉强度	
6	极限拉伸应变(%)	
7	弹性模量(GPa)	《活性粉末混凝土》GB/T 31387
8	28 d 收缩率	《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082
9	初始坍落扩展度(mm)	《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283
10	1 h 坍落扩展度(mm)	
11	钢纤维分布均匀性	本标准第 9.4.5 条和附录 B

3 对于配合比检验,如全部检验项目符合设计和本标准要求,则判定该产品合格;如检验项目不完全符合设计和本标准的要求,则重新取样,取样数量加倍。如取样结果全部合格,则判定合格,如重新取样检验项目不符合设计和本标准要求,则判定不合格。

4 同一标段、同一配合比施工前进行一次配合比检验。如施工过程中配合比有调整,应对调整后的 UHPC 重新检测表 9.9.3 所列的项目。

9.9.4 施工过程中的现场抽检应符合下列规定:

- 1 同一标段、同一配合比、同一生产批号材料情况下,应连续浇筑 200 m³ 且前后施工不超过 1 个月为一批进行抽检。每批

取样检验不应少于 1 次,检验项目按表 9.9.4 要求进行。

2 每施工日应检测表 9.9.4 中第 1~3 项。

表 9.9.4 UHPC 现场抽检项目

序号	材料性能(28 d 标准养护)	试验方法
1	抗压强度(MPa)	《活性粉末混凝土》GB/T 31387
2	初始坍落扩展度(mm)	《自密实混凝土应用技术规程》
3	1 h 坍落扩展度(mm)	JGJ/T 283
4	弹性段抗拉强度(MPa)	本标准附录 A
5	极限抗拉强度(MPa)	
6	极限抗拉强度/弹性段抗拉强度	
7	极限拉伸应变(%)	
8	钢纤维分布均匀性	本标准第 9.4.5 条和附录 B

9.9.5 成型后的 UHPC 应均匀完好,不应有龟裂和收缩裂纹现象,并应衔接密实,无脱空、台阶现象。

附录 A 拉伸试验

A. 1 一般规定

A. 1. 1 应采用无缺口 UHPC 试件测试在单轴拉伸作用下荷载-位移曲线。

A. 1. 2 UHPC 弹性抗拉强度、弹性极限应变、抗拉强度、极限拉应变和抗拉弹性模量的测定应按本附录执行。

A. 2 试件和试验设备

A. 2. 1 拉伸试验设备的最大试验力范围宜为 200 kN~300 kN。

A. 2. 2 试验量测设备应能测量抗压及抗拉强度, 测量力的误差范围在 $\pm 1\%$, 位移传感器量程在 $\pm 5 \text{ mm} \sim \pm 30 \text{ mm}$, 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. 2. 3 试验夹具设计应避免偏心及次弯矩。

A. 2. 4 中间纯拉段固定有 2 个矩形金属架, 二者之间的距离, 即试件的测试标距 L 为 150 mm。

A. 2. 5 两个金属架之间安装 4 个精度为 0.0001 mm 的线性可变位移计。

A. 3 试件制造和准备

A. 3. 1 试件应符合下列规定:

- 1 试件形状和尺寸见图 A. 3. 1。
- 2 每组试验应制作 6 个试件。

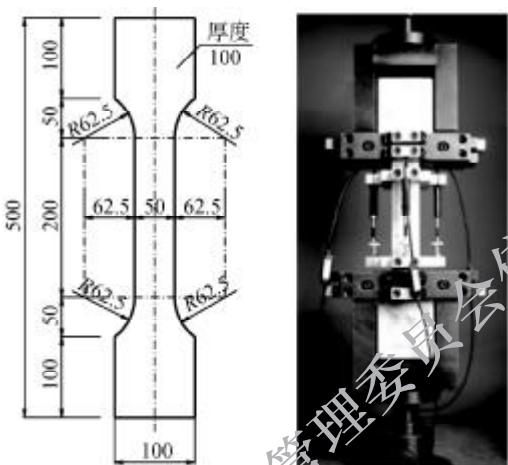


图 A. 3. 1 单轴拉伸试验试件尺寸(mm)

A. 3. 2 试件制作应符合下列规定:

- 1 材料搅拌均匀后应一次性连续浇筑成型。
 - 2 对于扩展度小于 650 mm 的 UHPC, 在试件成型过程中可进行插捣。
- A. 3. 3 试件浇筑成型后应立即覆盖塑料膜, 并储存在 20℃ 环境中。试件浇筑完 24 h 后进行拆模并进行标准养护, 在 28 d 试验前提前取出晾置 3 d~5 d。

A. 4 试验实施

- A. 4. 1 每个试件承受单调荷载, 试验前宜进行 0.5 kN 的预加载, 正式试验按照位移速度 0.05 mm/min 施加, 直至试件拉力下降至峰值拉力的 50% 时结束试验。测试应变硬化型 UHPC 时,

可在残余力达到峰值拉力的 80%时停止加载。

A.4.2 试件中如出现试件拉伸断在 150 mm 标距外的情况,即轴拉荷载-位移曲线出现倒缩现象,测试得到的应变硬化段部分可认为有效。

A.5 强度和变形的确定

A.5.1 弹性抗拉强度应按下式计算:

$$f_{Ute} = \frac{F_A}{b_m \cdot h_m} \quad (A.5.1)$$

式中: F_A ——弹性极限拉力;

b_m , h_m ——分别为标距段中心截面的宽度和高度,取沿标距段纵向等间距 3 个不同测量位置的平均值。

A.5.2 抗拉强度应按下式计算:

$$f_{Ult} = \frac{F_B}{b_m \cdot h_m} \quad (A.5.2)$$

式中: F_B ——试验最大拉力。

A.5.3 抗拉极限拉应变应按下式计算:

$$\epsilon_{Ult} = \frac{d_m}{L_m} \quad (A.5.3)$$

式中: ϵ_{Ult} —— F_B 对应的应变;

d_m —— F_B 对应的平均位移;

L_m ——标距段的平均长度。

A.5.4 试验结果的评判应符合下列规定:

1 根据 A.4.1、A.4.2 的试验算出每个 UHPC 试件的弹性抗拉强度 f_{Ute} 、极限抗拉强度 f_{Ult} 以及 f_{Ult}/f_{Ute} 。

2 每组试件中不少于 3 个试件具备应力-应变全曲线(包括

弹性段和塑性段),即判定本组试验有效;反之,则判定为无效。

3 满足性能等级的有效试件数量不应少于 3 个。

4 f_{Utek} 和 f_{Utu} 的测试值取有效试件的最小值。

A. 6 试验报告

A. 6. 1 试验报告应包含下列基本信息:

- 1 委托方的名称和地址,测试对象。
- 2 实验室名称和试验负责人。
- 3 试件的制作和试验日期。
- 4 试件的尺寸测量(包括长度、宽度、厚度)。

A. 6. 2 试验报告应列出下列试验结果:

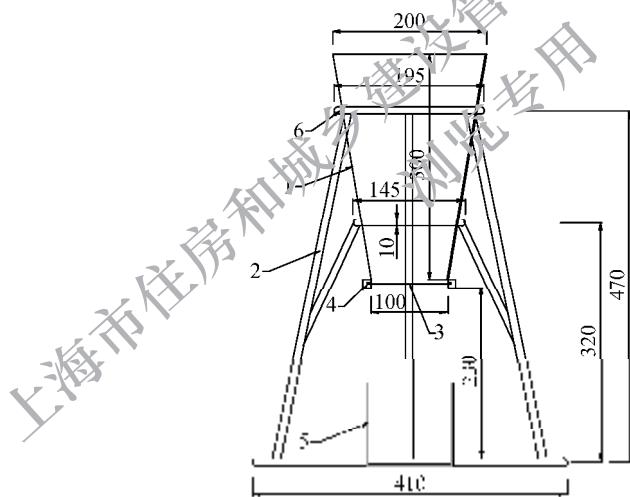
- 1 完整的应力-应变图。
- 2 弹性阶段应力的最大值 f_{Ute} 以及对应的应变 ϵ_{Ute} 。
- 3 应变软化型为拉伸应变达到 0.15% 时对应的拉应力,应变硬化型为最大极限应力 f_{Utu} 和极限应变 ϵ_{Utu} 。
- 4 f_{Utu}/f_{Ute} 比值。

附录 B 超高性能混凝土拌合物中钢纤维分布均匀性的检验方法

B.0.1 本检测方法适用于测定桥梁工程用UHPC拌合物中钢纤维分布均匀性。

B.0.2 倒置坍落度筒装置应符合下列规定：

1 坍落度筒应符合现行行业标准《混凝土坍落度仪》JG/T 248 的规定。倒置坍落度筒装置是将坍落度筒倒置于支架上，筒口由翅板封住，安装时应保持倒坍落度筒轴线的垂直度(图B.0.2)。



1—坍落度筒；2—钢制支架；3—翅板；4—钢制凹槽；
5—容重筒，体积为1L；6—钢制环箍

图 B.0.2 倒置坍落度筒装置(mm)

2 电子天平:称量 1 kg,感量 1 g(用于称量钢纤维)。

3 容量筒:标准 1 L 容量筒 2 个。

4 振捣:重量为 1 kg 的木槌。

5 其他:铁铲、容器、磁铁等。

B.0.3 试验步骤应符合下列规定:

1 将拌合物灌到高出坍落度筒口,振捣沿坍落度筒侧壁均匀敲击,左右侧壁各 10 次。刮去多余的拌合物,并填平表面凹陷部分。

2 抽出翅板,放出坍落度筒中拌合物填满 1 L 标准容量筒,然后立即闭合翅板,取出容量筒;再缓缓抽出翅板继续放料,当坍落度筒中剩余约 1/3 拌合物时,用另一个 1 L 标准容量筒接住,将两个容量筒振实,表面刮平,分别做好标记。

3 将两个容量筒中拌合物分别倒入不小于 10 倍拌合物体积的大容器中,加水搅拌。可将稀浆慢慢倒出,在所余的砂石及钢纤维残渣中用磁铁搜集钢纤维,并仔细洗净粘附在纤维上的异物。必要时,将收集的纤维倒入另外容器中二次加水搅拌,重新收集。

B.0.4 钢纤维处理应符合下列规定:

1 实验室做法:收集的钢纤维应在 105℃±5℃的温度下烘干至恒重,烘干时间不应少于 4 h,每隔 1 h 称量 1 次,直至连续 2 次称量之差小于较小值的 0.5% 时为止。冷却至室温后应称其重量,钢纤维精确至 1 g。

2 施工现场做法:收集的钢纤维晾晒于筛网中,可采用吹风机、吸水纸等辅助措施清理表面水分,直至吸水纸表面无明显水渍,再连续称量 2 次,称量之差小于较小值的 1% 即可。

注意:区分两个容量筒中收集的钢纤维,处理过程中钢纤维不可有丢失。

B.0.5 钢纤维含量应按下式计算:

$$W_s = \frac{m_s}{V} \quad (\text{B. 0. 5})$$

式中: W_s ——UHPC 中钢纤维含量(kg/m^3);

m_s ——容量筒中钢纤维质量(g);

V ——容量筒容积(L), 本试验为 1 L。

B. 0. 6 钢纤维的体积率应按下式计算:

$$\rho_s = \frac{W_s}{\gamma_s} \times 100\% \quad (\text{B. 0. 6})$$

式中: ρ_s ——UHPC 中钢纤维体积率(%);

γ_s ——钢纤维的质量密度(kg/m^3)。

B. 0. 7 计算得到两个容量筒中钢纤维体积率之差与二者平均值之比为 n , UHPC 中钢纤维均匀性以离析程度 SD 表示, UHPC 拌合物离析程度判定见表 B. 0. 7。

表 B. 0. 7 UHPC 拌合物离析程度判定

离析程度等级	n
SD. I	$n < 10\%$
SD. II	$10\% \leq n < 20\%$
SD. III	$20\% \leq n < 40\%$
SD. IV	$n \geq 40\%$

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1) 表示很严格,非这样做不可的用词:

正面词采用“必须”;

反面词采用“严禁”。

2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的用词:

正面词采用“应”;

反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的用词:

正面词采用“宜”;

反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的用词,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《通用硅酸盐水泥》GB 175
- 2 《混凝土结构加固设计规范》GB 50367
- 3 《混凝土外加剂》GB 8076
- 4 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433
- 5 《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736
- 6 《活性粉末混凝土》GB/T 31387
- 7 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080
- 8 《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081
- 9 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》
GB/T 50082
- 10 《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119
- 11 《混凝土质量控制标准》GB 50164
- 12 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2
- 13 《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166
- 14 《道桥用防水涂料》JC/T 975
- 15 《混凝土坍落度仪》JG/T 248
- 16 《混凝土用水标准》JGJ 63
- 17 《高性能混凝土用骨料》JG/T 568
- 18 《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10
- 19 《自密实混凝土应用技术规程》JGJ/T 283
- 20 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》
JTG 3362
- 21 《公路工程技术标准》JTG B01
- 22 《公路桥涵设计通用规范》JTG D60

- 23 《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64
- 24 《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310
- 25 《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64—01
- 26 《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231—01
- 27 《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650
- 28 《公路桥梁加固设计规范》JTG/T J22
- 29 《预拌混凝土生产技术标准》DG/TJ 08—227

上海市住房和城乡建设管理委员会信息公
共划览专用