



T/CECS XXX-202X

中国工程建设标准化协会标准

铁路钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面
技术规程

Technical specification for railway steel and ultra-high performance
concrete (UHPC) composite deck

(征求意见稿)

中国**出版社

中国工程建设标准化协会标准

铁路钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面 技术规程

Technical specification for railway steel and ultra-high performance
concrete (UHPC) composite deck

T/CECS XXX—202X

(征求意见稿)

主编单位： 中铁第四勘察设计院集团有限公司

批准单位： 中国工程建设标准化协会

执行日期： 202X 年 XX 月 XX 日

中国**出版社

202X 北 京

前 言

《铁路钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面技术规程》（以下简称规程）是根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2022 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2022〕13 号）的要求编制的。编制组在深入调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外现行标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为 8 章，主要技术内容包括：总则、术语和符号、材料、结构计算、抗剪连接件计算、构造要求、施工及验收等。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会铁道分会归口管理，由中铁第四勘察设计院集团有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请反馈给中铁第四勘察设计院集团有限公司（地址：湖北省武汉市武昌杨园和平大道 745 号，邮政编码：430063）。

主编单位： 中铁第四勘察设计院集团有限公司

参编单位： 中国铁路经济规划研究院有限公司

湖南大学

中铁大桥科学研究院有限公司

中国铁路设计集团有限公司

中国铁建大桥工程局集团有限公司

主要起草人： 严爱国 文望青 曾 敏 王存国 邵旭东

王 波 周尚猛 陈良江 孙宗磊 赵会东

王凯林 马 广 熊满华 刘振标 王新国

夏正春 罗春林 崔苗苗 郭 攀 李振东

张超超 高立强 曹君辉 李盼盼 杜宝军

周天喜 赵 健 任延龙 安东省 罗文辉

梁倬贤 陈晓辉 黄 振 蔡 畅 王志平

曹阳梅 杨得旺 高 慰 王小飞 任 征

主要审查人：

目 次

1	总则.....	8
2	术语和符号.....	9
2.1	术语.....	9
2.2	符号.....	9
3	材料.....	13
3.1	UHPC.....	13
3.2	钢材.....	15
3.3	普通钢筋.....	16
4	结构计算.....	17
4.1	一般规定.....	17
4.2	强度验算.....	17
4.3	刚度验算.....	19
4.4	稳定验算.....	20
4.5	疲劳验算.....	20
4.6	抗裂验算.....	20
5	抗剪连接件计算.....	22
5.1	一般规定.....	22
5.2	抗剪强度验算.....	22
5.3	抗剪连接件疲劳验算.....	23
6	构造要求.....	24
6.1	钢桥面板及剪力钉.....	24
6.2	超高性能混凝土层.....	24
6.3	接缝构造.....	25
7	施工.....	28
7.1	一般规定.....	28
7.2	栓钉焊接.....	28
7.3	钢筋铺设.....	29
7.4	UHPC 搅拌与运输.....	29
7.5	UHPC 布料与摊铺.....	29

7.6	接缝施工.....	30
7.7	UHPC 养护	31
8	验收.....	32
8.1	一般规定.....	32
8.2	钢材检验.....	32
8.3	干混料检验.....	32
8.4	钢桥面板表面处理施工检验.....	33
8.5	栓钉焊接检验.....	33
8.6	钢筋网铺设检验.....	33
8.7	UHPC 摊铺施工检验	34
8.8	施工验收.....	35
附录 A	UHPC 轴心抗拉强度试验方法	36
附录 B	UHPC 层疲劳细节和疲劳寿命	40
附录 C	UHPC 名义弯拉应力容许值	41
附录 D	UHPC 层第二、三体系主要检算位置	42
附录 E	降低 UHPC 层名义拉应力的方法.....	43
	用词说明.....	44
	引用标准名录	45
附：	条文说明.....	46

Contents

1	General provisions	8
2	Terms and symbols	9
2.1	Terms	9
2.2	Symbols.....	9
3	Materials.....	13
3.1	UHPC	13
3.2	Structural steel.....	15
3.3	Steel reinforcement	16
4	Structural calculation	17
4.1	General requirements	17
4.2	Checking of Strength	17
4.3	Checking of Stiffness	19
4.4	Checking of Stability	20
4.5	Checking of fatigue	20
4.6	Checking of crack resisting.....	20
5	Calculation of shear connections	22
5.1	General requirements	22
5.2	Checking of shear strength.....	22
5.3	Checking of fatigue of shear connections	23
6	Detailing requirements	24
6.1	Steel bridge deck and shear studs	24
6.2	UHPC layer	24
6.3	Structural details of the joints	25
7	Construction	28
7.1	General requirements	28
7.2	Welding shear studs	28
7.3	Reinforcement placement.....	29
7.4	UHPC mixing and transportation.....	29
7.5	UHPC distribution and paving.....	29
7.6	Joint construction	30
7.7	UHPC curing.....	31
8	Acceptance	32
8.1	General requirements	32

8.2	Structural steel inspection	32
8.3	Dry blend inspection	32
8.4	Construction inspection of surface treatment of steel bridge deck	33
8.5	Inspection of welding shear studs	33
8.6	Inspection of reinforcement mesh placement	33
8.7	Construction inspection of UHPC paving.....	34
8.8	Construction acceptance.....	35
Appendix A	Test method for axial tensile strength of UHPC	36
Appendix B	Fatigue details and fatigue life of UHPC layer.....	40
Appendix C	Allowance value of nominal flexural-tensile stress of UHPC.....	41
Appendix D	The main checking positions of the second and third systems of UHPC layer.....	42
Appendix E	Methods to reduce the nominal tensile stress of UHPC layer	43
	Explanation of wording.....	44
	List of quoted standards	45
	Addition: Explanation of provisions	46

1 总 则

1.0.1 为规范铁路钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面桥梁的设计、施工及检验标准，确保其安全可靠、适用耐久、技术先进、经济合理，特制定本规程。

1.0.2 本规程适用于新建铁路有砟及无砟轨道钢桥面，既有桥梁钢桥面改造可参考使用。

1.0.3 本规程中钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面桥梁的钢梁指含有正交异性钢桥面板的钢主梁。

1.0.4 钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面桥梁的设计、施工及检验除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

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、石英砂、添加剂、钢纤维、减水剂等材料经充分搅拌形成匀质的干混料后，按照一定质量比例加水拌和、凝结硬化后形成，具有超高力学性能、超高抗渗性能的高韧性水泥基复合材料，抗压强度在 100MPa 以上、抗折强度在 25MPa 以上，简称“UHPC”。

2.1.2 钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面 steel and ultra-high performance concrete (UHPC) composite deck

由正交异性钢桥面板、UHPC 层组合而成的一种桥面形式，其中 UHPC 层与正交异性钢桥面板间通过连接件连接。

2.1.3 钢纤维 steel fiber

采用钢制材料加工制成的微细纤维。

2.1.4 栓钉 shear stud

栓钉又名剪力钉，起到连接正交异性钢桥面板与 UHPC 层的作用。

2.1.5 热点应力法 hot spot stress method

热点应力法是一种采用有限元方法计算焊趾位置疲劳的计算方法，一般将距焊趾特定位置处的应力外推得到焊趾处的热点应力。

2.1.6 增强型接缝 enhanced joint

为满足 UHPC 在大跨、宽幅桥面上的分块与分幅施工，或满足钢-UHPC 组合桥面体系的节段拼装施工，在不同施工单元间设置的增强型连接构造。

2.1.7 蒸汽养护 steam curing

浇筑的 UHPC 终凝后在相对湿度不低于 95%，温度在 80~90℃蒸汽环境中持续养护 72 小时，或温度在 90℃以上蒸汽环境中持续养护 48 小时后达到强度等级的养护过程。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能有关符号

UHPC120——边长 100mm 立方体抗压强度标准值为 120MPa 的超高性能混凝土；

E_c ——UHPC 的弹性模量 (MPa) ;
 E_s ——钢材的弹性模量 (MPa) ;
 E_g ——普通钢筋的弹性模量 (MPa) ;
 G_c ——UHPC 的剪切模量 (MPa) ;
 G_s ——钢材的剪切模量 (MPa) ;
 n_0 ——钢材与 UHPC 弹性模量比;
 n_{G0} ——钢材与 UHPC 剪切模量比;
 μ_c ——UHPC 的泊松比;
 α_c ——UHPC 的温度线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$) ;
 ν_s ——钢材的泊松比;
 α_s ——钢材的温度线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$) ;
 ρ_s ——钢材的质量密度 (kg/m^3) ;
 $f_{cu,k}$ ——边长 100mm 的 UHPC 立方体抗压强度标准值 (MPa) ;
 f_c 、 f_{ct} ——UHPC 的轴心抗压、抗拉极限强度 (MPa) ;
 f_{fk} ——UHPC 的抗折极限强度 (MPa) ;
 τ_c ——UHPC 的抗剪强度 (MPa) ;
 f_t^r ——配筋 UHPC 的名义弯拉应力容许值 (MPa) ;
 $f_{t,joint}^r$ ——接缝处配筋 UHPC 的名义弯拉应力容许值 (MPa) ;
 f_s ——钢材的屈服强度 (MPa) ;
 f_g ——普通钢筋抗拉、抗压计算强度的屈服强度 (MPa) ;
 f_{su} ——栓钉极限抗拉强度 (MPa) ;
 $[\sigma_c]$ ——UHPC 弯曲或偏心受压容许应力 (MPa) ;
 $[\sigma]$ ——钢材轴向容许应力 (MPa) ;
 $[\sigma_w]$ ——钢材弯曲容许应力 (MPa) ;
 $[\tau]$ ——钢材剪切容许应力 (MPa) ;
 $[\sigma_g]$ ——普通钢筋的容许应力 (MPa) ;
 $[\Delta\sigma]$ ——普通钢筋应力幅容许值 (MPa) ;

2.2.2 作用和作用效应有关符号

M_I ——形成钢-UHPC 组合桥面前截面的弯矩计算值 (N mm) ;
 M_{II} ——形成钢-UHPC 组合桥面后截面计算弯矩增量 (N mm) ;

M ——截面的弯矩计算值 (N mm) ;
 V ——计算剪力 (N) ;
 V_s ——混凝土收缩徐变或温度效应在钢和混凝土结合面产生的纵桥向水平剪力 (N) ;
 V_{ms} ——UHPC 和钢主梁界面最大单位长度纵向水平剪力(N);
 V_{su} ——栓钉的抗剪承载力 (N) ;
 V_1 ——单位长度内钢和 UHPC 结合面上的纵向剪力 (N) ;
 σ_s ——钢结构弯曲正应力 (MPa) ;
 σ_{sl} ——钢结构纵向正应力 (MPa) ;
 σ_{st} ——钢结构横向正应力 (MPa) ;
 σ_c ——UHPC 层弯曲正应力 (MPa) ;
 σ_t ——UHPC 层底面的最大拉应力 (MPa) ;
 τ_s ——钢结构剪应力 (MPa) ;
 τ_{sb} ——钢结构弯曲剪应力 (MPa) ;
 τ_{sp} ——钢结构扭转剪应力 (MPa) ;
 τ_c ——UHPC 层剪应力 (MPa) ;
 τ_{cb} ——UHPC 层弯曲剪应力 (MPa) ;
 τ_{cp} ——UHPC 层扭转剪应力 (MPa) ;
 σ_g ——钢筋重心处的拉应力 (MPa) ;

2.2.3 几何参数有关符号

y ——所求应力点到换算截面中性轴的距离 (mm) ;
 I_n ——钢结构截面惯性矩 (mm^4) ;
 I_{un} ——钢-UHPC 组合截面的换算截面惯性矩 (mm^4) ;
 S ——剪应力计算点以上的换算截面对总换算截面中性轴的面积矩 (mm^3) ;
 t ——换算截面的腹板厚度 (mm) ;
 b ——UHPC 换算宽度 (mm) ;
 c ——验算方向上 (纵桥向或横桥向), UHPC 层受拉钢筋外边缘至受拉侧表面的距离 (mm) ;
 A_g ——受拉区钢筋截面总面积 (mm^2) ;
 A_c ——有效受拉 UHPC 截面面积 (mm^2) ;
 A_{c0} ——UHPC 层毛截面面积 (mm^2) ;

d ——验算方向上（纵桥向或横桥向），受拉区钢筋直径（mm）；

y_0 ——受拉 UHPC 上表面到中性轴的距离（mm）；

h_{td} ——受拉区未开裂的 UHPC 高度（mm）；

h_r ——受拉钢筋重心位置至受拉 UHPC 上表面的距离（mm）；

y_g ——纵向钢筋重心至换算截面中性轴的距离（mm）；

A_s ——栓钉钉杆截面面积（mm²）；

l_{cs} ——混凝土收缩徐变或温度引起的纵桥向集中剪力在结合面的水平传递长度（mm）；

S_c ——UHPC 层对组合截面中性轴的面积矩（mm³）；

2.2.4 计算系数及其它有关符号

γ ——UHPC 的抗剪强度计算系数；

$W_{\max}$ ——UHPC 表面的最大裂缝宽度（mm）；

α_{cr} ——构件受力特征系数；

ψ ——裂缝间受拉钢筋应变不均匀系数；

ρ ——按有效受拉 UHPC 截面面积计算的受拉钢筋配筋率。

3 材 料

3.1 UHPC

3.1.1 UHPC 由水泥、矿物掺合料、石英砂、添加剂、钢纤维等材料经充分搅拌形成匀质的干混料后，按照一定质量比例加水拌和、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。

3.1.2 水泥宜采用品质稳定、强度等级不低于 42.5 级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其性能应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定。

3.1.3 粉煤灰应符合国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 的规定，硅灰应符合现行《铁路混凝土》TB/T 3275 的技术要求。当采用其它矿物掺合料时，应通过试验进行验证，确定 UHPC 性能满足工程应用要求后方可使用。

3.1.4 骨料应使用 SiO₂ 含量大于 90%、含泥量不大于 0.5% 的石英砂。石英砂可分为粗粒径砂（1.25~0.63mm）、中粒径砂（0.63~0.315mm）和细粒径砂（0.315~0.16mm）三个粒级，筛分试验应符合现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684 的规定。不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量限制值应符合表 3.1.4 的规定。石英粉中公称粒径小于 0.16mm 的颗粒的体积比例应大于 95%。

表 3.1.4 不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量

粒级要求	1.25~0.63mm 粒级		0.63~0.315mm 粒级		0.315~0.16mm 粒级	
	≥1.25mm	<0.63mm	≥0.63mm	<0.315mm	≥0.315mm	<0.16mm
质量百分比（%）	≤5	≤10	≤5	≤10	≤5	≤5

3.1.5 钢纤维性能指标应满足：直径 0.10~0.25mm，长度 6~25mm，抗拉强度不应低于 2000MPa，其它性能应满足现行行业标准《钢纤维混凝土》JG/T 472 的规定。为提高钢纤维耐久性，其表面宜镀铜。

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

3.1.7 拌合用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定，在具体项目实施前需要使用施工拌合水试拌确认 UHPC 性能。

3.1.8 膨胀剂应符合现行国家标准《混凝土膨胀剂》GB 23439 关于 I 型膨胀剂的相关技术

要求。

3.1.9 掺用改善拌合物和 UHPC 性能的其它外加剂时，其性能应符合现行国家标准的规定；且应通过试验，确定 UHPC 性能满足工程应用要求后方可使用。

3.1.10 UHPC 轴心抗压极限强度 f_c 、抗折极限强度 f_{fk} 、弯曲或偏心受压容许应力 $[\sigma_c]$ 应按表 3.1.10 取用，轴心抗拉极限强度 f_{ct} 宜通过附录 A 试验方法确定，当无试验资料时可参考表 3.1.10 取用。

表 3.1.10 UHPC 强度等级（MPa）

强度	UHPC 强度等级		
	UHPC100	UHPC120	UHPC140
轴心抗压极限强度 f_c	61.5	73.9	86.2
轴心抗拉极限强度 f_{ct}	7.25	8.70	10.15
抗折极限强度 f_{fk}	25	28	32
弯曲或偏心受压容许应力 $[\sigma_c]$	30.8	37.0	43.1

3.1.11 UHPC 的抗剪强度可通过试验确定。当无试验资料时，可按公式（3.1.11）计算取值：

$$\tau_c = \gamma f_c \quad (3.1.11)$$

式中： τ_c ——UHPC 的抗剪强度（MPa）；

γ ——计算系数，一般取 0.095~0.121，本规程建议取 0.095；

f_c ——UHPC 的轴心抗压极限强度（MPa）。

3.1.12 UHPC 的弹性模量的试验采用 100mm×100mm×300mm 的试件，按现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 或《活性粉末混凝土》GB/T 31387 通过试验确定。当无试验资料时，可按表 3.1.12 取值。

表 3.1.12 不同强度等级 UHPC 的弹性模量（MPa）

UHPC 强度等级	UHPC100	UHPC120	UHPC140
弹性模量	3.44×10^4	3.76×10^4	4.07×10^4

3.1.13 UHPC 的剪切模量 G_c 可按公式（3.1.13）取值：

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\mu_c)} \quad (3.1.13)$$

式中： G_c ——UHPC 的剪切模量；
 E_c ——UHPC 的抗压/抗拉弹性模量；
 μ_c ——UHPC 的泊松比，按照本规程第 3.1.14 条取值。

3.1.14 UHPC 的泊松比 μ_c 可取为 0.2，温度线膨胀系数 α_c 可取为 $1.1\times10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

3.1.15 在不同养护条件下，UHPC 的收缩应变和徐变系数按表 3.1.15 取值。

表 3.1.15 UHPC 的收缩应变和徐变系数终极值

养护条件	收缩应变（ $\times 10^{-6}$ ）	徐变系数终极值
自然养护（相对湿度 50%~70%）	400	0.8
高温蒸汽养护	0	0.2

3.1.16 UHPC 的抗渗等级不低于 P20 级，即抗渗压强不低于 2.0MPa。

3.1.17 UHPC 的抗氯离子扩散系数 $\leq 0.1\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。

3.2 钢 材

3.2.1 钢材可采用 Q345q、Q370q、Q420q 和 Q500q，其质量等级、板厚、交货技术条件等应符合《铁路桥梁用结构钢》TB/T 3556 的有关规定。

3.2.2 钢材的基本容许应力应按表 3.2.2 确定。

表 3.2.2 钢材的屈服强度、基本容许应力表（MPa）

应力种类	符号	钢材牌号			
		Q345q	Q370q	Q420q	Q500q
屈服强度	f_s	345	370	420	500
轴向应力	$[\sigma]$	200	210	240	285
弯曲应力	$[\sigma_w]$	210	220	250	300
剪应力	$[\tau]$	120	125	145	170

注：钢材的基本容许应力与《铁路桥梁用结构钢》TB/T 3556中板厚 $t\leq 50\text{ mm}$ 的屈服强度相对应，当 $t> 50\text{ mm}$ 时，容许应力可按屈服点的比例予以调整。

3.2.3 钢材的物理性能指标应按表 3.2.3 采用。

表 3.2.3 钢材的物理性能指标

弹性模量 E_s （MPa）	剪切模量 G_s （MPa）	泊松比 ν_s	线膨胀系数 α_s （ $/^{\circ}\text{C}$ ）	质量密度 ρ_s （ kg/m^3 ）
2.1×10^5	8.1×10^4	0.3	1.2×10^{-5}	7850

3.2.4 栓钉机械性能和化学成分应符合《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的有关规定。

3.3 普通钢筋

3.3.1 钢筋应符合《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092 的有关规定。

3.3.2 钢筋的计算强度、容许应力及弹性模量应按表 3.3.2 采用。

表 3.3.2 钢筋的计算强度、容许应力及弹性模量（MPa）

指 标	符号	钢筋牌号	
		HRB400	HRB500
计算强度	f_g	400	500
容许应力	$[\sigma_g]$	210	260
弹性模量	E_g	2.0×10^5	2.0×10^5

3.3.3 钢筋的疲劳容许应力幅 $[\Delta\sigma]$ 应符合《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092 的有关规定。

4 结构计算

4.1 一般规定

4.1.1 铁路钢-UHPC 组合桥面桥梁第一体系整体计算可考虑 UHPC 层的受力，第二、三体系局部受力计算应考虑 UHPC 组合桥面受力，第一体系宜与二、三体系相同方向上的计算结果进行线性叠加。

4.1.2 钢-UHPC 组合桥面的结构计算，UHPC 层和钢结构应符合平截面假定，并应计入 UHPC 层收缩徐变的影响。

4.1.3 钢-UHPC 组合梁的截面特性计算可采用换算截面法，将 UHPC 截面换算为钢材截面进行计算。

4.2 强度验算

4.2.1 钢-UHPC 组合桥面内力与应力计算应按施工阶段、运营阶段，分别计算恒载、活载、附加力、特殊荷载作用下的截面内力，再按平截面假定计算截面应力，截面的正应力、剪应力应分阶段采用叠加法计算。

4.2.2 钢-UHPC 组合截面的应力计算应考虑轴力和弯矩共同作用的影响。

4.2.3 钢-UHPC 组合桥面的弯曲正应力应按下列公式计算：

$$\sigma_s = \frac{M_I y}{I_n} + \frac{M_{II} y}{I_{un}} \quad (4.2.3-1)$$

$$\sigma_c = \frac{My}{n_0 I_{un}} \quad (4.2.3-2)$$

式中： σ_s ——钢结构正应力（MPa），受拉为正；

σ_c ——UHPC 层正应力（MPa），受拉为正；

M_I ——形成钢-UHPC 组合桥面前截面的弯矩计算值（N·mm），截面下缘受拉为正；

M_{II} ——形成钢-UHPC 组合桥面后截面计算弯矩增量（N·mm），截面下缘受拉为正；

M ——截面的弯矩计算值（N·mm），截面下缘受拉为正；

I_n ——钢结构截面惯性矩（mm⁴）；

I_{un} ——钢-UHPC 组合截面的换算截面惯性矩 (mm^4) ;

y ——所求应力点到换算截面中性轴的距离 (mm) , 在中性轴以下为正;

n_0 ——钢材与 UHPC 弹性模量比, 按 $n_0=E_s/E_c$ 计算。

4.2.4 钢-UHPC 组合桥面的弯曲剪应力应按下列公式计算:

$$\tau_{sb} = \frac{VS}{I_{un}t} \quad (4.2.4-1)$$

$$\tau_{cb} = \frac{VS}{n_{G0}I_{un}b} \quad (4.2.4-2)$$

式中: τ_{sb} ——钢结构弯曲剪应力 (MPa) ;

τ_{cb} ——UHPC 层弯曲剪应力 (MPa) ;

V ——计算剪力 (N) ;

S ——剪应力计算点以上的换算截面对总换算截面中性轴的面积矩 (mm^3) , 当计算钢结构剪应力时取剪应力计算点以上的钢截面对钢结构截面中性轴的面积矩;

I_{un} ——组合截面换算截面惯性矩 (mm^4) , 当计算钢结构剪应力时取钢结构截面惯性矩;

t ——换算截面的腹板厚度 (mm) , 即钢结构腹板厚度;

b ——UHPC 换算宽度 (mm) ;

n_{G0} ——钢材与 UHPC 剪切模量比, 按 $n_{G0}=G_s/G_c$ 计算。

4.2.5 钢-UHPC 组合桥面的自由扭转剪应力应按下列公式计算:

$$\tau_{cp} = \frac{\tau_{sp}}{n_{G0}} \quad (4.2.5)$$

式中: τ_{cp} ——UHPC 层扭转剪应力 (MPa) ;

τ_{sp} ——钢结构扭转剪应力 (MPa) ;

n_{G0} ——钢材与混凝土剪切模量比, 按 $n_{G0}=G_s/G_c$ 计算。

4.2.6 钢-UHPC 组合桥面的钢结构应力应符合下列规定:

$$\sigma_{sl} \leq [\sigma_w] \quad (4.2.6-1)$$

$$\sigma_{st} \leq [\sigma_w] \quad (4.2.6-2)$$

$$\tau_s = \tau_{sb} + \tau_{sp} \leq [\tau] \quad (4.2.6-3)$$

$$\sqrt{\sigma_{sl}^2 + \sigma_{st}^2 - \sigma_{sl}\sigma_{st} + 3\tau_s^2} \leq 1.1[\sigma_w] \quad (4.2.6-4)$$

式中: σ_{sl} ——钢结构纵向正应力 (MPa) ;

σ_{st} ——钢结构横向正应力 (MPa) ;

τ_s ——钢结构剪应力 (MPa) ;

τ_{sb} ——钢结构弯曲剪应力 (MPa) ;

τ_{sp} ——钢结构扭转剪应力 (MPa) ;

$[\sigma_w]$ ——钢材容许弯曲应力 (MPa) ;

$[\tau]$ ——钢材容许剪应力 (MPa) 。

4.2.7 钢-UHPC 组合桥面 UHPC 应力应符合下列规定:

$$\sigma_c \leq [\sigma_c] \quad (4.2.7-1)$$

$$\tau_c = \tau_{cb} + \tau_{cp} \leq 0.17 f_c \quad (4.2.7-2)$$

式中: σ_c ——UHPC 层压应力 (MPa) ;

τ_c ——UHPC 层剪应力 (MPa) ;

τ_{cb} ——UHPC 层弯曲剪应力 (MPa) ;

τ_{cp} ——UHPC 层扭转剪应力 (MPa) ;

$[\sigma_c]$ ——UHPC 容许压应力 (MPa) ;

f_c ——UHPC 抗压极限强度 (MPa) 。

4.2.8 UHPC 层底面的最大拉应力应建立有限元模型进行计算, 在计算荷载的最不利组合作用下, UHPC 层底面的最大拉应力不得超过其轴心抗拉极限强度。

$$\sigma_t \leq f_{ct} \quad (4.2.8)$$

式中: σ_t ——UHPC 层底面的最大拉应力 (MPa) 。

4.3 刚度验算

4.3.1 铁路钢-UHPC 组合桥面桥梁的刚度应符合《铁路桥涵设计规范》TB 10002 的有关规定。

4.3.2 桥跨结构宜设预拱度, 预拱度的设置可按照《铁路桥涵设计规范》TB 10002 计算, 并考虑施工方法和顺序的影响。预拱度应保持桥面线形平顺。

4.3.3 铁路钢-UHPC 组合桥面桥梁的变形计算应计入施工顺序的影响, 并应计入 UHPC 徐变、收缩和温度等作用的影响。

4.4 稳定验算

4.4.1 铁路钢-UHPC 组合桥面桥梁施工阶段钢结构稳定性检算应符合《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091 的有关规定。

4.4.2 铁路钢-UHPC 组合桥面桥梁在计算荷载的最不利组合作用下，纵横向倾覆稳定系数不应小于 1.3。

4.4.3 铁路钢-UHPC 组合桥面应考虑施工期及运营期桥面板局部稳定。

4.5 疲劳验算

4.5.1 承受列车荷载的结构构件与连接，应按疲劳细节类别进行疲劳验算。

4.5.2 疲劳验算时，应采用名义应力法或热点应力法，其中 UHPC 层的疲劳验算应采用名义应力法，钢主梁的疲劳验算宜采用热点应力法，当某些疲劳细节不适合采用热点应力法时，宜采用名义应力法。

4.5.3 UHPC 层各疲劳细节的疲劳强度见附录 B.0.1。

4.5.4 铁路钢-UHPC 组合桥面的钢构件和栓钉的疲劳验算应符合《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091 的有关规定。

4.6 抗裂验算

4.6.1 UHPC 层抗裂验算可通过控制名义弯拉应力或检算裂缝宽度。

4.6.2 当 UHPC 层抗裂验算通过控制名义弯拉应力进行时，若采用 12mm 正交异性钢桥面板，名义弯拉应力应不大于附录 C 中表 C.0.1 中列出的名义弯拉应力容许值。

4.6.3 当通过裂缝宽度计算进行抗裂验算时，铁路钢-UHPC 组合桥面桥梁 UHPC 层表面的最大裂缝宽度按下列式计算：

$$W_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_g}{E_g} (1.06c + 0.152 \frac{d}{\rho}) \frac{y_0 - h_{td}}{y_0 - h_{td} - h_r} \quad (4.6.3-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.12 \frac{f_{ct}}{\rho \sigma_g} \quad (4.6.3-2)$$

$$\rho = \frac{A_g}{A_c} \quad (4.6.3-3)$$

$$\sigma_g = \frac{M y_g}{I_{\text{un}}} \quad (4.6.3-4)$$

式中： $W_{\max}$ —— UHPC 表面的最大裂缝宽度（mm）；

α_{cr} ——构件受力特征系数，纵桥向取 1.8，横桥向取 1.6；

ψ ——裂缝间受拉钢筋应变不均匀系数，当 $\psi < 0.2$ 时，取 $\psi = 0.2$ ；当 $\psi > 1.0$ 时，取 $\psi = 1.0$ ；

σ_g ——主+附工况下钢筋重心处的拉应力（MPa）；

E_g ——钢筋的弹性模量（MPa）；

c ——验算方向上 UHPC 层受拉钢筋（纵桥向或横桥向）外边缘至受拉侧表面的距离（mm）；

d ——验算方向上（纵桥向或横桥向），受拉区钢筋直径（mm）；

ρ ——按有效受拉 UHPC 截面面积计算的受拉钢筋配筋率；

y_0 ——受拉 UHPC 上表面到中性轴的距离（mm）；

h_{td} ——受拉区未开裂的 UHPC 高度，即拉应力在 0 到 f_{ct} 之间的高度（mm）；

h_r ——受拉钢筋重心位置至受拉 UHPC 上表面的距离（mm）；

f_{ct} ——不配筋 UHPC 的轴心抗拉极限强度（MPa）；

A_g ——受拉区钢筋截面总面积（mm²）；

A_c ——有效受拉 UHPC 截面面积（mm²），纵桥向 UHPC 层按轴心受拉构件计算，取计算模型中 UHPC 层截面面积 $A_c = b_e h_c$ ，横桥向 UHPC 层按偏心受拉构件计算，取 $A_c = 0.5 b_e h_c$ ， b_e 、 h_c 分别为计算模型中 UHPC 层的宽度和厚度；

M ——截面弯矩（N·mm），不同受力阶段、种类的荷载应分别计算；

y_g ——纵向钢筋重心至换算截面中性轴的距离（mm）；

I_{un} ——与截面弯矩相对应的钢-UHPC 组合截面换算截面惯性矩（mm⁴）。

4.6.4 铁路钢-UHPC 组合桥面中 UHPC 层顶面的最大裂缝宽度限值为 0.05mm。

4.6.5 当施工中需要对 UHPC 层进行分跨、分幅或分段浇筑时，必须在先浇-后浇连接部位设置接缝。接缝处 UHPC 层抗裂验算也通过控制名义弯拉应力来进行，当名义弯拉应力不大于附录 C 中表 C.0.2 中列出的名义弯拉应力容许值，即认为接缝处 UHPC 层顶面最大裂缝宽度不大于 0.05mm。

4.6.6 UHPC 层中的抗裂计算应重点检算附录 D 所示位置。

4.6.7 当 UHPC 层抗裂验算不满足时，除可采用提高 UHPC 等级、减小钢筋间距的方法外，还可以采用附录 E 中措施降低 UHPC 层名义拉应力。

5 抗剪连接件计算

5.1 一般规定

5.1.1 抗剪连接件应保证钢桥面与 UHPC 界面剪力的有效传递和防止分离，共同承担作用力。

5.1.2 钢-UHPC 组合桥面中抗剪连接件宜采用栓钉，也可采用有可靠依据的其它类型连接件。抗剪连接件应具备一定的剪切变形能力，但不同类型的连接件不宜在同一截面混合使用。

5.2 抗剪强度验算

5.2.1 单个栓钉连接件的抗剪承载力应按式(5.2.1)进行计算：

$$V_{su} = 0.7 A_s f_{su} \quad (5.2.1)$$

式中： V_{su} ——栓钉的抗剪承载力（N）；

A_s ——栓钉钉杆截面面积（ mm^2 ）；

f_{su} ——栓钉极限抗拉强度，满足《电弧焊柱焊用圆柱头焊钉》GB/T10433 的要求，可取 400MPa。

5.2.2 抗剪连接件的纵向剪力计算应符合下列规定：

1 钢主梁和 UHPC 层结合面的纵向最大剪力按未开裂分析方法计算，将抗剪连接件的整体计算结果和局部计算结果进行叠加。

2 抗剪连接件的整体计算中单位长度上的纵桥向水平剪力 V_1 按下式计算。抗剪连接件的数量宜按剪力钉包络图形状进行分段计算，在相应区段内均匀布置。

$$V_1 = \frac{VS_c}{I_{un}} \quad (5.2.2-1)$$

式中： V ——形成组合截面之后作用于组合体系的竖向剪力（N）；

S_c ——UHPC 层对组合截面中性轴的面积矩（ mm^3 ）；

I_{un} ——组合截面的惯性矩（ mm^4 ）。

3 UHPC 和钢主梁界面的端部应考虑混凝土收缩徐变作用或温度作用对抗剪连接件纵桥向水平剪力的叠加作用，最大单位长度纵向水平剪力 V_{ms} 应按下式进行计算：

$$V_{ms} = \frac{2V_s}{l_{cs}} \quad (5.2.2-2)$$

式中： V_s ——混凝土收缩徐变或温度效应在钢和混凝土结合面产生的纵桥向水平剪力（N）；
 l_{cs} ——混凝土收缩徐变或温度引起的纵桥向集中剪力在结合面的水平传递长度，取主梁相邻腹板间距长度和主梁长度的 1/10 两者中的较小值（mm）。

4 在局部计算中抗剪连接件的内力计算宜采用有限元分析法，建立局部计算模型，模拟抗剪连接件的连接作用，并考虑由列车车轮竖向力和制动力引起的栓钉纵、横向剪力。

5.3 抗剪连接件疲劳验算

5.3.1 抗剪连接件疲劳验算细则应遵循本规程第 4.5 节的规定。

5.3.2 抗剪连接件的疲劳验算内力应考虑总体荷载效应和局部荷载效应叠加。

6 构造要求

6.1 钢桥面板及剪力钉

6.1.1 桥梁的钢面板厚度不宜小于 12mm，加劲肋可采用 U 肋、T 肋、I 肋等形式，隔板及加劲肋间距可在常规正交异性钢桥面基础上根据计算适当加大。

6.1.2 剪力钉的设置应符合下列规定：

1 剪力钉的钉柱直径不宜小于 13mm，一般可采用 19mm。最小长度不应小于 35mm，并根据 UHPC 层厚度及保护层要求调整。

2 剪力钉的布置形式为矩阵式布置。

3 剪力钉间距应符合下列规定：

1) 剪力钉纵、横向布设间距宜为 150~250mm，不应小于 5 倍焊钉直径，且不应大于 300mm，可结合列车活载受力扩散范围，受力复杂区域适当进行加密；

2) 尽量避免剪力钉布设在横隔板、腹板及加劲肋的顶面附近，最小距离不小于 20mm。

6.2 超高性能混凝土层

6.2.1 钢-UHPC 组合桥面 UHPC 层厚度不宜小于 50mm。

6.2.2 UHPC 中钢筋网的设置应符合下列规定：

1 UHPC 钢筋保护层厚度不应小于 10mm、且不应大于 20mm。

2 钢筋直径不宜小于 10mm，间距可采用 100mm，且间距不应小于 30mm，可结合列车活载受力扩散范围，受力复杂区适当进行加密。

3 加密钢筋避免在纵、横隔板处截断，截断位置距隔板距离不小于 500mm。

4 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，错开距离应满足《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092 的规定。搭接长度不小于 20 倍的钢筋直径，锚固长度不小于 10 倍的钢筋直径。

5 钢筋应包含横桥向和纵桥向两层钢筋，一般情况下，纵桥向钢筋置于下层，横桥向钢筋置于上层。

6 UHPC 层中钢筋的最小配筋率应符合下列规定：

1) 钢筋配筋率为面积率，按 $\rho = A_g / A_{c0}$ 计算；

2) UHPC 层中钢筋的最小单向配筋率（纵桥向或横桥向）不宜小于 1.5%。

6.3 接缝构造

6.3.1 UHPC 分段浇筑时，接缝宜设置在拉应力较小的区域，且应满足以下规定：

- 1 对于横向接缝，接缝位置宜设置在两相邻横隔板间跨中至前后 1/4 点的范围内。
- 2 对于纵向接缝，接缝位置宜设置在两相邻腹板（或纵向加劲肋）间跨中至前后 1/4 点的范围内。

6.3.2 为提高接缝处的连接性能和力学性能，接缝形式宜采用方波式（图 6.3.2-1）或 Z 型接缝（图 6.3.2-2），内部钢筋网接头宜错开布置。

1 采用方波式接缝时，应符合下列规定：

- 1) 方波尺寸宜为 200mm~400mm；
- 2) 方波接缝和钢筋网接头宜错开布置。

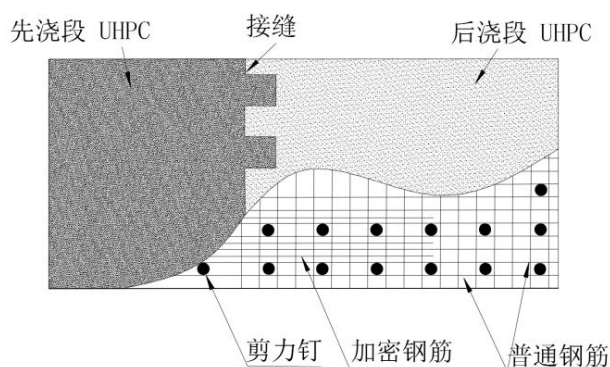


图 6.3.2-1 UHPC 接缝方案：方波接缝

2 采用 Z 型钢板接缝时，应符合下列规定：

- 1) Z 型钢板厚度宜为 10mm、宽度宜为 300mm；
- 2) Z 型钢板通过间隔焊固定在钢桥面板顶板上，焊接总长度不宜低于 Z 型钢板边缘总长度的 20%。

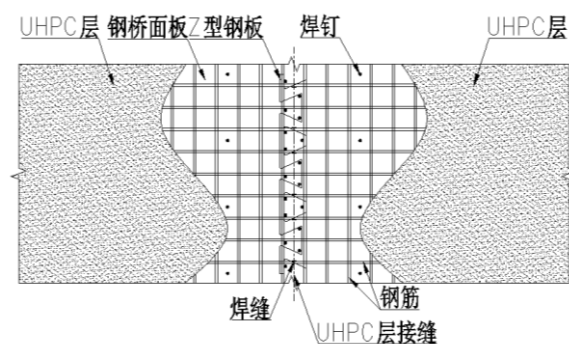


图 6.3.2-2 UHPC 接缝方案：Z 型接缝

6.3.3 UHPC 层与普通混凝土之间连接时，连接构造应符合下列规定。

- 1 应在混凝土结构中预埋锚固钢筋，钢筋的型号应与 UHPC 内的钢筋相同，并处于同一

平面，间距应不大于 300mm，搭接长度不小于 15d；

2 锚固钢筋预埋长度 L 应按《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092 确定。UHPC 层与混凝土结构的边界连接构造可参照图 6.3.3 设置。

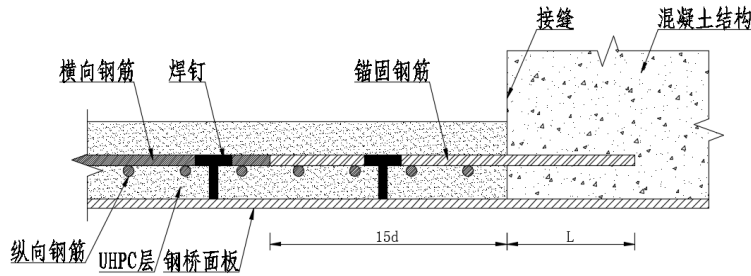


图 6.3.3 UHPC 层与混凝土结构连接立面示意图

6.3.4 UHPC 层与周边钢结构连接时，连接构造应符合下列规定。

- 1 当采用焊接 U 型钢筋作为连接构造时，应符合以下规定：
 - 1) 焊接 U 型钢筋时，应按图 6.3.4-1 进行设计，U 型钢筋应与 UHPC 中的钢筋同型号；
 - 2) U 型钢筋与钢结构界面之间采用单面满焊方式；
 - 3) U 型钢筋两肢长度不宜低于 150mm，开口端宽度宜为 150mm；
 - 4) 相邻 U 型钢筋间距不宜大于 300mm。

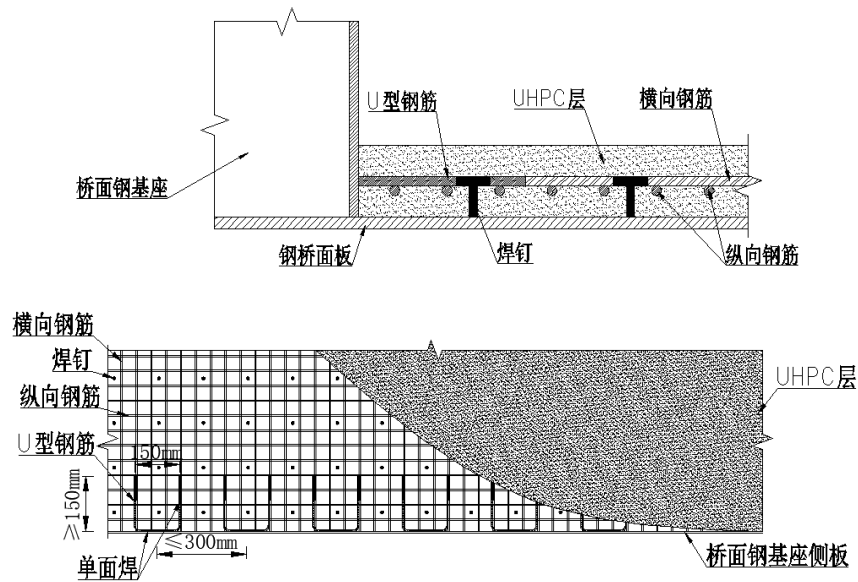


图 6.3.4-1 UHPC 层与钢结构连接示意图 (U 型钢筋连接)

- 2 当采用焊钉作为连接构造时，应符合以下规定：
 - 1) 焊接焊钉时，应按图 6.3.4-2 进行设计，焊钉应与钢桥面板上的焊钉同型号；
 - 2) 焊钉位置宜位于 UHPC 的一半厚度处，间距不宜大于 300mm；

3) 焊钉直径不宜低于 13mm，长度不宜小于 35mm。

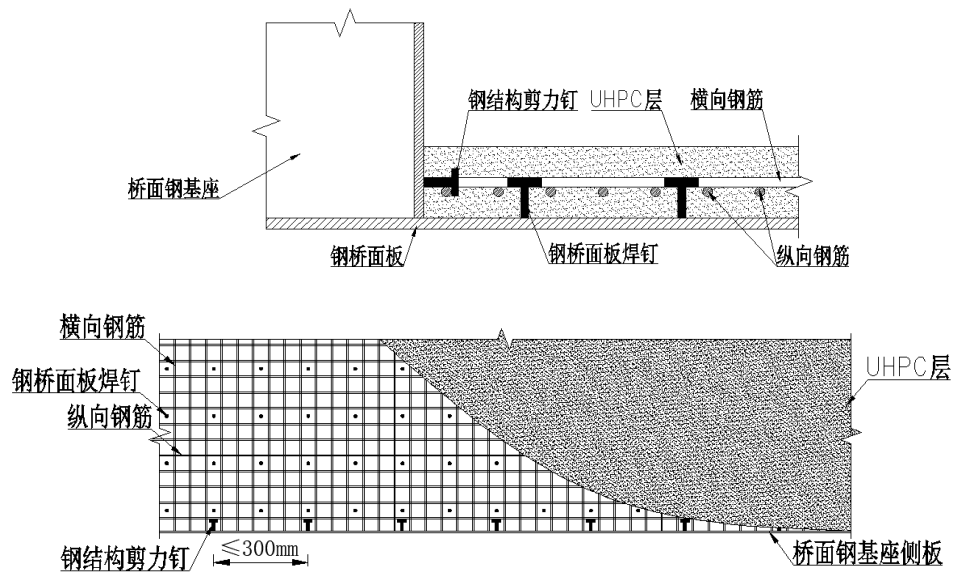


图 6.3.4-2 UHPC 层与钢结构连接示意图（焊钉连接）

7 施 工

7.1 一般规定

7.1.1 钢-UHPC 组合桥面体系施工应根据结构特点和受力特性确定施工程序和工艺，保证施工质量，应选择专业施工技术队伍和采用专业施工设备。

7.1.2 钢桥面板应清除铁锈、焊渣冰层、泥土和其它杂物，且应作防腐处理。

7.1.3 施工时应避开雨季和冬季施工，施工时现场环境气温应在 5℃以上，宜在 10℃以上，风力达到 6 级及以上必须停止施工。

7.1.4 UHPC 混合料宜提前进行工厂预混干拌，应采用专用设备，且应确保钢纤维不结团。

7.1.5 UHPC 宜采用干混料直接加水的方式搅拌。

7.1.6 钢-UHPC 组合桥面体系可采用现场浇筑，也可采用在厂内随主梁节段浇筑、现场浇注湿接缝的形式。

7.1.7 UHPC 层应选择温度稳定适宜（气温高于 5℃）、风速较小（6 级及以下）、无雨天气的条件下进行浇筑。

7.2 栓钉焊接

7.2.1 无论是旧钢桥桥面铺装翻修还是新建钢桥桥面铺装施工，在焊接栓钉时，应符合下列规定：

1 应按栓钉的布置位置在钢桥面板上画墨线定位。当栓钉加密时，应先定位出普通位置点，再定位出加密位置点。

2 当栓钉的设计位置与钢主梁拼接焊缝位置冲突时，应将栓钉偏离焊缝边界 2~3cm，不应将栓钉直接焊接在拼接焊缝的顶面。

3 应采用电弧螺柱焊机焊接栓钉。焊接时应控制焊接时间，确保焊接质量。

4 焊接完成后，应清除定位时设置的墨线、焊渣、磁环和杂物。

5 焊接完后应对栓钉进行敲击检查，防止焊接不牢固。

7.2.2 栓钉焊接完成后，钢桥面板防腐涂装采用环氧富锌漆，应涂装 1 道，且干膜厚度不小于 80μm。

7.2.3 当栓钉的设计位置与钢主梁拼接焊缝位置冲突时，应将栓钉偏离焊缝边界 2cm~3cm，严禁直接在焊缝上焊接栓钉。

7.3 钢筋铺设

7.3.1 钢筋网铺设时，其级别、直径、间距及相对位置应符合设计规定。

7.3.2 绑扎钢筋前，应在钢桥面上设置垫层钢筋，垫层钢筋高度应符合设计规定。垫层钢筋应错开设置在钢筋与桥面板之间，并应与钢筋网绑扎牢固。

7.3.3 钢筋接头及钢筋网宜采用镀锌钢丝绑扎，丝径宜为 0.7~2.0mm，且钢丝丝头末端应朝向桥面板。

7.3.4 钢筋铺设完成后，应对钢筋网高度、间距等进行检查，不符合要求时，应进行局部调整；避免施工中钢筋网的塌陷，同时保持钢筋网的清洁。

7.4 UHPC 搅拌与运输

7.4.1 UHPC 搅拌应满足以下规定：

1 混凝土袋装材料严格按照施工水料比要求进行准确称量，干料称量最大允许偏差应 $\leq \pm 1\%$ ，用水量最大允许偏差应 $\leq \pm 1\%$ 。

2 采用强制式双轴搅拌机搅拌混凝土，采用电子计量系统计量原料。搅拌时，先向搅拌机投入干料，搅拌 1min，然后加水，搅拌 7min。

3 温度低于 5℃时不宜进行搅拌浇筑施工。

7.4.2 超高性能混凝土拌合站生产能力、运输能力应满足现场连续浇筑作业的需要，宜采用专业混凝土罐车，不得采用机动翻斗车、手推车等工具长距离运输。

7.4.3 超高性能混凝土运输过程中需保证混凝土的均匀性，确保坍落度、流动性等工作性能满足施工要求。

7.4.4 长距离运输过程中需对运输设备采取保温隔热措施，防止局部混凝土温度过高（夏季）或过低（冬季）。应采取封闭措施防止外部水浸入运输容器或自身水分蒸发，严禁在运输过程中向混凝土内加水。

7.4.5 尽量减少混凝土的转载次数和运输时间，从搅拌机卸出混凝土到混凝土浇筑完毕宜控制在 2h 以内。

7.4.6 若采用搅拌罐车运输混凝土，当罐车到达浇筑现场时，应使罐车高速旋转 1~2min，再将混凝土拌合物卸出。

7.5 UHPC 布料与摊铺

7.5.1 UHPC 宜采用专用布料机或管道泵送，布料高度应适当高于模板。

7.5.2 采用专用布料机时，应在布料机出口处放置振捣器，在布料机中超高性能混凝土接近布完时打开振捣器，使布料器中混凝土充分流出。

7.5.3 采用管道泵送布料时，应符合下列规定：

- 1 宜根据混凝土供应、摊铺设备、场内外条件等划分泵送布料区域及布料顺序。
- 2 宜采用由远而近方式布料，采用多根泵管同时布料时，其布料速度宜保持一致。
- 3 泵送布料完成后，应及时进行输送泵和管道的清洗工作。

7.5.4 UHPC 摊铺振捣应能使模板内各部位混凝土摊铺平整、振捣密实，宜采用专用摊铺机和振动梁摊铺、平板振动器辅助振捣，并应符合下列规定：

- 1 通过试验段确定初始摊铺厚度，施工时根据初始摊铺厚度及布料速度控制好摊铺速度。
- 2 混凝土布料完成后宜用振动梁将混凝土做初始振平摊铺。
- 3 初始振平后用摊铺机再次摊铺施工，摊铺机宜按照控制速度匀速推进，不宜反复碾压。如有局部未充分碾压抹平的部位，可采用平板振捣器加以辅助振捣抹平。
- 4 平板振捣器辅助振捣宜在布料后立即开始，并于 5min 内完成。

7.5.5 对局部厚度不足的部位宜采用人工布料的方式加料，并用平板振捣器振捣抹平。

7.5.6 超高性能混凝土失水过多时，可在摊铺机摊铺前或摊铺后往混凝土表面喷洒水雾，以保持混凝土处于塑性状态。

7.5.7 摊铺完成后，宜采用提浆整平机进行振平抹面处理，提浆整平机行进速度通过试铺段确定，同步检查摊铺厚度及必要的局部修补。

7.5.8 每盘混凝土从布料入模到摊铺振捣完成时间应控制在 30min 以内。

7.5.9 摊铺振捣抹平后，应及时用塑料薄膜将混凝土表面覆盖，且应在塑料薄膜上喷洒水雾，降温保湿养护，且采取措施避免塑料膜脱落。

7.5.10 施工时，UHPC 应能自然流至桥面钢筋网任意空隙位置，并经摊铺振捣后能完全覆盖钢筋网和栓钉。

7.6 接缝施工

7.6.1 顺向 UHPC 接缝宜设置在两线之间；横向 UHPC 接缝宜设置在两个横隔板中间的受压区，横隔板顶部及墩顶的受拉区不宜设置横向 UHPC 接缝。

7.6.2 浇筑 UHPC 前应在接缝处设置模板，模板宜采用木板，板身应稳固、竖直，模板下方宜采用聚氨酯泡沫填缝剂密封，防止 UHPC 从模板底部流出。

7.6.3 当 UHPC 采用分段施工时，后一节段 UHPC 施工前应对前一节段 UHPC 接缝处进行凿毛处理，凿毛施工应符合以下规定：

- 1 先浇筑的 UHPC 从加水拌合开始至 10h 后（初凝后）进行凿毛处理。
- 2 凿毛宽度应满足设计要求，设计无要求时应全断面凿毛，凿毛深度可为 2cm。
- 3 凿毛面应竖直、钢纤维应清晰均匀可见。
- 4 凿毛后，应吹除遗留在钢桥面板上的 UHPC 屑末。

7.6.4 接缝处应衔接良好，无台阶或脱空现象。

7.7 UHPC 养护

7.7.1 UHPC 养护应视温度条件分为一般保湿养护和高温蒸汽养护。当日平均温度在 10℃ 以上、最低温度在 5℃ 以上，方可采用一般保湿养护。

7.7.2 一般保湿养护应按如下步骤进行：

- 1 UHPC 振捣抹平完成后应将塑料薄膜覆盖在表面。
- 2 浇筑完成后至 24h 内，应不定期在塑料薄膜上喷洒水雾。
- 3 24h 后应掀开塑料薄膜，在混凝土表面喷洒水雾，再覆盖上塑料薄膜。
- 4 UHPC 宜带模养护 7d，最短养护时间应不少于 3d。
- 5 养护期间，塑料薄膜应完好无损，彼此搭接完整，搭接位置应用质量较轻的木块或其它物品覆盖，搭接宽度应大于 20cm。
- 6 拆模后混凝土应继续进行养护，总养护时间宜控制在 28d，最短养护时间不少于 14d。

7.7.3 高温蒸汽养护宜通过蒸汽锅炉、蒸汽管道和蒸汽养护棚等设施完成，养护前应根据现场条件和养护要求确定保温棚支架搭设、锅炉布置及养护方案，养护过程中宜通过传感器调整蒸汽量的大小实现对温度和湿度的控制。

7.7.4 高温蒸汽养护应按如下步骤进行：

- 1 UHPC 振捣抹平完成后应将塑料薄膜覆盖在表面。
- 2 混凝土终凝后撤掉塑料薄膜，开始蒸汽养护。
- 3 当养护温度恒定在 80℃ 时，养护时间不少于 72h；当养护温度恒定在 90℃ 时，养护时间不少于 48h。

7.7.5 蒸汽高温养护时升温速度不应大于 12℃/h，养护过程中养护棚内的相对湿度不低于 95%，养护结束后降温速度不超过 15℃/h。

7.7.6 养护完成后对明显凹凸不平部位应采用打磨机打磨，确保 UHPC 层均匀完好、无龟裂、无收缩裂纹且表面平整。

8 验 收

8.1 一般规定

8.1.1 钢-UHPC 组合桥面的施工质量检验和过程控制检测按本规程实施，本规程未规定的按现行国家及行业标准执行。

8.1.2 应建立健全的质量保证体系，对施工各工序的质量进行检查、控制。

8.1.3 钢-UHPC 组合桥面工程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《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415 及《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424 的有关规定。

8.1.4 拌合用水应符合《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

8.1.5 相关原材料检验、试铺、施工原始记录等资料均应如实保存完好。

8.2 钢材检验

8.2.1 原材料应具有供应商提供的出厂合格检验证书，并按有关检验项目、批次规定，严格实施进场检验。

8.2.2 原材料的检验批量应符合下列规定：

1 钢筋、钢纤维、栓钉按进场的批次和产品的抽样检验方案确定；且同一工程、同一原材料来源、同一组生产设备生产前提下，成型钢筋检验批量不应大于 60t、钢纤维检验批量不应大于 30t、栓钉按照国家标准频率进行检验。

2 不同批次或非连续供应的不足一个检验批量的钢筋、钢纤维、栓钉应作为一个检验批。

8.2.3 原材料进场检验的样品应随机抽取。

8.3 干混料检验

8.3.1 干混料进场时，除应按规定批次提供产品检验报告等质量证明文件外，还应进行外观检验和物理力学性能检验，并应符合下列规定：

1 袋装干混料应储存于干燥、通风、防潮、不受雨淋的场所，并按品种、批号分别堆放，不得混堆混用，且应先存先用。

2 袋装干混料应包装完整，无破袋、受潮现象。

3 按推荐用水量拌制混凝土，力学性能、坍落度等参数应符合相关要求。

8.3.2 干混料的性能进场检验可根据用户需求随时抽检。

8.4 钢桥面板表面处理施工检验

8.4.1 UHPC 施工前，钢桥面清理除锈应满足表 8.4.1 中相关检验要求：

表 8.4.1 钢桥面清理除锈实测项目

项次	检查项目	要求	检测方法和频率
1	相对湿度	≤85%	湿度计测量，每班测 1 次
2	氯化物含量	≤0.014%	试纸测试，GB/T 18570.9，每 200m ² 检测 1 处
3	锈蚀情况	无蓝点	氰化钾试纸测试，每 100m ² 检测 1 处
4	桥面清洁度	≥Sa2.5 级	目视比较法，GB/T 8923.1，每 200m ² 检测 1 处
5	桥面粗糙度	满足设计要求	比较样块法，GB/T 13288.2，每 200m ² 检测 1 处

8.4.2 钢桥面清理除锈后表面应光亮、清洁和干燥、无损伤和坑洞，并应及时涂装底漆。

8.5 栓钉焊接检验

8.5.1 栓钉焊接应满足表 8.5.1 中相关检验要求：

表 8.5.1 栓钉焊接实测项目

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

8.5.2 栓钉焊缝外形应饱满，无气孔、夹渣、裂纹等明显缺陷。

8.6 钢筋网铺设检验

8.6.1 钢筋网铺设应符合表 8.6.1 中相关要求：

表 8.6.1 钢筋网铺设实测项目

项次	检查项目	允许偏差（mm）	检测方法和频率	要求
1	钢筋搭接长度	≤10	钢尺测量，每 100m ² 检测 1 处	按设计图纸
2	钢筋网高度	≤3	钢尺测量，每 100m ² 检测 1 处	按设计图纸
3	钢筋网间距	≤10	钢尺或游标卡尺测量，每 100m ² 检测 1 处	按设计图纸

8.6.2 钢筋网铺设的外观要求：

- 1 垫块应布置合理，密度均匀，且应与下层钢筋绑扎在一起。
- 2 钢筋网纵、横桥向间距均匀，上层钢筋顶面与栓钉钉帽顶面的高度差基本均匀。
- 3 接缝布置合理，位置错开，接缝长度满足要求，接缝焊接或绑扎应牢固。
- 4 钢筋网间应洁净、无积水和杂物。

8.7 UHPC 摊铺施工检验

8.7.1 摊铺施工完成后应对 UHPC 性能、摊铺施工及养护等相关实测项目进行检验，检验项目应满足表 8.7.1-1、8.7.1-2、8.7.1-3 中相关要求：

表 8.7.1-1 UHPC 性能实测项目

项次	检查项目	检测方法和频率	性能要求
1	抗压强度	100mm×100mm×100mm 立方体试件 抗压试验，每 40m ³ 检测 1 组	$f_{cu,m}1.1S_{f_{cu}} \geq f_{cu,k}$ $f_{cu,min} \geq 0.95 f_{cu,k}$
2	抗弯拉强度	100mm×100mm×400mm 棱柱体试件抗弯 拉试验，每 40m ³ 检测 1 组	$f_{f,m} \geq 1.05f_{fk}$ $f_{f,min} \geq 0.95 f_{fk}$
3	弹性模量	普通混凝土力学性能试验方法标准， 100mm×100mm×300mm 棱柱体试件轴压 试验，每 40m ³ 检测 1 组	按设计要求
4	坍落度	普通混凝土拌合物性能试验方法标准， 每 40m ³ 检测 1 次	$\geq 180\text{mm}$ $\leq 280\text{mm}$

注： $f_{cu,m}$ 和 $f_{cu,min}$ 分别为 UHPC 立方体抗压强度的平均值和最小值， $f_{f,m}$ 和 $f_{f,min}$ 分别为 UHPC 的抗弯拉强度的平均值和最小值。

表 8.7.1-2 UHPC 层摊铺施工实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率
1	混凝土总层厚	$\geq -3\text{mm}$ $\leq +5\text{mm}$	摊铺过程中，将直钢丝插入到 UHPC 的底部，以直尺测量钢丝的浸润深度，每 40m ² 检测 1 处
2	桥面纵、横坡	$\leq 0.2\%$	水准仪、皮尺测量，每 40m ² 检测 1 处
3	平整度	$\leq 5\text{mm}$	3m 铝合金直尺，每 40m ² 检测 1 处

表 8.7.1-3 UHPC 层高温蒸汽养护实测项目

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

8.7.2 UHPC 摊铺施工的外观要求：

- 1 摊铺过程中，UHPC 应色泽正常，无发干或发亮现象。
- 2 UHPC 应流动性好，倾倒至桥面板时，应能自然流动至钢筋网间。经摊铺振捣后，应能完全覆盖钢筋网和栓钉，且表面厚度应均匀一致，无坑洼。
- 3 振捣充分和保湿养护后，UHPC 层应均匀完好，且不应有龟裂现象。
- 4 养护完成后，UHPC 层应均匀完好，且应无收缩裂纹。
- 5 UHPC 层的边缘及接缝处等位置应衔接良好，无脱空、台阶现象。
- 6 接缝区域先浇段侧面凿毛处理后，表面粗糙、断面上钢纤维分布应清晰均匀。

8.8 施工验收

8.8.1 应符合下列规定前提下方可开展质量验收评定工作：

- 1 使用的原材料、半成品、成品及施工工艺应符合本规程的规定。
- 2 质量保证资料应真实齐全，UHPC 层无严重外观缺陷。

8.8.2 质量保证资料包括下列内容：

- 1 所用原材料、半成品和成品的质量检验结果。
- 2 施工配合比、重要工序交接检查、栓钉施工检查、钢筋网施工检查、UHPC 施工检查记录。
- 3 各项质量控制指标的试验数据和质量检验资料。
- 4 施工过程中遇到的非正常情况记录及其对工程质量影响分析。
- 5 施工过程中如发生质量事故，经处理补救后，达到设计要求的认可证明文件。

8.8.3 对工程质量验收不合格的，应进行缺陷修补或返工，并重新进行质量验收。

附录 A UHPC 轴心抗拉强度试验方法

A.0.1 为进一步规范 UHPC 抗拉强度的试验方法，并在检验或控制 UHPC 预制或现浇构件的质量时，有一个统一的 UHPC 抗拉强度的指标，特制定此推荐试验方法。

A.0.2 UHPC 的取样应符合《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 中的有关规定。

A.0.3 UHPC 轴心抗拉强度试验应以三个试件为一组，每组试件所用的拌合物应从同一盘混凝土或同一车混凝土中取样。

A.0.4 UHPC 轴拉试件尺寸如图 A.0.4 所示。试件总长度为 600 mm，第一次浇筑尺寸为 500 mm×100 mm×100 mm 的长方体，待达到一定强度后凿毛并进行两端楔形块的二次浇筑（图 A.0.4 中阴影部分）。最终成型后试件等截面段长度为 220 mm，两端楔形块长度均为 190 mm，等截面段横截面尺寸为 100 mm×100 mm，两端楔形块横断面由 100 mm×100 mm 线性变化为 100 mm×196 mm，并在最端头 30 mm 长度范围内为 100 mm×196 mm 的等截面，楔形块斜截面与长方体相应侧面角度为 16.7°。

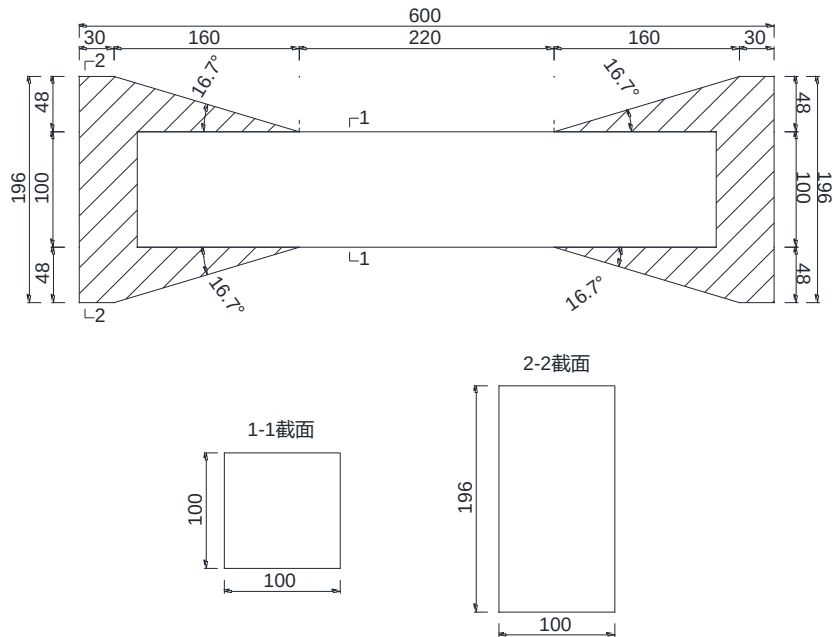


图 A.0.4 UHPC 轴拉试件设计尺寸图 (mm)

A.0.5 UHPC 轴拉试件钢筋的布置如图 A.0.5 所示。

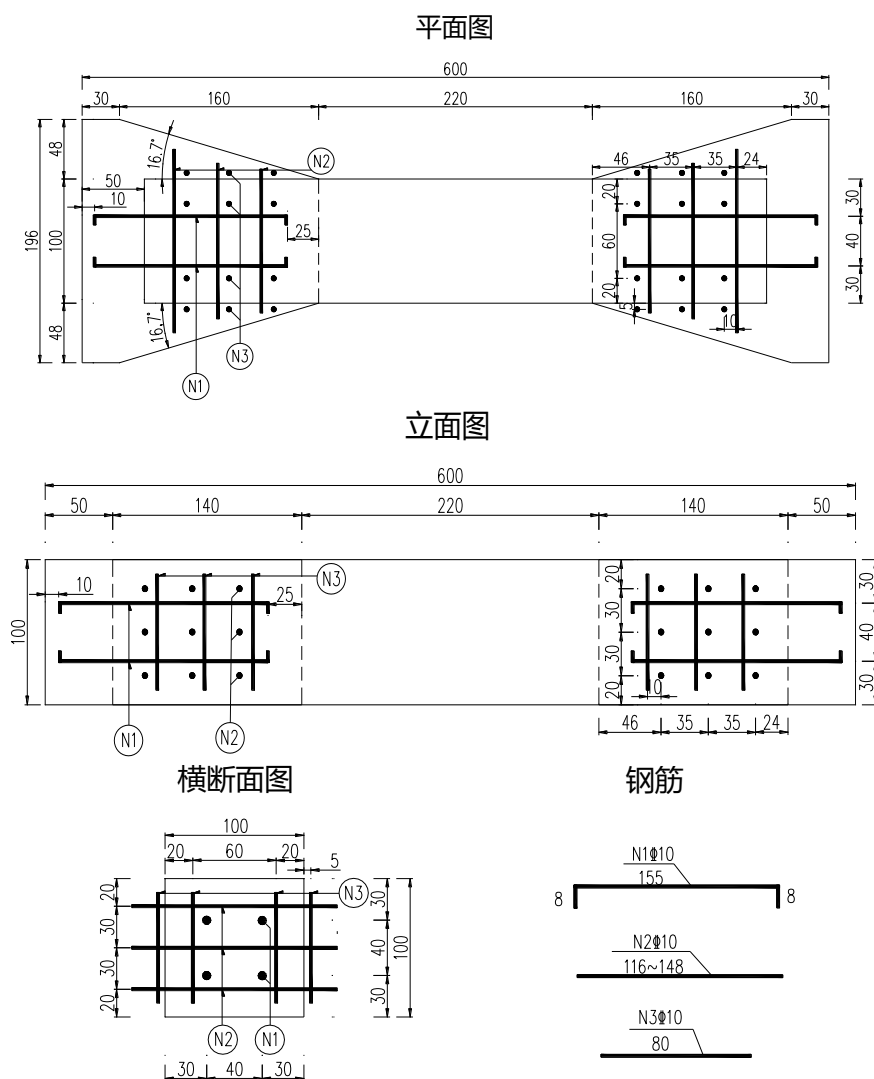


图 A.0.5 UHPC 轴拉试件普通钢筋布置图 (mm)

A.0.6 应对试件尺寸、模板制作与安装等全过程进行精细化控制，降低因试件自身带来的不利影响。UHPC 轴拉试件制备步骤如下：

a) 长方体等截面段第一次 UHPC 浇筑。试模内表面应涂上不与混凝土发生反应的脱模剂，试验成型后应立即用不透水薄膜覆盖表面。在模板两端植筋处开孔，孔径应略大于钢筋直径，便于 UHPC 能够自由变形而不受钢筋约束，同时应保证开孔处不会出现漏浆，浇筑时应振捣密实；

b) 两端楔形块第二次 UHPC 浇筑。试件养护至一定强度后，对两端二次浇筑处进行人工凿毛，并在两侧结合面处布置横向钢筋，在顶面钢筋端部焊接钢筋头，保证结合面抗剪、抗拔性能以防止两次浇筑界面处发生劈裂。浇筑楔形块时合理设计模板结构并采取科学的监测手段，保证楔形块两侧与第一次浇筑界面的夹角均为 16.7° 。采取有效措施控制 UHPC 试件各个相对面的对称性与平行度、表面平滑度。

A.0.7 为保证试件与试验机连接性能良好，连接装置上端设置双向转动功能，避免试件加

载过程中偏心引起的附加弯矩。

A.0.8 在试件各面标记参考点，选择四面中心位置粘贴应变片；设计钢支架并参照参考点进行安装，钢支架可用于安装磁性表座及电子百分表，电子百分表安装于四个侧面中心。试验前对原始标距进行记录，试验过程中密切观察钢支架与试件参考点位移值以判断支架与试件是否存在滑移现象。试验过程中分多级缓慢加载，关注 4 个应变片及 4 个电子百分表之间位移值是否存在较大差距，若存在较大偏位则应及时纠偏后方可继续试验操作。正式试验前应进行预拉检查应变片及电子百分表质量。试验前预拉以检查试件的偏心程度。预拉荷载为 10 kN，以应变测试结果为准，判断偏心程度，调整工装使偏心率小于 15%。偏心率计算公式（A.0.8）。

$$k = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \times 100\% \quad (\text{A.0.8})$$

式中： ε_1 、 ε_2 ——相对侧应变值；

k ——轴拉试件偏心率。

A.0.9 位移及应变测点布置如图 A.0.9 所示。正式试验前对试件预拉至 10 kN 以消除试验系统的非弹性变形，正式试验过程采用分级加载，每级荷载为 2 kN，加载速度为 4 kN/min，根据加载过程中实际情况进行必要的级数加密或改为位移控制，直至试件拉断。

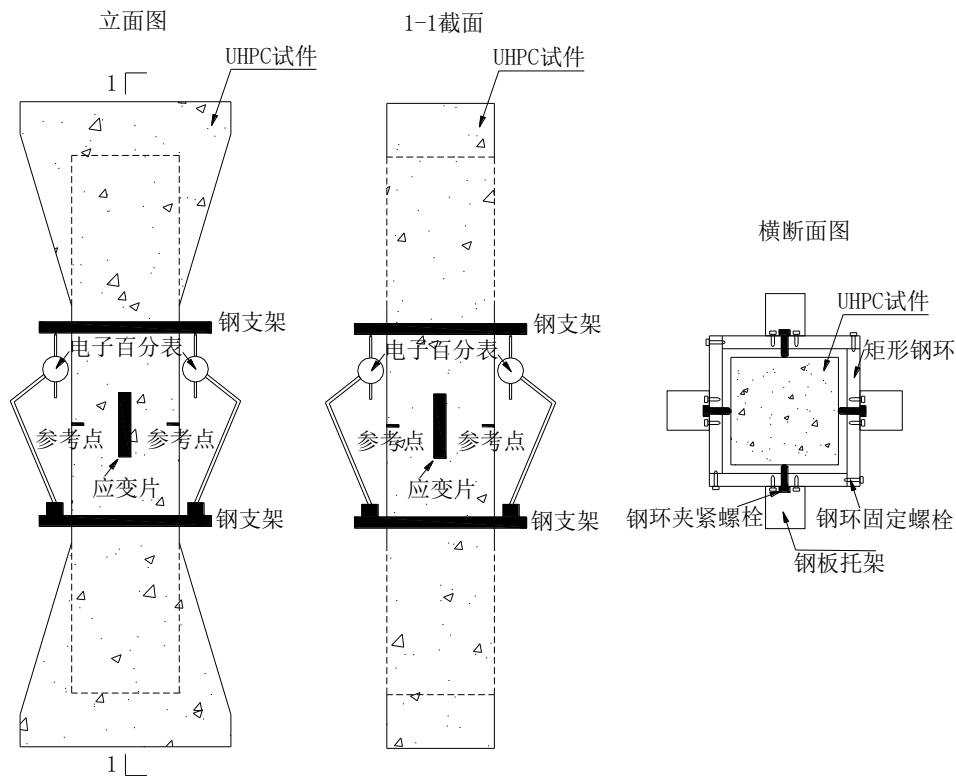


图 A.0.9 UHPC 轴拉试验加载方案

A.0.10 UHPC 轴心抗拉强度按下式计算：

$$f_t = \frac{F}{A} \quad (\text{A.0.10})$$

式中： f_t ——UHPC 试件轴心抗拉度（MPa）；

F ——试件破坏荷载（N）；

A ——试件中部横截面积（mm²）。

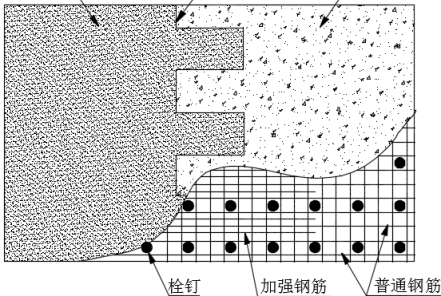
A.0.11 UHPC 轴心抗拉强度值的确定应符合下列规定：

- a) 三个试件测值的算数平均值作为该组试件的强度值（精确至 0.1 MPa）；
- b) 三个测值中最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的 15%时，则把最大及最小值一并舍除，取中间值作为该组试件的轴心抗拉强度值；
- c) 如最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的 15%，则该组试件的试验结果无效。

附录 B UHPC 层疲劳细节和疲劳寿命

B.0.1 UHPC 层的主要疲劳细节如表 B.0.1 所示，其中 f_t^r 、 $f_{t,joint}^r$ 参见附录 C。

表 B.0.1 UHPC 层的疲劳细节及分类

疲劳强度 (MPa)	细节位置及示意图	细节描述和施工要求
$0.5f_t^r$	UHPC 层连续区域	1) UHPC 层连续浇筑
$0.5f_{t,joint}^r$	UHPC 接缝区域  先浇段UHPC 接缝 后浇段UHPC 栓钉 加强钢筋 普通钢筋 ②	2) 先浇-后浇交界区域设置 UHPC 接缝

附录 C UHPC 名义弯拉应力容许值

C.0.1 配筋 UHPC 名义弯拉应力容许值

密配筋对于提高 UHPC 的开裂前抗拉强度具有显著效果。当桥面的面板厚 12mm，UHPC 层厚度为 50mm，纵横桥向配筋，直径为 10mm 时，各强度等级下，配筋 UHPC 的名义弯拉应力容许值可按表 C.0.1 取值。

表 C.0.1 各强度等级下配筋 UHPC 的名义弯拉应力容许值

强度等级	钢筋间距 (mm)	名义弯拉应力容许值 f_t^r (MPa)
UHPC100	100	13.2
	75	15.3
	50	18.4
UHPC120	100	15.2
	75	17.4
	50	20.3
UHPC140	100	17.2
	75	19.3
	50	22.4

C.0.2 UHPC 接缝的名义弯拉应力容许值

当施工中需要对 UHPC 进行分跨、分幅或分段浇筑时，应在先浇-后浇连接位置设置接缝。接缝处 UHPC 的名义弯拉应力容许值可按应表 C.0.1 中配筋 UHPC 名义弯拉应力容许值的 0.65 倍取值，如表 C.0.2 所示。

表 C.0.2 各强度等级下 UHPC 接缝的名义弯拉应力容许值

强度等级	钢筋间距 (mm)	名义弯拉应力容许值 $f_{t,joint}^r$ (MPa)
UHPC100	100	8.6
	75	9.9
	50	12.0
UHPC120	100	9.9
	75	11.3
	50	13.2
UHPC140	100	11.2
	75	12.5
	50	14.6

附录 D UHPC 层第二、三体系主要检算位置

D.0.1 UHPC 层第二、三体系应力计算时主要检算位置如表 D.0.1 所示。

表 D.0.1 UHPC 层第二、三体系应力计算主要检算位置

序号	检算位置	图示	说明
1	主梁腹板或纵隔板顶面位置		正应力，沿横桥向
2	横隔板顶面位置		正应力，沿纵桥向
3	纵肋腹板顶面位置-相邻横隔板间的跨中处		正应力，沿横桥向
4	纵肋腹板顶面位置-横隔板断面处		正应力，沿横桥向

附录 E 降低 UHPC 层名义拉应力的方法

E.0.1 当 UHPC 层抗裂验算不满足时，除采用提高 UHPC 等级、减小钢筋间距的方法外，还可以采用合理的措施降低 UHPC 层名义应力，使其满足抗裂要求。主要方法有：分阶段浇筑混凝土、预加荷载法、支点位移法等，也可以综合使用。

E.0.2 对于采用钢-UHPC 组合桥面体系的连续梁桥，正确安排 UHPC 层施工顺序，可以有效降低负弯矩区 UHPC 层的应力。分阶段浇筑如图 E.0.2 所示。

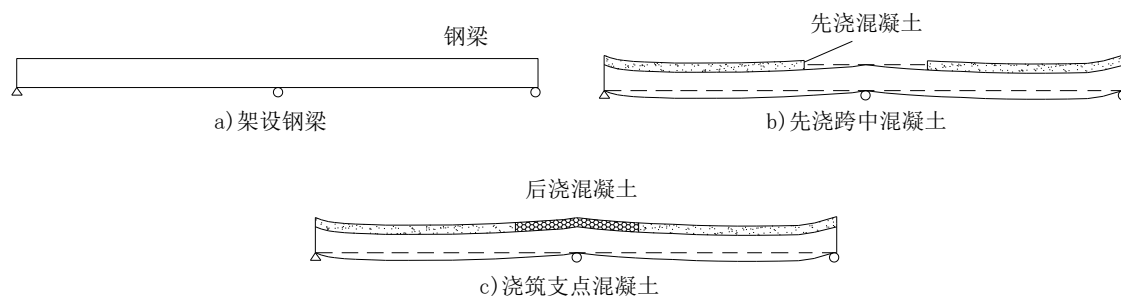


图 E.0.2 分阶段浇筑法

E.0.3 对采用超高性能混凝土钢桥铺装体系的连续梁桥，可采用预加荷载法或支点位移法，依靠钢梁的强迫变形对组合梁施加预应力，降低 UHPC 层的应力。如图 E.0.3-1 和图 E.0.3-2 所示。

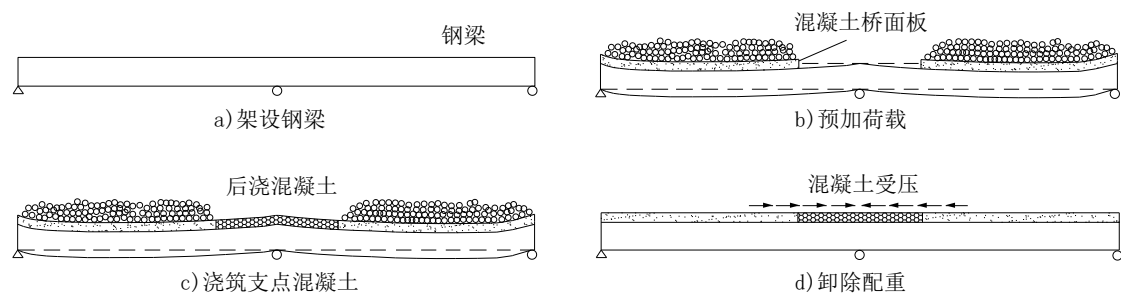


图 E.0.3-1 预加荷载法

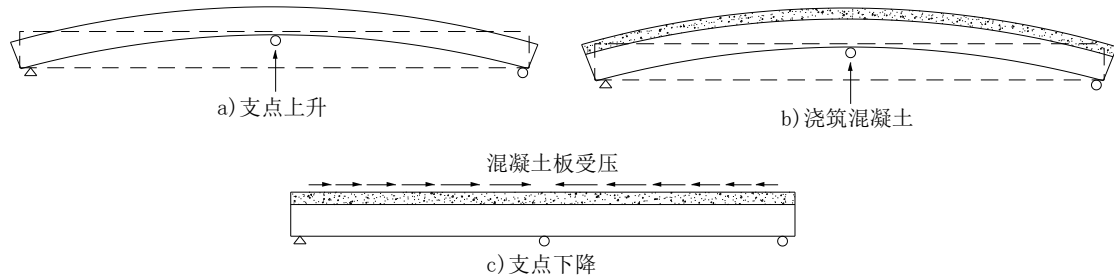


图 E.0.3-2 支点位移法

用 词 说 明

为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：

正面词采用“必须”、反面词采用“严禁”；

- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《铁路混凝土》TB/T 3275

《通用硅酸盐水泥》GB 175

《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596

《建设用砂》GB/T 14684

《钢纤维混凝土》JG/T 472

《混凝土外加剂》GB 8076

《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119

《混凝土用水标准》JGJ 63

《混凝土膨胀剂》GB 23439

《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081

《活性粉末混凝土》GB/T 31387

《铁路桥梁用结构钢》TB/T 3556

《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433

《铁路桥涵设计规范》TB 10002

《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092

《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091

《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080

《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415

《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424 的有关规定。

中国工程建设标准化协会标准

铁路钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面

技术规程

T/CECS XXX—202X

条文说明

目 次

1 总则.....	48
3 材料.....	53
3.1 UHPC	53
3.2 钢材	54
4 结构计算.....	55
4.1 一般规定	55
4.2 强度验算	55
4.3 刚度检算	56
4.5 疲劳验算	56
4.6 抗裂验算	56
5 抗剪连接件计算.....	60
5.1 一般规定	60
5.2 抗剪强度验算	60
5.3 抗剪连接件疲劳验算	60
6 构造要求.....	61
6.1 钢桥面板及剪力钉	61
6.2 超高性能混凝土层	61
6.3 接缝构造	61
7 施工.....	63
7.1 一般规定	63
附录 A 降低 UHPC 层名义拉应力的方法	64
附录 B 疲劳细节和疲劳寿命	65

1 总 则

1.0.1 目前我国已经制定了超高性能混凝组合桥面相关技术规范，规范的适用范围是公路正交异性钢桥面铺装。

随着铁路大跨度桥梁的建设规模日益扩大，正交异性钢桥面在铁路大跨桥梁中应用越加广泛。与公路钢桥面铺装不同，大跨铁路钢桥面防水铺装层设置于道砟以下，不直接承受列车机车车轮荷载，铺装层开裂破损不易被发现，雨水侵蚀钢桥面后引起钢桥面板锈蚀腐蚀，降低钢桥面板的使用寿命，且钢桥面铺装不易检查，维养难度大、成本高，为了避免因重新涂装桥面引起的铁路长期断道维养的现状，急需提出新的铺装结构来彻底解决铁路钢桥面的防腐的难题。

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)是一种具有超高力学性能及耐久性能的低收缩水泥基复合材料。鉴于 UHPC 独特的材料优势，在正交异性钢桥面板顶板上引入 UHPC 作为结构层,通过短栓钉形式的剪力键将 UHPC 结构层与正交异性钢桥面板形成组合桥面板协同受力，显著增大了桥面板的局部刚度，大幅降低各疲劳易损部位的应力幅,改善桥面的受力状况。UHPC 组合桥面铺装体系在铁路桥梁正交异性钢桥面上已有较多成功应用案例，并取得了良好的社会效应。表 1 列出了超高性能混凝土在国内铁路工程桥梁桥面体系中的应用情况。

表 1 国内已建成铁路超高性能混凝土组合桥面桥梁

序号	桥名	孔跨（m）	设计速度（km/h）	桥型	UHPC 层厚度(mm)	梁型	建成时间
1	蒙华铁路公安长江大桥	98+182+518+182+98	160	斜拉桥	60	钢桁梁	2018
2	蒙华铁路洞庭湖大桥	2×406	160	斜拉桥	50	钢桁梁	2018
3	沪通长江大桥天生港航道桥	141.5+336+141.8	120	拱桥	60	钢桁拱	2020
4	沪通长江大桥主航道桥	142+462+1092+462+142	250	斜拉桥	60	钢桁梁	2020
5	福厦铁路乌龙江特大桥	72+109+432+56+56	160	斜拉桥	50	混合梁	2023
6	包银铁路黄河大桥	80+80+310+80+80	250	斜拉桥	60	混合梁	在建

本规程的适用对象是铁路桥梁正交异性钢桥面铺装体系桥梁，即将超高性能混凝土应用在铁路正交异性钢桥面板上。在设计、施工等诸多方面，铁路超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的桥面结构不同于公路桥梁桥面铺装体系。因此，有必要为铁路超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁编写专用的技术规程。本规程结合了最新研究成果和实桥应用经验，以期为该类型桥梁的设计、施工与验收提供依据。

1.0.2 本规程的钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面技术适用于新建铁路有砟及无砟轨道钢桥面，既有钢桥铺装层的翻修与钢桥面板的加固可参考使用。

1.0.3 正交异性钢桥面板在国内应用广泛，但是其在长期运营中暴露出以下两类典型的病害：（1）在高频重列车荷载下，钢桥面板易出现疲劳裂缝；（2）钢桥面的常规防水铺装层易破损，需要频繁维修。这两类病害影响了桥梁的耐久性，使铁路桥梁难以断道养护的问题更加突出。本规程为解决这两类典型病害提供一种新的方案。因此，在超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁中，钢主梁特指具有正交异性钢桥面板的主梁结构。

铁路钢桥面防水铺装层需要适应桥梁变形，与桥面钢板的变形协调性要好，抗疲劳性能优越，同时应具有足够的强度和稳定性。

传统的铁路钢桥多采用明桥面加木枕的轨道结构形式，不存在钢桥面防水问题，较早期修建的铁路钢桥也多采用混凝土道砟槽板结构形式，桥面防水层基本采用铁路混凝土桥面防水层形式，常见的有：道砟槽板+卷材+钢纤维混凝土铺装层、聚脲弹性体防水层+聚丙烯纤维高性能混凝土铺装层等。由于采用了较厚的混凝土铺装结构，导致桥梁结构二恒质量较高，引起工程造价增加。同时，此类防护体系面层采用普通混凝土，在复杂应力作用下混凝土易开裂、松散，导致防水铺装层破坏。

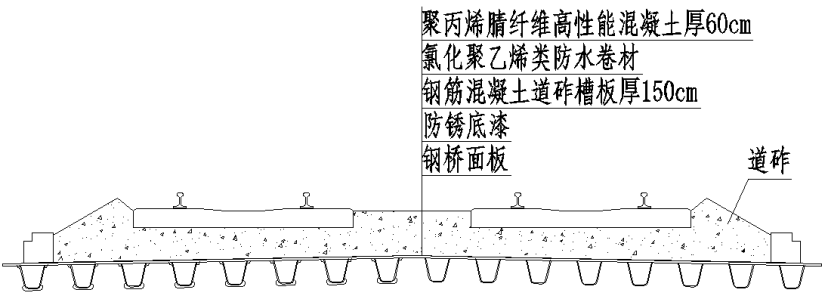


图 1 道砟槽板桥面防水铺装示意图

甲基丙烯酸甲酯（MMA）树脂防水铺装层是一种既可用于铁路混凝土桥面，也可用于钢桥面的防水铺装层，用于铁路钢桥面上时一般无需混凝土铺装层，其上面直接铺设道砟。

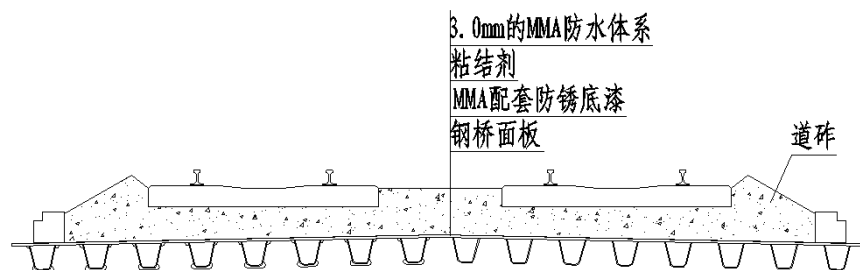


图 2 MMA 桥面防水铺装示意图

近年来，各类公路钢桥面柔性桥面防水铺装层如环氧沥青混凝土、浇注式沥青混凝土、ERS 树脂沥青组合体系等也纷纷在铁路桥面防水铺装层中采用。柔性铺装层除了具备混凝土铺装层的优点外，还具有随钢板协同变形能力强、与钢板连接紧密的特点，能够有效地保护钢桥结构，降低维修次数，延长整体使用寿命，对出现的细微病害也可采取灌封、挖补等工艺进行修补。但限于柔性铺装材料刚度较小，对正交异性钢桥面疲劳性能改善有限，且高分子材料在恶劣条件下的寿命不足。

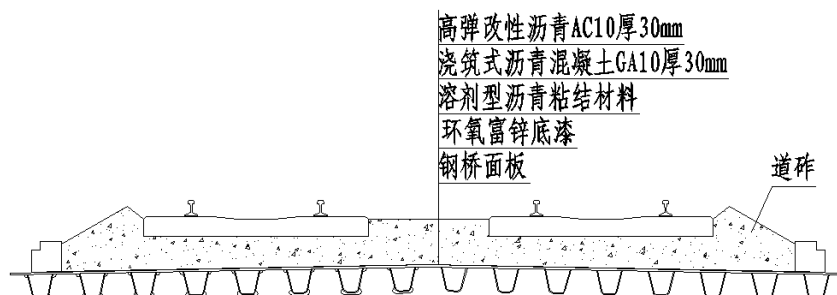


图 3 柔性防水铺装示意图

复合钢板作为一种新型铁路钢桥面防水铺装层，将多种钢材（主要为不锈钢）通过爆炸、轧制或爆炸轧制等工艺，与普通钢板（结构钢）复合而成的钢板。它同时具有 2 种不同钢种的特性，既有复层材料的良好耐蚀性，又有基层材料的高强度和韧性，同时还有较好的加工适应性和可焊性。铁路桥梁整体桥面结构选用复合钢板，替代常用的钢筋混凝土道碴槽板，可大大减轻结构质量，但经济性稍差。

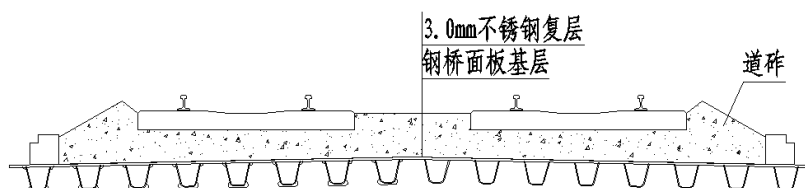


图 4 复合钢板防水铺装示意图

近年来，业内提出了一种超高性能混凝土组合钢桥面铺装体系。超高性能混凝土(简称UHPC)具有超高力学性能和良好耐久性能，将其引入钢桥面结构，通过短栓钉与钢桥面板相结合，形成组合铺装体系。在荷载作用下，该铺装体系可显著改善钢结构细节的疲劳性能，并且 UHPC 层不发生开裂破损，在设计状态下可以达到与主体结构同寿命。目前，该铺装体系已大量应用于公路桥梁工程中，取得了较好效果，而铁路钢桥面应用相对较少。

为提高铁路桥面铺装层的使用寿命，减少中期维修，降低全寿命周期的维护费用，在正交异性钢桥面板顶板上引入 UHPC 作为结构层，通过短栓钉形式的剪力键将 UHPC 结构层与正交异性钢桥面板形成组合桥面板协同受力，显著增大桥面板的局部刚度，大幅降低各疲劳易损部位的应力幅，改善了钢桥面板和铺装层的受力状况，同时也作为桥面防水材料，为防止外界水分渗漏到钢桥面板提供了附加防护。

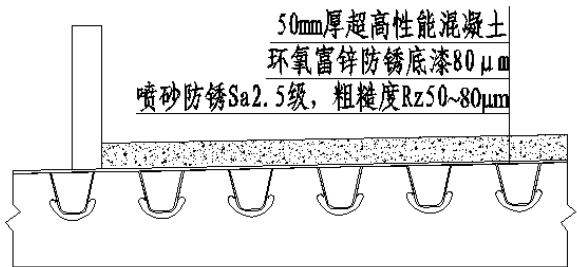


图 5 超高性能混凝土防水铺装示意图

表 2 铁路桥面防水铺装方案比较表

防水铺装类型	道砟槽板+卷材+纤维混凝土铺装层	MMA	柔性铺装层	复合钢板	超高性能混凝土
优点	混凝土道砟槽具有强度高、抑振质量大的特点	无混凝土层，大幅减轻桥面二恒，能适用各种基面，耐磨、流淌固化性好	浇注式沥青+高弹性改性沥青防水铺装层变形能力强，抗低温与抗疲劳开裂性能良好，水密性能好	不锈钢复合钢板，防腐性能好，强度高，寿命周期内无需养护、更换等	UHPC 强度高，抗裂性能好。桥面板参与全桥整体受力和局部受力，可提高结构刚度。后期无需养护更换。
缺点	采用剪力钉与桥面结合，参与结构受力，部分区域受拉,易开裂，需高配筋、设断缝等；道砟槽板自重大，导致结构内力相应增加	抗紫外线照射能力、耐磨及抗道砟动态碾压能力要求高	道砟铺设在柔性铺装层上，可能存在高温稳定性问题，施工要求高；挡砟墙范围较窄，大型施工机具操作存在困难	复合钢板焊接等要求高，接头疲劳性能可能会弱有降低	需采用剪力钉与桥面结合，需适当配筋。桥面板施工时养护要求较高

防水铺装类型	道砟槽板+卷材+纤维混凝土铺装层	MMA	柔性铺装层	复合钢板	超高性能混凝土
施工工艺	施工工序多，施工难度一般	直接喷涂 MMA 树脂涂料，施工较简单	一般须特殊设备，对施工环境要求较高	施工较简单，但焊接质量要求高	施工工艺及设备要求较高
经济性	一般，自重大会增加主体结构造价	全寿命周期考虑更换 5 次，费用 2000~2500 元/m ²	全寿命周期考虑更换 3 次，费用 3500~4500 元/m ²	不锈钢复合钢板折算费用 1500~2000 元/m ² ，无需更换	平均费用约 1600-1800 元，无需更换。

由上表 2 可知，铁路 UHPC 桥面具有强度高、耐磨性、抗渗性及耐久性好的特性，可实现与主体结构同寿命，具备全寿命周期免维护的优点，是一种新型绿色长寿的铁路钢桥面铺装方案。

1.0.4 本规程以铁路超高性能混凝土钢桥面铺装体系桥梁的系列研究成果为基础，并以国家现行行业标准为框架进行编写。因此，铁路钢—超高性能混凝土组合桥面体系的设计、施工与验收还应符合现行国家及行业标准的规定。

3 材 料

3.1 UHPC

3.1.1 UHPC 根据最紧密堆积理论配制而成，组成部分中没有粗骨料，并掺入大量钢纤维。该混凝土工作性能良好，可采用泵送施工，能实现自密实、自流平，具有超高的力学性能和耐久性能，特别是具有超高的抗拉强度和韧性。

3.1.2 胶砂强度较高并且掺加混合料较少的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，适合用于配制 UHPC，便于掺用较多的矿物掺合料来改善混凝土的性能。

3.1.5 钢纤维是 UHPC 层的必需组分，钢纤维的加入是为了提高 UHPC 层的韧性。UHPC 层需具有优异的抗拉性能以满足钢桥面板上的高拉应力要求，因此 UHPC 层的钢纤维体积率下限值不小于 2.5%。另一方面，钢纤维体积率过高，会增加材料成本，可能会产生纤维结团、工作性能和力学性能降低等不利影响，因此结合国内外已有经验 UHPC 层中纤维体积率不大于 3.5%。

3.1.6 现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 是我国关于外加剂产品的主要标准。现行国家标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 规定了不同品种外加剂的应用技术要求。UHPC 的水泥用量大、水胶比低，为保证 UHPC 的性能，宜用高性能减水剂，且减水率大于 30%。

3.1.7 混凝土用水包括拌合用水和养护用水。现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 包括了对各种水用于混凝土的规定。

3.1.10 本条中，超高性能混凝土轴心抗压极限强度、抗折极限强度及轴心受拉极限强度由中铁大桥科学研究院有限公司实验室实测得出，超高性能混凝土容许应力是以超高性能混凝土抗压极限强度为基础除以安全系数而得出，弯曲受压及偏心受压的安全系数采用 2.0。其中 UHPC 容重与施工配合比有关，其重量略重于普通混凝土，当钢纤维含量为 0~2%时，UHPC 容重可取 $25 \text{ kN/m}^3 \sim 28 \text{ kN/m}^3$ 。

3.1.11 UHPC 抗剪强度的计算公式参考了文献《混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量》（施士昇；1999）。

3.1.12 UHPC 弹性模量的取值参考了文献《Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》（FHWA；2013）的计算公式， $E_c = 3435.6\sqrt{f_{cu,k}}$ 。

3.1.13 本条文 UHPC 剪切模量的取值参考了《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092。

3.1.16 本条文 UHPC 的抗渗级别定义参考了《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011 第 3.3.2 条，测试方法一般采用逐级加压法。考虑到 UHPC 良好的致密性，本条规定其渗透压强为 2.0MPa，意味着 UHPC 在 2.0MPa 的静水压力作用下不会渗水。

3.1.17 UHPC 的抗氯离子渗透指标参考了法国超高性能混凝土材料规范《Concrete—Ultra-high performance fibre-reinforced concrete — Specifications, performance, production and conformity》（NF P 18-470， 2016）的有关规定。

3.2 钢 材

3.2.2、3.2.3 条参考了《铁路桥梁用结构钢》TB/T 3556 的相关条款。

4 结构计算

4.1 一般规定

4.1.1 铁路钢-UHPC 组合桥面桥梁第一体系整体计算可考虑 UHPC 层的受力，同时也要传递桥面荷载，承担列车荷载、温度作用、收缩徐变等引起的局部效应。

4.2 强度验算

4.2.1 钢梁和 UHPC 层是通过抗剪连接件互相联接成整体的。抗剪连接件是弹性材料制成，当其受力以后，必然伴随着剪切变形，所以严格地讲，整个组合截面受弯后保持平截面的假定是近似的，即 UHPC 层和钢梁只是部分共同作用而非完全共同作用，但常用的组合桥面若采用刚性抗剪连接件，或采用柔性抗剪连接件，抗剪连接件布置满足本规范的相关要求，在竖向荷载作用下是可以假定为完全共同作用的，即按平截面假定进行计算是满足计算精度要求的。

4.2.4 在进行钢梁和 UHPC 层弯曲剪应力计算时，分别按最不利情况进行计算：在计算钢梁剪应力时，假定竖向剪力完全由钢梁截面承担；在计算混凝土板剪应力时，假定竖向剪力由组合截面承担。剪应力计算点，一般取中性轴处、钢梁的腹板顶。

4.2.5 采用纯扭理论进行钢-UHPC 组合截面一般截面的应力计算，对于一般箱梁截面铁路组合截面梁，计算精度是可以保证的。

4.2.6 应力检算的目的在于使构件的任何截面的计算应力都不超过容许应力。

钢-UHPC 组合梁作为受弯构件，除了分别针对纵向正应力、横向正应力、剪应力进行检算外，尚应进行组合应力检算。组合应力包括纵向正应力、横向正应力、剪应力三部分内容，容许应力提高系数为 1.1。

对于钢梁的受拉翼缘，其计算面积均采用净截面积。由于铆接构件的钉孔由铆钉杆填充，应能传递压力。高强度螺栓连接的构件，则由于高强度螺栓的预拉力导致钢材侧面产生强大的压力，使栓孔断面处的局部屈服强度有所提高，因此钢梁的压翼缘在强度计算中均不需扣孔。

4.2.8 UHPC 层底面的最大拉应力计算应建立有限元局部模型，采用线弹性有限元模型。

4.3 刚度检算

4.3.1 钢-UHPC 组合桥面桥梁的挠度控制是结构刚度控制的要求，UHPC 层厚度通常较薄，对结构整体刚度的影响可忽略不计，铁路桥面采用 UHPC 方案显著增大了桥面板的局部刚度。因 UHPC 层裂缝限值比较严格（0.05mm），根据相关试验结果，UHPC 层的刚度亦无需考虑折减。

4.3.3 在计算挠度时，应考虑施工顺序的影响，考虑结合作用还未发生时钢梁在荷载下的挠度，而在 UHPC 层施工时还应考虑结合作用对挠度的影响。

4.5 疲劳验算

4.5.1 对大多数铁路桥梁结构，列车荷载是导致疲劳破坏的主要因素，故在本规程中对列车荷载作用下的疲劳验算进行规定。

根据沪通铁路长江大桥等工程计算分析，采用 UHPC 组合桥面后钢结构各疲劳细节最大应力幅与无铺装钢桥面各疲劳细节受力相比均有明显下降，最大应力幅降幅为 68.2%；由于 UHPC 组合桥面钢结构疲劳应力水平较低，低于常幅疲劳极限，极大改善了钢桥面板和铺装层的受力状况，因此，可基本消除后期钢桥面板的疲劳开裂风险。

4.5.2 热点应力法考虑结构宏观几何特征的变化与焊接接头带来的结构不连续引起的应力集中效应，但不考虑焊缝处局部几何特征的变化引起的缺口效应。热点应力包含线性分布的膜应力与弯曲应力，而不包括缺口引起的非线性应力峰值。需要强调的是热点应力并不是结构的真实应力，而是假想出来的。严格来讲，热点应力法仅适用于对焊趾的评估，但结合疲劳试验也可以推广到包含焊根在内的其它潜在裂纹萌生点的评估中。

4.6 抗裂验算

4.6.2 在超高性能混凝土钢桥面铺装体系中，要控制 UHPC 层的裂缝宽度，须对 UHPC 层进行配筋。试验研究表明，当钢面板厚 12mm，上铺 UHPC 层厚度为 50mm，纵横双向配筋直径为 10mm，净保护层 15mm，钢筋中心间距分别为 100mm、75mm、50mm 时，UHPC 层 0.05mm 裂缝宽度对应的名义弯拉应力如附录 C 所示。

UHPC 开裂验算的基本计算方法，验算的步骤如下：（1）计算关注位置 UHPC 层在主力或主+附组合下的第一体系应力和列车荷载作用下的第二、三体系应力，两者叠加得到名义弯拉应力计算值；（2）根据 UHPC 强度等级、是否为接缝及采用的钢筋间距，在附录 C 查出 UHPC 名义弯拉应力容许值；（3）将名义弯拉应力计算值与名义弯拉应力容

许值比较，判断是否满足要求。

4.6.3 目前还没有较权威的针对组合桥面板裂缝宽度的计算公式，因而通常都借用普通钢筋混凝土裂缝宽度的计算公式，根据《秦沈线钢与混凝土结合梁试验研究》（2000G006）的试验结果，采用我国《混凝土结构设计规范》GB 50010 中计算混凝土轴拉构件最大裂缝宽度公式的计算值最为接近结合梁裂缝宽度实测值。

本规程编制组通过组合桥面负弯矩受弯正交试验，研究了主要设计参数对钢-UHPC 组合桥面受弯性能的影响，并结合《混凝土结构设计规范》GB 50010 中裂缝宽度计算公式，对平均裂缝间距计算公式和钢筋应变不均匀系数计算公式进行了修正，建立了钢-UHPC 组合桥面最大裂缝宽度公式。

为便于理解验算裂缝中的公式，现给出一个算例：

1 算例概述

福厦铁路乌龙江特大桥孔跨布置为（72+109+432+56+56）m 四线铁路高低塔斜拉桥，该桥中跨主梁采用钢箱梁，边跨部分区域主梁采用预应力混凝土箱梁。钢箱梁为正交异性板结构，由顶板、底板、斜底板、纵腹板围封而成。顶板厚 16mm，底板厚度 20mm，钢箱梁两侧各设两道纵腹板，纵腹板厚度 32mm；顶板纵向设置 U 肋，加劲肋板厚 10mm、间距 600mm；底板纵向均采用 U 肋，U 肋板厚 8mm、间距 600mm。

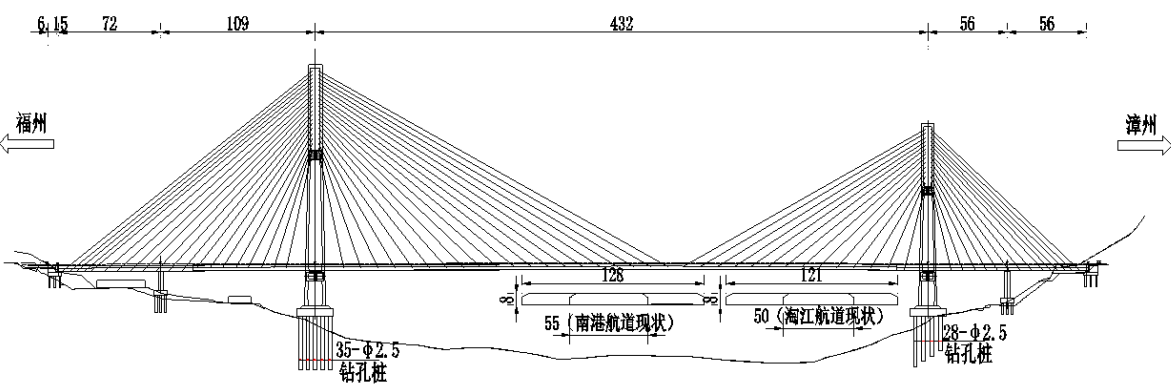


图 6 乌龙江特大桥桥式布置图（单位：m）

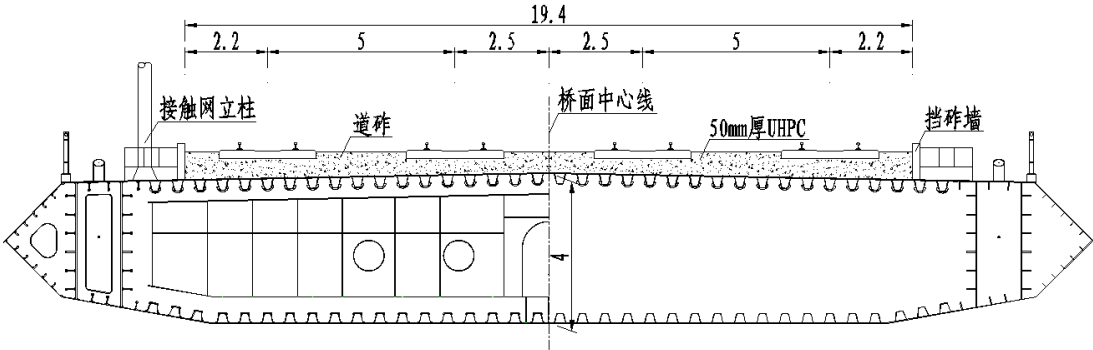


图 7 钢箱梁标准断面图（单位：m）

钢箱梁表面铺设 UHPC120 层，UHPC 层厚 50mm，宽 19.4m，之后再铺设道砟、铁轨等。钢筋网间距为 100mm×100mm，均采用 Φ10 HRB400 钢筋，横向钢筋布置于纵向钢筋上方。

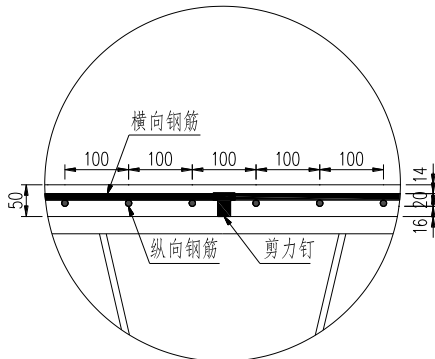


图 8 UHPC 铺装层横断面图（单位：mm）

2 由案例概述可得基本参数如下表所示：

表 3 由案例可得基本参数

基本参数	参数值
构件受力特征系数 α_{cr}	1.8
不配筋 UHPC 的轴心抗拉极限强度 f_{ct} （MPa）	8.7
受拉区钢筋截面总面积 A_g （mm ² ）	15315
有效受拉 UHPC 截面面积 A_c （mm ² ）	970000
钢筋的弹性模量 E_g （MPa）	200000
UHPC 层受拉钢筋外边缘至受拉侧表面的距离 c （mm）	24
受拉区钢筋直径 d （mm）	10
受拉区未开裂的 UHPC 高度 h_{td} （mm）	0
受拉钢筋重心位置至受拉 UHPC 上表面的距离 h_r （mm）	29
按有效受拉 UHPC 截面面积计算的受拉钢筋配筋率 ρ	0.016

3 根据全桥有限元计算及组合截面特性计算可得基本参数如下表所示：

表 4 全桥有限元计算及截面特性计算基本参数

基本参数	参数值
截面弯矩 M （N·mm）	378705227169
与截面弯矩相对应的钢-UHPC 组合截面换算截面惯性矩 I_{un} （mm ⁴ ）	6617956000000
受拉 UHPC 上表面到中性轴的距离 y_0 （mm）	1740
钢筋重心至换算截面中性轴的距离 y_g （mm）	1711

4 由上述基本参数，分别计算：钢筋重心处的拉应力 σ_g ；裂缝间受拉钢筋应变不均匀

系数 ψ ；UHPC 表面的最大裂缝宽度 $W_{\max}$ ，具体如下。

$$\sigma_g = \frac{My_g}{I_{un}} = 97.91 \text{MPa} \quad (1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.12 \frac{f_{ct}}{\rho \sigma_g} = 0.42 \quad (2)$$

$$W_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_g}{E_g} (1.06c + 0.152 \frac{d}{\rho}) \frac{y_0 - h_{td}}{y_0 - h_{td} - h_r} = 0.046 \text{mm} \quad (3)$$

裂缝宽度 $W_{\max} \leq 0.05 \text{mm}$ ，组合桥面 UHPC 层能够满足抗裂性能要求。

根据以往组合桥面 UHPC 层开裂强度参数研究的结论，对于 100mm 间距钢筋网、横向钢筋在上的构造，组合桥面 UHPC 层开裂强度为 16.3~23.8MPa，根据相关模型试验试验结果，由模型试验结果可知，组合桥面 UHPC 层开裂 0.05mm 时应力为 18.79MPa，乌龙江特大桥理论计算得出的 UHPC 层最大拉应力为 15.73MPa，组合桥面 UHPC 层能够满足抗裂性能要求。

由以上计算可知，本规范抗裂验算公式计算结果与以往组合桥面 UHPC 层开裂强度参数研究的结论相符。

4.6.4 本条文根据文献《Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete》（Rafiee A.; 2012）的研究结论，当裂缝宽度不超过 0.05mm 时，可认为裂缝对于 UHPC 的耐久性没有影响。

4.6.6 在超高性能混凝土钢桥面铺装体系中，控制 UHPC 层在荷载组合作用下，负弯矩区域的拉应力，尤其是位于钢主梁腹板、横隔板、纵隔板顶面位置的 UHPC 层。本条列出了计算中应该重点检算的不利位置。

5 抗剪连接件计算

5.1 一般规定

5.1.1 钢-UHPC 组合桥面中抗剪连接件宜采用栓钉，应保证 UHPC 层与钢主梁能有效地组合和共同承担荷载作用。

5.2 抗剪强度验算

5.2.1 依据中铁大桥科学研究院有限公司推出试件的试验结果，UHPC 抗压强度一般较高，较难发生压碎破坏，推出试验破坏形式为栓钉剪坏。故单个栓钉连接件的抗剪承载力设计值应根据栓钉剪切破坏确定。

5.2.2 超高性能混凝土钢桥面铺装体系结构抗剪连接件的作用（荷载）仅包含钢主梁与 UHPC 板组合后的各种荷载。在整体作用纵桥向剪力计算时，按弹性理论假设钢主梁与 UHPC 层完全结合来计算，不计钢与 UHPC 层间的粘结力及摩擦作用，不考虑负弯矩 UHPC 层开裂的影响。

5.3 抗剪连接件疲劳验算

5.3.2 抗剪连接件疲劳验算细则应遵循本规程第 4.5 节的规定。应建立有限元计算模型，抗剪连接件的疲劳验算应分别计算总体荷载效应和局部荷载效应，计算方法参考《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091 中的相关规定。

6 构造要求

6.1 钢桥面板及剪力钉

6.1.1 目前国内外正交异性钢桥面板中，钢桥面板顶板厚度一般不小于 14mm，对于超高性能混凝土组合桥面，考虑到 UHPC 层对桥面结构的刚度有一定贡献，钢桥面板顶板厚度可以适当减小，故本条规定钢桥面板厚度不小于 12mm。

6.1.2 剪力钉的设置优劣直接关系到 UHPC 层与钢桥面板之间的连接性能，进而影响桥面铺装体系的结构性能。在满足 UHPC 层与钢桥面之间连接受力要求的前提下，剪力钉的布置应满足一定的构造要求，防止因剪力钉布置不合理造成 UHPC 与钢桥面板连接失效。

6.2 超高性能混凝土层

6.2.1 UHPC 层厚度直接影响铁路组合桥面铺装的工作性能。为研究合理的 UHPC 层厚度，采用有限元法对 UHPC 层和钢桥面板受力性能分析，进而探讨 UHPC 层合理厚度区间，分析得知随着 UHPC 层厚度增加，肋间挠度减小，局部刚度增大，钢桥面板应力得到改善。当度介于 50~60mm 时，肋间挠度降幅接近 90.0%，钢桥面板应力改善效果明显，结合整体结构二恒的增量，综合考虑，理论上 UHPC 层的合理厚度区间为 50~60 mm。

6.2.2 UHPC 层中配置钢筋能够显著提高其抗裂性能，并适当考虑优化用钢量。在受压区，宜选用 100mm×100mm 钢筋网，在受拉区及受力复杂区域加密至 50mm，以提高 UHPC 层抗裂性能。钢筋在 UHPC 内锚固长度的取值参考了文献《Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》（FHWA；2013）。

6.3 接缝构造

6.3.1 接缝是超高性能混凝土钢桥面铺装体系的薄弱区域，其抗裂性能相对于非接缝区低一些，应避免将其设置在拉应力区，宜将其设置于压应力区，防止运营期开裂。由于接缝区是超高性能混凝土钢桥面铺装体系的薄弱区，应避免接缝区 UHPC 层受拉，因此宜将接缝区设置在两相邻横隔板（或纵肋）之间，接缝位置如图 9 所示。

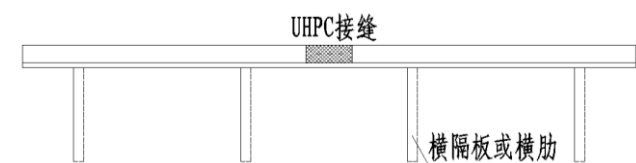


图 9 UHPC 接缝位置

6.3.2 接缝形式需兼顾施工便易性和传力可靠性，当采用其它特殊接缝时，应进行专题研究。

7 施 工

7.1 一般规定

7.1.7 超高性能混凝土钢桥面铺装体系在施工过程中如遇特殊气候条件，施工应符合下述规定：

- a) 施工时应随时检测气温和混合料、拌和水及路面的温度；
- b) 低温施工：当施工气温处于 5℃～10℃时，超高性能混凝土钢桥面铺装体系施工应采取适当的保温覆盖措施；
- c) 高温施工：当施工昼夜日平均气温高于 30℃时，注意对 UHPC 层洒水保湿养生。混凝土拌和物的温度不得超过 35℃。

附录 A 降低 UHPC 层名义拉应力的方法

A.0.4 试件形状与尺寸设计参照 CECS 13-2009《纤维混凝土试验方法标准》第 6.7 条“轴心抗拉强度和受拉应力-应变全曲线试验”。为避免浇筑试件时出现因变截面处收缩变形受到约束而过早出现裂缝的现象，试验采取分两次浇筑的方法制作 UHPC 轴拉试件。

附录 B 疲劳细节和疲劳寿命

B.0.1 从大量正交异性钢桥面板桥梁实际运营实践来看，正交异性钢桥面板在交变活载作用下，易发生疲劳失效的位置承受疲劳循环次数远远超过 200 万次，因此采用无限疲劳寿命设计的方法可较为有效地控制此类结构疲劳疲劳裂纹的产生。由于 UHPC 与正交异性钢桥面板组成组合结构以后将大大降低易疲劳位置的循环应力幅，可使得其组成的组合结构满足无限疲劳寿命设计的要求。参考综合相关组合桥面结构疲劳限值资料，中铁大桥科学研究院有限公司通过试验研究验证了 UHPC 层的疲劳极限强度（1000 万次）约为 0.5 倍配筋 UHPC（含接头）的静力名义弯拉应力容许值，可使得组合桥面钢结构和 UHPC 层不产生疲劳裂纹，满足耐久性要求。