



T/CECS G XXXX: 2021

中国工程建设协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路钢-超高性能混凝土组合桥梁
技术规程

Technical Specifications for Highway Steel-Ultra High
Performance Concrete Composite Bridge

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

征求意见稿

中国工程建设协会标准

公路钢-超高性能混凝土组合桥梁 技术规程

Technical Specifications for Highway Steel-Ultra High Performance
Concrete Composite Bridge

T/CECS G: xxxxxx

主编单位：湖南大学

上海市城市建设设计研究总院（集团）有限公司

批准部门：中国工程建设标准化协会

实施日期：2021 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2019 年第一批中国工程建设标准化协会标准（CECS G）制修订项目编制工作的通知》（中建标公路[2019] 84 号）的要求，由湖南大学承担《公路钢-超高性能混凝土组合桥梁技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

本规程对公路钢-超高性能混凝土组合桥梁设计、施工中的有关技术要求进行了规定。在编制过程中，考虑国内尚未颁布相关的钢-超高性能混凝土桥梁设计规范，为规范公路钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计和施工，统一质量检验标准，确保其安全可靠、技术先进、经久耐用、经济合理，编制组以《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01-2015）为基础，吸纳已有的工程经验和编制单位前期的科研成果，并参考国内外的有关标准、规范及超高性能混凝土技术研究成果，编制形成本技术规程，作为钢-超高性能混凝土组合桥梁设计、施工和检验验收的技术性指导文件。

本规程主要内容包括：1 总则；2 术语和符号；3 材料；4 基本规定；5 组合梁；6 组合梁超高性能混凝土桥面板；7 钢-超高性能混凝土组合梁计算；8 连接件；9 施工；10 检验与验收。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由湖南大学或上海市城市建设设计研究总院（集团）有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或曹君辉（地址：湖南省长沙市岳麓区湖南大学土木工程学院，邮编：410082；电话：15802536124；电子邮箱：caojunhui@hnu.edu.cn），以便修订时研用。

主 编 单 位：湖南大学

上海市城市建设设计研究总院（集团）有限公司

参 编 单 位：中交公路规划设计院有限公司

中交第二公路勘察设计研究院有限公司

湖南省交通规划勘察设计院有限公司

林同桃国际工程咨询(中国)有限公司

湖南大学设计研究院有限公司

广东冠生土木工程技术有限公司

湖南中路华程桥梁科技股份有限公司

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

参 加 人 员：

征求意见稿

目 录

前 言	I
1. 总则	1
2. 术语和符号	2
2.1 术 语	2
2.2 符 号	2
3. 材料	8
3.1 超高性能混凝土（UHPC）	8
3.2 钢材	16
4. 基本规定	16
5. 组合梁	18
5.1 一般规定	18
5.2 设计原则	18
5.3 计算规定	19
5.4 变形与裂缝控制	20
6. 组合梁超高性能混凝土桥面板	21
6.1 一般规定	21
6.2 超高性能混凝土平板构造要求	21
6.3 超高性能混凝土矮肋板构造要求	22
6.4 型钢-超高性能混凝土组合板构造要求	23
6.5 桥面板配筋构造	24
6.6 超高性能混凝土现浇湿接缝	27
6.7 纵向抗剪验算	30
6.8 冲切验算	30
7. 钢-超高性能混凝土组合梁计算	32
7.1 作用效应计算	32
7.2 强度计算	33
7.3 稳定计算	34

7.4	疲劳计算.....	35
7.5	应力计算.....	36
7.6	裂缝计算.....	37
7.7	变形计算.....	45
8.	连接件	46
8.1	一般规定.....	46
8.2	构造要求.....	46
8.3	计算.....	47
9.	施工	50
9.1	一般规定.....	50
9.2	钢梁工程.....	50
9.3	模板、支架.....	51
9.4	超高性能混凝土工程.....	53
9.5	钢-超高性能混凝土组合梁预制安装	59
9.6	超高性能混凝土现浇湿接缝施工.....	61
10.	检验与验收	62
10.1	一般规定.....	62
10.2	桥梁总体.....	62
10.3	钢梁工程.....	63
10.4	模板、支架.....	65
10.5	钢筋.....	67
10.6	超高性能混凝土材料.....	68
10.7	钢-超高性能混凝土组合梁预制安装	69
10.8	超高性能混凝土现浇湿接缝.....	71
10.9	超高性能混凝土板抛丸糙化处理.....	72
附录 A	超高性能混凝土轴拉性能试验方法.....	73
附录 B	超高性能混凝土收缩应变和徐变系数计算.....	78
附录 C	超高性能混凝土纤维取向系数的确定方法及取值.....	80
附录 D	超高性能混凝土抗压、抗弯、轴拉强度及性能评定.....	83

附录 E 超高性能混凝土收缩试验方法	85
附录 F 超高性能混凝土原材料检验	89
本规程用词说明	92
引用标准名录	93

征求意见稿

1. 总则

1.0.1 为规范和指导公路钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计、施工和检验验收，保障工程质量，按照安全、耐久、适用、环保、经济和美观的原则，制定本技术规程。

条文说明

目前，我国已经制定了《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01)。但是该规范的适用范围是常规的钢-混凝土组合桥梁，不适用钢-超高性能混凝土组合梁桥。在设计、施工等诸多方面，钢-超高性能混凝土组合桥梁结构不同于传统的钢-混凝土组合桥梁。同时考虑国内没有颁布相关的钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计规范，为规范钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计、施工和检验验收，确保其技术先进、安全可靠、耐久使用、经济合理，以行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01)为基础，吸纳已有的工程经验和编制单位前期的科研成果，并参考国内外的有关标准、规范及超高性能混凝土技术研究成果，编制形成本技术规程，作为钢-超高性能混凝土组合桥梁设计、施工和检验验收的技术性指导文件。

1.0.2 本规程适用于超高性能混凝土作为桥面板材料的钢-超高性能混凝土组合梁结构，主要为新建或扩建公路桥梁，具体包含了公路钢-超高性能混凝土组合梁结构的设计、施工及检验验收。

1.0.3 本规程采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，按分项系数的设计表达式进行设计。

1.0.4 公路钢-超高性能混凝土组合桥梁应按不小于 100 年设计使用年限进行设计。

1.0.5 公路钢-超高性能混凝土组合桥梁应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。

1.0.6 公路钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计应考虑施工、运营管理与养护的要求。

1.0.7 公路钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计、施工和检验验收除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2. 术语和符号

2.1 术 语

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

由水泥、矿物掺合料、集料、钢纤维和外加剂等材料或由上述材料制成的干混料加水拌和，经凝结硬化后形成的一种具有超高强度、超高韧性和超高耐久性的水泥基复合材料。

2.1.2 钢-超高性能混凝土组合桥梁 steel-UHPC composite bridge

钢-超高性能混凝土组合桥梁主要由超高性能混凝土桥面板、钢梁组合而成。

2.1.3 超高性能混凝土桥面板 UHPC bridge deck

超高性能混凝土桥面板由超高性能混凝土板和钢筋网组成，主要起承重和防水作用。

2.1.4 纤维取向系数 fiber orientation coefficient

表示纤维分布和取向效应对超高性能混凝土受拉开裂后力学性能影响的系数。

2.1.5 标准热养护 standard heat curing

超高性能混凝土试件在温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度大于 50% 的环境中静置 1d~2d 后脱模，将脱模后的试件进行热养护，养护制度为以不大于 15°C/h 的速率升温至不低于 90°C ，恒温 48h，然后以不大于 15°C/h 的速率降温至环境温度。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能有关符号

UC120 ——边长 100mm 的立方体抗压强度标准值为 120 MPa 的超高性能混凝土；

UT7 ——哑铃形轴心抗拉强度标准值为 7 MPa 的超高性能混凝土；

UF22 ——400×100×100mm 的棱柱体弯拉强度标准值为 22 MPa 的超高性能混凝土；

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

f_{ck} 、 f_{cd} ——超高性能混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；

f_{tk} 、 f_{td} ——超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；

f_{te} ——超高性能混凝土弹性极限抗拉强度；

f_{tu} ——超高性能混凝土极限抗拉强度；

ε_0 、 ε_{cu} ——超高性能混凝土受压峰值应变、极限压应变；

ε_{el} 、 ε_{tu} ——超高性能混凝土受拉弹性极限拉应变（初裂应变）、极限拉应变；

μ_c ——超高性能混凝土泊松比；

α_c ——超高性能混凝土温度线膨胀系数；

E_s ——钢材弹性模量；

E_r ——普通钢筋弹性模量；

E_{sp} ——钢板条弹性模量；

E_c 、 G_c ——超高性能混凝土弹性模量、剪切变形模量；

f_k 、 f_d ——钢材抗拉、抗压和抗弯强度标准值、设计值；

f_{stud} ——焊钉材料的抗拉强度最小值；

f ——钢梁的强度设计值；

f_{vd} ——钢梁腹板的抗剪强度设计值；

f_{ctfm} ——超高性能混凝土最大开裂应力平均值；

$f_{ctm,el}$ ——超高性能混凝土弹性阶段极限拉应力平均值；

P_u ——推出试验得到的焊钉连接件的平均抗剪承载力。

2.2.2 作用和作用效应有关符号

M_d ——钢-超高性能混凝土组合梁弯矩设计值；

N_{load} 、 M_{load} ——外荷载作用下引起的轴力和弯矩；

N_{cc} 、 M_{cc} ——分别为受压区超高性能混凝土承受的轴力和弯矩；

N_{sc} 、 M_{sc} ——分别为受压区钢筋承受的轴力和弯矩；

-
- N_{ct} 、 M_{ct} ——分别为受拉区超高性能混凝土承受的轴力和弯矩；
 N_{st} 、 M_{st} ——分别为受拉区钢板条承受的轴力和弯矩；
 F_{ld} ——最大集中反力设计值；
 W_{eff} ——钢-超高性能混凝土组合梁截面的抗弯模量；
 V_{vd} ——钢-超高性能混凝土组合梁竖向剪力设计值；
 V_{vu} ——钢-超高性能混凝土组合梁竖向抗剪承载力；
 V_d ——承载能力极限状态下连接件剪力设计值；
 V_{sd} ——正常使用极限状态下的连接件剪力设计值；
 V_{sud} ——承载能力极限状态下焊钉连接件抗剪承载力设计值；
 V_u ——承载能力极限状态下连接件抗剪承载力设计值；
 w_s ——钢筋埋置深度处的裂缝宽度；
 w_t ——超高性能混凝土表面裂缝宽度；
 σ_{ss} ——裂缝位置的钢筋应力；
 σ_{sp} ——按作用（或荷载）频遇组合计算的超高性能混凝土层底面钢板条拉应力；
 $\sigma_{pc,m}$ ——设有预应力钢筋的板截面上，由于预应力引起的超高性能混凝土的有效平均压应力；
 $\varepsilon_{sm,f}$ ——裂缝间钢筋的平均应变；
 $\varepsilon_{cm,f}$ ——裂缝间超高性能混凝土的平均应变；
 $\varepsilon_{cs}(t)$ ——计算时考虑的龄期为 t 时的收缩应变；
 $\varepsilon_{cs,0}$ ——名义终极收缩应变；
 $\varepsilon_{t,a}$ ——受拉区超高性能混凝土的应变。

2.2.3 几何参数有关符号

- A_s ——受拉区普通钢筋的截面面积；
 A_c ——超高性能混凝土截面面积；
 A_{ss} ——焊钉连接件杆截面面积；
 A_{sp} ——受拉钢板条截面面积；

- A_w ——钢梁腹板的截面面积；
 $A_{c,eff}$ ——超高性能混凝土有效受拉面积；
 $h_{c,eff}$ ——超高性能混凝土有效受拉高度；
 d ——钢筋直径；
 d_{ss} ——焊钉连接件杆部的直径；
 h ——截面高度；
 h_0 ——截面有效高度；
 y_0 ——计算模型中性轴到钢板条底面的距离；
 h_{te} ——计算模型中钢板条的厚度；
 l_t ——传递长度；
 l_f ——钢纤维长度；
 l_c ——平均裂缝间距；
 b_c ——抗裂验算时，计算模型中超高性能混凝土层的宽度；
 h_c ——计算模型中超高性能混凝土层的厚度；
 b_t ——计算模型中钢板条的宽度；
 h_s ——钢筋形心到超高性能混凝土层表面的距离；
 h_{yt} ——超高性能混凝土比例极限拉应变高度；
 U_m ——距集中反力作用面 $h_0/2$ 处破坏锥体截面面积的周长；
 x_0 ——受压区高度；
 x' ——受拉弹性区高度；
 ρ_{eff} ——有效配筋率；
 γ ——配筋超高性能混凝土的重力密度；
 γ_c ——超高性能混凝土的重力密度；
 ρ_f ——钢纤维体积率；
 ρ_s ——体积配筋率；
 I_{cr} ——钢-超高性能混凝土组合梁开裂截面惯性矩；
 I_{un} ——钢-超高性能混凝土组合梁未开裂截面惯性矩；
 k_{ss} ——焊钉连接件的抗剪刚度；

- s_1 —— $0.3 P_u$ 对应的滑移量；
- s_2 —— $0.4 P_u$ 对应的滑移量；
- $s_{\max}$ ——正常使用极限状态下结合面的最大滑移值；
- $s_{\lim}$ ——正常使用极限状态下结合面的滑移限值；
- $w_{\max}$ ——最大裂缝宽度限值；
- $s_{r,\max,f}$ ——最大裂缝间距；
- ϕ ——截面曲率；
- H ——超高性能混凝土侧压力计算位置处至新浇超高性能混凝土顶面的总高度。

2.2.4 计算系数及其他有关符号

- K 、 K_{global} 、 K_{local} ——超高性能混凝土纤维取向系数、整体纤维取向系数、局部纤维取向系数；
- n_0 ——短期荷载作用下钢材与超高性能混凝土的弹性模量比；
- n_L ——长期弹性模量比；
- α_{cr} ——构件受力特征系数；
- β_h ——截面高度尺寸效应系数；
- β_p ——钢筋影响系数；
- P ——超高性能混凝土板破坏锥体截面内纵向与横向受拉钢筋的配筋百分率的均值；
- ψ ——裂缝间受拉钢板条应变不均匀系数；
- a_{ss} 、 b_{ss} ——荷载-滑移曲线的参数；
- γ_0 ——结构重要性系数；
- γ_{sud} ——焊钉连接件的抗力系数；
- $\varphi(t, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 ，计算龄期为 t 时的超高性能混凝土徐变系数；
- $\varphi_0(t_\infty, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 ，超高性能混凝土终极徐变系数；
- k_t ——荷载特征系数；
- k_2 ——开裂截面的应变分布影响系数；

- l_0 ——保护层厚度对裂缝间距的影响；
- δ ——钢筋对保护层厚度和粘结强度的增强系数；
- η ——钢筋的粘结系数；
- t ——计算考虑时刻的超高性能混凝土龄期；
- t_0 ——加载时超高性能混凝土龄期；
- ψ_L ——徐变因子。

征求意见稿

3. 材料

3.1 超高性能混凝土 (UHPC)

3.1.1 超高性能混凝土的组成部分包括水泥、矿物掺合料、石英砂、石英粉、钢纤维、减水剂和水，其中水胶比宜为 0.16~0.22。

条文说明

超高性能混凝土组成部分中没有粗骨料，并掺入了大量钢纤维，以改善其抗拉性能。有关研究表明水胶比大于 0.22 后，硬化水泥石中的毛细孔可能形成连通孔，对超高性能混凝土的耐久性不利；而水胶比小于 0.16 后，超高性能混凝土的流动性能难以满足工程要求。

3.1.2 超高性能混凝土原材料的要求和制备方法应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）的规定。

3.1.3 超高性能混凝土的抗压强度等级应根据 100 mm 立方体抗压强度标准值确定，强度等级划分为 UC120、UC140、UC160、UC180、UC200。

条文说明

立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 是超高性能混凝土各项力学性能指标的基本代表值。对于普通混凝土强度等级按 150mm 的立方体抗压强度标准值确定。现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）规定，活性粉末混凝土立方体抗压强度试验的标准试件采用 100mm 的立方体试件。目前，国内已有的超高性能混凝土结构试验主要是 100mm 立方体作为标准试件，相关成果也主要是基于该标准试件所得。与此同时，各国超高性能混凝土标准中抗压强度试件尺寸主要为 100mm 立方体、直径 100mm 或 70mm 的圆柱体，而没有采用边长或直径 150mm 的试件。另外一方面，考虑到超高性能混凝土抗压强度较高，若仍然沿用普通混凝土中的 150mm 立方体抗压强度，则目前广泛采用的 2MN 试验机难以满足要求。为此，本规范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。

本规范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 28d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95%保证率的抗压强度值。在现行国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387) 强度等级划分的基础上，结合桥梁结构实际应用需求确定本规范超高性能混凝土强度等级划分。

3.1.4 湿接缝用超高性能混凝土应具备早期强度高和低收缩的特性，其技术性能指标应符合表 3.1.4 的规定。

表 3.1.4 湿接缝用超高性能混凝土技术性能指标

材料性能	测试依据	指标	
		龄期	指标
抗压强度（MPa）	《活性粉末混凝土》GB/T 31387	2 d	≥40
		7 d	≥80
		28 d*	≥120
弹性模量（GPa）	《活性粉末混凝土》GB/T 31387	2 d	≥16
		7 d	≥28
		28 d	≥40
抗折强度（MPa）	《活性粉末混凝土》GB/T 31387	2 d	≥8
		7 d	≥16
		28 d*	≥25
抗拉强度（MPa）	《环氧树脂砂浆技术规程》DL/T 5193	28 d*	≥8
限制膨胀率（%）	《混凝土膨胀剂》GB/T 23439	7 d	0~0.02
28 天收缩率（με）	《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 GB/T 50082	＜150	
坍落扩展度（mm）	《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080	≥600	
*28 d 的抗压强度、抗折强度以及抗拉强度取标准值，其余均取平均值。			

条文说明

钢-超高性能混凝土组合梁在工厂预制，运至现场吊装就位后通过湿接缝连接成整体。为便于施工，现场浇筑的超高性能混凝土湿接缝宜采用自然养护方式，因此要求湿接缝用超高性能混凝土具有低收缩的特性，避免新旧超高性能混凝土界面出现收缩裂缝。同时，为保证桥梁的快速化施工，要求湿接缝用超高性能混凝土具有较高的早期强度。

3.1.5 超高性能混凝土的轴心抗拉强度等级应根据附录 A 的哑铃形轴拉试验的弹性极限抗拉强度标准值确定，强度等级划分为 UT6、UT7、UT8、UT9。

条文说明

根据国内外已有试验结果，掺入钢纤维的超高性能混凝土初裂强度（弹性极限抗拉强度）一般在 5MPa~12MPa，主要由超高性能混凝土基体性质决定，而超高性能混凝土极限抗拉强度与钢纤维性质（掺量、类型、长径比）等密切相关。对于同一抗压性能分级，超高性能混凝土可多个极限抗拉强度取值。为此，本规范的超高性能混凝土轴心抗拉强度按哑铃形轴拉试验的超高性能混凝土初裂强度（弹性极限抗拉强度）确定。因此，本规范定义超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值是指按标准方法制作、养护的哑铃形试件（附录 A 所示），在 28d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95%保证率的弹性极限抗拉强度值。超高性能混凝土轴心抗拉强度等级划分为 UT6、UT7、UT8、UT9 四级，大体可以覆盖超高性能混凝土对不同抗拉性能的应用需求。

3.1.6 超高性能混凝土应具有轴拉应变硬化特性，并应符合表 3.1.6 的规定。

表 3.1.6 超高性能混凝土拉伸性能

f_{te}/f_{tk}	f_{tu}/f_{te}	f_{tu}/f_{tk}	ε_{tu}
≥ 1.0	≥ 1.0	≥ 1.1	$\geq 2000\mu\varepsilon$

条文说明

抗拉性能是超高性能混凝土的关键技术性能指标。用弹性极限抗拉强度 f_{te} 、极限抗拉强度 f_{tu} 和对应的极限拉应变 ε_{tu} 的三个参数表征，并用 f_{tu}/f_{tk} 来表征超高性能混凝土拉伸应变硬化指标要求。

3.1.7 超高性能混凝土的弯拉强度等级应根据 400 mm×100 mm×100 mm 棱柱体抗弯强度标准值确定，强度等级划分为 UF19、UF22、UF25、UF28。

条文说明

结合现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）规定，超高性能混凝土抗弯强度等级根据 400mm×100mm×100mm 棱柱体抗弯强度标准值划分。本规范定义超高性能混凝土弯拉强度标准值是指按标准方法制作、养护的棱柱体试件，在 28d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95%保证率的抗弯强度值。为便于超高性能混凝土质量控制和检验，结合国内超高性能混凝土工程经验，将超高性能混凝土抗弯强度等级划分为 UF19、UF22、UF25 和 UF28 四级，大体可以覆盖超高性能混凝土对不同受弯韧

性的应用需求。超高性能混凝土的轴心抗拉强度与弯拉强度有一定相关性，在缺乏相关试验数据情况下，可参考表 3.1.7 选用超高性能混凝土弯拉强度等级。

表 3.1.7 超高性能混凝土轴心抗拉强度等级与弯拉强度等级建议关系

轴心抗拉强度等级	UT6	UT7	UT8	UT9
弯拉强度等级	$\geq$ UF19	$\geq$ UF19	$\geq$ UF22	$\geq$ UF25

3.1.8 超高性能混凝土的纤维取向系数应符合下列规定：

1. 整体纤维取向系数 K_{global} 可取 1.25，局部纤维取向系数 K_{local} 可取 1.75。
2. 必要时，纤维取向系数可通过附录 C 的方法进行测定。

条文说明

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

为了考虑纤维取向对超高性能混凝土抗拉性能的影响，本条文规定引入纤维取向系数 K 对超高性能混凝土抗拉强度进行折减，同时通过纤维取向系数 K 反映实际构件与标准试件之间的强度差异。在没有开展现场模型试验时，参考法国超高性能混凝土结构设计规范《National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)》(NF P 18-710, 2016, 以下简称“《法国超高性能混凝土结构设计规范 NF P 18-710 2016》”)相关条文规定，同时结合国内已有的研究和工程经验，取整体纤维取向系数 $K_{global}=1.25$ ，局部纤维取向系数 $K_{local}=1.75$ 是基本可行的。

3.1.9 超高性能混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和轴心抗压强度设计值 f_{cd} 应按表

3.1.9-1 的规定采用，超高性能混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 和轴心抗拉强度设计值 f_{td} 应按表 3.1.9-2 的规定采用。

表 3.1.9-1 超高性能混凝土轴心抗压强度

强度类型	强度等级				
	UC 120	UC 140	UC 160	UC 180	UC 200
$f_{cu,k}$ (MPa)	120	140	160	180	200
f_{ck} (MPa)	84	98	112	126	140
f_{cd} (MPa)	58	68	77	87	97

表 3.1.9-2 超高性能混凝土轴心抗拉强度

强度类型	强度等级			
	UT 6	UT 7	UT 8	UT 9
f_{tk} (MPa)	6	7	8	9
f_{td} (MPa)	4.1/K	4.8/K	5.5/K	6.2/K

注：1 K 为纤维取向系数，按第 3.1.8 条规定取值。

条文说明

对超高性能混凝土轴心强度的标准值和设计值，现说明如下：

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

$$f_{ck} = 0.88\alpha f_{cu,k} \quad (3.1.9a)$$

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，因此本规范取 $\alpha=0.80$ 。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。

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

3 轴心抗拉强度标准值：根据轴心抗拉强度等级划分，依次取 6MPa、7MPa、8MPa 和 9MPa。

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

3.1.10 超高性能混凝土弹性模量 E_c 宜根据现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）的规定进行测试。若无实测数据，超高性能混凝土弹性模量 E_c 可按表 3.1.10 采用。

表 3.1.10 超高性能混凝土的弹性模量

强度等级	UC 120	UC 140	UC 160	UC 180	UC 200
E_c ($\times 10^3$ MPa)	43.4	45.7	47.5	49.1	50.4

条文说明

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

$$E_c = \frac{10^5}{1.5 + \frac{96.5}{f_{cu,k}}} \quad (3.1.10a)$$

3.1.11 承载能力极限状态超高性能混凝土设计受压应力-应变关系应按下列公式取用。

$$\begin{cases} \sigma_c = f_{cd} \times \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) & (\varepsilon \leq \varepsilon_0) \\ \sigma_c = f_{cd} & (\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (3.1.11-1)$$

$$\varepsilon_0 = f_{cd} / E_c \quad (3.1.11-2)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0042 - (f_{cu,k} - 120) \times 10^{-5} \quad (3.1.11-3)$$

条文说明

超高性能混凝土受压应力-应变曲线一般包括上升段和下降段两部分。超高性能混凝土在达到峰值应力（抗压强度）前，应力-应变曲线处于上升段，基本为线性变化，国内超高性能混凝土峰值应变的试验值一般在 0.0026~0.0045 范围内；超高性能混凝土在达到峰值应力后，应力-应变曲线进入下降段，应力降低到 0.85 倍峰值应力时的应变的试验值 0.0034~0.0053 范围内。

结合超高性能混凝土材料的受压特性和国内结构设计的一般习惯，为简化设计，规定超高性能混凝土在达到抗压强度设计值前，其应力-应变曲线采用线性变化关系；达到抗压强度设计值后且压应变在极限压应变范围内时，其压应力保持不变，即应力-应变曲线为双折线模型。其中极限压应变 ε_{cu} 根据国内已有的试验结果偏安全取 0.0034~0.0042。

目前，国际上的超高性能混凝土的主要规范指南在承载力计算时，受压应力-应变曲线普遍采用简化的双折线模型和三折线模型。若进行超高性能混凝土构件的非线性全过程分析时，宜采用更为准确的应力-应变关系。

3.1.12 超高性能混凝土的剪切变形模量 G_c 可按本规程第 3.1.10 条规定 E_c 值的 0.4 倍采用。

3.1.13 超高性能混凝土基体的重度取值不宜小于 24 kN/m³，钢纤维与钢筋的重度取值为 78.5 kN/m³。配筋超高性能混凝土的重度应按下列公式计算：

$$\gamma = 24(1 - \rho_f - \rho_s) + 78.5(\rho_f + \rho_s) \quad (3.1.13)$$

式中： γ ——配筋超高性能混凝土的重力密度（kN/m³）；

ρ_f ——钢纤维体积率；

ρ_s ——体积配筋率。

3.1.14 超高性能混凝土的泊松比 μ_c 宜取 0.2；超高性能混凝土的温度线膨胀系数 α_c 宜取 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

条文说明

对比各国超高性能混凝土指南（规范），关于泊松比和线膨胀系数取值。各国超高性能混凝土指南、规范对于泊松比的规定较为统一，均为 0.2。同时结合国内已有研究成果，本规程超高性能混凝土泊松比取 0.2。

对于温度线膨胀系数，各国超高性能混凝土指南（规范）规定值介于 $1.0 \sim 1.35 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 间。一般认为，超高性能混凝土材料温度线膨胀系数大的水泥基材料含量高，线膨胀系数小的粗集料含量低或不含，故其线膨胀系数应高于普通混凝土（ $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ），且低于钢材（ $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ），并结合国内相关试验研究，本规程超高性能混凝土线膨胀系数取 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

3.1.15 超高性能混凝土的徐变系数宜根据现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》（GB/T 50082）的规定进行测试，收缩应变的测试应符合本规程附录 E 的规定。若无实测数据，超高性能混凝土的收缩应变和徐变系数终极值可按本规范附录 B 规定取值。

3.1.16 超高性能混凝土扩展度应不小于 550 mm，并应符合现行行业标准《自密实混凝土应用技术规程》（JGJ/T 283）的规定。

条文说明

桥面板材料采用超高性能混凝土，板件较薄，厚度在 50 mm~200 mm 间，且配有普通钢筋，为确保主梁超高性能混凝土板件浇筑密实，本条文规定主梁超高性能混凝土应满足自密实混凝土的要求。

3.1.17 超高性能混凝土的耐久性能应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）的规定。

3.2 钢材

3.2.1 型钢的型号及尺寸应按现行国家标准《热轧 H 型钢和剖分 T 型钢》(GB/T 11263) 的规定取用。

3.2.2 钢材相关设计指标应按现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64) 的规定取用。

3.2.3 焊钉连接件的材料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。

3.2.4 普通钢筋的相关设计指标应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 的规定取用。

4. 基本规定

4.0.1 钢-超高性能混凝土组合梁的尺寸和构造应保证具有合理的抗弯、抗扭刚度。

4.0.2 钢-超高性能混凝土组合梁及组合构件除应考虑正常的温度效应外, 尚应考虑由于钢材和超高性能混凝土两种材料不同的线膨胀系数引起的效应影响。

4.0.3 钢-超高性能混凝土组合桥梁设计应考虑可能同时出现的所有作用, 按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行作用组合。

4.0.4 钢-超高性能混凝土组合桥梁施工阶段的作用组合, 应根据实际情况确定, 结构上的施工人员和施工机具设备等均应作为可变作用加以考虑。

4.0.5 钢-超高性能混凝土组合梁中钢结构、钢-超高性能混凝土接触面、连接件以及超高性能混凝土的耐久性设计应分别符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG/T D64)、《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01) 或国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387) 的相关规定。

4.0.6 超高性能混凝土桥面板宜采用热养护以消除收缩影响, 热养护结束后即可安装。

条文说明

超高性能混凝土桥面板预制后采用热养护，养护结束后收缩基本完成，因而不需在厂内存放六个月再安装。

4.0.7 钢-超高性能混凝土组合桥梁结构的施工方法宜采用工厂整体预制，现场简支安装，后结构连续的施工方法，施工工艺流程如图 4.0.7 所示。



图 4.0.7 钢-超高性能混凝土组合桥梁施工流程

4.0.8 钢-超高性能混凝土组合桥梁结构应按分项工程进行质量检验与验收，并应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的有关规定。

5. 组合梁

5.1 一般规定

5.1.1 钢梁可采用 I 形、闭口或槽形箱梁截面形式；超高性能混凝土桥面板可采用平板、矮肋板或型钢-超高性能混凝土组合板。

条文说明

吸纳已有的工程经验和编制单位前期的科研成果, 本条文规定超高性能混凝土桥面板可采用如图 5.1.1a 所示的平板、矮肋板或型钢-超高性能混凝土组合板。

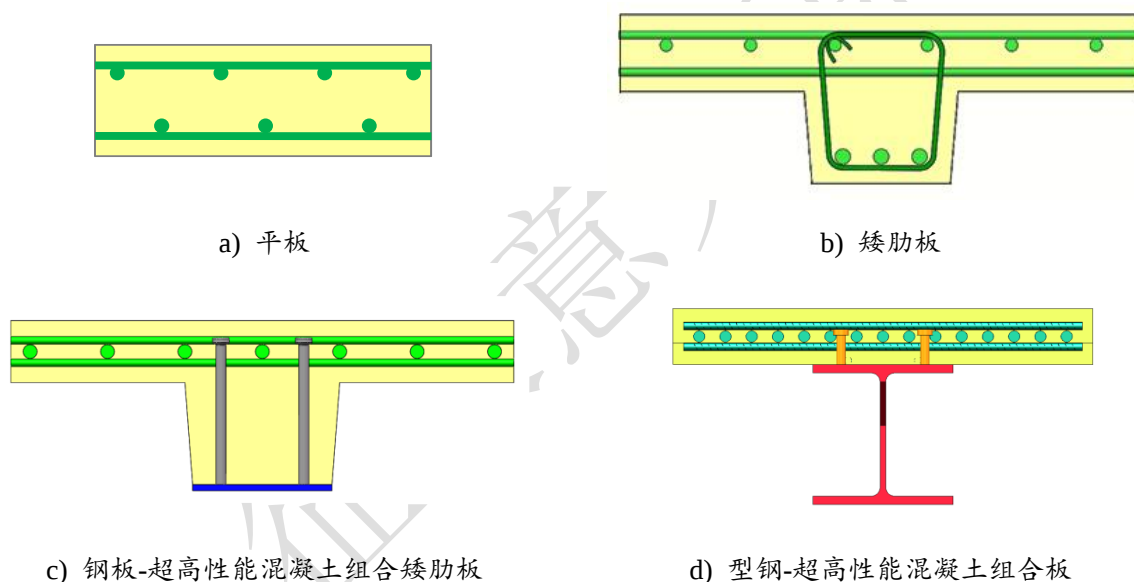


图 5.1.1a 超高性能混凝土桥面板构造形式示意图

5.1.2 钢-超高性能混凝土组合梁的剪力连接件应能够承担钢梁和超高性能混凝土桥面板间的纵桥向剪力及横桥向剪力, 同时应能抵抗超高性能混凝土桥面板与钢梁间的掀起作用。

5.2 设计原则

5.2.1 钢-超高性能混凝土组合梁的持久状况应按承载能力极限状态的要求, 进行承载力及稳定性计算, 必要时尚应进行结构的倾覆和界面滑移验算。在进行承载能力

极限状态计算时，作用（或荷载）组合应采用作用基本组合，结构材料性能应采用其强度设计值。

5.2.2 钢-超高性能混凝土组合梁的持久状况设计应按正常使用极限状态的要求，对组合梁的应力、裂缝宽度、界面滑移和挠度进行验算，并满足本规程第 5.4 节的要求。在进行正常使用极限状态计算时，作用（或荷载）组合应采用作用频遇组合、准永久组合。

5.2.3 钢-超高性能混凝土组合梁的短暂状况设计应对组合梁在施工过程中各个阶段的承载能力及稳定性进行验算，必要时尚应进行结构的倾覆验算。承载能力验算应采用作用基本组合，稳定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。

5.2.4 钢-超高性能混凝土组合梁进行抗疲劳设计时，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。

5.3 计算规定

5.3.1 计算钢-超高性能混凝土组合梁截面特性时，应采用换算截面法，其中超高性能混凝土桥面板取有效宽度范围内的截面，应考虑受拉区超高性能混凝土开裂对刚度的影响。

条文说明

将超高性能混凝土板有效宽度范围内的超高性能混凝土板面积除以弹性模量比等效替换成钢材面积，此时将钢-超高性能混凝土组合梁视为同一材料，计算组合梁的截面特性值。钢-超高性能混凝土组合梁中负弯矩区也应考虑超高性能混凝土的抗拉强度，按开裂截面考虑。

5.3.2 钢-超高性能混凝土组合梁超高性能混凝土桥面板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）规定计算。

5.4 变形与裂缝控制

5.4.1 钢-超高性能混凝土组合梁应力验算的作用（或荷载）应采用标准组合，其中汽车荷载应计入冲击系数。

5.4.2 钢-超高性能混凝土组合梁的竖向挠度限值应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的相关规定。

5.4.3 钢-超高性能混凝土组合梁应设置预拱度，预拱度值宜等于结构自重标准值和1/2 车道荷载频遇值所产生的竖向挠度之和，频遇值系数为 1.0，并考虑施工方法和顺序的影响；预拱度设置应保持桥面曲线平顺。

5.4.4 超高性能混凝土构件的裂缝宽度验算是指数验算超高性能混凝土表面裂缝宽度，各类环境中超高性能混凝土最大裂缝宽度不应超过表 5.4.4 规定的限值。

表 5.4.4 最大裂缝宽度限值 $w_{\max}$

环境类别	最大裂缝宽度限值（mm）
I类-一般环境	0.15
II类-冻融环境	0.15
III类-近海或海洋氯化物环境	0.10
IV类-除冰盐等氯化物环境	0.10
V类-盐结晶环境	0.05
VI类-化学腐蚀环境	0.10
VII类-磨蚀环境	0.15

条文说明

超高性能混凝土裂缝宽度验算宜控制表面裂缝从而保证钢纤维的耐久性。参考国内外相关规范并结合国内外相关工程经验，本规范在现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 基础上对裂缝宽度限值偏安全地从严规定。

6. 组合梁超高性能混凝土桥面板

6.1 一般规定

6.1.1 超高性能混凝土桥面板的形式选择应考虑桥型、跨径、施工方法等因素。

条文说明

吸纳已有的工程经验和编制单位前期的科研成果,本规程提出了超高性能混凝土平板、矮肋板、型钢-超高性能混凝土组合板三种形式的桥面板,设计中应根据不同类型组合桥梁的特点采用。

6.1.2 预制超高性能混凝土桥面板应采取必要措施保证先后施工的超高性能混凝土有效结合并共同受力。

6.1.3 超高性能混凝土桥面板及板内钢筋除应满足桥梁整体受力要求外,尚应能抵抗由局部作用引起的效应。

6.1.4 超高性能混凝土桥面板一般可不设置承托。当主梁间距较大,需设置承托时,承托的外形尺寸及构造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)的有关规定。

6.1.5 超高性能混凝土桥面板中配置两层钢筋时,板厚不宜小于 50 mm;配置三层钢筋时,板厚不宜小于 80 mm。

条文说明

本条文规定了三种超高性能混凝土桥面板中不同的配筋情况下的超高性能混凝土桥面板厚度要求,以防止由于超高性能混凝土桥面板过薄而导致钢筋间距过小,从而引起浇筑困难。

6.2 超高性能混凝土平板构造要求

6.2.1 超高性能混凝土平板厚度不应小于 100 mm。

条文说明

考虑到超高性能混凝土平板在局部刚度方面的要求，对最小板厚做出了规定。

6.3 超高性能混凝土矮肋板构造要求

6.3.1 超高性能混凝土矮肋板由面板和纵肋组成，纵肋尺寸及布置间距应根据桥面板支撑条件及纵、横桥向受力分配特点确定，且满足下列规定：

- 1 面板厚度不宜小于 80 mm；
- 2 纵肋高度不宜小于 100 mm；
- 3 纵肋底宽不宜小于 100 mm，顶宽应大于底宽，且顶、底宽差值不宜小于 20 mm；
- 4 纵肋间距不宜小于 0.5 m，且不宜大于 1 m。

条文说明

结合超高性能混凝土矮肋板在配筋、截面效率、施工以及结构受力等方面的要求，对面板厚度、纵肋高度、纵肋底宽以及纵肋间距等关键尺寸做出了规定。

6.3.2 超高性能混凝土矮肋板肋下缘可配置钢筋，也可在肋底设置钢板条，钢板条宽度不宜小于肋底宽度，且钢板条顶面设有焊钉连接件。

6.3.3 当超高性能混凝土矮肋板肋底设置钢板条时，钢板条及焊钉连接件满足下列规定：

- 1 钢板条厚度不宜小于 8 mm；
- 2 钢板条顶面的焊钉连接件直径不宜小于 13 mm，焊钉钉帽底面位置宜位于面板底面位置上方，且到后者的距离不宜小于 20 mm；
- 3 钢板条顶面的焊钉连接件间距不宜小于 100 mm，且不宜大于 200 mm。

6.3.4 超高性能混凝土矮肋板中的面板至少应布设三层钢筋，两层横桥向钢筋位于外侧、纵桥向钢筋位于内侧。

条文说明

本条文规定了面板中的配筋要求，应考虑纵、横桥向受弯两个方向进行配筋。一般

而言，面板横桥向受弯对钢筋保护层厚度更敏感，故横桥向钢筋应置于外侧。

6.4 型钢-超高性能混凝土组合板构造要求

6.4.1 型钢-超高性能混凝土组合板由带钢板条的超高性能混凝土面板和型钢纵肋组合而成，型钢纵肋尺寸及布置间距应根据桥面板支撑条件及纵、横向受力分配特点确定，且应满足下列规定：

- 1 超高性能混凝土面板厚度不宜小于 50 mm；
- 2 型钢纵肋型号应按现行国家标准《热轧 H 型钢和剖分 T 型钢》（GB/T 11263）取用，且型钢高度不宜小于 150 mm；
- 3 型钢纵肋间距不宜小于 0.5 m，且不宜大于 1 m。

条文说明

结合型钢-超高性能混凝土组合板在配筋、截面效率以及结构受力等方面的要求，对面板厚度、型钢高度以及型钢间距等关键尺寸做出了规定。

6.4.2 型钢纵肋顶面设有焊钉连接件，并满足下列规定：

- 1 焊钉连接件直径不宜小于 13 mm；
- 2 焊钉连接件间距不宜小于 100 mm，且不宜大于 200 mm。

6.4.3 超高性能混凝土面板底面应沿横桥向按一定间距布设钢板条，钢板条顶面设有焊钉连接件，钢板条及焊钉连接件满足下列规定：

- 1 钢板条厚度不宜小于 8 mm；
- 2 钢板条顶面的焊钉连接件直径不小于 13 mm；
- 3 钢板条顶面的焊钉连接件间距不宜小于 100 mm，且不宜大于 200 mm。

6.4.4 超高性能混凝土面板中宜至少布设纵、横桥向各一层钢筋，钢筋均靠近超高性能混凝土面板顶面，且横桥向钢筋位于上层、纵桥向钢筋位于下层。

6.5 桥面板配筋构造

6.5.1 钢筋的超高性能混凝土保护层厚度应满足下列要求：

- 1 普通钢筋保护层厚度应取钢筋外缘至超高性能混凝土表面的距离，不应小于钢筋公称直径。
- 2 普通钢筋的保护层厚度不应小于 1.5 倍纤维长度。当掺入纤维长度不等的混杂纤维时，钢纤维长度应取较大值。
- 3 最外侧钢筋的保护层厚度不应小于表 6.5.1 的规定值。

表 6.5.1 超高性能混凝土保护层最小厚度

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

注：1 表中数值是针对各环境类别的最低作用等级、钢筋和超高性能混凝土无特殊防腐措施规定的。

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

3 对工厂预制的超高性能混凝土构件，其保护层最小厚度可将表中相应数值减小 5 mm，但不得小于 15 mm。

条文说明

由于超高性能混凝土具有致密的微观结构，因而具有良好的耐久性。对比《法国超高性能混凝土结构设计规范 NF P 18-710 2016》、《日本 UFC 结构设计与施工指南 JSCE 2006》、《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》、《美国超高性能混凝土华夫板设计指南 FHWA 2013》中关于最小保护层厚度的规定，并综合考虑粘结力的可靠传递、钢筋抗腐蚀等因素，制定本条文所规定的保护层厚度的要求。

2 当采用混杂纤维时，应选择长度较大的纤维控制其保护层厚度。经工艺试验验证后，保护层厚度可不小于 1.0 倍纤维长度。

6.5.2 当计算中充分考虑普通钢筋的强度时，其最小锚固长度应符合表 6.5.2 的规定。

表 6.5.2 钢筋最小锚固长度

钢筋种类		HPB300	HRB400、HRBF400、RRB400	HRB500
受压钢筋（直端）		14d	8d	11d
受拉钢筋	直端	16d	10d	13d
	弯钩端	14d	8d	11d

注：1 d 为钢筋公称直径（mm）。

2 当超高性能混凝土在凝固过程中易受扰动时，锚固长度应增加 25%。

3 当带肋钢筋的公称直径大于 25 mm 时，锚固长度应增加 25%。

4 当钢筋位于现浇接缝区域时，锚固长度应增加 25%。

5 当受拉钢筋末端采用弯钩时，锚固长度为包括弯钩在内的投影长度。

条文说明

超高性能混凝土与钢筋之间的粘结性能很大程度上决定了应力传递过程和传递长度。鉴于超高性能混凝土材料的力学性能与普通混凝土有明显区别，使用目前混凝土设计规范中的粘结性能及应力传递长度(钢筋最小锚固长度)对超高性能混凝土将显得过于保守。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）第 9.1.4 条的条文说明，钢筋最小锚固长度 l_a 按下列公式计算得出：

$$l_a = f_{sk} \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{1}{\pi d \tau} = \frac{f_{sk} d}{4\tau} \quad (\text{错误!未找到引用源。a})$$

$$\tau = \eta \delta f_{tk} / \gamma_c \quad (\text{错误!未找到引用源。b})$$

式中： f_{sk} ——钢筋抗拉强度标准值；

d ——钢筋直径；

τ ——钢筋与混凝土极限锚固粘结应力，按《法国 UHPC 结构设计

规范 NF P 18-710 2016》取用；

η ——粘结系数，对于普通钢筋取 2.25，对于光圆钢筋取 1.0；

δ ——保护层中钢纤维对钢筋和混凝土粘结强度增强系数；

$f_{ctk,el}$ ——弹性极限抗拉强度标准值，取 f_{tk} ；

γ_c ——混凝土材料分项系数，取 1.45。

根据计算，不同强度等级超高性能混凝土中钢筋锚固长度为 $5d \sim 15d$ ，与普通混凝土的 $30d \sim 40d$ 相比大幅减小。为简化设计锚固长度的要求，本条规定锚固长度偏安全地按 UT6 计算确定。与此同时，考虑到制作和安装偏差，本条规定的钢筋最小锚固长度

在计算锚固长度的基础上，考虑 $1.5d$ 的制作和安装偏差作为锚固长度储备。受压钢筋锚固长度在受拉钢筋锚固长度基础上减去 $2d$ 。

需要注意的是，当超高性能混凝土在凝固过程中易受扰动、带肋钢筋的公称直径过大（如大于 25mm ）、钢筋位于现浇接缝区域时，会对超高性能混凝土与钢筋之间的粘结锚固性能产生不利影响，此时钢筋的锚固长度应适当增加。

6.5.3 普通钢筋净距不应小于 1.5 倍钢筋公称直径，不应小于 1.5 倍纤维长度，且不应小于 20mm 。

条文说明

对比《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》、《日本 UHPC 结构设计和施工指南 JSCE 2006》、《瑞士 UHPFRC 设计指南 SIA 2052 2016》、《美国 UHPC 华夫板设计指南 FHWA 2013》和《澳大利亚 Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000》中关于最小钢筋净距的规定，并综合考虑粘结力的可靠传递、可施工性等因素，制定本条文所规定的最小钢筋净距的要求。

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

1 钢筋焊接接头和机械连接接头应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的有关规定；

2 受拉钢筋绑扎接头的搭接长度应不小于表**错误!未找到引用源。**的规定；受压钢筋绑扎接头的搭接长度应不小于表**错误!未找到引用源。**规定的受拉钢筋绑扎接头搭接长度的 0.7 倍。

表 错误!未找到引用源。 受拉钢筋绑扎接头搭接长度

钢筋种类	HPB300	HRB400、HRBF400、RRB400	HRB500
搭接长度	$26d$	$16d$	$21d$

注：1 当带肋钢筋直径 d 大于 25mm 时，其受拉钢筋的搭接长度应按表值增加 $3d$ 采用。
2 当超高性能混凝土在凝固过程中易受扰动时，搭接长度应增加 $3d$ 。
3 在任何情况下，受拉钢筋的搭接长度不应小于 160mm 。
4 当钢筋位于现浇接缝区域时，搭接长度应增加 $3d$ 。
5 当受拉钢筋末端采用弯钩时，锚固长度为包括弯钩在内的投影长度。

条文说明

参考《法国超高性能混凝土结构设计规范 NF P 18-710 2016》和现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010) 关于钢筋搭接长度修正系数的规定, 考虑粘结力的可靠传递, 同时结合国内已有试验资料, 制定本条文所规定的钢筋搭接长度的要求。

6.5.5 钢筋呈交错布置时, 应符合下列要求:

- 1 交错布置钢筋的锚固长度 l_a 应符合本规范 6.5.2 条规定。
- 2 交错布置钢筋的重叠长度 l_{os} 不应小于 0.8 倍的钢筋锚固长度。
- 3 交错布置钢筋的净距 l_d 不应小于 1.5 倍纤维长度和 2 倍钢筋公称直径, 且不宜大于钢筋重叠长度 l_{os} 和 100mm。
- 4 交错布置钢筋的保护层厚度不宜小于 2 倍钢筋公称直径, 且不宜大于 3 倍钢筋公称直径。若交错布置钢筋的保护层厚度小于 2 倍钢筋公称直径时, 钢筋的锚固长度和重叠长度应在第 1 款和第 2 款规定值基础上增加 $3d$ 。

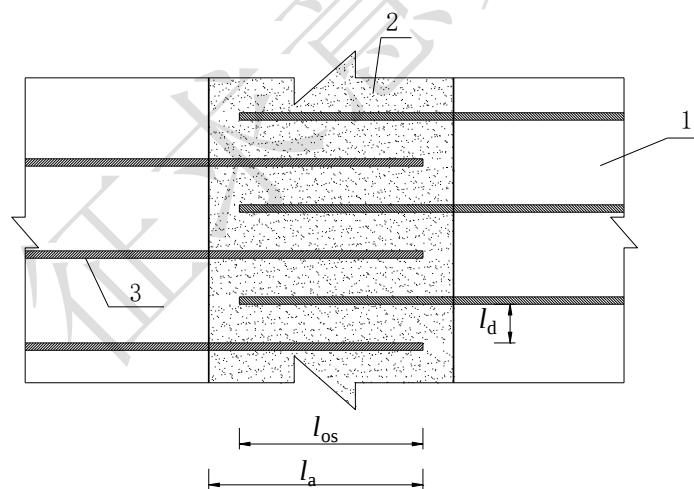


图 6.5.5 受力钢筋交错布置接头

1-预制超高性能混凝土板；2-超高性能混凝土现浇湿接缝；3-预埋钢筋

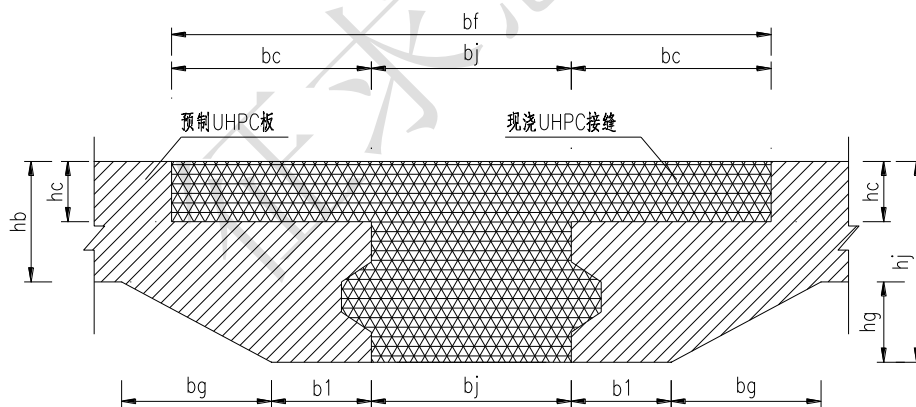
6.6 超高性能混凝土现浇湿接缝

- ### 6.6.1 组合梁超高性能混凝土桥面板纵、横向两类湿接缝的构造应进行必要的强化处理。湿接缝预埋钢筋直径不应小于 12 mm, 间距不应大于 200 mm。钢筋的保护层厚

条文说明

6.6.2 对于超高性能混凝土平板和矮肋板的纵、横向湿接缝，以及型钢-超高性能混凝土组合板的纵向湿接缝，宜选用 T 形接缝（图 6.6），其构造要点宜符合下列规定：

- 1 超高性能混凝土板宜通过倒角过渡形成局部加高构造。其中，加高区高度 h_g 不宜小于 0.5 倍预制板厚 h_b ，加高过渡区宽度 b_g 与高度 h_g 之比不宜小于 2，加高区底部宽度 b_1 不宜小于 100mm；
- 2 T 形接缝高度 h_j 不宜小于 200 mm，其中槽口深度 h_c 不宜小于 50mm，且不宜大于 0.5 倍板厚 h_b ；
- 3 接缝顶部宽度 b_t 不宜小于 500mm，槽口宽度 b_c 不宜小于 150mm；
- 4 接缝宽度 b_l 不宜小于 200mm。



条文说明

-28-

6.6.3 对于型钢-超高性能混凝土组合板的横向湿接缝，宜选用设有钢板和钢条强化的 T 形接缝（图 6.6），其构造要点宜符合下列规定：

- 1 型钢端面 l_s 范围内铺设钢板， l_s 不宜小于 400 mm；
- 2 型钢端面通过加工形成上弯的钢条，接缝处每侧型钢侧面的钢条数不少于 4 条；
- 3 接缝区域内横隔板上翼缘、铺设的钢板均含有焊钉连接件，并应注意与钢筋、钢条位置错开；
- 4 T 形接缝高度 h_j 由型钢-UHPC 组合桥面总高控制，其中槽口深度 h_c 不小于 50 mm，且应不大于 $0.5h_j$ ；
- 5 T 形接缝顶宽 b_f 不宜小于 500 mm，其中槽口宽度 b_c 不宜小于 150 mm；
- 6 T 形接缝底宽 b_j 不宜小于 200 mm；
- 7 接缝处钢条的长度不小于 10 倍的钢筋直径；
- 8 接缝处 UHPC 端面呈燕尾状，其中，燕尾企口深度 b_q 不小于 50 mm，燕尾企口交错区域投影长度 l_c 不小于 50 mm，燕尾企口倾角 α 不小于 45° 且不大于 70° ，燕尾企口长度 l_q 不小于 200 mm。

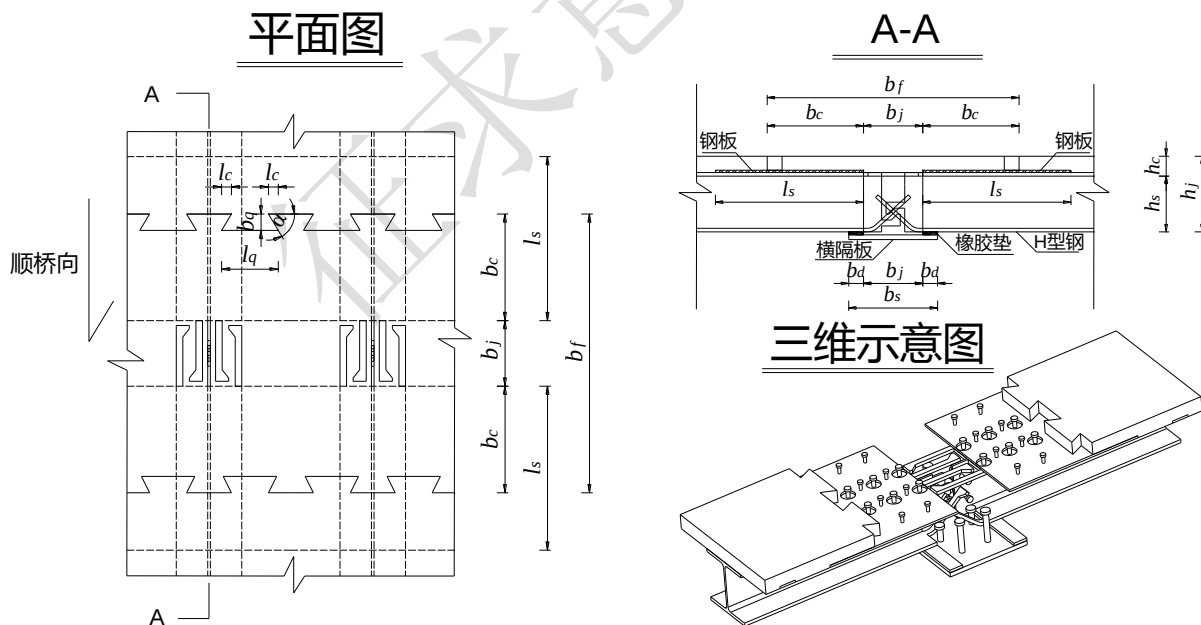


图 6.6.3 型钢-超高性能混凝土组合板横向湿接缝方案

条文说明

本条文规定了适用于型钢-超高性能混凝土组合板的接缝构造，其核心要点为：通过将型钢端部钢条外伸、接缝附近型钢顶面加密焊钉、超高性能混凝土端部设企口等方

式，共同强化接缝的抗裂性能。

6.7 纵向抗剪验算

6.7.1 钢-超高性能混凝土组合梁超高性能混凝土桥面板纵向抗剪验算时，可按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64）第 6.3 节规定执行。

6.8 冲切验算

6.8.1 在集中反力作用下不配制抗冲切钢筋的超高性能混凝土板，其抗冲切承载力计算可按下列公式计算（图 6.8.1）：

$$\gamma_0 F_{ld} \leq (0.7\beta_h\beta_\rho f_{td} + 0.15\sigma_{pc,m})U_m h_0 \quad (6.8.1-1)$$

$$\beta_\rho = 0.75 + 0.04\sqrt{Pf_{sd}} \quad (6.8.1-2)$$

式中： F_{ld} ——最大集中反力设计值；
 β_h ——截面高度尺寸效应系数，当 $h \leq 300\text{mm}$ 时，可取 1.0；当 $h \geq 800\text{mm}$ ，可取 0.85；当 $300\text{mm} \leq h \leq 800\text{mm}$ 时，其间可按直线插入取值，此处 h 为板的高度；
 β_ρ ——钢筋影响系数；
 P ——超高性能混凝土板破坏锥体截面内纵向与横向受拉钢筋的配筋百分率的均值，当 P 大于 4.0 时，取 $P=4.0$ ；
 f_{sd} ——钢筋抗拉强度设计值（MPa）；
 f_{td} ——超高性能混凝土轴心抗拉强度设计值，其中纤维取向系数应取局部纤维取向系数 $K_{\text{local}}=1.75$ ；
 $\sigma_{pc,m}$ ——设有预应力钢筋的板截面上，由于预应力引起的超高性能混凝土的有效平均压应力，其值宜控制在 1.0MPa~3.5MPa 范围内；
 U_m ——距集中反力作用面 $h_0/2$ 处破坏锥体截面面积的周长；
 h_0 ——板的有效高度。

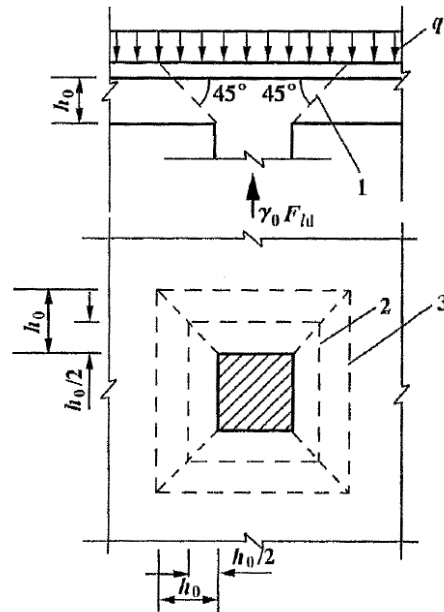


图 6.8.1 板抗冲切承载力计算

1-冲切破坏锥体的斜截面；2-距集中反力作用面 $h_0/2$ 处破坏锥体截面周长；3-冲切破坏锥体的底面线

条文说明

调研国内外已有超高性能混凝土板抗剪试验，共搜集了 116 块超高性能混凝土板双向冲切试验结果，其中配筋超高性能混凝土板 81 块，不配筋超高性能混凝土板 35 块。根据统计试验资料分析，随着超高性能混凝土板的配筋率的提高，能增强钢筋销栓作用、增大超高性能混凝土板的剪压区高度，进而提高其冲切承载力。因此，对现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362) 的抗冲切承载力公式进行修正，通过引入钢筋影响系数，建立了本规范给出的超高性能混凝土板抗冲切承载力计算公式。同时，通过局部纤维取向系数来考虑可能存在的不利纤维分布取向对超高性能混凝土抗拉强度不利影响。

利用统计的超高性能混凝土板双向冲切试验结果，对本条文规定的超高性能混凝土板抗冲切承载力公式进行误差分析和可靠度校核。结果表明，本条文公式可较好地预测超高性能混凝土板的抗冲切承载力，满足可靠指标 4.7 的要求。

7. 钢-超高性能混凝土组合梁计算

7.1 作用效应计算

7.1.1 钢-超高性能混凝土组合梁的作用效应计算应符合下列规定：

- 1 应按弹性方法进行计算，必要时应考虑结构的二阶效应。
- 2 应考虑施工方法及顺序的影响。
- 3 应考虑超高性能混凝土开裂、超高性能混凝土收缩徐变等因素的影响。
- 4 当剪力连接件按本规程第 8 章的相关规定进行设计时，组合梁作用效应计算可不考虑钢梁和超高性能混凝土桥面板之间的滑移效应。

7.1.2 钢-超高性能混凝土连续组合梁的整体分析应符合下列规定：超高性能混凝土桥面板应采用开裂分析方法，中间支座两侧各 $0.15L$ （ L 为梁的跨度）范围内组合梁截面刚度取开裂截面刚度 EI_{cr} ，其余区段组合梁截面刚度取未开裂截面刚度 EI_{un} 。

7.1.3 组合梁温度效应、超高性能混凝土收缩徐变的计算应符合下列规定：

1 组合梁应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的相关规定计算温度效应。

2 超高性能混凝土桥面板收缩产生的效应可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的相关规定计算，其收缩应变可按本规程第 3.1.15 条取用或按附录 B 计算。

3 在进行钢-超高性能混凝土组合梁桥整体分析时，可采用调整钢材与超高性能混凝土弹性模量比的方法考虑超高性能混凝土徐变的影响，按式（7.1.3）计算。超静定结构中超高性能混凝土收缩徐变所引起的效应，宜采用有限元方法计算。

$$n_L = n_0[1 + \psi_L \phi(t, t_0)] \quad (7.1.3)$$

式中： n_L ——长期弹性模量比；

n_0 ——短期荷载作用下钢与超高性能混凝土的弹性模量比， $n_0 = E / E_c$ ；

E_c ——超高性能混凝土弹性模量；

- E ——钢材弹性模量；
- $\varphi(t, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 ，计算龄期为 t 时的超高性能混凝土徐变系数，应按附录 B 计算；
- ψ_L ——根据作用（或荷载）类型确定的徐变因子，永久作用取 1.1，超高性能混凝土收缩作用取 0.55，由强迫变形引起的预应力作用取 1.5。

7.2 强度计算

7.2.1 抗弯计算应符合下列规定：

1 计算钢-超高性能混凝土组合梁抗弯承载力时，应考虑施工方法及顺序的影响，并应对施工过程进行抗弯验算，施工阶段作用组合效应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 组合梁截面抗弯承载力应采用线弹性方法进行计算，以截面上任意一点达到材料强度设计值作为抗弯承载力的标志，并应符合下列规定：

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \frac{M_{d,i}}{W_{\text{eff},i}} \quad (7.2.1-1)$$

$$\gamma_0 \sigma \leq f \quad (7.2.1-2)$$

式中： i ——变量，表示不同的应力计算阶段；其中， $i=I$ 表示未形成组合梁截面（钢梁）的应力计算阶段； $i=II$ 表示形成组合梁截面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截面的弯矩设计值（N·mm）；

$W_{\text{eff},i}$ ——对应不同应力计算阶段，钢梁或组合梁截面的抗弯模量（mm³）；

f ——钢筋、钢梁或超高性能混凝土的强度设计值（MPa）。

3 计算组合梁抗弯承载力时应考虑超高性能混凝土桥面板剪力滞效应的影响。

4 计算组合梁负弯矩区抗弯承载力时，应考虑负弯矩区超高性能混凝土的抗拉贡献，同时还应计入超高性能混凝土板翼缘有效宽度内纵向钢筋的作用。

7.2.2 钢-超高性能混凝土组合梁的竖向抗剪承载力应按下列原则计算：

1 组合梁竖向抗剪验算应按下列式计算:

$$\gamma_0 V_{\text{vd}} \leq V_{\text{vu}} \quad (7.2.2-1)$$

$$V_{\text{vu}} = f_{\text{vd}} A_{\text{w}} \quad (7.2.2-2)$$

式中: V_{vd} ——组合梁的竖向剪力设计值 (N);

V_{vu} ——组合梁的竖向抗剪承载力 (N);

A_{w} ——钢梁腹板的截面面积 (mm^2);

f_{vd} ——钢梁腹板的抗剪强度设计值 (MPa)。

2 组合梁承受弯矩和剪力共同作用时, 应考虑两者耦合的影响, 腹板最大折算应力应按下列式验算:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1f_{\text{d}} \quad (7.2.2-3)$$

式中: σ 、 τ ——钢梁腹板同一点上同时产生的正应力、剪应力 (MPa);

f_{d} ——钢材抗拉强度设计值 (MPa)。

条文说明

钢-超高性能混凝土组合梁竖向抗剪承载力计算偏安全地忽略超高性能混凝土桥面板对竖向抗剪承载力的贡献。

7.2.3 钢-超高性能混凝土组合梁的纵向剪力应按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01) 第 7.2.3 条规定计算。

7.3 稳定计算

7.3.1 钢-超高性能混凝土组合梁的稳定计算应符合下列规定:

1 施工期间组合梁应具有足够的侧向刚度和侧向约束(支撑), 以保证钢梁不发生整体失稳。组合梁桥由多根钢梁构成时, 支承处应设置横向联结系, 并要求具有足够的刚度, 其他位置宜根据实际需要布置横向联结系。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)的有关规定。

2 超高性能混凝土桥面板与钢梁有效连接成整体后, 组合梁正弯矩区段可不进行整体稳定性验算。

3 组合梁腹板加劲肋的设置宜考虑形成组合截面后钢梁腹板受压区高度变化的影响, 进行合理设计。

4 连续组合梁负弯矩区钢梁为箱形截面或者下翼缘有可靠的横向约束, 且腹板有加劲措施时, 可不必进行负弯矩区侧扭稳定性验算, 否则应按本规程第 7.3.2 条规定对钢梁侧扭稳定性进行验算。

7.3.2 连续钢-超高性能混凝土组合梁负弯矩区侧扭稳定性应按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01) 第 7.3.2 条规定进行验算。

7.4 疲劳计算

7.4.1 钢-超高性能混凝土组合梁的抗疲劳设计应符合下列规定:

- 1 承受动应力的结构构件或连接件应进行疲劳验算。
- 2 在设计使用年限内, 桥梁结构不应发生疲劳破坏。
- 3 组合梁疲劳验算应采用弹性分析方法。
- 4 组合梁疲劳荷载的选取应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64) 的相关规定。

7.4.2 钢-超高性能混凝土组合梁中, 组合梁的钢梁及连接、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) 7.4.2 条的规定。

7.4.3 超高性能混凝土桥面板的疲劳验算时, 应采用名义应力法, 应力按弹性状态计算。

条文说明

超高性能混凝土桥面板厚度较薄, 在车轮荷载作用下, 应力较大, 应对其疲劳性能进行验算。疲劳验算的目的是确保超高性能混凝土桥面板在设计寿命期内不会出现由疲劳开裂引起的安全问题。

7.4.4 超高性能混凝土桥面板的疲劳强度应符合以下规定:

- 1 超高性能混凝土桥面板抗裂疲劳强度取其名义抗裂强度的 0.5 倍。
- 2 超高性能混凝土桥面板接缝处的疲劳强度取为连续处疲劳强度的 0.7 倍。

条文说明

编制团队对钢-超高性能混凝土组合梁开展了负弯矩作用下的抗弯疲劳试验(《轻型组合桥面板的疲劳性能研究》, 土木工程学报, 2015)。试验中控制超高性能混凝土层的弯拉应力幅为 21.3 MPa, 为其静力名义抗裂强度(42.7 MPa)的 0.5 倍。

试验结果表明, 当经历 310 万次疲劳应力循环后, 超高性能混凝土层未出现任何疲劳开裂现象, 此时试件中的钢梁已严重疲劳开裂。该试验中的超高性能混凝土材料等级为 UF25, 当配筋间距为 30 mm 时, 超高性能混凝土层的横桥向名义抗裂强度容许值为 20.1 MPa, 疲劳强度则为 $0.5 \times 20.1 = 10.05$ MPa。根据 Miner 准则, 偏保守取超高性能混凝土的 S-N 曲线斜率为 $m=3$, 则可得在该疲劳强度下, 超高性能混凝土的疲劳寿命将超过 $310 \times (21.3/10.05)^3 = 2951$ 万次, 超过了桥面结构的疲劳极限循环次数(一般为 1000 万次), 理论上超高性能混凝土具有无限疲劳寿命。因此, 超高性能混凝土桥面的疲劳强度可偏保守地取其静力名义抗裂强度的 0.5 倍。

而对于超高性能混凝土接缝, 根据编制组的前期研究, 强化接缝的静力抗裂强度为连续处的 79%, 因此, 本节偏保守的取整数, 按 70% 计算接缝处的抗裂强度。

7.5 应力计算

7.5.1 对短暂状况的设计, 应计算构件在制作、运输及安装等施工阶段由自重、施工荷载等引起的应力, 并不应超过本节规定的限值。施工荷载除有特别规定外, 均采用标准组合; 温度作用效应可按施工时实际温度场取值; 动力安装设计产生的效应应乘以相应的动力系数。

7.5.2 持久状况下, 钢-超高性能混凝土组合梁的应力验算应符合下列规定:

- 1 超高性能混凝土构件正截面的最大压应力不宜大于 $0.50f_{ck}$;
- 2 钢结构应力不应大于 75% 的强度设计值, 且应满足稳定要求。

7.5.3 短暂状况下, 钢-超高性能混凝土组合梁的应力验算应符合下列规定:

- 1 超高性能混凝土构件正截面的最大压应力不宜大于 $0.70f_{ck}$;
- 2 钢结构应力不应大于 80% 的强度设计值, 且应满足稳定要求。

7.6 裂缝计算

7.6.1 对于配筋超高性能混凝土构件, 当拉应力不大于 f_{tk}/K_{global} , 可不验算构件裂缝宽度; 当拉应力大于 f_{tk}/K_{global} , 应对其进行裂缝宽度验算。

条文说明

本规程规定超高性能混凝土构件按全预应力构件或 A 类预应力构件设计, 不用进行裂缝宽度验算。钢筋超高性能混凝土构件设计, 应进行裂缝宽度验算。当超高性能混凝土构件拉应力小于 f_{tk}/K_{global} 时, 认为超高性能混凝土基体没有开裂, 不用验算钢筋超高性能混凝土构件裂缝宽度; 当钢筋超高性能混凝土构件拉应力大于 f_{tk}/K_{global} 时, 认为超高性能混凝土基体已开裂, 应验算裂缝宽度。

7.6.2 钢-超高性能混凝土组合梁结构中超高性能混凝土最大裂缝宽度应满足本规程第 5.4.4 节的要求。

7.6.3 对于含有粘结钢筋超高性能混凝土构件, 为确保超高性能混凝土和钢筋之间的协同工作, 裂缝宽度计算应针对最大受拉处的钢筋应力, 钢筋埋置深度处的裂缝宽度 w_s 可按下列公式计算:

$$w_s = s_{r,max,f} (\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f}) \quad (7.6.3)$$

式中: $s_{r,max,f}$ ——最大裂缝间距, 按本规程第 7.6.6 条规定计算;

$\varepsilon_{sm,f}$ ——裂缝间钢筋的平均应变, 考虑了滑移及裂缝间纤维的拉伸强化效应的影响;

$\varepsilon_{cm,f}$ ——裂缝间超高性能混凝土的平均应变, $(\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f})$ 为裂缝间钢筋与超高性能混凝土的应变差值, 可按本规程第 7.6.5 条规定计算。

7.6.4 超高性能混凝土最大表面裂缝宽度 w_t 可按下列公式计算并满足:

$$w_t = w_s \cdot (h - x_0 - x') / (h_0 - x_0 - x') \leq w_{max} \quad (7.6.4)$$

式中： h ——截面高度；
 h_0 ——截面有效高度（受拉区钢筋合力点至受压区边缘距离）；
 x_0 ——受压区高度；
 x' ——受拉弹性区高度（超高性能混凝土拉应力在 $0 \sim f_{ctm,el}$ 之间）；
 w_{max} ——最大裂缝宽度限值，按本规程表 5.4.4 取值。

7.6.5 裂缝间钢筋与超高性能混凝土应变差 ($\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f}$) 可按下列公式计算：

$$\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f} = \frac{\sigma_{ss}}{E_s} - \frac{f_{ctfm}}{K_{global} E_c} - \frac{1}{E_s} \left[k_t (f_{ctm,el} - \frac{f_{ctfm}}{K}) \left(\frac{1}{\rho_{eff}} + \frac{E_s}{E_c} \right) \right] \quad (7.6.5)$$

式中： σ_{ss} ——裂缝位置的钢筋应力；

E_s 、 E_c ——分别为钢筋与超高性能混凝土弹性模量；

$f_{ctm,el}$ ——超高性能混凝土的线弹性抗拉强度平均值，可取 f_{tk} ；

f_{ctfm} ——超高性能混凝土开裂后的应力最大值的平均值，可取 f_{tk} ；

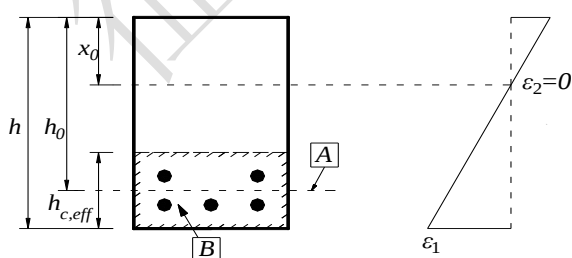
ρ_{eff} ——有效配筋率，等于 $A_s/A_{c,eff}$ ；

$A_{c,eff}$ ——超高性能混凝土有效受拉面积，如图 7.6.5 所示；

$h_{c,eff}$ ——超高性能混凝土有效受拉高度，等于 $\min\{2.5(h-h_0), h/2\}$ ；

A_s ——超高性能混凝土有效受拉高度范围内的普通钢筋面积；

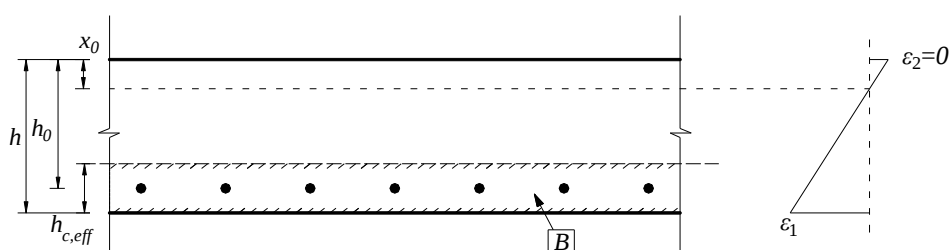
k_t ——荷载特征系数；对短期荷载，可取 0.6；对长期荷载或高幅重复荷载，可取 0.4。



(a) 梁

□ A 钢筋形心位置

□ B 超高性能混凝土有效受拉面积



□ B 超高性能混凝土有效受拉面积

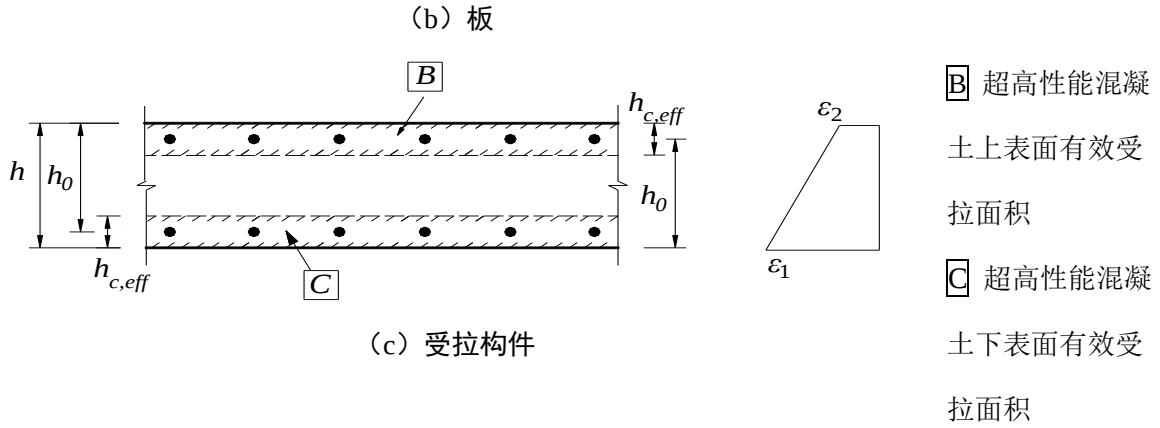


图 7.6.5 典型有效受拉面积示意图

7.6.6 最大裂缝间距 $s_{r,max,f}$ 可按下列公式计算：

$$s_{r,max,f} = 2.55(l_0 + l_t) \quad (7.6.6-1)$$

$$l_0 = 1.33 \cdot c / \delta \quad (7.6.6-2)$$

$$l_t = 2 \times \left[0.3k_2 \left(1 - \frac{f_{ctfm}}{K_{global} f_{ctm,el}} \right) \cdot \frac{1}{\delta\eta} \right] \frac{d}{\rho_{eff}} \geq \frac{l_f}{2} \quad (7.6.6-3)$$

$$\delta = 1 + 0.4 \frac{f_{ctfm}}{K_{global} f_{ctm,el}} \leq 1.5 \quad (7.6.6-4)$$

式中： l_0 ——保护层厚度对裂缝间距的影响；

l_t ——传递长度；

c ——钢筋保护层厚度；

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

k_2 ——开裂截面的应变分布影响系数；对于轴拉截面，取 $k_2 = 1$ ；对于纯弯截面和受弯且受轴向力的部分受压截面，取 $k_2 = 0.5$ ；对于既受弯还受轴向拉力的全截面受拉截面，取 $k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2\varepsilon_1$ ； ε_1 和 ε_2 分别为受拉截面不同边缘上较大和较小的拉应变值；

l_f ——钢纤维长度；

d ——钢筋直径；

η ——普通钢筋的粘结系数，可取 2.25。

条文说明

条文 7.6.3~7.6.6 参考了《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》给出的裂缝宽度计算方法。

承载能力极限状态和正常使用极限状态超高性能混凝土设计轴拉应力-应变关系应按下列公式取用。

$$\begin{cases} \sigma_t = f_{td} \times \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{el}} \right) & (\varepsilon \leq \varepsilon_{el}) \\ \sigma_t = f_{td} & (\varepsilon_{el} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}) \end{cases} \quad (7.6.6a)$$

$$\varepsilon_{el} = f_{td} / E_c \quad (7.6.6b)$$

$$\varepsilon_{tu} = 0.0025 \quad (7.6.6c)$$

本规程中充分利用超高性能混凝土的轴心受拉应变硬化特性。为便于设计，本规程规定的超高性能混凝土设计轴拉本构曲线形式综合参考了法国 UHPC 材料技术标准《Concrete - Ultra-high performace fibre-reinforced concrete - Specifications, performance, production and conformity》(NF P 18-470, 2016)、《法国 UHPC 结构设计规范 NF P 18-710 2016》、《日本 UHPC 结构设计和施工指南 JSCE 2006》、《澳大利亚 Ductal 预应力梁设计指南 UNSW 2000》以及《美国 UHPC 华夫板设计指南 FHWA 2013》的形式，采用双折线形式。其中正常使用极限状态超高性能混凝土抗拉强度设计值取 $f_{td}=f_{tk}/K$ ，承载能力极限状态超高性能混凝土抗拉强度取 $f_{td}=f_{tk}/1.45/K$ ，初裂应变 ε_{el} 取 f_{td}/E_c 。基于湖南大学试验结果，本规程将超高性能混凝土的极限拉应变设计值偏安全地定为 $2500 \mu\varepsilon$ 。

计算配筋超高性能混凝土构件的裂缝宽度时，应考虑受拉区超高性能混凝土参与工作，受弯构件、轴心受拉构件计算流程分别如图 7.6.6 和图 7.6.6 所示。

正常使用极限状态裂缝宽度验算基本假定：

- (1) 可视裂缝时截面应变分布满足平截面假定；
- (2) 考虑受拉区超高性能混凝土全部参与截面受力，超高性能混凝土受拉应力应变关系按公式 7.6.6a~7.6.6c 取用，超高性能混凝土部分的应变位于受拉应力-应变关系的伪应变强化段，且受拉区超高性能混凝土开裂强度为 f_{tk}/K ；
- (3) 超高性能混凝土受压及钢筋受拉的应力应变均取线弹性。



已知按作用（或荷载）频遇组合计算弯矩值 M_s

计算图示如图 7.6.6 所示，根据轴力平衡条件和弯矩平衡条件，求得截面应变分布（即曲率 φ 和中和轴位置 x_0 ）

$$\sum N = 0 \quad C_{UHPC} = T_{UHPC1} + T_{UHPC2} + T_s$$

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



已求得截面曲率 φ 和中和轴位置 x_0

求得钢筋应力 $\sigma_{ss} = (h_0 - x_0)\varphi E_s$



根据本规程第 7.6.1~7.6.6 条规定计算超高性能混凝土表面裂缝宽度

图 7.6.6a 超高性能混凝土受弯构件裂缝宽度计算流程

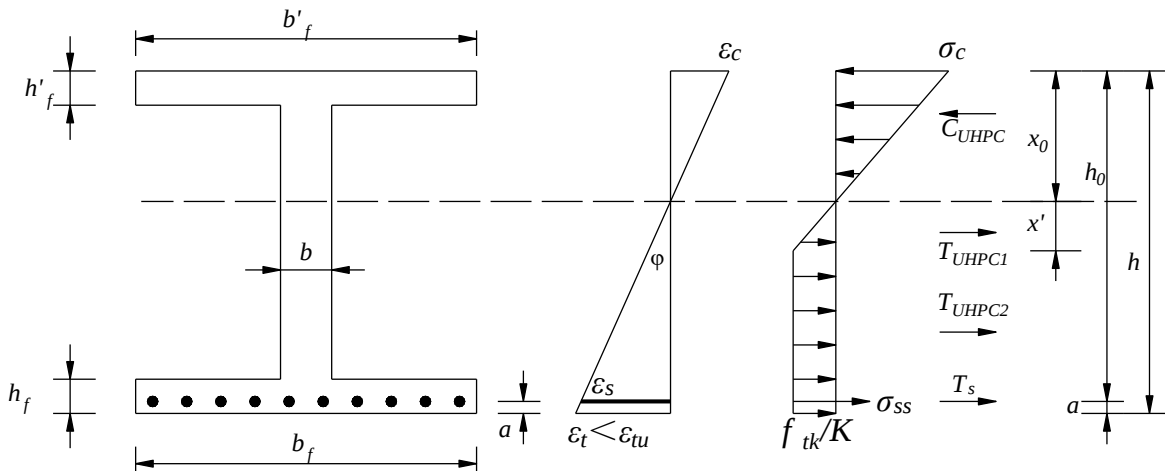


图 7.6.6b 超高性能混凝土受弯构件正常使用极限状态中和轴和曲率计算图示

正常使用极限状态裂缝宽度验算基本假定：

(1) 可视裂缝时截面应变分布满足平截面假定；

(2) 考虑受拉区超高性能混凝土全部参与截面受力，超高性能混凝土受拉应力应变关系按公式 7.6.6a~7.6.6c 取用，超高性能混凝土部分的应变位于受拉应力-应变关系的伪应变强化段，且受拉区超高性能混凝土开裂强度为 f_{tk}/K 。



已知按作用（或荷载）频遇组合计算轴力值 N_s

计算图示如图 7.6.6 所示，根据轴力平衡条件，求得钢筋应力

$$\sum N = N_s \quad N_s = T_{UHPC} + T_{s1} + T_{s2}$$



求得钢筋应力 $\sigma_{ss} = (T_{s1} + T_{s2}) / (A_{s1} + A_{s2})$



根据本规程第 7.6.1~7.6.6 条规定计算超高性能混凝土表面裂缝宽度

图 7.6.6c 超高性能混凝土轴心受拉构件裂缝宽度计算流程

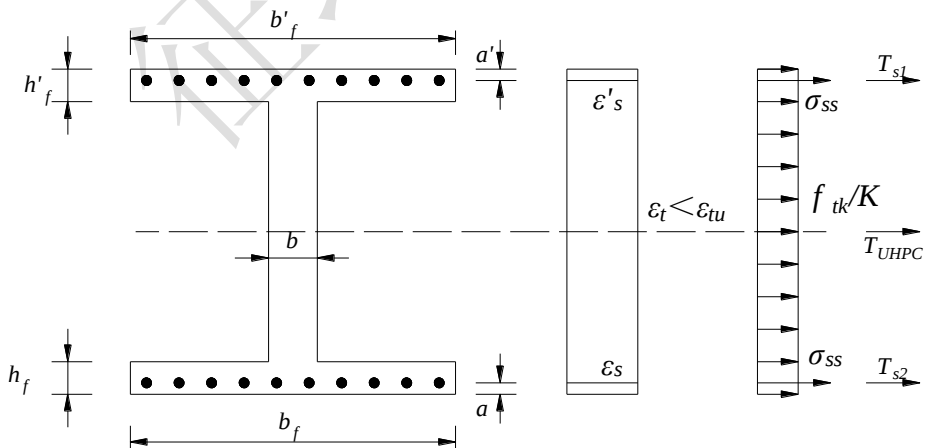


图 7.6.6d 超高性能混凝土轴心受拉构件正常使用极限状态计算图示

图中： h ——截面高度；

h_0 ——截面有效高度，即受拉钢筋中心线到受压边缘的距离；

a ——受拉区钢筋合力点至受拉边缘的距离；

- x_0 ——截面受压区的高度或中和轴到受压边缘的距离；
 x' ——受拉不开裂高度（超高性能混凝土拉应力在 $0 \sim f_{ctm,el}$ 之间）；
 ε_c, σ_c ——受压边缘超高性能混凝土的应变和应力；
 $\varepsilon_s, \sigma_{ss}$ ——受拉区钢筋的应变和应力；
 ε_t ——受拉边缘超高性能混凝土的应变；
 f_{tk} ——超高性能混凝土抗拉强度标准值；
 K ——超高性能混凝土纤维取向系数，按本规程第 3.1.8 条取值；
 C_{UHPC} ——受弯构件受压区超高性能混凝土压力合力；
 T_{UHPC} ——轴心受拉构件超高性能混凝土拉力合力；
 T_{UHPC1} ——受弯构件受拉区超高性能混凝土受拉弹性区拉力合力；
 T_{UHPC2} ——受弯构件受拉区超高性能混凝土受拉塑性区拉力合力；
 T_s, T_{s1}, T_{s2} ——受拉区钢筋拉力；
 φ ——截面曲率。

7.6.7 对于用钢板条作为体外配筋的超高性能混凝土桥面板，受拉区超高性能混凝土表面最大裂缝宽度可按下列公式计算：

$$w_{\max} = \alpha \left(\varepsilon_{t,a} - \frac{f_{tk}}{KE_c} \right) l_c \quad (7.6.7)$$

- 式中：
- α ——修正系数，取 4.4；
 $\varepsilon_{t,a}$ ——受拉区超高性能混凝土的应变；
 f_{tk} ——不配筋超高性能混凝土的轴心抗拉强度标准值（MPa）；
 K ——超高性能混凝土中纤维取向系数，取 1.25；
 E_c ——超高性能混凝土的弹性模量（MPa）；
 l_c ——正弯矩超高性能混凝土的平均裂缝间距（mm），取 $2/3 h_c$ ；
 h_c ——计算模型中超高性能混凝土层的厚度（mm）。

7.6.8 对于用钢板条作为体外配筋的超高性能混凝土桥面板，受拉区超高性能混凝土表面的拉应变可按下列公式计算：

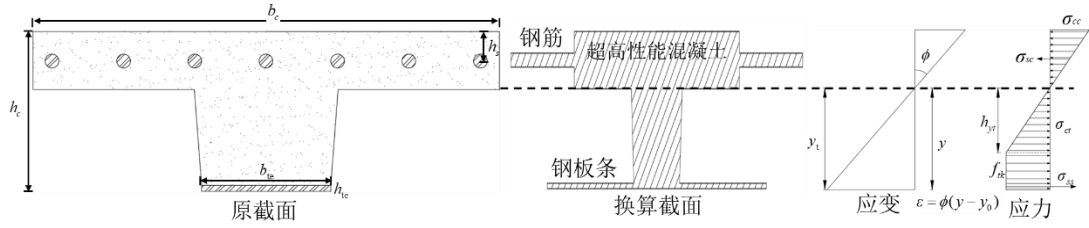


图 7.6.8 受力模型中 UHPC 底面拉应变计算示意图

(1) 外荷载作用下裂后截面内力和弯矩平衡方程如式 (7.6.8-1) 所示:

$$N_{sc} + N_{cc} + N_{ct} + N_{st} - N_{load} = 0 \quad (7.6.8-1)$$

$$M_{sc} + M_{cc} + M_{ct} + M_{st} - M_{load} = 0$$

式中: N_{cc} 、 M_{cc} ——分别为受压区超高性能混凝土承受的轴力和弯矩;
 N_{sc} 、 M_{sc} ——分别为受压区钢筋承受的轴力和弯矩;
 N_{ct} 、 M_{ct} ——分别为受拉区超高性能混凝土承受的轴力和弯矩;
 N_{st} 、 M_{st} ——分别为受拉区钢板条承受的轴力和弯矩;
 N_{load} 、 M_{load} ——为外荷载作用下引起的轴力和弯矩。

(2) 对图 7.6.8 的截面应力分布进行积分, 得到式 (7.6.8-1) 中各项的表达式, 如 (7.6.8-2) 所示:

$$\begin{aligned} N_{sc} &= -A_s E_s \phi (h_c - y_t - h_s) \\ N_{cc} &= -b_c E_c \phi (h_c - y_t)^2 / 2 \\ N_{ct} &= b_{te} E_c \phi h_{yt}^2 / 2 + b_{te} f_{ct} (y_t - h_{yt}) \\ N_{st} &= b_{te} E_s \phi h_{te} (y_t - h_{te} / 2) \\ M_{sc} &= -A_s E_s \phi (h_c - y_t - h_s)^2 \\ M_{cc} &= b_c E_c \phi (h_c - y_t)^3 / 3 \\ M_{ct} &= b_{te} E_c \phi h_{yt}^3 / 3 + b_{te} f_{ct} (y_t^2 - h_{yt}^2) / 2 \\ M_{st} &= b_{te} E_s \phi h_{te} (y_t - h_{te} / 2)^2 \end{aligned} \quad (7.6.8-2)$$

式中: b_c —— 抗裂验算时, 计算模型中超高性能混凝土层的宽度 (mm);
 h_c —— 计算模型中超高性能混凝土层的厚度 (mm);
 b_t —— 计算模型中钢板条的宽度 (mm);
 h_{te} —— 计算模型中钢板条的厚度 (mm);
 A_s —— 计算模型中横向钢筋的截面面积 (mm²);

- E_r —— 钢筋的弹性模量 (MPa) ;
 E_s —— 钢材的弹性模量 (MPa) ;
 E_c —— 超高性能混凝土的弹性模量 (MPa) ;
 ϕ —— 计算模型中截面的弯曲曲率 (1/mm) ;
 y_0 —— 计算模型中性轴到钢板条底面的距离 (mm) ;
 h_s —— 横桥向钢筋形心到超高性能混凝土层表面的距离 (mm) ;
 f_{tk} —— 不配筋超高性能混凝土的轴心抗拉强度标准值 (MPa) ;
 h_{yt} —— 超高性能混凝土比例极限拉应变高度 (mm) 。

条文说明

为对正弯矩作用下构建相适应的超高性能混凝土裂缝宽度计算方法和公式,考虑钢板条宽度和超高性能混凝土板厚度两个因素开展试验,制作了 12 个钢板条-超高性能混凝土组合板试件,探明了在正弯矩作用下超高性能混凝土板底面沿横桥向抗裂性能。

最大裂缝计算公式参考了法国规范《National Addition to Eurocode2 – Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-HighPerformance Fibre-Reinforced Concrete(UHPFRC)》(NFP 18-710,2016)的相关规定,并考虑裂缝宽度、间距等因素进行了修正。

7.7 变形计算

7.7.1 钢-超高性能混凝土组合梁的变形计算应符合下列规定:

- 1 组合梁在正常使用极限状态下的挠度可根据构件刚度按结构力学方法计算。
- 2 计算组合梁在正常使用极限状态下的挠度时,应采用弹性分析方法,考虑超高性能混凝土收缩徐变及预应力的影响。
- 3 组合梁在正常使用极限状态下的挠度应按本规程第 7.1.3 条的规定考虑作用(或荷载)长期效应的影响。

7.7.2 钢-超高性能混凝土组合梁的刚度计算可按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01)第 7.6.2 条规定执行。

8. 连接件

8.1 一般规定

8.1.1 钢与超高性能混凝土的结合应采用焊钉连接件。

条文说明

常用连接件形式可分为焊钉连接件、开孔板连接件和型钢连接件。由于开孔板连接件和型钢连接件会阻断钢纤维，导致钢纤维不连续，故此条文规定钢与超高性能混凝土的结合应采用焊钉连接件。

8.1.2 连接件不但应保证钢与超高性能混凝土有效结合，共同承担作用力，并应具有一定的变形能力。

8.1.3 连接件布置成倒立状态时，应在钢板上设置出气孔保证超高性能混凝土浇筑密实；连接件布置成侧立状态时，应避免超高性能混凝土离析。

8.2 构造要求

8.2.1 焊有连接件的钢板厚度不应小于焊钉直径的 0.5 倍。

8.2.2 焊钉连接件的构造应符合下列要求：

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

2 焊钉连接件的间距不宜超过 300 mm。

3 焊钉连接件剪力作用方向上的间距不宜小于焊钉直径的 5 倍，且不得小于 100 mm；剪力作用垂直方向的间距不宜小于焊钉直径的 2.5 倍，且不得小于 50 mm。

4 焊钉连接件的外侧边缘与钢板边缘的距离不应小于 25 mm。

5 焊钉外侧边缘至超高性能混凝土桥面板边缘间的距离不应小于 100 mm。

6 焊钉顶面的超高性能混凝土保护层厚度不应小于 20 mm。

条文说明

2.考虑到车轮荷载作用下,桥面板的变形较大,故规定矮肋板和型钢-超高性能混凝土组合板中钢板条顶面或型钢纵肋顶面的焊钉连接件间距不宜大于 200 mm。

8.3 计算

8.3.1 计算连接件剪力设计值时,应考虑钢与超高性能混凝土组合后的结构重力、汽车荷载、预应力(当采用时)、收缩(当超高性能混凝土未进行热养护时)、徐变以及钢与超高性能混凝土的升、降温差等作用,尚应按照不同的剪力方向分别进行作用组合。

8.3.2 焊钉连接件的抗剪刚度宜通过试验确定,并按下式(8.3.2-1)计算。当无试验资料时,可按式 8.3.2-2 和式 8.3.2-3 计算抗剪承载力和抗剪刚度。

$$k_{ss} = 0.5 \left(\frac{0.3P_u}{s_1} + \frac{0.4P_u}{s_2} \right) \quad (8.3.2-1)$$

式中: k_{ss} ——焊钉连接件的抗剪刚度 (N/mm);

P_u ——推出试验(标准推出试验的尺寸图如图 8.3.2 所示)得到的焊钉连接件的平均抗剪承载力 (N);

s_1 —— $0.3P_u$ 对应的滑移量 (mm);

s_2 —— $0.4P_u$ 对应的滑移量 (mm)。

$$P_u = \left(0.85 + \frac{f_{cu,k}}{f_{stud}} \right) A_{ss} f_{stud} \quad (8.3.2-2)$$

$$k_{ss} = \frac{2P_u - 0.7P_u b_{ss}}{2a_{ss} d_{ss}} \quad (8.3.2-3)$$

式中: k_{ss} ——焊钉连接件的抗剪刚度 (N/mm);

P_u ——推出试验得到的焊钉连接件的平均抗剪承载力 (N);

a_{ss} 、 b_{ss} ——荷载-滑移曲线的参数,建议参数 a_{ss} 、 b_{ss} 分别取值 0.016 和 0.9;

d_{ss} ——焊钉连接件杆部的直径 (mm);

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

f_{stud} ——焊钉材料的抗拉强度最小值 (MPa);

A_{ss} ——焊钉连接件杆部截面面积 (mm^2)。

条文说明

编制单位对超高性能混凝土中短焊钉的抗剪性能进行了一系列试验研究,提出了荷载-滑移全曲线实用经验公式和抗剪承载力计算公式,收集的国内外 68 组有效试验数据与理论计算结果吻合度较高。建议取 $0.3\sim 0.4P_u$ (短焊钉抗剪承载力) 处的割线刚度平均值作为超高性能混凝土中短焊钉的抗剪刚度 (8.3.2-1), 抗剪刚度试验值与理论计算结果对比表明该方法具有较高的精度。

编制单位按无量纲化后的曲线给出了不同直径焊钉的统一荷载-滑移曲线表达式 8.3.2a, 从而消除了焊钉直径的影响, 避免给出多条曲线, 便于设计。

$$\frac{P}{P_u} = \frac{\bar{S}}{a_{ss} + b_{ss}\bar{S}} \quad (8.3.2a)$$

式中: P ——单个焊钉连接件的剪力值 (N);

$\bar{S}$ ——平均相对滑移值 (s) / 焊钉连接件直径 (d_{ss})。

当无试验资料时, 为了和现有规范计算公式形式保持一致, 提出了焊钉连接件的抗剪承载力计算公式 8.3.2-2, 根据公式 8.3.2a 和 8.3.2-2, 可得到抗剪刚度计算公式 8.3.2-3。

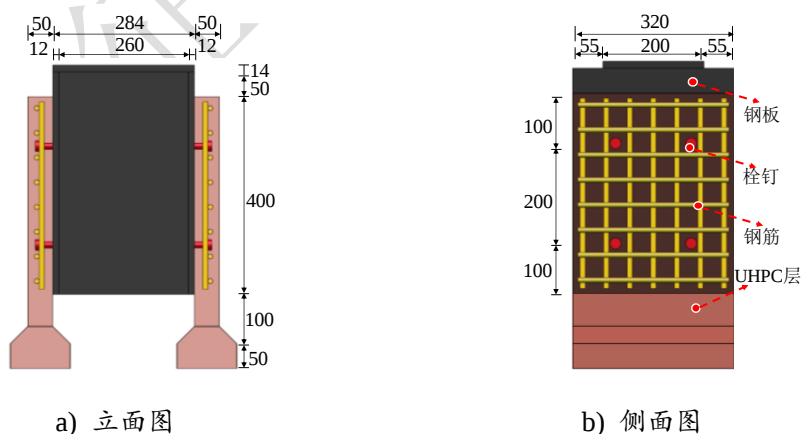


图 8.3.2a 标准推出试验尺寸示意图 (单位: mm)

8.3.3 依据连接件的使用情况, 应对连接件的承载能力极限状态和正常使用极限状态进行验算。

1 承载力极限状态应按下式验算：

$$\gamma_0 V_d \leq V_u \quad (8.3.3-1)$$

式中： V_d ——承载力极限状态下连接件剪力设计值（N）；

V_u ——承载力极限状态下连接件抗剪承载力设计值（N）。

2 正常使用极限状态应按下式验算：

$$s_{\max} \leq s_{\lim} \quad (8.3.3-2)$$

式中： $s_{\max}$ ——正常使用极限状态下结合面的最大滑移值（mm）；

$s_{\lim}$ ——正常使用极限状态下结合面的滑移限值，取 0.1 mm。

条文说明

本条文的结合面滑移验算仅限用于正常使用极限状态。滑移限值一般可考虑环境类别给出，在没有相关规定的情况下可取 0.1 mm。

8.3.4 单个焊钉连接件的抗剪承载力设计值如下：

$$V_{\text{sud}} = \frac{P_u}{\gamma_{\text{sud}}} \quad (8.3.2)$$

式中： V_{sud} ——承载力极限状态下焊钉连接件的抗剪承载力设计值（N）；

P_u ——推出试验得到的焊钉连接件的平均抗剪承载力（N）；

γ_{sud} ——抗力系数，建议取值 1.25。

条文说明

根据推出试验得到的焊钉连接件的平均抗剪承载力，并考虑抗力系数便得到了单个焊钉连接件的抗剪承载力设计值。

8.3.5 正常使用极限状态下，采用焊钉连接件的结合面最大滑移值可按下式计算：

$$s_{\max} = \frac{V_{\text{sd}}}{k_{\text{ss}}} \quad (8.3.3)$$

式中： $s_{\max}$ ——正常使用极限状态下的结合面最大滑移值（mm）；

V_{sd} ——正常使用极限状态下的连接件剪力设计值（N）；

k_{ss} ——焊钉连接件的抗剪刚度（N/mm）。

9. 施工

9.1 一般规定

- 9.1.1** 钢-超高性能混凝土组合桥梁的施工应选择具有相关工程经验的技术人员和专业施工设备的单位完成。
- 9.1.2** 施工前，应制定详细的施工组织设计，并应对负责各工序的施工人员进行岗前培训，建立质量控制体系，确定施工质量的有效控制方法。
- 9.1.3** 施工单位应建立各道工序的质量检查制度，并应留有完整的检查记录。
- 9.1.4** 每道工序完工后，应进行全面质量检验，确认合格后才能进入下一道工序的施工。
- 9.1.5** 本规程未明确规定的施工事项应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）和《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）的相关规定。

9.2 钢梁工程

- 9.2.1** 制造钢梁所用的材料、规格、性能等应符合设计文件的要求和现行国家产品标准的规定。材料除应有生产厂家的质量证明书外，制造厂还应按相关标准进行抽样复验，复验合格后方可使用。
- 9.2.2** 焊钉连接件的施工应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）和《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）的有关规定。
- 9.2.3** 钢梁的制造、包装、存放、运输和安装应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）和《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）的有关规定。
- 9.2.4** 钢梁的表面清理和涂装除应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》

（JTG/T 3650）之外，仍应符合下列规定：

- 1 钢梁涂装材料应具有良好的附着性、耐蚀性，具有出厂合格证和检验资料，并符合耐久性要求。
- 2 上翼缘板顶面和剪力连接件均不得涂装，在安装前应进行除锈、防腐蚀处理。
- 3 超高性能混凝土桥面板热养护过程中，应对主梁钢结构采取必要的防护措施，减少热养护对钢结构表面涂装的影响。
- 4 超高性能混凝土桥面板热养护结束后，应对局部损伤的涂层按现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）规定进行表面处理，并按原设计涂层补涂各层涂料。

9.2.5 钢梁制造尺寸允许偏差和安装允许偏差应符合表 和表 的规定。

9.3 模板、支架

9.3.1 模板及支架的设计应满足下列规定：

- 1 模板宜采用标准化的组合钢模板，组合钢模板的拼装应符合现行国家标准《组合钢模板技术规范》（GB 50214）的规定；支架宜采用钢材或常备式定型钢材构件等材料制作。
- 2 模板应能适应构件的热养护，对于钢模板表面还应进行防腐防锈处理。
- 3 应根据振动器的作用范围，在模板上交错布置附着式振动器。
- 4 对于现场接缝浇筑施工也可采用木模进行，但应保证模具的强度、刚度。

条文说明

超高性能混凝土板件尺寸较薄，制作精度要求高，且超高性能混凝土静水压力较大，对模板刚度要求高，故模板宜采用钢材制作。

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

$$F = \gamma_c H \quad (9.3.2)$$

式中： F ——新浇筑超高性能混凝土对模板的最大侧压力（ kN/m^2 ）；

γ_c ——超高性能混凝土的重力密度（ kN/m^3 ），可按本规程第 3.1.13 条规定计算；

H ——超高性能混凝土侧压力计算位置处至新浇筑超高性能混凝土顶面的总高度（ m ）。

条文说明

由于本规程要求超高性能混凝土流动性大，超高性能混凝土对模板侧压力应按液体压力予以计算。与普通混凝土相比，具有自密实性能的超高性能混凝土在浇筑过程中，下部模板所承受的侧向压力会随着浇筑高度增长而线性增加，要求模板具有更高的刚度和坚固程度。

9.3.3 模板的制作与安装除应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定之外，制作质量和安装精度还应分别满足表 10.4.2 和表 10.4.3 的规定，并符合下列规定：

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

条文说明

超高性能混凝土流动性大，模板间的微小缝隙会造成跑浆、漏浆等现象，影响超高性能混凝土均匀性和强度发展，为此规定模板接缝不得漏浆。对上部封闭的空间部位浇筑时，应在上部留有排气孔，否则会造成混凝土的空洞。

9.3.4 支架的制作与安装除应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定之外，制作质量和安装精度还应分别满足表 10.4.2 和表 10.4.3 的规定。

9.3.5 模板、支架的拆除，除应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定之外，还应符合下列规定：

- 1 模板、支架的拆除期限和拆除程序等应严格按施工图设计要求进行，设计未要求时，应在同条件养护超高性能混凝土试件抗压强度达到 40 MPa 及以上方可拆除。
- 2 拆模时，构件表面温度与环境温度的温度差不应大于 15 °C。
- 3 拆模后，应及时对构件转角处露出的钢纤维进行处理。

条文说明

超高性能混凝土浇筑完成后一般需保湿养护 24~48 h，根据超高性能混凝土强度发展规律，超高性能混凝土浇筑完成后 24~48 h，超高性能混凝土强度可达到 40 MPa 以上，可保证超高性能混凝土梁体不会因脱模而损坏、断裂，满足超高性能混凝土梁体起吊和移运的要求。当构件表面温度与环境温度的温度差过大时，会使超高性能混凝土的内表温差过大或使超高性能混凝土表面过快失水，从而导致超高性能混凝土表面出现裂缝，故规定构件表面温度与环境温度的温度差不应大于 15 °C。

9.4 超高性能混凝土工程

9.4.1 本节适用于超高性能混凝土的原材料质量要求、储存、搅拌、运输、浇筑和养护施工。

条文说明

超高性能混凝土施工过程中应对原材料质量、储存、搅拌、运输、浇筑和养护等关键过程和工艺予以重点关注。

9.4.2 超高性能混凝土材料供应方式可分为干混料供应方式和原材料供应方式两大类，由供需双方协商确定，宜优先选用干混料供应方式。若采用原材料供应方式，应采取必要措施确保其性能稳定。若采用干混料供应方式，宜提供干混料产品说明

书和干混料拌制超高性能混凝土产品性能检验报告，并应满足下列要求：

1 应标明产品名称、推荐用水量(及推荐外加剂产品型号和掺量)、该推荐用水量下该产品拌合物的工作性等级、给定养护条件下的硬化混凝土技术指标，并附加产品生产和质保期限。

2 应写明使用方法：如推荐用水量（及外加剂掺量）范围、建议搅拌方式、振捣和养护注意事项等。同时还需注明贮存、运输时的相关注意事项。

3 拌制超高性能混凝土产品的性能检验报告至少应列出产品名称、委托检验单位及人员、受委托检验单位及人员、主要检验性能指标、检验依据标准、测试人员及审查人员、送检日期、检验日期、审核日期等内容。

条文说明

超高性能混凝土供应方式主要分为原材料供应和干混料供应两大类。目前国内市场供应方式主要为干混料供应，具有质量可控制的优点。本条文规定了超高性能混凝土干混料供应的注意事项，为干混料生产企业提供建议和便于现场施工企业使用。

9.4.3 采用原材料供应方式时，超高性能混凝土原材料的质量要求应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）的规定。

9.4.4 超高性能混凝土干混料在储存过程中不应受潮和混入杂物，并应符合下列规定：

1 不同品种、规格型号和批号的超高性能混凝土干混料应分别储存，不应混杂，且宜先存先用。

2 袋装超高性能混凝土干混料应储存于干燥环境中，应有防雨、防潮、防扬尘措施。储存过程中，包装袋不应破损。

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

9.4.5 外加剂应按品种和生产厂家分别标识和贮存。粉状外加剂应防止受潮结块，如有结块，应进行检验，合格者应经粉碎至全部通过 600 μm 筛孔后方可使用。液态外

加剂应贮存在密闭容器内，并应防晒和防冻。如有沉淀等异常现象，应检验合格后方可使用。

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

9.4.7 纤维应按品种、规格和生产厂家分别标识和贮存，并应防潮、防锈。

9.4.8 超高性能混凝土原材料和干混料的计量应符合下列规定：

- 1 固体原材料、干混料应按质量计量，水和液体外加剂可按体积计量。
- 2 原材料计量应采用电子计量设备。计量设备的精度应符合要求，计量应准确。计量设备应定期标定，迁移后应重新进行标定。
- 3 原材料的计量允许偏差不应大于表 9.4.8 规定的范围。

表 9.4.8 超高性能混凝土原材料计量允许偏差

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

9.4.9 超高性能混凝土应就近生产，并应符合下列规定：

- 1 搅和前，应检查搅拌设备状态，并应严格按施工配合比或干混料使用说明书进行拌和。
- 2 应使用强制式搅拌设备，宜优选超高性能混凝土专用搅拌设备，搅拌设备的生产能力应保证超高性能混凝土的连续浇筑。
- 3 采用干混料供应方式时，应根据产品使用说明书的要求进行搅拌。若无规定，投入干混料、加水和液体外加剂后的搅拌时间不得少于 4min，且同一包装的干混料应一次搅拌完成，不得分盘搅拌。
- 4 采用原材料供应方式时，应确保固态原材料干拌均匀，宜通过试验确定投料顺序、数量及分段搅拌时间等工艺参数。

5 搅拌应保证拌合物质量均匀。钢纤维单独掺加时，混凝土搅拌机的下料装置上应有防止钢纤维结团的装置，出机拌合物中钢纤维不得结团。超高性能混凝土的均质性除应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的规定之外，尚应对每一工作班或单元结构物的超高性能混凝土中钢纤维含量随机进行检测，同一工作班或单元结构物的钢纤维含量两次测值的相对误差不应大于 5%，检测方法应符合现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》（JGJ/T 221）的规定。

6 搅拌结束后，应及时清洗搅拌设备。

条文说明

一般情况下，超高性能混凝土应优先采用具有自动计量系统的搅拌设备生产。对于野外少量超高性能混凝土情况，采用现场搅拌方式生产时但应严格控制原材料的计量精度。

2 超高性能混凝土的原材料种类多、用量相差较大，用水量小，对搅拌要求较高，应使用强制式搅拌设备。钢纤维随机连续分布对超高性能混凝土受力性能十分重要，宜一次连续浇筑完成，不宜设置施工缝，因此要求搅拌设备的生产能力能确保现场连续浇筑。

3 干混料生产过程中，同一包装的原材料都是单独计量、生产并包装；如分盘搅拌，可能会因为干混料内原材料分布不均影响配合比。

5 通过控制两次随机检测钢纤维含量的相对误差，以控制超高性能混凝土中纤维搅拌均匀。构件厚度或高度较大时，可对构件不同厚度或高度处的超高性能混凝土拌合物的钢纤维含量的相对误差进行检测，以控制钢纤维下沉对超高性能混凝土性能的影响。

9.4.10 超高性能混凝土运输宜采用搅拌运输车，并应符合下列规定：

1 混凝土搅拌车的运输能力应与搅拌设备生产能力、现场浇筑能力相匹配。

2 接料前应确保混凝土搅拌车罐已清洗干净，并排净罐内的积水，接料后严禁向搅拌车罐内的超高性能混凝土加水。

3 在运输途中及等候卸料时，应保持混凝土搅拌车罐体正常转速，不得停转。

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

5 超高性能混凝土拌合物在混凝土搅拌运输车内的时间不宜超过 90min。

6 对于寒冷、严寒或炎热的气候情况，混凝土搅拌运输车应有保温或隔热措施。

条文说明

超高性能混凝土的运输能力应与其凝结速度和浇筑速度相匹配，应使浇筑工作不间断且混凝土运到浇筑地点时仍能保持其均匀性及适宜浇筑的坍落度。

1 搅拌车运输能力应确保现场超高性能混凝土浇筑的连续性。

2 超高性能混凝土水胶比低，其性能受用水量的变化敏感。搅拌车罐内积水或接料后加水均会改变超高性能混凝土配比，影响其力学性能。

5 运输时间过长，超高性能混凝土拌合物的流动性降低过多，会影响浇筑的工作性。

9.4.11 在条件允许时可采用泵送方式输送，并应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的规定。

9.4.12 若采用吊斗或其他方式运输时，应保证超高性能混凝土的连续浇筑。

9.4.13 超高性能混凝土拌合物浇筑应保证纤维分布的均匀性和结构的整体性，并应符合下列规定：

1 浇筑前应检查模板、钢筋以及保护层厚度、预埋件位置、尺寸，确认无误后，方可进行浇筑。

2 超高性能混凝土拌合物宜采用平板振捣或模外振捣器振捣成型。

3 超高性能混凝土拌合物的自由下落高度不应超过 1.5m。当倾落高度大于 1.5m 时，应加串筒、斜槽、溜管等辅助工具。

条文说明

2 所采用的振捣机械和振捣方法除应保证密实外，尚应避免过振、拌合物离析、分层以及纤维露出构件表面。机械振捣易使超高性能混凝土均匀和密实，但振动时间过长易使超高性能混凝土产生离析和分层。钢纤维露出超高性能混凝土表面影响美观，应该避免。对于竖向结构，可将模板修成圆角，采用模板附着式振动器进行振动；对于上表面面积较大的平面结构，可采用平板式振动器进行振动，再用表面带凸棱的金属圆辊将竖起的钢纤维压下，然后用金属圆辊将表面滚压平整，待超高性能混凝土表面无泌水时，可用金属抹刀抹平。

3 由于钢纤维材质密度大,超高性能混凝土拌合物浇筑倾落时自由高度过高易导致离析或纤维结团,应予以注意。

9.4.14 超高性能混凝土应由一端开始均匀连续浇筑,自由流淌的水平距离不宜超过 3m。

条文说明

自由流动距离或通过振捣使超高性能混凝土流动距离太大,会影响钢纤维的分布。

9.4.15 浇筑箱形梁、槽形梁或其他异形构件时,超高性能混凝土工作性能等级宜高于 USF2 级。

条文说明

采用自密实超高性能混凝土,可有效减少异形构件底板或转角处气泡、蜂窝等施工缺陷。

9.4.16 预制超高性能混凝土桥面板养护应采用热养护,包括浇筑后的保湿养护和终凝后的热养护。

9.4.17 超高性能混凝土浇筑完成后,应及时进行保湿养护(静停),并应符合下列规定:

- 1 宜采用适宜的材料进行覆盖、保湿养护,并采取必要防风稳固措施。
- 2 保湿养护时间不宜少于 24h。
- 3 应控制养生水温与超高性能混凝土表面的温差不大于 15℃。
- 4 在同条件养护试件的抗压强度达到 40MPa 后方可拆模。

9.4.18 超高性能混凝土构件拆模后应及时进行热养护,并应符合下列规定:

1 保湿养护与热养护时间间隔不宜大于 7d,间隔期间应做好超高性能混凝土构件的防晒、防雨措施。

2 热养护过程宜分为升温、恒温 and 降温 3 个阶段,宜采用温度自动控制系统对热养护环境温度进行控制,相对湿度不宜低于 95%。

3 热养护恒温阶段的养护温度和时间宜通过工艺试验确定。若未开展工艺试验时,

养护温度恒定在 90℃及以上时，养护时间不应少于 48h；养护温度恒定在 80℃及以上时，养护时间不应少于 72h。

4 热养护升温阶段的升温速度不应大于 12℃/h，降温阶段应以不大于 15℃/h 的降温速度将养护温度逐渐降至环境气温。

条文说明

超高性能混凝土热养护一般包括浇筑超高性能混凝土后的保湿养护与超高性能混凝土终凝后的热养护。

1 保湿养护过程中，应加强巡查力度，发现有缺水部位时，应及时补水养护；发现养护膜有被风掀起或吹破的情况，应重新洒水，并恢复覆盖。

2 热养护可通过蒸汽锅炉、蒸汽管道和热养护棚等设施实现。热养护过程一般分为升温、恒温、降温三个阶段。

9.4.19 采用常温养护时，宜通过材料适应性和工艺适应性试验确定养护条件，且应符合下列规定：

1 超高性能混凝土浇筑完成后，应及时覆盖适宜的材料进行保湿养护，养护时间不得少于 7d。

2 应采取必要措施防止出现收缩裂缝。同条件养护试件的抗压强度达到 40MPa 后方可拆模。

3 养护时环境平均温度宜高于 10℃，当环境平均气温连续 5d 低于 5℃时，应按冬期施工过程处理，采取必要的保温措施。

条文说明

超高性能混凝土现场浇筑完成后，保湿养护 7d 以上，以尽量提高超高性能混凝土的胶凝材料水化程度。

9.5 钢-超高性能混凝土组合梁预制安装

9.5.1 组合梁预制、存放场地宜选择坚实地基，对软质地基应进行加固，并应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定。

9.5.2 超高性能混凝土桥面板混凝土的搅拌、运输、浇筑、养护应符合本规程 9.4 节的规定，并应符合下列规定：

1 侧模上应开有钢筋定位槽口。侧模制作安装精度：对角线长度允许偏差应为 ± 3 mm，钢筋预留槽位置允许偏差应为 ± 3 mm。

2 桥面板浇筑完成后，超高性能混凝土表面应整平、收浆，并及时采用塑料薄膜覆盖进行保湿养护。

3 超高性能混凝土桥面板的制作偏差：长宽尺寸允许偏差应为 ± 3 mm，厚度允许偏差应为 ± 5 mm；连接钢筋预埋位置允许偏差应为 ± 5 mm。桥面沿板长方向支承面平整度应控制在 2 m 范围内小于 2 mm。

9.5.3 钢-超高性能混凝土组合梁的堆放、运输应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的相关规定。

9.5.4 钢-超高性能混凝土组合梁的整跨安装应满足下列要求：

- 1 梁体吊装前应做好专项方案，并进行吊装工况下结构应力验算。
- 2 吊点应设置在支承线或横隔板的位置，梁上吊点以 4 个为宜。
- 3 超高性能混凝土桥面板浇筑前应在梁体内设置吊点连接设施，并能保证较大集中荷载的传递。
- 4 可设置吊具减小吊装荷载产生的水平力，吊装过程中应避免碰撞湿接缝钢筋。
- 5 严格控制其平面精度和高程，钢梁与理论位置的允许偏差应为 ± 5 mm。

9.5.5 钢-超高性能混凝土组合梁的先简支后连续施工应满足下列要求：

- 1 先简支安装的梁应设置临时支座进行支承。
- 2 简支变连续施工程序应符合设计规定，且应在一联梁全部安装完成后方可进行湿接缝超高性能混凝土的浇筑。
- 3 湿接缝的施工应符合本规程 9.6 节的规定，且湿接缝的混凝土宜在一天中气温相对较低的时段浇筑，且一联中的全部湿接缝应连续浇筑完成。
- 4 湿接缝达到规定强度后，可拆除临时支座，按设计规定的顺序完成体系转换。同一片梁的临时支座应同时拆除。

9.6 超高性能混凝土现浇湿接缝施工

9.6.1 超高性能混凝土现浇湿接缝施工包括超高性能混凝土桥面板纵向湿接缝和组合梁墩顶负弯矩区横向湿接缝两大类，湿接缝的浇筑顺序应符合设计要求。

9.6.2 湿接缝施工应符合下列规定：

1 湿接缝用超高性能混凝土宜采用补偿收缩型超高性能混凝土，且拌合物性能等级宜为 USF3 级及以上。

2 施工前应将浇筑超高性能混凝土范围内的梁板表层超高性能混凝土凿去 2~5 mm，清洗干净，保持表面润湿，并不得有积水。

3 湿接缝处的模板应具有足够的强度和刚度，与梁（板）体的接触面应密贴并具有一定的搭接长度，各接缝应严密不漏浆，模板周围宜采用高强止浆橡胶条止浆。

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

5 湿接缝浇筑完毕后，应尽早覆盖保湿薄膜，宜保湿养护 7d 以上，并采取必要措施防止出现收缩裂缝。超高性能混凝土抗压强度达到设计强度的 85% 以后，组合梁方可进行体系转换。

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

10. 检验与验收

10.1 一般规定

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

10.1.2 分项工程质量应在符合下列规定的前提下，方可进行检验评定：

1 所使用的原材料、半成品、成品及施工控制要点等符合设计和规范要求的规定，检验结果应经监理工程师检查认可。

2 无外观质量限制缺陷且质量保证资料真实、齐全。

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

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

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

10.2 桥梁总体

10.2.1 桥梁总体的基本要求和外观质量应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定。

10.2.2 桥梁实测允许偏差应符合表 10.2.2 的规定。

表 10.2.2 桥梁实体检测允许偏差及检验方法

项次	项目		允许偏差 (mm)	检验方法和频率
1	桥梁中线偏位		≤ 20	全站仪：每 50m 测 1 点，且不少于 5 点
2	桥面宽 (mm)	车行道	± 10	尺量：每 50m 测 1 个断面，且不少于 5 个断面
		人行道	± 10	
3	桥长 (mm)		+300、-100	全站仪或钢尺：检查中心处
4	桥面高程 (mm)	$L < 50m$	± 30	水准仪：桥面每侧 50m 测 1 点，且不少于 3 点；跨中、桥墩（台）处应布置测点
		$L \geq 50m$	$\pm (L/5000+15)$	

10.3 钢梁工程

10.3.1 钢梁制造和安装的基本要求和外观质量应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定。

10.3.2 钢梁制造和安装的实测项目应符合表 10.3.2-1 和表 10.3.2-2 的规定。

表 10.3.2-1 钢板梁制作实测项目

项次	检查项目			规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	梁高（mm）	梁高≤2 m		±2	钢尺：测两端腹板处高度
		横梁		±1.5	
		纵梁		±1.0	
2	跨度（mm）			±8	钢尺：测两支承中心距离
3	梁长（mm）	全长		±15	钢尺：测中心线处
		纵梁		+0.5, -1.5	
		横梁		±1.5	
4	纵、横梁旁弯（mm）			≤3	梁立置时在腹板一侧距主焊缝 100mm 处拉线测量：测中部、四分点 3 处
5	拱度（mm）	主梁	不设预拱度	+3, 0	梁卧置时在下盖板外侧拉线测量：测中部、四分点 3 处
			设预拱度	+10, -3	
		两片主梁拱度差		≤4	分别测两片主梁拱度，求差值
6	平面度（mm）	主梁腹板		≤h/350,且≤8	平尺及塞尺：测 3 处
		纵、横梁腹板		≤h/500,且≤5	
7	主梁、纵横梁盖板对腹板的垂直度（mm）	有孔部位		盖板宽度≤600 mm 时≤0.5, 其他≤1.0	角尺及塞尺：测 5 处
		其余部位		≤1.5	

8	焊缝尺寸	满足设计要求	量规：检查全部，每条焊缝检查 3 处
9	焊缝探伤		超声法：检查全部 射线法：按设计要求；设计未要求时按 10%抽查，且不少于 3 条
10	高强螺栓扭矩	$\pm 10\%$	扭矩扳手：检查 5%，且不少于 2 个

注：h 为腹板高，以 mm 计。

表 10.3.2-2 钢梁安装实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	轴线偏位 (mm)	钢梁纵轴线	≤10	全站仪：每跨测 3 处
		两跨相邻端横梁中 线相对偏位	≤5	尺量：测各相邻端横梁
2	高程(mm)	墩台处	±10	水准仪：每墩台测 3 处
		两跨相邻端横梁相 对高差	≤5	水准仪、尺量：测各相邻端横梁
3	固定支座处支承 中心偏位 (mm)	简支梁	≤10	尺量：测每固定支座
		连续梁	≤20	
4	焊缝尺寸		满足设计要求	量规：检查全部，每条焊缝检查 3 处
5	焊缝探伤			超声法：检查全部 射线法：按设计要求；设计未要求时按 10%抽查，且不少于 3 条
6	高强螺栓扭矩		±10%	扭矩扳手：检查 5%，且不少于 2 个

10.3.3 钢梁防护的基本要求、实测项目和外观质量应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 的相关规定。

10.3.4 焊钉焊接的基本要求如下：

- 1 同一工程、同一原材料来源的焊钉，按照国家标准频率进行检验。
- 2 焊钉和瓷环应符合设计要求和国家现行标准。
- 3 焊钉焊接应按有关技术要求和操作规程实施。
- 4 焊钉焊接位置应准确，焊缝饱满，钉身竖直。
- 5 当焊钉的设计位置与钢主梁拼接焊缝位置冲突时，应将焊钉偏离焊缝位置 2-3

cm。

6 个别焊钉的焊接质量不满足要求时，应锤除焊钉，并在原位置附近重新焊接焊钉。

10.3.5 焊钉焊接质量检验：

1 实测项目见表 10.3.5。

表 10.3.5 焊钉焊接实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率	要求
1	焊钉高度	$\leq 3\text{ mm}$	钢尺测量，每 50 m^2 检测 1 处	按设计图纸
2	焊钉倾角	$\leq 5^\circ$	钢尺及量角器测量，每 50 m^2 检测 1 处	90°
3	焊钉间距	$\leq 10\text{ mm}$	钢尺测量，每 50 m^2 检测 1 处	按设计图纸
4	焊缝可靠性	$\leq 5\%$	重锤平击钉帽，每 50 m^2 检测 1 处	97.5%

2 外观鉴定

- 1) 焊钉应位置准确、整齐，无明显错位。
- 2) 焊钉保持竖直，无明显倾角。
- 3) 焊缝外形应饱满，无气孔、夹渣、裂纹等明显缺陷。

10.4 模板、支架

10.4.1 模板、支架的制作和安装应符合下列基本要求：

- 1 应符合施工设计图（施工方案）的规定。
- 2 模板、支架应稳固牢靠，接缝严密，不得漏浆。
- 3 模板与混凝土接触面必须清理干净并涂刷隔离剂。
- 4 立柱基础有足够的支撑面和排水、防冻融措施。

10.4.2 模板制作允许偏差及检验方法应符合表 规定。

表 10.4.2 模板制作允许偏差及检验方法

项次	项目			允许偏差	检验方法和频率
1	钢模	外形尺寸	模板的长度和宽度	0, -1	尺量：每个构件长、宽、高各测 1 点
		(mm)	肋高	± 5	

2	板	面板端偏斜（mm）		0.5	尺量：每个构件测 2 点
3		连接配件 （螺栓、卡 子等）的孔 眼位置 （mm）	孔中心与板面的间距	±0.3	尺量：每个配件测 1 点
			板端孔中心与板端的间距	0， -0.5	
			沿板长度方向的孔	±0.6	
4		板面局部不平（mm）		1.0	2m 直尺和塞尺量：每构件测 4 处
5	板面和板侧挠度（mm）		±1.0	水准仪和拉线量：每构件测 1 处	

10.4.3 模板、支架安装允许偏差及检验方法应符合表 规定。

表 10.4.3 模板、支架安装允许偏差及检验方法

项次	项目			允许偏差（mm）	检查方法和频率
1	模板高程			±5	水准仪：每个构件测 1 处
2	模板尺寸			+5, -0	尺量：每个构件长、宽、高各测 1 点
3	轴线偏位	梁	5	经纬仪：每个构件纵、横向各测 1 点	
		悬浇各梁段	5		
		横隔梁	3		
4	支承面高程			+2, -5	水准仪：每个支承面测 1 点
5	相邻两板表面高低差			2	钢板尺和塞尺：测每相邻梁、板高差最大处
6	表面平整度			3	2m 直尺：沿梁长方形每侧面每 10m 梁长测 1 处×2 尺
7	垂直度			H/1000, 且≤3	经纬仪或垂线测量：每个节段
8	预埋件	支座板、锚垫板、 连接板等	位置	5	尺量：每个预埋件
			平面高差	2	水准仪：每个预埋件
		螺栓、锚筋等	位置	3	尺量：每个预埋件
			外露长度	±5	
9	预留孔洞	预应力筋孔道位置（梁端）		5	尺量：每个预埋件
		其他	位置	8	尺量：每个预埋件
			孔径	+10, 0	内卡尺量：每个预埋件
10	梁底模拱度			+5, -2	沿底模全长拉线，用钢尺量

11	侧向 弯曲	板	$L/1500$	沿侧模全长拉线，用钢尺量
		梁	$L/2000$ ，且不大于 10	
12	支架	纵轴线的平面偏位	$L/2000$ ，且不大于 30	经纬仪：每梁测量

注：1 L 为计算长度（mm）；

2 支承面高程系指模板底模上表面支撑混凝土面的高程；

3 H 为节段高度（mm）。

10.4.4 模板、支架的制作和安装的外观质量应符合下列规定：

- 1 混凝土浇筑前，模板内无积水和杂物。
- 2 模板与混凝土的接触面应平整、清洁。
- 3 固定在模板上的预埋件、预留孔和预留洞不得遗漏，且应安装牢固。

10.5 钢筋

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

10.5.2 钢筋加工和安装的实测项目应满足表 ~表 的规定。

表 10.5.2-1 钢筋加工实测项目

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

表 10.5.2-2 钢筋安装实测项目

项次	项目		允许偏差	检验方法和频率
1	受力钢筋 间距 (mm)	两排以上排距	± 5	尺量：长度 $\leq 20\text{m}$ 时，每个构件检查 2 个断面；长度 $> 20\text{m}$ 时，每个构件检查 3 个断面
		同排	梁	
			板	

2	箍筋、横向水平钢筋、螺旋筋间距 (mm)		±10	尺量：每构件测 10 个间距
3	钢筋骨架尺寸 (mm)	长	±10	尺量：按骨架总数 30%抽检
		宽、高或直径	±5	
4	弯起钢筋位置 (mm)		±20	尺量：每骨架抽查 30%
5	保护层厚度 (mm)	梁	±4	尺量：每构件各立模板面每 3m ² 检查 1 处，且每侧面不少于 5 处
		板	±3	

表 10.5.2-3 钢筋网实测项目

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

条文说明

与普通钢筋混凝土板件相比，钢筋超高性能混凝土板件更加轻薄，因此在现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 基础上，提高了钢筋保护层厚度、钢筋网安装位置的要求。

10.6 超高性能混凝土材料

10.6.1 进场检验

1) 采用原材料供应方式时，原材料的质量要求应符合本规范规定，且在进场时应按本规范附录 F 对原材料的性能和质量进行检验，经进场检验合格后方可使用。

2) 采用干混料供应方式时，应按本规范附录 F 对干混料的性能和质量进行检验，经进场检验合格后方可使用。

10.6.2 超高性能混凝土材料应符合下列要求：

1 基本要求

- 1) 超高性能混凝土原材料的质量要求应符合本规程的要求。
- 2) 超高性能混凝土采用原材料供应方式时, 超高性能混凝土的配合比应符合本规范的规定。
- 3) 超高性能混凝土采用干混料供应方式时, 超高性能混凝土的配合比除应符合本规范规定, 尚宜符合厂家的使用说明。

2 实测项目应符合表 10.6.2 的规定:

表 10.6.2 超高性能混凝土材料的实测项目

项次	项目	规定值	检验方法和频率
1	坍落扩展度 (mm)	在合格标准内	《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420): 每 50m ³ 检验一次、每个工班检验一次
2	抗压强度	在合格标准内	附录 D: 每 50 m ³ 检验一次
3	抗弯强度	在合格标准内	附录 D: 每 50 m ³ 检验一次
4	轴心抗拉强度	在合格标准内	附录 A: 原材料供应时, 每 200m ³ 检验一次; 干混料供应时, 应符合设计要求或供需双方约定, 设计或供需双方未规定时每座桥不少于 1 次
5	轴拉性能分级	在合格标准内	附录 A: 原材料供应时, 每 200m ³ 检验一次; 干混料供应时, 应符合设计要求或供需双方约定, 设计或供需双方未规定时每座桥不少于 1 次

3 外观质量:

- 1) 养护结束后, 超高性能混凝土应均匀完好, 且目视观测超高性能混凝土表面无收缩裂缝。
- 2) 混凝土层边角处、不同浇筑时期接缝处等位置应衔接良好, 无脱空、台阶现象。
- 3) 接缝区域先浇段超高性能混凝土侧面凿毛处理后, 表面粗糙, 断面上有大量钢纤维裸露在外。

10.7 钢-超高性能混凝土组合梁预制安装

10.7.1 钢-超高性能混凝土组合梁预制安装的基本要求:

- 1 钢梁制造和安装的基本要求应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准

第一册 土建工程》(JTG F80/1) 的相关规定。

2 在吊移出预制底座时, 超高性能混凝土强度不得低于设计所要求的吊装强度, 预制件不得受到损伤; 在安装时, 支承结构(墩台、盖梁、垫石)的强度应满足设计要求。

3 安装前, 预制钢-超高性能混凝土组合梁应检验合格, 墩、台支座垫板应稳固; 就位后, 预制组合梁两端支座应对位, 梁底与支座以及支座底与垫石顶应密贴, 临时支撑应稳固。

10.7.2 钢-超高性能混凝土组合梁预制安装的实测项目应满足的要求:

- 1 钢梁制造的实测项目应符合表 10.3.2-1 的规定。
- 2 超高性能混凝土桥面板预制的实测项目应符合表 10.7.2-1 的规定。
- 3 钢-超高性能混凝土组合梁安装的实测项目应同时符合表 和表 10.7.1-2 的规定。

表 10.7.2-1 预制超高性能混凝土桥面板的实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率
1	板长度 (mm)	$\pm 3, 0.1\%$	尺量: 每板顶面中线、底面两侧
2	宽度 (mm)	$\pm 3, 0.1\%$	尺量: 每板测 3 个断面
3	厚度 (mm)	0, +3	
4	平整度 (mm)	≤ 2	用 2m 直尺: 沿板长方向每侧面每 2m 板长测 1 处 $\times 2$ 尺
5	预埋件位置 (mm)	± 4	尺量: 每板测 3 个断面
6	超高性能混凝土板 总层厚 (mm)	≤ 3	浇筑过程中, 将直钢丝插入到超高性能混凝土的底部, 以直尺测量钢丝的浸润深度, 每 40 m ² 检测 1 处
7	净保护层厚度 (mm)	≤ 2	浇筑过程中, 将直钢丝插入到焊钉顶部或钢筋便于, 以直尺测量钢丝的浸润深度, 每 40 m ² 检测 1 处

表 10.7.1-2 预制钢-超高性能混凝土组合梁安装实测项目

项次	项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	支承中心偏位 (mm)	梁	≤ 5	尺量: 每跨测 6 个支承处, 不足 6 个时全测
		板	≤ 10	
2	梁、板顶面高程 (mm)		± 8	水准仪: 每跨测 5 处, 跨中、桥

				墩（台）处应布置测点
3	相邻梁、板顶面高差（mm）	$L \leq 40\text{m}$	≤ 8	尺量：测每相邻梁、板高差最大处
		$L > 40\text{m}$	≤ 12	
4	轴线偏位（mm）		≤ 5	全站仪：每跨测 3 处

10.7.3 钢-超高性能混凝土组合梁预制安装的外观质量应符合现行行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1）的相关规定。

10.8 超高性能混凝土现浇湿接缝

10.8.1 超高性能混凝土现浇湿接缝浇筑时的基本要求如下：

- 1 湿接缝凿毛断面应有大量钢纤维裸露在外，凿毛断面上应保持洁净。
- 2 湿接缝处的模板应具有足够的强度和刚度。
- 3 连接钢筋的设置应符合设计要求。

10.8.2 超高性能混凝土现浇湿接缝的实测项目如表 10.8.2 所示。

表 10.8.2 超高性能混凝土现浇湿接缝实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率
1	湿接缝的长度和宽度 (mm)	$\leq 5^*$	用钢尺量，每处湿接缝检测 3 处
2	相邻两板表面高低差 (mm)	$\leq 3^*$	用钢尺量，每处湿接缝检测 3 处
3	湿接缝高度 (mm)	$\leq 5^*$	浇筑过程中，将直钢丝插入到超高性能混凝土的底部，以直尺测量钢丝的浸润深度，每处湿接缝检测 3 处
4	湿接缝净保护层厚度 (mm)	≤ 4	浇筑过程中，将直钢丝插入到钢筋表面，以直尺测量钢丝的浸润深度，每处湿接缝检测 3 处
5	湿接缝平整度 (mm)	$\leq 5^*$	3 m 铝合金直尺，每处湿接缝检测 3 处

10.8.3 超高性能混凝土湿接缝外观应满足如下要求：

- 1 湿接缝形状与设计一致、无明显高差等。

-
- 2 新-老超高性能混凝土无界面裂缝。

10.9 超高性能混凝土板抛丸糙化处理

10.9.1 超高性能混凝土板表面糙化处理后，其层间抗剪强度和抗拉拔强度应符合设计要求。

10.9.2 采用抛丸法糙化超高性能混凝土板表面时应符合下列规定：

- 1 抛丸施工前应通过试验确定超高性能混凝土板表面的粗糙度指标。
- 2 抛丸施工前应清除超高性能混凝土表面的油渍、锈迹、杂物、积水等杂质，确保桥面干燥、洁净。
- 3 大面积抛丸施工前应通过抛丸工艺试验，确定最佳丸料规格、丸料流量即最佳电机负载、抛丸设备行走速度等关键工艺参数。
- 4 抛丸过程应连续作业，如因特殊原因造成抛丸停机，在下次重抛之前应将机器倒退 30 cm 左右，再重新开始抛丸，待机器行走过去后，应及时检查搭接区域抛丸质量，如有遗漏再进行补抛。
- 5 抛丸施工时，抛丸设备两次施工行车道之间需搭接 1 cm~5 cm 宽度。
- 6 抛丸后应清洗桥面，确保超高性能混凝土板表面具有良好的清洁度，无浮灰、浮浆、碎屑等杂物；并对桥面进行保护，避免二次污染桥面。
- 7 在面层施工前，抛丸施工不宜过早进行。如过早进行，不利于裸露钢纤维的防锈蚀。

附录 A 超高性能混凝土轴拉性能试验方法

A.1 一般规定

A.1.1 本方法适用于测定超高性能混凝土在单轴拉伸试验条件下的弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、极限抗拉强度、极限拉应变。

A.2 试件尺寸和数量

A.2.1 单轴拉伸的试件平面尺寸如图A.2.1所示，厚度可采用50mm或100mm。设计单位或供需双方可根据需要选择单轴拉伸试件的厚度。当超高性能混凝土中钢纤维长度不大于16mm时，宜采用厚度为50mm的试件；当超高性能混凝土中钢纤维长度大于16mm时，宜采用厚度为100mm的试件。不同厚度试件的测试结果在进行合格评定时可不考虑尺寸效应。

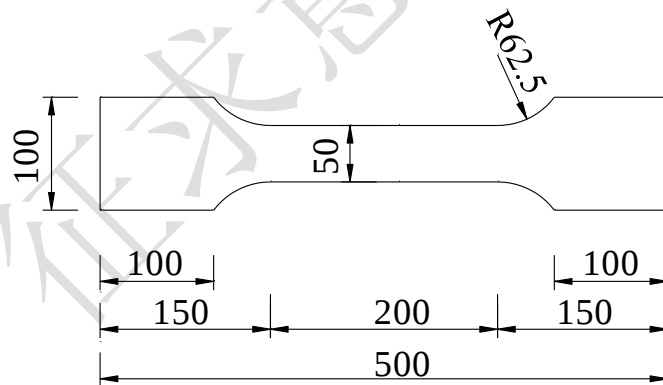


图 A.2.1 单轴拉伸试验的试件尺寸（单位：mm）

A.2.2 每组试件数量为6个。

A.3 试件制作

A.3.1 试件的浇筑和成型应按本规程第9.4节有关规定执行。

A.3.2 宜在试件变截面段侧面粘贴碳纤维布或铝片，亦可采取其他可靠措施强化变截面段受力，且碳纤维布或铝片宜伸入等截面段15mm。

A.3.3 超高性能混凝土构件采用热养护时，超高性能混凝土轴拉试件的养护方式应采取标准热养护方式。公路桥涵超高性能混凝土构件采用自然养护时，超高性能混凝土轴拉试件的试件养护方式应按现行行业标准《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》（JTG 3420）的规定进行标准养护。

A.4 试验仪器设备

A.4.1 拉力试验机的性能要求除应符合现行国家标准《混凝土物理力学性能试验标准》（GB/T 50081）的有关规定，还可按位移控制模式进行加载。

A.4.2 用于微变形测量的仪器装置应符合下列规定：

1 用于微变形测量的仪器宜采用位移传感器，也可采用千分表、激光测长仪、引伸仪等。采用位移传感器或千分表时应备有微变形测量固定架，试件的变形通过微变形测量固定架传递到位移传感器或千分表。采用位移传感器或千分表测量试件变形时，应有数据自动采集系统；条件许可时，可采用荷载和位移数据同步采集系统。

2 当采用位移传感器或千分表时，其测量精度应为 $\pm 0.001\text{ mm}$ ；当采用激光测长仪或引伸仪时，其测量精度应为 $\pm 0.001\%$ 。

3 微变形测量仪的标距宜为 150 mm 。

A.5 试验步骤

A.5.1 到达试验龄期前，将试件在规定试验环境中自然干燥1天后，量测试件等截面区的截面尺寸。试件厚度的取值应取试件不同位置的6个数值的平均值，沿长轴方向每边等间距选取3个位置量测。当实测尺寸与公称尺寸之差不超过 1 mm 时，可按公称尺寸进行计算。试件承压面的不平整度误差不得超过边长的 0.05% ，承压面域相邻面的不垂直度不应超过 $\pm 5^\circ$ 。

A.5.2 将试件放置于试验机上下夹具中，上下夹具连接件应与混凝土试件的中轴线一致并对中。在试件弧形段与夹具接触部位宜放置 $0.5\text{ mm}\sim 1\text{ mm}$ 厚的橡胶垫片或铝垫片。将试件上端与试验机上夹头固定，升降拉力试验机至合适高度，调整试件方向，将试件下端固定。

A.5.3 当采用位移传感器或千分表测量变形时，应将位移传感器或千分表固定在变形测量架，并由标距定位杆进行定位，然后将变形测量架通过紧固螺钉固定在试件中部。

A.5.4 开动试验机进行预拉，预拉荷载相当于弹性极限荷载的15%~20%。预拉时，应测读应变值，计算偏心率，计算方法应符合现行国家标准《混凝土物理力学性能试验标准》（GB/T 50081）的轴向拉伸试验方法。当试件偏心率大于15%时，应对试件重新进行对中调整。

A.5.5 预拉完毕后，应重新调整测量仪器，进行正式测试。拉伸试验时，对试件进行连续、均匀加荷，宜采用位移控制加荷，加荷速率宜取0.2mm/min。当采用位移传感器测量变形时，试件测量标距内的变形应由数据采集系统自动记录，绘制荷载-变形曲线。试件初裂前，数据采样频率不宜小于2 Hz；试件初裂后，数据采样频率不宜小于5 Hz。

A.5.6 当满足下列条件之一时，应终止加载，停止试验：

- 1 试件进入拉伸应变软化阶段后拉应力低于峰值荷载的30%时；
- 2 试件的拉应变达到 10000×10^{-6} 时；
- 3 试件拉断。

A.6 结果计算和确定

A.6.1 弹性极限点的选取应符合下列规定：

- 1 宜取位移传感器和数据采集系统绘制的荷载-变形曲线中，由线性段转为非线性段的点作为弹性极限点。
- 2 当荷载-变形曲线中线性段转为非线性段的点不明显时，可取拉应变为 200×10^{-6} 对应的曲线上的点作为弹性极限点。

A.6.2 极限抗拉点应选取试件拉伸变形达到0.30mm时对应的点。

A.6.3 弹性极限抗拉强度和应变应按式(1)进行计算：

$$f_{te} = \frac{F_A}{b_m h_m} \quad (\text{A.6.3-1})$$

$$\varepsilon_{te} = \frac{l_{te}}{L} \quad (\text{A.6.3-2})$$

式中： f_{te} ——弹性极限抗拉强度（MPa），计算结果精确至 0.01 MPa；

F_A ——弹性极限荷载（N），取弹性极限点处的荷载；

b_m 、 h_m ——轴拉试件中部截面的宽度、厚度（mm）。

ε_{te} ——弹性极限拉应变，计算结果精确至 10×10^{-6} ；

l_{te} ——弹性极限点处拉伸变形（mm）；

L ——测试标距（mm）。

A.6.4 极限抗拉强度和应变应按下式进行计算：

$$f_{tu} = \frac{F_B}{b_m h_m} \quad (\text{A.6.4-1})$$

$$\varepsilon_{tu} = \frac{l_{tu}}{L} \quad (\text{A.6.4-2})$$

式中： f_{tu} ——极限抗拉强度（MPa），计算结果精确至 0.01 MPa；

F_B ——极限抗拉荷载（N），应取极限抗拉点的荷载，即轴拉试验的拉伸变形 0.30mm 时对应的荷载；

ε_{tu} ——极限拉应变，计算结果精确至 10×10^{-6} ；

l_{tu} ——拉伸变形为 0.30mm 处（mm）。

应取轴拉试验过程中最大荷载处拉伸变形，应变软化型超高性能混凝土应取拉伸变形为 0.30mm。

A.6.5 试验结果的处理

1 有效轴拉试件的开裂位置应位于标距内，有效轴拉试件数量不应小于3个。当有效轴拉试件数量小于3个时，该组试件无效，应重新进行试验。

2 根据所有有效轴拉试件测值的平均值确定弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变和极限抗拉强度的最终试验结果，且根据所有有效轴拉试件测值的最小值确定极限拉应变的最终试验结果。

3 超高性能混凝土抗拉强度标准值可按下式确定：

$$f_{tk} = f_{te,m} - tS_n$$

(A.6.5-1)

式中： $f_{te,m}$ ——弹性极限抗拉强度均值（MPa），计算结果精确至 0.01MPa；
 t ——T 检验系数，可按表 A.6.5 规定取值；
 S_n ——n 组试件的标准差（MPa），计算结果精确至 0.01MPa。

表 A.6.5 T 检验系数

试件组数	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...	>30	...	∞
t 值	2.920	2.353	2.132	2.015	1.943	1.895	1.860	1.833	1.812	1.796	...	1.7	...	1.645

附录 B 超高性能混凝土收缩应变和徐变系数计算

B.0.1 超高性能混凝土的收缩应变计算应符合下列规定：

1 采用标准热养护的超高性能混凝土，养护结束后的超高性能混凝土收缩应变可取零。

2 采用标准养护（环境温度 $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于95%）的超高性能混凝土，其收缩应变宜通过试验确定。若无实测数据，标准养护的超高性能混凝土收缩应变可按下列公式计算：

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cs,0} \cdot e^{\frac{c}{\sqrt{t+d}}} \quad (\text{B.0.1})$$

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

$\varepsilon_{cs,0}$ ——名义终极收缩应变，可取 $700\mu\varepsilon$ ；

t ——计算考虑时刻的超高性能混凝土龄期（d）；

c, d ——拟合系数，可取 $c=-2.48$ ， $d=-0.86$ 。

条文说明

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

对比国外各超高性能混凝土指南（规范），并结合国内相关试验资料，给出了第 2 款建议公式。

B.0.2 超高性能混凝土的徐变系数宜通过试验确定。若无实测数据，且超高性能混凝土压应力不大于 $0.4f_{cu,k}$ 时，超高性能混凝土的徐变系数可按下式计算：

$$\phi(t, t_0) = \phi_0(t_{\infty}, t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^a}{(t - t_0)^a + b} \quad (\text{B.0.2})$$

式中: $\phi(t, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 , 计算考虑龄期为 t 时的超高性能混凝土徐变系数;

$\phi_0(t_\infty, t_0)$ ——加载龄期为 t_0 时的超高性能混凝土徐变系数终极值, 可按表 B.0.2 取值;

t ——计算考虑时刻的超高性能混凝土龄期 (d);

t_0 ——加载时超高性能混凝土龄期 (d);

a, b ——拟合系数, 可按表 B.0.2 取值。

表 B.0.2 超高性能混凝土徐变系数终极值和系数 a 、 b 取值表

加载龄期 t_0 (d)	养护制度	徐变系数终极值 $\phi(t_\infty, t_0)$	系数 a	系数 b
4	标准养护	1.2	0.6	3.2
7	标准养护	1.0	0.6	4.5
28	标准养护	0.8	0.6	10
-	标准热养护结束后	0.2	0.6	10

条文说明

普通混凝土结构在长期荷载作用下的徐变效应非常明显, 而超高性能混凝土材料因基体致密和纤维含量较高, 使得其徐变系数远小于普通混凝土和高强混凝土。国内外大量的试验研究表明超高性能混凝土材料的徐变主要受养护条件、加载龄期、持荷时间及加载应力水平等的影响。根据《法国超高性能混凝土结构设计规范 NF P 18-710 2016》规定, 超高性能混凝土材料若未经热养护, 则其徐变类似于高性能混凝土; 但是, 若采用热养护, 则其徐变系数将显著降低。对比国外各超高性能混凝土指南(规范), 并结合国内相关试验资料, 给出了徐变系数建议公式。

超高性能混凝土徐变试验可参考现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082) 执行。

附录 C 超高性能混凝土纤维取向系数的确定方法及取值

C.1 一般规定

C.1.1 超高性能混凝土纤维取向系数宜通过对超高性能混凝土实体模型进行多向切割并开展四点弯曲试验确定。

C.1.2 若无条件，纤维系数可按下列规定取值：（可取整体纤维取向系数 $K_{\text{global}}=1.25$ ，局部纤维取向系数 $K_{\text{local}}=1.75$ 。）

- 1 当 $h \leq 50\text{mm}$ 时， $K_{\text{global}}=1.00$ ， $K_{\text{local}}=1.00$ 。
- 2 当 $h \geq 100\text{mm}$ 时， $K_{\text{global}}=1.25$ ， $K_{\text{local}}=1.75$ 。
- 3 当 $50 < h < 100\text{mm}$ 时，按第1款和第2款规定直线内插取用。

C.2 实体模型与模制试件制作

C.2.1 超高性能混凝土实体模型的厚度应与实际结构保持一致，平面尺寸不宜小于 $500\text{mm} \times 1000\text{mm}$ （可制成3个）。

C.2.2 超高性能混凝土实体模型的浇筑、成型、养护方式应与实际结构保持一致。

C.2.3 模制试件的厚度 h 应与实际结构保持一致，平面尺寸宜为 $1h \times 4h$ 。

C.2.4 模制试件浇筑与成型应符合本规程第9.4节有关规定，养护方式应与实际结构保持一致。

C.3 实体试件切割

C.3.1 超高性能混凝土实体模型的切割试件方向不宜少于两个纤维取向，即平行于超高性能混凝土浇筑方向和垂直于超高性能混凝土浇筑方向。

条文说明

建议根据超高性能混凝土结构中主应力场方向和超高性能混凝土浇筑方向划分实体试件的切割位置和方式。对于以受剪切作用为主的超高性能混凝土结构，建议按照竖

直、水平、45°方向对其进行切割；对于以受弯曲作用为主的超高性能混凝土结构，建议按照横向、纵向对其进行切割。

C.3.2 超高性能混凝土实体模型切割前，应明确切割施工顺序、制定切割施工安全应急预案和环境保护措施、并确定切割区域边界基准。

条文说明

超高性能混凝土实体模型切割的施工安全与环境保护可参考河南省地方标准《混凝土结构物水下切割施工技术规范》（DB41/T 1649）。

C.3.3 采用混凝土切割机对超高性能混凝土实体模型进行多向切割，切割试件应测3个不同位置的断面尺寸，尺寸误差应在±3mm以内；切割试件应测2个不同位置的长度尺寸，尺寸误差应在±10mm以内。

C.4 试验方法

C.4.1 超高性能混凝土切割试件、模制试件的弯拉强度试验应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387的规定。

C.5 结果计算和确定

C.5.1 若试件下边缘断裂位置处于两个集中荷载作用线之间，则试件的弯拉强度应按下式计算：

$$f_{tq} = \frac{F_u L}{bh^2} \quad (C.5.1-1)$$

式中： f_{tq} ——切割试件弯曲强度（MPa），计算结果精确至 0.01MPa；

F_u ——切割试件极限荷载（N）；

b 、 h ——切割试件跨中截面的宽度、高度（mm）；

L ——支座间跨度（mm）。

C.5.2 有效试件的开裂位置应位于两个集中荷载之间，有效试件数量不应少于2个。当有效试件数量少于2个时，该组试件无效，应重新进行试验。

C.5.3 切割试件的弯拉强度应按下式进行修正：

$$f_{fx} = \frac{f_f}{\lambda} \quad (\text{C.5.3-1})$$

$$\lambda = \begin{cases} 1 + \frac{(b+h-l_f)}{10bh} & \text{模制试件} \\ 1 + \frac{(b-5h+5l_f)l_f}{10bh} & \text{切割试件} \end{cases} \quad (\text{C.5.3-2})$$

式中： f_{fx} ——切割试件的修正弯拉强度（MPa），计算结果精确至 0.01MPa；
 f_f ——试件的弯拉强度实测值（MPa），计算结果精确至 0.01MPa；
 λ ——截面弯拉强度修正系数。

条文说明

已有研究表明，试件的模板面、切割面、浇筑面可能会影响试件边缘钢纤维的取向或者锚固效率，对其进行修正是必要的。

C.5.4 纤维取向系数应按下列公式计算

$$\text{整体纤维取向系数} \quad K_{\text{global}} = \frac{f_{\text{fm},m}}{f_{\text{fqx},m}} \quad (\text{C.5.4-1})$$

$$\text{整体纤维取向系数} \quad K_{\text{local}} = \frac{f_{\text{fm},m}}{f_{\text{fqx},\min}} \quad (\text{C.5.5-2})$$

式中： K_{global} ——整体纤维取向系数， $1.0 \leq K_{\text{global}} \leq 2.0$ ；
 K_{local} ——局部纤维取向系数， $1.0 \leq K_{\text{local}} \leq 2.5$ ；
 $f_{\text{fm},m}$ ——模制试件的弯曲强度平均值（MPa）；
 $f_{\text{fqx},m}$ ——切割试件的修正弯曲强度平均值（MPa）；
 $f_{\text{fqx},\min}$ ——切割试件的修正弯曲强度最小值（MPa）。

附录 D 超高性能混凝土抗压、抗弯、轴拉强度及性能评定

D.0.1 超高性能混凝土的抗压强度、弯拉强度、轴拉强度和轴拉性能应分批进行检验评定。一个检验批的超高性能混凝土应由力学性能等级相同、试验龄期相同、生产工艺条件和配合比基本相同的超高性能混凝土组成。

D.0.2 采用标准热养护的超高性能混凝土试件应在养护结束后7d进行试验；采用《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》JTG 3420规定的标准养护的超高性能混凝土试件应在成型后28d时进行试验。

D.0.3 超高性能混凝土的取样、抗压强度试验、弯拉强度试验应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387的规定。

D.0.4 超高性能混凝土的轴心抗拉强度试验应符合本规程附录A的规定。

D.0.5 超高性能混凝土抗压强度的合格判定应符合下列规定：

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

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

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

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

S_n ——同批试件强度的标准差（MPa），精确到 0.01MPa，当时

$S_n < 2.5\text{MPa}$ 时，取 $S_n = 2.5\text{MPa}$ ；

$f_{cu,k}$ ——超高性能混凝土设计抗压强度（MPa）；

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

2 同批试件组数小于 10 组时，可用非数理统计方法评定，并满足下述条件：

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

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

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

$f_{cu,k}$ ——超高性能混凝土设计抗压强度（MPa）；

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

D.0.6 超高性能混凝土弯拉强度的合格判定应满足下述条件：

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

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

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

$f_{t,k}$ ——超高性能混凝土设计抗弯、抗拉强度（MPa）；

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

D.0.7 超高性能混凝土轴心抗拉强度的合格判定应满足下述条件：

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

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

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

$f_{t,k}$ ——超高性能混凝土设计抗拉强度（MPa）；

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

D.0.8 同批试件的超高性能混凝土轴拉性能指标 f_{te} / f_{tk} 、 f_{tu} / f_{te} 、 f_{tu} / f_{tk} 和 ε_{tu} 应符合本规范表3.1.6的规定，则评定为轴拉性能分级合格；若有一项性能不满足要求，则评定为不合格。

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

附录 E 超高性能混凝土收缩试验方法

E.0.1 本方法适用于测定在无约束和规定的温湿度条件下硬化超高性能混凝土试件的收缩变形。

E.0.2 超高性能混凝土的收缩试验应采用尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 515\text{mm}$ 的棱柱体试件，每组应为 3 个试件。

E.0.3 收缩试验的试验设备应符合下列规定：

1 测量超高性能混凝土收缩变形的装置应具有硬钢或石英玻璃制作的标准杆，并应在测量前及测量过程中及时校核仪表的读数。

2 收缩测量装置可采用下列形式之一：

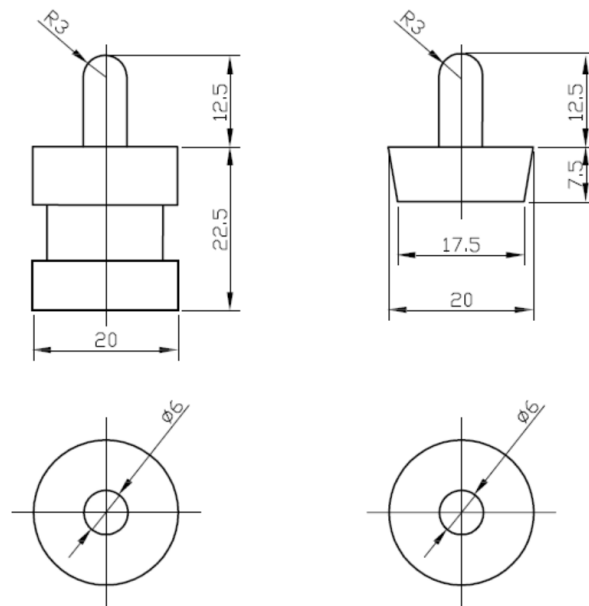
1) 卧式混凝土收缩仪的测量标距应为 540mm ，并应装有精度为 $\pm 0.001\text{mm}$ 的千分表或测微器。

2) 立式混凝土收缩仪的测量标距和测微器同卧式混凝土收缩仪。

3) 其他形式的变形测量仪表的测量标距不应小于 100mm ，并至少能达到 $\pm 0.001\text{mm}$ 的测量精度。

E.0.4 试件和测头应符合下列规定：

1 采用卧式混凝土收缩仪时，试件两端应预埋测头或留有埋设测头的凹槽。卧式收缩试验用测头（图 E.0.4-1）应由不锈钢或其他不锈的材料制成。



(a) 预埋测头

(b) 后埋测头

图 E.0.4-1 卧式收缩试验用测头

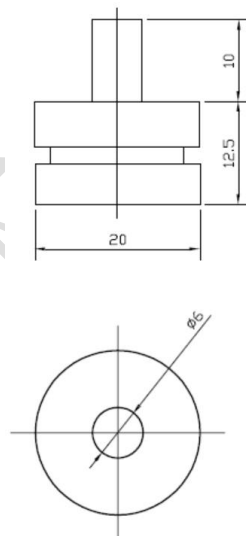


图 E.0.4-2 立式收缩试验用测头

2 采用立式混凝土收缩仪时，试件一端中心应预埋测头（图 E.0.4-2）。立式收缩试验用测头的另外一端宜采用 M20mm×35mm 的螺栓（螺纹通长），并应与立式混凝土收缩仪底座固定。螺栓和测头都应预埋进去。

3 采用接触法引伸仪时，所用试件的长度应至少比仪器的测量标距长出一个截面边长。测头应粘贴在试件两侧面的轴线上。

4 使用混凝土收缩仪时，制作试件的试模应具有能固定测头或预留凹槽的端板。使用接触法引伸仪时，可用一般棱柱体试模制作试件。

5 收缩试件成型时不得使用机油等憎水性脱模剂。试件成型后应带模养护 1d~2d，并保证拆模时不损伤试件。对于事先没有埋设测头的试件，拆模后应立即粘贴或埋设测头。采用标准养护的试件，拆模后应立即送至温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 95% 以上的标准养护室养护。采用热养护的试件，拆模后应立即进行标准热养护。

E.0.5 超高性能混凝土收缩试验应按下列步骤进行：

1 收缩试验应在恒温恒湿环境中进行，室温应保持在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度应保持在 $60\% \pm 5\%$ 。试件应放置在不吸水的搁架上，底面应架空，每个试件之间的间隙应大于 30mm。

2 采用标准养护的超高性能混凝土试件，在试件浇筑成型后应立即放入标准养护室，当超高性能混凝土抗压强度达到 $25\text{MPa} \pm 5\text{MPa}$ 的龄期时，从标准养护室取出，并应立即移入恒温恒湿室内预置 1h，再测定其初始长度，此后应至少按下列规定的时间间隔测量其变形读数：1、3、7、14、28、45、60、90、120、150、180、360d（从移入恒温恒湿室内计时）。

3 采用热养护的超高性能混凝土试件，应在标准热养护结束后移入恒温恒湿室，并在恒温恒湿室内预置 4h，再测其初始值，测量时应记下试件的初始干湿状态。此后应至少按下列规定的时间间隔测量其变形读数：1、3、7、14、28、45、60、90、120、150、180、360d（从测试初长开始计时）。

4 收缩测量前应先用标准杆校正仪表的零点，并应在测定过程中至少再复核 1-2 次，其中一次应在全部试件测读完后进行。当复核时发现零点与原值的偏差超过 $\pm 0.001\text{mm}$ 时，应调零后重新测量。

5 试件每次在卧式收缩仪上放置的位置和方向均应保持一致。试件上应标明相应的方向记号。试件在放置及取出时应轻稳仔细，不得碰撞表架及表杆。当发生碰撞时，应取下试件，并应重新以标准杆复核零点。

6 采用立式混凝土收缩仪时，整套测试装置应放在不易受外部振动影响的地方。读数时宜轻敲仪表或者上下轻轻滑动测头。安装立式混凝土收缩仪的测试台应有减振装

置。

7 用接触法引伸仪测量时，应使每次测量时试件与仪表保持相对固定的位置和方向。每次读数应重复 3 次。

E.0.6 超高性能混凝土收缩试验结果计算和确定应按下列方法进行：

1 超高性能混凝土收缩应按下列公式计算：

$$\varepsilon_{st} = \frac{L_0 - L_t}{L_b} \quad (\text{E.0.6})$$

式中： ε_{st} ——试验期为 t (d) 的超高性能混凝土收缩， t 从测定初始长度时算起；

L_b ——试件的测量标距,用混凝土收缩仪测量时应等于两测头内侧的距离，即等于超高性能混凝土试件长度（不计测头凸出部分）去两个测头埋入深度之和（mm）。采用接触法引伸仪时，即为器的测量标距；

L_0 ——试件长度的初始读数（mm）；

L_t ——试件在试验期为 t (d) 时测得的长度读数（mm）。

2 每组应取 3 个试件收缩的算术平均值作为该组混凝土试件的收缩测定值，计算应精确到 1.0×10^{-6} 。

3 作为相互比较的超高性能混凝土收缩值可取试验期为 90d 所测得的干燥收缩值。

附录 F 超高性能混凝土原材料检验

F.0.1 水泥进场时，应附有生产厂的品质试验检验报告等合格证明文件，并应按批次对同一生产厂、同一品种、同一强度等级及同一出厂日期的水泥进行强度、细度、安定性和凝结时间等性能的检验，散装水泥应以每 500t 为一批，袋装水泥应以每 200t 为一批，不足 500t 或 200t 时，亦按一批计。当对水泥质量有怀疑或受潮或存放时间超过 3 个月时，应重新取样复验，并应按其复验结果使用。水泥的检验试验方法应符合现行行业标准《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》（JTG E30）的规定。

F.0.2 矿物掺合料进场时，应对其品种、技术指标、出厂日期等进行检查，并按批次对同一厂家、同一品种、同一指标、同一批号且连续进场的矿物掺合料按表 F.0.2 的规定进行检验。粉煤灰、石灰石粉不超过 200t 为一批，磨细矿渣、石英粉不超过 300t 为一批，磨细天然沸石、偏高岭土不超过 120t 为一批，硅灰不超过 30t 为一批。不同批次或非连续供应的不足一个检验批量的矿物掺合料应作为一个检验批。

表 F.0.2 矿物掺合料检验内容和方法

掺合料类别	检验内容	检验试验方法
粉煤灰	细度、需水量比、烧失量、三氧化硫含量	《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）：每 200t 检验一次
石灰石粉	碳酸钙含量、细度、活性指数、流动度比、含水量、亚甲基值	《矿物掺合料应用技术规范》（GB/T 51003）：每 200t 检验一次
磨细矿渣	氧化镁含量、三氧化硫含量、烧失量、氯离子含量、含水率、细度、需水量比、活性指数	《高强高性能混凝土用矿物外加剂》（GB/T 18736）：每 300t 检验一次
石英粉	二氧化硅含量、粒级要求、硫化物及硫酸盐含量、云母含量	《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）：每 300t 检验一次
磨细天然沸石	氯离子含量、吸铵值、细度、需水量比、活性指数	《高强高性能混凝土用矿物外加剂》（GB/T 18736）：每 120t 检验一次
偏高岭土	氧化镁含量、三氧化硫含量、烧失量、氯离子含量、二氧化硅含量、三氧化二铝含量、游离氧化钙含量、含水率、细度、需水量比、活性指数	《高强高性能混凝土用矿物外加剂》（GB/T 18736）：每 120t 检验一次
硅灰	比表面积、二氧化硅含量	《高强高性能混凝土用矿物外加剂》（GB/T 18736）：每 30t 检验一次

F.0.3 集料进场时，宜按同产地、同规格、连续进场数量不超过 300m³ 或 450t 为一验收批，小批量进场的宜以不超过 150m³ 或 300t 为一验收批进行检验；检验内容应包括外观、筛分、有害物质含量、含泥量、泥块含量、石粉含量和坚固性等；必要时尚应对氯离子含量、碱活性及放射性等指标进行检验。检验试验方法应符合现行行业标准

《公路工程集料试验规程》(JTG E42) 的规定。

F.0.4 外加剂进场时, 应对其品种、性能、出厂日期等进行检查, 并应按批次对同一厂家、同一等级、同一品种、同一批号且连续进场的外加剂按表 F.0.4 的规定进行检验。外加剂以每 50t 为一批, 不同批次或非连续供应的不足一个检验批量的外加剂应作为一个检验批。

表 F.0.4 外加剂检验内容

掺合料类别	检验内容		检验试验方法
减水剂	减水率、泌水率比、含气量、凝结时间差、抗压强度比、收缩率比		《混凝土外加剂》(GB 8076): 每 50t 检验一次
膨胀剂	细度、凝结时间、限制膨胀率、抗压强度		《混凝土膨胀剂》(GB/T 23439): 每 50t 检验一次
减缩剂	均匀性	外观	目测: 每 50t 检验一次
		密度、氯离子含量、总碱量	《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T 8077): 每 50t 检验一次
	掺减缩剂的超高性能混凝土性能	减水率	《混凝土外加剂》(GB 8076): 每 50t 检验一次
		凝结时间差	
		含气量	
		抗压强度比	
		减缩率	

F.0.5 钢纤维进场时, 应附有生产厂的品质试验检验报告等合格证明文件, 并应按批次对同一生产厂、同一品种和同一规格的钢纤维进行抗拉强度、长度、直径、形状合格率和杂质含量等性能的检验, 应按每 20t 为一个检验批。不同批次或非连续供应的不足一个检验批量的钢纤维应作为一个检验批。检验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。

F.0.6 采用饮用水时, 超高性能混凝土用水可不检验; 当采用其他水源或对水质有疑问时, 应对同一水源检查不少于一次, 检验内容应包括 pH 值、不溶物含量、可溶物含量、氯化物含量、硫酸盐含量、碱含量等。检验试验方法应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650) 的规定。

F.0.7 超高性能混凝土干混料进场时, 应检查进场干混料的产品使用说明和型式检验报告, 应按表 F.0.7 的规定对干混料按配合比拌制而成的超高性能混凝土性能和质量进行检验。同生产厂家、同批号、同品种、同强度等级、同出厂日期且连续进场的干混

料，检验批量不应大于 200t。不同批次或非连续供应的不足一个检验批量的超高性能混凝土干混料应作为一个检验批。

表 F.0.7 超高性能混凝土干混料的进场检验项目

项次	项目		规定值或允许偏差	检验方法和频率
1	外观要求		包装完好、干燥、均匀和无结块	目测：每 200t 检验一次
2	坍落扩展度		在合格标准内	《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420)：每 200t 检验一次
3*	力学性能	抗压强度	在合格标准内	附录 D：每 200t 检验一次
		抗弯强度	在合格标准内	
		轴心抗拉强度	在合格标准内	附录 A：每 200t 检验一次
		轴拉性能分级	在合格标准内	
4**	钢纤维	外观	均匀分散，无纤维结团和锈蚀现象	《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)：每 200t 检验一次
		直径合格率 (%)	≥90	
		重量合格率 (%)	≥85 单纤维检验	
			≥90 纤维组检验	
		纤维体积率 (%)	±1	

注：*干混料力学性能检验项目应符合设计要求。

**干混料中包含钢纤维时，应对钢纤维的质量进行检验。

本规程用词说明

1. 为了便于在执行本规程条文时区别对待，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，在条件许可时首先这样做的用词：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。

2. 规程中指定应按其他有关规程和规范执行时，写法为：“应按……执行”或“应符合……的要求（或规定）”。非必须按指定的标准、规范的规定执行时，写法为“可参照……”。

引用标准名录

- 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》(GB/T 10433)
- 《热轧 H 型钢和剖分 T 型钢》(GB/T 11263)
- 《环氧树脂砂浆技术规程》(DL/T 5193)
- 《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T 221)
- 《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283)
- 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080
- 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082
- 《混凝土物理力学性能试验标准》(GB/T 50081)
- 《混凝土膨胀剂》GB/T 23439
- 《混凝土泵送施工技术规程》(JGJ/T 10)
- 《混凝土结构设计规范》(GB 50010)
- 《混凝土质量控制标准》(GB 50164)
- 《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)
- 《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01)
- 《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64)
- 《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722)
- 《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30)
- 《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420)
- 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)
- 《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)
- 《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)
- 《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)
- 《组合钢模板技术规范》(GB 50214)
- 《碳素结构钢》(GB/T 700)
- 《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917)

《工程可靠性设计统一标准》(GB 50513)

《预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规程》(CJJ/T 111)

《Concrete-Ultra-high performance fibre-reinforced concrete-Specifications, performance, production and conformity》(NF P 18-470, 2016)

《Design for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》(FHWA, 2013)

《Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams》(UNSW, 2000)

《National addition to Eurocode 2-Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete(UHPFRC)》(NF P 18-710, 2016)

《Recommendation: Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based Composites (UHPFRC): Construction material, dimensioning and application》(SIA 2052, 2016)

《Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)》(JSCE, 2006)

《Eurocode 4: Design of composite steel and concrete steel and concrete structures》(BS EN 1994-1-1)