



T/CECSG:*****-2027

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

型钢-超高性能混凝土组合桥梁技 术规程

Technical Specifications for Steel Section–Ultra-High
Performance Concrete Composite Beam Bridges

(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

型钢-超高性能混凝土组合桥梁技术规程

Technical Specifications for Steel Section-Ultra-High
Performance Concrete Composite Beam Bridges

T/CECS G: *****-2027

主编单位：湖南省交通规划勘察设计院有限公司

湖南省高速公路集团有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

施行日期：2027 年 XX 月 XX 日

中国计划出版社

2027 北 京

中国工程建设标准化协会

公 告

第 号

关于发布《型钢-超高性能混凝土组合桥梁技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2025 年第二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[2025]310 号）的要求，由湖南省交通规划勘察设计院有限公司、湖南省高速公路集团有限公司等单位编制的《型钢-超高性能混凝土组合桥梁技术规程》，经协会公路分会组织审查，现批准发布，编号为 T/CECS G:*****-2027，自 2027 年 月 日起施行。

中国工程建设标准化协会

二〇二七年 月 日

前言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2025 年第二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[2025]310 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程编制遵循“安全可靠、技术先进、经济合理、绿色低碳”的原则，旨在指导型钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计、施工、检验及验收，保障工程质量与施工安全。

本规程共分 7 章和 4 个附录，主要内容包括：总则、术语、材料、设计与计算、结构与构造、施工与控制、质量检评、附录 A UHPC 收缩应变和徐变系数计算、附录 B 纤维法抗弯承载力计算流程、附录 C 设计流程、附录 D 施工典型工序。

请注意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。

本规程基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于其他特定专项应用条件使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路专业委员会归口管理，由湖南省交通规划勘察设计院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，请反馈给湖南省交通规划勘察设计院有限公司（地址：湖南长沙市月亮岛路 598 号，邮政编码：410200，电子邮箱：heyaoBei@qq.com）。

主编单位：湖南省交通规划勘察设计院有限公司
湖南省高速公路集团有限公司

参编单位：****

主 编：黄 斌、林 鸣

主要参编人员：****

主 审：周 良

参与审查人员：****

参 加 人 员：****

目次

1 总则	8
2 术语	9
3 材料	10
3.1 一般规定.....	10
3.2 UHPC	10
3.3 型钢.....	13
3.4 钢筋.....	14
3.5 连接材料.....	14
4 设计与计算	15
4.1 一般规定.....	15
4.2 作用与作用组合.....	15
4.3 计算模型.....	16
4.4 承载能力极限状态计算.....	17
4.5 正常使用极限状态验算.....	23
4.6 短暂状况验算.....	27
4.7 耐久性设计.....	27
5 结构与构造	29
5.1 一般规定.....	29
5.2 总体布置.....	29
5.3 型钢部件.....	30
5.4 UHPC 部件.....	30
5.5 桥面湿接缝.....	31
5.6 钢樁连接件.....	32
5.7 梁段接头.....	32
5.8 支点横梁.....	33
5.9 跨间横隔板.....	34
5.10 负弯矩区抗裂措施.....	34
5.11 可维护性构造.....	34
6 施工与控制	36
6.1 一般规定.....	36

6.2 型钢部件制造.....	37
6.3 组合梁制造与存放.....	38
6.4 组合梁运输与安装.....	38
6.5 湿接缝施工.....	39
7 质量检评	41
7.1 一般规定.....	41
7.2 型钢部件.....	41
7.3 钢樨连接件.....	42
7.4 UHPC 部件.....	42
7.5 安装.....	43
附录 A UHPC 收缩应变和徐变系数计算	44
附录 B 纤维法抗弯承载力计算流程.....	46
附录 C 设计流程.....	49
附录 D 施工典型工序	50
本规程用词用语说明	52

1 总则

1.0.1 为规范公路和市政型钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计、施工、检验及验收工作，提高其施工质量和控制精度，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于采用 T 形对称切割型钢与 T 形 UHPC 梁上下承插的型钢-UHPC 组合桥梁。

1.0.3 型钢-UHPC 组合桥梁宜采用工厂化预制和现场拼接安装方式。

1.0.4 型钢-UHPC 组合桥梁的设计、施工、检验及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

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

具有超高强度、超高韧性、超长耐久性的水泥基复合材料。

2.0.2 型钢-超高性能混凝土组合桥梁 section steel-UHPC composite bridge

由 T 形对称切割型钢部件与 T 形 UHPC 部件上下承插形成组合受力构件的桥梁。

2.0.3 型钢-超高性能混凝土组合梁 section steel-UHPC composite beam

T 形对称切割型钢部件与 T 形 UHPC 部件上下承插形成整体，并在横截面内共同受力的梁，简称型钢-UHPC 组合梁。

2.0.4 型钢部件 section steel component

与 UHPC 部件形成组合截面并承担纵桥向主要受力的型钢构件。

2.0.5 UHPC 部件 UHPC component

与型钢部件形成组合截面并承担纵桥向主要受力的 UHPC 构件。

2.0.6 连接件 connector

连接型钢部件与 UHPC 部件并使其共同受力的构件。

2.0.7 联端横梁 cross beam at end support

型钢-UHPC 组合梁桥位安装后，一联桥两端支点处的混凝土横梁。

2.0.8 中支点横梁 cross beam at middle support

型钢-UHPC 组合梁桥位安装后，一联桥连续支点处的混凝土横梁。

2.0.9 跨间横隔板 internal diaphragm

主梁非支点处的跨间 UHPC 横隔板。

2.0.10 负弯矩区抗裂措施 anti-cracking measures at negative bending moment region

为控制组合梁连续支点负弯矩区桥面开裂而采取的构造或配筋措施。

3 材料

3.1 一般规定

型钢-UHPC 组合梁所用材料除应符合本规程的规定外，尚应符合有关法律、法规及国家、行业现行有关标准的规定。

3.2 UHPC

3.2.1 水泥宜采用强度等级不低于 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《通用硅酸盐水泥》（GB 175）的规定。

3.2.2 粉煤灰应符合现行《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）的规定；采用其他矿物掺合料时，应通过试验验证其对 UHPC 性能的影响，确认符合工程应用要求后方可采用。

3.2.3 细集料宜使用 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 ~ 0.63 mm）、中粒径砂（0.63 ~ 0.315 mm）和细粒径砂（0.315 ~ 0.16 mm）三个粒级，筛分试验应符合现行《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 3.2.1 的规定。石英粉中公称粒径小于 0.16 mm 的颗粒的体积比例应大于 95%。

表 3.2.1 不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量

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

3.2.4 钢纤维性能指标应符合下列规定：直径 0.10 ~ 0.25 mm，长度 6 ~ 25 mm，抗拉强度不应低于 2000 MPa，其他性能应满足现行《钢纤维混凝土》JG/T 472 的规定。钢纤维表面宜镀铜。

3.2.5 减水剂应符合现行《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%。

3.2.6 拌合用水应符合现行《混凝土用水标准》（JGJ 63）的规定，工程应用前应采用施工拌合水进行试拌，并确认 UHPC 性能。

3.2.7 膨胀剂应符合现行《混凝土膨胀剂》（GB 23439）关于 I 型膨胀剂的相关技术要求。

3.2.8 采用用于改善拌合物性能和 UHPC 性能的其他外加剂时，其性能应符合现行有关标准的规定，并应通过试验确认 UHPC 性能符合工程应用要求后方可采用。

3.2.9 UHPC 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 3.2.2 的规定采用。UHPC 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 3.2.3 的规定采用。

表 3.2.2 UHPC 轴心抗压强度

强度类型	强度等级					
	UHPC100	UHPC120	UHPC140	UHPC160	UHPC180	UHPC200
$f_{cu,k}$ (MPa)	100	120	140	160	180	200
f_{ck} (MPa)	70	84	98	112	126	140
f_{cd} (MPa)	49	58	68	77	87	97

表 3.2.3 UHPC 轴心抗拉强度

强度类型	强度等级			
	UT6	UT7	UT8	UT9
f_{tk} (MPa)	6	7	8	9
f_{td} (MPa)	4.1/K	4.8/K	5.5/K	6.2/K

条文说明

1 轴心抗压强度标准值:轴心抗压强度标准值 f_{ck} 为棱柱体抗压强度,其与混凝土强度等级(立方体抗压强度标准值)的关系为: $f_{ck}=0.88\alpha f_{cu,k}$, 式中系数 α 为棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值, UHPC100-UHPC200 取为 0.80。

2 轴心抗压强度设计值: 轴心抗压强度设计值 f_{cd} 为考虑材料分项系数的抗压强度设计值, 取值为: $f_{cd}=f_{ck}/1.45$ 。

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: 轴心抗拉强度设计值 f_{td} 为考虑材料分项系数和纤维取向系数 K 的抗拉强度设计值, 取值为: $f_{td}= (f_{tk}/1.45) /K$ 。

5 纤维取向系数: K 为纤维取向系数, 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。

3.2.10 UHPC 弹性模量 E_c 宜根据现行《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 3.2.4 采用。

表 3. 2. 4 UHPC 的弹性模量

强度类型	强度等级					
	UHPC100	UHPC120	UHPC140	UHPC160	UHPC180	UHPC200
$E_c (\times 10^3 \text{ MPa})$	40.6	43.4	45.7	47.5	49.1	50.4

条文说明

UHPC 弹性模量 E_c 与抗压强度标准值的关系为:
$$E_c = \frac{10^5}{1.5 + \frac{96.5}{f_{cu,k}}}$$

3.2.11 UHPC 的剪切变形模量 G_c 可按本规程第 3.2.10 条规定 E_c 值的 0.4 倍采用。

3.2.12 UHPC 的泊松比 μ_c 可取为 0.2, 温度线膨胀系数 α_c 可取为 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

3.2.13 UHPC 的徐变系数宜按现行《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)的规定进行测试, 收缩应变宜通过试验确定; 无实测数据时, UHPC 的收缩应变和徐变系数终极值可按本规程附录 A 取值

3.2.14 UHPC 的抗渗等级不应低于 P20 级。

3.2.15 UHPC 的抗氯离子扩散系数不应大于 $0.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

3.3 型钢

3.3.1 型钢材料可采用 Q235 钢、Q355 钢、Q390 钢、Q420 钢和 Q460 钢，钢材的质量应分别符合现行《碳素结构钢》（GB/T 700）和《低合金高强度结构钢》（GB/T 1591）的规定。型钢强度设计值应按表 3.3.1 取值。

表 3.3.1 型钢材料的强度设计值（MPa）

型钢		抗拉、抗压和抗弯	抗剪
牌号	厚度（mm）	f_d	f_{vd}
Q235 钢	≤ 16	190	110
	16~40	180	105
	40~63	170	100
Q355 钢	≤ 16	285	165
	16~40	275	160
	40~63	270	155
Q390 钢	≤ 16	310	180
	16~40	295	170
	40~63	280	160
Q420 钢	≤ 16	335	195
	16~40	320	185
	40~63	305	175
Q460 钢	≤ 16	370	210
	16~40	355	205
	40~63	345	200

条文说明

表中厚度系指计算点的钢材厚度，对轴心受拉和轴心受压构件系指截面中较厚板件的厚度。

3.3.2 型钢截面形式、尺寸及允许偏差应符合现行《热轧 H 型钢和剖分 T 型钢》（GB/T 11263）的有关规定。

3.4 钢筋

3.4.1 钢筋材料性能应符合现行《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。

3.4.2 型钢-UHPC 组合梁主要受力钢筋宜采用高强钢筋。

3.5 连接材料

3.5.1 构件中设置的电弧螺栓焊抗剪螺柱应符合现行《紧固件电弧螺柱焊用螺柱和瓷环》（GB/T 10433）的规定。电弧螺栓焊抗剪螺柱的力学性能应符合表 3.5.1 的规定。

表 3.5.1 电弧螺栓焊抗剪螺柱的力学性能（MPa）

代号	屈服强度 f_{std}^y	抗拉强度 f_{std}
SD1	≥ 350	≥ 400

3.5.2 型钢部件及连接件使用的高强螺栓应符合下列规定：

- 1 高强度螺栓、螺母、垫圈应符合现行《钢结构用高强度大六角头螺栓连接副》（GB/T 1231）或《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》（GB/T 3632）的规定；
- 2 高强度螺栓的设计预拉力值 P_d 应按表 3.5.2 采用；
- 3 高强度螺栓连接的钢材摩擦面抗滑移系数宜采用 0.45。

表 3.5.2 高强螺栓的设计预拉力值（kN）

螺纹直径规格		M20	M22	M24	M27	M30
性能	8.8S	125	150	175	230	280
等级	10.9S	155	190	225	290	355

3.5.3 型钢部件及连接件的焊接应符合下列规定：

- 1 手工焊接采用的焊接材料应符合现行《非合金钢及细晶粒钢焊条》（GB/T 5117）或《热强钢焊条》（GB/T 5118）的规定。选用的焊条型号应与主体金属性能相适应；
- 2 自动焊接或半自动焊接采用的焊丝和焊剂，应与主体金属性能相适应，并应符合现行相关标准的规定。

4 设计与计算

4.1 一般规定

4.1.1 型钢-UHPC 组合梁结构计算应按下列极限状态进行：

- 1 承载能力极限状态：包括构件和连接的强度破坏、疲劳破坏，结构、构件丧失稳定及结构倾覆；
- 2 正常使用极限状态：包括影响结构、构件正常使用的变形、开裂、界面滑移及影响结构耐久性的局部损坏；
- 3 短暂状况：包括构件在制作、运输及安装等施工阶段由自重、施工荷载等引起的应力。

4.1.2 型钢-UHPC 组合梁设计应根据作用类别、作用对结构和构件的影响以及桥梁所处环境条件，按下列设计状况进行极限状态验算：

- 1 持久状况应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计；
- 2 短暂状况应进行承载能力极限状态设计，必要时可进行正常使用极限状态设计；
- 3 偶然状况应进行承载能力极限状态设计；
- 4 地震状况应进行承载能力极限状态设计。

4.2 作用与作用组合

4.2.1 型钢-UHPC 组合梁结构计算应考虑结构可能承受的作用，包括结构重力、基础变位、UHPC 收缩和徐变、汽车荷载、人群荷载、施工荷载及温度作用等，并按现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）进行作用组合。

4.2.2 型钢-UHPC 组合梁作用效应计算应符合下列规定：

- 1 应按弹性方法计算，必要时应考虑结构二阶效应；
- 2 应考虑施工方法及施工顺序的影响；
- 3 应考虑 UHPC 收缩、徐变等因素的影响。

4.2.3 主要作用取值和计算应符合下列规定：

- 1 结构重力：型钢部件和 UHPC 部件自重应按构件实际重力计算；
- 2 基础变位：超静定结构当考虑由于地基压密等引起的长期变形影响时，应根据最终位移量计算构件的效应。当采用经验估值时，按《公路桥涵地基与

基础设计规范》（JTG 3363）的规定，相邻墩台间不均匀沉降差值（不包括施工中的沉降）不应使桥面形成大于 2‰的附加纵坡（折角）；

3 UHPC 收缩和徐变：超高性能混凝土的收缩应变和徐变系数终极值可按本规程附录 A 规定取值；

4 活载：汽车荷载及汽车冲击荷载、人群荷载按 JTG D60 规定取值；

5 温度效应：应按现行 JTG D60 的有关规定计算温度效应。

4.2.4 型钢-UHPC 组合梁结构计算工况应包括下列三个计算阶段：

1 阶段 I，梁体位于预制场内且处于多点连续支撑状态。该阶段应考虑结构自重，以及 UHPC 部件收缩、徐变引起的结构次内力等；

2 阶段 II，梁体处于简支受力状态。该阶段应考虑部分桥面系及附属设施自重，以及施工荷载等；

3 阶段 III，完成中支点横梁、联端横梁的现浇与体系转换，结构处于连续受力状态。该阶段应考虑剩余的桥面系及附属设施自重，以及使用阶段的可变作用等。

4.3 计算模型

4.3.1 型钢-UHPC 组合梁整体稳定、强度、刚度和疲劳分析时，可建立梁格模型或单梁模型。对形状规则桥梁，可采用单梁模型；形状特殊桥梁和超宽桥梁等，宜采用梁格模型。

4.3.2 采用单梁模型时，荷载横向分布系数符合下列规定：

1 在支点断面，采用横向铰接板法或杠杆原理法计算；

2 在四分点断面和跨中断面，采用偏心压力法计算。

4.3.3 采用梁格法建模时，可按图 4.3.1 建模，横向梁单元间距不应大于 1.5 m。

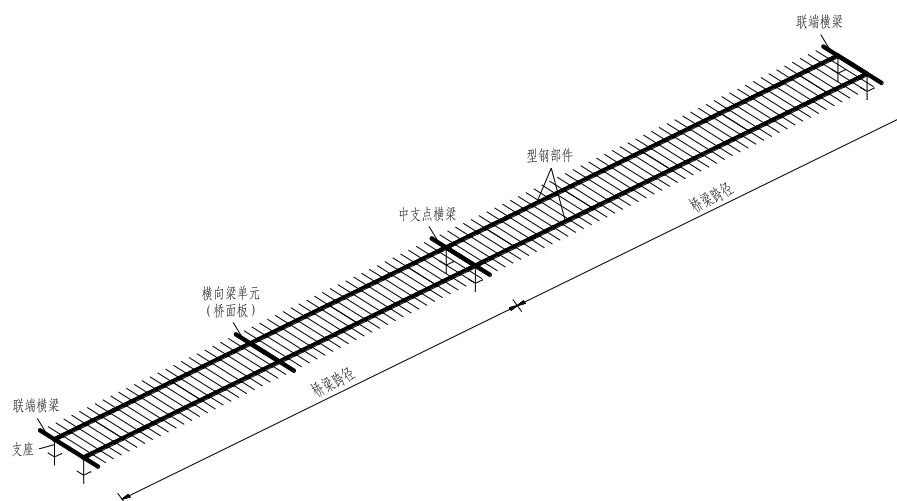


图 4.3.1 梁格法模型示意图

4.3.4 计算模型考虑 UHPC 部件与型钢部件一起承担荷载, 用于组合截面强度计算、型钢部件强度计算、UHPC 部件应力计算、裂缝宽度计算、挠度计算、疲劳计算及连接件数量计算等。

4.3.5 中支点横梁及联端横梁钢-UHPC 结合部、梁段接头分析宜采用有限元空间模型。

4.4 承载能力极限状态计算

4.4.1 抗弯承载力计算应符合下列规定:

- 1 抗弯承载力设计值应符合式 (4.4.1) 的要求:

$$M_u \geq \gamma_0 M_d \quad (4.4.1)$$

- 2 型钢-UHPC 组合梁抗弯承载力 M_u 宜采用塑性设计方法计算, 也可采用弹塑性设计方法计算, 采用弹塑性设计方法计算时应采用纤维法计算组合梁截面的抗弯承载力。纤维法抗弯承载力计算流程可按本规程附录 B 计算。

- 3 型钢-UHPC 组合梁承受正弯矩时, 采用塑性设计方法的抗弯承载力 M_u 可根据平截面假定, 按下列规定进行计算:

- 1) 当符合下列条件时

$$A_{um}f_{td} + A_{rm}f_{rd} + A_sf_{sd} \leq f_{cd}A_{ut} + f_{rd}A_{rt} \quad (4.4.2)$$

受压区翼缘取矩形截面, 同时应考虑受拉区翼缘和腹板超高性能混凝土的抗拉作用 (见图 4.4.1), 其正截面抗弯承载力应按下列规定计算:

$$x_0 b_{ut} f_{cd} + A_{rt} f_{rd} = (h_{ut} - x_0) b_{ut} f_{td} + A_{um} f_{td} + A_{rm} f_{rd} + A_s f_{sd} \quad (4.4.3)$$

$$M_u = \frac{1}{2} b_{ut} f_{cd} x_0^2 + A_{rt} f_{rd} y_{rt} + f_{td} b_{ut} (h_{ut} - x_0) y_{ut} + f_{td} A_{um} y_{um} + f_{rd} A_{rm} y_{rm} + f_{yd} A_s y_s \quad (4.4.4)$$

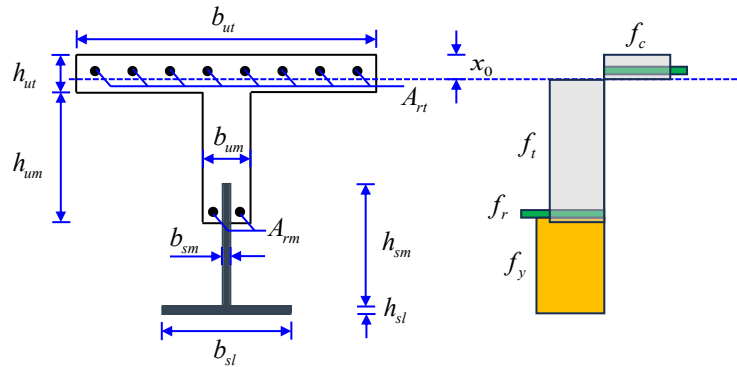


图 4.4.1 正弯矩抗弯设计计算图示 ($x_0 \leq h_{ut}$)

2) 当不符合式(4.4.2)的条件时, 计算中应考虑截面腹板受压及超高性能混凝土抗拉作用(见图 4.4.2), 其正截面抗弯承载力应按下列规定计算:

$$A_{ut}f_{cd} + (x_0 - h_{ut})b_{um}f_{cd} + A_{rt}f_{rd} = (h_{ut} + h_{um} - x_0)b_{um}f_{td} + A_{rm}f_{rd} + A_s f_{sd} \quad (4.4.5)$$

$$M_u = A_{ut}f_{cd}y_{ut} + (x_0 - h_{ut})b_{um}f_{cd}y_{umc} + A_{rt}f_{rd}y_{rt} + (h_{ut} + h_{um} - x_0)b_{um}f_{td}y_{umt} + A_{rm}f_{rd}y_{rm} + A_s f_{sd}y_s \quad (4.4.6)$$

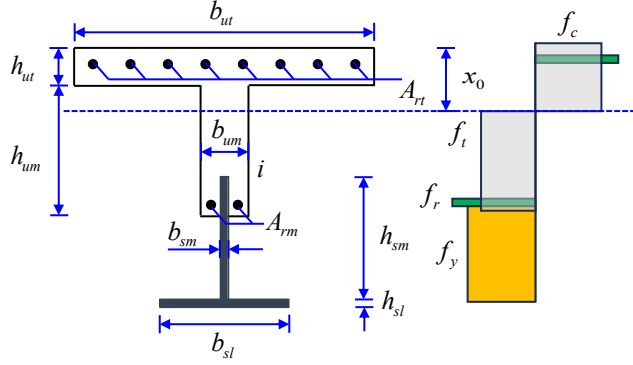


图 4.4.2 正弯矩抗弯设计计算图示 ($x_0 > h_{ut}$)

式中:

A_{ut} 、 A_{um} —UHPC 部件顶板、腹板的面积 (mm^2);

f_{cd} 、 f_{td} —UHPC 部件的抗压、抗拉强度设计值 (MPa);

f_{rd} 、 f_{sd} —钢筋、型钢部件的抗拉强度设计值 (MPa);

A_s —型钢部件面积 (mm^2);

y_{ut} 、 y_{um} 、 y_{umc} 、 y_{umt} —UHPC 部件顶板受拉部分、腹板、腹板受压部分和腹板受拉部分的形心到中和轴的距离 (mm);

y_{rt} 、 y_{rm} —UHPC 部件顶板纵筋、腹板下缘等效纵筋合力到中和轴的距离 (mm);

y_s —型钢部件形心到中和轴的距离 (mm)。

4 型钢-UHPC 组合梁墩顶负弯矩区域承受负弯矩时, 其采用塑性设计方法的抗弯承载力 M_u 可根据平截面假定, 按下列规定计算:

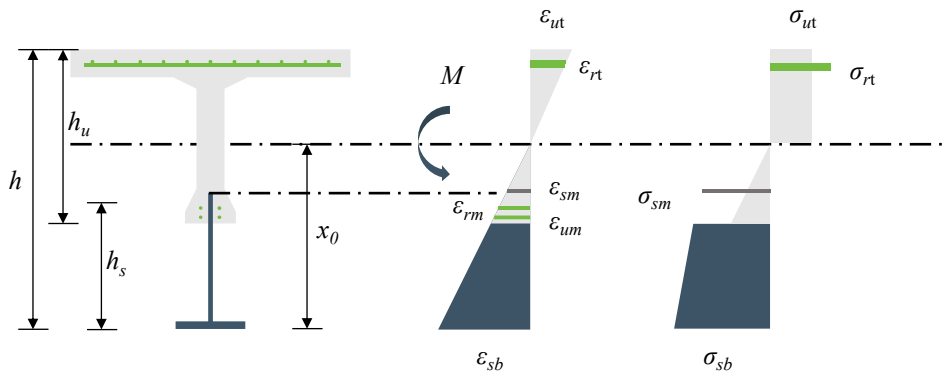


图 4.4.3 负弯矩抗弯设计计算图示

$$f_{td}(A_{ut} + 2y_{um}b_{um}) + f_{rd}A_{rt} = \frac{4y_{um}^2 f_{rd}}{3y_{rt}E_r} E_u b_{um} + \frac{y_{rm} f_{rd}}{y_{rt}} A_{rm} + \frac{(y_{sm} + y_{sl}) f_{rd}}{2y_{rt}E_r} E_s A_{sm} + \frac{y_{sl} f_{rd}}{y_{rt}E_r} A_{sl} \quad (4.4.7)$$

$$M_u = f_{td}(A_{ut} + 2y_{um}b_{um}) + f_{rd}A_{rt}y_{rt} + \frac{4y_{um}^3 f_{rd}}{3y_{rt}E_r} E_u b_{um} + \frac{y_{rm}^2 f_{rd}}{y_{rt}} A_{rm} + \frac{(y_{sm} + y_{sl}) f_{rd}}{2y_{rt}E_r} y_{sm} E_s A_{sm} + \frac{y_{sl}^2 f_{rd}}{y_{rt}E_r} A_{sl} \quad (4.4.8)$$

4.4.2 抗剪承载力计算应符合下列规定：

- 1 斜截面抗剪承载力设计值应符合式（4.4.9）的要求：

$$V_u \geq \gamma_0 V_d \quad (4.4.9)$$

- 2 斜截面抗剪承载力设计值 V_u 应按下列规定进行计算：

$$V_u = \min(V_{us}, V_{uL}) \quad (4.4.10)$$

- 1) 组合腹板斜截面抗剪承载力设计值应按下列规定进行计算：

$$V_{us} = V_s + V_c \quad (4.4.11)$$

$$V_s = \frac{1}{\sqrt{3}} f_y \cdot t_s \cdot h_s \quad (4.4.12)$$

$$V_c = t_U \cdot h_U \cdot f_{tk} + \frac{A_{sv}}{s} \cdot h_U \cdot f_{s2} \quad (4.4.13)$$

式中：

f_y ——型钢部件的抗拉强度设计值（MPa）；

t_s ——型钢部件腹板的厚度（mm）；

h_s ——型钢部件腹板的高度（mm）；

t_U ——UHPC 部件腹板的厚度（mm）；

h_U ——UHPC 部件腹板的高度（mm）；

f_{tk} ——UHPC 的抗拉强度标准值（MPa）；

A_{sv} ——UHPC 肋板中箍筋的截面积（mm²）；

s ——UHPC 肋板中箍筋的间距（mm）；

f_{s2} ——UHPC 肋板中箍筋的强度设计值（MPa）。

2) 组合腹板界面水平剪力决定的斜截面抗剪承载力设计值应按下列规定进行计算:

$$V_{uL} = \frac{V_{uG}}{e_x} z \quad (4.4.14)$$

式中:

V_{uG} ——组合腹板单个钢棒连接件水平抗剪承载力设计值 (N);

e_x ——钢棒连接件的间距 (mm);

z ——剪应力分布高度或内力臂, 可取为 0.9 倍梁高 (mm)。

4.4.3 钢棒连接件计算应符合下列规定:

1 钢棒连接件应按现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015) 第 9.3 节和《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015) 第 11.4 节的有关规定计算。

2 型钢-UHPC 组合桥梁型钢部件与 UHPC 部件结合面纵桥向水平剪力应采用线弹性方法计算, 计算时不应计入型钢部件与 UHPC 部件之间的黏结力和摩擦力, 并按未开裂截面进行分析。

3 单个钢棒连接件的水平抗剪承载力设计值应按下列规定计算:

$$V_{uG} = \min(V_s, V_{c,sp}, V_{c,A}) \quad (4.4.15)$$

1) 钢棒连接件部位钢棒的水平抗剪承载力 V_s 应按式 (4.4.16) 确定:

$$V_s = 0.72 \left(\frac{f_{td} \cdot t_U}{f_y \cdot t_s} \right)^\alpha \cdot f_y \cdot t_s \cdot e_x \quad (4.4.16)$$

式中:

α ——拟合系数, 取 0.376。

2) 钢棒连接件部位 UHPC 劈裂的水平抗剪承载力 $V_{c,sp}$ 应按式 (4.4.17) 确定:

$$V_{c,sp} = \frac{0.17e_x^2 + 0.28t_c^2}{0.25 \left(1 - \frac{t_w}{t_c} \right)} f_{td} \left(\alpha \frac{f_y \cdot t_w}{f_{td} \cdot t_c} + 0.3914 \right) \cdot (1 + \rho_{D,i}) \quad (4.4.17)$$

式中:

α ——拟合系数, 取 0.06408;

$\rho_{D,i}$ ——冲切配筋率, $\rho_{D,i} = \frac{E_r \cdot A_{sf}}{E_c \cdot A_{D,i}}$;

A_{sf} ——混凝土板中单个连接件上方横向钢筋的总横截面积 (mm^2);

$A_{D,i}$ ——单个钢棒连接件混凝土板的面积, 取 $A_{D,i} = h_c \cdot e_x$ (mm^2);

h_c ——UHPC 板的高度 (mm)。

3) 钢棒连接件部位 UHPC 剪切的水平抗剪承载力 $V_{c,A}$ 应按式 (4.4.18) 确定:

$$V_{c,A} = \alpha \cdot A_{c,A} \cdot f_{td} \cdot (1 + \rho_D) \quad (4.4.18)$$

式中:

$A_{c,A}$ ——钢棒的剪切面积, $A_{c,A} = e_x (t_U - 0.568t_s)$ (mm^2);

α ——拟合系数, 取 2.0613;

ρ_D ——剪切配筋率, $\rho_D = \frac{E_r \cdot A_b}{E_c \cdot A_D}$;

A_b ——混凝土卵中横向钢筋的横截面积 (mm^2);

A_D ——混凝土卵的面积, 取 $A_D = 0.2 \cdot e_x^2$ (mm^2);

4 钢棒连接件的抗剪刚度按下列公式计算:

$$K = \frac{\alpha \cdot P_u}{\delta_u} \quad (4.4.19)$$

式中:

K ——单个钢棒连接件的抗剪刚度 (N/mm);

P_u ——单个钢棒连接件抗剪承载力设计值 (N);

α ——荷载系数, 取 0.7;

δ_u ——单个钢棒连接件荷载 $\alpha \cdot P_u$ 时对应的滑移量 (mm)。

5 钢棒连接件的设计应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015) 的规定。

4.4.4 整体稳定计算应符合下列规定:

1 型钢部件稳定性验算应符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015) 的规定;

- 2 阶段 I、II，可不进行施工阶段整体稳定计算；
- 3 阶段 III，可不进行正弯矩区整体稳定性验算；
- 4 阶段 III，负弯矩区应按现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015) 的规定进行型钢部件侧扭稳定性验算。

4.4.5 倾覆稳定计算应符合 GB 50917 的规定。

4.4.6 疲劳计算应符合下列规定：

1 型钢部件疲劳计算符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015) 第 7.4 节和《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015) 第 5.5 节的有关规定。

2 UHPC 部件应对弯拉应力进行疲劳验算，并应符合下列规定：

1) 疲劳应力计算应按现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 考虑荷载作用，各项荷载应取用标准值；

2) UHPC 部件应力计算可采用名义应力法，按线弹性状态计算；

3) UHPC 部件疲劳名义弯拉应力允许值 $[f_{f,d}^f]$ 宜通过试验确定。无试验数据时，可取 $[f_{f,d}^f] = 0.5 \times [f_{f,d}]$ 。其中，UHPC 静力名义弯拉应力容许值 $[f_{f,d}]$ 可取本规程表 4.5.1 规定裂缝宽度限值对应的名义弯拉应力，裂缝宽度应按本规程第 4.5.3 条规定计算。

4) UHPC 部件疲劳验算时，UHPC 部件受拉区弯拉应力不应大于 UHPC 疲劳名义弯拉应力允许值。

3 钢棒连接件应按式 (4.4.18) ~ 式 (4.4.19) 进行疲劳验算：

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E2}}{\Delta \sigma_C} + \frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E2}}{\Delta \tau_C} \leq 1.3 \quad (4.4.18)$$

$\gamma_{Mf} \quad \gamma_{Mf,s}$

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E2}}{\Delta \sigma_C} \leq 1.0 \quad \frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E2}}{\Delta \tau_C} \leq 1.0 \quad (4.4.19)$$

$\gamma_{Mf} \quad \gamma_{Mf,s}$

式中：

$\Delta \sigma_{E2}$ 、 $\Delta \sigma_C$ ——疲劳荷载作用下型钢部件上缘等效正应力幅、钢材疲劳抗力，按现行《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64) 的有关规定计算 (MPa)；

γ_{Mf} ——疲劳抗力分项系数，按现行《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64) 的有关规定取值。

4.4.7 桥面板计算应符合下列规定：

1 型钢-UHPC 组合梁桥面板可按单向板计算，简支桥面板的计算跨径取相邻腹板间的净距加板厚，但不大于两腹板中心之间对的距离。此时，弯矩可按式（4.4.20）~式（4.4.21）简化方法计算：

1) 支点弯矩

$$M = -0.7M_0 \quad (4.4.20)$$

2) 跨中弯矩

$$M = 0.8M_0 \quad (4.4.21)$$

式中：

M_0 —与计算跨径相同的简支板跨中弯矩（ $\text{kN} \cdot \text{m}$ ）。

2 UHPC 桥面板应按矩形薄板构件进行抗弯承载力计算，并应考虑 UHPC 的抗拉作用。

4.5 正常使用极限状态验算

4.5.1 型钢-UHPC 组合梁按持久状况设计时，应进行截面应力、抗裂性、裂缝宽度和挠度验算，各项计算值应符合本规程规定的相应限值。

4.5.2 型钢-UHPC 组合梁的正常使用极限状态应符合下列规定：

1 对短期挠度验算及 UHPC 部件抗裂验算，作用（或荷载）应采用现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）短期效应组合；对长期挠度验算，作用（或荷载）应采用现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）长期效应组合；

2 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；

3 对连续梁等超静定结构，尚应计入由 UHPC 收缩徐变、基础不均匀沉降以及温度变化引起的次效应。

4.5.3 应力验算应符合下列规定：

型钢-UHPC 组合梁受弯构件在弯矩及预应力作用下产生的 UHPC 部件及型钢部件法向应力可按式（4.5.1）~式（4.5.4）计算：

UHPC 部件应力：

$$\sigma_{\text{UT}} = \frac{M_k}{n_0 I_0} y_{\text{UT}} \quad (4.5.1)$$

$$\sigma_{\text{UB}} = \frac{M_k}{n_0 I_0} y_{\text{UB}} \quad (4.5.2)$$

型钢部件应力：

$$\sigma_{ST} = \frac{M_k}{I_0} y_{ST} \quad (4.5.3)$$

$$\sigma_{SB} = \frac{M_k}{I_0} y_{SB} \quad (4.5.4)$$

式中：

σ_{UT} 、 σ_{UB} —UHPC 部件顶、底缘应力（MPa）；

M_k —截面弯矩值（N·mm）；

n_0 —型钢部件弹性模量与 UHPC 部件弹性模量的比值， $n_0 = E_s/E_u$ ；

I_0 —UHPC 部件与型钢部件组合截面的换算惯性矩（mm⁴）；

y_{UT} 、 y_{UB} —UHPC 部件顶、底缘至组合梁弹性中和轴的距离（mm）；

σ_{ST} 、 σ_{SB} —型钢部件顶、底缘应力（MPa）；

y_{ST} 、 y_{SB} —型钢部件顶、底缘至组合梁弹性中和轴的距离（mm）。

4.5.4 裂缝宽度验算应符合下列规定：

- 1 UHPC 部件应按作用频遇组合并考虑长期效应的影响验算裂缝宽度；
- 2 当 UHPC 部件的拉应力不大于 f_{tk}/K 时，可不验算 UHPC 部件裂缝宽度；当 UHPC 部件拉应力大于 f_{tk}/K ，应验算 UHPC 部件裂缝宽度。
- 3 UHPC 部件的裂缝宽度验算是指验算 UHPC 部件表面裂缝宽度，各类环境中 UHPC 部件最大裂缝宽度不应超过表 4.5.1 规定的限值。

表 4.5.1 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
-----------	------

4 型钢-UHPC 组合梁 UHPC 部件表面最大裂缝宽度 w_{tmax} 应按作用频遇组合并考虑长期效应的影响验算裂缝宽度，最大裂缝宽度 w_{tmax} 可按式 (4.5.5) 计算：

$$w_{tmax} = w_s (h - x - x') / (d - x - x') \quad (4.5.5)$$

式中：

h — 截面高度 (mm)；

d — 截面有效高度 (mm)；

x — 受压区高度 (mm)；

x' — UHPC 拉应力在 0 与 $f_{ctm,el}$ 之间的未开裂受拉区高度 (mm)；

w_s — 受拉钢筋表面最大裂缝宽度 (mm)，可按式 (4.5.6) ~ 式 (4.5.8)

计算：

$$w_s = S_{r,max,f} (\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f}) \quad (4.5.6)$$

$$\varepsilon_{sm,f} - \varepsilon_{cm,f} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{f_{tk}}{K \cdot E_{cm}} - \frac{1}{E_s} \left[K_t \left(f_{tk} - \frac{f_{tk}}{K} \right) \left(\frac{1}{\rho_{eff}} + \frac{E_s}{E_{cm}} \right) \right] \quad (4.5.7)$$

$$S_{r,max,f} = 2.55 (l_0 + l_t) \quad (4.5.8)$$

式中：

$S_{r,max,f}$ — 最大裂缝间距 (mm)；

$\varepsilon_{sm,f}$ — 裂缝间钢筋的平均应变；

$\varepsilon_{cm,f}$ — 裂缝间 UHPC 的平均应变。

σ_s — 裂缝位置的钢筋应力 (MPa)，计算正弯矩状态下 UHPC 腹板下缘最大裂缝宽度时，可按开裂截面、并假定中和轴位于 UHPC 腹板进行计算；计算负弯矩状态下 UHPC 面板表面最大裂缝宽度时，可假定受拉区全截面屈服，内力臂可取 $d \cdot x_{cr} / 3$ ，其中， d 为截面有效高度， x_{cr} 为按开裂截面计算得到的受压区高度；

E_s ， E_{cm} — 钢筋与 UHPC 的弹性模量 (MPa)；

f_{tk} — UHPC 的抗拉强度标准值 (MPa)；

ρ_{eff} —有效配筋率，需考虑 UHPC 腹板下缘钢筋与埋入部分钢棒连接件根部面积；

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

l_t —传递长度（mm）， $l_t = 2 \times \left[0.3k_2 \left(1 - \frac{1}{K} \right) \frac{1}{\delta \cdot \eta} \right] \frac{\phi}{\rho_{\text{eff}}}$ ， l_t 不应小于 0.5 倍 l_f ；

l_f —钢纤维长度（mm）；

l_0 —保护层厚度对裂缝间距的影响长度， $l_0 = 1.33c / \delta$ ；

c —钢筋保护层厚度（mm）；

δ —纤维对保护层的受拉性能与粘结强度的影响系数， $\delta = 1 + 0.4 \left(\frac{1}{K} \right)$ ， δ 不应大于 1.5；

k_2 —开裂截面的应变分布系数，对于受弯构件，可取为 0.5；对于纯拉构件，可取为 1.0；

η —钢筋的粘结系数；对于带肋钢筋，可取为 2.25；对于光圆钢筋，可取为 1.0。

4.5.5 挠度验算应符合下列规定：

1 型钢-UHPC 组合梁的挠度可根据给定的构件刚度用结构力学的方法，并考虑长期作用的影响进行计算；仅受正弯矩作用的组合梁，其抗弯刚度应取未开裂截面的折减刚度；连续组合梁宜按变截面刚度梁进行计算，在距中间支座两侧各 0.15 倍梁跨度范围内取开裂截面的折减刚度，其余区段仍取未开裂截面的折减刚度。

2 型钢-UHPC 组合梁的挠度验算尚应符合下列规定：

1) 受弯构件的刚度计算时，开裂截面折减刚度 B_{cr} 应考虑超高性能混凝土的抗拉作用；

2) 挠度长期增长系数取 $\eta_0 = 1 + \phi(t, t_0)$ ，式中 $\phi(t, t_0)$ 为加载龄期 t_0 ，计算考虑龄期 t 时的超高性能混凝土徐变系数，可按本规程附录 A 计算。

3 型钢-UHPC 组合梁的竖向挠度限值应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的有关规定。

4.5.6 局部稳定验算应符合下列规定：

1 型钢-UHPC 组合梁腹板局部稳定计算, 型钢部件腹板可按弹性约束于 UHPC 部件和型钢部件下翼缘的薄板考虑, UHPC 部件腹板可按弹性约束于 UHPC 桥面板和型钢部件的 UHPC 板考虑。

2 型钢部件腹板最小厚度应符合现行《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917) 的有关规定。

3 型钢部件下翼缘承受有较大固定集中荷载处, 应按承受固定集中荷载的轴心受压构件计算其在腹板平面外的稳定性。

4 应对 UHPC 部件桥面板承压稳定性和腹板的剪切稳定性能进行弹性稳定验算, 桥面板的承压弹性稳定系数和腹板的剪切弹性稳定系数不应小于 4.0。

4.6 短暂状况验算

4.6.1 短暂状况的应力验算, 应包括构件在制作、运输及安装等施工阶段由自重、施工荷载等引起的应力, 并应符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015) 的规定。

4.6.2 除另有规定外, 自重和施工荷载均应采用标准值; 温度作用可取施工期间可能出现的最不利温度; 采用梁上运梁工艺时, 运梁车及其运输的预制梁自重应乘以 1.3 的动力放大系数。

4.6.3 短暂状况下, 型钢-UHPC 组合梁的应力验算应符合下列规定:

- 1 UHPC 部件正截面的最大压应力不宜大于 $0.70f_{ck}$;
- 2 型钢部件应力不应大于 0.80 倍的强度设计值, 并应满足稳定性要求。

4.7 耐久性设计

4.7.1 型钢部件应根据环境确定防腐环境等级以及所需的保护年限, 同时应根据运营养护和经济合理的条件, 对不同位置的钢材按现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722) 的有关规定确定合理的防腐涂装系统。

4.7.2 UHPC 部件应符合现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362) 的耐久性设计规定, 并按现行《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTJ/T 3310) 的有关规定进行设计。

4.7.3 严重及以上环境等级条件, 宜减少型钢部件在大气区、浪溅区的表面积。浪溅区、水位变动区部位宜采用重防腐涂层、金属热喷涂层加封闭涂层保护措施。

4.7.4 暴露在 UHPC 部件之外的连接件、紧固件等，应设置可靠的连接方式，连接部位应进行防腐处理。

4.7.5 UHPC 部件浇筑前，应清除钢樨连接件表面的氧化皮、油脂和毛刺等缺陷。

4.7.6 UHPC 部件应设置防水层、侧面檐口、滴水槽。

4.7.7 伸缩装置应设置防水构造，桥台部位应设置排水通道。

5 结构与构造

5.1 一般规定

5.1.1 型钢-UHPC 组合梁的设计应与运输、架设方案统筹考虑，宜采用梁上运梁的运输方案、架桥机安装的架设方案与先简支后连续的结构形式，当桥位满足汽车吊施工条件时，可优先采用汽车吊安装。

5.1.2 型钢-UHPC 组合桥梁的结构设计应根据建设条件、施工技术、运营及养护等要求，进行标准化设计，结构与连接应简洁、合理。

5.1.3 型钢-UHPC 组合桥梁设计流程可按附录 C 执行。

5.2 总体布置

5.2.1 型钢-UHPC 组合梁的纵向布置应符合下列规定：

- 1 宜采用等跨布置；
- 2 连续跨数宜为 3 跨 ~ 5 跨，最大联长应综合考虑气候、抗震设防、墩高以及伸缩缝和支座形式等因素确定；
- 3 梁高宜采用等高形式，高跨比宜取 $1/20 \sim 1/25$ 。

5.2.2 横断面布置应符合下列规定：

- 1 型钢部件的横向间距宜为 $1.5\text{ m} \sim 2.0\text{ m}$ ；
- 2 双向四车道高速公路的单幅桥，宜采用 4 片预制型钢-UHPC 组合梁（见图 5.2.1）；
- 3 双向六车道高速公路的单幅桥，宜采用 5 片预制型钢-UHPC 组合梁（见图 5.2.2）。

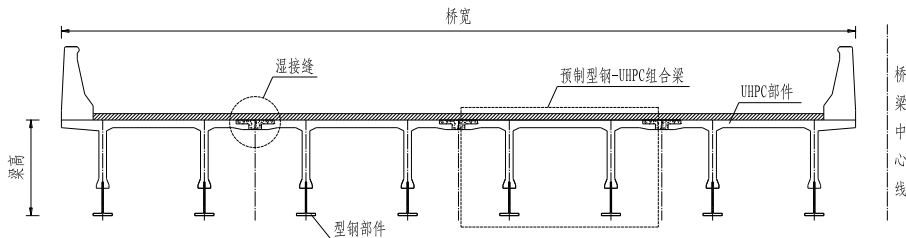


图 5.2.1 双向四车道高速公路标准横断面

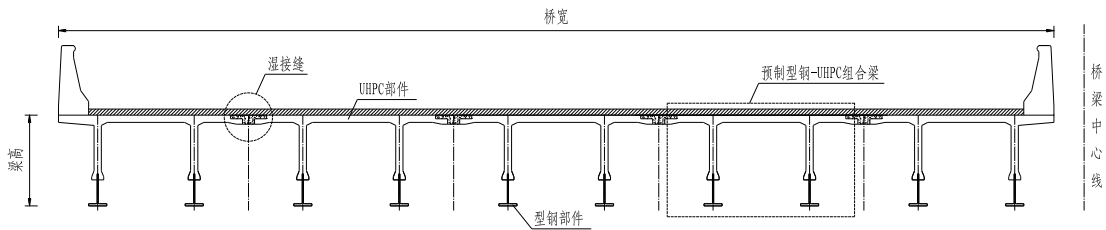


图 5.2.2 双向六车道高速公路标准横断面

5.2.3 型钢-UHPC 组合梁可不设桥面现浇层。桥面横坡宜由 UHPC 桥面板顶缘形成，其坡度应与路线单向横坡一致；型钢部件的下翼缘板宜保持水平布置（见图 5.2.3）。

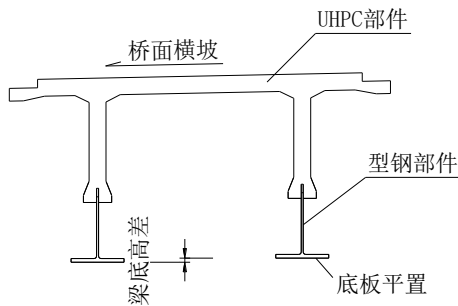


图 5.2.3 桥面横坡设置方式

5.3 型钢部件

5.3.1 型钢部件宜优先采用热轧 H 型钢对称切割而成，可采用焊接方式制作。

5.3.2 型钢部件腹板的厚度不宜小于 13 mm。

5.4 UHPC 部件

5.4.1 UHPC 部件与型钢部件在梁场台座上浇筑，形成先组合组合梁结构。

5.4.2 UHPC 部件腹板标准厚度宜取 100 mm～140 mm，应在钢棒连接件处做成马蹄状承托，厚度宜加厚至 200 mm。

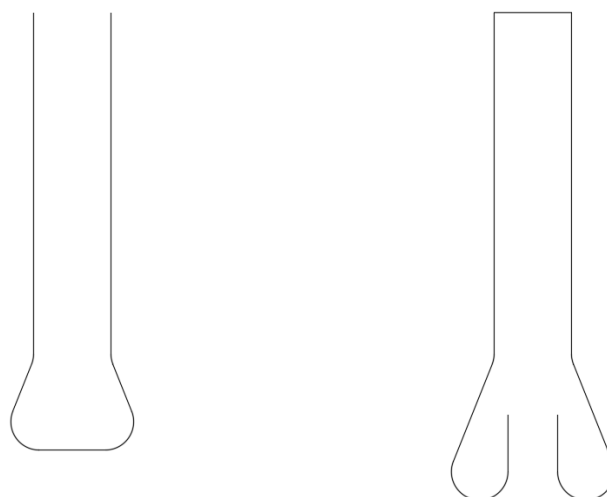
5.4.3 UHPC 部件顶板标准厚度宜取 120mm～140mm，护栏底部 UHPC 部件顶板应根据护栏防撞需求加厚。

5.4.4 UHPC 部件顶板应配置主要受力方向的主筋、与主筋垂直或斜交的分筋、梗腋加强筋等。顶板主筋应采用螺纹钢筋，直径不宜小于 10 mm。

5.4.5 UHPC 部件腹板应配置主要竖向箍筋、与箍筋垂直的分筋、承托加强筋及横向短钢筋等。腹板配筋应符合下列规定：

1 主要竖向箍筋应包括横向穿过钢棒连接件槽口的竖向箍筋及钢棒连接件处的竖向箍筋（见图 5.4.1），横向穿过钢棒连接件槽口的竖向箍筋顶部可不封闭，钢棒连接件处的竖向箍筋在支点 1 倍梁高范围内应加密布置。

2 承托加强筋直径不宜小于 16 mm。



a) 穿过钢棒连接件槽口

b) 钢棒连接件处

图 5.4.1 UHPC 部件竖向箍筋

5.4.6 UHPC 部件应设置穿过钢棒剪力键凹槽的横向短钢筋，直径不宜小于 12 mm。

5.4.7 钢筋中心间距不宜大于 150 mm，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 20 mm。

5.5 桥面湿接缝

5.5.1 桥面湿接缝的构造宜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。

5.5.2 桥面湿接缝宜选用 T 形湿接缝（见图 5.5.1），也可采用矩形湿接缝、楔形湿接缝，T 形湿接缝构造应符合下列规定：

1 预制 UHPC 部件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 30 mm，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 100 mm；

2 槽口深度 h_c 不宜小于 50 mm，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 500 mm，槽口宽度 b_c 不宜小于 150 mm；

4 接缝宽度 b_j 不宜小于 200 mm。

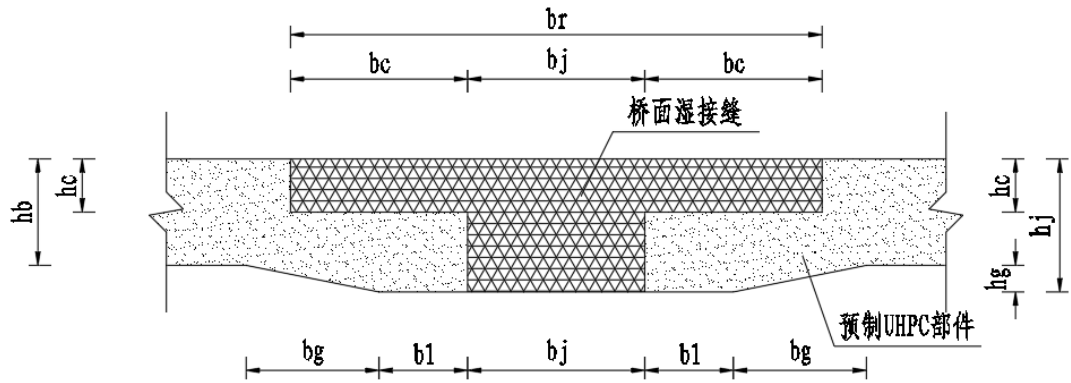


图 5.5.1 T 形湿接缝构造示意图

5.6 钢棒连接件

5.6.1 型钢部件与 UHPC 部件的结合应采用插入式钢棒连接件。

5.6.2 钢棒连接件沿跨度方向的间距 e_x 宜取 100 mm~300 mm；钢棒高度宜为钢棒连接件间距的 0.4 倍。

5.6.3 钢棒连接件形状及构造尺寸应符合图 5.6.1 的规定。

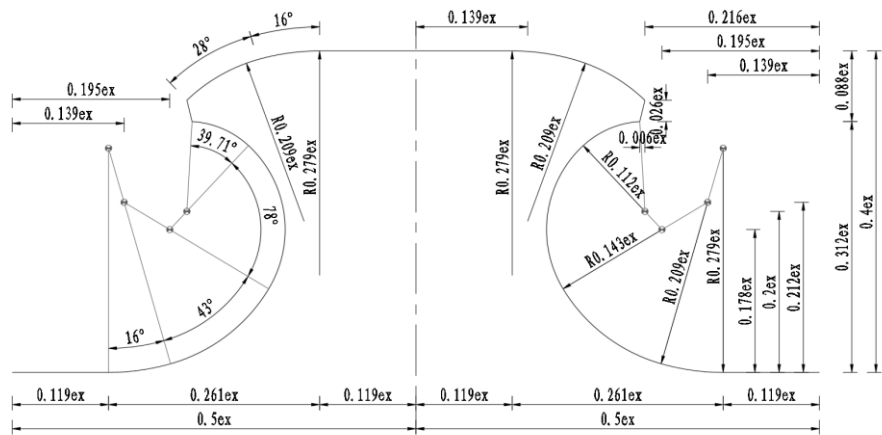


图 5.6.1 钢棒连接件形状和尺寸（图中符号变量斜体且下标正体）

5.6.4 钢棒连接件底部伸入 UHPC 部件不宜小于 40 mm。

5.7 梁段接头

5.7.1 梁段接头宜采用快速连接干接头（见图 5.7.1），可采用焊接连接湿接头（见图 5.7.2）。

5.7.2 UHPC 部件接头宜设置端部钢板，接头端部钢板顶面应采用焊接连接。

5.7.3 型钢部件腹板和下翼缘板应采用高强度螺栓摩擦型连接，拼接件宜采用钢板。

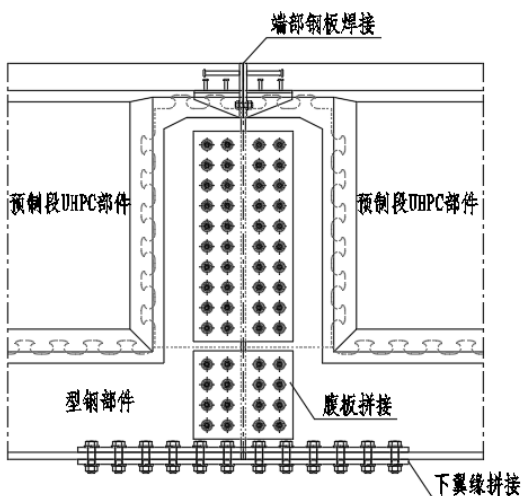


图 5.7.1 快速连接干接头示意图

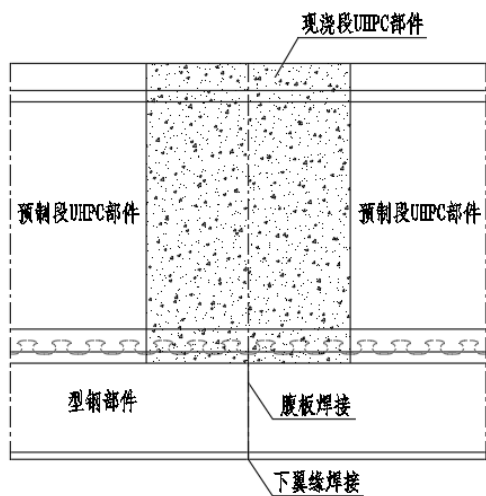


图 5.7.2 焊接连接湿接头示意图

5.8 支点横梁

5.8.1 中支点横梁、联端横梁宜采用横向贯通设计，宜采用高度高于型钢部件方式，见图 5.8.1。

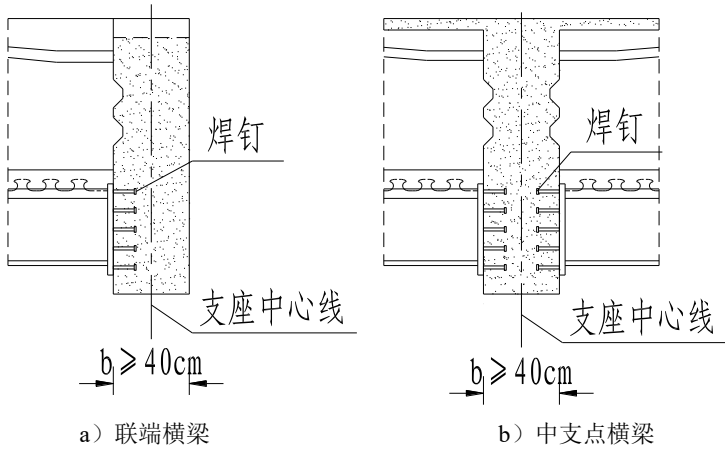


图 5.8.1 支点横梁示意图（图中宽度符号斜体）

5.8.2 中支点横梁、联端横梁的构造应符合下列规定：

- 1 当支座位于型钢部件正下方时，边支点端承钢板距梁端的距离 b 不宜小于 40 cm，中支点两端承钢板的间距 b 不宜小于 40 cm；
- 2 支座与型钢部件不对齐时， b 值应考虑加宽，加宽值不宜小于 10 cm。

5.8.3 支点横梁相对型钢部件加高的厚度 t 不宜小于 15 cm，加高后的支点横梁尺寸应满足支座锚栓的布置要求。

5.9 跨间横隔板

5.9.1 型钢-UHPC 组合梁宜设置跨间横隔板。

5.9.2 跨间横隔板宜设置在预制型钢-UHPC 组合梁 UHPC 部件内侧，预制梁间可不设置跨间横隔板。

5.9.3 跨间横隔板应与 UHPC 部件同高，板厚不宜小于 120 mm。

5.10 负弯矩区抗裂措施

5.10.1 跨中区域防撞护栏应在体系转换前的结构简支状态完成施工。

5.10.2 负弯矩 UHPC 部件顶板宜采用强配筋形式，控制 UHPC 部件裂缝宽度。

5.10.3 中支点横梁 UHPC 部件顶部增加水平台阶，现浇断面呈 T 形。T 形接缝后浇顶板厚度不宜小于 60 mm，后浇顶板纵桥向长度宜自中支点中心线向两侧各延伸 $L/10$ （ L 为跨径）（见图 5.10.1）。

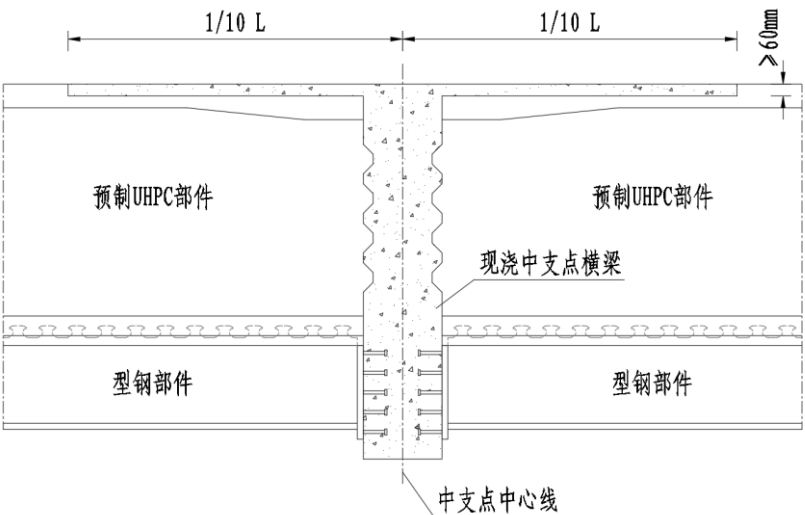


图 5.10.1 中支点横梁局部构造示意图

5.11 可维护性构造

5.11.1 梁体底面与桥墩顶面的净距不应小于 400 mm（见图 5.11.1）。

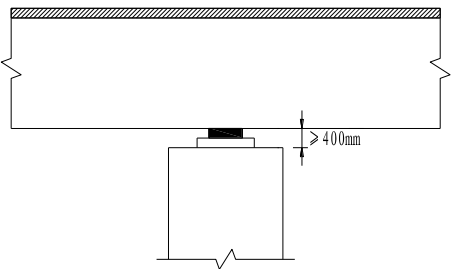


图 5.11.1 梁体底面与桥墩顶面净距示意图

5.11.2 更换支座时，其顶升支点应设置在临时支座中心线处。

5.11.3 桥面板的构造设计，应符合桥检车检查与维护作业条件。

6 施工与控制

6.1 一般规定

6.1.1 UHPC 材料宜优先选用干混料供应方式。

条文说明

目前超高性能混凝土的供应方式主要包括干混料供应方式和原材料供应方式两大类。干混料供应方式是指将各种固体原材料在工厂拌和均匀，经包装后运至使用现场，按一定比例加水和其他液体组分并搅拌均匀后，成为浇筑用超高性能混凝土。原材料供应方式是指在使用现场，先按一定投料顺序加入固体原材料并搅拌均匀后，再加水和其他液体组分搅拌均匀后完成超高性能混凝土的制备。

影响超高性能混凝土性能的主要因素有原材料的质量及是否形成了颗粒紧密堆积体。采用干混料供应，可在工厂完成超高性能混凝土颗粒堆积体的质量控制，并在出厂前做好有关性能检验，有利于保证超高性能混凝土的质量和可靠性，且使用方便。

6.1.2 UHPC 拌合物运输和浇筑过程中，严禁向拌合物中加水。

条文说明

超高性能混凝土水胶比低，其性能受用水量的变化敏感。因此在运输和浇筑过程中往超高性能混凝土拌合物中加水会明显影响强度，同时对其耐久性和其他力学性能产生不利影响，具有较大危害。

6.1.3 型钢-UHPC 组合梁施工流程宜按下列顺序进行：型钢部件制造→UHPC 部件浇筑预制→型钢-UHPC 组合梁架设→跨间横梁现场浇筑→纵向湿接缝及跨中护栏施工→中支点与联端横梁浇筑及体系转换→支点护栏施工→附属工程施工。施工典型工序可按附录 D 执行。

6.1.4 型钢部件的制造应符合现行《钢结构焊接规范》（GB 50661）和《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》（JTG/T 3651）的有关规定。

6.1.5 型钢部件的涂装应符合现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722）的有关规定。

6.1.6 UHPC 部件预制生产应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）和《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。

6.1.7 UHPC 部件的脱模强度和吊装强度应符合设计要求。设计未规定时，脱模强度不应低于 40MPa，吊装强度不宜低于设计强度的 85%。

6.1.8 型钢-UHPC 组合梁现场施工应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）和《公路工程施工安全技术规范》（JTG F90）的有关规定。

6.2 型钢部件制造

6.2.1 型钢的制造应符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）和《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》（JTG/T 3651）的有关规定。

6.2.2 型钢部件分段制造应综合考虑吊装、运输和出厂定尺规格等因素，并应符合设计文件要求，减少材料损耗。

6.2.3 钢樨连接件切割工艺应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的有关规定，应按均匀速度一次连续切割，切割路径示意图 6.2.2。

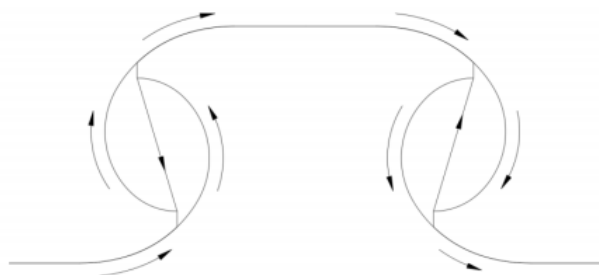


图 6.2.2 钢棒连接件的切割路径示意图

6.2.4 采用 H 型钢对称剖分制作 T 型钢时，应采用数控激光、数控等离子或数控火焰切割工艺，严禁采用手工切割。

6.2.5 型钢开孔应采用数控钻孔，严禁火焰割孔。

6.2.6 型钢部件的焊接应采用熔透焊接。

6.3 组合梁制造与存放

6.3.1 组合梁制作和存放除应符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）有关规定外，尚应符合下列规定：

1 UHPC 采用热养护时，梁段养护后即可安装，对存放时间不作要求。

2 UHPC 采用自然养护时，梁段的存放时间不宜少于 180 天。

6.3.2 UHPC 桥面板浇筑时宜采用满堂式支撑；采用多点支撑时，支撑间距不应大于 3 m。

6.3.3 UHPC 热养护结束后，应对型钢部件局部损伤的涂层按现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的有关规定进行表面处理。

6.3.4 现场梁段采用快速连接干接头拼接时，应在场内按单片预制组合梁进行整孔试拼装。

6.3.5 存放台座应坚固稳定，且高出地面不宜小于 200 mm，存放场地应设置排水设施。

6.3.6 构件应按工地架设顺序编号，并按吊运顺序安排存放位置。

6.3.7 多层叠放时，层与层之间应采用垫木隔开，上下层垫木应在同一竖直线上。叠放层数应根据组合梁桥面板强度、台座地基承载力、垫木强度和叠放稳定性经计算确定，且不宜大于 2 层。

6.3.8 雨季或冻融期施工时，应采取防止存放场地地基软化和下沉的措施。

6.4 组合梁运输与安装

6.4.1 组合梁的运输与安装施工应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）、《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》（JTG/T 3651）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。

6.4.2 安装施工前，应根据桥位环境条件、交通组织和施工机械能力等因素，选择整孔吊装、架桥机安装等安装方法，并制定专项施工方案。

6.4.3 组合梁运输和吊装系统应安全、稳定，并应采取措施防止作业过程中对梁体产生过大集中荷载和冲击作用。

6.4.4 吊装时应根据型钢部件下翼缘板高差采取垫平措施，防止梁体扭转、翘曲和侧倾，且不宜采用兜底吊；吊点宜设置 4 个并均匀布置，吊具刚度应符合受力要求。

6.4.5 组合梁简支阶段应设置临时支座，安装前应准确放样临时支座的平面位置和标高，并在临时支座上标识纵、横向中心线，作为安装基准线。

6.4.6 梁体落于千斤顶后，应复测组合梁的标高及坐标，并通过三向千斤顶调整其标高和平面位置，准确就位后落梁至临时支座。

6.4.7 支点横梁现浇混凝土达到设计强度后，方可拆除临时支座，完成体系转换。

6.5 湿接缝施工

6.5.1 施工前宜对接缝表面 UHPC 进行糙化处理，糙化深度宜为 8~10 mm。

6.5.2 浇筑前，接缝表面应清洗干净，保持润湿，不得有积水。

6.5.3 湿接缝处的模板与梁（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。

6.5.4 湿接缝 UHPC 浇筑时机和浇筑顺序应符合设计要求。若设计未规定时，应在一天中气温适宜的时段浇筑，且一联中的全部湿接缝应一次浇筑完成，浇筑过程中可采用人工插捣方式辅助密实。

6.5.5 湿接缝 UHPC 养护应符合下列规定：

1. 湿接缝 UHPC 应边浇筑边覆盖无纺土工布或养护薄膜，保湿养护时间不应少于 7 d；
2. 同条件养护试件的抗压强度达到 40 MPa 后，方可拆模；
3. 养护时环境平均温度宜高于 10℃，当环境平均气温低于 10℃或最低气温低于 5℃时，应采取冬期施工保温措施；
4. 现场养护时应采取防止产生收缩裂缝的措施。

6.5.6 组合梁体系转换前，UHPC 强度不应小于设计强度的 85%。

7 质量检评

7.1 一般规定

7.1.1 型钢-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《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTGF80/1)的有关规定。

7.1.2 分项工程、分部工程、单位工程质量评定应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTGF80/1)的有关规定。

7.2 型钢部件

7.2.1 型钢制造、安装和防护的基本要求、实测项目和外观质量应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTGF80/1)、《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》(JTGT3651)和《钢结构工程施工质量验收标准》(GB50205)的有关规定。

7.2.2 型钢部件的涂装表面处理、涂层外观质量、涂层干膜厚度、附着力检验应符合现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T722)的有关规定,涂层体系性能要求应满足设计文件要求。

7.2.3 型钢经对称剖分后,两腹板高度之差不应大于1.5mm,腹板垂直度偏差不应大于1mm。型钢翼缘贴合面的平面度和腹板侧面直线度均不应大于1.0mm/m,并应保证与T型UHPC构件承插连接的间隙均匀。

7.2.4 型钢开孔的孔径偏差和孔位偏差均应为 $\pm 0.5\text{mm}$,孔壁粗糙度Ra应不大于 $25\mu\text{m}$,且不应有无毛刺和飞边。

7.2.5 型钢部件的焊接应满足全熔透一级焊缝要求,并应进行100%UT无损探伤。

7.2.6 型钢部件出厂时,应提供下列资料:

1. 原材料复试报告;
2. 焊接工艺评定报告;
3. 无损探伤检测报告;

- 4. 预拼记录；
- 5. 防腐检测记录。

7.2.7 现场进场型钢验收应符合下列规定：

- 1. 型钢运输过程中产生的变形应进行检查；当型钢侧向弯曲矢高大于 $L/1000$ 时，应返厂矫正；
- 2. 结合面和钢樨的磕碰损伤应进行全数检查；当磕碰深度大于 1 mm 时，应按经批准的修复方案进行补焊、打磨；
- 3. 高强度螺栓连接摩擦面应按有关规定进行抗滑移系数见证取样复验

7.2.8 验收不合格的型钢应按下列规定处置：

- 1. 轻微尺寸偏差可采用冷矫正处理，矫正后应重新检验；
- 2. 焊缝探伤检测不合格时，应彻底清除缺陷后进行返修。同一部位返修次数不应超过 2 次，返修后应进行 100%超声波复验；
- 3. 结合面锈蚀或涂层大面积破损时，应重新进行喷砂除锈和防腐处理；
- 4. 对称剖分尺寸超差且无法矫正时，应作报废处理，不得降级使用。

7.3 钢樨连接件

7.3.1 钢樨连接件加工精度应符合现行《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205）的有关规定。

7.3.2 钢樨连接件加工允许偏差应为 $+2\text{ mm}$ ， -4 mm 。

7.4 UHPC 部件

7.4.1 UHPC 部件的基本要求和外观质量应符合现行《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。

7.4.2 UHPC 部件材料检验与性能试验应符合现行《超高性能混凝土》（GB/T 31387—2025）的有关规定。

7.4.3 UHPC 部件实测项目应符合表 7.4.3 的规定。

表 7.4.3 UHPC 部件预制实测项目

项次	项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	梁（板）长度（mm）	总长度	+5， -10	尺量：每梁顶面中线、底面两侧
		梁段长度	0， -2	

2	断面 尺寸 (mm)	宽 度	梁、板	干接缝(梁翼缘、板)	± 3	尺量: 每梁测 3 个断面, 每板测 2 个断面
				湿接缝(梁翼缘、板)	± 20	
		高度		梁、板	± 5	
		顶板、底板、腹板或梁肋厚			$+3, 0$	
3	平整度 (mm)				≤ 5	用 2 m 直尺; 沿梁长方向 每侧面每 10 m 梁长测 1 处 $\times 2$ 尺
4	横梁及预埋件位置 (mm)				≤ 4	尺量: 每件
5	横坡 (%)				± 0.15	水准仪: 每梁测 3 个断面, 板测 2 个断面

条文说明

与普通混凝土构件相比, 超高性能混凝土构件壁厚更轻薄。为确保施工质量, 结合国内工程经验, 在现行《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, 适当提高了超高性能混凝土构件壁厚、预埋件位置等预制要求。

7.5 安装

组合梁的安装除应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 的有关规定外, 实测项目还应符合表 7.6 的规定。

表 7.6 组合梁、板的安装实测项目

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

附录 A UHPC 收缩应变和徐变系数计算

A.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 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，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：

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

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

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

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 $c=-2.48, d=-0.86$ 。

A.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 $0.4f_{\text{cu,k}}$ 时，超高性能混凝土的徐变系数可按下式计算：

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

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

C.0.1 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 C.0.1 取值。

表 A.0.1 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 $\phi_0(t_\infty, t_0)$	系数 a	系数 b
4	标准养护	1.2	0.6	3.2
7	标准养护	1.0	0.6	4.5
28	标准养护	0.8	0.6	10
-	标准热养护结束后	0.2	0.6	10

附录 B 纤维法抗弯承载力计算流程

B.0.1 纤维法抗弯承载力应按下图流程计算。

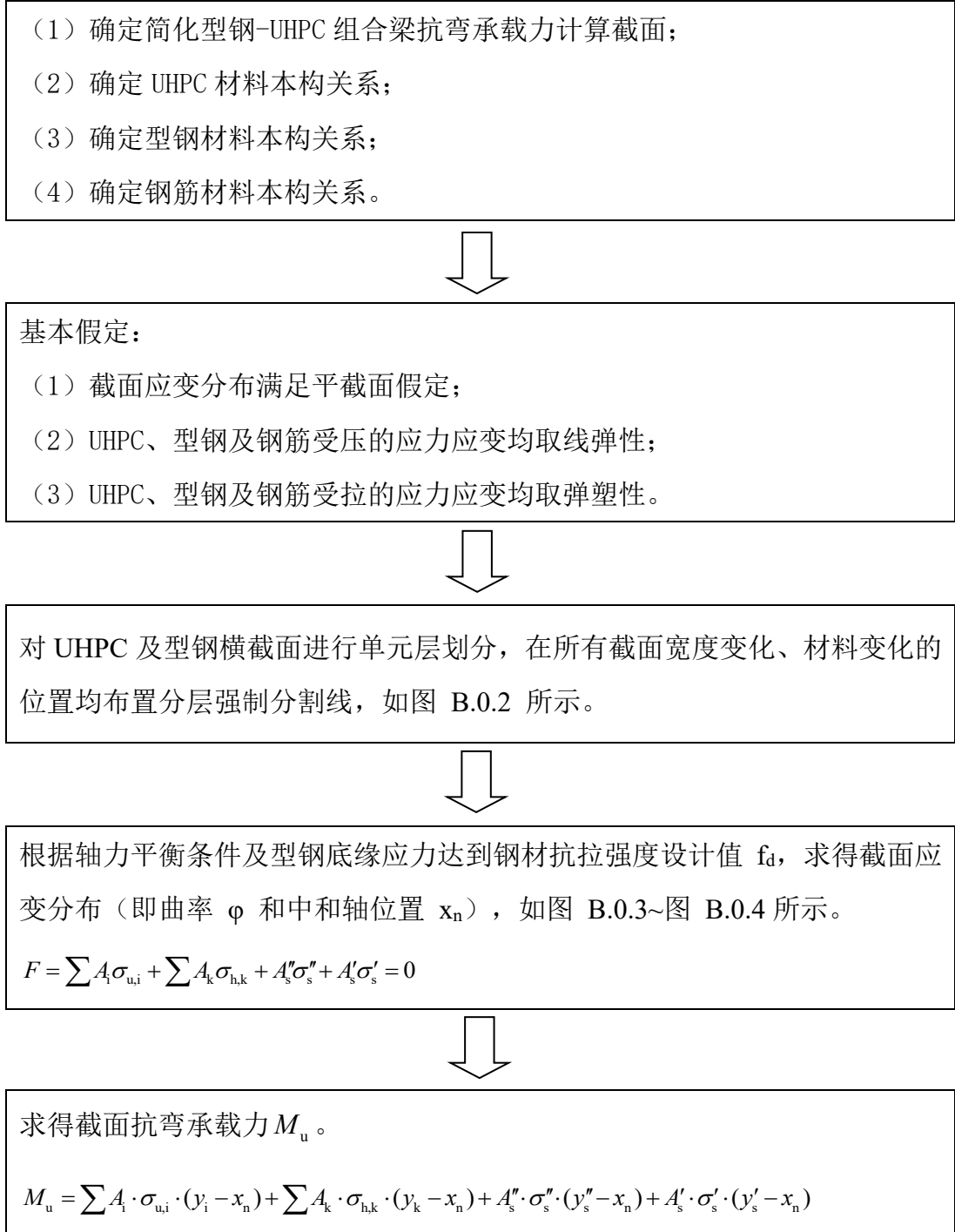


图 B.0.1 纤维法抗弯承载力计算流程图

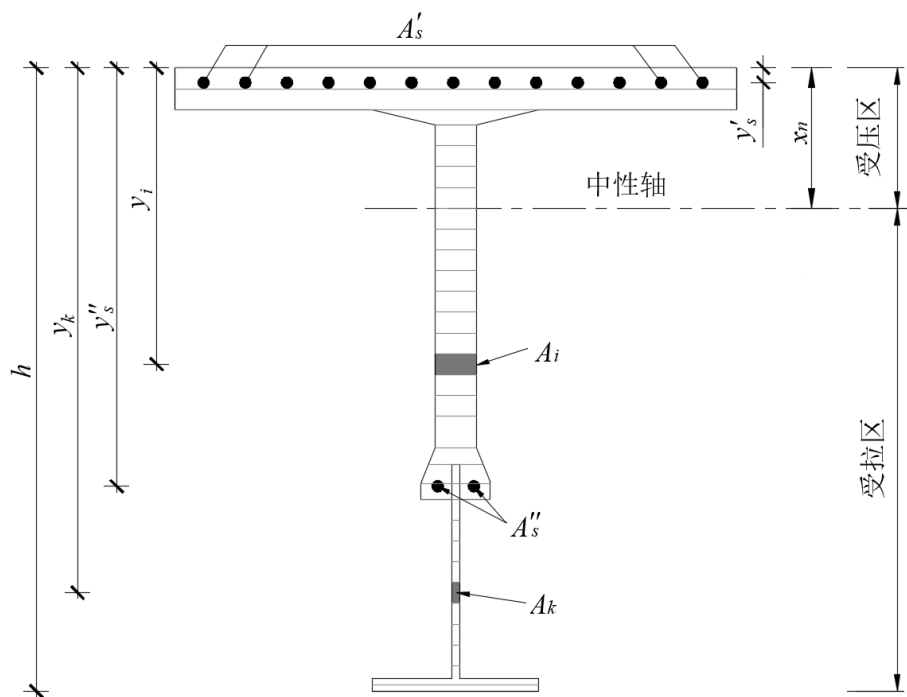


图 B.0.2 纤维法计算分层图示

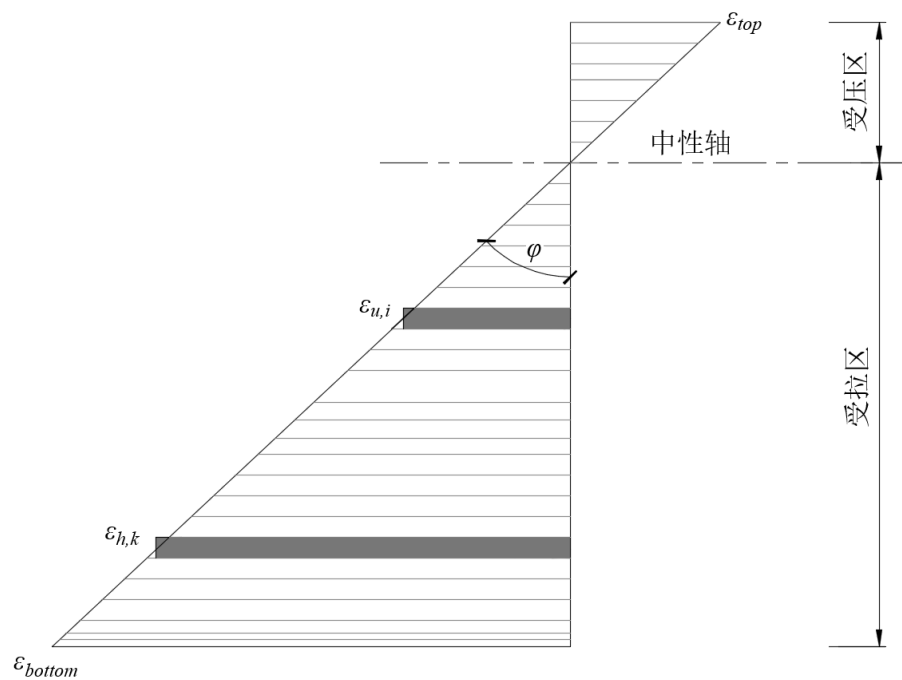


图 B.0.3 纤维法计算应变分布示意图

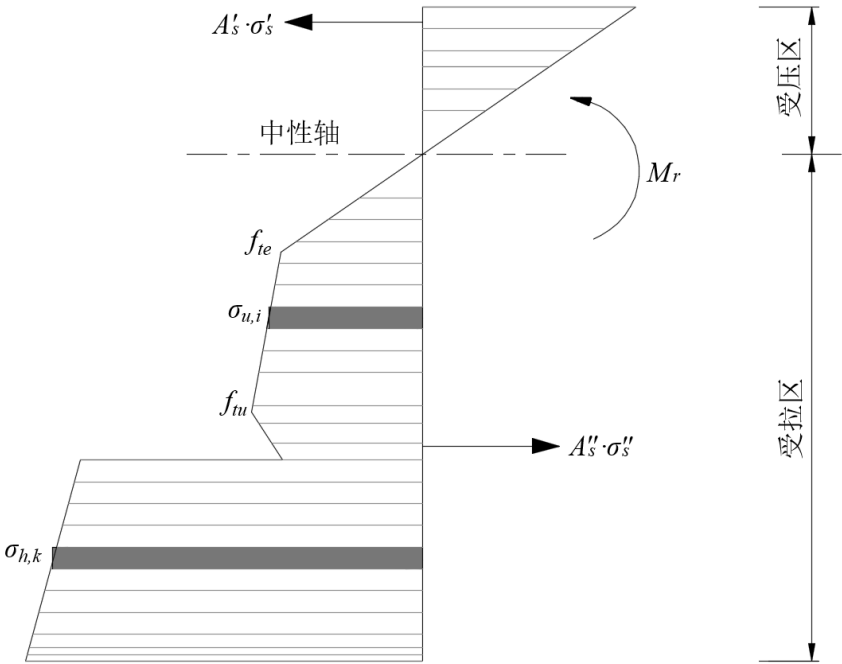


图 B.0.4 纤维法计算应力分布示意图

附录 C 设计流程

C.0.1 型钢-超高性能混凝土组合桥梁的设计流程如图 C.1 所示。

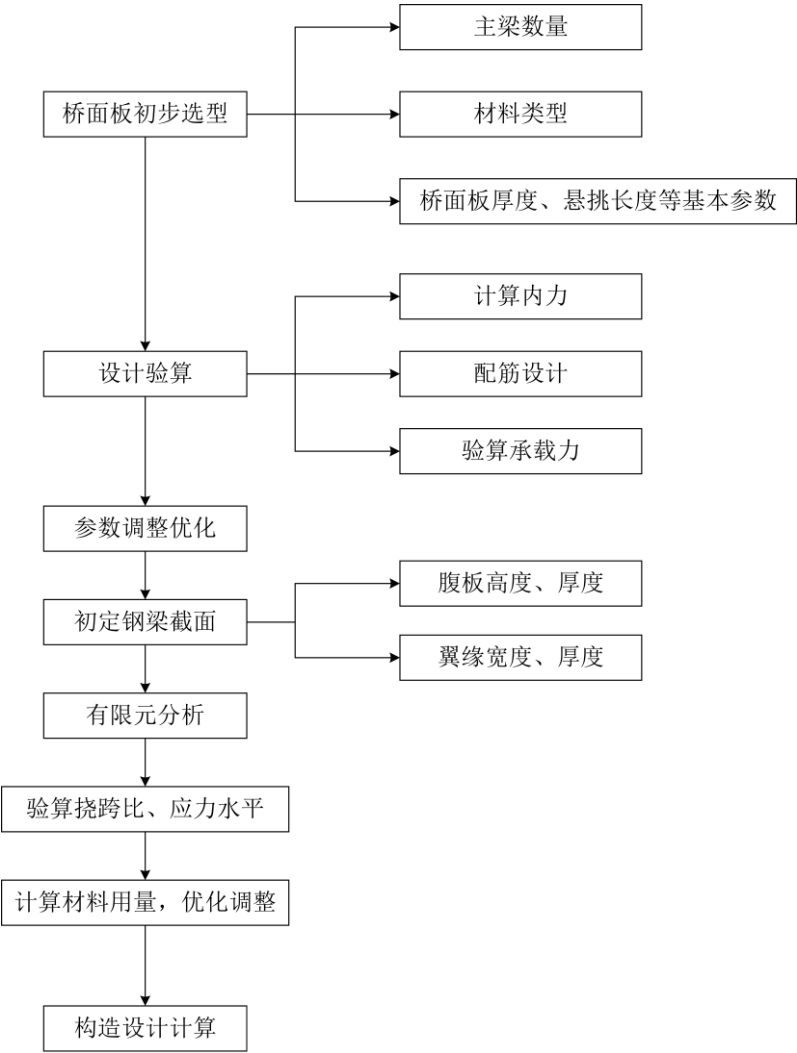


图 C.0.1 设计流程图

附录 D 施工典型工序

D. 1 预制型钢-UHPC 组合梁加工与存放

标准型钢在工厂切割成型钢部件后，运至预制场，随后在型钢部件之间设置临时横撑，搭设 UHPC 部件模板，完成 UHPC 部件浇筑，如图 D.1 所示；浇筑完成后进行预制型钢-UHPC 组合梁的养护、存放。



图 D.1 组合梁加工

D. 2 型钢-UHPC 组合梁运输、拼装

利用运梁车将预制型钢-UHPC 组合梁运至桥位临时台座，现场拼装连接。利用汽车吊吊装型钢-UHPC 组合梁，将其置于墩顶临时支撑（宜采用砂箱支座）上。应设置型钢部件定位装置，使型钢部件安装位置准确，如图 D.2 所示。

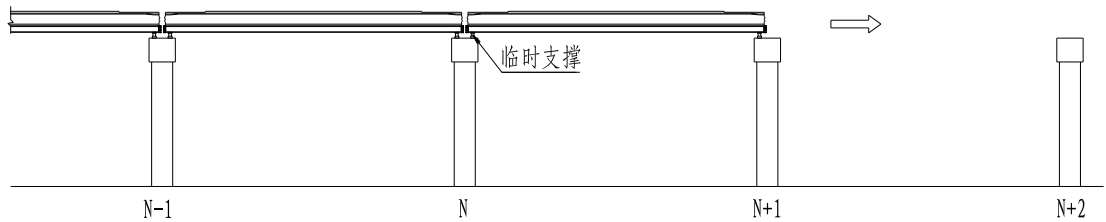


图 D.2 组合梁安装

D. 3 现场浇筑

全桥架设完成后，浇筑纵向湿接缝；待接缝混凝土强度达到设计强度的 85% 后，施工跨中区域防撞护栏，墩顶区域 6 m 范围内的护栏暂不施工，如图 D.3 所示。

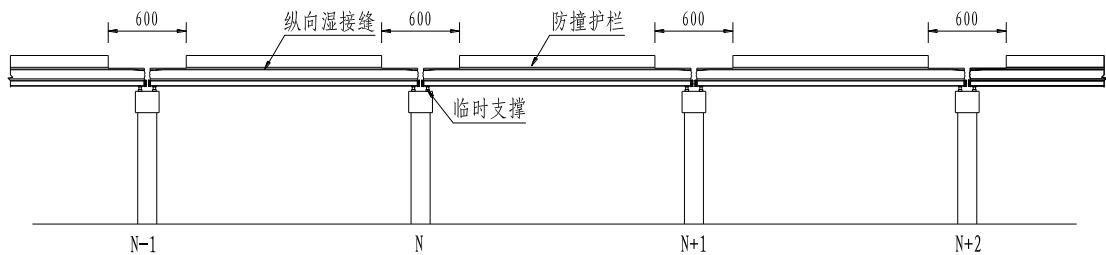


图 D.3 现场浇筑

D. 4 体系转换

连接绑扎支点横梁钢筋，浇筑支点横梁，完成先简支后连续的体系转换，如图 D.4 所示。

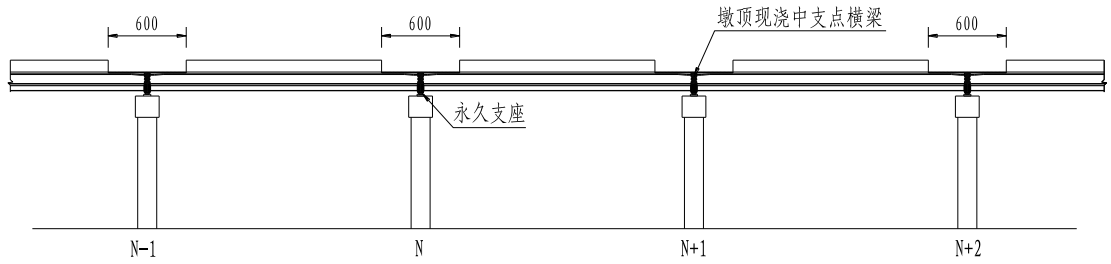


图 D.4 体系转换

D.5 施工附属设施

浇筑墩顶区域 6 m 范围防撞护栏，施工桥面附属设施，见图 D.5。

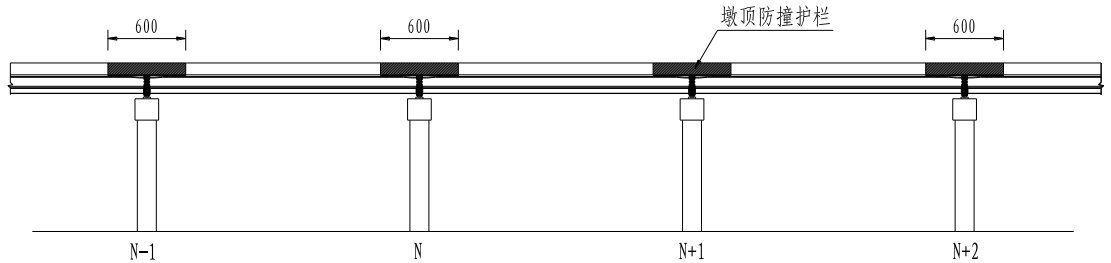


图 D.5 施工附属设施

本规程用词用语说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“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) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》（×××）的有关规定”。
- 3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本规程第×章的有关规定”、“应符合本规程第×.×节的有关规定”、“应符合本规程第×.×.×条的有关规定”或“应按本规程第×.×.×条的有关规定执行”。