

新疆维吾尔自治区地方标准 DB65

J XXX—2024

DB65/T 8XXX—2024

超高性能混凝土桥梁应用技术标准

(征求意见稿)

2024-XX-XX 发布

2024-XX-XX 实施

新疆维吾尔自治区住房和城乡建设厅
新疆维吾尔自治区市场监督管理局

联合发布

前 言

根据新疆维吾尔自治区住房和城乡建设厅《关于发布 2022 年第一批自治区工程建设地方标准制（修）订计划的通知》的要求，在大量的试验基础之上，结合自治区工程实践经验，参考国内活性粉末混凝土、超高性能混凝土材料的检测、试验相关论文及技术标准，经专家深入论证，并在广泛征求意见的基础上，编制完成本标准。

本标准分六章一个附录。主要内容包括 1 总则；2 术语和符号；3 材料性能；4 超高性能混凝土结构设计基本规定；5 超高性能混凝土构件设计；6 超高性能混凝土-钢组合桥面板构件设计；7 超高性能混凝土连接设计；8 施工及质量检验；9 施工安全与环保。

本标准由自治区住房和城乡建设厅负责管理，由上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司负责具体内容的解释。在使用过程中如发现需要修改和补充之处，请反馈至上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司（地址：乌鲁木齐水磨沟区安居南路 802 号鸿瑞豪庭 3 号楼 22 层；邮编：830000；联系电话：0991-4185881；邮箱：zhangpeijun@smedi.com）。

本标准主编单位：上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司
新疆交通建设集团股份有限公司

本标准参编单位：同济大学

本标准主要起草人： 马 磊 张培君 王俊颜 肖汝诚
李建中 石雪飞 黄 虹 郭 瑞
王瑞龙 赵晓梅 王 巍 施 军
张旭昌 王鸿锴 鲁传安 侯凤国
王 浩 苏 俭 卫 璞 王 斐

本标准主要审查人： 徐 镛 陈向东 侯荣军 翟新铭
张 忠 张振钦 晋 强

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术 语	2
2.2	符 号	4
3	材料	10
3.1	超高性能混凝土	10
3.2	其他	13
4	超高性能混凝土结构设计基本规定	14
5	超高性能混凝土构件设计	17
5.1	一般规定	17
5.2	持久状况承载力极限状态计算	19
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	39
5.5	构造要求	40
5.6	加固设计	41
6	超高性能混凝土-钢组合桥面板构件设计	49
6.1	一般规定	49
6.2	结构计算	50
6.3	构造要求	54
7	超高性能混凝土连接设计	57
7.1	一般规定	57
7.2	上部结构连接	58
7.3	下部结构连接	58
8	施工及质量检验	62
8.1	一般规定	62
8.2	施工准备	62
8.3	模板和支架	63

8.4	搅拌	63
8.5	运输	64
8.6	浇筑	64
8.7	养护	65
8.8	高温和冬期施工	65
8.9	质量检验	66
8.10	构件预制、运输、安装	66
9	施工安全与环保	69
9.1	一般规定	69
9.2	安全施工	69
9.3	环境保护	70
	附录 A 超高性能混凝土收缩应变和徐变应变计算	71
	本标准用词说明	73
	引用标准名录	74
	条文说明	75
1	总 则	78
2	术语和符号	79
3	材料性能	80
3.1	超高性能混凝土	80
4	超高性能混凝土结构设计基本规定	84
5	超高性能混凝土构件设计	87
5.1	一般规定	87
5.2	持久状况承载力极限状态计算	87
5.3	持久状况正常使用极限状态计算	96
5.4	持久状况和短暂状况构件应力计算	97
5.5	构造要求	97
5.6	加固设计	99
6	超高性能混凝土-钢组合桥面板结构设计	102
6.1	一般规定	102
6.2	结构计算	103

6.3	构造要求	104
7	桥梁预制构件连接设计	106
7.1	一般规定	106
7.2	上部结构连接	107
7.3	下部结构连接	107
8	施工及质量检验	109
8.1	一般规定	109
8.2	施工准备	109
8.3	模板和支架	109
8.4	搅拌	110
8.5	运输	110
8.6	浇筑	111
8.7	养护	111
8.8	高温和冬期施工	112
8.9	质量检验	112
8.10	构件预制、运输、安装	113

1 总 则

1.0.1 为使超高性能混凝土桥梁的设计、施工、质量检验符合安全可靠、适用耐久、技术先进、经济合理的要求，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于市政桥梁工程超高性能混凝土结构的设计、施工及质量检验。

1.0.3 超高性能混凝土桥梁的设计、施工及质量检验，除应符合本标准的规定外，尚应符合国家、行业和本自治区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
(简称超高性能混凝土)

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 预混料 premix

由水泥、矿物掺合料、骨料按超高性能混凝土配合比配制的干混料，可包含纤维和固态外加剂。

2.1.3 弹性抗拉强度 elastic tensile strength

单轴拉伸试件的应力-应变曲线由线性转变为非线性时所对应的拉伸应力。

2.1.4 抗拉强度 tensile strength

单轴拉伸试件应力-应变曲线上的拉伸应力峰值。

2.1.5 抗弯拉强度 flexural tensile strength

100mm×100mm×400mm 棱柱体试件承受弯矩作用折断破坏时，试件表面所承受的极限拉应力，也称抗折强度。

2.1.6 极限拉应变 ultimate tensile strain

单轴拉伸试件应力-应变曲线上的拉伸应力峰值所对应的应变。

2.1.7 应变硬化 strain hardening

单轴拉伸试件的拉伸应力达到弹性抗拉强度后，随应变增大而持续上升的现象。

2.1.8 应变软化 strain softening

单轴拉伸试件的拉伸应力达到弹性抗拉强度后，随应变增大

而持续下降的现象。

2.1.9 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} —— 超高性能混凝土的弹性模量；
- G_u —— 超高性能混凝土的剪切变形模量；
- UC 120 —— 立方体抗压强度标准值为 120MPa 的超高性能混凝土抗压强度等级；
- UT 0 —— 抗拉性能满足 0 级要求的超高性能混凝土抗拉性能等级；
- 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_{sd} —— 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} —— 超高性能混凝土轴心抗压强度设计值；
- f_{Uck} —— 超高性能混凝土轴心抗压强度标准值；
- f'_{Uck} —— 施工阶段的立方体超高性能混凝土轴心抗压强度标准值；
- f_{Ucuk} —— 超高性能混凝土立方体抗压强度标准值；
- f_{Ute} —— 超高性能混凝土弹性抗拉强度；
- f_{Uted} —— 超高性能混凝土弹性抗拉强度设计值；
- f_{Utek} —— 超高性能混凝土弹性抗拉强度标准值；
- f_{Utud} —— 超高性能混凝土抗拉强度；
- f_{Utud} —— 超高性能混凝土抗拉强度设计值；
- f_{Utuk} —— 超高性能混凝土抗拉强度标准值；
- f'_{Utk} —— 施工阶段的超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值；
- f_{vd} —— 钢材的抗剪强度设计值；
- h_u —— 超高性能混凝土构件或超高性能混凝土层的厚度；

- l_u —— 超高性能混凝土构件或超高性能混凝土层的裂缝计算长度；
 t —— 龄期；
 t_0 —— 加载龄期；
 ε_{Ucc} —— 超高性能混凝土的徐变应变；
 ε_{Ucu} —— 非均匀受压时的超高性能混凝土极限压应变；
 ε_{Uel} —— 超高性能混凝土的弹性应变；
 ε_{Us} —— 超高性能混凝土的总收缩值；
 $\varepsilon_{Us\infty}$ —— 超高性能混凝土的最终收缩应变值；
 ε_{Utu} —— 超高性能混凝土的极限拉应变；
 μ —— 超高性能混凝土的泊松比；
 $\sigma_{U,D}$ —— 超高性能混凝土名义疲劳弯拉应力允许值；
 $\varphi_{U,\infty}(t_\infty, t_0)$ —— 超高性能混凝土的最终徐变系数；
 w_{ut} —— 超高性能混凝土裂缝宽度。

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} —— 受压区超高性能混凝土的压应力合力；
 ——
 F_{Ut} —— 受拉区超高性能混凝土的拉应力合力；
 ——
 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
	—	
$V_{Rd,U}$	—	超高性能混凝土基体的抗剪承载力；
	—	
$V_{Rd,s}$	—	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；
	—	
σ_{p0} 、 σ'_{p0}	—	受拉区、受压区纵向预应力钢筋合力点处超高性能混凝土 — 法向应力等于 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 — 生的超高性能混凝土预压应力；
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超高性能混凝土的 — 法向拉应力；
σ_{tp}	—	在作用频遇组合和预加力产生的超高性能混凝土主拉应 — 力；
$\sigma_{t,max}^f$	—	疲劳验算时超高性能混凝土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，构件截面受压边缘超高性能 — 混凝土的应力；
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

- 处超高性能混凝土的应变；
- 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超高性能混凝土的应变；
- ε_{Uc} — 截面达到抗弯承载力极限时，构件截面受压边缘超高性能混凝土的应变；
- ε_{Ut} — 受拉区预应力钢筋屈服时，构件截面受拉边缘超高性能混凝土的应变。

2.2.3 几何参数有关符号

- A_U — 超高性能混凝土构件的截面净面积；
-
- A_{Ut} — 超高性能混凝土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 — 截面受压区超高性能混凝土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、预应力钢筋合力点至受压区边缘的距离；
 a_t — 超高性能混凝土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；
 h_U — 超高性能混凝土构件或加固增设的超高性能混凝土层厚度；
 x — 截面受压区高度；
 x_c — 超高性能混凝土构件截面受压区高度；

- x_t — 超高性能混凝土构件拉应变小于 $2.0\varepsilon_{UtL}$ 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 材料

3.1 超高性能混凝土

3.1.1 超高性能混凝土的原材料水泥、矿物掺合料、骨料、纤维、外加剂和水等应符合现行地方标准《超高性能混凝土检验标准》DB65/T 8014 的规定。

3.1.2 超高性能混凝土抗压强度等级应按边长为 100mm 立方体试件的抗压强度标准值确定，抗压强度等级不应低于 UC120，抗压强度标准值 f_{Uck} 应按表 3.1.2 采用。

表 3.1.2 超高性能混凝土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

3.1.3 超高性能混凝土轴心抗压强度标准值 f_{Uck} 应按表 3.1.3 采用。

表 3.1.3 超高性能混凝土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

3.1.4 超高性能混凝土轴心抗压强度设计值 f_{Ucd} 应按表 3.1.4 采用。

表 3.1.4 超高性能混凝土轴心抗压设计值

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

3.1.5 超高性能混凝土应按拉伸力学特性分为应变硬化型和应变软化型，各抗拉性能等级的弹性抗拉强度标准值 f_{Utek} 、抗拉强度标准值 f_{Utuk} 和极限拉应变 ϵ_{Utu} 应按表 3.1.5 采用。

表 3.1.5 超高性能混凝土弹性抗拉强度标准值、抗拉强度标准值和极限拉应变

抗拉性能分	应变软化型	应变硬化型			
抗拉性能等	UT 0	UT I	UT II	UT III	UT IV
f_{Utek} (MPa)	7.0	7.0	7.0	8.0	10.0
f_{Utuk} (MPa)	4.9*	7.0	7.7	9.6	12.0
f_{Utuk}/f_{Utek}	0.7*	1.0	1.1	1.2	1.2
ϵ_{Utu} (%)	0.15*	0.15	0.15	0.2	0.2

注：*指按现行地方标准《超高性能混凝土检验标准》DB65/T 8014 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} 。

3.1.6 超高性能混凝土弹性抗拉强度设计值 f_{Uted} 及抗拉强度设计值 f_{Utud} 应按下列公式计算：

$$f_{Uted} = \frac{\eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utek}}{\gamma_U} \quad (3.1.6-1)$$

$$f_{Utud} = \frac{\eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utuk}}{\gamma_U} \quad (3.1.6-2)$$

式中： η_{hU} —— 构件厚度影响系数：当构件厚度 h_U 小于 50mm 时，取 1.0；当构件厚度大于 100mm 时，取 0.8；当构件厚度为 50mm~100mm 时，按直线内插取值（图 3.1.6）；

η_k —— 构件尺寸和制造工艺影响系数：当进行整体计算分析时，取 1.0；当进行局部计算分析时，取 0.85；

γ_U —— 材料分项系数：当为不配筋构件时，取 1.4；当为普通钢筋或预应力钢筋构件时，取 1.3。

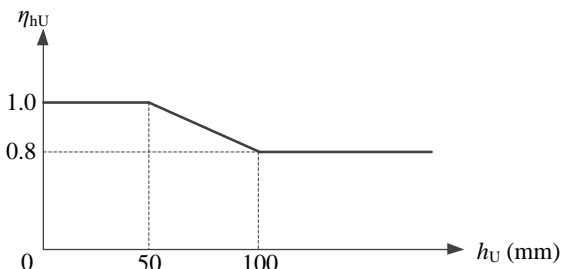


图 3.1.6 构件厚度影响系数

3.1.7 超高性能混凝土抗弯拉强度等级应按 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 棱柱体抗折强度试验确定，抗弯拉强度 f_{Uf} 应按表 3.1.7 采用。

表 3.1.7 超高性能混凝土抗弯拉强度

抗弯拉强度等级	UF 12	UF 14	UF 18	UF 22	UF 25	UF 28
f_{Uf} (MPa)	12	14	18	22	25	28

3.1.8 超高性能混凝土受压或受拉时的弹性模量 E_{Uc} 应按表 3.1.8 采用。当有可靠试验依据时， E_{Uc} 可按实测数据确定。

表 3.1.8 超高性能混凝土弹性模量

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

3.1.9 超高性能混凝土剪切变形模量 G_{Uc} 可按表 3.1.8 中 E_{Uc} 值的 0.4 倍采用，超高性能混凝土泊松比 ν_{Uc} 可采用 0.2。

3.1.10 超高性能混凝土抗渗性能等级、抗冻融性能等级和抗硫酸盐侵蚀性能等级应按现行国家、地方标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 和《超高性能混凝土检验标准》DB65/T 8014 确定，各性能等级应符合表 3.1.10-1~3.1.10-3 的规定。

表 3.1.10-1 超高性能混凝土抗渗性能

	性能等级
抗渗性能	$\geq \text{P}25$

表 3.1.10-2 超高性能混凝土抗冻融性能

	性能等级		
抗冻融性能	F500	F700	≥F900

表 3.1.10-3 超高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀性能

	性能等级		
抗硫酸盐侵蚀性能	KS150	KS200	≥KS300

3.1.11 超高性能混凝土应满足自密实性能要求，坍落扩展度的等级应符合表 3.1.11 的规定。

表 3.1.11 超高性能混凝土坍落扩展度

坍落扩展度等级	SF1	SF2	SF3
初始坍落扩展度 (mm)	550~655	660~755	760~850
1h 坍落扩展度 (mm)	550~600	600~700	700~800

3.2 其他

3.2.1 超高性能混凝土桥梁中采用的普通混凝土、普通钢筋、预应力钢筋的力学性能指标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。

3.2.2 超高性能混凝土-钢组合桥面板构件中采用的钢材、普通螺栓和锚栓、高强度螺栓、铆钉的物理性能和设计指标应符合现行标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定。

4 超高性能混凝土结构设计基本规定

4.0.1 超高性能混凝土桥梁结构应采用以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法，并按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。

4.0.2 超高性能混凝土桥梁结构应根据制作、运输、安装和使用过程中承受的作用，进行持久状况、短暂状况、偶然状况和地震状况等四种设计状况的极限状态设计。四种设计状况均应进行承载能力极限状态设计；对持久状况还应进行正常使用极限状态设计；对短暂状况及地震状况，可根据需要进行正常使用极限状态设计；对偶然状况，可不进行正常使用极限状态设计。

4.0.3 超高性能混凝土桥梁结构的设计安全等级应按现行强制性工程建设规范《城市道路交通工程项目规范》GB55011 的规定确定。桥梁类别应按现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 或《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定执行。

4.0.4 超高性能混凝土桥梁结构设计采用的作用、作用分类、代表值和作用效应组合，除地震作用外，应符合现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 或《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。

4.0.5 超高性能混凝土桥梁应进行抗震设计，并应符合现行行业标准《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 的规定。

4.0.6 超高性能混凝土构件正截面承载力应按下列基本假定进行计算：

- 1 构件弯曲后，截面仍应保持平面。
- 2 截面受拉区超高性能混凝土拉应变在不超过 2.0 倍极限拉

应变 ($2.0 \varepsilon_{Utu}$) 内应按 f_{Utud} 计入抗拉强度, 拉应变超过 $2.0 \varepsilon_{Utu}$ 的部分, 不应计入超高性能混凝土的抗拉强度。

3 超高性能混凝土受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时, 受压区超高性能混凝土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_c 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, 且受压侧超高性能混凝土最大压应变不超过极限压应变 $\varepsilon_{Ucu} = 0.0033$ 。

4 超高性能混凝土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, 极限状态压应力取普通混凝土的轴心抗压强度设计值。

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。

4.0.7 桥梁工程超高性能混凝土结构计算应计入材料收缩、徐变的影响。计算超高性能混凝土徐变时, 可假定徐变与超高性能混凝土应力呈线性关系。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 3.0.8 条取用; 超高性能混凝土的收缩应变, 可按本标准第 3.0.8 条取用。

4.0.8 桥梁工程超高性能混凝土结构设计时, 超高性能混凝土构件宜采用应变硬化型超高性能混凝土, 维修加固工程中可采用应变软化型超高性能混凝土。结构计算时, 配筋超高性能混凝土 (UT I 级以上) 材料的本构关系如图 4.0.8 所示。超高性能混凝土的抗拉强度设计值应按本标准第 3.0.7 条计算。

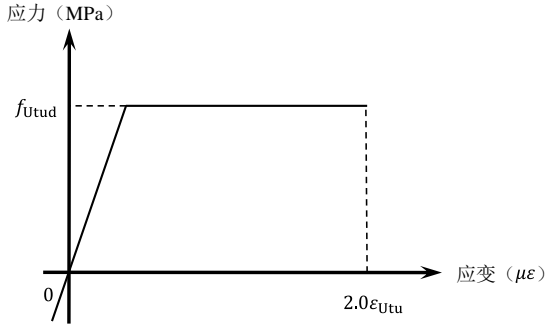


图 4.0.8 配筋超高性能混凝土本构关系图

4.0.9 超高性能混凝土结构的承载力计算可采用本标准计算公式，也可采用按本标准 4.0.6 条规定计入材料非线性本构的有限元计算方法。

4.0.10 超高性能混凝土结构受力分析时，无配筋超高性能混凝土材料的重度可取 26kN/m^3 ，配筋超高性能混凝土材料重度可取 27kN/m^3 。

4.0.11 桥梁工程超高性能混凝土结构及构件的设计使用年限应符合现行行业标准《公路工程技术标准》JTG B01 的规定。超高性能混凝土-钢组合桥面板结构中的超高性能混凝土层为结构层，设计使用年限应与桥梁主体结构一致。

5 超高性能混凝土构件设计

5.1 一般规定

5.1.1 超高性能混凝土受弯构件、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超高性能混凝土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 普通钢筋超高性能混凝土构件

$$\xi_b = \frac{1}{1 + \frac{f_{sd}}{E_s \varepsilon_{Ucu}}} \quad (5.1.1-1)$$

2 预应力超高性能混凝土构件

$$\xi_b = \frac{1}{1 + \frac{0.002}{\varepsilon_{Ucu}} + \frac{f_{pd} - \sigma_{p0}}{E_p \varepsilon_{Ucu}}} \quad (5.1.1-2)$$

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} —— 非均匀受压时的超高性能混凝土极限压应变，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超高性能混凝土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。

表 5.1.1 相对界限受压区高度 ξ_b

钢筋种类	ξ_b
HPB300	0.73
HRB400、HRBF400、RRB400	0.67
HRB500	0.61

注：1 截面受拉区内配置不同种类钢筋的受弯构件，其 ξ_b 值应选用相应于各种钢筋的较小者。

2 $\xi_b = x_b/h_0$ ， x_b 为纵向受拉钢筋达到设计强度且受压区超高性能混凝土同时达到极限压应变时（表中数值以极限压应变 0.0033 计）构件受压区应力图高度。

5.1.2 超高性能混凝土受弯构件、偏心受力构件纵向钢筋应力按下列规定确定：

1 普通钢筋

$$\sigma_{si} = E_s \varepsilon_{Ucu} \left(\frac{h_{0i}}{x} - 1 \right) \quad (5.1.2-1)$$

2 预应力钢筋

$$\sigma_{pi} = E_p \varepsilon_{Ucu} \left(\frac{h_{0i}}{x} - 1 \right) + \sigma_{poi} \quad (5.1.2-2)$$

3 按式（5.1.2-1）、（5.1.2-2）计算的纵向钢筋应力应符合本标准第 4.0.7 条 5 款的规定。

式中： — 第 i 层纵向钢筋截面重心至截面受压边缘的距离；

h_{0i}

x — 超高性能混凝土受压区高度；

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_{poi} — 第 i 层纵向预应力钢筋截面重心处超高性能混凝土法向应力等于零时，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 应变硬化型超高性能混凝土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 仅设置普通钢筋的超高性能混凝土轴拉构件，正截面抗拉承载力应按下列式计算：

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

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

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

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

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超高性能混凝土构件的截面净面积。

II 受弯构件

5.2.2 矩形截面超高性能混凝土受弯构件的正截面抗弯承载力计算应符合下列规定：

1 矩形截面超高性能混凝土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下列规定（图 5.2.2-1），构件抗弯承载力按式（5.2.2-1）计算：

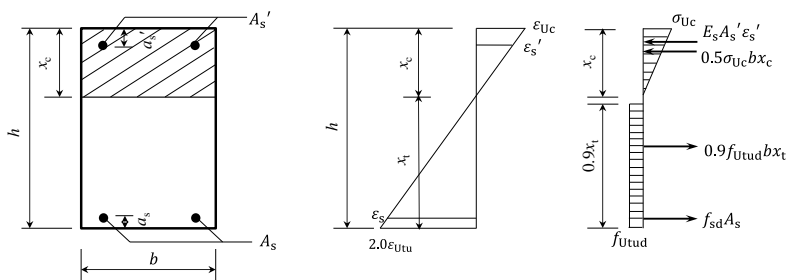


图 5.2.2-1 配置纵向普通钢筋的矩形截面超高性能混凝土受弯构件正截面承载力计算

$$\begin{aligned} \gamma_0 M_d \leq f_{sd} A_s \left(h - a_s - \frac{x_c}{3} \right) + 0.9 f_{Utud} b x_t \left(0.55 x_t + \frac{2x_c}{3} \right) \\ + E_s A'_s \varepsilon'_s \left(\frac{x_c}{3} - a'_s \right) \end{aligned} \quad (5.2.2-1)$$

上式中超高性能混凝土截面受压区高度 x_c 应按下列各式计算：

$$F_{Uc} + E_s A'_s \varepsilon'_s = F_{Ut} + f_{sd} A_s \quad (5.2.2-2)$$

其中：

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

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

$$F_{Ut} = 0.9 f_{Utud} b x_t \quad (5.2.2-5)$$

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

$$\varepsilon'_s = \frac{x_c - a'_s}{h - x_c} 2.0\varepsilon_{Ut} \quad (5.2.2-7)$$

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

截面受压区高度应符合下列要求：

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

2 矩形截面超高性能混凝土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下列规定（图 5.2.2-2），构件抗弯承载力按式（5.2.2-10）计算：

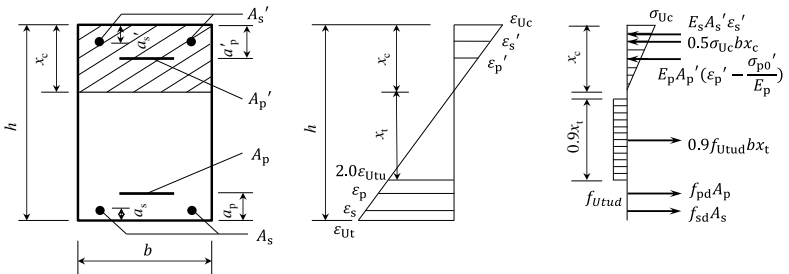


图 5.2.2-2 配置纵向普通钢筋及预应力钢筋的矩形截面超高性能混凝土受

弯构件正截面承载力计算

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

上式中超高性能混凝土截面受压区高度 x_c 应按下列下式计算：

$$F_{Uc} + E_s A'_s \varepsilon'_s + E_p A'_p \left(\varepsilon'_p - \frac{\sigma'_{p0}}{E_p} \right) \quad (5.2.2-11)$$

$$= F_{Ut} + f_{pd} A_p + f_{sd} A_s$$

其中：

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

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

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

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

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

$$\varepsilon'_s = \frac{x_c - a'_s}{h - x_c} \varepsilon_{Ut} \quad (5.2.2-17)$$

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

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

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

截面受压区高度应符合下列要求：

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

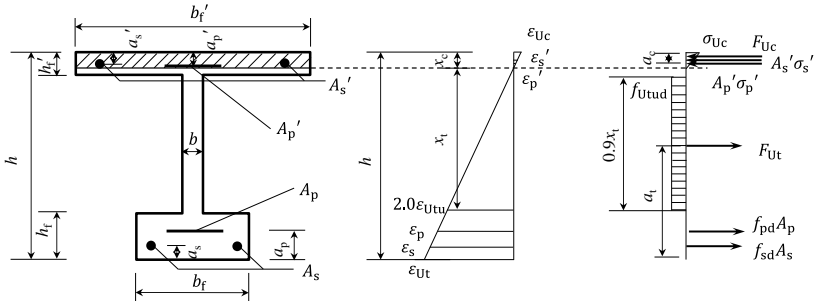
式中： γ_0 —— 桥梁的重要性系数，按本标准第 4.0.3 条的规定采用；

M_d —— 弯矩设计值；

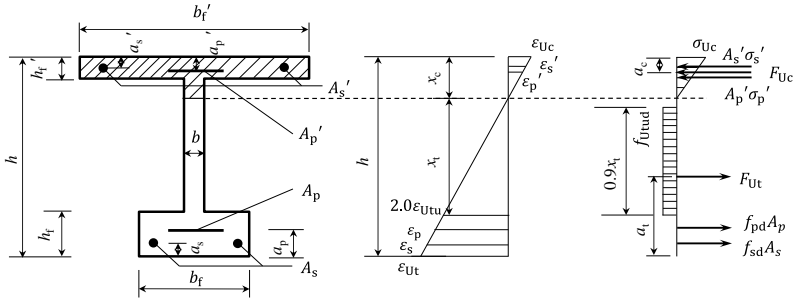
F_{Uc}	——	受压区超高性能混凝土的压应力合力；
F_{Ut}	——	受拉区超高性能混凝土的拉应力合力；
f_{Utud}	——	超高性能混凝土的抗拉强度设计值；
f_{Ucd}	——	超高性能混凝土的抗压强度设计值；
ε_{Utu}	——	超高性能混凝土的极限拉应变；
E_s	——	普通钢筋的弹性模量；
f_{sd}	——	普通钢筋抗拉强度设计值；
A_s, A'_s	——	构件受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；
b	——	矩形截面宽度；
x_c	——	截面受压区高度；
h	——	截面高度；
a_s, a'_s	——	构件受拉区、受压区纵向普通钢筋重心的到截面受拉边缘的距离；
x_t	——	超高性能混凝土构件拉应变小于 $2.0\varepsilon_{Utu}$ 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超高性能混凝土的应变；
ε_{Ut}	——	受拉区预应力钢筋屈服时，构件截面受拉边缘超高性能混凝土的应变；
ε_{Uc}	——	截面达到抗弯承载力极限时，构件截面受压边缘超高性能混凝土的应变；

- 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超高性能混凝土的应变；
- 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超高性能混凝土的应变；
- σ_{p0} —— 受拉区预应力钢筋合力点处超高性能混凝土法向应力等于零时预应力钢筋的应力；
- σ'_{p0} —— 受压区预应力钢筋合力点处超高性能混凝土法向应力等于零时预应力钢筋的应力；
- σ_{Uc} —— 截面达到抗弯承载力极限时，构件截面受压边缘超高性能混凝土的应力。

5.2.3 工字形截面超高性能混凝土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下列规定（图 5.2.3）：



（情形 a：受压区位于上翼缘内）



(情形 b: 受压区位于腹板内)

图 5.2.3 工字形截面超高性能混凝土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

$$\begin{aligned} \gamma_0 M_d \leq & f_{sd} A_s (h - a_c - a_s) + f_{pd} A_p (h - a_c - a_p) \\ & + f_{Utud} A_{Ut} (h - a_c - a_t) \\ & - \sigma'_s A'_s (a'_s - a_c) - \sigma'_p A'_p (a'_p - a_c) \end{aligned} \quad (5.2.3-1)$$

超高性能混凝土截面受压区高度 x_c 按下列公式计算:

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

其中:

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

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

有效受拉区位于腹板范围内:

$$A_{Ut} = 0.9bx_t \quad (5.2.3-5)$$

有效受拉区位于受拉翼缘范围内:

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

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

$$\sigma_{Uc} = E_{Uc}\varepsilon_{Uc} = E_{Uc} \frac{2.0\varepsilon_{Utu}x_c}{x_t} \leq f_{Ucd} \quad (5.2.3-8)$$

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

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

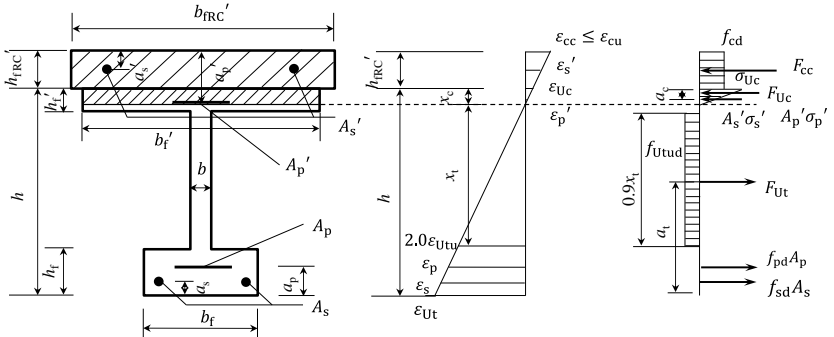
- 式中: b —— 工字形截面腹板宽度;
 b_f —— 工字形截面受拉翼缘宽度;
 b'_f —— 工字形截面受压翼缘宽度;
 h_f —— 工字形截面受拉翼缘高度;
 h'_f —— 工字形截面受压翼缘高度;
 a_c —— 截面受压区超高性能混凝土压应力合力重心距离受压边缘的距离;
 a_t —— 超高性能混凝土构件有效受拉区合力重心距受拉边缘的距离;
 A_{Ut} —— 超高性能混凝土构件有效受拉区面积。

2 情形 b: 受压区位于腹板内

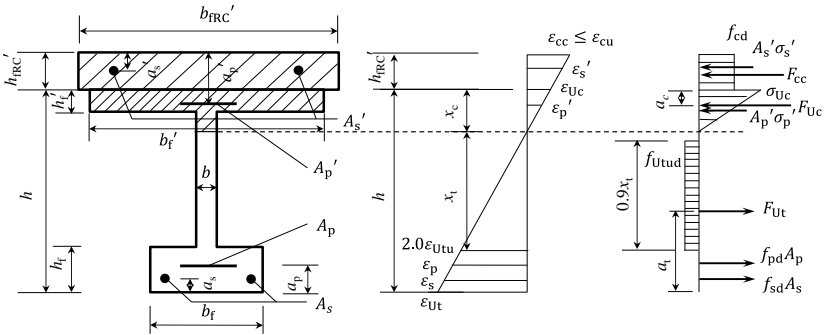
正截面抗弯承载力计算同式(5.2.3-1)所示, 构件超高性能混凝土截面受压区高度 x_c 应按式(5.2.3-2)计算, 其中 F_{Uc} 计算按式(5.2.3-3)进行, 其余分项计算同情形 a。

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

5.2.4 工字形截面超高性能混凝土与普通钢筋混凝土桥面板（简称 RC 桥面板）组成的超高性能混凝土-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下列规定（图 5.2.4）：



（情形 a：受压区位于上翼缘内）



（情形 b：受压区位于腹板内）

图 5.2.4 超高性能混凝土-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

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

组合截面受压区高度

$$x = h'_{\text{fRC}} + x_c \tag{5.2.4-2}$$

其中 x_c 按下列公式计算:

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

其中:

$$F_{\text{cc}} = f_{\text{cd}} b'_{\text{fRC}} h'_{\text{fRC}} \tag{5.2.4-4}$$

$$F_{\text{Uc}} = 0.5 \sigma_{\text{Uc}} b'_f x_c \tag{5.2.4-5}$$

$$F_{\text{Ut}} = f_{\text{Utud}} A_{\text{Ut}} \tag{5.2.4-6}$$

有效受拉区位于腹板范围内:

$$A_{\text{Ut}} = 0.9 b x_t \tag{5.2.4-7}$$

有效受拉区位于受拉翼缘范围内:

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

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

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

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

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

- 式中： F_{cc} —— 受压区 RC 桥面板的压应力合力；
 f_{cd} —— 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 —— 超高性能混凝土-RC 组合梁截面受压区高度；
 a_c —— 组合截面中超高性能混凝土梁受压区压应力合力重心距离超高性能混凝土梁受压边缘的距离；
 a_t —— 超高性能混凝土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(5.2.4-1)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。

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

5.2.5 超高性能混凝土构件斜截面抗剪承载力应按下述公式计算：

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

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

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

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

- 式中： V_{Rd} —— 抗剪承载力设计值；
 $V_{Rd,U}$ —— 超高性能混凝土基体的抗剪承载力；
 $V_{Rd,s}$ —— 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} —— 超高性能混凝土的弹性抗拉强度设计值；
 f_{Utud} —— 超高性能混凝土的极限抗拉强度设计值；
 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：

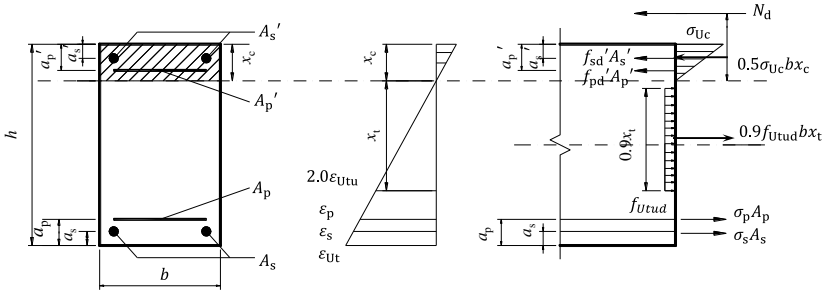


图 5.2.6 矩形截面偏心受压构件正截面抗压承载力计算

$$\gamma_0 N_d \leq 0.5\sigma_{Uc}bx_c + \sigma'_s A'_s + \sigma'_p A'_p - \sigma_p A_p - \sigma_s A_s - 0.9x_t b f_{Utud} \quad (5.2.6-1)$$

$$\gamma_0 N_d e \leq 0.5\sigma_{Uc}bx_c \left(h_0 - \frac{x_c}{3} \right) + \sigma'_s A'_s (h_0 - a'_s) + \sigma'_p A'_p (h_0 - a'_p) - 0.9x_t b f_{Utud} \left(h_0 - x_c - \frac{x_t}{2} \right) \quad (5.2.6-2)$$

$$e = \eta e_0 + h/2 - a \quad (5.2.6-3)$$

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 $\sigma_s = f_{sd}$ 、 $\sigma_p = f_{pd}$ ， σ_{Uc} 、 σ'_s 、 σ'_p 、 x_t 按式 (5.2.2-12) ~ (5.2.2-20) 计算；截面受压区高度 x_c 尚应符合下列规定：

i) 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：

$$x_c \geq 2a' \quad (5.2.6-4)$$

ii) 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 $\left(f'_{pd} - \sigma'_{p0}\right)$ 为负时：

$$x_c \geq 2a'_s \quad (5.2.6-5)$$

截面受拉区高度 x_t 应符合下列规定：

$$x_t \leq h - x_c \quad (5.2.6-6)$$

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 $\sigma_{uc}=f_{ucd}$ ， σ_s 、 σ_p 按本标准第5.1.5条计算； σ'_s 、 σ'_p 、 x_t 应按下式计算：

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

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

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

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：

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

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

$$\xi_1 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h} \leq 1.0 \quad (5.2.6-12)$$

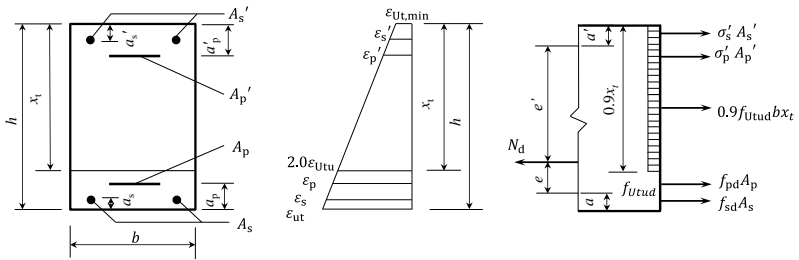
式中： γ_0 —— 桥梁的重要性系数，按本标准第4.0.3条的规定采用；

N_d —— 轴力设计值；

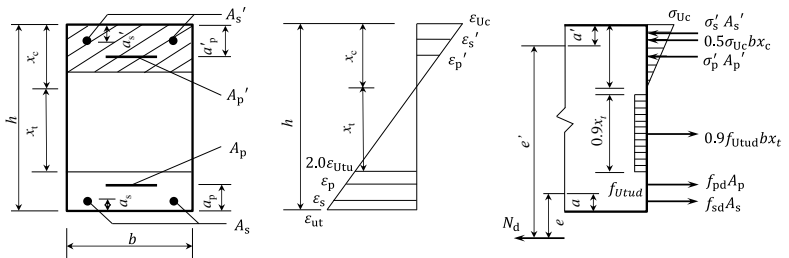
- e_0 —— 轴力对截面重心轴的偏心距, $e_0 = M_d/N_d$, 不小于 20mm 和偏压方向构件截面最大尺寸的 1/30 两者之间的较大值;
- e —— 轴力作用点至截面受拉边或受压较小边纵向钢筋 A_s 和 A_p 合力点的距离;
- x_t —— 超高性能混凝土构件拉应变小于 $2.0\varepsilon_{Utu}$ 的受拉区高度;
- M_d —— 相应于轴力的弯矩设计值;
- η —— 偏心距增大系数;
- f_{Utd} —— 超高性能混凝土的抗拉强度设计值;
- f_{Ucd} —— 超高性能混凝土的抗压强度设计值;
- ε_{Utu} —— 超高性能混凝土的极限拉应变;
- 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 2 款的规定取用；
 σ_{p0} 、 σ'_{p0} —— 受拉区、受压区纵向预应力钢筋合力点处超高性能混凝土法向应力等于零时预应力筋应力，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；
 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：



a) 小偏心受拉构件



b) 大偏心受拉构件

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_p 的合力点和 A'_s 、 A'_p 合力点之间时:

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

$$\gamma_0 N_d e' \leq f_{sd} A_s (h'_0 - a_s) + f_{pd} A_p (h'_0 - a_p) + 0.9 x_t b f_{Utud} \left(\frac{x_t}{2} - a' \right) \quad (5.2.7-2)$$

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

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,超高性能混凝土受压区的高度尚应满足本标准第 5.1.4 条的要求。

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

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

式中： 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' —— 纵向受压钢筋合力点至截面受拉边缘的距离。

IV 受扭、受冲切及局部承压构件

5.2.8 超高性能混凝土受扭、受冲切及局部承压构件承载力验算可参照行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362的相关规定,并以超高性能混凝土抗拉强度设计值 f_{Utd} 、超高性能混凝土抗压强度设计值 f_{Ucd} 分别替换 JTG 3362 中常规混凝土抗拉强度设计值 f_{td} 及抗压强度设计值 f_{cd} 进行计算。

V 疲劳强度验算

5.2.9 超高性能混凝土构件疲劳验算时,应对正截面受拉区边缘纤维的超高性能混凝土拉应力进行验算;超高性能混凝土应力计算可采用名义应力法,按线弹性状态计算。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。

5.2.10 超高性能混凝土疲劳验算时,受拉区边缘纤维的应力应按下式进行验算:

$$\sigma^f \leq \sigma_{\text{t,n}} \quad (5.2.10)$$

式中:—— 疲劳验算时超高性能混凝土截面受拉区边缘纤维的最大拉应力;

$\sigma_{\text{t,max}}^f$
 $\sigma_{\text{U,D}}$ —— 超高性能混凝土名义疲劳弯拉应力允许值,按本标准第 3.0.13 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 预应力超高性能混凝土构件,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 3.0.10、3.0.11 条的规定。

II 抗裂验算及裂缝宽度验算

5.3.4 预应力超高性能混凝土受弯构件进行正截面拉应力计算应符合下列规定：

1 A 类预应力超高性能混凝土受弯构件截面受拉边缘的拉应力应按下式计算：

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leq 0.6f_{Utek} \quad (5.3.4)$$

式中： σ_{st} —— 在作用频遇组合下构件抗裂验算边缘超高性能混凝土的法向拉应力，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超高性能混凝土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} —— 超高性能混凝土的弹性抗拉强度标准值。

2 B 类预应力超高性能混凝土受弯构件在结构自重作用下控制截面受拉边缘不得消压。

5.3.5 A 类和 B 类预应力超高性能混凝土受弯构件斜截面主拉应

力应符合下列规定：

1 预制构件：
$$\sigma_{tp} \leq 0.6f_{Utek} \quad (5.3.5-1)$$

2 现场浇筑构件：
$$\sigma_{tp} \leq 0.5f_{Utek} \quad (5.3.5-2)$$

式中： σ_{tp} —— 在作用频遇组合和预加力产生的超高性能混凝土主拉应力，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} —— 超高性能混凝土的弹性抗拉强度标准值。

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

5.3.7 对接B类预应力构件标准控制应力的应变软化型超高性能混凝土构件，以及不配预应力钢筋的应变软化型超高性能混凝土构件，应按正常使用极限状态频遇组合并计入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 中的规定。

III 挠度验算

5.3.8 对超高性能混凝土受弯构件，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。

5.3.9 预应力超高性能混凝土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 5.3.8 条计算的挠度值，乘以挠度长期增长系数 η_{θ} ，挠度长期增长系数取 $\eta_{\theta} = 1 + \phi(t - t_0)$ 。

5.3.10 超高性能混凝土受弯构件按本标准第 5.3.9 条计算的长

期挠度值，在消除结构自重产生的长期挠度后，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 $1/300$ 。

5.3.11 超高性能混凝土受弯构件的预拱度、预应力超高性能混凝土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 持久状况预应力超高性能混凝土构件应力计算

5.4.1 按持久状况设计的预应力超高性能混凝土受弯构件，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_{Uck} 。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。

5.4.2 对预应力超高性能混凝土受弯构件进行持久状况设计时，使用阶段正截面的超高性能混凝土法向压应力不超过 $0.4f_{Uck}$ 时可按线性徐变理论进行设计。

5.4.3 对预应力超高性能混凝土受弯构件进行持久状况设计时，使用阶段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 中的规定要求。

II 短暂状况构件的应力计算

5.4.4 超高性能混凝土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，并不应超过本标准第 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，当有组合时不计入荷载组合系数。

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。

5.4.5 制作、运输等短暂设计工况下超高性能混凝土构件正截面及斜截面应力应符合下列规定：

1 受压区超高性能混凝土正截面验算边缘压应力不应超过 $0.8f'_{Uck}$ ， f'_{Uck} 为施工阶段对应的立方体超高性能混凝土轴心抗压强度标准值。

2 超高性能混凝土受弯构件中性轴处主拉应力不应超过 f'_{Utuk} ， f'_{Utuk} 为施工阶段对应的超高性能混凝土抗拉强度标准值。

5.4.6 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 D60 执行。

5.4.7 对构件施加预加力时，超高性能混凝土的立方体抗压强度不得低于设计强度等级的 80%，弹性模量不应低于超高性能混凝土设计弹性模量的 80%。

5.5 构造要求

5.5.1 普通钢筋和预应力钢筋的超高性能混凝土保护层厚度取钢筋外缘至混凝土表面的距离，不应小于 15mm 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，超高性能混凝土

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	$9d$	$11d$
受压钢筋	直端	$9d$	$11d$

注：1. d 为钢筋公称直径（mm），对于束筋应为等代直径；

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 中的规定。

5.5.3 应变软化型超高性能混凝土受弯构件纵向受力配筋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，配筋超高性能混凝土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 50mm。

5.5.5 T 形、I 形、箱形截面超高性能混凝土梁的腹板宽度，不应小于 80mm。

5.5.6 当超高性能混凝土构件因预制或分段浇筑产生冷缝，且构件设计计算计入接缝两侧超高性能混凝土抗拉能力时，应对接缝构造做配筋强化处理。接缝处补强钢筋间距宜为 75mm~200mm，补强钢筋面积按超高性能混凝土接缝截面抗拉等强进行设计。

5.6 加固设计

5.6.1 采用超高性能混凝土进行桥梁加固宜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。

5.6.2 采用超高性能混凝土进行桥梁加固，应通过凿毛或植筋等构造措施保证新增超高性能混凝土层与原结构的可靠连接，界面处理措施应满足 JTG/TJ22-2008《公路桥梁加固设计规范》要求。

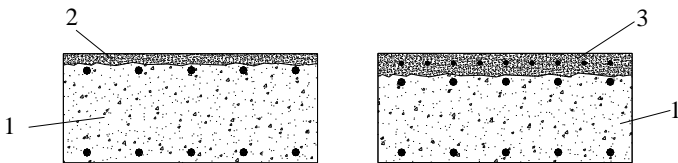
5.6.3 采用超高性能混凝土进行桥梁加固，且加固层与原结构有

可靠连接时，被加固结构应按下列要求进行两阶段受力计算：

1 新浇超高性能混凝土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 新浇超高性能混凝土层达到规定龄期的强度标准值后，按加固后的组合截面进行受力计算。

5.6.4 超高性能混凝土加固桥梁结构宜采用增设超高性能混凝土层或配筋超高性能混凝土层进行承载能力加固，如图 5.6.4 所示；采用增设的超高性能混凝土层时，厚度宜大于 25mm；采用增设配筋超高性能混凝土层时，厚度宜大于 40mm。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。



(a) 增设超高性能混凝土层 (b) 增设配筋超高性能混凝土层

图 5.6.4 增设超高性能混凝土加固

1—原结构； 2—增设超高性能混凝土层； 3—增设配筋超高性能混凝土层

5.6.5 在受拉区采用超高性能混凝土进行承载能力加固时，应采用应变硬化的超高性能混凝土材料，并宜采用配筋超高性能混凝土进行加固。

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

5.6.7 在受压区采用超高性能混凝土进行加固时，抗弯承载能力应按下式进行计算（图 5.6.8）：

$$\begin{aligned}
\gamma_0 M_d \leq & \varepsilon_{cc} \cdot h_U \cdot E_U \cdot B \cdot \left(\frac{h_U}{2} + h_c - d_{sc} \right) \\
& + \frac{(\varepsilon_{Uc} - \varepsilon_{cc}) \cdot h_U \cdot E_U \cdot B}{2} \left(\frac{2h_U}{3} + h_c - d_{sc} \right) \\
& + \frac{\varepsilon_{cc} \cdot (x - h_U) \cdot E_c \cdot B}{2} \left(\frac{2(x - h_U)}{3} + h_U + h_c - x - d_{sc} \right) \\
& + \varepsilon_{sU} \cdot E_s \cdot A_{sU} (d_{sU} - d_{sc}) + \varepsilon_{sc1} \cdot E_s \cdot A_{sc1} (d_{sc} - d_{sc})
\end{aligned} \tag{5.6.7-1}$$

$$x = \xi_b \cdot (h_U + h_c - d_{sc}) \tag{5.6.7-2}$$

$$\varepsilon_{Uc} = \frac{x \cdot \varepsilon_{sc}}{h_U + h_c - d_{sc} - x} \tag{5.6.7-3}$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{(x - h_U) \cdot \varepsilon_{sc}}{h_U + h_c - d_{sc} - x} \tag{5.6.7-4}$$

$$\varepsilon_{sU} = \frac{[x - (h_U + h_c - d_{sU})] \cdot \varepsilon_{sc}}{h_U + h_c - d_{sc} - x} \tag{5.6.7-5}$$

$$\varepsilon_{sc1} = \frac{[x - (h_U + h_c - d_{sc})] \cdot \varepsilon_{sc}}{h_U + h_c - d_{sc} - x} \tag{5.6.7-6}$$

$$\varepsilon_{sc} = \frac{f_{sd}}{E_s} \tag{5.6.7-7}$$

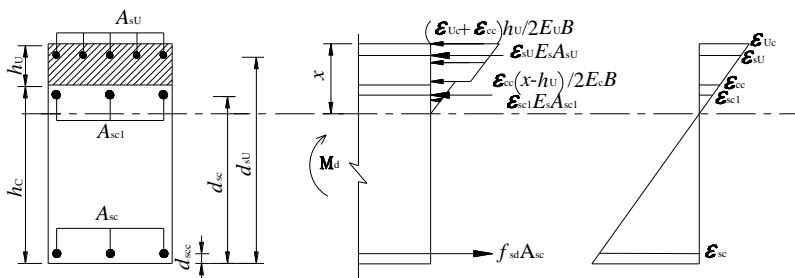


图 5.6.7 受压区增设超高性能混凝土层受弯构件的抗弯承载力计算

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} ——加固后新增超高性能混凝土的压应变，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} ——超高性能混凝土的抗压强度设计值（MPa）；

E_u ——超高性能混凝土的弹性模量（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} ——加固后新增超高性能混凝土中钢筋的应变，应根据平截面假定进行计算，并符合 $\epsilon_{su} \leq f_{sdU}/E_s$ ；

f_{sdU} ——超高性能混凝土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} ——加固后超高性能混凝土层中纵向钢筋的横截面积（mm²）；

A_{sc1} ——原构件受压区混凝土中纵向钢筋的横截面积（mm²）；

A_{sc} ——原构件受拉区混凝土中纵向钢筋的横截面积（mm²）；

h_U ——增设的超高性能混凝土层厚度（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_{sc1} ——原构件混凝土受拉区钢筋到受拉区边缘的距离（mm）；

d_{sU} ——加固后超高性能混凝土层中钢筋到受压区边缘的距离（mm）。

5.6.8 加固后构件的抗剪承载能力，可按下列式进行计算：

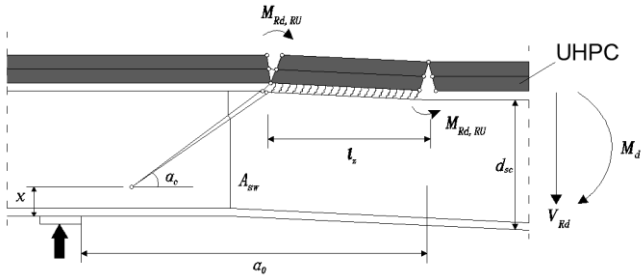


图 5.6.9 超高性能混凝土层位于受拉区梁的抗剪模型

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,U} \quad (5.6.8-1)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{f_{cd} \cdot b_w}{2} \left[\frac{x}{\sin \alpha_c} \cdot (1 - \cos \alpha_c) \right] \quad (5.6.8-2)$$

$$V_{Rd,s} = A_{sw} \cdot f_{sc} \cdot \cot \alpha \quad (5.6.8-3)$$

$$V_{Rd,U} = \frac{2 \cdot M_{Rd, RU}}{l_z} \quad (5.6.8-4)$$

$$x = 0.9 \cdot w_m \cdot d_{eq} \quad (5.6.8-5)$$

$$w_m = \frac{A_{sc} f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}}{A_c f_{cd}} \quad (5.6.8-6)$$

$$d_{eq} = \frac{d_{sc} A_{sc} f_{sd} + d_U A_U f_{Utd} + d_{sU} A_{sU} f_{sUd}}{A_{sc} f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}} \quad (5.6.8-7)$$

$$l_z = a_0 - \frac{d_{sc}}{\tan \alpha_c} \quad (5.6.8-8)$$

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）；

$V_{Rd,U}$ ——配筋超高性能混凝土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；

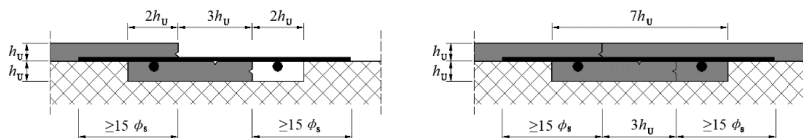
α_c ——原构件中弯矩和剪力引起的斜裂缝的倾角，通常情况下， $20^\circ \leq \alpha_c \leq 60^\circ$ ，近似取为 $\alpha_c = 35^\circ$ ；

l_c ——外力臂。

5.6.9 钢筋混凝土墩柱受压承载力不足时，可采用增设超高性能混凝土层或配筋超高性能混凝土层进行加固，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。

5.6.10 构造接缝应按照图 5.6.10 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超高性能混凝土截面面积 AU（厚度为 h_U ）的 2.4%。



a) 第一阶段

b) 第二阶段

图 5.6.10 超高性能混凝土层的接缝构造细节

5.6.11 超高性能混凝土用于小铰缝空心板梁铰缝、铺装破损及梁底受弯裂缝病害加固可采用以下措施及步骤：

- 1 凿除破损铰缝混凝土及原桥面铺装混凝土；
- 2 板缝两侧植筋，加强桥面铺装与板梁的结合；
- 3 清洁梁顶面，在板梁上方布设钢筋网片，浇筑厚度 60mm

超高性能混凝土结构层；

4 待超高性能混凝土结构层达到强度要求后实施防水粘结层、铺设沥青磨耗层。

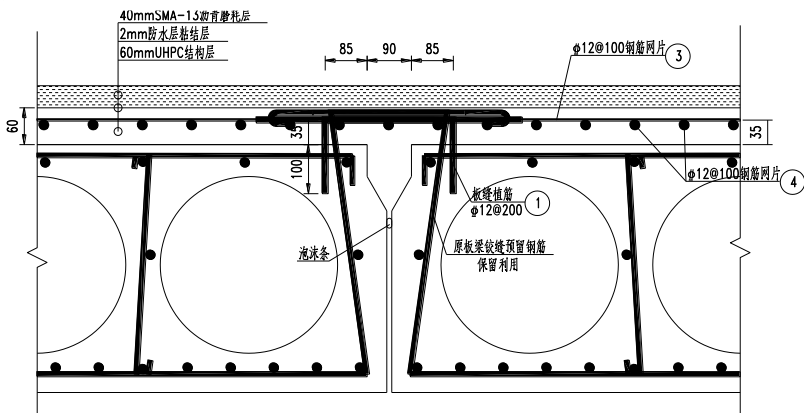


图 5.6.11 超高性能混凝土用于空心板梁铰缝及结构加固示意图

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 超高性能混凝土-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 超高性能混凝土-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，可不计入超高性能混凝土与钢顶板的层间滑移；计算局部效应时，应计入局部滑移效应，可不计入超高性能混凝土与钢顶板间的粘接力和摩阻力。

6.1.4 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构温度效应的计算应符合下列规定：

1 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构的整体温度效应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。

2 超高性能混凝土-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）。

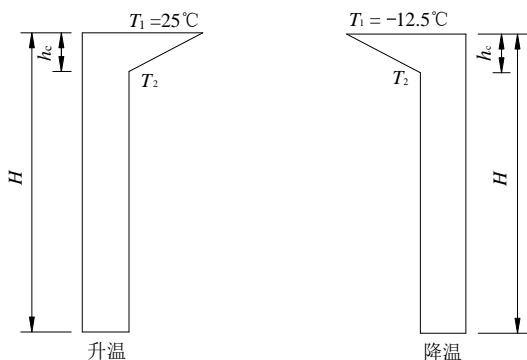


图 6.1.4 竖向温度梯度

h_c —超高性能混凝土层厚度； H —组合截面全高

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 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构中受拉区段考虑超高性能混凝土参与受力时，采用的超高性能混凝土抗拉性能等级不应低于 UT III。

6.2 结构计算

6.2.1 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构中的钢结构抗弯承载力应符合下列公式规定：

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

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

式中： i ——变量，表示不同的应力计算阶段，其中， $i = \text{I}$ 表示未形成超高性能混凝土-钢组合桥面板结构截面（钢梁）的应力计算阶段； $i = \text{II}$ 表示形成超高性能混凝土-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；

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

f_d ——钢筋或钢梁强度设计值；

γ_0 ——结构重要性系数。

6.2.2 超高性能混凝土-钢组合桥面板中受拉区超高性能混凝土结构层采用应变硬化型超高性能混凝土时，应对超高性能混凝土结构层进行拉应变验算，结构形成组合截面后的恒载、活荷载、温度荷载、收缩徐变效应共同作用下超高性能混凝土结构层拉应变不应超过其极限拉应变 ε_{utu} 。超高性能混凝土结构层应变分析应采用本标准 4.0.8 条规定的材料受拉本构模型。

6.2.3 抗剪计算应符合下列规定：

1 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构抗剪承载力应符合下列公式规定：

$$\gamma_0 V_{vd} \leq V_{vu} \quad (6.2.3-1)$$

$$V_{vu} = f_{vd} A_w \quad (6.2.3-2)$$

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 当超高性能混凝土-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:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1f_d \quad (6.2.3-3)$$

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。

6.2.4 剪力连接件采用圆柱头焊钉时,纵向抗剪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。

6.2.5 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构的稳定计算应符合下列规定:

1 施工期间超高性能混凝土-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》JTG D64 的规定。

2 超高性能混凝土-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。

6.2.6 设计使用年限内,超高性能混凝土-钢组合桥面板结构中的钢结构、剪力钉和超高性能混凝土层均不应发生疲劳破坏。

6.2.7 超高性能混凝土-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》JTG D64 的规定。

6.2.8 超高性能混凝土-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。

6.2.9 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构中超高性能混凝土层的疲劳验算应符合下列规定：

$$\sigma_{st,max} \leq \sigma_{U,D} \quad (6.2.9)$$

式中： $\sigma_{st,max}$ ——超高性能混凝土层在频遇组合下的最大拉应力，可按弹性方法计算；

$\sigma_{U,D}$ ——超高性能混凝土的容许疲劳强度，应符合本标准第 5.2.10 条的规定。

6.2.10 超高性能混凝土层抗裂计算应同时计入结构重力、收缩徐变等永久作用和汽车荷载、温度作用等可变作用，并应准确模拟超高性能混凝土-钢组合桥面板结构的施工顺序。

6.2.11 超高性能混凝土层应建立局部模型分析验证抗裂性能，超高性能混凝土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-相邻横隔板间跨中处，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。

6.2.12 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构中超高性能混凝土层的抗裂验算应符合下列规定：

1 超高性能混凝土层计算拉应力不大于超高性能混凝土弹性抗拉强度设计值时，可认为超高性能混凝土层不开裂。

2 当超高性能混凝土层拉应力大于超高性能混凝土弹性抗拉强度设计值时，应按本标准图 4.0.8 的材料本构关系进行非线性分析，超高性能混凝土层计算拉应变应小于超高性能混凝土极限拉应变。

6.2.13 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构桥梁整体挠度应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定。

6.2.14 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构局部挠度计算应符合下列规定（图 6.2.14）：

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

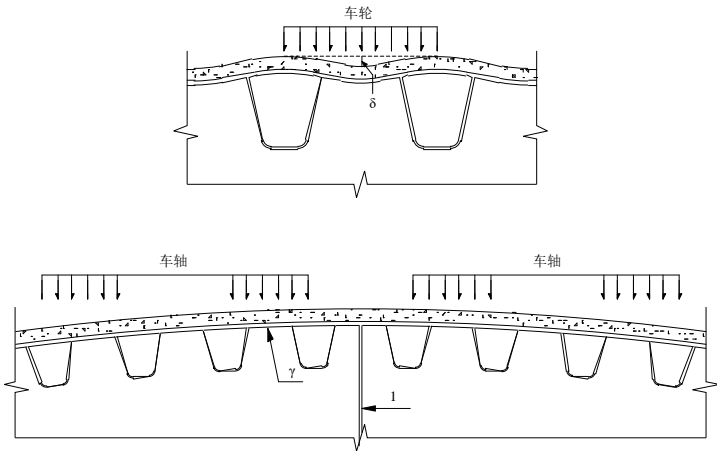


图 6.2.14 局部挠度计算

δ —相对挠度； γ —曲率半径； l —主梁腹板或纵隔板

6.3 构造要求

6.3.1 超高性能混凝土-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 12mm，并不应小于焊钉直径的 0.5 倍。
- 2 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构的超高性能混凝土层厚度不宜小于 50mm，且不宜大于 100mm。

6.3.2 超高性能混凝土层内钢筋网的设置应符合下列规定：

- 1 超高性能混凝土保护层厚度不应小于 10mm，宜采用 15mm。

- 2 钢筋直径不宜小于 10mm。
- 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，并应错开布置。搭接长度不应小于 10 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 250mm 时，应对桥面板外周一圈的焊钉加密一倍，即间距为桥面板内部间距的一半，并不大于 150mm。
- 4 焊钉间距宜与钢筋间距模数匹配设置。

6.3.4 超高性能混凝土结构层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 $S_{rb}/4$ ， S_{rb} 为加劲肋的横向间距。

6.3.5 超高性能混凝土层与其他结构连接，应设置边界连接构造。

6.3.6 超高性能混凝土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，超高性能混凝土层表面应采用抛丸粗糙化处理，并保持超高性能混凝土层表面干燥、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 的相关要求，其中防水粘结层 60℃剪切强度应不小于 0.6MPa。

7 超高性能混凝土连接设计

7.1 一般规定

7.1.1 预制拼装桥梁的上部结构预制构件之间、预制墩柱与承台、预制墩柱与盖梁、预制墩柱节段之间可采用超高性能混凝土连接方式。

7.1.2 预制构件采用超高性能混凝土连接时，其抗拉性能等级应符合下列规定：

1 用于预制小箱梁、T 梁桥面板横向接缝的连接段超高性能混凝土不应低于 UT I；

2 用于下部结构预制构件竖向接缝的连接段超高性能混凝土不应低于 UT III。

7.1.3 超高性能混凝土连接段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 20mm 和最长钢纤维长度；

2 主筋的保护层厚度不应小于钢筋直径。

7.1.4 当预制构件的超高性能混凝土连接段主筋采用交错布置时，应符合下列规定：

1 当主筋直径 $d \leq 25\text{mm}$ 时，钢筋的最小搭接长度应为 10d；

2 当主筋直径 $d > 25\text{mm}$ 且 $d \leq 32\text{mm}$ 时，钢筋的最小搭接长度应为 12d；

3 当主筋为束筋时，钢筋的最小搭接长度应按换算后的等代直径计；

4 交错布置的钢筋净距不宜小于 20mm 和 1.5 倍最长钢纤维长度。

7.2 上部结构连接

7.2.1 上部结构预制构件超高性能混凝土连接接缝可采用平直缝（图 7.2.1）、企口缝等形式，拼接界面处宜作粗糙化处理。

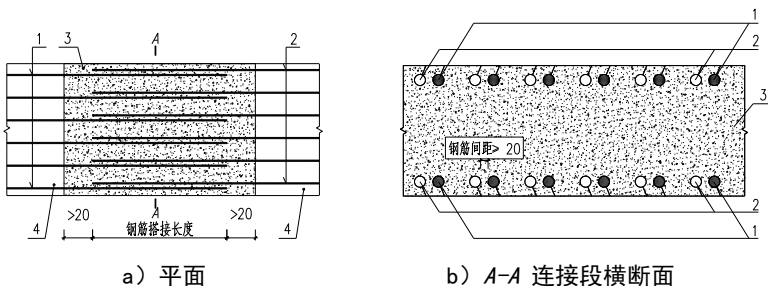


图 7.2.1 上部结构横向连接（单位：mm）

1—一侧预制梁伸出钢筋；2—另一侧预制梁伸出钢筋；

3—连接段现浇超高性能混凝土；4—预制构件

7.2.2 上部结构预制构件超高性能混凝土连接段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、预制墩柱与盖梁的超高性能混凝土连接段可采用扩头式或环缝式（图 7.3.1-1、图 7.3.1-2）。

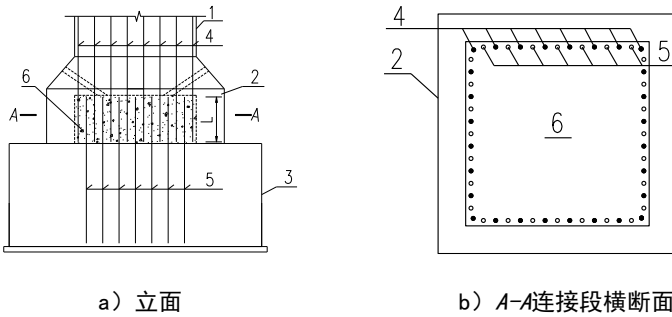


图 7.3.1-1 超高性能混凝土扩头式连接段

1—预制立柱；2—预制立柱柱底扩头；3—承台；4—立柱伸出钢筋；
5—承台伸出钢筋；6—连接段现浇超高性能混凝土；L—钢筋搭接长度

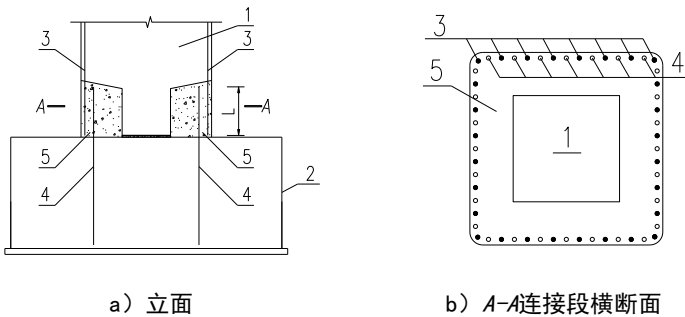


图 7.3.1-2 超高性能混凝土环缝式连接段

1—预制立柱；2—承台；3—立柱伸出钢筋；4—承台伸出钢筋；
5—连接段现浇超高性能混凝土；L—钢筋搭接长度

7.3.2 预制墩柱节段之间的超高性能混凝土连接段可采用环缝式（图 7.3.2）。

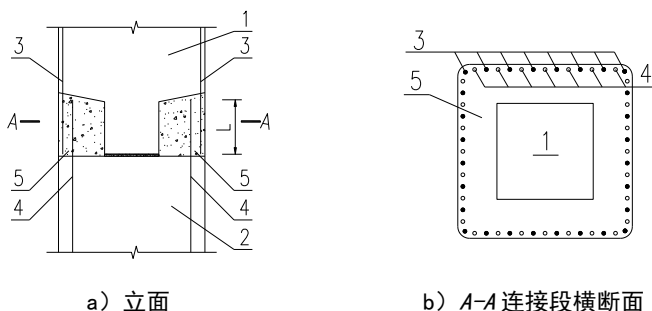


图 7.3.2 预制墩柱节段连接

1—上节预制立柱；2—下节预制立柱；3—上节预制立柱伸出钢筋；
4—下节预制立柱伸出钢筋；5—连接段现浇超高性能混凝土；L—钢筋搭接
长度

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 下部结构预制构件采用超高性能混凝土连接时，钢筋可采用束筋布置，钢筋搭接长度应符合本标准第 7.1.4 条的规定。

7.3.5 下部结构预制构件采用超高性能混凝土连接时，连接段应作为能力保护构件设计，并按现行行业标准《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，计算时应计入超高性能混凝土抗拉强度的贡献，超高性能混凝土实际承受的最大拉伸应变应小于超高性能混凝土的极限拉伸应变。

7.3.6 下部结构预制构件采用超高性能混凝土连接时，墩柱塑性铰区域内加密箍筋的配制应符合现行行业标准《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 的规定，其中墩柱加密区长度应从预制段起计算。

7.3.7 下部结构预制构件采用超高性能混凝土连接时，抗震验算应符合下列规定：

- 1 对于地震作用下发生弯曲破坏的高墩，塑性铰区域位于预制墩柱范围，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 进行地震位移验算，其中墩柱高度应扣除超高性能混凝土连接段的高度；
- 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。

8 施工及质量检验

8.1 一般规定

- 8.1.1 超高性能混凝土的施工及质量检验应符合现行国家、行业标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387、《混凝土强度检验评定标准》GB 50107、《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，以及现行地方标准《超高性能混凝土检验标准》DB 65/T 8014 的规定。
- 8.1.2 超高性能混凝土的质量检验应符合现行地方标准《超高性能混凝土检验标准》DB 65/T8014 的规定执行。
- 8.1.3 超高性能混凝土施工宜建立首件制度。

8.2 施工准备

- 8.2.1 超高性能混凝土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。
- 8.2.2 超高性能混凝土预混料，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，超高性能混凝土拌合前应根据施工配合比精确计量预混料和水的用量，各原材料的计量偏差不应大于1%。
- 8.2.3 超高性能混凝土预混料运输过程应密封防潮，储存于干燥、密闭、防潮、不受雨淋的场所，并按品种、批号分别堆放，不得混堆。
- 8.2.4 超高性能混凝土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。

8.3 模板和支架

- 8.3.1 模板和支架应有足够的强度、刚度和稳定性,能承受超高性能混凝土施工过程中所产生的各种荷载。计算新浇筑超高性能混凝土对模板的最大侧压力时,超高性能混凝土的重力密度取 26kN/m^3 。
- 8.3.2 超高性能混凝土采用蒸汽养护时,模板应采用钢模板。钢板表面应进行防腐防锈处理。
- 8.3.3 模板表面宜涂覆水性脱模剂。
- 8.3.4 模板应在超高性能混凝土强度达到 40MPa ,且符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 相关规定后,方可拆除,并应严格按照施工图设计的要求进行。
- 8.3.5 超高性能混凝土连接工艺,模板、支架体系及防护措施应进行一体化设计。

8.4 搅拌

- 8.4.1 超高性能混凝土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。
- 8.4.2 超高性能混凝土搅拌应采用强制式搅拌机,搅拌机的转速不宜低于 40r/min 。
- 8.4.3 超高性能混凝土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% 。
- 8.4.4 超高性能混凝土搅拌时间从加水开始计,拌合物流化后继续搅拌不宜少于 1min ,总搅拌时间不宜少于 3min 。超高性能混凝土搅拌完成后,应保证钢纤维不结团。
- 8.4.5 超高性能混凝土拌合物的扩展度应满足施工要求。尚应检

验 1h 扩展度, 1h 扩展度的损失应控制在 100mm 以内。当拌合物与浇筑地点相距较远时, 浇筑前应检验 2h 或更长时间扩展度。

8.5 运输

8.5.1 超高性能混凝土运输方案应包括运输方式、运输能力和前后工序的匹配性。

8.5.2 超高性能混凝土拌合物在运输过程应保证均匀, 不产生分层、离析。

8.5.3 超高性能混凝土设备的运输能力应保证浇筑的连续性, 超高性能混凝土加水拌合至浇筑的时间不宜超过 120min, 气温超过 30℃ 时不宜超过 90min, 静置时间不得超过 30min。

8.6 浇筑

8.6.1 超高性能混凝土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。

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

8.6.3 现场浇筑的超高性能混凝土应连续浇筑, 浇筑过程应保证密实性, 保持表面湿润, 不应出现冷缝。

8.6.4 超高性能混凝土宜为自流平超高性能混凝土。浇筑和成型过程中应保证超高性能混凝土密实、钢纤维分布均匀以及构件的整体性, 避免拌合物分层、离析、硬壳、以及钢纤维外露。

8.6.5 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, 再浇筑超高性能混凝土。

8.6.6 超高性能混凝土-钢组合桥面板, 超高性能混凝土表面应

进行抛丸等糙化方式处理，形成干净、均匀、粗糙的表面。

8.7 养护

8.7.1 超高性能混凝土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。混凝土养护用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

8.7.2 超高性能混凝土常温养护应符合下列规定：

1 超高性能混凝土浇筑完成后，应及时进行保湿养护和薄膜覆盖。

2 超高性能混凝土-钢组合桥面板，宜在覆膜前喷雾增湿，养生膜搭接处用薄板覆盖防止刮风掀起，发现有保湿膜覆盖不到位、缺水等现象，及时处理并补水养护，混凝土终凝前增加二次抹压过程。

3 超高性能混凝土构件、预制构件连接及维修加固保湿养护不宜小于 7d，超高性能混凝土-钢组合桥面板保湿养护不宜小于 14d，且不应小于 7d。

8.8 高温和冬期施工

8.8.1 超高性能混凝土高温期施工应符合下列规定：

1 超高性能混凝土的施工宜避开中午高温的时间。

2 超高性能混凝土预混料宜避光存放。

3 搅拌用水宜添加冰屑等措施，拌合用水温度不宜高于 20℃。

8.8.2 超高性能混凝土冬期施工应采用蓄热或蒸汽养护措施时，养护时间应保证超高性能混凝土抗压强度达到 40MPa。并应符合下列规定：

1 控制超高性能混凝土的入模温度在 5℃~30℃之间。

2 超高性能混凝土与临接的已固化混凝土间的温度差不可超过 15℃。

3 使用保温材料覆盖外露部分，确保初始固化温度不低于 5℃。

4 脱模后，超高性能混凝土表面温度与环境温度之差不应大于 20℃。

8.9 质量检验

8.9.1 超高性能混凝土质量检验可分为出厂检验、进场检验及现场抽检。

8.9.2 成型后的超高性能混凝土应均匀完好，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。

8.10 构件预制、运输、安装

8.10.1 构件预制安装施工及质量检验应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650、《公路工程质量检验评定标准第一册 土建工程》JTG F 80/1 和《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2 的规定。

8.10.2 预制拼装桥梁的设计与施工宜采用信息化辅助手段，构件信息模型的创建、使用和管理应符合现行国家标准《建筑信息模型施工应用标准》GB/T 51235 的规定。

8.10.3 预制工厂选址应符合现行国家标准《工业企业总平面设计规范》GB 50187、《工业企业噪声控制设计规范》GB/T 50087 的有关规定和当地城市总体规划的要求。场地规划应根据生产效率、起重能力等因素合理划分各功能区，并符合现行国家标准《绿色工业建筑评价标准》GB/T 50878 的相关要求。

8.10.4 模具应进行专项设计。模具应与预制构件的外形特征、成型方式、脱模工艺等相适应，同时保证其刚度、周转次数和预留孔洞位置准确。

8.10.5 构件预制时不得遗漏预埋构件吊点预埋件，吊点设计和施工按现行行业标准《公路装配式混凝土桥梁设计规范》JTG/T 3365 附录 A 要求执行。

8.10.6 预制构件生产用台座结构应有足够的承载能力、刚度和稳定性，并应进行地基承载力验算。

8.10.7 预制构件在运输前，应先考察路线的交通路况、限行、限高、限重、道路的最大纵坡等情况，对沿线道路桥梁的通行能力进行复核。并取得交通管理部门的同意。

8.10.8 预制构件在运输、吊装、翻转的过程，应做好成品面防碰撞保护措施，可在关键部位设置棉纱、橡胶块或枕木等柔性结构，避免污染和损伤预制构件。

8.10.9 采用超高性能混凝土进行预制构件连接时，应符合以下规定：

1 超高性能混凝土灌注完成 3 天且抗压强度达到与被连接构件混凝土同等强度后，且连接截面仅处于受压状态，可进行下道工序施工。

2 承台与立柱、立柱与立柱、立柱与盖梁采用超高性能混凝土连接时，承台预埋筋与预制立柱钢筋、分节预制立柱钢筋、立柱钢筋与盖梁预埋钢筋之间均应错位布置，连接钢筋应在专用胎架上制作加工成型。

8.10.10 当立柱采用超高性能混凝土连接工艺的分节段预制拼装时，确保拼接表面无油、无水且无可见灰粉。并应符合下列要求：

1 立柱节段拼装应根据设计要求和施工工艺确定工艺流程。

2 立柱节段拼装前应对拼接缝表面进行复测，表面平整度应小于士 3 mm。

3 上节段立柱阶段安装应采取临时措施确保安装过程构件稳定。

8.10.11 采用超高性能混凝土连接工艺拼装预制防撞护栏应符合以下规定：

1 单片防撞护栏长度宜为 5m-10m，吊点可采用预埋螺栓或精轧螺纹钢，吊点数量及位置应进行设计验算确定。

2 防撞护栏宜在主梁形成整体结构并达到设计强度后进行安装，如主梁未形成整体结构，应对边梁采取防倾覆措施。

3 防撞护栏安装时，应采取调节措施使防撞护栏与梁体临时固定，线型调整到位后，需设置相应措施保证防撞护栏的稳定性。

8.10.12 防撞护栏与边梁一体化安装应设置临时防倾覆措施，并尽快完成端部横梁和纵向湿接缝连接。连接混凝土强度未达到设计强度前，不应在边梁上堆载或扰动。

9 施工安全与环保

9.1 一般规定

9.1.1 施工单位应根据现行国家标准《施工企业安全生产管理规范》GB 50656 中相关要求建立健全安全生产责任制。

9.1.2 超高性能混凝土现场施工安全、环保等要求应符合现行国家标准《建筑与市政施工现场安全卫生与职业健康通用规范》GB 55034 的规定和地方标准的规定。

9.1.3 高处作业应符合现行行业标准《公路工程施工安全技术规范》JTG F90 和《建筑施工高处作业安全技术规范》JGJ 80 的有关规定，高处作业施工平台应进行专项设计。

9.1.4 超高性能混凝土施工期间，应严格控制噪声并遵守现行国家标准《建筑施工现场环境噪声排放标准》GB 12523 的规定。合理安排施工时间，避免在夜间和午休时间进行高噪音作业。同时，应采取相应的隔音、消音措施，减少噪音对周围居民的影响。

9.1.5 根据《建设项目环境保护管理条例（2017年修正）》（中华人民共和国国务院令 第 682 号）的规定，对环境保护实行分类管理。

9.2 安全施工

9.2.1 超高性能混凝土施工应严格遵守现行国家、行业以及本自治区安全标准规范，制定专项安全施工方案，落实施工安全控制的各项要求。

9.2.2 超高性能混凝土施工用电应符合现行国家标准《建设工程施工现场供用电安全规范》GB 50194 和现行行业标准《施工现场

临时用电安全技术规范》JGJ 46 中的相关规定，编制临时用电施工组织设计。

9.2.3 对超高性能混凝土的搅拌、浇筑和养护设备，应定期检查和维护，确保设备运行正常，防止因设备故障引发的安全隐患。

9.3 环境保护

9.3.1 超高性能混凝土施工应配备相应的环保设施，如废水处理设施、废气处理设施、噪声控制设施等，并定期维护和检修，确保其正常运行。宜采用先进环保设备和工艺，减少废水、废气和废渣等的排放，实现资源循环利用和污染物减排。

9.3.2 超高性能混凝土施工应合理规划施工材料和建筑垃圾的堆放位置，并采取相应的防尘、防渗漏等措施，避免对环境造成污染。应按要求设置封闭围挡、清洗设施、密目式安全网、洒水降尘、垃圾处理、噪音控制、废水管理等设施。

9.3.3 超高性能混凝土施工应加强材料管理，减少损耗，实现资源的最大化利用。

9.3.4 超高性能混凝土施工应采取有效防护或清理措施，避免超高性能混凝土外溢或泄漏，对成品构件造成污染。

附录 A 超高性能混凝土收缩应变和徐变应变计算

A. 0. 1 超高性能混凝土的收缩应变宜通过试验确定，当缺乏试验资料时，收缩应变可按下列规定计算：

1 当采用常温养护时，超高性能混凝土的收缩应变可按下列式计算：

$$\varepsilon_{Us}(t) = \varepsilon_{Us\infty} \cdot e^{-\left(\frac{2.48}{t-0.86}\right)} \quad (\text{A. 0. 1-1})$$

式中： ε_{Us} ——超高性能混凝土龄期为 t 时的收缩应变；

$\varepsilon_{Us\infty}$ ——超高性能混凝土的收缩终极应变，可取 0.6‰~0.8‰；

t ——计算龄期（d）。

2 当采用蒸汽养护时，超高性能混凝土的收缩应变可按下列式计算：

$$\varepsilon_{Us}(t) = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{Us\infty}}{2} \cdot t (t \leq 2) \\ \varepsilon_{Us\infty} (t > 2) \end{cases} \quad (\text{A. 0. 1-2})$$

式中： $\varepsilon_{Us\infty}$ ——超高性能混凝土的收缩终极应变值，可取 0.8‰。

A. 0. 2 超高性能混凝土的徐变应变应按下列规定计算：

1 当超高性能混凝土的压应力不大于 40% f_{Ucuk} 或拉应力不大于 f_{Ute} 时，徐变应变可按下列公式计算：

$$\varepsilon_{Ucc}(t) = \phi_U(t, t_0) \cdot \varepsilon_{Uel} \quad (\text{A. 0. 2-1})$$

$$\phi_U(t, t_0) = \phi_{U,\infty}(t_\infty, t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^a}{(t - t_0)^a + b} \quad (\text{A. 0. 2-2})$$

2)

式中： $\varepsilon_{Ucc}(t)$ ——超高性能混凝土的徐变应变；

ε_{Uel} ——超高性能混凝土的弹性应变；

$\phi_U(t, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 、计算龄期为 t 的超高性能混凝土徐变系数；

$\phi_{U,\infty}(t_\infty, t_0)$ ——超高性能混凝土的最终徐变系数，可按表 A. 0. 2 取值；

t_0 ——加载龄期 (d)；

t ——计算龄期 (d)；

a 、 b ——系数，可按表 A. 0. 2 取值。

表 A. 0. 2 最终徐变系数 $\phi_{U,\infty}(t_\infty, t_0)$ 和系数 a 、 b

t_0 (天)	养护条件	$\phi_{U,\infty}(t_\infty, t_0)$	a	b
4	常温养护	1.2	0.6	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 当超高性能混凝土的压应力大于 $40\%f_{Ucuk}$ 或拉应力大于 f_{Ute} 时，徐变应变应计入荷载产生的非线性影响，徐变系数应通过试验确定。

本标准用词说明

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”。

引用标准名录

- 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》 GB/T 10433
- 《活性粉末混凝土》 GB/T 31387
- 《普通混凝土力学性能试验方法标准》 GB/T 50081
- 《混凝土质量控制标准》 GB 50164
- 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》 CJJ 2
- 《城市桥梁抗震设计规范》 CJJ 166
- 《道桥用防水涂料》 JC/T 975
- 《混凝土泵送施工技术规程》 JGJ/T 10
- 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG 3362
- 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60
- 《公路钢结构桥梁设计规范》 JTG D64
- 《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》 JTG/T D64-01
- 《公路桥梁抗震设计规范》 JTG/T 2231-01
- 《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T 3650

新疆维吾尔自治区地方标准

超高性能混凝土桥梁应用技术标准

J XXX—2024

DB65/T 8XXX—2024

条文说明

目 次

1	总 则	78
2	术语和符号	79
3	材料性能	80
3.1	超高性能混凝土	80
4	超高性能混凝土结构设计基本规定	84
5	超高性能混凝土构件设计	87
5.1	一般规定	87
5.2	持久状况承载力极限状态计算	87
5.3	持久状况正常使用极限状态计算	96
5.4	持久状况和短暂状况构件应力计算	97
5.5	构造要求	97
5.6	加固设计	99
6	超高性能混凝土-钢组合桥面板结构设计	102
6.1	一般规定	102
6.2	结构计算	103
6.3	构造要求	104
7	桥梁预制构件连接设计	106
7.1	一般规定	106
7.2	上部结构连接	107
7.3	下部结构连接	107
8	施工及质量检验	109
8.1	一般规定	109
8.2	施工准备	109
8.3	模板和支架	109
8.4	搅拌	110
8.5	运输	110
8.6	浇筑	111

8.7 养护	111
8.8 高温和冬期施工	112
8.9 质量检验	112
8.10 构件预制、运输、安装	113

1 总 则

1.0.1 超高性能混凝土由预混料（包括水泥、细砂、硅灰、石英粉）、细钢纤维等基本材料组成，配制过程中采用最大密实度理论，减小材料内部空隙及微裂缝数量，控制材料内部缺陷，提高材料的均质性，并掺入小直径短纤维空间桥接弥合微裂缝，从而达到高强度、高韧性、高耐久性的目的。由于具有上述优点，超高性能混凝土在桥梁工程中有较大的应用前景。

超高性能混凝土材料的力学特点与普通混凝土有较大的不同，目前我国已经制定并颁布国家及行业标准不能直接套用。因此，在广泛吸收、消化国内外相关研究成果和工程应用的基础上，编写本技术标准，供设计遵循。

1.0.2 本标准所指的桥梁工程超高性能混凝土结构包含超高性能混凝土构件、超高性能混凝土-钢组合桥面板构件、超高性能混凝土连接等。

2 术语和符号

2.1.1~2.1.9 本章仅将本标准出现的、超高性能混凝土相关的相关术语列出。术语的解释，其中部分是国际公认的定义，但大部分是概括性的涵义，并非国际或国家公认的定义。术语的英文名称不是标准化名称，仅供引用时参考。

3 材料性能

3.1 超高性能混凝土

3.1.2 现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T31387 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,本标准建议超高性能混凝土的强度等级应根据 100mm 立方体抗压强度标准值划分。本标准定义超高性能混凝土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,在规定试验龄期以标准试验方法测得的具有 95%保证率的抗压强度值。对于自然养护类超高性能混凝土,试验龄期应为 28d;对于蒸汽养护类超高性能混凝土,试验龄期应为 7d。养护结束后的试件应在符合现行行业标准《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》规定的试验环境下存放至试验龄期。

按超高性能混凝土的抗压性能、抗拉性能等级顺序对混凝土的性能进行分级标记。

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

$$f_{ck} = 0.88\alpha f_{cu,k} \quad (1)$$

式中,系数 α 为棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值,与混凝土的强度等级有关,C50 以下混凝土取为 0.76;C55~C80 取为 0.78~0.82。湖南大学统计国内外总计 142 组强度范围在 77MPa~189MPa 范围内的超高性能混凝土立方体抗压强度和棱柱体抗压强度试验结果,结果表明超高性能混凝土棱柱体抗压强度和

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,因此本规程取 $a=0.80$ 。同时,由于超高性能混凝土中掺有钢纤维,超高性能混凝土的受压脆性得到显著改善,可不考虑脆性折减系数。

3.1.4 在轴心抗压强度标准值的基础上材料分项系数采用 1.45 后,得到轴心抗压强度设计值,则有 $f_{Ucd} = f_{Uck}/1.45$ 。

3.1.5 抗拉性能是超高性能混凝土的基本力学性能之一。拉伸试验要求应符合《超高性能混凝土检验标准》附录 A 的规定。由于超高性能混凝土抗拉性能受纤维掺量、纤维分布以及构件尺寸等多种因素影响,可呈现出拉伸应变软化、低应变硬化和高应变硬化特征,为了方便结构设计,因此本标准通过弹性抗拉强度、抗拉强度以及抗拉强度对应的峰值应变来限制各抗拉性能等级的超高性能混凝土应满足的最低抗拉性能要求,如 UT 0 代表弹性抗拉强度标准值为 7MPa 的应变软化超高性能混凝土, $\frac{f_{Utuk}}{f_{Utek}} = 0.7$ 指断后残余抗拉强度标准低于弹性抗拉强度标准值。

超高性能混凝土按拉伸力学特性分为应变硬化和应变软化两种类型,应采用下列规定进行表达:

(1) 采用双折线模型,描述超高性能混凝土的弹性性能和硬化特征。

(2) 采用应力裂缝宽度模型,描述超高性能混凝土的软化行为,裂缝宽度与应变应符合下列规定:

$$\varepsilon_{Ut} = \frac{w_{Ut}}{l_u} \quad (2)$$

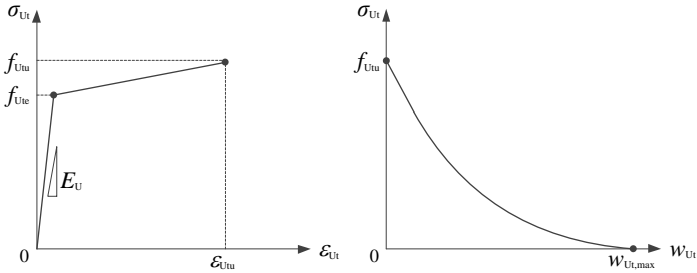
$$l_u = \frac{2}{3} h_u \quad (3)$$

式中: l_u ——超高性能混凝土构件或超高性能混凝土层的裂缝计算

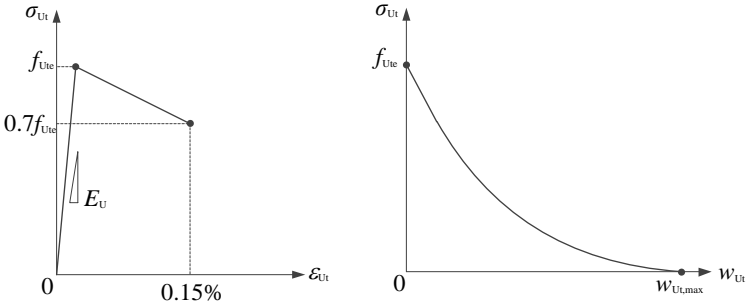
长度 (mm)；

h_U ——超高性能混凝土构件或超高性能混凝土层的厚度 (mm)；

w_{Ut} ——超高性能混凝土构件或超高性能混凝土层的裂缝张开宽度 (mm)， $w_{Ut,max}$ 可取最长纤维长度的 1/2。



(a) UT I~IV 应变硬化类型



(b) UT 0 应变软化类型

图 1 超高性能混凝土应变硬化和应变软化特性

3.1.6 根据超高性能混凝土应用情况的不同，超高性能混凝土抗拉强度设计值会有不同的分项系数；本条款相关系数主要引自瑞士标准。

其中，构件厚度影响系数 η_{hU} 考虑到不同厚度构件中超高性能混凝土中钢纤维分布方向的影响。构件尺寸和制造工艺影响系数 η_k 为

在进行整体性能分析时，构件会发生应力重分布，故取 1.0；在进行局部性能分析时，不会发生应力重分布，故取 0.85。材料分项系数 γ_U 考虑到超高性能混凝土构件中是否配筋对结构安全可靠度的影响。

3.1.7 结合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T31387 规定，超高性能混凝土弯拉强度等级根据 $400\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 棱柱体弯拉强度标准值划分。结合国内超高性能混凝土工程经验，将超高性能混凝土弯拉强度等级划分为 UF12~UF28 六级，大体可以覆盖超高性能混凝土主梁构件对不同受弯韧性的要求。

3.1.11 超高性能混凝土配合比需满足自密实和桥梁结构纵横坡成型的施工工艺要求：1) 当纵坡、横坡 $\leq 3\%$ 时，“初始坍落扩展度”和“1h 坍落扩展度”需符合设计要求，同时应满足超高性能混凝土现场施工的可操作性要求。2) 当纵坡、横坡 $> 3\%$ 时，应调整超高性能混凝土的触变性，以避免施工时产生溜坡现象。调整配合比后，需重新检测超高性能混凝土的技术性能指标，并符合设计要求。

4 超高性能混凝土结构设计基本规定

4.0.1 本标准的编制遵循国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153-2008 规定的设计原则，采用以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法，作用分类、代表值作用效应组合以及承载能力极限状态表达式和分项系数等均按《城市桥梁设计规范》CJJ11-2011(2019 年版)和《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2015 取值。

4.0.2 《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153-2008 在原 92 版标准规定结构设计应考虑持久设计状况、短暂设计状况和偶然设计状况等三种设计状况基础上，修订增加了地震设计状况。除地震设计状况外，其他偶然设计状况只需作承载能力极限状态设计，地震设计状况应按照现行《城市桥梁抗震设计规范》CJJ116 进行抗震验算。

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

按照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153-2008 极限状态设计原则，本标准桥梁结构设计分为承载能力极限状态和正常使用极限状态。承载能力极限状态是结构发挥允许的最大承载能力的状态，体现了结构的安全性；正常使用极限状态是结构达到使用功能上允许的某个限值的状态，体现了结构的适用性和耐久性。本标准对桥梁结构的各种极限状态均规定了明确的限值，设计应对桥梁结构按照本条所列的四种设计状况的不同极限状态分别进

行计算或验算,且都符合标准要求时,才达到设计桥梁预定的全部功能要求。

4.0.3 桥梁结构安全等级是根据结构的重要性及结构破坏后果即危及人的生命、造成经济损失、对社会或环境产生影响等的严重程度所确定的。关于桥梁分类的标准与《城市桥梁设计规范》CJ11-2011(2019年版)和《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2015 保持统一。

4.0.6 本条规定了超高性能混凝土正截面承载力计算的基本假定:

1 受弯构件在截面边缘配筋达到屈服强度时截面平均应变基本满足平截面假定,此假定为正截面承载力计算公式推导的基本假定。

2 不同于普通钢筋混凝土构件在正截面承载力计算时不计入受拉区混凝土抗拉能力作用,超高性能混凝土材料具有较高的抗拉强度,特别是应变硬化型超高性能混凝土在抗拉屈服后还具有相当的延性性能,当超高性能混凝土极限拉应变不小于 2000μ 时,受拉区 HRB400 级钢筋可达屈服强度,因此在正截面承载力计算中应计入超高性能混凝土抗拉强度的贡献。对超高性能混凝土构件轴拉性能试验研究发现,对于应变硬化型超高性能混凝土,在受拉区超高性能混凝土达到甚至超过极限拉应变一定程度时抗拉强度仍能维持较高水平,参考《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》,并结合轴拉试验研究,认为当超高性能混凝土拉应变不超过 $2.0 \varepsilon_{Utu}$ 时,可在承载力计算中计入抗拉强度,当拉应变超过此水平时,认为超高性能混凝土抗拉退出工作,本项简化对构件承载力验算是偏安全的。

3 超高性能混凝土材料抗压强度高,对受弯构件,在承载能力极限状态受压区高度往往远低于受拉区高度,当受拉区边缘应变不超过上述第 2 条的条件时,受压边缘应力不一定能达到材料抗

压强度值，实际受压区应力分布为三角形分布。

4 超高性能混凝土-普通钢筋混凝土组合构件中，受拉区普通混凝土的抗拉能力不计入，在受压区普通混凝土应力分布按矩形分布简化计入。

4.0.7 徐变发展规律与超高性能混凝土应力水平关系密切，当超高性能混凝土压应力小于40%抗压强度标准值、拉应力小于弹性抗拉强度时，可采用线性徐变理论，按本标准第3.0.10条相关规定进行徐变变形及次效应分析。

4.0.8 超高性能混凝土材料拉伸本构关系受钢纤维体积掺量、钢纤维端部形状、纤维长度等诸多因素影响而呈现不同形态，若超高性能混凝土基体开裂后，钢纤维抗拉能力显著高于超高性能混凝土基体开裂前抗拉能力则为应变硬化类型；若钢纤维抗拉能力低于超高性能混凝土基体开裂前抗拉能力则为应变软化类型；二者大致相等时为低应变硬化类型。应变软化型超高性能混凝土基体开裂后，裂缝呈现集中开裂现象，随着荷载增加裂缝宽度迅速扩展，而应变硬化型超高性能混凝土则可形成大量细密的微裂纹，表现出良好的韧性，受力及耐久性能均更为优良。因此，新建结构建议采用应变硬化型超高性能混凝土。配筋超高性能混凝土的本构关系采用图4.0.8中的双折线类型，通常而言，超高性能混凝土的应变硬化性能会因钢筋的协同作用而有所增强。

5 超高性能混凝土构件设计

5.1 一般规定

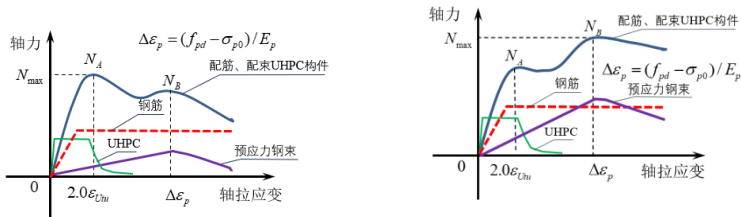
5.1.1 超高性能混凝土受弯构件及偏心受力构件界限受压区高度规定原理与常规混凝土界限受压区高度规定的考虑有相似之处，均为保证受弯构件最终破坏时受拉侧钢筋先屈服后发生受压侧混凝土或超高性能混凝土材料的压溃，确保破坏时构件发生较明显的延性变形而非脆性破坏，给使用者足够的破坏前征兆用于逃生或检修加固。因此界限受压区高度系根据平截面假定下受拉侧钢筋或预应力钢筋达到屈服应变时、受压区超高性能混凝土也同时达到极限压应变的截面应变协调关系得出。对于预应力超高性能混凝土构件，其界限受压区高度与预应力钢筋的初张应变（或截面消压应变）相关。

5.2 持久状况承载力极限状态计算

5.2.1 超高性能混凝土轴心受拉构件抗拉承载力验算计入超高性能混凝土材料抗拉强度，但超高性能混凝土抗拉延性平台长度相比钢材还有较大差距，特别是对于配置预应力钢筋的情况，当超高性能混凝土拉应变达到 2.0 倍极限拉应变时，预应力钢筋可能尚未达到屈服强度，应按等应变原则计入抗拉承载力包络值：取超高性能混凝土材料充分发挥抗拉强度时预应力钢筋在同应变下对应的抗拉承载力和预应力钢筋充分发挥抗拉强度而超高性能混凝土材料退出抗拉时对应的抗拉承载力的大值。如图 2 所示， N_A 为截面受拉区超高性能混凝土充分发挥抗拉能力时（边缘超高性能混凝土抗拉未退出工作）截面的抗拉能力； N_B 为截面受拉钢筋充

分发挥抗拉强度时（部分靠近受拉边缘的超高性能混凝土抗拉退出工作）截面的抗拉能力，此时截面的抗拉承载力应取 N_A 和 N_B 中的大值。

需要指出的是，对仅设置普通钢筋的应变硬化型超高性能混凝土轴拉构件（如图 3 所示），当超高性能混凝土抗拉开裂退出工作前，普通钢筋已屈服，此时普通钢筋无法再承受超高性能混凝土开裂后释放的拉力，将使得构件迅速破坏。本条中抗拉承载力指受荷过程中能达到的荷载最大值，构件有延性需求时应将荷载限定在仅由普通钢筋或预应力钢筋承受轴向力的范围。



情形 1：抗拉承载力由超高性能混凝土抗拉能力充分发挥控制（配束较少，或钢束初应力水平较高）

情形 2：抗拉承载力由钢束抗拉能力充分发挥控制（配束较多且钢束初应力水平较低）

图 2 超高性能混凝土轴拉构件抗拉承载力曲线（配普通钢筋及预应力钢筋）

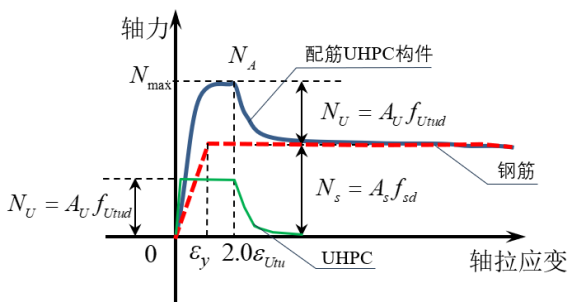
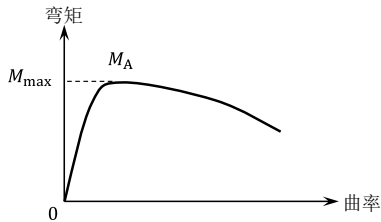


图3 超高性能混凝土轴拉构件抗拉承载力曲线（仅配普通钢筋）

5.2.2 矩形截面超高性能混凝土受弯构件抗弯承载力计算

1 当截面仅配普通钢筋时：

仅配置普通钢筋的矩形截面超高性能混凝土受弯构件抗弯承载力计算时，按 5.1.3 条计算假定及截面内力平衡方程确定受压区高度，当截面受拉边缘超高性能混凝土拉应变达到 2.0 倍极限拉应变时，受拉区超高性能混凝土抗拉能力充分发挥，此时受拉钢筋也已屈服，截面达到抗弯承载力极限（如图 4 所示， M_A 为截面受拉区超高性能混凝土充分发挥抗拉能力时截面的抗弯能力，边缘超高性能混凝土抗拉未退出工作。）此时受压侧超高性能混凝土压应力由应变协调及截面内力平衡关系得出，由于超高性能混凝土材料抗压强度较高，根据本条方法得当的受压边缘超高性能混凝土压应力不一定能达到抗压强度设计值。



抗弯承载力由超高性能混凝土抗拉能力充分发挥控制（普通钢筋屈服）

图4 超高性能混凝土受弯构件抗拉承载力曲线（仅配普通钢筋）

需要指出的是，《法国超高性能混凝土结构设计规范 NFP18-7102016》、《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》中受弯构件抗弯承载力计算假定都提及平截面假定，但《法国超高性能混凝土结构设计规范 NFP18-7102016》中为直接给出任何截面类型的抗弯承载力计算公式，仅给出一般断面受弯构件在满足平截面假定

下的截面各部分应变关系图示，不便于设计人员直接使用。而《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》中默认满足平截面假定时截面受压侧边缘超高性能混凝土压应力达到强度设计值，同时受拉侧边缘超高性能混凝土抗拉有效，并未提出受拉边缘一定范围内超高性能混凝土超过 $2.0 \varepsilon_{Utu}$ 后抗拉推出；这一图示假定下，截面内力平衡条件、受拉受压侧边缘超高性能混凝土的应力状态与平截面假定变形协调间通常不能自洽，按图 5 所示计算构件抗弯承载力往往会高估，进而使设计偏不安全。

因此，本标准受弯构件截面应力由应变关系协调（满足平截面假定）与截面内力平衡条件双约束条件下得出，超高性能混凝土拉应变超过 $2.0 \varepsilon_{Utu}$ 后不再计入超高性能混凝土抗拉贡献。

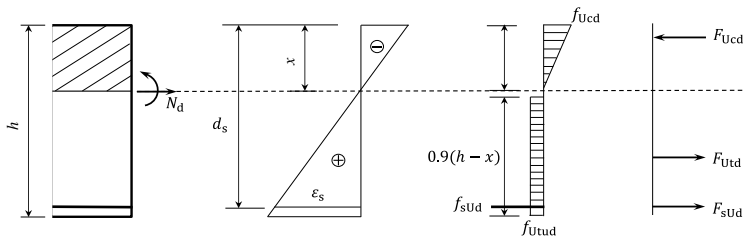
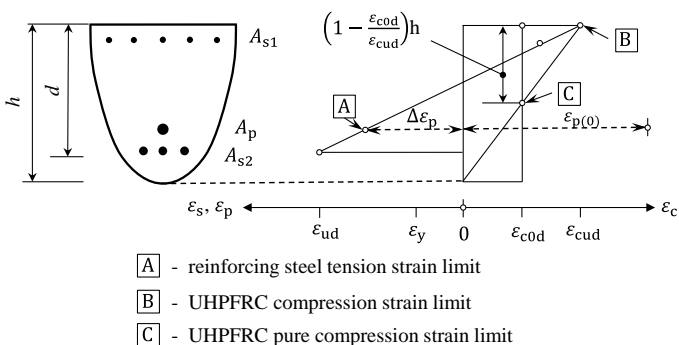


图 5 《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》受弯构件抗弯承载力计算



- [A] - reinforcing steel tension strain limit
- [B] - UHPFRC compression strain limit
- [C] - UHPFRC pure compression strain limit

图 6 《法国超高性能混凝土结构设计规范 NFP18-7102016》受弯构件抗弯

承载力计算

矩形截面受弯承载力计算示例 1（仅配置普通钢筋）：

以 $b = 500\text{mm}$, $h = 1000\text{mm}$ 截面为示例计算, 受拉钢筋采用 8 根 25mm 钢筋, $A_s = 3928\text{mm}^2$, 受压钢筋采用 4 根 25mm 钢筋, $A'_s = 1964\text{mm}^2$, $a_s = 55\text{mm}$, $a'_s = 40\text{mm}$, 截面如图 7 所示。取 UC180 等级超高性能混凝土, $f_{\text{Utud}} = 6.2\text{MPa}$, $E_{\text{Uc}} = 4.5 \times 10^4\text{MPa}$, $\varepsilon_{\text{Utu}} = 0.002$, $f_{\text{sd}} = 330\text{MPa}$, $E_s = 2 \times 10^5\text{MPa}$ 。

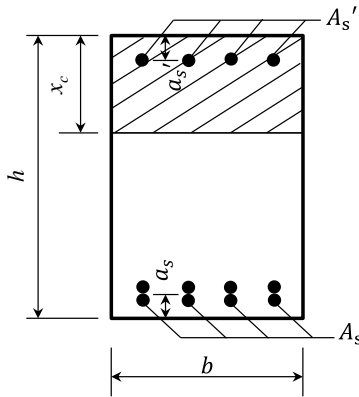


图 7 矩形截面超高性能混凝土受弯构件正截面承载力计算示例

（仅配置纵向普通钢筋）

由式 (4) 并带入式 (5.2.2-3) ~ (5.2.2-8), 求出 x_c ,

$$F_{\text{Uc}} + E_s A'_s \varepsilon'_s = F_{\text{Ut}} + f_{\text{sd}} A_s \quad (4)$$

即

$$\begin{aligned} 0.5E_{\text{Uc}} \cdot \frac{x_c}{h - x_c} 2.0\varepsilon_{\text{Utu}} \cdot bx_c + E_s A'_s \cdot \frac{x_c - a'_s}{h - x_c} 2.0\varepsilon_{\text{Utu}} \\ = 0.9f_{\text{Utud}}b(h - x_c) + f_{\text{sd}}A_s \end{aligned}$$

求解 x_c 的一元二次方程，得出

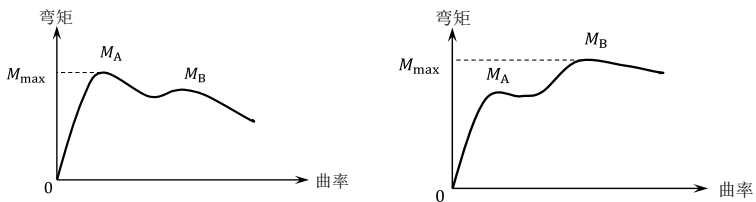
$$x_c = 229.0\text{mm} < \xi_b h_0 = 0.62 \times (1000 - 55) = 585.9\text{mm}$$

此时，受压边缘超高性能混凝土的压应力 $\sigma_{uc} = 53.5\text{MPa} \leq f_{ucd} = 87\text{MPa}$;

由式 (5.2.2-1) 可计算出截面的抗弯承载力为 $M_u = 2380.5\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

2 当截面同时配预应力钢筋及普通钢筋时：

配置体内钢束及普通钢筋的矩形截面超高性能混凝土受弯构件抗弯承载力计算时，按 5.1.3 条计算假定及截面内力平衡方程确定受压区高度，平衡方程截面受拉区抗力计入拉应变小于 2.0 倍极限拉应变范围内的超高性能混凝土材料抗拉强度效应。由于预应力钢束的屈服应变 (1860MPa 钢绞线屈服应变约 9000 μ) 远高于 2.0 倍超高性能混凝土极限拉应变 (4000 μ)，二者不一定能同时发挥最大抗拉能力。配预应力钢束的超高性能混凝土受弯构件抗弯承载力与钢束初应变、钢束抗拉能力与受拉区超高性能混凝土抗拉能力的相对大小关系等因素有关。如图 8， M_A 为截面受拉区超高性能混凝土充分发挥抗拉能力时 (边缘超高性能混凝土抗拉未退出工作) 截面的抗弯能力； M_B 为截面受拉钢束充分发挥抗拉强度时 (部分靠近受拉边缘的超高性能混凝土抗拉退出工作) 截面的抗弯能力，截面抗弯承载力 M_{\max} 视钢束初应变、钢束面积等参数而定。



情形 1：抗弯承载力由超高性能混凝土抗拉能力充分发挥控制（配束较少，或钢束初应力水平较高）

情形 2：抗弯承载力由钢束抗拉能力充分发挥控制（配束较多且钢束初应力水平较低）

图 8 超高性能混凝土受弯构件抗拉承载力曲线（同时配预应力钢筋及普通钢筋）

矩形截面受弯承载力计算示例 2（同时配置普通钢筋及预应力钢筋，预应力钢筋初拉力较大）：

以 $b = 500\text{mm}$, $h = 1000\text{mm}$ 截面为示例计算，受拉钢筋采用 4 根 25mm 钢筋， $A_s = 1964\text{mm}^2$ ，受压钢筋采用 2 根 25mm 钢筋， $A_s' = 981\text{mm}^2$ ，受拉预应力钢筋采用 1 根 $\Phi 15.2-15$ 钢绞线， $A_p = 2085\text{mm}^2$ ，钢束有效预拉应力为 $\sigma_p = 800\text{MPa}$ ， $a_s = 40\text{mm}$ ， $a_s' = 40\text{mm}$ ，截面如下图所示。取 UC180 等级超高性能混凝土， $f_{\text{Utud}} = 6.2\text{MPa}$ ， $E_{\text{Uc}} = 4.5 \times 10^4\text{MPa}$ ， $\varepsilon_{\text{Utut}} = 0.002$ ， $f_{\text{sd}} = 330\text{MPa}$ ， $E_s = 2 \times 10^5\text{MPa}$ ， $f_p = 1260\text{MPa}$ ， $E_s = 1.95 \times 10^5\text{MPa}$ 。

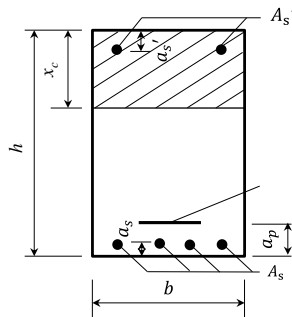


图 9 矩形截面超高性能混凝土受弯构件正截面承载力计算示例
（同时配置纵向普通钢筋及纵向预应力钢筋）

由预应力钢筋、普通钢筋的位置及截面特性可计算 $\sigma_{p0} = 832\text{MPa}$ ，由式（5.2.2-15）、（5.2.2-16）可得，受拉区预应力

钢筋屈服时, $\varepsilon_p = (f_{pd} - \sigma_{p0})/E_p = 0.00220$; 超高性能混凝土受拉边缘应变:

$$\varepsilon_{Ut} = \frac{h}{h - a_p} \varepsilon_p = 0.00244 < 2.0\varepsilon_{Utu}$$

取 $\varepsilon_{Ut} = 2.0\varepsilon_{Utu} = 0.004$, 即在超高性能混凝土受拉边缘的拉应变为 $2.0\varepsilon_{Utu}$ 时达到截面的抗弯承载力极限状态。

将式 (5.2.2-12) ~ (5.2.2-20) 带入式 (5.2.2-11), 求解 x_c 的一元二次方程, 得出:

$$x_c = 285.6\text{mm} < \xi_b h_0 = 0.60 \times (1000 - 80) = 552\text{mm}$$

此时, 受压边缘超高性能混凝土的压应力 $\sigma_{Uc} = 71.9\text{MPa} \leq f_{Ucd} = 87\text{MPa}$;

由式 (5.2.2-10) 可计算出截面的抗弯承载力为 $M_u = 3956.4\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

矩形截面受弯承载力计算示例 3 (同时配置普通钢筋及预应力钢筋, 预应力钢筋初拉力较小):

钢束有效预拉应力为 $\sigma_p = 300\text{MPa}$, 其余同算例 2。

由预应力钢筋、普通钢筋的位置及截面特性可计算 $\sigma_{p0} = 315\text{MPa}$, 由式 (5.2.2-15)、(5.2.2-16) 可得, 受拉区预应力钢筋屈服时, $\varepsilon_p = (f_{pd} - \sigma_{p0})/E_p = 0.00485$; 超高性能混凝土受拉边缘应变

$$\varepsilon_{Ut} = \frac{h}{h - a_p} \varepsilon_p = 0.00539 > 2.0\varepsilon_{Utu}$$

取 $\varepsilon_{Ut} = 0.00539$, 此时超高性能混凝土受拉边缘的拉应变为 $2.0\varepsilon_{Utu}$ 的部分已退出受拉。

将式 (5.2.2-12) ~ (5.2.2-20) 带入式 (5.2.2-11), 求解 x_c 的一元二次方程, 得出

$$x_c = 242.4\text{mm} < \xi_b h_0 = 0.405 \times (1000 - 80) = 372.6\text{mm}$$

此时，受压边缘超高性能混凝土的压应力 $\sigma_{uc} = 77.5\text{MPa} \leq f_{ucd} = 87\text{MPa}$ ；

由式（5.2.2-10）可计算出截面的抗弯承载力为 $M_u = 3582.5\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

5.2.3 对于工字形截面超高性能混凝土受弯构件抗弯承载力计算公式，区分受压区位于翼缘内及受压区高度位于腹板范围内两种情况，其余计算原理及假定同本标准第5.2.2条。

5.2.4 为优化受压区超高性能混凝土用量采用超高性能混凝土-RC组合截面时（RC板位于受压翼缘侧），本条给出了工字形截面超高性能混凝土-RC受弯构件抗弯承载力计算公式，假定受压区高度覆盖普通钢筋混凝土RC面板层（不满足此假设说明RC层厚度取值偏大，不经济），并区分受压区位于工字形超高性能混凝土翼缘内及受压区高度位于腹板范围内两种情况，其余计算原理及假定同本标准第5.2.2条。

5.2.5 参考《瑞士UHPFRC设计指南 SIA 2052 2016》，超高性能混凝土构件斜截面抗剪承载力包括超高性能混凝土构件基体抗剪项、普通钢筋抗剪项、预应力钢筋抗剪项三部分，其中预应力钢束的作用效应除弯起筋竖向力分量外，预应力轴力对抗剪承载力提高作用体现在超高性能混凝土构件基体抗剪项及普通钢筋抗剪项中主压应力场倾角的变化中。

5.2.6、5.2.7 配置体内钢束及普通钢筋的矩形截面超高性能混凝土偏心受压及偏心受拉构件正截面承载力计算时，按本标准第5.1.3条计算假定及截面内力平衡方程确定受压区高度，平衡方程截面受拉区抗力计入拉应变小于2.0倍极限拉应变范围内的超高性能混凝土材料抗拉强度效应。

5.2.8 超高性能混凝土材料抗拉能力及延性性能显著优于常规混凝土，其抗扭、抗冲切及局部承压受力分析参照既有常规混凝土结构分析计算方法是偏安全的。

5.2.9、5.2.10 与普通钢筋混凝土结构不同，由于超高性能混凝土结构设计时计入超高性能混凝土抗拉能力对结构受力性能的贡献，因此需要对超高性能混凝土结构受拉疲劳应力进行控制。超高性能混凝土构件疲劳验算采用名义应力法，荷载组合选用标准值验算构件受拉边缘纤维拉应力。根据《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》的规定，疲劳强度控制水平： $\sigma_{U,D} = 0.3 \times (f_{Utek} + f_{Utuk}) = 0.6 \times \left(\frac{f_{Utek} + f_{Utuk}}{2}\right)$ 。对于本标准 3.0.6 条规定中进行局部分析或不配筋超高性能混凝土结构、且构件厚度大于 100mm 时，构件抗拉强度设计值 $f_{Utud} = 0.486f_{Utuk} \sim 0.571f_{Utuk}$ ，会出现疲劳强度控制水平大于抗拉强度设计值的情况（ $\sigma_{U,D} > f_{Utud}$ ），此时构件超高性能混凝土受拉边缘拉应力由抗拉强度设计值控制。

5.3 持久状况正常使用极限状态计算

5.3.1~5.3.3 超高性能混凝土构件中钢束张拉控制应力、预应力效应验算截面规定、预应力损失计算方法与普通预应力混凝土结构规定相同，除计算收缩徐变效应引起的预应力损失应按本标准第 3 章相关参数进行外，其余按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定执行。

5.3.6 应变硬化型超高性能混凝土材料具有较强的抗拉延性及裂缝控制能力，构件受拉开裂后裂缝形态细密，在达到极限拉应变前裂缝宽度很小（轴拉试验揭示裂缝宽度小于 0.05mm），当拉应变超过极限拉应变后，裂缝开展速度开始大幅增加。因此，对于应变硬化型超高性能混凝土构件当频遇组合下边缘拉应变不超过 ε_{Utu} 时，可不验算裂缝宽度，认为裂缝宽度 $< 0.05\text{mm}$ 。但应注意，若构件收缩变形受约束时，拉应变验算尚应计入被约束的收缩应变。

5.3.7 应变软化型超高性能混凝土材料在拉应力超过峰值抗拉

强度后抗拉性能快速退化，裂缝控制能力较差，裂缝开展形态与普通混凝土构件类似，偏安全地，此类构件裂缝宽度验算要求及计算方法按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定执行。

5.3.10 超高性能混凝土材料具有轻质高强的特性，有效减轻桥梁自重，实现桥梁构件轻型化。为避免挠度控制值要求高导致结构设计受刚度控制而增加截面尺寸、影响经济性，超高性能混凝土构件挠度限制条件较普通钢筋混凝土桥梁有所降低，但不低于钢结构桥梁挠度控制限值要求。

5.4 持久状况和短暂状况构件应力计算

5.4.2 持久状况设计时，若超高性能混凝土法向压应力超过 $0.4f_{Uck}$ 或法向拉应力超过 f_{Utek} 时，结构将产生非线性徐变效应，即正应力水平不变但徐变变形逐步变大，结构分析应计入该非线性变形因素的影响。

5.4.7 超高性能混凝土具有高强、早强特性，但尚应对预应力超高性能混凝土构件张拉预应力钢筋时抗压强度及弹性模量进行下限值规定，以免过早张拉钢束引起后期较大的徐变变形，或因强度不足导致构件局部损伤。

5.5 构造要求

5.5.1 超高性能混凝土具有致密、抗裂性能好等特点，能较好保护普通钢筋及预应力钢筋，因此对超高性能混凝土构件的最小保护层厚度要求低于普通混凝土。参考《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》的规定，要求最外层钢筋保护层厚度不应小于 15mm。

5.5.2 超高性能混凝土与配筋材料（钢筋和钢绞线）之间的粘结

性能很大程度上决定了应力传递过程和传递长度，这一参数主要取决于超高性能混凝土的抗拉强度（间接反映粘结抗剪强度）、钢筋外形、钢筋端头锚固形状等因素。鉴于超高性能混凝土材料的力学性能远高于普通混凝土，因此在其中的钢筋锚固长度较普通混凝土大幅降低。通过对不同保护层厚度（2d、2.5d、3d、3.5d）、不同钢筋直径（12mm、16mm、20mm）、不同锚固长度（4d、6d、8d、10d）等参数开展钢筋直接拉拔锚固试验（加载反力不直接作用于超高性能混凝土锚固块体表面）的破坏形态可知，对屈服强度为400MPa的HRB400级钢筋，当锚固长度为10d时，上述各种保护层厚度下钢筋均为拉断破坏且超高性能混凝土构件侧面裂缝较少；考虑到实际应用时的定位偏差等因素，规定直线锚固的HRB400级受拉钢筋锚固长度为12d。《瑞士UHPFRC设计指南 SIA 2052 2016》中关于屈服强度为500MPa级受拉钢筋的锚固长度最小值为15d（端部直线形锚固），同时建议端部弯钩的受拉钢筋锚固长度可较直线形减少30%，受压钢筋锚固长度比受拉锚固长度可减少30%。由于超高性能混凝土构件的高强、轻质特性，从材料特性相匹配的角度建议配筋强度等级不宜过小，因此本标准中仅列出屈服强度400MPa级以及500MPa级钢筋的最小锚固长度取值。

5.5.3 最小配筋率设置 为避免受弯构件超过初裂弯矩后出现脆性断裂。而对于应变软化的超高性能混凝土，因抗裂性能及延性性能较差，最小配筋率设置原则基于确保承载能力极限状态所对应的荷载值高于开裂时所对应的荷载值，以保证构件不出现脆性破坏。

5.5.4 超高性能混凝土板的最小厚度 不应小于50mm为加工制造偏差、钢筋最小保护层要求及构件局部稳定等因素。某实际工程应用中采用超高性能混凝土-RC组合梁，其中超高性能混凝土预制梁采用 π 形截面，预制梁翼缘顶板厚度从边缘50mm渐变至腹板处100mm，50mm厚翼缘板内设置一层横桥向受力钢筋及与后浇钢筋混

凝土桥面板（RC板）的剪力筋（直径12mm的U形筋），在上述配筋需求下两侧保护层厚度尚能满足不小于15mm的要求。因此，配筋超高性能混凝土板的最小厚度不宜小于50mm。

5.5.5 由于施工偏差因素及梁体腹板配筋等构造需求，并参考国内外既有超高性能混凝土梁桥设计参数，认为超高性能混凝土梁的腹板宽度不应小于80mm。

5.5.6 当超高性能混凝土构件因预制或分段浇筑产生冷缝时，接缝处的钢纤维连续性得不到保证，抗裂强度被削弱，为此构件设计计算计入接缝处超高性能混凝土抗拉能力需对接缝构造做配筋加强处理。

5.6 加固设计

5.6.1 采用超高性能混凝土材料可对桥梁结构或构件进行承载能力加固，在某些特定场合也可用于提高局部构件的耐久性。采用超高性能混凝土加固桥梁技术是通过在原有桥梁结构基础上结合超高性能混凝土层来提高原有构件的承载力、刚度和耐久性的方法。跟传统增大截面法等类似加固技术对比，超高性能混凝土加固桥梁技术在不明显增加桥梁结构的自重的前提下，可有效提高结构的承载能力，并且可作为一层致密且有一定变形能力的保护层，以提高结构耐久性，特别适合在严苛环境下的混凝土桥梁结构。

5.6.2 新增超高性能混凝土层与原构件的连接可靠是保证加固后结构共同受力的关键，因此需要通过构造措施保证界面的连接不先于构件发生破坏，可通过界面凿毛或植筋等措施为保证界面可靠连接的措施。

加固工程中常采用构件表面凿毛、砂轮机或高压水喷射打毛及人工凿沟槽等方法，主要技术要求分别是：①原构件混凝土表面经修整露出骨料断面后，应再原构件凿毛成凹凸差不小于6mm且

露出至少一半的粗骨料的粗糙面；也可鑿成点深 $4\sim 6\text{mm}$ 、间距为不大于 30mm 的梅花形分布麻点。②采用砂轮机或高压水射流打毛时，在经修整露出骨料断面后的原构件混凝土表面打出方向垂直于剪力作用方向的纹路，纹深不小于 4mm ，纹路间距不大于 50mm 。③采用人工凿沟槽时，在经修整露出骨料断面后的原构件混凝土表面凿出方向垂直于剪力作用方向的沟槽，沟槽深不小于 6mm ，沟槽间距不大于 150mm 。

5.6.3 桥梁结构的恒载作用比较大，采用超高性能混凝土加固桥梁技术时，由于桥梁结构在后浇超高性能混凝土层硬化并与原结构间实现剪力连接前，实际上是分阶段受力，故将桥梁结构采用超高性能混凝土加固技术的施工过程分为两个受力阶段进行计算：第一阶段是以原构件截面受力的结构计算；第二阶段是以加固后构件组合截面受力的结构计算。

5.6.4、5.6.11 采用超高性能混凝土进行桥梁罩面加固时，可增加原截面承载力并提升原结构桥面耐久，应注意做好原结构表面粗糙化处理，确保后浇超高性能混凝土层与原结构层的可靠连接。对于不配筋超高性能混凝土罩面加固，考虑原结构表面粗糙化度对浇筑超高性能混凝土层均匀性的影响，建议其厚度宜大于 25mm ，该技术在挪威较早用于冬季除冰盐损伤常规混凝土梁顶层混凝土的耐久性加固工程应用；若在加罩超高性能混凝土层中设置钢筋网片，考虑保护层及钢筋布置需要，超高性能混凝土厚度不宜小于 40mm ；在上海某公路地面跨河桥上上部空心板加固工程中应用加罩 60mm 厚配单层双向钢筋网的超高性能混凝土加固结构层，用于快速修复空心板铰缝及桥面铺装破损害害。

5.6.7 在受压区采用超高性能混凝土进行加固抗弯承载能力计算基于截面平截面假定建立超高性能混凝土-混凝土组合梁的抗弯平衡方程，满足变形协调及截面内力平衡。受压区新增超高性能混凝土加固层的压应变根据上述平截面假定及内力平衡关系求解，

组合截面抗弯极限承载力计算时，由于超高性能混凝土加固层分阶段参与受力，且桥梁一期恒载占比通常较大，因此超高性能混凝土加固层压应力不一定达到其抗压强度设计值。计算模型中，相关系数与现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 保持一致。

6 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构设计

6.1 一般规定

6.1.1 借鉴常规正交异性桥面板的受力体系划分，整体计算为第一体系计算，局部计算为第二、三体系，三个体系的计算结果叠加，可得到超高性能混凝土-钢组合桥面板结构的完整应力状态。

1 第一体系：组合桥面板结构承受车道荷载作用，参与结构总体计算，也称为“主梁体系”。

2 第二体系：超高性能混凝土层与正交异性桥面板作为整体支承于主梁、横梁腹板上，承受车辆轮压作用，也称为“桥面体系”。

3 第三体系：超高性能混凝土层与钢顶板组成的叠合板件支承于顶板加劲，形成连续组合板，承受肋间的轮压荷载，也称为“面板体系”。

6.1.2 二、三体系传统算法包括格子梁法、P-E法、解析法等，上述方法均基于一定理论假设，结构形式规则时可取得良好的计算精度，并有益于概念设计。

近年来，有限元计算方法得到了广泛的应用，操作方便且可模拟各类结构形式，可根据结构的具体构造，建立详细的三维有限元模型，一次性计算二、三体系。建立空间阶段模型时，节段长度及边界条件应能模拟实际受力情况，单元尺寸应能满足工程设计要求。钢板件可采用板壳单元模拟，超高性能混凝土层可采用实体单元模拟，剪力连接件可采用弹簧单元或梁单元模拟。

6.1.4 温度梯度效应借鉴现行行业标准《公路桥梁设计通用规范》JTG D60 中的规定，并结合本规范超高性能混凝土层厚度的适用范围 50mm~100mm，因此超高性能混凝土-钢组合桥面板结构的竖向温度梯度分布形式采用单折线模式。

6.1.5 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构中超高性能混凝土结构层在恒载、活荷载、温度荷载及收缩徐变（变形被钢结构约束）

作用下可能承受较大拉应变，若受拉区段考虑超高性能混凝土参与受力时，采用 UT III 级以上抗拉性能的超高性能混凝土可有效适应上述效益产生的拉应变而不至于产生明显裂缝，进而保证超高性能混凝土与钢筋及钢结构协同工作的同时兼备较好的耐久性。在结构受压区段或者受拉受力性能需求较小的区段也可采用应变软化型超高性能混凝土。

6.2 结构计算

6.2.1 超高性能混凝土-钢组合桥面板结构受力性能与施工顺序密切相关，计算模型与实际施工状态需要对应。强度验算借鉴现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01 中的规定，钢结构部分受力验算以各部位应力水平作为验算依据。超高性能混凝土-钢组合结构桥面板剪力滞效应明显，应计算桥面板的有限分布宽度。

6.2.2 超高性能混凝土-钢组合桥面板中受拉区超高性能混凝土结构层在恒载、活荷载、温度荷载、收缩徐变效应共同作用下其结构层的名义拉应力通常会超过超高性能混凝土的弹性抗拉强度，当采用应变硬化型超高性能混凝土结构层时，在上述荷载作用下超高性能混凝土层应变不超过极限拉应变时，应变硬化型超高性能混凝土产生的裂缝为细密微裂缝，进而保证超高性能混凝土与钢筋及钢结构协同工作的同时兼备较好的耐久性，因此对应变硬化型超高性能混凝土结构层采用考虑材料非线性本构关系的拉应变设计验算。上述超高性能混凝土总拉伸应变分析时，超高性能混凝土超出弹性抗拉强度后按 4.0.8 条给出的双折线非线性抗拉本构模型考虑进行受力及变形分析，在塑性区段受拉超高性能混凝土不再提供额外轴向刚度，其结构受力变形与内设钢筋网片变形协调，超高性能混凝土塑性总应变由约束收缩应变（约束收缩应变有较大不确定性，施工过程需加强管控）、温差应变、整体及局部组合结构受力时超高性能混凝土结构层与钢筋随动变形应变三部

分构成。

6.2.12 超高性能混凝土层应力水平小于弹性抗拉强度设计值时，尚处于弹性状态，未发生开裂。对于应力水平大于弹性抗拉强度设计值时，超高性能混凝土进入屈服平台，应当计入非线性本构关系计算应变值，由于应变硬化型超高性能混凝土的拉应变超过极限拉应变后裂缝开展迅速（此时钢筋已经屈服），因此，超高性能混凝土拉应变限值取超高性能混凝土极限拉应变。超高性能混凝土-钢组合桥面中建议采用应变硬化型超高性能混凝土结构层，当其抗拉性能不低于 UT III 级时，其极限抗拉强度大于弹性抗拉强度，且极限拉应变超过 2000μ 。轴拉试验表明，具备上述轴拉性能的超高性能混凝土有较强的裂缝控制能力，在达到 2000μ 拉应变时基体裂缝为细密分散裂纹，裂缝宽度不超过 0.05mm ，因此综合考虑超高性能混凝土受钢结构约束收缩应变、与钢结构温度效应变形差、整体及局部受力作用下超高性能混凝土结构层超出弹性抗拉强度设计值后的随动塑性应变总和不超过应变硬化型超高性能混凝土极限拉应变时，可不进行裂缝宽度验算。

6.2.14 本条规定了超高性能混凝土-钢组合桥面板结构局部挠度的加载模式和限值，目的是确保桥面系的局部挠度不会过大，以减小在车载作用下，面层因局部变形过大而出现脱层等病害问题，同时确保行车的舒适性。

6.3 构造要求

6.3.1 目前国内外正交异性钢桥面板的设计中，钢面板厚度一般不小于 14mm 。而对于超高性能混凝土-钢组合桥面板结构，考虑到超高性能混凝土层对桥面系刚度的贡献， 50mm 以上超高性能混凝土-钢组合桥面板可降低钢桥面疲劳应力幅 50% 以上，钢面板厚度可适当减薄，故本条文中规定不小于 12mm 。

根据现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433，焊钉直径规格最小为 10cm ，且一般控制焊钉的长径比不小于 4 ，

因此超高性能混凝土层厚度不宜小于 50mm；考虑到超高性能混凝土-钢组合桥面板结构的经济性，超高性能混凝土层厚度一般不大于 100mm。实际工程应用中超高性能混凝土-钢组合桥面中超高性能混凝土结构层厚度多在 50~60mm。

6.3.2 超高性能混凝土-钢组合桥面板中常用超高性能混凝土结构层厚度为 50mm~60mm，根据顺横向受力需要通常布置双向钢筋网片，钢筋直径 10~16mm。保护层厚度规定结合实际配筋布置条件，并参照《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》瑞士规范规定，要求最小厚度不小于 10mm，不宜小于 15mm；通常临磨耗层侧保护层厚度取 15mm，临钢顶板侧可按最小 10mm 控制。

6.3.4 超高性能混凝土装配化施工或分段浇筑时，会出现超高性能混凝土接缝。由于接缝处超高性能混凝土中的钢纤维不连续，抗裂强度将被削弱，为此，需对接缝处做硬化处理，如加密钢筋间距等。接缝设计应通过试验验证其传力及耐久性能。

6.3.5 超高性能混凝土层应设置边界连接构造，保证边界构造物与超高性能混凝土层连接处不产生裂缝，从而避免超高性能混凝土层内部或桥面受到外部有害物质侵入所造成的损害。与超高性能混凝土层相接的边界构造物包括伸缩缝、路缘石、护栏、其他路面结构或其他构造物。当边界相接部分为路面结构时，应采用超高性能混凝土层伸入到路面结构中的方式设置边界连接结构；除路面结构以外，其他边界结构物应采用钢结构或混凝土结构。

6.3.6 本条针对桥面沥青磨耗层不小于 40mm，如桥面沥青磨耗层小于 40mm，防水粘结层的剪切强度应研究后适当提高。

7 桥梁预制构件连接设计

7.1 一般规定

7.1.1 超高性能混凝土由于具有高强度、高韧性、高耐久性、与钢筋握裹力强、自流平便于施工等优点,可应用于桥梁预制结构之间的连接中,连接构造采用钢筋搭接连接,无需绑扎或焊接,现场工作量小,施工快速,钢筋定位要求低,且适用于束筋布置,是一种较好的连接形式。

7.1.2 超高性能混凝土应用于预制梁连接时,选型主要取决于超高性能混凝土与钢筋粘结性能,试验表明,UT I型可满足相关要求。超高性能混凝土应用于下部结构连接时,选型主要取决于超高性能混凝土的抗拉强度和极限拉应变,试验表明,UT III可满足相关要求。

7.1.3 超高性能混凝土材料致密性高,耐久性远超普通混凝土,最外侧钢筋的常规保护层厚度即可满足耐久性的要求,对于受力主筋而言,保护层厚度的选取主要受钢筋在超高性能混凝土中的锚固性能和消除钢纤维取向的影响。超高性能混凝土中常用长度为 $6\text{mm}\sim 25\text{mm}$ 、直径为 $0.10\text{mm}\sim 0.25\text{mm}$ 、长径比为 $50\sim 120$ 的微细钢纤维。

7.1.4 上海市政总院做了159个超高性能混凝土与钢筋的粘结性能。试验表明,搭接长度与钢筋直径有密切关系。当钢筋直径大于 25mm 时,钢筋受拉时的颈缩效应明显,导致钢筋与超高性能混凝土接触面积减小,应计入搭接长度的增加。当钢筋直径大于 32mm 时,目前还缺乏相关试验数据,最小搭接长度应根据试验确定。

7.2 上部结构连接

7.2.1 预制梁连接的典型构造参考当前实际工程中的应用。试验表明,预制梁连接形式采用平直缝或企口缝均可满足受力要求,为了提高后浇超高性能混凝土与普通预制混凝土的粘结性能,接触截面应进行粗糙化处理。

7.2.2 为了提高连接后预制梁的整体性,预制梁连接的典型构造设计是基于连接段的抗弯承载力强于预制梁段得出的,即破坏发生在预制梁段,保证连接段不发生破坏。上海市政总院联合同济大学做了 26 个超高性能混凝土连接预制桥面板的静力加载试验,试验结果表明,在满足本标准第 7.1.4 条钢筋最小搭接长度时,破坏发生在预制梁段。

7.3 下部结构连接

7.3.1、7.3.2 下部结构连接的典型构造参考当前实际工程中的应用。

7.3.4 预制墩柱配筋形式多样,束筋布置也较为常见,常规预制墩柱连接方式为灌浆套筒连接、灌浆金属波纹管连接等,仅适用于单根钢筋的配筋形式,应用受限。而超高性能混凝土连接预制墩柱适用于束筋连接,应用范围更广。

7.3.5 连接段作为能力保护构件设计时,计算按现行行业标准《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。为了计入超高性能混凝土抗拉强度的贡献及保证钢筋在超高性能混凝土中的锚固性能,超高性能混凝土的最大拉伸应变应小于超高性能混凝土的极限拉伸应变,即超高性能混凝土在最大拉伸应变时仍可提供抗拉强度且不开裂。

7.3.6 塑性铰发生在预制段,连接段采用能力保护构件设计,即

墩柱加密区应从预制段起计算,扣除超高性能混凝土连接段长度。

7.3.7 超高性能混凝土连接预制墩柱的设计理念为塑性铰发生在预制段,连接段采用能力保护构件设计,相对其他连接方式破坏发生在连接段,在地震作用下可更好的控制损伤部位,提高抗震韧性。上海市政总院联合同济大学做了30个超高性能混凝土连接预制桥墩的拟静力加载试验,试验结果表明,在合理考虑超高性能混凝土材料的抗拉性能、超高性能混凝土连接段钢筋搭接长度、超高性能混凝土厚度和接缝处受力钢筋配置时,可使破坏发生在预制段。

抗震验算可按现行行业标准《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,但墩柱高度应扣除连接段的高度。

8 施工及质量检验

8.1 一般规定

8.1.3 首件施工是通过选取标准段、精细化管理、培训与交流、总结与改进以及复制与推广等步骤,可以有效提升施工质量和效率,复制与推广至整个工程建设,确保项目顺利完成。

8.2 施工准备

8.2.1 超高性能混凝土施工专项方案分为两个方面:一方面是混凝土搅拌机的生产技术方案,包括原材料、设备种类和数量、混凝土的制备、运输等;另一方面是工程现场的施工技术方案,包括浇筑、振捣、养护等工艺。

8.2.2 超高性能混凝土的供应方式可由供需双方协商确定,可将除钢纤维外各种固体原材料拌成预混料,也可将钢纤维预混入预混料中。为保证计量精度,原材料及预混料的计量应采用电子计量设备。

8.2.3 原材料及预混料应储存在干燥通风的场所,并按品种批号分别堆放,不得混堆混用,且应先存先用。

8.3 模板和支架

8.3.3 由于钢纤维的存在,超高性能混凝土在施工中不能进行插捣,故超高性能混凝土表面的气孔排出就要更多地依赖模板以及脱模剂的使用。经过市场调研发现,水性脱模剂能够比较好地排出超高性能混凝土里的气体,提高表面成型质量。

8.4 搅拌

8.4.1 目前超高性能混凝土是采用预混料现场加水搅拌而成。搅拌前应确定搅拌机的状态,搅拌机的出料速率应与运输能力和现场浇筑能力匹配,合理配制资源,控制搅拌、运输和浇筑的连续性。

8.4.3 超高性能混凝土对于用水量有比较高的精度要求,当用水量偏差大于 1%时,混凝土工作性会产生较大的差别,从而影响混凝土的性能。

8.4.4 超高性能混凝土所需要的搅拌时间相较于普通高性能混凝土更长,根据不同的搅拌机,应试验制定最佳搅拌时间,但是不宜少于 3min,流化后继续搅拌时间不宜少于 1min。

8.4.5 当超高性能混凝土拌合物与浇筑地点相距较远,或由于施工安排需要等待较长时间才能浇筑时,拌合物的工作性可能会因水分蒸发、颗粒沉降、减水剂效果减弱等因素而发生显著变化。在此情况下,除了常规的 1 小时扩展度检验外,还需在拌合物运至浇筑地点前,根据实际需要检验 2 小时或更长时间的扩展度。这一检验旨在确保即使在较长时间的运输或等待后,拌合物的工作性仍能满足施工要求,避免因工作性恶化而导致浇筑质量下降。

8.5 运输

8.5.1、8.5.2 超高性能混凝土建议使用搅拌罐车运输,由于翻斗车及吊斗没有搅拌措施,拌合物易离析,根据现场工程经验,仅适用于扩展度在 450mm 以下的混凝土拌合物。对于寒冷及炎热天气,应对搅拌车、翻斗车采取保温或隔热措施,避免混凝土产生较大的温度起伏。

8.5.3 混凝土拌合物从搅拌机卸入搅拌运输车至卸料时的时间不宜超过 90min。运输时间过长,混凝土拌合物的流动性降低过

多,难于浇筑密实。同一构件或同一工程部位的混凝土应连续浇筑,避免产生冷缝。

8.6 浇筑

8.6.1 超高性能混凝土浇筑前,应检查模板支撑的稳定性以及接缝的密合情况,并应保证模板在混凝土浇筑过程中不失稳、不跑模和不漏浆。天气炎热时,宜采取遮挡措施避免阳光照射金属模板,或从金属模板外侧进行浇水降温。

8.6.4 自流平超高性能混凝土(扩展度应大于550mm)是一种具有极高力学性能和优异工作性的混凝土材料。该混凝土拌合物在浇筑时,无需额外振捣或仅需轻微振捣即可自动流动并填充模板内的所有空间,形成密实、均匀且表面平整的混凝土结构。硬壳现象是指在超高性能混凝土浇筑后,其表面迅速干燥并硬化,形成一层硬壳,而内部混凝土可能仍处于未完全凝结状态。这种硬壳不仅影响混凝土的力学性能,如强度、韧性和耐久性,还可能导致混凝土结构的整体性能下降。

8.6.5 凿毛应确保完全漏出新鲜密实混凝土的粗集料,且凿毛深度不宜小于5mm。

8.6.6 当采用抛丸方式处理时,抛丸构造深度宜在0.35mm~0.5mm之间。

抛丸工艺:浇筑成型后,自然养护2天或抗压强度达到40MPa后,清理超高性能混凝土层表面浮浆,用压缩空气吹净表面浮尘,随后进行表面抛丸。

8.7 养护

8.7.2 大量试验数据表明,超高性能混凝土的收缩主要发生在7d内,特别是浇筑后的前3d。与普通混凝土一样,超高性能混凝土的

收缩主要分为塑性收缩、自收缩、温度收缩和干燥收缩。由于超高性能混凝土的水灰比低、胶凝材料用量大,自收缩为主要的收缩形式,自收缩主要发生时间为前 3d。因此,现场浇筑的超高性能混凝土在浇筑完成后,应及时增湿覆膜,减少早期水分蒸发,提高混凝土中胶凝材料的水化程度。

超高性能混凝土用于钢-超高性能混凝土组合结构,属于超薄超大面积混凝土施工,混凝土的养护要求极为严格。为保证塑性期不失水,混凝土成型完毕后,就应开始洒水保湿。混凝土塑性期会产生很大的塑性收缩和水化收缩,因此在终凝前的二次抹压尤为重要。

8.7.4 在搅拌超高性能混凝土时,要采取措施控制原料温度,确保混凝土的入模温度符合要求。

8.8 高温和冬期施工

8.8.1 高温施工:即日最高温度超过 35℃。

由于超高性能混凝土胶材用量大、用水量低,在夏季施工时,容易出现失水起壳、流动性损失过快现象,在正午阳光直射下甚至会发生速凝,严重影响施工质量。故夏季施工时,应编制相应夏季施工技术方案、应急方案等,保证工程质量和施工安全。

8.8.2 在正常情况下,超高性能混凝土强度随龄期发展较快,但日均温度低于 5℃时,混凝土凝结时间大幅度增加,强度随龄期发展缓慢此时虽不至于冻坏,但也会大幅延长工期,故本标准推荐蓄热养护,使混凝土快速产生强度。

8.9 质量检验

8.9.1 出厂检验报告应包含:预制构件的名称和型号、生产日

期及生产批次、出厂检验日期，原材料检验报告及验收资料、预制构件施工过程的检验报告和验收资料等。

8.10 构件预制、运输、安装

8.10.4 模具可采用分段组合式模具，以适应不同尺寸构件，模具拼接应具有互换性。拼装完成后应进行质量验收，验收合格后方可使用。

互换性：同一规格的零件（构件），不需要作任何挑选、调整或修配，就能装配到成品上去，并能符合使用性能要求，这种特性就叫互换性。互换性意义：有利于组织协作和专业化、规模化生产，对保证产品质量，降低成本、方便装配、维修有重要意义。

8.10.10 拼装前应对节段拼接缝进行表面处理，清除尘土、油脂等污染物及松散混凝土与浮浆。

8.10.11 防撞护栏安装的稳定性措施：使用临时连接件（如角钢、螺栓等）将防撞墙与梁体进行初步连接，在防撞墙底部设置支撑架，并使用拉索或缆绳将其与桥梁的固定点相连，以增加其稳定性。