

DB61

陕西省地方标准

DB 61/T 1611—2022

高性能钢桥技术规范

Technical specification for high performance steel bridges

2022 - 10 - 12 发布

2022 - 11 - 12 实施

陕西省市场监督管理局

发布

目 次

前言.....II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 2

4 基本规定..... 4

5 材料..... 4

6 高性能钢梁桥..... 6

7 高性能钢拱桥..... 13

8 高性能钢斜拉桥和悬索桥..... 14

9 免涂装耐候钢桥..... 17

10 制造与安装..... 21

11 质量验收..... 22

附录 A（规范性）免涂装耐候钢桥全寿命周期经济性评价模型..... 23

附录 B（规范性）UHPFRC 现场拌制及浇筑工艺..... 25

附录 C（规范性）组合梁斜拉桥混凝土桥面板翘曲特征系数..... 26

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由陕西省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：长安大学、中交第一公路勘察设计研究院有限公司、西安公路研究院、中铁宝桥集团有限公司。

本文件主要起草人：王春生、段兰、王茜、翟晓亮、李军平、汪小鹏、车平、张静雯。

本文件由长安大学负责解释。

本文件首次发布。

联系信息如下：

单位：长安大学

电话：029-82334830

地址：陕西省西安市碑林区南二环中段长安大学

邮编：710064

高性能钢桥技术规范

1 范围

本文件规定了高性能钢桥的材料、设计、制造、安装、质量检验的要求。
本文件适用于高性能钢梁桥、高性能钢拱桥、高性能钢斜拉桥与悬索桥、免涂装耐候钢桥。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 714 桥梁用结构钢
- GB/T 1228 钢结构用高强度大六角头螺栓
- GB/T 1229 钢结构用高强度大六角螺母
- GB/T 1230 钢结构用高强度垫圈
- GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉
- GB 11345 焊缝无损检测 超声检测技术、检测等级和评定
- GB/T 17101 桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝
- GB/T 18365 斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索
- GB/T 36034 埋弧焊用高强钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求
- GB/T 39133 悬索桥吊索
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收规范
- GB 50923 钢管混凝土拱桥技术规范
- CJJ 2 城市桥梁工程施工与质量验收规范
- CJJ 11 城市桥梁设计规范
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG D62 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准
- JTG/T D64-01 公路钢混组合桥梁设计与施工规范
- JTG/T D65-06 公路钢管混凝土拱桥设计规范
- JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范
- JTG/T 3365-01 公路斜拉桥设计规范
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
- TB 10002 铁路桥涵设计规范

TB 10091 铁路桥梁钢结构设计规范

TB/T 2137 铁路钢桥面栓接面抗滑移系数试验方法

3 术语和定义

下列术语适用于本文件。

3.1

高性能钢材 high performance steel

具有高强度、高韧性、强可焊性、耐候性中的一项或多项材料特性指标的钢材,简称HPS。

3.2

高强度钢材 high strength steel

名义屈服强度不低于420MPa的钢材。

3.3

高韧性钢材 high toughness steel

质量等级为D、E、F级且韧脆转变温度不高于-60℃的钢材。

3.4

耐候钢材 weathering steel

通过添加铬、镍、铜、钼等合金元素,使金属基体表面上形成致密保护锈层,防止钢材基体被外界环境进一步侵蚀,耐候指数I不小于6.0的钢材,耐候钢材代号NH。

3.5

高强度钢丝 high strength wire

极限抗拉强度不低于1860MPa的钢丝。

3.6

高性能缆索 high performance cable

极限抗拉强度不低于1860MPa的平行钢丝缆索和钢绞线缆索。

3.7

超高性能水泥基复合材料 ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material

由水泥、砂、硅灰、减水剂、纤维等材料制备,具有抗压、抗拉及抗弯拉强度高特点的水泥基复合工程材料,简称UHPFRC。

3.8

波折板剪力键 corrugated steel plate shear connector

将钢板加工为开孔波折板样,实现UHPFRC受力层和钢桥面板间协调受力的剪力键。

3.9

混合设计 hybrid design

在结构或构件设计中采用不同强度或韧性等级钢材的设计方法。

3.10

冷连接组合设计 cold composite design

采用结构胶或粘结剪力键等非焊接热加工的方式实现组合的设计方法。

3.11

应力比 stress ratio

恒载与活载等共同作用下构件中产生的最大应力与最小应力的比值 (R)。

3.12

强韧性组合桥面板 high resilience composite deck plate

采用UHPFRC的组合桥面板。

3.13

高性能钢板梁桥 high performance steel girder bridge

采用高性能钢材、UHPFRC等材料建造的钢板梁桥。

3.14

高性能钢拱桥 high performance steel arch bridge

采用高性能钢材、UHPFRC等材料建造的拱桥。

3.15

高性能钢桁梁桥 high performance steel truss girder bridge

采用高性能钢材、UHPFRC等材料建造钢桁梁桥。

3.16

高性能钢塔与组合塔 high performance steel tower and composite tower

采用高性能钢材、UHPFRC等材料建造的钢塔或组合塔。

3.17

隧道效应 Tunnel like effect

在垂直挡土墙或窄路肩、较小的桥下净空及紧靠路肩的高桥台等使用条件下，跨线桥下出现除冰盐雾难以被气流消散、行车时盐雾飞溅的现象。

3.18

年平均湿润时间

一年内相对湿度大于80%且温度高于0℃的天数。

3.19

腐蚀余量

考虑腐蚀减薄影响的耐候钢材厚度富余量。

4 基本规定

- 4.1 高性能钢桥的结构分析应满足 JTG/T D64、JTG/T D65-06、TB 10091 的规定。
- 4.2 高性能钢桥应根据结构的重要性、应力状态、连接方式、环境条件等因素进行选材。
- 4.3 高性能钢桥的钢主梁宜采用混合设计，并满足下列规定：
 - a) 翼缘板宜采用强度等级不低于 Q420 且韧性等级不低于 D 级的高性能钢材。
 - b) 腹板钢材强度等级可低于翼缘板，但强度差不宜超过 2 个强度等级，腹板韧性等级宜与翼缘板韧性等级相同。
 - c) 钢桁梁节点宜选用高强、高韧性钢材。
 - d) 加劲肋、横向联结系杆件可采用普通强度钢材。
 - e) 钢主梁宜优先采用耐候钢材。
- 4.4 免涂装耐候钢桥应符合以下环境要求：
 - a) 氯离子沉淀量不大于 $50 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的地区。
 - b) SO_2 含量不高于 $210 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的工业环境。
 - c) 年平均湿润时间不大于 220 天的地区。
 - d) 使用环境无隧道效应。
 - e) 耐候钢梁下翼缘距设计水位应不小于 3m。
- 4.5 除免涂装耐候钢桥以外，高性能钢桥应按 JTG/T D64、JT/T 722 的规定进行防护、涂装设计。
- 4.6 高性能钢桥的制造、安装与质量验收应满足除本文件以外的 GB 50205、JTG F80/1、CJJ 2 的规定。

5 材料

5.1 高性能钢材

5.1.1 高性能钢材的屈强比应不超过 0.85，强度设计值应根据钢材的不同厚度按表 1 的规定采用。

表1 高性能钢材的强度设计值

钢材		抗拉、抗压和抗弯 f_d (MPa)	抗剪 f_{vd} (MPa)	端面承压（刨平顶紧） f_{cd} (MPa)
牌号	厚度 (mm)			
Q420	≤16	335	195	390
	16~40	320	185	
	40~63	305	175	
	63~100	290	165	
Q460	≤16	365	210	425
	16~40	350	200	
	40~63	330	190	
	63~100	315	180	

表 1 （续）

钢材		抗拉、抗压和抗弯 f_d (MPa)	抗剪 f_{vd} (MPa)	端面承压（刨平顶紧） f_{cd} (MPa)
牌号	厚度（mm）			
Q500	≤16	395	230	460
	16~40	380	220	
	40~63	360	205	
	63~100	345	195	
Q690	≤16	550	320	640
	16~40	525	300	
	40~63	500	285	
	63~100	475	270	

- 5.1.2 高强度钢材的牌号包括 GB/T 714 中的 Q420、Q460、Q500、Q690。
- 5.1.3 高性能钢材焊缝的强度设计值应满足表 2 的规定。

表2 高性能钢材的焊缝强度设计值

构件钢材		对接焊缝			角焊缝	
牌号	厚度（mm）	抗压 f_{cd}^w （MPa）	抗拉 f_{ld}^w （MPa）		抗剪 f_{vd}^w （MPa）	抗拉、抗压或抗剪 f_{ld}^w （MPa）
			焊缝质量等级			
			一级、二级	三级		
Q420 钢	≤16	335	335	285	195	200
	16~40	320	320	270	185	
	40~63	305	305	260	175	
	63~100	290	290	245	165	
Q460 钢	≤16	365	365	310	210	230
	16~40	350	350	295	200	
	40~63	330	330	285	190	
	63~100	315	315	265	180	
Q500 钢	≤16	395	395	335	230	250
	16~40	380	380	320	220	
	40~63	360	360	310	205	
	63~100	345	345	290	195	
Q690 钢	≤16	550	550	460	320	345
	16~40	525	525	440	300	
	40~63	500	495	430	285	
	63~100	475	475	400	270	

5.2 超高性能水泥基复合材料

- 5.2.1 UHPFRC 扩展度宜为 550mm~850mm。
- 5.2.2 UHPFRC 的材料性能应符合表 3 的要求。

表3 UHPFRC 材料指标限值

弹性模量 (GPa)	抗压强度 (MPa)		轴心抗拉强度 (MPa)	弯拉强度 (MPa)
	7 天龄期	28 天龄期	28 天龄期	28 天龄期
≥38	≥28 天抗压强度的 75%	≥100	≥6	≥25

5.3 其他材料

- 5.3.1 用于 UHPFRC 组合钢桥面板的结构胶应符合表 4 中各项材料性能指标设计值的要求。

表4 结构胶材料指标

7 天后抗压强度 (MPa)	7 天后抗拉强度 (MPa)	7 天后抗弯强度 (MPa)	抗剪强度 (MPa)	UHPFRC 与钢粘结强度 (MPa)
≥60	≥40	≥45	≥5	≥18

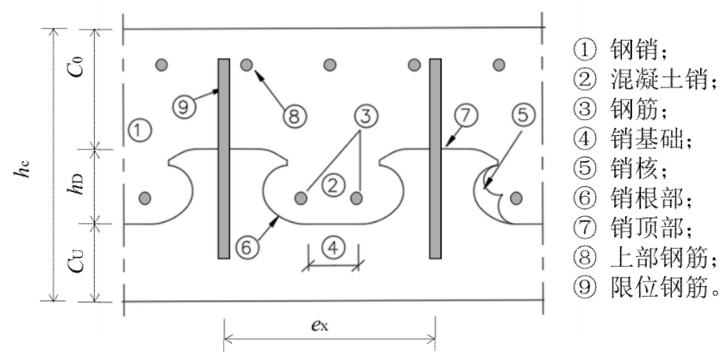
- 5.3.2 混凝土、普通钢筋及预应力钢筋的材料类型及材料参数应满足 JTG/D62 的规定。
- 5.3.3 耐候螺栓的材料耐侯指数 I 应不小于 6.0；
- 5.3.4 高强度螺栓、螺母、垫圈的技术条件应满足 GB/T 1228、GB/T 1229、GB/T 1230、GB/T 1231 的规定。
- 5.3.5 栓钉材料应满足 GB/T 10433 的规定。
- 5.3.6 UHPFRC 中的纤维宜选用表面镀铜高强钢纤维，长度宜取 12mm~15mm、长径比宜取 60~80。

6 高性能钢梁桥

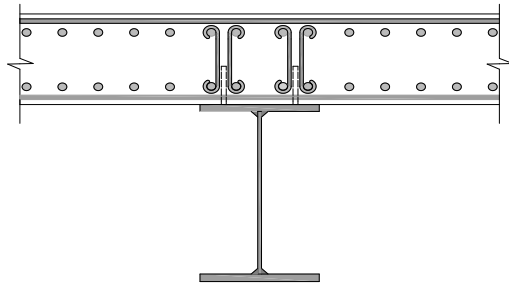
6.1 高性能钢板梁桥

- 6.1.1 高性能钢板梁桥应满足 JTG/T D64 第 7.2 至 7.4 节的规定。
- 6.1.2 高性能钢板梁桥的桥面板可采用现浇 UHPFRC 桥面板、预制 UHPFRC 桥面板、UHPFRC-混凝土组合桥面板、压型钢板 UHPFRC 桥面板等强韧性组合桥面板。
- 6.1.3 UHPFRC 桥面板可根据需要采用等厚度、变厚度 UHPFRC 桥面板：
 - a) 对较宽桥面，宜选择变厚度 UHPFRC 桥面板；
 - b) 对负弯矩区段，宜优先选用现浇 UHPFRC 桥面板。
- 6.1.4 单向、双向 UHPFRC 桥面板应根据计算结果配置受力钢筋。
- 6.1.5 分节段现浇 UHPFRC 桥面板时，宜设置燕尾槽接缝。
- 6.1.6 当采用多块预制 UHPFRC 桥面板时，应在钢梁上翼缘布置抗剪连接键，预制 UHPFRC 板安装完成后在带状区浇注 UHPFRC，预制 UHPFRC 板宜采用侧面外伸环形钢筋、燕尾槽等形式。
- 6.1.7 UHPFRC-混凝土组合桥面板的底层宜为铺设在钢主梁上的 UHPFRC 预制板，且预制 UHPFRC 板中应设置受力与构造钢筋，预制 UHPFRC 板上应现浇混凝土层，如图 1。
- 6.1.8 压型钢板 UHPFRC 桥面板应在钢主梁上铺设压型钢板且布设钢筋，然后现浇 UHPFRC 层，如图 2。

- c) 组合销剪力连接件的高厚比为 $0.08 \leq (t_w / h_D) \leq 0.5$;
- d) 采用多道组合销剪力连接件时, 剪力键间的横向间距不小于 120mm;
- e) 混凝土层上覆盖厚度 (C_o)、下覆盖厚度 (C_u) 均不小于 20mm。



a) 组合销剪力键配筋



b) 采用组合销剪力键的组合设计构造示意图

图4 抗剪连接键的形式

6.2 高性能钢箱梁桥

6.2.1 高性能钢箱梁桥的主梁可采用以下几种横断面形式, 见图 5。

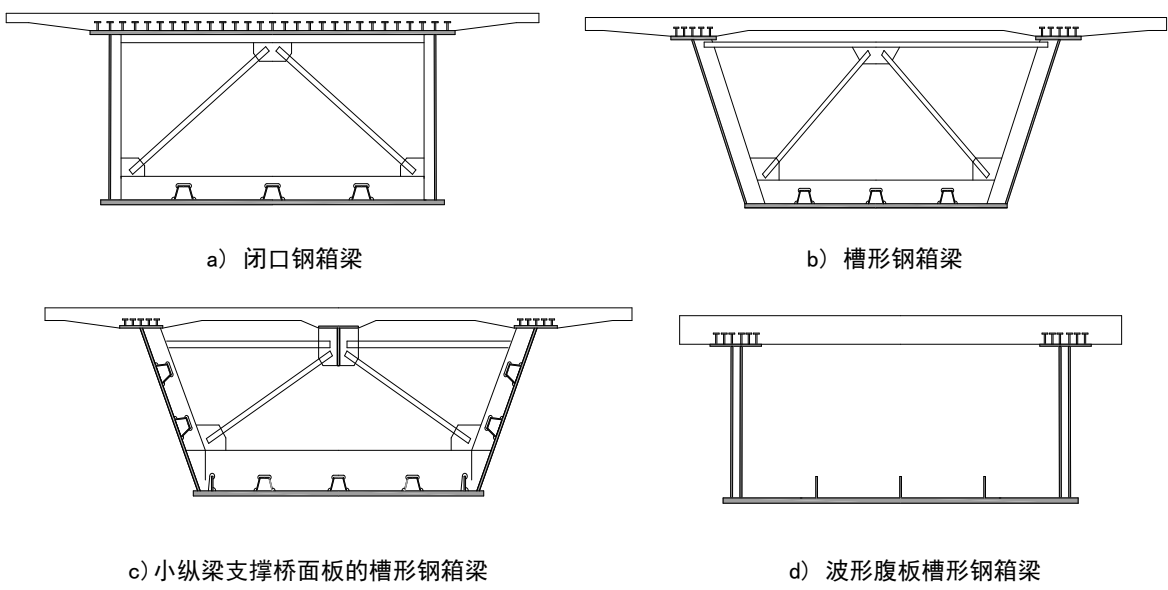
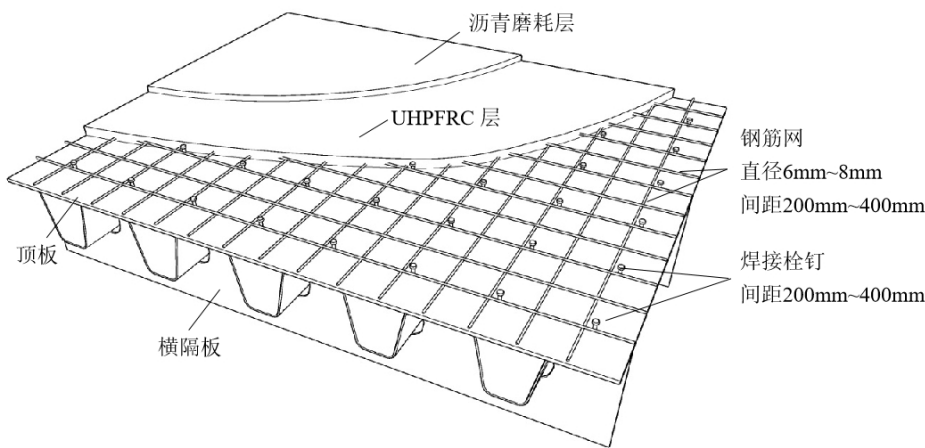


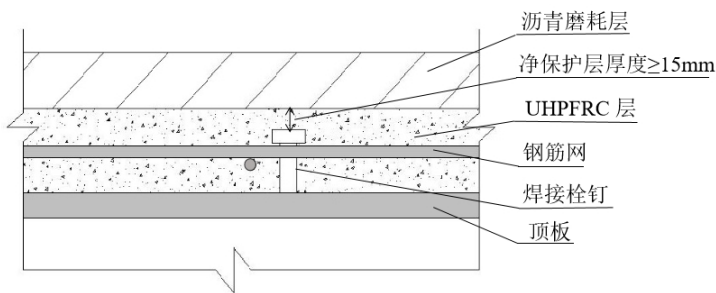
图5 高性能钢箱梁桥典型横断面

- 6.2.2 高性能钢箱梁桥宜选用的桥面板形式包括 UHPFRC 组合桥面板和 UHPFRC 组合钢桥面板两类。
- 6.2.3 UHPFRC 组合桥面板用于槽型钢箱梁时，应在槽型钢箱梁上翼缘设置剪力键。
- 6.2.4 UHPFRC 组合钢桥面板用于闭口钢箱梁时，应通过焊接栓钉、冷连接胶层、冷连接波折键等一种或多种方式实现 UHPFRC 层与钢桥面板的连接：

- a) 采用焊接栓钉的 UHPFRC 组合钢桥面板，宜按照 200mm~400mm 间距在钢桥面板顶板上焊接栓钉，并铺设直径 6mm~8mm、间距 200mm~400mm 的单层钢筋网，净保护层厚度应不小于 15mm，如图 6；



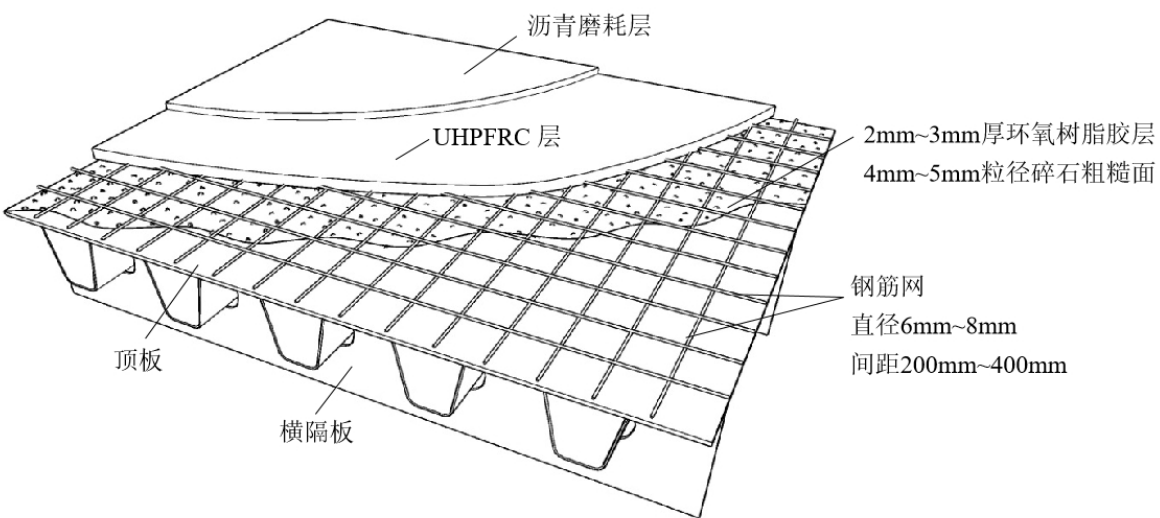
a) 采用焊接栓钉的UHPFRC组合钢桥面板设计



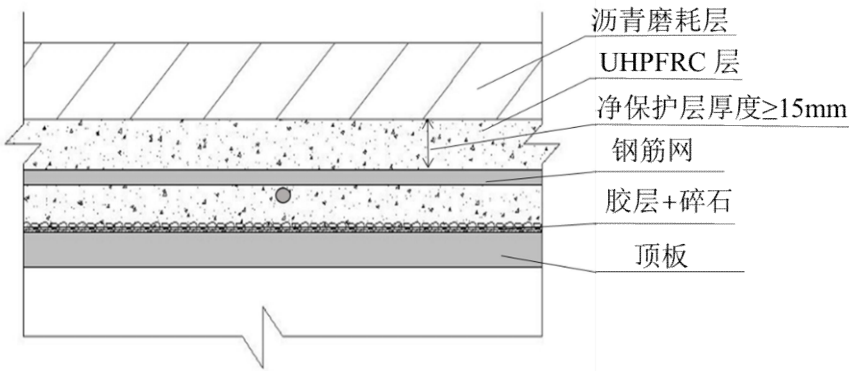
b) 采用焊接栓钉的UHPFRC组合钢桥面板分层

图6 采用焊接栓钉的UHPFRC组合钢桥面板构造示意图

- b) 采用冷连接胶层的 UHPFRC 组合钢桥面板，宜在钢桥面板表面铺设 2mm~3mm 厚结构胶，并在胶层上均匀撒布粒径 4mm~5mm 碎石,铺设直径 6mm~8mm、间距 200mm~400mm 的单层钢筋网，净保护层厚度应不小于 15mm，如图 7；



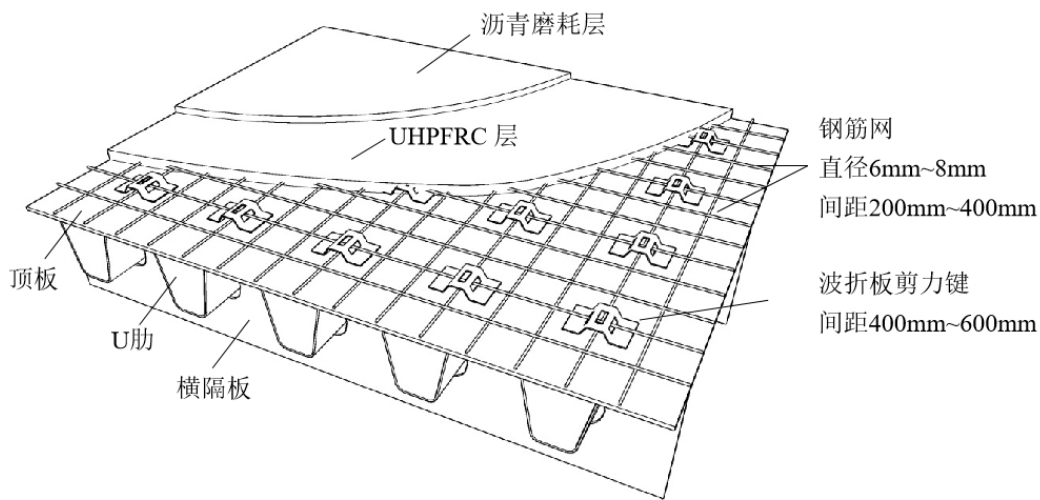
a) 采用胶层粘结的UHPFRC组合钢桥面板设计



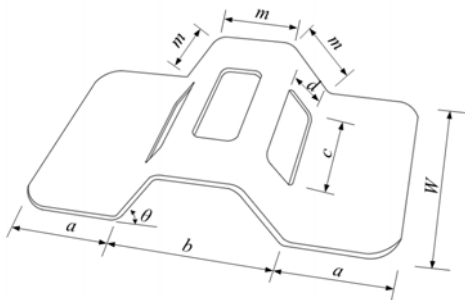
b) 采用胶层粘结的UHPFRC组合钢桥面板分层

图7 采用胶层粘结的UHPFRC组合钢桥面板构造示意图

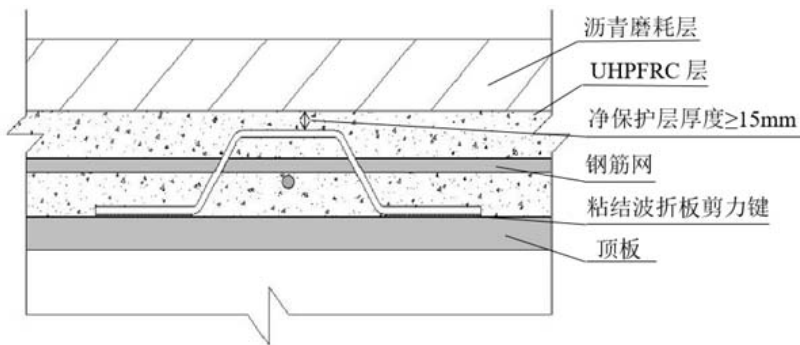
c) 采用冷连接波折板剪力键的 UHPFRC 组合钢桥面板,宜按照 400mm~600mm 间距布置波折板剪力键,铺设直径 6mm~8mm、间距 200mm~400mm 的单层钢筋网,净保护层厚度应不小于 15mm,波折板剪力键开孔的最小尺寸 (d) 不应小于 UHPFRC 中钢纤维尺寸的 2 倍,如图 8;



a) 采用冷连接波折键的UHPFRC组合钢桥面板设计



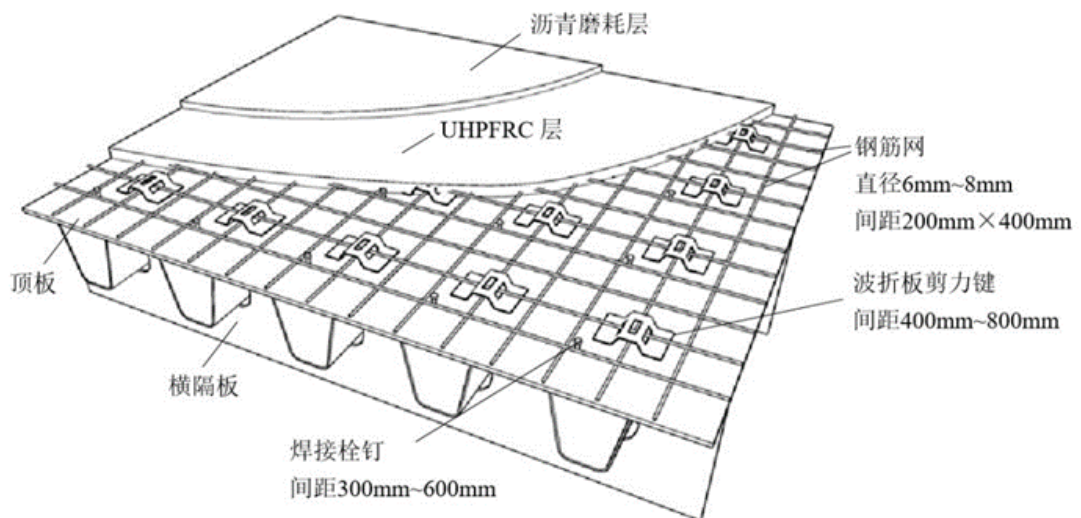
b) 波折钢板剪力键示意图



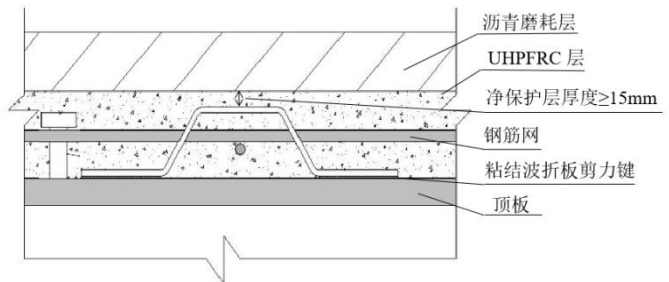
c) 采用冷连接波折键的UHPFRC组合钢桥面板分层

图8 采用冷连接波折键的UHPFRC组合钢桥面板构造示意图

- d) 采用焊接栓钉和冷连接波折板剪力键的混合连接 UHPFRC 组合钢桥面板，宜按照 300mm~600mm 间距焊接栓钉、400mm~800mm 间距粘接波折板剪力键，铺设直径 6mm~8mm、间距 200mm~400mm 的单层钢筋网，净保护层厚度应不小于 15mm，如图 9。



a) 采用混合连接的UHPFRC组合钢桥面板设计



b) 采用混合连接的UHPFRC组合钢桥面板分层

图9 采用混合连接的UHPFRC组合钢桥面板构造示意图

6.2.5 UHPFRC 组合钢桥面板的受力验算应同时满足局部挠度限值、界面首次剥离荷载限值：

- a) 车辆荷载作用下，UHPFRC 组合钢桥面板顶板的挠度与跨径之比不应大于 1/700，其中：挠度指纵肋间桥面板顶板的最大挠度，跨径指对应桥面板最大挠度发生位置处的纵肋支撑间距；
- b) UHPFRC 组合钢桥面板所承受荷载应小于表 5 中的组合界面首次剥离荷载。

表5 组合界面首次剥离荷载

组合界面方式	首次剥离荷载（kN）
胶层连接	≥120
波折键连接键	≥70
栓钉连接	≥70
混合连接	≥130

6.3 高性能钢桁梁桥

6.3.1 主桁杆件断面可采用开口截面、闭口截面，如图 10。

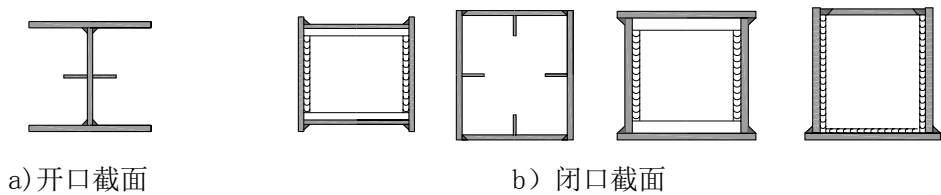


图10 主桁杆件截面形式

6.3.2 上承式钢桁梁可采用混凝土桥面板或 UHPFRC 桥面板：

- a) 上承式组合桁梁正弯矩区宜采用混凝土桥面板，正弯矩应由混凝土顶板及上弦杆、受拉的下弦杆共同承担；
- b) 上承式组合桁梁负弯矩区宜采用 UHPFRC 桥面板，负弯矩应由 UHPFRC 桥面板和上弦杆、受压的下弦杆共同承担。

6.3.3 下承式组合桁梁的桥面板宜采用 UHPFRC 组合桥面板，桥面板设计时应满足下列规定：

- a) 桥面板沿纵向支撑在主桁架下弦杆上时，桥面板与主桁下弦杆宜采用组合设计，板的横向跨度由下弦杆的间距确定，无纵梁时沿横向可设置多道小横梁或型钢；
- b) 主桁架节点处设置横梁时，桥面板仅由横梁支撑，桥面沿纵向跨度为主桁架一个节间的长度，沿纵向可设置多道小纵梁或型钢；
- c) 桥面板支承于纵、横梁上，且不与主桁架进行组合设计时，应分别计算桥面板、主桁架的受力。

6.3.4 钢桁梁与桥面板进行组合设计时，钢桁架上弦杆节点处宜按剪力键群形式布置剪力键，如图 11。剪力键群中单个栓钉极限承载力的折减系数应取 0.8~0.9。

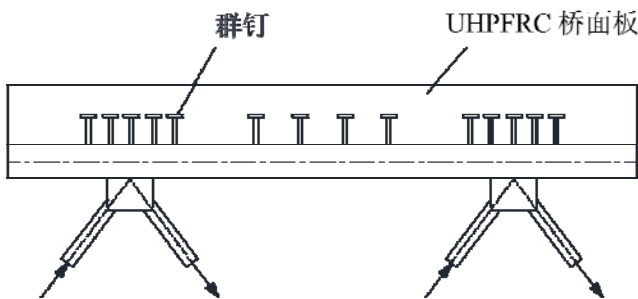


图11 群钉示意图

6.3.5 钢桁梁的联结系构造设计应满足 JTG/T D64 2015 中 9.4 的规定。

7 高性能钢拱桥

7.1 主拱

7.1.1 高性能钢管拱肋

7.1.1.1 主拱圈钢构件可选取高性能钢管或管内填充混凝土的高性能组合钢管。

7.1.1.2 空心高性能钢管拱宜采用混合设计，受力复杂的拱脚区域宜采用 Q500 及以上强度级别、质量等级不低于 D 级的高性能钢材。

7.1.1.3 应力状态复杂的主拱区段可选用 UHPFRC 进行填充。

7.1.1.4 高性能钢管拱肋的计算应满足 JTG/T D65-06-2015 中 4.3、5.9 和 8.2 的规定。

7.1.1.5 高性能钢管拱肋的构造应满足 GB 50923 中 7.2 的规定。

7.1.2 高性能钢箱拱肋

7.1.2.1 钢箱拱圈宜采用强度级别不低于 Q420、质量等级不低于 D 级的高性能钢材。

7.1.2.2 钢箱主拱受力复杂的拱脚等区域宜采用 Q500 及以上强度级别、E 级及以上质量级别的高性能钢材。

7.1.3 高性能钢桁拱肋

7.1.3.1 钢桁主拱宜采用强度级别不低于 Q420、质量等级不低于 D 级的高性能钢材。

7.1.3.2 主桁复杂受力杆件、关键传力杆件宜采用 Q500 及以上强度级别、E 级及以上质量级别的高性能钢材。

7.1.3.3 高性能钢桁拱肋的构造与计算应满足 JTG D64-2015 中第 10.1 节的规定。

7.2 拱座与立柱

7.2.1 系杆拱桥的拱脚可采用 UHPFRC。

7.2.2 立柱可采用 UHPFRC 或高性能钢材。

7.3 吊杆和系杆

7.3.1 高性能钢管拱桥吊杆和系杆应按照 JTG/T D65-06 进行承载能力计算。

7.3.2 吊杆抗疲劳验算时，当应力比（R）大于 0.8 时应在 JTG D64-2015 中 5.5 和附录 C 规定的疲劳细节强度基础上折减 0.1。

7.3.3 系杆抗疲劳验算时应计入大应力比的影响，应在 JTG D64 2015 中 5.5 和附录 C 规定的细节疲劳强度基础上折减 0.15。

7.4 桥面结构

7.4.1 桥面结构应采用防连续破坏的结构体系。

7.4.2 桥面结构宜采用高性能钢结构、UHPFRC 组合结构。

8 高性能钢斜拉桥和悬索桥

8.1 主梁

8.1.1 高性能缆索承重桥梁的主梁宜采用高性能钢材、超高性能水泥基复合材料。

8.1.2 组合梁斜拉桥主梁桥面板有效宽度计算，应考虑恒载和活载作用下主梁轴力和弯矩的应力分离-叠加效应：

- a) 弯矩作用下，应采用剪力滞效应引起的附加挠度表征剪力滞效应的大小，桥面板附加挠度（ w_s ）应按公式（1）至（4）计算：

$$w_s = \frac{qt}{E_s I_0 k_2^2} \left[-\frac{\text{ch}(k_2 L - 2k_2 x)}{k_2^2 \text{ch}(k_2 L)} - \frac{Lx - x^2}{2} \right] \dots\dots\dots (1)$$

式中：

w_s ——桥面板附加挠度；

q ——竖向力；
 t ——简化参数，按照公式（2）计算；
 E_s ——钢材弹性模量；
 I_0 ——对组合截面换算截面中性轴的惯矩；
 k_2 ——组合梁斜拉桥混凝土桥面板翘曲特征系数，应按附录C计算；
 L ——计算跨径；
 x ——纵桥向截面位置。

$$t = 2P_1P_3 - \alpha_i + \alpha_i \frac{y^2}{b_i^2} + D \dots\dots\dots (2)$$

$$P_1 = k_i^2 (E_c A_{ci} + A_s I_{si}) \dots\dots\dots (3)$$

$$P_3 = E_c A_{ci} \left(D^2 - \frac{2}{3} \alpha_i D + \frac{23}{15} \alpha_i^2 \right) + E_s A_{si} D^2 \dots\dots\dots (4)$$

式中：

t ——简化参数；
 P_1 ——微分方程参数；
 P_3 ——微分方程参数；
 α_i ——剪力滞效应翘曲位移幅值， $i=1、2$ 。
 y ——横桥向位置；
 b_i ——悬出部分混凝土板宽度取 $i=1$ ，腹板间混凝土板宽度取 $i=2$ ；
 D ——轴力自平衡函数；
 k_i ——组合梁斜拉桥混凝土桥面板翘曲特征系数，依次取 $i=1、2$ ，应按附录C计算；
 E_c ——混凝土弹性模量；
 A_{ci} ——混凝土悬臂板、腹板之间的混凝土板面积，依次取 $i=1、2$ ；
 A_s ——钢主梁总面积；
 I_{si} ——钢主梁上翼缘、腹板、下翼缘相对于组合截面中性轴的惯性矩，依次取 $i=1、2、3$ ；
 E_s ——钢材弹性模量；
 A_{si} ——钢主梁上翼缘、腹板、下翼缘的面积，依次取 $i=1、2、3$ ；
 b) 轴力作用下，宜按后张预应力或轴向集中力沿主梁翼缘两侧分别以 30° 角呈线性传递直至均匀分布在桥面板上，如图 12；

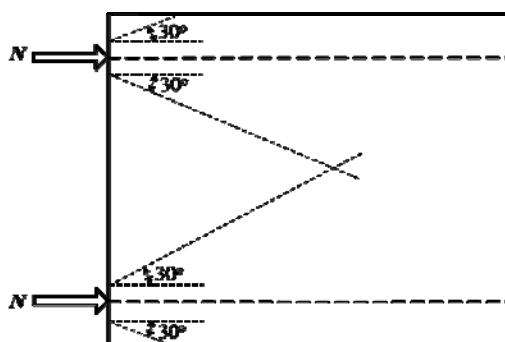


图 12 预应力或轴向集中力沿主梁翼缘传递计算图式

c) 弯矩和轴力共同作用下翼缘内的正应力应按公式 (5) 计算:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \sigma_N \pm \sigma_M \dots\dots\dots (5)$$

式中:

σ ——正应力;

N ——轴向力;

A ——主梁截面面积;

M ——弯矩;

W ——主梁截面抗弯模量;

σ_N ——按初等梁理论计算的轴力单独作用下截面翼缘的正应力值;

σ_M ——按初等梁理论计算的弯矩单独作用下截面翼缘的正应力值。

d) 轴弯共同作用下的有效宽度系数 (b_e/b) 应按公式 (6) 计算:

$$\frac{b_e}{b} = \frac{\sigma_N + \sigma_M}{\frac{\sigma_N}{(b_e/b)_N} + \frac{\sigma_M}{(b_e/b)_M}} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

b_e ——混凝土板有效宽度;

b ——混凝土板宽度;

σ_N ——按初等梁理论计算的轴力单独作用下截面翼缘的正应力值;

σ_M ——按初等梁理论计算的弯矩单独作用下截面翼缘的正应力值。

$(b_e/b)_N$ ——轴力单独作用下的有效宽度系数;

$(b_e/b)_M$ ——弯矩单独作用下的有效宽度系数。

8.2 缆索

8.2.1 斜拉索、主缆、吊索的材料技术指标应满足本文件及 GB/T 39133、GB/T 18365 的规定。

8.2.2 斜拉索、吊索抗疲劳验算时应计入大应力比的影响, 应将 JTG D64—2015 中 5.5 和附录 C 规定的细节疲劳强度折减 0.1。

8.3 高性能钢塔与组合塔

8.3.1 高性能钢塔、高性能组合塔的典型截面形式如图 13、14。

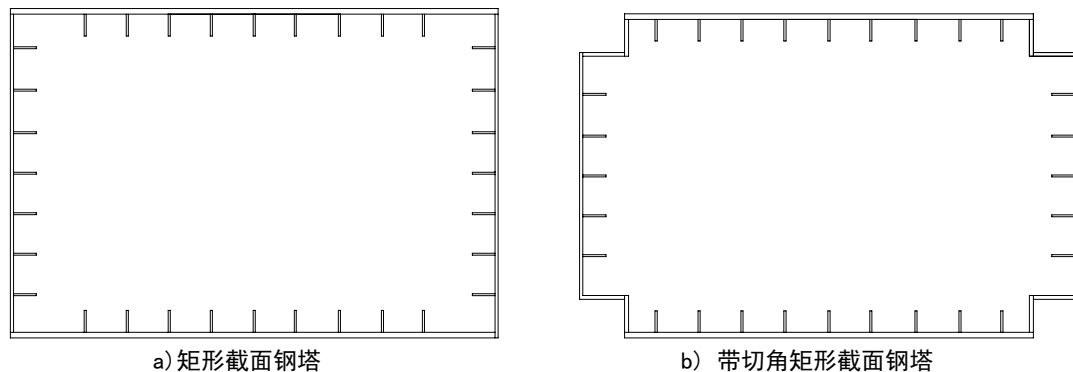


图13 高性能钢塔典型截面构造示意图

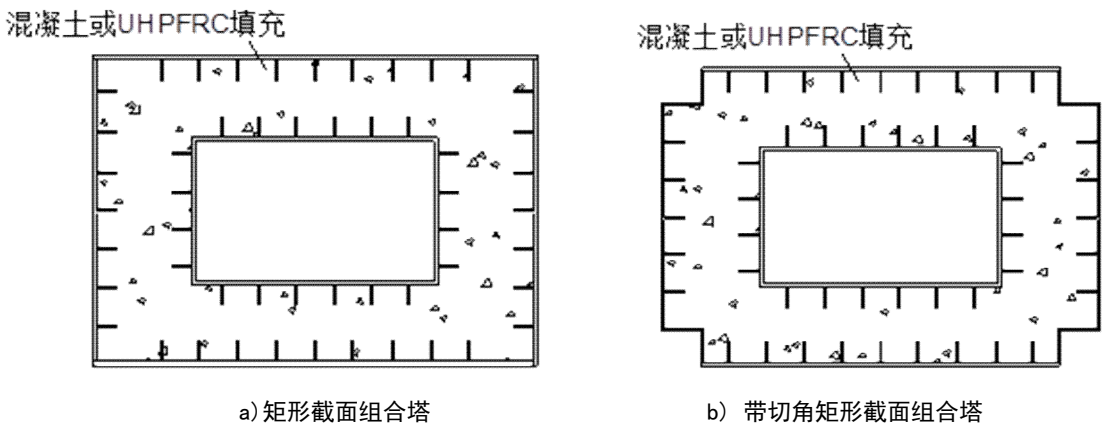


图14 高性能组合塔典型截面构造示意图

- 8.3.2 高性能钢塔、组合塔宜采用混合设计,并应满足 JTG/T D64—2015 第 12 章的规定。
- 8.3.3 高性能钢塔、高性能组合塔可采用耐候钢材。
- 8.3.4 高性能钢塔、组合塔的横梁与塔连接区段、斜拉索锚固区段宜采用强度等级不低于 460 MPa、质量等级不低于 D 级的高性能钢材。
- 8.3.5 高性能钢塔与组合塔的塔墩-塔基连接区段宜优先采用 UHPFRC 等高性能材料。
- 8.3.6 高性能组合塔的钢塔壁与 UHPFRC 组合设计、钢塔段-UHPFRC 结合段、塔墩-塔基连接段组合设计时，宜按照本文件 5.1 节进行剪力键选取及组合设计。

9 免涂装耐候钢桥

9.1 一般规定

- 9.1.1 免涂装耐候钢桥的构造设计应考虑钢梁、连接节点、伸缩缝等构件的细部构造以及排水管道布置等细节设计。耐候钢主梁构造细节的设计应利于通风、排水。
- 9.1.2 免涂装耐候钢主梁截面变化处，应尽量改变板件厚度而不改变宽度，且焊缝处余高应磨平。
- 9.1.3 免涂装耐候钢桥采用伸缩装置时，应利用非金属材料制作集流槽将水导流至结构以外，桥梁端部排水构造见图 15，应在距梁端 1 倍~2 倍梁高范围内的钢梁进行涂装。

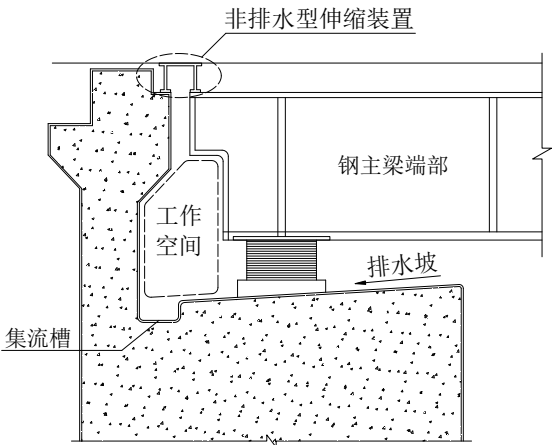


图15 桥梁端部排水构造

- 9.1.4 免涂装耐候钢桥的方案比选设计应按照附录 A 全寿命周期经济性评价模型进行。
- 9.1.5 免涂装耐候钢桥栓接接头应采取构造与工艺措施避免腐蚀、缝隙腐蚀：

- a) 耐候螺栓与板边相邻螺栓的最大间距为 $14t$ (t 为较薄板的厚度) 且不大于 180 mm;
- b) 相邻耐候螺栓中心线间的最大距离为 $8t$ 且不大于 130 mm;
- c) 若螺栓间距必须大于上述值, 应对螺栓密封处理。

9.2 钢板梁桥构造设计

- 9.2.1 应在免涂装耐候钢板梁桥靠近梁端区域的钢主梁下翼缘下表面设置 V 形挡水板 (图 16)。
- 9.2.2 主梁间宜保持通风状态良好, 主梁间距宜不小于梁高的 1.5 倍 (图 17)。

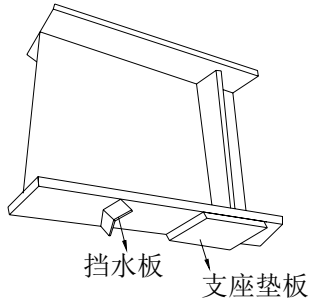


图 16 挡水板

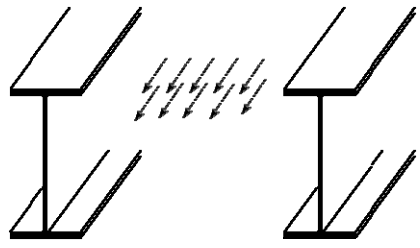


图 17 主梁间通风示意图

- 9.2.3 耐候钢梁的横向加劲肋布设 (图 18) :
- a) 在横向加劲肋与翼缘板焊接处宜设置半径 35 mm~50 mm 的圆形过焊孔;
- b) 横向加劲肋与受拉翼缘间宜设置 60 mm~80 mm 间隙。

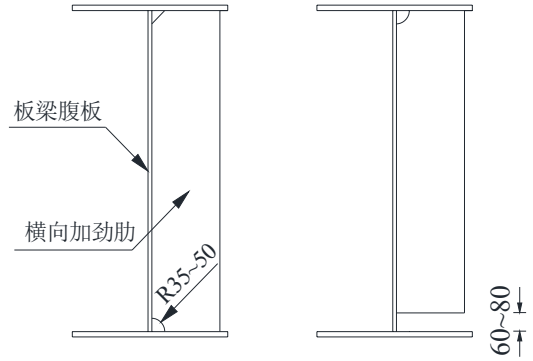


图18 焊接横向加劲肋构造示意图 (单位: mm)

- 9.2.4 耐候钢板梁桥应在桥面板外伸部分设置滴水槽、排水格栅及排水槽, 悬臂端部与边梁下翼缘连线与水平面夹角不超过 45° (图 19、图 20)。

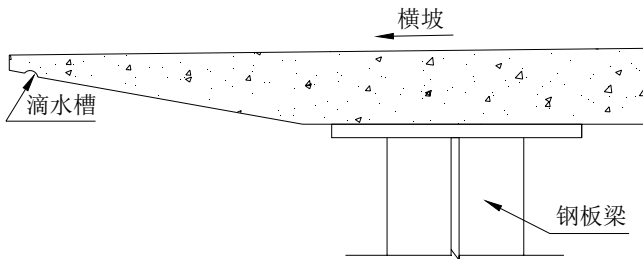


图19 设置桥面横坡和滴水槽

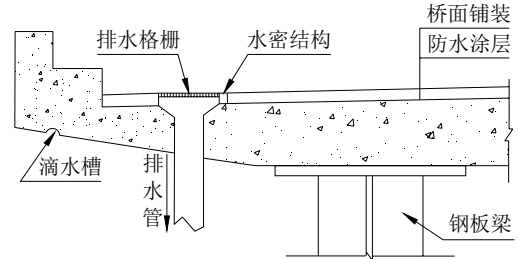


图20 桥面排水构造

9.3 钢箱梁桥构造设计

- 9.3.1 耐候钢箱梁桥宜在钢箱主梁腹板上设置通气孔、在底板上设置排水孔。
- 9.3.2 耐候钢箱梁的箱室内不应布设排水管。
- 9.3.3 箱梁底板与腹板连接处腹板宜伸出底板下缘大于 20mm，不宜采用底板外伸的形式（如图 21）。

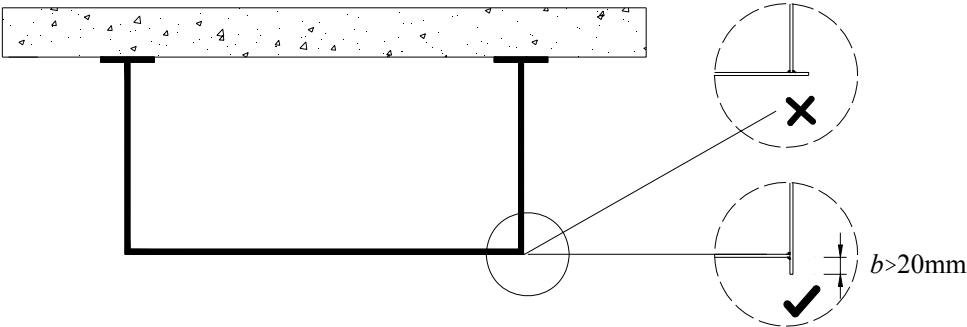


图21 箱梁底板与腹板连接构造示意图

9.4 腐蚀余量与抗疲劳验算

- 9.4.1 免涂装耐候钢桥的计算应满足除本文件以外的 JTG/T D64 的规定。
- 9.4.2 免涂装耐候钢桥计算时宜采用设置腐蚀余量的方法考虑设计使用期（ T_d ）内的腐蚀损失。腐蚀余量 Δt 宜按公式（6）的计算结果设置。

$$\Delta t = t_d + t_1 - t_n - t_v \dots\dots\dots (7)$$

式中：

Δt —腐蚀余量，mm；

t_d —构件满足极限状态要求的最小厚度，mm；

t_1 —截面厚度损失设计值，mm；

t_n —构件名义厚度，mm；

t_v —热轧钢板的类别和厚度的系数，mm，取值参考GB/T 709。

- 9.4.3 免涂装耐候钢桥构件抗疲劳验算时应计入腐蚀的折减影响，宜在 JTG D64、TB 10091 规定的非耐候钢疲劳细节强度基础上降低一个等级。

9.5 维护

- 9.5.1 免涂装耐候钢桥应定期进行日常养护、锈层稳定性评价。
- 9.5.2 免涂装耐候钢桥宜定期检查、测定板厚：
 - a) 检查周期应根据桥梁技术状况评定结果确定；
 - b) 当测定的构件厚度损失累积量超过设计腐蚀余量时，应对该构件进行涂装；
 - c) 免涂装耐候钢桥定期检查应按照表 6 进行。

表6 定期检查要点

典型部位	检查要点
钢板梁	下翼缘锈层堆积、腹板下部150cm范围内潮湿、接缝处锈渣
钢箱梁	箱内积水、箱体附着腐蚀介质
钢桁梁	桁架节点积水、杂物堆积
横向联结系及加劲肋	水平构件及开口面的积水情况、节点板间隙缝隙腐蚀
螺栓、焊缝	缝隙腐蚀
伸缩缝、排水管	泄漏源的维修和更换
支座、桥墩、桥台	杂物堆积、锈液着色、裂缝、缝隙腐蚀

9.5.3 免涂装耐候钢桥锈层稳定性应采用外观检测结合胶带粘附力测试方法评定：

- a) 外观检测按照表 7 评定；
- b) 胶带粘附力测试按照表 8 评定。

表7 锈层外观评定

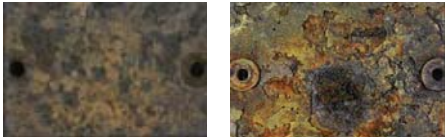
颜色	状态	图样
浅棕色	暴露早期	
巧克力棕色	稳定锈层发展阶段	
黑色	非稳定锈层	

表8 胶带粘附力测试评定

胶带样本纹理	状态
紧密粘附，不受强力钢丝刷剥离	保护性锈层
灰尘状	暴露早期
颗粒状	有潜在失效风险，应根据暴露时间和结构位置判定
片状（直径小于 6mm）	初步判定为非稳定性锈层
片状（直径大于 12mm）	非稳定性锈层
层状或结节	非稳定性锈层，腐蚀严重

9.5.4 耐候钢构件已产生保护性锈层时应持续进行周期性锈层评定，尚未形成稳定锈层时宜定期低压水清洗，出现非稳定性锈层时应进行涂装。

10 制造与安装

10.1 制造

- 10.1.1 高性能钢桥的制造应满足 JTG/T 3651—2022 第 5、6、7 章的规定。
- 10.1.2 对采用混合设计的高性能钢桥构件进行焊接时，焊材的选择应与较高强度、较高韧性的钢材相匹配。
- 10.1.3 在焊接前，应根据高性能钢构件焊接工艺按照表 9 确定：

表9 高性能钢焊接预热和道间温度

温度	不同板厚 t (mm) 的最低预热温度							
	埋弧焊、药皮焊条电弧焊				气体保护熔化极电弧焊、药芯焊丝电弧焊			
	$t < 20$	$20 \leq t \leq 40$	$40 < t \leq 65$	$t > 65$	$t < 20$	$20 \leq t \leq 40$	$40 < t \leq 65$	$t > 65$
最低预热温度 (°C)	10	20	20	50	10	20	65	110
最高预热温度 (°C)	205		230		205		230	

- 10.1.4 吊耳、节点板、接头等处角焊缝应修磨匀顺，其端部必须从主板以圆弧逐渐过渡到连接板，不应存在凸角。
- 10.1.5 高强度螺栓的连接表面抗滑移系数应满足 GB 50205 的规定。
- 10.1.6 高性能钢材应在焊接 24 小时后进行无损检验，焊缝不应有裂纹、未熔合、夹渣、未填满弧坑、漏焊等缺陷，焊缝质量应满足 GB/T 11345 的规定。
- 10.1.7 高性能钢桥构件的零件宜采用冷矫正，矫正后的钢料表面不应有明显的凹痕和其他损伤；采用热矫正时，温度宜控制在 600℃~800℃，严禁过烧，且降至室温前不得锤击零件和用水急冷。
- 10.1.8 对耐候钢桥的焊接技术要求包括：
- 耐候钢桥焊接材料的耐候指数 I 应不小于 6.0；
 - 焊接过程中道间温度应不低于预热温度，最大道间温度不宜超过 180℃，最低预热温度见表 10；
 - 耐候钢桥焊接后应清除焊缝周围的焊剂、焊渣及飞溅物，可进行表面预处理。

表10 耐候钢最低预热温度

耐候钢牌号	不同板厚 t (mm) 的最低预热温度			
	$20 \leq t \leq 40$	$40 < t \leq 60$	$60 < t \leq 80$	$t > 80$
Q345NH	/	50℃	80℃	100℃
Q420NH	/	65℃	100℃	120℃
Q500NH	80℃	100℃	120℃	150℃

- 10.1.9 免涂装耐候钢桥栓接前，应将栓接面打磨至无污垢、氧化皮。

10.2 安装

- 10.2.1 高性能钢桥的安装应满足 JTG/T 3651—2022 第 12、13 章的规定。
- 10.2.2 UHPFRC 现场拌制及浇筑工艺应满足附录 B 的技术规定。
- 10.2.3 采用冷连接界面的 UHPFRC 组合钢桥面板施工应符合以下要求：
- 施工前应对钢桥面板顶板进行除锈、除尘处理，应保证顶板表面清洁、湿润、无积水；
 - 胶层的施工温度宜为 20℃~40℃、可施工温度不低于 0℃；

- c) 胶层施工时宜采用与设计胶层厚度相等的小钢片（如：平面尺寸 5mm×5mm）控制胶层涂刷厚度，胶层厚度差应小于±0.5mm；
 - d) 当胶层界面施工温度为 0℃～20℃时，UHPFRC 层应在 12 小时内浇筑完成；当胶层界面施工温度为 30℃～40℃时，UHPFRC 层应在 4 小时内浇筑完成；
 - e) 对现浇完成的 UHPFRC 区域，应及时覆膜养护，使养护面湿润且不得有积水，养护时间宜大于 14 天。
- 10.2.4 高性能组合塔的内填 UHPFRC 施工时，应满足 UHPFRC 泵送施工条件。
- 10.2.5 耐候钢桥表面宜通过正常使用阶段由轧制氧化层自然更替形成稳定耐候锈层，也可采用喷淋和暴晒交替、稳定化处理技术。
- 10.2.6 耐候钢桥构件在储存过程中应避免积水，应避免构件间、构件与地面之间的接触，耐候钢桥构件堆放的高度应保证其不受从地面溅起的雨水影响。
- 10.2.7 耐候钢构件存放 6 个月以内时应倾斜暴露放置，存放时间大于 6 个月时应对进行覆盖存放。

11 质量验收

- 11.1 高性能钢桥的焊接质量验收应满足 GB 50205 的规定。
- 11.2 高性能钢桥构件的制造质量检验与验收应满足 JTG/T 3651—2022 第 9 章的规定。
- 11.3 UHPFRC 组合桥面板的质量验收应满足表 11 的规定。

表11 UHPFRC 组合桥面实测项目

序号	项目		规定值或 允许偏差值	检查方法和频率
1	厚度（mm）		+10, -5	水准仪：以同桥面板产生相同挠度变形的点为基准点，测量桥面铺装施工前后相对高差；长度不大于 100m 每车道测 3 处，每增加 100m 每车道增加 2 处
2	平整度	σ(mm)	≤1.32	平整度仪：全线每车道连续检测，每 100m 计算 σ、IRI
		IRI(m/km)	≤2.2	
		最大间隙 h(mm)	≤3	3m 直尺，每半幅车道每 200m 测 2 处×5 尺
3	抗滑构造深度(mm)		+1, -1	铺砂法：长度不大于 200m 时测 5 处，每增加 100m 增加 1 处
注：IRI为国际平整度指数；h为3m直尺与面层的最大间隙。				

- 11.4 高性能钢桥安装施工质量应满足 JTG/T 3651-2022 第 14 章的规定。

附录 A
(规范性)

免涂装耐候钢桥全寿命周期经济性评价模型

A.1 免涂装耐候钢桥全寿命周期经济评价模型

免涂装耐候钢桥全寿命周期经济评价模型应按以下要求建立分析：

- a) 确定分析目标：确定研究桥梁的基本特征、分析范围及内容；
- b) 建立分析假定：设置特定的需求条件（如，建设模式、投资模式、环境成本折现率计算方法）；
- c) 成本构成及对应模型：确定成本组成分类并建立各成本相关模型；
- d) 建立总成本分析模型：考虑资金时间价值等建立全寿命周期成本模型。

A.2 免涂装耐候钢桥全寿命周期成本

免涂装耐候钢桥全寿命周期成本应包括决策设计阶段成本、施工阶段成本、运营及回收阶段成本，如图A.1。

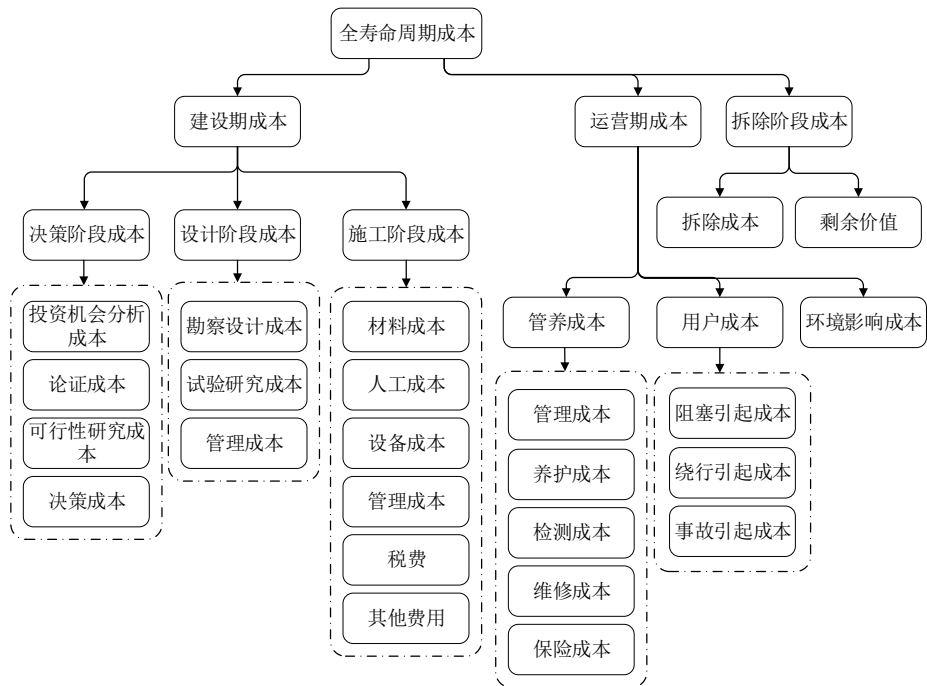


图 A.1 耐候钢桥全寿命周期成本

A.3 耐候钢桥全寿命成本计算模型

耐候钢桥全寿命成本计算模型由公式（A.1）、公式（A.2）公式（A.3）和公式（A.4）组成。

$$LCC = CC + OC + DC \dots\dots\dots(A.1)$$

$$CC = C_{\text{Planning}} + C_{\text{Design}} + C_{\text{Construction}} \dots\dots\dots(A.2)$$

$$OC = C_{\text{Maintenance}} + C_{\text{User}} + C_{\text{Environment}} \dots\dots\dots(A.3)$$

$$DC = C_{\text{Demolition}} + V_{\text{Residual}} \dots\dots\dots(A.4)$$

式中：

LCC ——全寿命周期成本；

CC ——建设期总成本；

OC ——运营期总成本；

DC ——拆除期总成本；

C_{Planning} 、 C_{Design} 、 $C_{\text{Construction}}$ ——建设期规划成本、设计成本、施工成本；

$C_{\text{Maintenance}}$ 、 C_{User} 、 $C_{\text{Environment}}$ ——运营期管养成本、用户成本、环境成本；

$C_{\text{Maintenance}}$ 、 C_{User} ——拆除成本、剩余价值。

附 录 B

(规范性)

UHPFRC 现场拌制及浇筑工艺

B.1 UHPFRC现场拌制工艺

UHPFRC现场拌制工艺应满足以下技术规定：

- a) 搅拌前应确保搅拌设备清洁、干燥，搅拌第一盘拌合料前应湿润搅拌机且不得留有明水；
- b) 干粉料应满足：河砂应过筛（筛网规格：5mm×5mm）、清洗至无泥、晒干；水泥和硅灰要求干燥、无潮湿或压块；
- c) 现场拌制时，应先将干粉组分加入搅拌机并拌合均匀，再加入液体组分（如水、减水剂液体部分），最后均匀撒入钢纤维、且避免成团；
- d) 出料前，应清洁装料运输车、洒水润壁、排干积水。

B.2 UHPFRC现场浇筑工艺

UHPFRC现场浇筑工艺应满足以下技术规定：

- a) 现场浇筑后，应采用表面式振捣器对 UHPFRC 层适度振捣，使表面外露钢纤维适度下沉；
- b) 浇筑后应及时采取覆盖塑料薄膜并保湿的养护措施，严禁初凝前 UHPFRC 表明有明水，养护时间宜大于 14 天；
- c) 若涉及 UHPFRC 表面刻槽的抗滑构造施工，宜在 UHPFRC 初凝阶段进行刻槽处理，再进行覆膜养生，刻槽过程中应尽量减少 UHPFRC 外露面积、时长。

附录 C

(规范性)

组合梁斜拉桥混凝土桥面板翘曲特征系数

C.1 组合梁斜拉桥混凝土桥面板翘曲特征系数

组合梁斜拉桥混凝土桥面板翘曲形函数见公式 (C.1)， k_1 、 k_2 是特征方程 (C.2) 的特征值，应照公式 (C.1) 和公式 (C.2) 求解特征值 k_1 、 k_2 。

$$f = C_1 \operatorname{sh} k_1 x + C_2 \operatorname{ch} k_1 x + C_3 \operatorname{sh} k_2 x + C_4 \operatorname{ch} k_2 x + C_5 x \dots\dots\dots (C.1)$$

$$k^4 + P_1 k^2 + P_2 = 0 \dots\dots\dots (C.2)$$

$$C_3 = -\frac{P_2 q}{P_1 k_2} \dots\dots\dots (C.3)$$

$$C_4 = -\frac{P_2 q}{P_1 k_2} \operatorname{th} k_1 \frac{L}{2} \dots\dots\dots (C.4)$$

$$P_1 = k_s^2 (E_c A_c + E_s A_s) \dots\dots\dots (C.5)$$

$$P_2 = E_c I_c + E_s I_s \dots\dots\dots (C.6)$$

式中：

f ——组合梁斜拉桥混凝土桥面板翘曲形函数；

x ——纵桥向距梁端的距离；

C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 ——边界条件参数，在简支、均布荷载条件下取： $C_1=C_2=C_5=0$ 、 C_3 和 C_4 按照公式 (C.3) 和公式 (C.4) 计算；

k_1 、 k_2 ——由公式 (C.2) 所求解 k 的特征值；

P_1 ——由公式 (C.5) 计算确定；

P_2 ——由公式 (C.6) 计算确定；

E_c 、 E_s ——混凝土弹性模量，钢材弹性模量；

A_c 、 A_s ——混凝土板截面面积，钢主梁截面面积；

I_c 、 I_s ——混凝土板惯性矩，钢主梁惯性矩；

n ——钢材和混凝土弹性模量比， $n = E_s / E_c$ 。