

# GDJTG

广东省交通运输行业地方标准

GDJTG/T A01—2015

## 超高性能轻型组合桥面结构技术规程

Technical Specification for Ultra-high Performance  
Light-weighted Composite Deck Structure

2015-06-15 发布

2015-06-15 实施

广东省交通运输厅发布



广东省交通运输行业地方标准

**超高性能轻型组合桥面结构技术规程**

**Technical Specification for Ultra-high Performance  
Light-weighted Composite Deck Structure**

**GDJTG/T A01—2015**

主编单位：广东冠生土木工程技术有限公司

批准部门：广东省交通运输厅

实施日期：2015年6月15日

2015年·广州



# 广东省交通运输厅文件

粤交科〔2015〕752号

---

## 广东省交通运输厅关于发布《超高性能轻型组合桥面结构技术规程》的通知

各地级以上市交通运输局（委）、顺德区国土城建和水利局、环境运输和城市管理局，省公路局，省交通运输工程质监站、造价站、规划研究中心，省南粤交通投资建设有限公司，省交通集团，各有关单位：

为解决正交异性钢桥面固有的典型病害问题，提高钢桥面耐久性，降低钢桥运营维护成本，减少钢桥面维护引起的交通阻断，厅组织编制了《超高性能轻型组合桥面结构技术规程》（GDJTG/T A01—2015），现予以发布，自发布之日起在全省交通运输行业内

施行。附件请在广东省交通科技网 (<http://jtkj.gdcd.gov.cn>) 通知公告栏下载。

实施过程中, 请各有关单位注意积累资料, 总结经验, 及时将发现的问题和修改意见、建议同时反馈至以下负责日常解释和日常管理工作的单位, 以便修订时研用。

负责日常解释工作单位:

广东冠生土木工程技术有限公司 (广州市番禺区大石街沿江中路北联村新北大街 27 号德智北联务中心 7 楼, 邮编 510000, 联系电话: 020-34619102/13826267557, 电子邮箱: 13826267557@163.com)。

负责日常管理工作单位:

广东省交通运输规划研究中心 (地址: 广州市越秀区白云路 27 号 1510 室, 邮政编码: 510101, 联系电话: 020-83730237, 电子邮箱: gdjtdb@gdcd.gov.cn)。

附件: 超高性能轻型组合桥面结构技术规程



公开方式: 依申请公开

---

抄送: 广东省公路勘察规划设计院股份有限公司。

---

广东省交通运输厅办公室

2015年6月15日印发

---



## 前 言

本规程按照《GB/T 1.1-2009 标准化工作导则》给定的规则起草。

正交异性钢桥面具有结构自重轻、施工快捷方便、承载能力大等优点，在国内外桥梁工程中得到广泛应用。钢桥面系通常由正交异性钢桥面板与沥青混凝土铺装层组成。在运营中，钢桥面系容易出现以下两种典型的病害问题：（1）正交异性钢桥面板疲劳开裂；（2）沥青混凝土铺装层使用寿命偏短，易出现开裂、车辙、壅包等病害，须频繁维护。这些病害问题在国内桥梁中普遍存在，影响了桥梁结构的耐久性和行车舒适性，并增加了钢桥面的维护成本。

为了解决钢桥面系的上述难题，本规程编制单位借鉴国际上有关超高性能混凝土的研究成果，通过大量的科学研究及实桥试验，提出了超高性能轻型组合桥面结构，该结构由正交异性钢桥面板与超高韧性混凝土组合而成，具有局部刚度大、耐久性能好等优点，能够综合解决正交异性钢桥面板的上述典型病害问题。

超高性能轻型组合桥面结构是一种新型的桥面结构形式，与传统的正交异性钢桥面板相比，其设计、施工、验收技术条件均有所不同。为此，特制订本规程。

本规程是在经过 4 年的一系列理论分析和试验研究，并在广东省肇庆市马房大桥实桥应用和检验的基础上进行编写的。

负责本规程日常解释工作的单位：广东冠生土木工程技术有限公司（广州市番禺区大石街沿江中路北联村新北大街 27 号德智北联商务中心 7 楼，邮政编码：511430，联系电话：13826267557，电子邮箱：13826267557@163.com）；湖南大学桥梁工程系（长沙市岳麓山湖南大学土木工程学院，邮政编码：410012，联系电话 13908468141，电子邮箱：shaoxd@vip.163.com）。

负责本规程日常管理工作的单位：广东省交通运输规划研究中心（广州市越秀区白云路 27 号 1510 室，邮政编码：510101，联系电话：020-83730237，电子邮箱：gdjtdb@gdcd.gov.cn）。

主 编 单 位： 广东冠生土木工程技术有限公司

参 编 单 位： 湖南大学

广东省公路建设有限公司

广东虎门大桥有限公司

广东冠粤路桥有限公司

广东省公路勘察规划设计院股份有限公司

主要编写人： 邵旭东 肖礼经 曹君辉 黄政宇 李 嘉

吴玉刚 涂常卫 王树林 曾田胜 梁立农

陈 刚 熊 锋 周志敏 杨亚兵 利良泉

张 哲 张会荣

## 目 录

<b>1 总则</b> .....	<b>1</b>
<b>2 术语和符号</b> .....	<b>2</b>
2.1 术 语 .....	2
2.2 符 号 .....	4
<b>3 材料</b> .....	<b>7</b>
3.1 STC .....	7
3.2 钢材 .....	13
3.3 普通钢筋 .....	16
<b>4 基本规定</b> .....	<b>18</b>
4.1 一般规定 .....	18
4.2 承载能力极限状态计算.....	20
4.3 正常使用极限状态验算.....	21
4.4 持久状况及短暂状况应力验算.....	22
4.5 疲劳验算 .....	22
4.6 设计流程和设计内容.....	23
<b>5 承载能力极限状态设计</b> .....	<b>24</b>
5.1 抗弯承载力计算.....	24
5.2 抗剪承载力计算.....	26
5.3 整体稳定计算.....	27
5.4 疲劳验算 .....	29
<b>6 正常使用极限状态设计</b> .....	<b>41</b>
6.1 一般规定 .....	41
6.2 应力验算 .....	42
6.3 栓钉内力验算.....	46
6.4 STC 抗裂验算 .....	46
6.5 挠度验算 .....	47
<b>7 剪力连接件</b> .....	<b>48</b>

7.1 一般规定 .....	48
7.2 抗剪承载力设计值.....	48
7.3 剪力连接件疲劳验算.....	49
7.4 剪力连接件的数量计算.....	50
<b>8 构造要求.....</b>	<b>51</b>
<b>9 施工.....</b>	<b>53</b>
9.1 一般规定 .....	53
9.2 施工准备 .....	55
9.3 焊接栓钉 .....	56
9.4 铺筑施工 .....	57
9.5 特殊气候条件下施工.....	60
<b>10 检验与验收.....</b>	<b>62</b>
10.1 一般规定 .....	62
10.2 进场检验 .....	62
10.3 质量检验 .....	63
10.4 质量验收 .....	69
<b>附录 A STC 用钢纤维性能检验方法.....</b>	<b>70</b>
<b>附录 B 开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩计算 .....</b>	<b>73</b>
<b>本规程用词说明.....</b>	<b>75</b>
<b>引用标准名录.....</b>	<b>76</b>
<b>条文说明.....</b>	<b>79</b>
<b>1 总则.....</b>	<b>81</b>
<b>2 术语和符号.....</b>	<b>83</b>
<b>3 材料.....</b>	<b>84</b>
3.1 STC .....	84
3.2 钢材 .....	87
3.3 普通钢筋 .....	87
<b>4 基本规定.....</b>	<b>88</b>
4.1 一般规定 .....	88

---

4.2	承载力极限状态计算.....	88
4.3	正常使用极限状态验算.....	89
4.4	持久状况及短暂状况应力验算.....	90
4.5	疲劳计算 .....	90
4.6	设计流程和设计内容.....	90
<b>5</b>	<b>承载力极限状态设计.....</b>	<b>91</b>
5.1	抗弯承载力计算.....	91
5.2	抗剪承载力计算.....	92
5.3	整体稳定计算.....	92
5.4	疲劳验算 .....	95
<b>6</b>	<b>正常使用极限状态设计.....</b>	<b>98</b>
6.1	一般规定 .....	98
6.2	应力验算 .....	99
6.3	栓钉内力验算.....	100
6.4	STC 抗裂验算 .....	100
6.5	挠度验算 .....	101
<b>7</b>	<b>剪力连接件.....</b>	<b>102</b>
7.1	一般规定 .....	102
7.2	抗剪承载力设计值.....	102
7.3	剪力连接件疲劳计算.....	103
7.4	剪力连接件的数量计算与布置.....	104
<b>8</b>	<b>构造要求.....</b>	<b>105</b>
<b>9</b>	<b>施工.....</b>	<b>106</b>
9.1	一般规定 .....	106
9.2	施工准备 .....	106
9.3	焊接栓钉 .....	106
9.4	铺筑施工 .....	106
9.5	特殊气候条件下施工.....	107
<b>10</b>	<b>检验与验收.....</b>	<b>108</b>

10.1	一般规定 .....	108
10.2	进场检验 .....	108
10.3	质量检验 .....	108
10.4	质量验收 .....	108

# 1 总则

**1.0.1** 为规范超高性能轻型组合桥面结构工程的设计和施工，统一质量检验标准，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** 本规程适用于以超高性能轻型组合桥面结构作为桥面体系的桥梁结构，包括新建桥梁和大中修桥梁钢桥面改造，具体包含了超高性能轻型组合桥面结构工程的设计、施工及检验。对于其它领域的工程，亦可参考使用。

**1.0.3** 本规程中超高性能轻型组合桥面结构的钢梁系指含有正交异性钢桥面板的钢主梁，钢主梁的形式多为钢箱梁。

**1.0.4** 本规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，按分项系数的表达式进行设计。

**1.0.5** 超高性能轻型组合桥面结构按 STC 不开裂进行设计，设计基准期与主体桥梁结构一致。

**1.0.6** 铺装层根据不同的材料类型，采用相应的设计寿命。

**1.0.7** 超高性能轻型组合桥面结构工程的设计、施工及检验除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 超高韧性混凝土 Super Toughness Concrete (STC)

由水泥、矿物掺合料、细集料、钢纤维和减水剂等材料或由上述材料制成的干混料先加水拌合，再经凝结硬化后形成的一种具有高抗弯强度、高韧性、高耐久性的水泥基复合材料，简称 STC。

#### 2.1.2 超高性能轻型组合桥面结构 Ultra-high Performance Light-weighted Composite Deck Structure

超高性能轻型组合桥面结构主要由正交异性钢桥面板、超高韧性混凝土层组合而成，超高性能轻型组合桥面结构顶面可铺设面层（沥青混凝土铺装层），如图 2.1.2 所示。

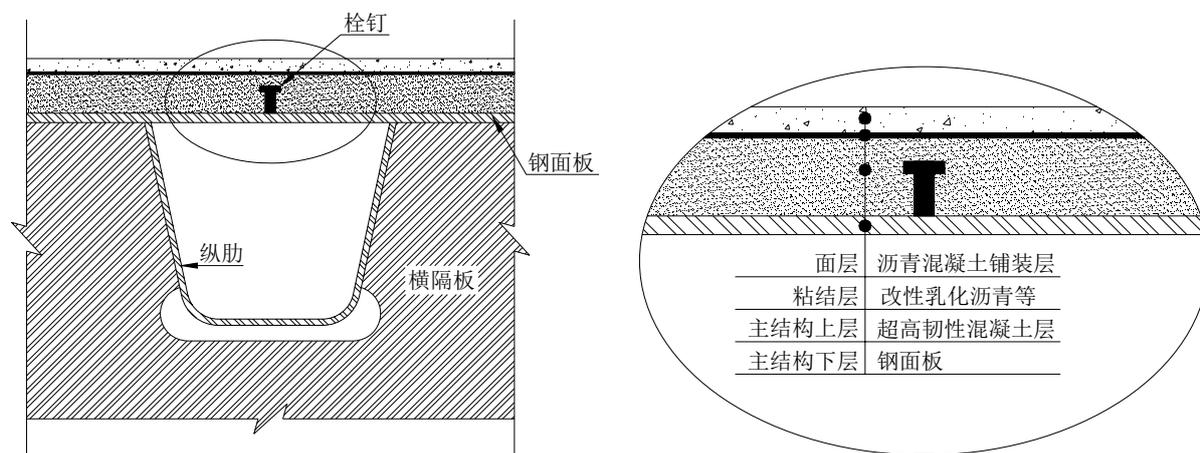


图 2.1.2 超高性能轻型组合桥面结构示意图

#### 2.1.3 主结构上层 Main Structure Upper Course

主结构上层由 STC 层、栓钉和钢筋网组成，起主要承重和防水作用。如图 2.1.3 所示。

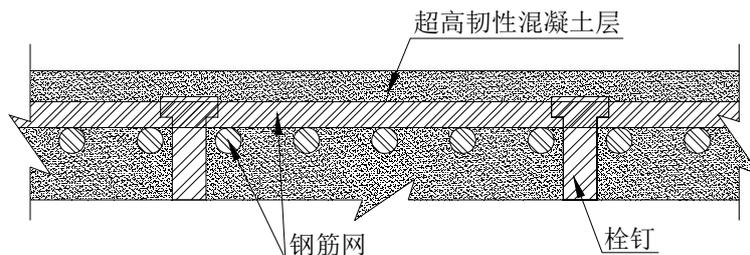


图 2.1.3 主结构上层示意图

#### 2.1.4 粘结层 Bonding Layer

介于主结构上层与面层之间，起到粘结作用的薄层构造，宜采用改性沥青质材料。

#### 2.1.5 面层 Surface Course

位于超高性能轻型组合桥面结构顶面的沥青混凝土铺装层，简称面层。

#### 2.1.6 钢纤维 Steel Fiber

用钢质材料加工制成的短纤维。

#### 2.1.7 钢纤维体积率 Steel Fiber Volume Fraction

在超高韧性混凝土中，钢纤维所占的体积百分数。

#### 2.1.8 高温蒸汽养护 Steam Treating

浇注的超高韧性混凝土在高温、蒸汽环境中持续养护一段时间后达到强度等级，这一养护过程称为高温蒸汽养护。

#### 2.1.9 栓钉 Shear Stud

栓钉又名剪力钉，起到连接钢板与超高韧性混凝土层的作用。

#### 2.1.10 接缝 Joint

为满足超高韧性混凝土在大跨、宽幅桥面上的分块与分幅施工，或满足超高性能轻型组合桥面结构的节段拼装施工，在不同施工单元间设置的连接形式。

## 2.2 符 号

下列术语和定义适用于本规程。

### 2.2.1 材料性能有关符号

STC22——抗弯拉强度标准值为 22 MPa 的超高韧性混凝土；

$E_c$ ——超高韧性混凝土的抗压/抗拉弹性模量；

$E_s$ ——钢材的弹性模量；

$E_r$ ——钢筋的弹性模量；

$G_c$ ——超高韧性混凝土的剪切弹性模量；

$G_s$ ——钢材的抗剪弹性模量；

$f_{ck}$ 、 $f_{cd}$ ——不配筋的超高韧性混凝土的轴心抗压强度标准值、设计值；

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

$f_{tk}$ 、 $f_{td}$ ——超高韧性混凝土抗弯拉强度标准值、设计值；

$f_{td}$ ——不配筋的超高韧性混凝土的轴心抗拉强度设计值；

$\varepsilon_{crack,d}$ ——不配筋的超高韧性混凝土的轴心受拉初裂应变设计值；

$\varepsilon_{td}$ ——不配筋的超高韧性混凝土的轴心受拉极限应变设计值；

$f_t'$ ——配筋的超高韧性混凝土的名义弯拉应力容许值；

$f_{t,joint}'$ ——接缝处配筋的超高韧性混凝土的名义弯拉应力容许值；

$f_y$ ——钢材的屈服强度；

$f_d$ ——钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

$f_{vd}$ ——钢材抗剪强度设计值；

$f_{cd}$ ——钢材断面承压强度设计值；

$f_{stud}^y$ 、 $f_{stud}$ ——栓钉的屈服强度和抗拉强度；

$f_{sk}$ 、 $f_{sd}$ ——普通钢筋抗拉强度标准值、设计值；

$f'_{sk}$ 、 $f'_{sl}$ ——普通钢筋抗压强度标准值、设计值；

$[\Delta\sigma_c]$ ——疲劳验算中，超高韧性混凝土的容许应力幅；

$[\Delta\sigma_s]$ ——疲劳验算中，钢结构构件或构造细节的容许应力幅。

### 2.2.2 作用和作用效应有关符号

$M$ ——弯矩设计值；

$N_s$ ——计算荷载下单个剪力连接件所承受的剪力；

$N_v^c$ ——剪力连接件的抗剪承载力设计值；

$V$ ——剪力设计值；

$\sigma_c$ ——STC 层的应力；

$\sigma_s$ ——钢主梁应力；

$\Delta\sigma_c$ ——标准疲劳车作用下，超高韧性混凝土层的应力幅；

$\Delta\sigma_s$ ——标准疲劳车作用下，钢主梁构件或构造细节处的应力幅。

### 2.2.3 几何参数有关符号

$A_c$ ——超高韧性混凝土层的截面面积；

$A_s$ ——钢主梁的截面面积；

$A_{sc}$ ——钢主梁受压区的截面面积；

$A_{st}$ ——钢主梁受拉区的截面面积；

$A_r$ ——正弯矩区超高韧性混凝土层有效宽度范围内的纵向钢筋截面积；

$A_{rt}$ ——负弯矩区超高韧性混凝土层有效宽度范围内的纵向钢筋截面积；

$A_{stud}$ ——栓钉的钉杆截面面积；

$H$ ——组合梁截面高度；

$L$ ——组合梁计算跨度；

$I_0$ ——组合梁截面的换算截面惯性矩；

$b_c$ ——超高韧性混凝土层的有效宽度；

$h_c$ ——超高韧性混凝土层的厚度；

$l_{d,l}$ ——栓钉纵向间距；

$l_{d,t}$ ——栓钉横向间距。

#### 2.2.4 计算系数及其他有关符号

$\gamma_F$ ——疲劳荷载分项系数；

$\gamma_M$ ——疲劳抗力分项系数；

$\mu$ ——荷载冲击系数。

## 3 材料

### 3.1 STC

**3.1.1** STC 的组成部分包括水泥、粉煤灰、石英砂、石英粉、钢纤维、减水剂和水，其中水胶比宜为 0.16~0.22。

**3.1.2** 水泥应符合现行国家标准 GB175 《通用硅酸盐水泥》的规定；宜采用 42.5 级以上硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。

**3.1.3** 粉煤灰应符合现行国家标准 GB/T 1596 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》的规定，粒化高炉矿渣粉应符合现行国家标准 GB/T 18046 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》的规定，硅灰应符合现行国家标准 GB/T 27690 《砂浆和混凝土用硅灰》的规定。宜采用 I 级粉煤灰、S95 等级以上的粒化高炉矿渣粉。当采用其它矿物掺合料时，应通过试验进行验证，确定 STC 性能满足工程应用要求后方可使用。

**3.1.4** 骨料应为单粒级石英砂和石英粉，性能指标符合表 3.1.4 的规定。

**表 3.1.4 石英砂和石英粉的技术指标（单位%）**

项目	技术指标
二氧化硅含量	≥95
氯离子含量	≤0.02
硫化物及硫酸盐含量	≤0.50
云母含量	≤0.50

**3.1.5** 石英砂和石英粉的筛分试验应符合现行行业标准 JGJ52 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》的规定；石英砂和石英粉的二氧化硅含量检验应符合现行行业标

准 JC/T874《水泥用硅质原料化学分析方法》的规定；石英砂和石英粉的氯离子含量、硫化物及硫酸盐含量、云母含量检验应符合现行行业标准 JGJ52《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》的规定。

**3.1.6** 石英砂应分为粗粒径砂 (1.25mm~0.63mm)、中粒径砂 (0.63mm~0.315mm) 和细粒径砂 (0.315mm~0.16mm) 三个粒级。不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量限制值应符合表3.1.6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3.1.6 不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量**

粒级要求	1.25 mm~0.63mm 粒级		0.63 mm~0.315mm 粒级		0.315 mm~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

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

**3.1.8** 掺用改善拌合物和 STC 性能的其他外加剂时，其性能应符合国家现行相关标准的规定；且应通过试验，确定 STC 性能满足工程应用要求后方可使用。

**3.1.9** 钢纤维应采用镀铜高强度纤维，其性能指标应符合表3.1.9的规定。钢纤维的性能检验应符合附录A的规定。

**表3.1.9 钢纤维的性能指标**

项目	性能指标
抗拉强度 (MPa)	≥1600
长度 (12 mm~14mm或6mm~8mm体积含量) (%)	≥96
直径 (0.18 mm~0.22mm或0.12mm~0.16mm纤维比例) (%)	≥90

形状合格率 (%)	≥96
杂质含量 (%)	≤1.0

注：1.50 根试样的长度平均值应在12mm~14mm或6mm~8mm范围内。

2.50 根试样的直径平均值应在 0.18mm~0.22mm 或 0.12mm~0.16mm 范围内。

**3.1.10** 拌合用水应符合现行行业标准 JG J63 《混凝土用水标准》的规定。

**3.1.11** 配筋对改善 STC 基本力学特性的作用显著，STC 的强度等级应按照配筋和不配筋进行区分。

**3.1.12** 不配筋 STC 的强度等级应按抗弯拉强度划分，各个等级中 STC 的抗弯强度、抗压强度的标准值和设计值不应小于表 3.1.12 的规定。

**表 3.1.12 不配筋 STC 强度等级**

强度等级	抗弯拉强度/MPa		抗压强度/MPa		
	标准值 $f_{jk}$	设计值 $f_{jd}$	立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$	轴心抗压强度标准值 $f_{ck}$	设计值 $f_{cd}$
STC22	22	15.2	120	77.4	53.4
STC25	25	17.2	140	90.3	62.3
STC28	28	19.3	160	103.2	71.2

**3.1.13** STC 具有轴拉应变硬化特性。不配筋 STC22、STC25、STC28 的轴拉强度设计值  $f_{td}$  分别取为 7 MPa、8 MPa、9 MPa，极限拉应变设计值  $\epsilon_{td}$  取固定值 3000  $\mu\epsilon$ 。但初裂应变  $\epsilon_{crack,d}$  应根据轴拉应力强度设计值和本规程第 3.1.17 条所规定的 STC 弹性模量确定。各强度等级下，STC 的轴拉应力-应变曲线如图 3.1.13 所示。

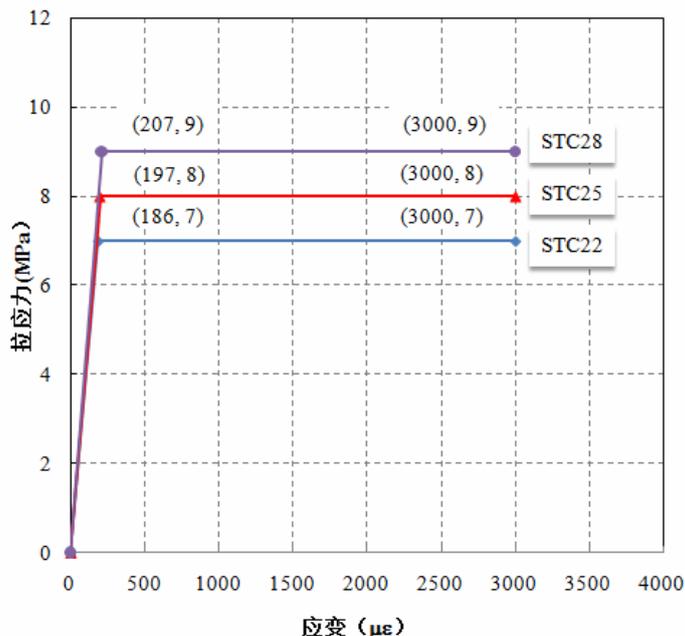


图 3.1.13 不配筋 STC 的轴拉应力-应变曲线

3.1.14 密配筋对于提高 STC 的开裂前抗拉强度具有显著效果。当钢面板厚 12mm，STC 层厚度为 35~50mm，横桥向配筋（位于上层，净保护层厚 15mm）、纵桥向配筋（位于下层）直径为 10mm 时，各强度等级下，配筋 STC 的名义弯拉应力容许值可按表 3.1.14 取值。

表 3.1.14 各强度等级下配筋 STC 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)
STC22	67	16.8
	50	19.0
	40	22.7
	33	26.7
STC25	67	19.5
	50	21.7
	40	25.4
	33	29.4
STC28	67	22.2

	50	24.4
	40	28.1
	33	31.5

**3.1.15** 当施工中需要对 STC 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 STC 的名义弯拉应力容许值可按表 3.1.14 中配筋 STC 名义弯拉应力容许值的 0.65 倍取值，如表 3.1.15 所示。

**表 3.1.15 各强度等级下 STC 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 $f_{t, \text{joint}}^r$ (MPa)
STC22	67	10.9
	50	12.4
	40	14.8
	33	17.4
STC25	67	12.7
	50	14.1
	40	16.5
	33	19.1
STC28	67	14.4
	50	15.9
	40	18.3
	33	20.5

**3.1.16** STC 的抗剪强度可通过试验确定。当无试验资料时，可按公式 3.1.16 计算取值：

$$\tau_c = \gamma f_{ck} \quad (3.1.16)$$

式中： $\tau_c$ —STC 的抗剪强度 (MPa)；

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

$f_{ck}$  —不配筋 STC 的轴心抗压强度标准值 (MPa)。

**3.1.17** STC 的抗压/抗拉弹性模量采用 100mm×100mm×400mm 的试件，按现行国家标准 GB/T 50081《普通混凝土力学性能试验方法标准》或现行行业标准 JTGE 30-2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》通过试验确定。

当无试验资料时，可按公式 3.1.17 计算取值：

$$E_c = 3435.6\sqrt{f_{cu,k}} \quad (3.1.17)$$

式中： $E_c$  —STC 的抗压/抗拉弹性模量(MPa)；

$f_{cu,k}$  —不配筋 STC 的立方体抗压强度标准值(MPa)。

将表 3.1.12 所示不同强度等级 STC 的立方体抗压强度标准值代入公式 (3.1.17) 可得 STC 的抗压/抗拉弹性模量如表 3.1.17 所示。

**表 3.1.17 不同强度等级 STC 的弹性模量 (GPa)**

STC 强度等级	STC22	STC25	STC28
抗压/抗拉弹性模量	37.6	40.7	43.5

**3.1.18** STC 的剪切模量  $G_c$  可按公式 (3.1.18) 取值：

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\mu_c)} \quad (3.1.18)$$

式中： $G_c$  —STC 的剪切模量；

$E_c$  —STC 的抗压/抗拉弹性模量；

$\mu_c$  —STC 的泊松比，按照本规程第 3.1.19 条取值。

**3.1.19** STC 的泊松比  $\mu_c$  可取为 0.2；STC 的温度线膨胀系数  $\alpha_c$  可取为  $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

**3.1.20** 在不同养护条件下，STC 的收缩应变和徐变系数按表 3.1.20 取值。

**表 3.1.20 STC 的收缩应变和徐变系数**

养护条件	收缩应变/ $\mu\epsilon$	徐变系数
高温蒸汽养护后	0	0.2
自然养护（相对湿度 50~70%）	550	0.8

**3.1.21** 钢筋在 STC 内的锚固长度的取值应符合以下规定：

- 1 当钢筋达到其屈服强度时，锚固长度为  $6d_r$ ，其中  $d_r$  为钢筋的公称直径。
- 2 当钢筋达到其极限强度时，锚固长度为  $9d_r$ ，其中  $d_r$  为钢筋的公称直径。

**3.1.22** STC 的抗渗性能级别应不低于 P20 级，即抗渗压强不低于 2.0MPa。

## 3.2 钢材

**3.2.1** 超高性能轻型组合桥面结构中的钢主梁应按结构形式、受力特点、连接方式及其所处环境条件等因素合理选用钢材的牌号和等级。

**3.2.2** 超高性能轻型组合桥面结构的钢材可采用 Q235 钢、Q345 钢、Q390 钢和 Q420 钢，其质量应分别符合国家标准《碳素结构钢》GB/T700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。钢材强度设计值应按表 3.2.2 采用。

**表 3.2.2 钢材的强度设计值 (MPa)**

钢 材		抗拉、抗压和抗弯	抗剪	端面承压
牌号	厚度或直径 (mm)	$f_d$	$f_{vd}$	(刨平顶紧) $f_{ccd}$
Q235 钢	$\leq 16$	190	110	280
	16~40	180	105	270
	40~100	170	100	255
Q345 钢	$\leq 16$	275	160	415
	16~40	270	155	400

	40~63	260	150	390
	63~80	250	145	375
	80~100	245	140	365
Q390 钢	≤16	310	180	465
	16~40	295	170	445
	40~63	280	160	420
	63~100	265	150	395
Q420 钢	≤16	335	195	505
	16~40	320	185	480
	40~63	305	175	455
	63~100	290	165	430

注：表中厚度系指计算点的钢材厚度，对轴心受压构件系指截面中较厚板件的厚度。

**3.2.3** 超高性能轻型组合桥面结构宜采用桥梁用结构钢，其质量应符合现行国家标准《桥梁用结构钢》GB/T 714 的规定。钢材强度设计值应按表 3.2.3 采用。

**表 3.2.3 钢材的强度设计值 (MPa)**

钢 材		抗拉、抗压和抗弯	抗剪	端面承压
牌号	厚度或直径 (mm)	$f_d$	$f_{vd}$	(刨平顶紧) $f_{ccd}$
Q235q 钢	≤50	185	105	275
	50~100	180	100	270
Q345q 钢	≤50	275	155	410
	50~100	265	150	395
Q370q 钢	≤50	295	170	440
	50~100	285	165	425
Q420q 钢	≤50	335	190	500
	50~100	325	185	485

注：表中厚度系指计算点的钢材厚度，对轴心受压构件系指截面中较厚板件的厚度。

### 3.2.4 钢主梁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国家标准《碳钢焊条》GB 5117 或《低合金钢焊条》GB 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，并应符合国家现行相关标准的规定。

### 3.2.5 钢主梁及连接件使用的高强螺栓应符合下列标准：

- 1 高强度螺栓、螺母、垫圈应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角头螺母、垫圈技术条件》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 高强度螺栓的预应力设计值  $P_d$  应按表 3.2.5 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 3.2.5 高强螺栓的预拉力设计值 (kN)

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

3.2.6 构件中设置的栓钉应符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的规定。栓钉的力学性能应符合 3.2.6 的规定。

表 3.2.6 栓钉的力学性能 (MPa)

钢 号	屈服强度 $f_{styd}^y$	抗拉强度 $f_{stud}$
ML15、ML15AI	$\geq 320$	$\geq 400$

3.2.7 钢材的物理性能指标应按表 3.2.7 采用。

表 3.2.7 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 $\nu_s$	线膨胀系数 $\alpha_s$ (以每℃计)	质量密度 $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
$2.06 \times 10^5$	$7.9 \times 10^4$	0.3	$1.2 \times 10^{-5}$	7850

### 3.3 普通钢筋

**3.3.1** STC 中的普通钢筋宜选用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 和 RRB400 钢筋，并应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2 的规定。

**3.3.2** 普通钢筋的抗拉强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。

普通钢筋的抗拉强度标准值  $f_{sk}$  应按表 3.3.2 采用。

**表 3.3.2 钢材的物理性能指标**

钢筋种类	符号	公称直径 d (mm)	$f_{sk}$ (MPa)
HRB400	Φ	6~50	400
HRBF400	Φ <sup>F</sup>		
RRB400	Φ <sup>R</sup>		
HRB500	Φ	6~50	500
HRBF500	Φ <sup>F</sup>		

**3.3.3** 普通钢筋的抗拉强度设计值  $f_{sd}$  和抗压强度设计  $f'_{sd}$  应按表 3.3.3 采用。

**表 3.3.3 普通钢筋抗拉、抗压强度设计值 (MPa)**

钢筋种类	$f_{sd}$	$f'_{sd}$
HRB400	330	330
HRBF400		
RRB400		
HRB500	415	415
HRBF500		

注：1. 超高性能轻型组合桥面结构的轴心受拉和小偏心受拉构件的钢筋抗拉强度设计值大于 330MPa 时，应按 330MPa 取用。

2. 构件中配有不同种类的钢筋时，每种钢筋应采用各自强度的设计值。

**3.3.4** 普通钢筋的弹性模量  $E_r$  应按表 3.3.4 采用。

**表 3.3.4 普通钢筋的弹性模量 (MPa)**

钢 筋 种 类	$E_r$
HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500、RRB400	$2.0 \times 10^5$

## 4 基本规定

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁应对其构件及连接件进行下列验算：

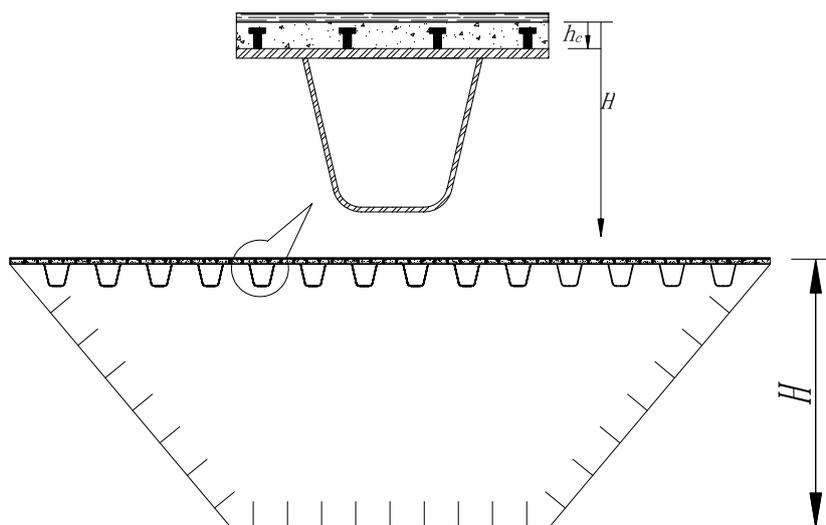
- 1 按承载能力极限状态的要求进行持久状况及偶然状况的承载力、整体稳定计算。
- 2 按正常使用极限状态的要求进行持久状况的抗裂性、应力、挠度验算，以及耐久性设计。
- 3 按短暂状况结构受力状态的要求进行施工等工况的验算。

**4.1.2** 超高性能轻型组合桥面结构中，STC 层的有效宽度 $b_c$ 应按照《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917—2013 中的第 4.1.5 条取值。

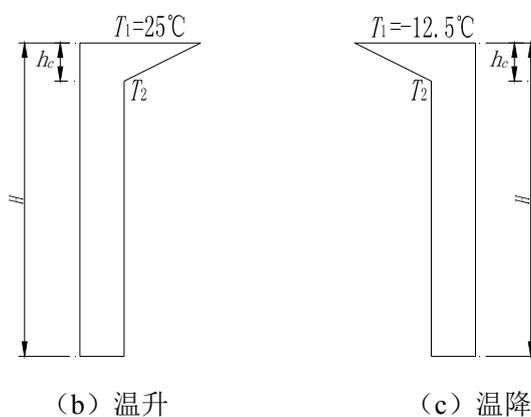
**4.1.3** 超高性能轻型组合桥面结构的温度作用应按下列规定计算：

1 计算超高性能轻型组合桥面结构由于均匀温度作用引起的效应时，应从受到约束时的结构温度开始，计算环境最高和最低有效温度的作用效应。当缺乏实际调查资料时，最高和最低有效温度标准值可按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004 取值。材料线膨胀系数应按本规程第 3.1.19 条和第 3.2.7 条的规定取值。

2 计算超高性能轻型组合桥面结构由于梯度温度引起的效应时，应采用图 4.1.3 所示的竖向温度梯度分布形式。温度梯度取值按照式 (4.1.3) 进行。



(a) 断面尺寸示意



(b) 温升

(c) 温降

图 4.1.3 温度梯度计算图示

$h_c$ —STC 层的厚度； $H$ —组合截面全高

1) 温升时， $T_2$  按照下式计算：

$$T_2 = 25 - \frac{25 - 6.7}{100} h_c \quad (4.1.3-1)$$

式中： $h_c$ —STC 层的厚度（mm）。

2) 温降时， $T_2$  按照下式计算：

$$T_2 = -12.5 - \frac{-12.5 + 3.3}{100} h_c \quad (4.1.3-2)$$

式中： $h_c$ —STC 层的厚度（mm）。

**4.1.4** 超高性能轻型组合桥面结构的设计计算除应符合本规程的规定外，尚应符合现行行业标准《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917—2013、《公路钢筋混凝土及预

应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的相关规定。

**4.1.5** 面层（铺装层）的设计应按现行行业标准《公路沥青路面设计规范》JTG D50-2006 实施。

## 4.2 承载能力极限状态计算

**4.2.1** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的安全等级应根据结构的重要性、结构破坏可能产生的严重性按表 4.2.1 采用。

**表 4.2.1 桥梁的安全等级**

安全等级	结构类型	桥梁类型
一级	重要结构	特大桥、大桥、中桥、重要小桥
二级	一般结构	小桥

注：1.表中所列大、中、小桥系按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004 中的单孔跨径确定，对于多跨不等跨桥梁，以其中最大跨径为准，本表冠以“重要”的中桥和小桥，系指高速公路和一级公路上、国防公路上、城市快速路上、主干路和交通特别繁忙的城市次干路上的桥梁。  
2.对有特殊要求的桥梁，其设计安全等级可根据具体情况另行确定。

**4.2.2** 超高性能轻型组合桥面结构的承载能力极限状态计算应采用下式：

$$\gamma_0 S_{ud} \leq R \quad (4.2.2)$$

式中： $\gamma_0$ —桥梁的重要性系数，对应于设计安全等级一级、二级的超高性能轻型组合桥面结构桥梁应分别取不小于 1.1、1.0；

$S_{ud}$ —作用效应的组合设计值，对于汽车荷载效应应计入冲击系数；

$R$ —构件承载能力设计值。

**4.2.3** 当对超高性能轻型组合桥面结构桥梁进行截面承载力、整体稳定、剪力连接件承载力计算时，作用（或荷载）的效应组合应采用现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的基本组合；当进行倾覆稳定计算和疲劳验算时，作用的效应组合应采用标准组合。

**4.2.4** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的抗倾覆稳定计算应按照现行行业标准《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917—2013 中的第 4.5 条进行计算。

### 4.3 正常使用极限状态验算

**4.3.1** 超高性能轻型组合桥面结构的正常使用极限状态验算应采用式 (4.3.1)：

$$S_{sd} \leq C \quad (4.3.1)$$

式中： $S_{sd}$ —正常使用极限状态作用（或荷载）组合的效应设计值；

$C$ —结构构件达到正常使用要求所规定的变形、应力和裂缝宽度等的限值。

**4.3.2** 超高性能轻型组合桥面结构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 STC 层抗裂验算，作用（或荷载）应采用现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004 中短期效应组合；对长期挠度验算，作用（或荷载）应采用现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004 中长期效应组合；计算值不得超过本规程规定的各相应限值。

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 STC 收缩（当未采用高温蒸汽养护时）、徐变、基础不均匀沉降以及温度变化等引起的次效应。

**4.3.3** 超高性能轻型组合桥面结构的挠度应符合下列规定：

1 由汽车荷载（不计冲击力）所引起简支或连续梁的竖向挠度，不应超过计算跨径的 1/600；梁悬臂端部的竖向挠度不应超过悬臂长度的 1/300。

2 当结构自重和静活载产生的挠度超过计算跨径的 1/1600 时，桥梁结构应设置预拱度，其值等于结构重力和 1/2 静活载所产生的竖向挠度和，预拱度线形应采用平顺曲线。

3 对于临时或特殊结构，其竖向挠度容许值可与有关部门协商确定。

**4.3.4** 超高性能轻型组合桥面结构的局部稳定应符合规范《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917—2013 第 6.4 节的要求。

**4.3.5** 超高性能轻型组合桥面结构中 STC 层顶面的最大裂缝宽度限定为 0.05 mm, 设计中应对 STC 层进行抗裂验算。

#### 4.4 持久状况及短暂状况应力验算

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

**4.4.2** 持久状况下, 超高性能轻型组合桥面结构的应力验算应符合下列规定:

- 1 STC 层正截面的最大压应力不宜大于  $0.50 f_{ck}$ 。
- 2 钢结构应力不应大于 75% 的强度设计值, 且应满足稳定的要求。

**4.4.3** 短暂状况下, 超高性能轻型组合桥面结构的应力验算应符合下列规定:

- 1 STC 层正截面的最大压应力不宜大于  $0.70 f_{ck}$ 。
- 2 钢结构应力不应大于 80% 的强度设计值, 且应满足稳定的要求。

#### 4.5 疲劳验算

**4.5.1** 疲劳验算的目的是确保超高性能轻型组合桥面结构在设计寿命期内不会出现由疲劳开裂引起的安全问题, 并降低运营中对各构件和疲劳细节的疲劳检测和维护频率。

**4.5.2** 超高性能轻型组合桥面结构的疲劳验算应采用容许应力幅法, 应力应按弹性状态计算。容许疲劳应力幅应按构细节分类以及应力循环次数确定。疲劳验算的方法和细则应符合本规程第 5.4 节的有关规定。

## 4.6 设计流程和设计内容

4.6.1 超高性能轻型组合桥面结构的设计流程如图 4.6.1 所示：

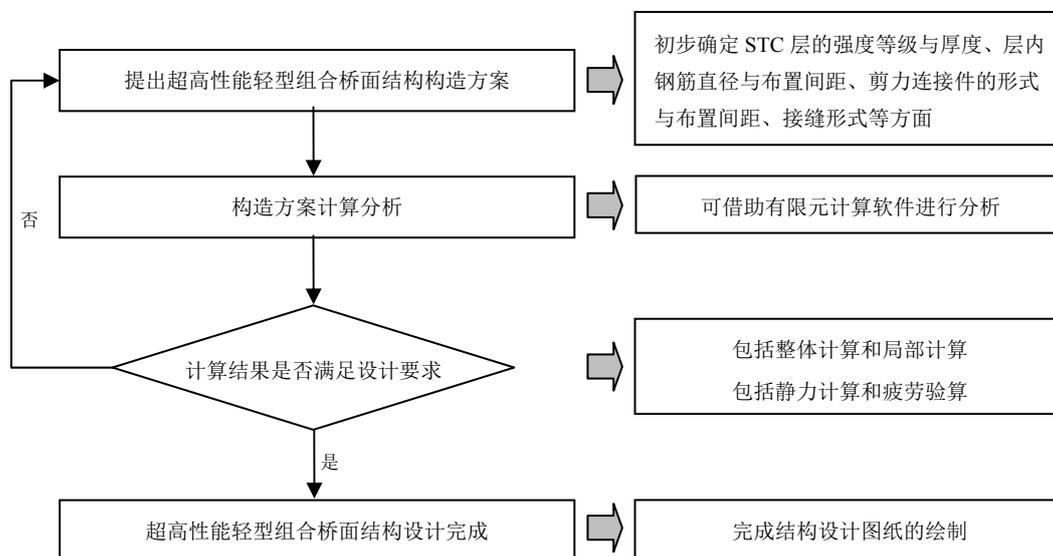


图 4.6.1 超高性能轻型组合桥面结构设计流程示意图

4.6.2 超高性能轻型组合桥面结构的设计内容包含：

1 确定超高韧性混凝土层的强度等级与厚度、层内钢筋直径与布置间距、钢-STC 结合面剪力连接件的形式及布置间距；

2 确定超高性能轻型组合桥面结构中正交异性钢桥面板的构造，如面板厚度，纵肋、横隔形式与间距，构造细节形式等，该部分与传统正交异性钢桥面板的设计内容相同；

3 确定超高性能轻型组合桥面结构中的接缝形式。

## 5 承载能力极限状态设计

### 5.1 抗弯承载力计算

5.1.1 采用塑性设计方法计算超高性能轻型组合桥面结构强度时,在下列部分可不计及弯矩和剪力的相互影响;

1 受正弯矩作用的超高性能轻型组合桥面结构截面;

2 受负弯矩作用且  $A_r f_{sd}$  不小于  $0.15 A_s f_d$  的超高性能轻型组合桥面结构截面 ( $A_r$  为负弯矩区 STC 桥面板有效宽度范围内纵向钢筋的截面面积,  $f_{sd}$  为普通钢筋的抗拉强度设计值,  $A_s$  为钢主梁截面面积,  $f_d$  为钢材的抗压或抗拉强度设计值)。

5.1.2 塑性设计方法设计正弯矩区超高性能轻型组合桥面结构的抗弯承载力时,由于 STC 层较薄,一般情况下均能满足  $A_c f_{cd} + A_r f_{sd} < A_s f_d$ , 因此,塑性中和轴始终在钢主梁截面内 (图 5.1.2), 抗弯承载力应符合下列公式要求:

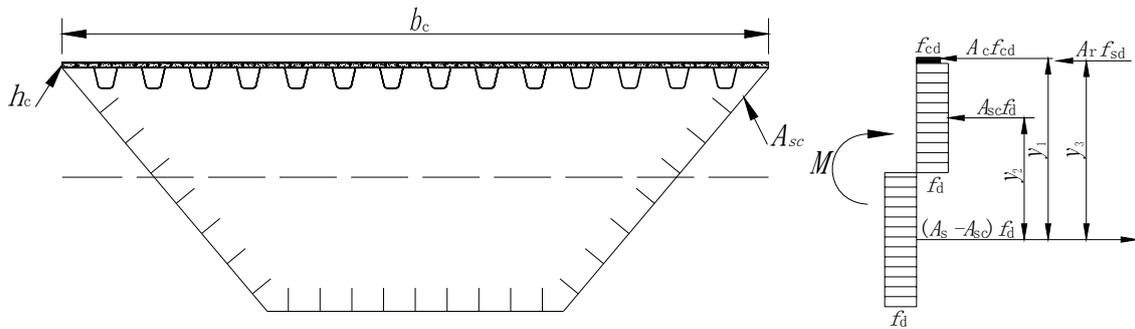


图 5.1.2 正弯矩塑性极限状态下,组合梁截面及应力图形

$h_c$ —STC 层的厚度;  $b_c$ —STC 层的有效宽度

$$\gamma_0 M \leq M_u = A_c f_{cd} y_1 + A_s f_d y_2 + A_r f_{sd} y_3 \quad (5.1.2-1)$$

$$A_{sc} = \frac{A_s f_d - A_c f_{cd} - A_r f_{sd}}{2 f_d} \quad (5.1.2-2)$$

式中:  $\gamma_0$ —桥梁结构重要性系数,按本规程第 4.2.2 条的规定取值;

$M$ —正弯矩设计值 (N·mm) ;

$M_u$ —截面正弯矩承载力设计值 (N·mm) ;

$A_c$ —STC 层的截面面积(mm<sup>2</sup>);

$A_{sc}$ —钢主梁受压区的截面面积(mm<sup>2</sup>);

$A_r$ —正弯矩区 STC 层有效宽度范围内的纵向钢筋截面面积(mm<sup>2</sup>);

$A_s$ —钢主梁的截面面积(mm<sup>2</sup>);

$y_1$ —STC 层截面形心至钢主梁受拉区截面形心的距离 (mm) ;

$y_2$ —钢主梁受压区截面形心至钢主梁受拉区截面形心的距离 (mm) ;

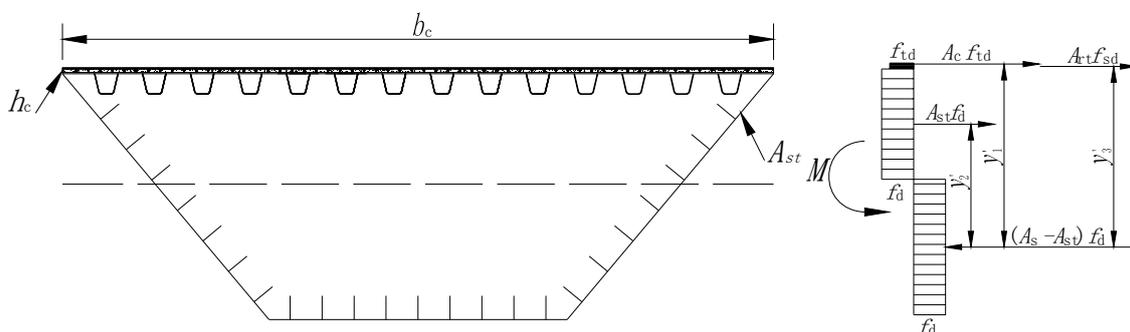
$y_3$ —STC 层内钢筋截面形心至钢主梁受拉区截面形心的距离 (mm) ;

$f_{cd}$ —STC 的抗压强度设计值 (MPa) ;

$f_d$ —钢材的抗拉强度设计值 (MPa) ;

$f_{sd}$ —STC 桥面板内纵向钢筋的抗拉强度设计值 (MPa) 。

**5.1.3** 塑性设计方法设计负弯矩区超高性能轻型组合桥面结构的抗弯承载力时, 由于 STC 层较薄, 一般情况下均能满足  $A_c f_{td} + A_{rt} f_{sd} < A_s f_d$ , 因此, 塑性中和轴在钢主梁截面内 (图 5.1.3), 抗弯承载能力应符合下列公式要求:



**图 5.1.3 负弯矩塑性极限状态下, 组合梁截面及应力图形**

$h_c$ —STC 层的厚度;  $b_c$ —STC 层的有效宽度

$$\gamma_0 M' \leq M'_u = A_c f_{td} y'_1 + A_{st} f_d y'_2 + A_{rt} f_{sd} y'_3 \quad (5.1.3-1)$$

$$A_{st} = \frac{A_s f_d - A_c f_{td} - A_{rt} f_{sd}}{2 f_d} \quad (5.1.3-2)$$

式中： $\gamma_0$ —桥梁结构重要性系数，按本规程第 4.2.2 条的规定采用；

$M'$ —负弯矩设计值 (N•mm)；

$M'_u$ —截面负弯矩承载力设计值 (N•mm)；

$A_c$ —STC 层的截面面积(mm<sup>2</sup>)；

$A_{st}$ —钢主梁受拉区的截面面积(mm<sup>2</sup>)；

$A_{rt}$ —负弯矩区 STC 层有效宽度范围内的纵向钢筋截面面积(mm<sup>2</sup>)；

$A_s$ —钢主梁的截面面积(mm<sup>2</sup>)；

$y'_1$ —STC 层截面形心至钢主梁受压区截面形心的距离 (mm)；

$y'_2$ —钢主梁受拉区截面形心至钢主梁受压区截面形心的距离 (mm)；

$y'_3$ —STC 层内钢筋截面形心至钢主梁受压区截面形心的距离 (mm)；

$f_{td}$ —STC 层的轴拉强度设计值 (MPa)；

$f_d$ —钢材的抗拉强度设计值 (MPa)；

$f_{sd}$ —STC 层内纵向钢筋的抗拉强度设计值 (MPa)。

## 5.2 抗剪承载力计算

**5.2.1** 超高性能轻型组合桥面结构的抗剪承载力可采用下式计算：

$$\gamma_0 V \leq h_w t_w f_{vd} \quad (5.2.1)$$

式中： $V$ —剪力设计值 (N)；

$h_w$ —钢主梁腹板高度 (mm)；

$t_w$ —钢主梁腹板厚度 (mm)；

$f_{vd}$ —钢材的抗剪强度设计值 (MPa)。

**5.2.2** 超高性能轻型组合桥面结构承受弯矩和剪力共同作用时,应按下列规定验算腹板最大折算应力:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1f_d \quad (5.2.2)$$

式中:  $\sigma$ 、 $\tau$ —钢主梁腹板计算高度边缘同一点上同时产生的正应力、剪应力 (MPa);  
 $f_d$ —钢材抗拉强度设计值 (MPa)。

### 5.3 整体稳定计算

**5.3.1** 在超高性能轻型组合桥面结构中,当钢桥面板的纵向加劲肋采用闭口肋时,无须进行整体稳定计算。当加劲肋为开口肋时(如倒 T 型钢、角钢等形式),若开口纵向加劲肋受压翼缘的自由长度  $l_1$  与其总宽度  $b_1$  的比值超过了表 5.3.1 规定的数值时,应进行整体稳定计算。

**表 5.3.1 开口纵向加劲肋不需要计算稳定的最大  $l_1/b_1$  值**

钢 种	跨中无侧向支承点的梁	跨中有侧向支承点的梁
Q235q、Q235	13.0	16.0
Q345q、Q345	10.5	13.0
Q370q、Q390	10.0	12.5
Q420q、Q420	9.5	12.0

注: 1.  $l_1$  为受压翼缘侧向支点间的距离, 即两道相邻横隔板的间距;

2.  $b_1$  为开口纵向加劲肋受压翼板的宽度。

**5.3.2** 施工阶段的超高性能轻型组合桥面结构, 在 STC 层未硬化前, 应对钢主梁进行整体稳定计算。

**5.3.3** 钢主梁与 STC 层结合后, 当受负弯矩作用的超高性能轻型组合桥面结构需要进行整体稳定计算时, 其整体稳定可按下列公式进行计算:

$$\gamma_0 M_d \leq \chi_{LT} M_{Rd} \quad (5.3.3-1)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ 且 } \chi_{LT} \leq 1 \quad (5.3.3-2)$$

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT}^2 - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (5.3.3-3)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Rk}}{M_{cr}}} \quad (5.3.3-4)$$

$$M_{Rk} = W_n f_y \quad (5.3.3-5)$$

式中： $M_d$ —超高性能轻型组合桥面结构中弯矩设计值 (N•mm)；

$M_{Rd}$ —按本规程第 5.1 节规定计算的超高性能轻型组合桥面结构截面抗弯承载力 (N•mm)；

$\chi_{LT}$ —超高性能轻型组合桥面结构侧扭屈曲的折减系数；

$\phi_{LT}$ —计算过程中简写符号；

$\bar{\lambda}_{LT}$ —换算长细比；

$\alpha_{LT}$ —缺陷系数，应按表 5.3.3-1 和表 5.3.3-2 取值；

$M_{Rk}$ —采用材料强度标准值计算的组合梁截面抗弯承载力 (N•mm)，应按本规程第 5.1 节的规定计算；

$M_{cr}$ —超高性能轻型组合桥面结构侧扭屈曲弹性临界弯矩 (N•mm)，可按本规程附录 B 进行计算；

$f_y$ —钢材的屈服强度 (MPa)；

$W_n$ —组合截面的净截面模量 (mm<sup>3</sup>)。

表 5.3.3-1 缺陷系数  $\alpha_{LT}$

屈曲曲线类型	a	b	c	d
缺陷系数 $\alpha_{LT}$	0.21	0.34	0.49	0.76

表 5.3.3-2 侧向失稳曲线分类

横截面形式	屈曲方向	屈曲曲线类型
轧制 I 形截面	$h/b \leq 2$	<i>a</i>
	$h/b > 2$	<i>b</i>
焊接 I 形截面	$h/b \leq 2$	<i>c</i>
	$h/b > 2$	<i>d</i>
其他截面	—	<i>d</i>

## 5.4 疲劳验算

**5.4.1** 疲劳验算主要采用交通荷载，必要时还应考虑恒载、温度、风等其他荷载的共同作用。针对不同构件类型和设计目的，定义下列两种疲劳模型：

- 1 疲劳荷载模型 I 用于验算全局受力构件是否具有无限疲劳寿命。
- 2 疲劳荷载模型 II 用于验算局部受力构件在其设计使用期内是否具有足够的安全性。

### 5.4.2 疲劳荷载模型 I 及疲劳验算公式。

- 1 疲劳荷载模型 I 采用以下公式验算：

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_p}{\Delta \sigma_D / \gamma_{Mf}} \leq 1.0 \quad (5.4.2-1)$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_p}{\Delta \tau_L / \gamma_{Mf}} \leq 1.0 \quad (5.4.2-2)$$

式中： $\gamma_{Ff}$ —疲劳荷载分项系数，取 1.0；

$\gamma_{Mf}$ —疲劳抗力分项系数，对重要构件取 1.35，对次要构件取 1.15；

$\Delta \sigma_p$ 、 $\Delta \tau_p$ —按疲劳荷载模型 I 计算得到的正应力幅与剪应力幅；

$\Delta \sigma_D$ —正应力常幅疲劳极限，取值参考本规程第 5.4.5 和 5.4.6 条；

$\Delta \tau_L$ —剪应力疲劳截止限，取值参考本规程第 5.4.5 和 5.4.6 条。

2 疲劳荷载模型 I 为等效的车道荷载。集中荷载为  $0.7P_K$ ，均布荷载为  $0.3q_K$ 。 $P_K$  和  $q_K$  按《公路工程技术标准》JTG B01-2014 第 7.0.3 条取值。

3 疲劳荷载模型 I 产生的应力幅按以下公式计算：

$$\Delta\sigma_p = \sigma_{p\max} - \sigma_{p\min} \quad (5.4.2-3)$$

$$\Delta\tau_p = \tau_{p\max} - \tau_{p\min} \quad (5.4.2-4)$$

式中， $\sigma_{p\max}$ 、 $\sigma_{p\min}$ —将疲劳荷载模型 I 按最不利情况加载于影响线得出的最大和最小正应力；

$\tau_{p\max}$ 、 $\tau_{p\min}$ —将疲劳荷载模型 I 按最不利情况加载于影响线得出的最大和最小剪应力。

### 5.4.3 疲劳荷载模型 II。

1 疲劳荷载模型 II 采用以下公式验算，其中公式 (5.4.3-3) 用于考虑组合应力的情况。

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E5}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1.0 \quad (5.4.3-1)$$

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E5}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1.0 \quad (5.4.3-2)$$

$$\left(\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E5}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E5}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}}\right)^5 \leq 1.0 \quad (5.4.3-3)$$

式中： $\Delta\sigma_{E5}$ 、 $\Delta\tau_{E5}$ —换算为 500 万次常幅疲劳循环的等效常值应力幅。

$\Delta\sigma_C$ 、 $\Delta\tau_C$ —疲劳细节类别值，为对应 500 万次常幅疲劳循环的疲劳应力强度，取值参考本规程第 5.4.5 和 5.4.6 条。

2 疲劳荷载模型 II 为单车模型，模型车轴荷载及分布规定如图 5.4.3-1 所示。

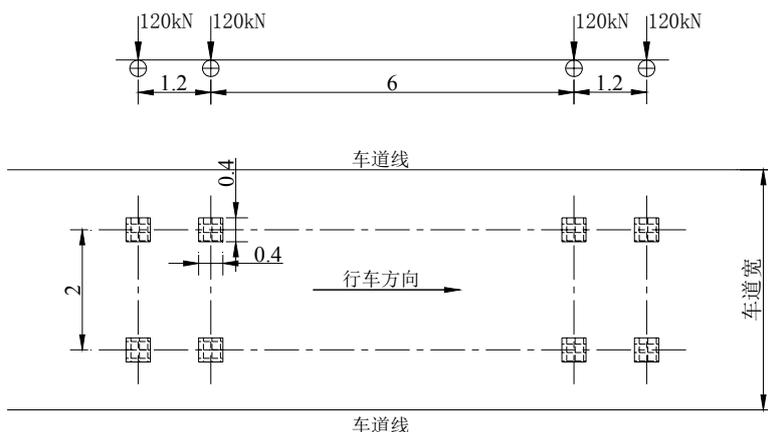


图 5.4.3-1 疲劳车模型 II (单位: m)

3 疲劳荷载模型 II 产生的等效常值应力幅按以下公式计算:

$$\Delta\sigma_{E5} = (1 + \mu)\lambda(\sigma_{P_{max}} - \sigma_{P_{min}}) \quad (5.4.3-4)$$

$$\Delta\tau_{E5} = (1 + \mu)\lambda(\tau_{P_{max}} - \tau_{P_{min}}) \quad (5.4.3-5)$$

式中:  $\mu$  — 冲击系数, 按第 5.4.7 条的规定取值;

$\lambda$  — 损伤等效系数,  $\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$ , 且  $\lambda \leq \lambda_{max}$ , 其中  $\lambda_{max}$  按图 5.4.3-5 取值;

$\sigma_{p_{max}}$ 、 $\sigma_{p_{min}}$  — 将疲劳荷载模型 II 按最不利情况加载于影响线得出的最大和最小正力;

$\tau_{p_{max}}$ 、 $\tau_{p_{min}}$  — 将疲劳荷载模型 II 按最不利情况加载于影响线得出的最大和最小剪应力。

4 在计算正交异性钢桥面板应力时, 应考虑车轮在车道上的横向分布, 见图 5.4.3-2。

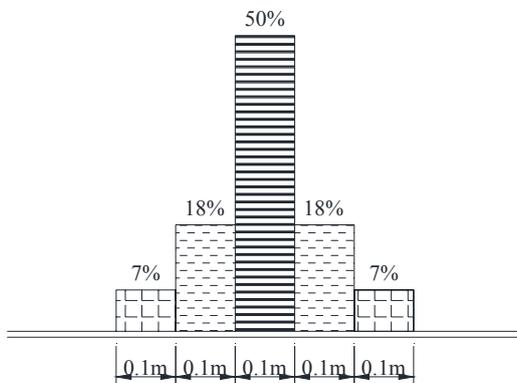


图 5.4.3-2 疲劳荷载模型 II 中心线横桥向分布概率

5  $\lambda_1$  为损伤效应系数, 根据验算构件影响线(面)的临界长度  $l$  按图 5.4.3-3 取值。

当  $l$  大于 80m 时, 按 80m 计, 当  $l$  小于 10m 时, 按 10m 计。

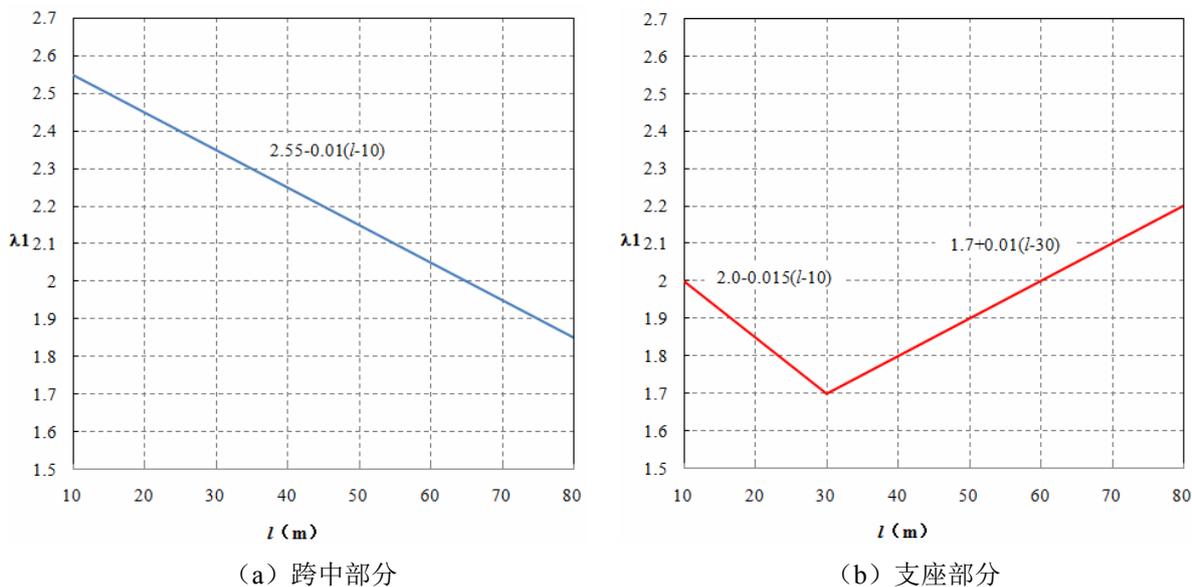


图 5.4.3-3 针对弯矩的  $\lambda_1$  取值图

验算截面对应的临界长度  $l$  按以下规则确定:

(1) 用于弯矩计算:

对于简支梁, 取其跨径值;

对于连续梁跨中部位截面(如图 5.4.3-4 所示), 取验算截面所在跨的跨径;

对于连续梁支承部分截面(如图 5.4.3-4 所示), 取相邻两跨跨径的平均值;

对于桥道横梁, 取相邻桥道纵梁跨径之和。

(2) 用于剪力计算:

对于支承部分截面(如图 5.4.3-4 所示), 取验算截面所在跨的跨径值;

对于跨中部分截面(如图 5.4.3-4 所示), 取验算截面所在跨跨径的 0.4 倍。

(3) 用于拱桥计算:

对于吊杆, 取 2 倍的吊杆长度;

对于拱圈, 取拱跨跨径一半。

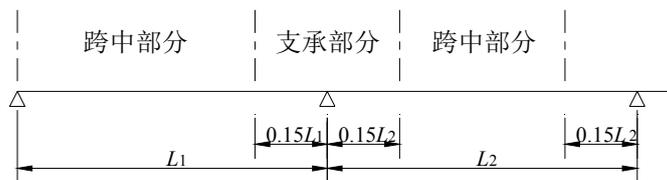


图 5.4.3-4 跨中部分与支承部分的范围划分

6  $\lambda_2$  为交通流量系数，由下式计算确定：

$$\lambda_2 = \frac{Q_0}{480} \left( \frac{N_{ly}}{0.5 \times 10^6} \right)^{1/5} \quad (5.4.3-6)$$

式中： $Q_0$ —疲劳荷载模型车 II 总重，为 480kN；

$N_{ly}$ —慢车道或主车道的重车（总重大于 100kN）年交通量，应通过对近似交通状态道路进行交通调查得到，当无可靠数据时可参考下式计算：

$$N_{ly} = \frac{0.9pN_y}{j} \quad (5.4.3-7)$$

式中： $N_y$ —计算车道所在行车方向上的年总交通量；

$p$ —重车载总交通量中所占的比例，当无可靠数据时可参考表 5.4.3 取值；

$j$ —在该行车方向上慢车道与主车道数量和。

**表 5.4.3 重车数量占总交通量的比例**

交通等级		重车数量占总交通量的比例 $p$
1	港口、矿区等以货运为主功能的高速公路或一级公路	80%
2	其他高速公路或一级公路	40%
3	二级公路	20%
4	三、四级公路	10%

7  $\lambda_3$  为设计寿命系数，由下式计算确定：

$$\lambda_3 = (t_{Ld} / 100)^{1/5} \quad (5.4.3-8)$$

式中： $t_{Ld}$ —构件的设计使用寿命。

8  $\lambda_4$  为多车道效应系数，由下式计算确定：

$$\lambda_4 = \left[ 1 + \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^5 + \dots + \frac{N_j}{N_1} \left( \frac{\eta_j}{\eta_1} \right)^5 + \dots + \frac{N_k}{N_1} \left( \frac{\eta_k}{\eta_1} \right)^5 \right]^{1/5} \quad (5.4.3-9)$$

式中： $k$ —慢车道和主车道数量和；

$N_j$ —每年在  $j$  车道行驶的重车车辆数;

$\eta_j$ —对应于车道  $j$  中线处, 形成应力幅的内力影响线值, 取正值。

9  $\lambda_{\max}$  根据图 5.4.3-5 取值。

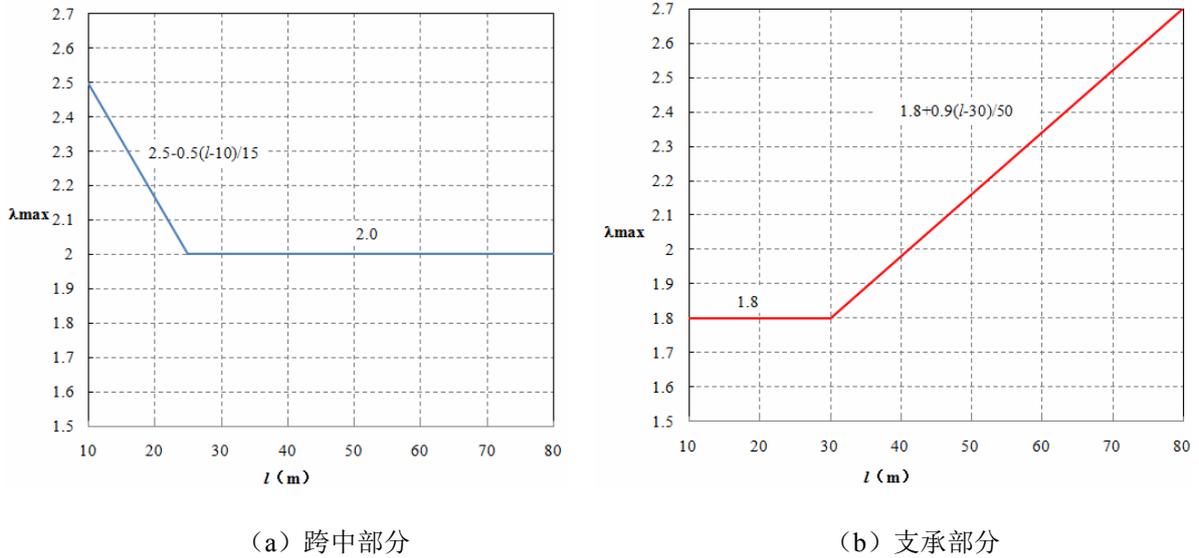


图 5.4.3-5 针对弯矩的  $\lambda_{\max}$  取值

**5.4.4** 疲劳验算时, 应采用名义应力法或热点应力法, 其中 STC 层的疲劳验算应采用名义应力法, 钢主梁的疲劳验算宜主要采用热点应力法, 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。

**5.4.5** STC 层的疲劳强度应符合以下规定:

1 STC 层 (含接缝) 的疲劳强度以容许等效最大应力水平定义, 其中容许等效最大应力水平是指 STC 层的等效最大名义应力与其静力名义弯拉应力容许值之比。500 万次疲劳寿命时 STC 的容许等效最大应力水平为 0.48, 200 万次疲劳寿命时 STC 的容许等效最大应力水平为 0.51。疲劳验算时, STC 的设计等效最大应力水平应按照下式计算。

$$S_{\max}^e = S_{\max} - \frac{5.17}{16.76} S_{\min} \quad (5.4.5)$$

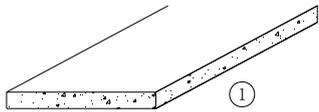
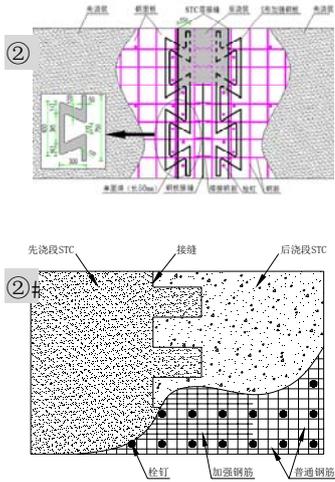
式中:  $S_{\max}$ —STC 中的最大应力水平  $\sigma_{\max} / f_t^r$ ;

$S_{\min}$ —STC 中的最小应力水平  $\sigma_{\min} / f_t^r$  ;

$f_t^r$ —配筋 STC 的静力名义弯拉应力容许值。

2 以容许等效最大应力水平 0.48 或 0.51 乘以表 3.1.14 和表 3.1.15 中各等级配筋 STC (含接头) 的静力名义弯拉应力容许值, 可得 STC 层的疲劳细节分类如表 5.4.5 所示。

**表 5.4.5 STC 层的疲劳细节及分类**

500 万次 疲劳强度(MPa)	200 万次 疲劳强度(MPa)	细节位置及示意图	细节描述和施工要求
$0.48 f_t^r$	$0.51 f_t^r$	<p>STC 层连续区域</p> 	1) STC 层连续浇筑。
$0.48 f_{t,joint}^r$	$0.51 f_{t,joint}^r$	<p>STC 接缝区域</p> 	2) 先浇-后浇交界区域, 设置 STC 接缝。

**5.4.6 钢梁的疲劳强度应符合以下规定:**

1 钢梁的疲劳强度以一系列的  $\log \Delta\sigma_R$ - $\log N$  曲线 (图 5.4.6-1) 和  $\log \Delta\tau_R$ - $\log N$  曲线 (图 5.4.6-2) 组成, 也称为 S-N 曲线, 每条曲线对应不同的疲劳强度等级。每个疲劳强度等级由 500 万次疲劳循环对应的疲劳强度  $\Delta\sigma_c$  和  $\Delta\tau_c$  定义。

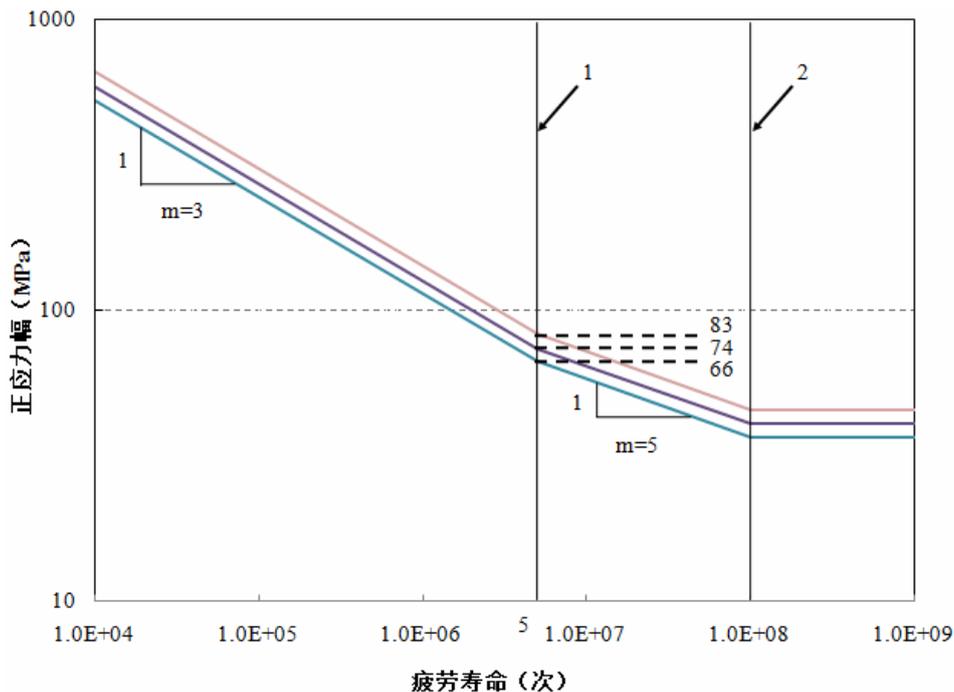


图 5.4.6-1 钢梁疲劳强度等级 (正应力幅)

(1 表示常幅疲劳极限, 即疲劳强度等级  $\Delta\sigma_C = \Delta\sigma_D$ ; 2 表示变幅疲劳截止限  $\Delta\sigma_L$ )

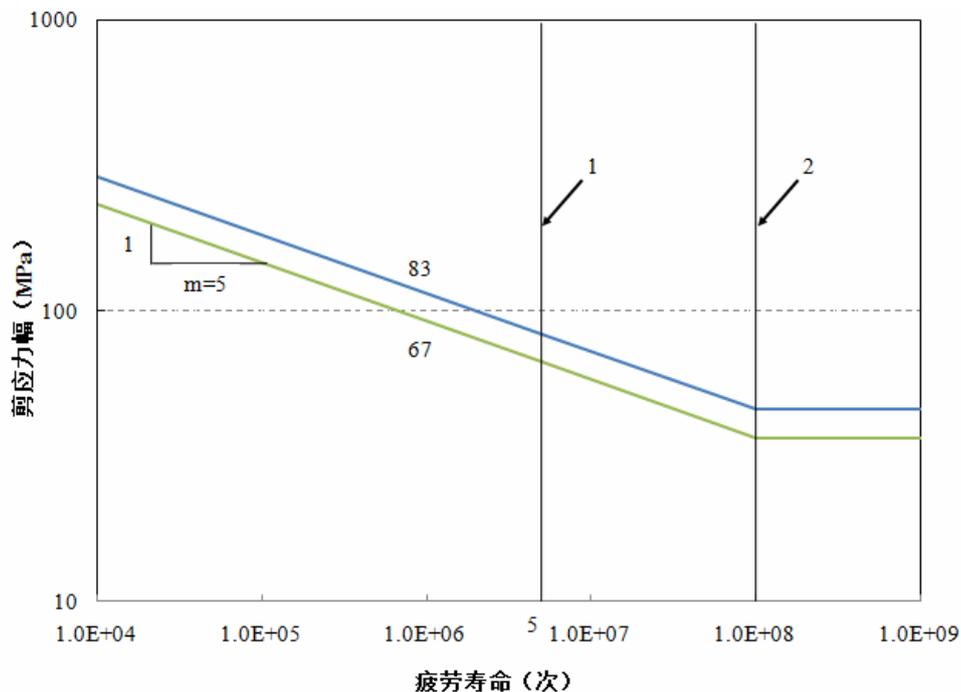
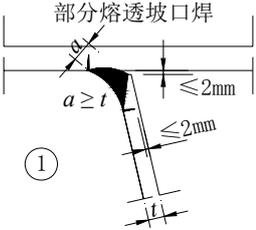
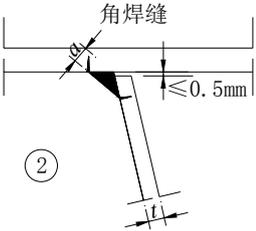
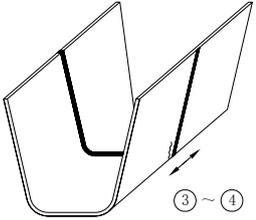
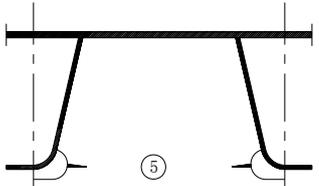


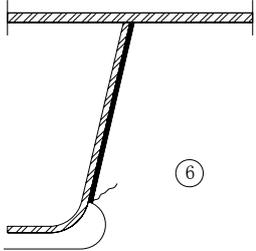
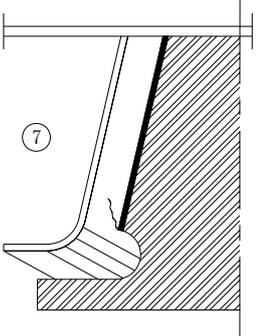
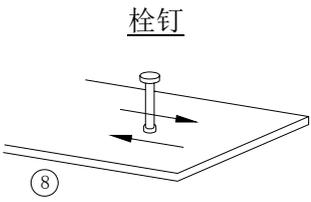
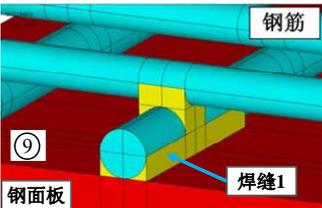
图 5.4.6-2 钢梁疲劳强度等级 (剪应力幅)

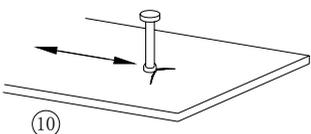
(1 表示疲劳强度等级  $\Delta\tau_C$ ; 2 表示变幅疲劳截止限  $\Delta\tau_L$ )

2 钢梁的主要疲劳细节如表 5.4.6 所示, 各细节分类均取 500 万次寿命时的疲劳强度。

表 5.4.6 钢梁主要疲劳细节分类

500 万次 疲劳强度(MPa)	200 万次 疲劳强度(MPa)	细节位置及示意图	细节描述及施工要求
74	100	<p>面板-纵肋焊缝</p>  <p>①</p>	<p>1) 满足 <math>a \geq t</math> 的部分熔透坡口焊。</p>
66	90	<p>角焊缝</p>  <p>②</p>	<p>2) 贴角焊或不满足 1) 的部分熔透坡口焊。</p>
83	112	<p>纵肋对接焊缝</p>  <p>③~④</p>	<p>3) 全熔透坡口焊, 所有焊缝沿箭头方向打磨至同纵肋表面平齐; 使用起焊板和熄焊板, 并在焊后去除; 焊后进行无损检测。</p>
66	90	<p>纵肋对接焊缝</p>  <p>③~④</p>	<p>4) 全熔透坡口焊, 焊缝凸面高度不超过焊缝宽度的 10%, 并均匀过渡至纵肋表面; 使用起焊板和熄焊板, 并在焊后去除; 焊后进行无损检测。</p>
118*	160*	<p>横隔板弧形切口</p>  <p>⑤</p>	<p>5) 横隔板过焊孔处弧形切口的自由边, 边缘应打磨平滑。疲劳验算宜采用名义应力法。</p>

500 万次 疲劳强度(MPa)	200 万次 疲劳强度(MPa)	细节位置及示意图	细节描述及施工要求
66	90	<p>纵肋-横隔板焊缝 (横隔板弧形切口起点位置)</p> 	<p>6) 位于纵肋-横隔板焊缝处, 横隔板弧形切口的起点位置。</p>
66	90	<p>纵肋-横隔板焊缝 (纵肋腹板中的焊缝端部位置)</p> 	<p>7) 位于纵肋-横隔板焊缝处, 纵肋腹板中的焊缝端部位置。</p>
54* (m=8)	60* (m=8)	<p>栓钉</p> 	<p>8) 计算栓钉的剪应力幅; 疲劳验算宜采用名义应力法。</p>
67* (m=5)	80* (m=5)	<p>焊接水平钢筋网</p> 	<p>9) 计算焊接水平钢筋网剪力连接件中焊缝 1 的剪应力幅; 疲劳验算宜采用名义应力法。</p>

500 万次 疲劳强度(MPa)	200 万次 疲劳强度(MPa)	细节位置及示意图	细节描述及施工要求
66	90	<p>栓钉根部的钢面板</p> 	10) 位于焊接栓钉底部的钢面板。

注：1.表中各细节按 500 万次寿命时的疲劳强度(MPa) 进行分类，其中带\*的为名义应力疲劳强度，不带\*的为热点应力疲劳强度；

2.因热点应力法不适用于疲劳细节 5、8、9，建议采用名义应力法计算。

3 对于非焊接疲劳细节（如横隔板弧形切口自由边），或当焊接疲劳细节进行了消除残余应力处理时，若疲劳细节的部分或全部应力循环为压应力时，应考虑平均应力对疲劳强度的影响。该影响通过降低设计应力幅实现，即设计应力幅的计算考虑全部的拉应力和 60%的压应力，如图 5.4.6-3 所示。

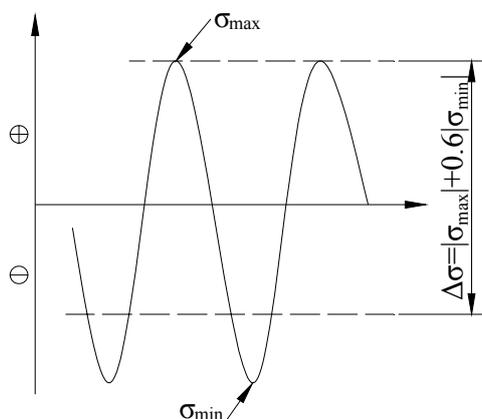


图 5.4.6-3 降低设计应力幅的计算方法

5.4.7 疲劳设计和验算考虑冲击作用，按下式取值。

$$\mu = \begin{cases} 0.3(1 - \frac{D}{6}) & D \leq 6m \\ 0 & D > 6m \end{cases} \quad (5.4.7)$$

式中： $\mu$ —荷载冲击系数；

D—验算截面到伸缩缝的距离，单位  $m$ 。

**5.4.8** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的疲劳验算尚应符合国家相关行业标准的有关规定。本节未包含的疲劳验算细则可参考欧洲规范的有关规定。

## 6 正常使用极限状态设计

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 超高性能轻型组合桥面结构应根据正常使用极限状态的要求进行短暂状况和持久状况的计算。

**6.1.2** 按持久状况设计时，应对超高性能轻型组合桥面结构的截面应力、抗裂性和挠度等进行计算；按短暂状况设计时，仅对超高性能轻型组合桥面结构的截面应力进行计算。各项计算值均应满足本规范规定的相应限值。

**6.1.3** 计算超高性能轻型组合桥面结构的挠度和应力时应计入施工顺序的影响，并计入 STC 的收缩（当未采用高温蒸汽养护时）、徐变、及温度等作用的效应。

**6.1.4** 超高性能轻型组合桥面结构弹性阶段的计算可采用下列基本假定：

1 钢与 STC 均为理想线弹性体，必要时可以遵循本规程第 3.1.13 条考虑 STC 的非线性轴拉应力-应变关系。

2 组合桥面结构弯曲时，STC 截面与钢主梁截面各自符合平截面假定，材料服从虎克定律。

**6.1.5** 理论上，超高性能轻型组合桥面结构的正常使用极限状态设计计算可分成三个结构体系进行计算：

1 第一体系：超高性能轻型组合桥面结构作为钢主梁全截面的上翼缘，承受总体荷载，称为“主梁体系”。

2 第二体系：STC 层与正交异性钢面板共同形成主梁的桥面板，承受车辆局部荷载，亦称为“桥面体系”。

3 第三体系：超高韧性混凝土主结构层与钢面板作为支撑在纵、横肋上的连续组

合板, 板体承受车轮的局部荷载, 称为“面板体系”。

其中第一体系为总体荷载效应, 第二和第三体系为局部荷载效应, 各体系的计算结果叠加后得到超高性能轻型组合桥面结构各构件中的计算结果。根据超高性能轻型组合桥面结构的受力特性, 计算的重点应为局部荷载效应, 即第二和第三体系。

考虑到正交异性钢桥面板构造复杂, 理论方法难以求解, 宜借助有限元法进行计算, 该方法更具操作性和实用性。

建立有限元模型时, 第一体系可用梁单元建立整体模型, 第二和第三体系可以建立一个局部模型中, 各部件以板壳单元或实体单元建立。对两种模型的计算结果进行叠加, 即可得到结构的实际受力状态。在局部有限元模型中, 应确保网格划分合理。

**6.1.6** 考虑到超高性能轻型组合桥面结构的受力特性, 在计算总体荷载效应时(第一体系), 可不考虑钢主梁与 STC 层间的滑移效应, 但在计算局部荷载效应时(第二和第三体系), 应考虑层间滑移效应。计算中应忽略铺装层对超高性能轻型组合桥面结构刚度的贡献。

**6.1.7** 计算中可偏安全地, 不考虑 STC 中的配筋。当需要考虑配筋时, 应按纵、横桥向的配筋分别考虑。

**6.1.8** 在本节中未涉及的内容应符合行业规范《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62-2004、《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917—2013 中桥梁设计计算相关条文的规定。

## 6.2 应力验算

**6.2.1** 应力验算应涵盖超高性能轻型组合桥面结构中的各个构件, 包括 STC 层, 剪力连接件, STC 接缝, 以及钢结构。

**6.2.2** 根据超高性能轻型组合桥面结构的受力特点, 各构件的应力验算需要考虑总体荷载效应与局部荷载效应的叠加。在总体荷载效应计算中, 弯矩作用下 STC 层及钢主

梁法向应力可按下列公式计算：

STC 层顶面应力：

$$\sigma_c = \frac{M_k}{n_0 I_0} y_c \quad (6.2.2-1)$$

钢主梁下翼缘应力：

$$\sigma_s = \frac{M_k}{I_0} y_s \quad (6.2.2-2)$$

式中： $\sigma_c$ —STC 顶面应力（MPa）；

$M_k$ —截面弯矩值（N•mm）；

$n_0$ —钢材弹性模量与 STC 弹性模量的比值， $n_0 = E_s / E_c$ ；

$I_0$ —超高性能轻型组合桥面结构桥梁组合截面的换算惯性矩（mm<sup>4</sup>）；

$\sigma_s$ —钢主梁下翼缘应力（MPa）；

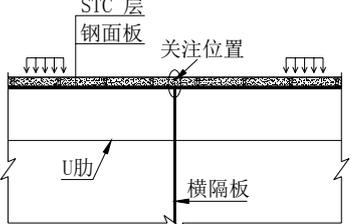
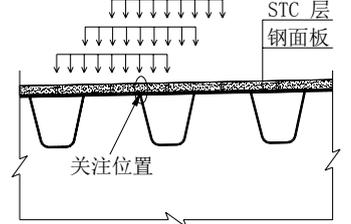
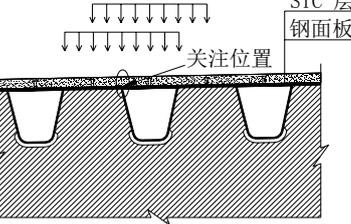
$y_c$ —STC 层顶面至组合截面弹性中性轴的距离（mm）；

$y_s$ —钢主梁下翼缘至组合截面弹性中性轴的距离（mm）。

**6.2.3** 在局部荷载效应计算中，宜建立有限元模型进行计算。STC 层中的应力计算应关注峰值应力，且应重点关注 STC 层在负弯矩区的拉应力，如表 6.2.3 所示。

**表 6.2.3 超高性能轻型组合桥面结构中 STC 层主要关注位置**

序号	关注位置	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

**6.2.4** STC 装配化施工或分段浇筑时, 都会出现 STC 接缝。由于接缝处 STC 中的钢纤维不连续, 抗裂强度将被削弱, 为此, 需对接缝处做强化处理。STC 的接缝形式宜为以下两种方案之一。

- 1 含异型加强钢板的接缝方案 (图 6.2.4-1)。

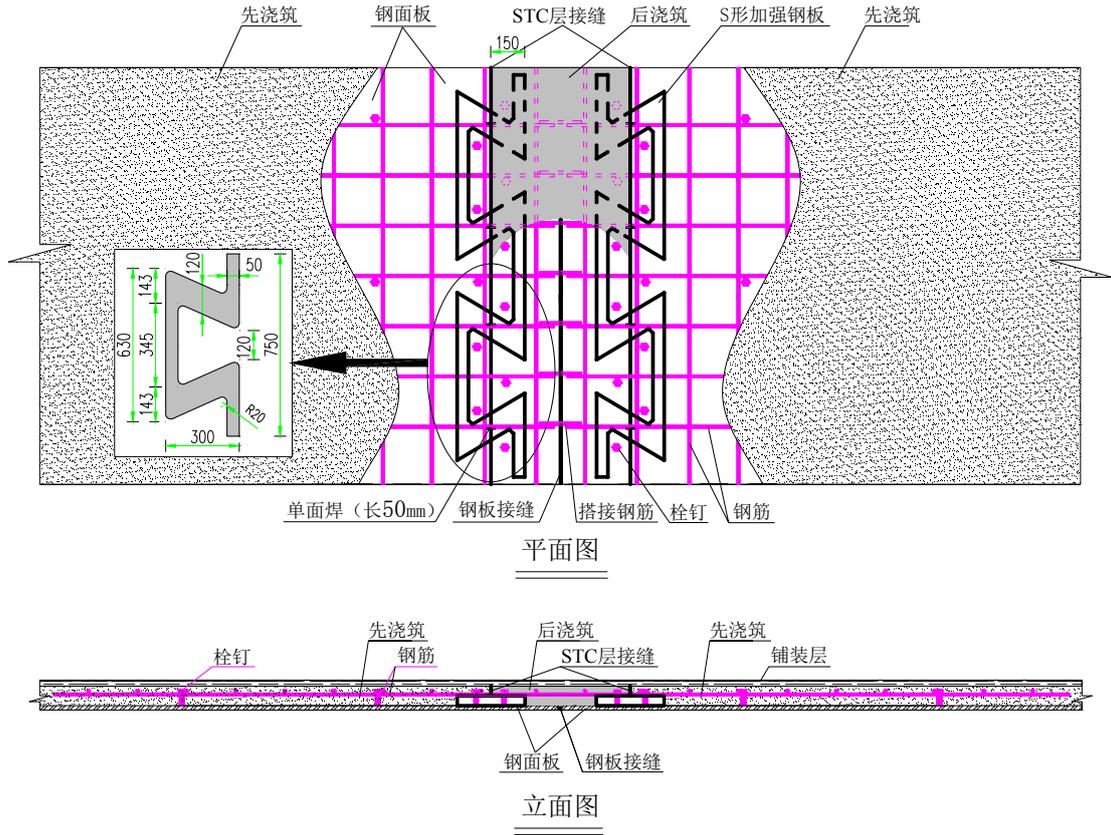


图 6.2.4-1 STC 接缝方案一：异型加强钢板(单位:mm)

2 矩形接缝方案 (图 6.2.4-2)。

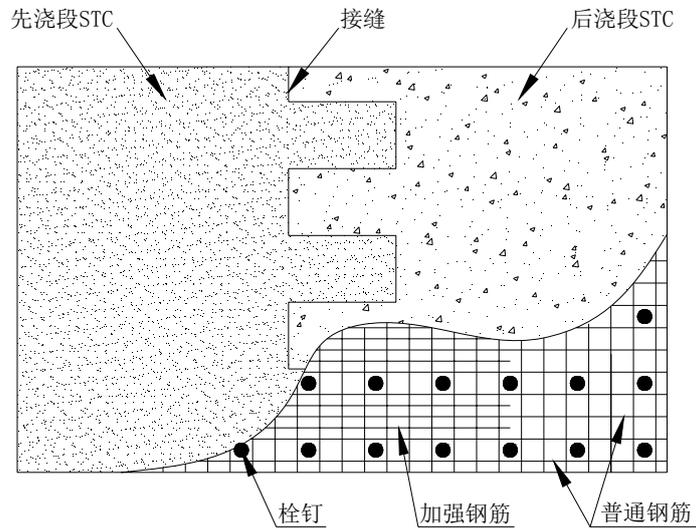


图 6.2.4-2 STC 接缝方案二：矩形接缝

6.2.5 由于接缝处 STC 层的抗裂能力相对较弱，宜将接缝设置在低拉应力的位置。横向接缝应设置在两横隔板之间，如图 6.2.5 所示；纵向接缝应设置在两纵肋之间。



图 6.2.5 STC 接缝应设于低应力区

### 6.3 栓钉内力验算

6.3.1 对于钢-STC 间的剪力连接件，应通过计算得到其最大剪力，并与连接件的剪力限值进行比较，其中连接件的剪力限值规定参考本规程的第 7.1 节。

6.3.2 考虑到超高性能轻型组合桥面结构中局部荷载效应显著，剪力连接件内力的计算宜采用有限元分析法。

计算中应建立整体计算模型和局部计算模型，并将计算结果进行叠加。在局部计算模型中，宜采用弹簧单元模拟建立连接件的连接作用，且应考虑由车轮竖向荷载和车轮刹车水平荷载引起的栓钉内力，其中车轮刹车水平荷载按照车轮竖向荷载的 1/2 考虑，如图 6.3.2 所示。

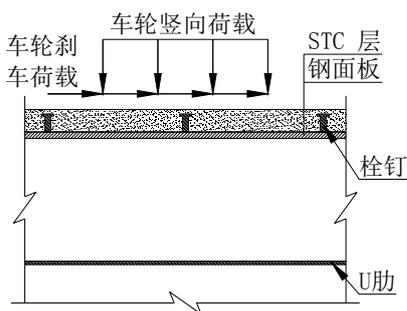


图 6.3.2 剪力连接件内力计算荷载布置示意图（局部荷载效应）

### 6.4 STC 抗裂验算

6.4.1 当 STC 的应力验算符合本规程第 6.2 节的有关规定，且 STC 的设计拉应力不

大于表 3.1.14 规定的配筋 STC 的名义弯拉应力容许值时，可确保 STC 层的裂缝宽度小于 0.05mm。

**6.4.2** 当施工中需要对 STC 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。接缝构造形式应按照本规程第 6.2.4 条的规定。当接缝处 STC 的设计拉应力不大于表 3.1.15 规定的接缝 STC 的名义弯拉应力容许值时，可确保接缝处 STC 层的裂缝宽度小于 0.05mm。

## 6.5 挠度验算

**6.5.1** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的整体挠度应按照《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917—2013 中第 6.3 节计算。

**6.5.2** 超高性能轻型组合桥面结构的局部挠度应按照图 6.5.2 的加载模式计算，且计算结果应满足以下要求：

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

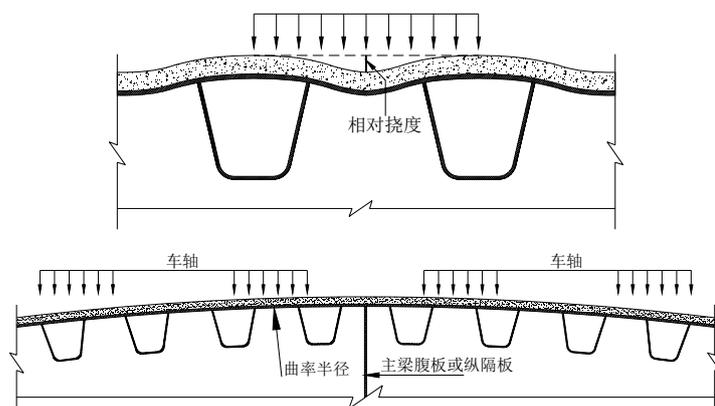


图 6.5.2 局部挠度验算加载示意图

## 7 剪力连接件

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 超高性能轻型组合桥面结构中剪力连接件的选用不但应保证 STC 与钢主梁能有效地组合和共同承担作用，而且还需满足 STC 层厚度薄这一重要特性。

**7.1.2** 超高性能轻型组合桥面结构中剪力连接件宜采用栓钉，也可采用焊接水平钢筋网等形式。

**7.1.3** 在正常使用极限状态下，超高性能轻型组合桥面结构中，单个剪力连接件承担的剪力设计值不应超过 75% 的抗剪承载力设计值。

### 7.2 抗剪承载力设计值

**7.2.1** 单个栓钉连接件的抗剪承载力设计值如下（栓钉剪断破坏）：

$$N_v^c = 1.19 A_{stud} f_{stud} \left( \frac{E_c}{E_s} \right)^{0.2} \left( \frac{f_{cu}}{f_{stud}} \right)^{0.1} \quad (7.2.1)$$

式中： $N_v^c$ —栓钉的抗剪承载力设计值（N）；

$E_c$ 、 $E_s$ —STC 和栓钉的弹性模量（MPa）；

$f_{cu}$ —边长为 100mm 的 STC 的立方体抗压强度标准值（MPa）；

$A_{stud}$ —栓钉钉杆截面面积（mm<sup>2</sup>）；

$f_{stud}$ —栓钉抗拉强度（MPa），当栓钉材料性能等级为 4.6 级时，取 400MPa。

**7.2.2** 在焊接水平钢筋网剪力连接件中，每个焊点的抗剪承载力设计值如下：

$$N_v^c = \tau_{stc-rebar} C_{l,rebar} l_{l,rebar} \leq f_{weld,1} l_{weld,1} w_{weld,1} \quad (7.2.2)$$

式中： $N_v^c$ —焊接水平钢筋网的抗剪承载力设计值（N）；

$\tau_{stc-rebar}$ —STC层-纵向抗剪钢筋间的抗剪粘结强度设计值（MPa），对于带肋钢筋，本规程取为8.5 MPa；

$C_{l,rebar}$ —纵向抗剪钢筋的名义周长（mm）；

$l_{l,rebar}$ —纵向钢筋的计算长度，取为相邻两道横向抗剪钢筋的间距（mm）；

$f_{weld,1}$ —纵向抗剪钢筋-钢面板连接焊缝（焊缝1）的抗剪强度设计值（MPa），本规程取为120 MPa；

$l_{weld,1}$ —纵向抗剪钢筋-钢面板间焊缝（焊缝1）的长度（mm）；

$w_{weld,1}$ —纵向抗剪钢筋-钢面板间焊缝（焊缝1）的宽度（mm）。

其中焊接水平钢筋网剪力连接件的构造形式为：将纵向抗剪钢筋间断焊接在钢面板表面（该焊缝称为“焊缝1”），将横向抗剪钢筋点焊在纵向抗剪钢筋上（该焊缝称为“焊缝2”），并浇筑STC层以包裹住焊接水平钢筋网，具体构造如图7.2.2所示（未示出STC层）。

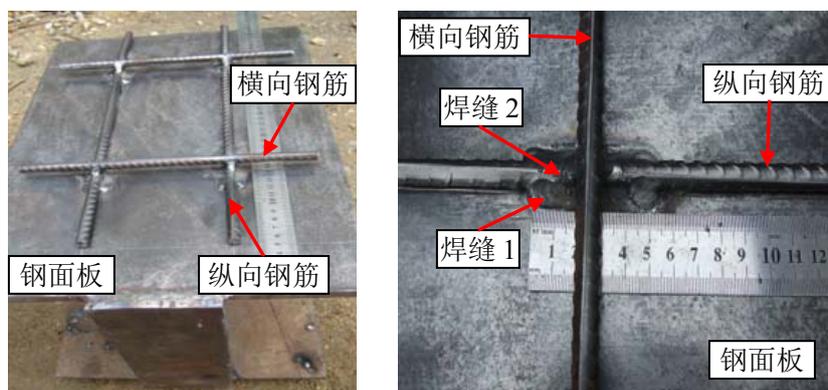


图 7.2.2 焊接水平钢筋网剪力连接件构造示意

### 7.3 剪力连接件疲劳验算

7.3.1 剪力连接件疲劳验算细则应遵循本规程第5.4节的规定。

**7.3.2** 剪力连接件疲劳验算应包含总体荷载效应和局部荷载效应，计算时的交通荷载应符合本规程第 5.4.2 和 5.4.3 条的规定。

## **7.4 剪力连接件的数量计算**

**7.4.1** 为确保 STC 层与钢桥面板形成牢固的组合作用，剪力连接件设计中的一项重要验算内容是，确保在车轮荷载下的局部正弯矩区域，STC 层底面的最大拉应力不得超过其轴拉强度（不考虑配筋），按本规程第 3.1.13 取值，当不能满足要求时，应对剪力连接件进行加密，重新计算，直至满足要求。计算的作用（或荷载）的效应组合应采用现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的基本组合。

## 8 构造要求

**8.1.1** 超高性能轻型组合桥面结构中各层的厚度应符合下列规定：

- 1 桥梁的钢面板厚度不宜小于 12 mm。
- 2 超高性能轻型组合桥面结构的主结构上层（STC 层）的厚度不宜小于 35mm。
- 3 面层（铺装层）的厚度不宜小于 10mm，可采用 Novachip 超薄铺装层、沥青玛蹄脂碎石混合料（SMA）、沥青混凝土（AC）或超薄聚合物混凝土 TPO (Thin Polymer Overlay)。

**8.1.2** 钢筋网的设置应符合下列规定：

- 1 最小 STC 保护层厚度不应小于 10mm，宜采用 15 mm。
- 2 钢筋直径不宜小于 10mm，钢筋中心间距不宜大于 50mm。
- 3 钢筋接头宜设置在受力小的区段，宜采用焊接或绑扎的方式，并应错开布置。搭接长度不宜小于 20 倍的钢筋直径。
- 4 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。
- 5 STC 层中钢筋的最小配筋率应符合下列规定：
  - 1) 钢筋配筋率应按面积率计算；
  - 2) STC 层中钢筋的最小单向配筋率（纵桥向或横桥向）不宜小于 3.0%。

**8.1.3** 栓钉的设置应符合下列规定：

- 1 栓钉的钉柱直径不宜小于 9mm。
- 2 栓钉的布置形式为矩阵式布置。
- 3 栓钉间距应符合下列规定：
  - 1) 不宜大于 10 倍的超高韧性混凝土层厚度，且不大于 300 mm；
  - 2) 当栓钉间距大于 250mm 时，应对桥面板外周一圈的栓钉加密一倍，即间距为

桥面板内部间距的一半，并不大于 150mm。

4 本规程推荐的栓钉布置间距如下：

- 1) 当桥面纵肋腹板间距 $\leq 300$  mm 时，栓钉的纵、横桥向间距宜为 140-160mm；
- 2) 当桥面纵肋腹板间距 $> 300$  mm 时，栓钉的纵、横桥向间距宜为 120-140mm。

**8.1.4** STC 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 横缝应设置在相邻两道横隔板间的跨中断面前后  $S_d/4$  范围内，其中  $S_d$  为横隔板的纵向间距。

2 当钢主梁在行车道区域存在主梁腹板（或纵隔板）时，纵缝应设置在相邻两道主梁腹板（或纵隔板）间的中间截面左右  $S_{wb}/4$  范围内，其中  $S_{wb}$  为主梁腹板（或纵隔板）的横向间距；当钢主梁在行车道区域未设置主梁腹板（或纵隔板）时，纵缝应设置在相邻两道纵向加劲肋的中间断面左右  $S_{rb}/4$ ，其中  $S_{rb}$  为加劲肋的横向间距。

**8.1.5** STC 层上表面的处理，按不同的铺装，采用不同的界面处理技术。

## 9 施工

### 9.1 一般规定

**9.1.1** 超高性能轻型组合桥面结构的施工应选择具有相关工程经验的技术人员和专业施工设备的单位完成。

**9.1.2** 施工前，应制定详细的施工组织设计，并应对负责各工序的施工人员进行岗前培训，建立质量控制体系，确定施工质量的有效控制方法。

**9.1.3** 施工前，应对路段内施工的钢桥面进行封闭。施工时，除施工中必需的设备人员外，严禁任何车辆、机具及人员通行，确保工作面的洁净、干燥及施工现场的整洁性，并应防止施工过程中对工作面的污染。

**9.1.4** 施工前，宜完成试验段施工，以检验施工设备的正常有效运转及各工序质量控制的正确性。

**9.1.5** 超高性能轻型组合桥面结构的工期安排应避开雨季和冬季施工，并应做好预防措施，施工时气温应在 5℃ 以上，宜在 10℃ 以上，风力达到 6 级及以上必须停止施工。

**9.1.6** 施工单位应建立各道工序的质量检查制度，并应留有完整的检查记录。

**9.1.7** 每道工序完工后，应进行全面质量检验，确认合格后才能进入下一道工序的施工。

**9.1.8** 超高性能轻型组合桥面结构的施工主要有两种方法，如下所示（图 9.1.8）：

方法一：先完成钢主梁架设（对于旧桥，可忽略此步骤），完成 STC 层现浇和养

护施工，然后铺筑铺装层；

方法二：场内制作完成钢主梁节段后，在节段的钢面板上浇筑和养护 STC 层，梁段运至现场拼装，并完成节段间现浇 STC 层的浇筑和养护，待全桥合拢后，铺筑铺装层。

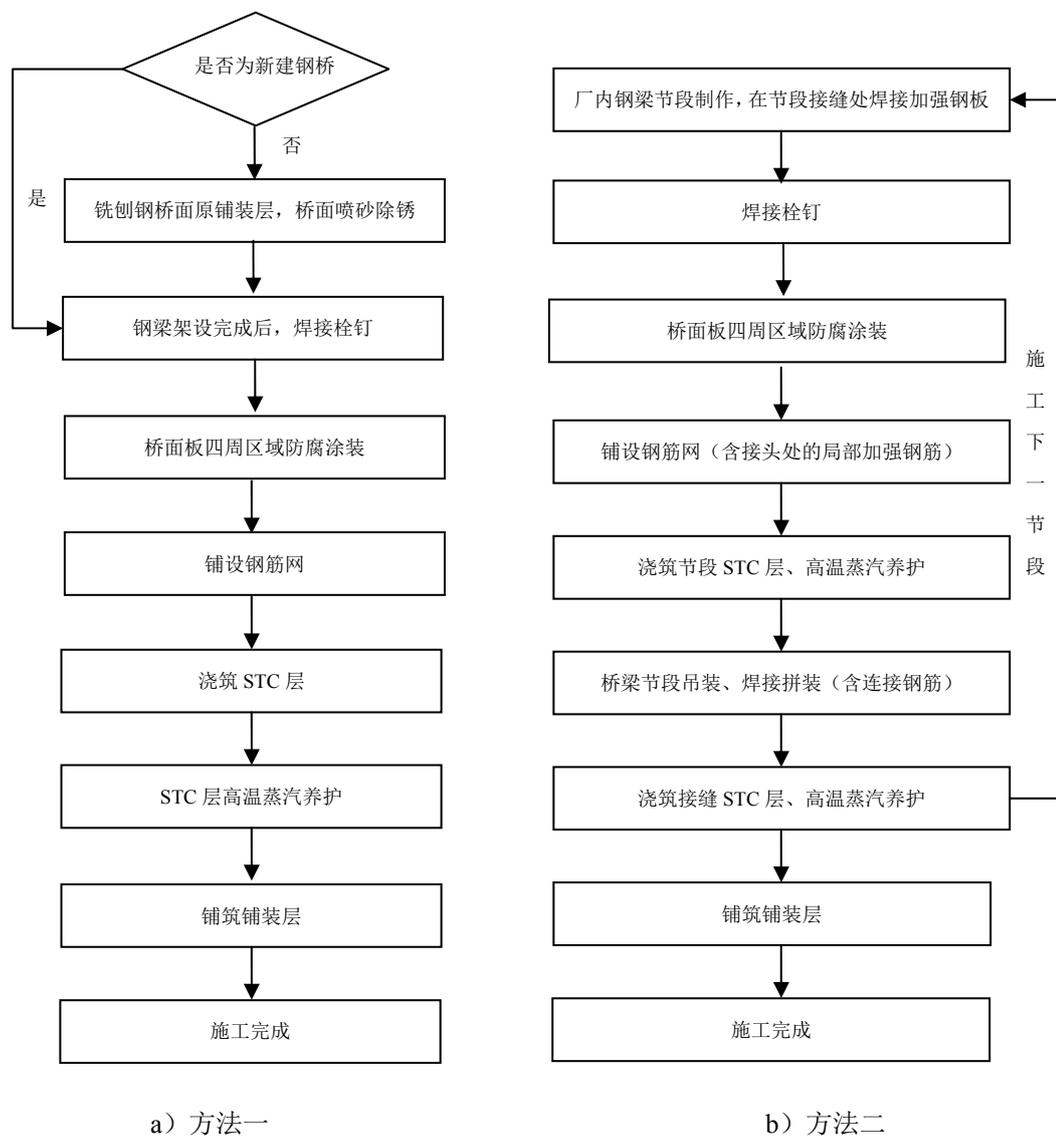


图 9.1.8 超高性能轻型组合桥面结构施工工艺流程

9.1.9 接缝的设置应符合以下规定：

1 采用施工方法一时：

1) 需根据工程规模和施工能力确定 STC 层的摊铺施工单元，一般以桥跨为一个摊铺区域：

2) 一般以桥跨的伸缩缝为横向施工缝;

3) 当设备摊铺宽度小于桥面宽度进行摊铺时需要设置纵向施工缝;一般以桥面中线为施工缝。

2 采用施工方法二时,宜以钢主梁的自然节段为 STC 层的摊铺施工单元,接缝应设置在相邻两道横隔板间的跨中区域。

**9.1.10** 超高性能轻型组合桥面结构施工的质量检验和过程控制检测按照本规程第 10 章检验与验收的规定实施,本规程未规定的按国家现行相关标准执行。

## 9.2 施工准备

**9.2.1** 施工前,应根据工程规模、现场条件等确定施工方案,编制施工组织设计。

**9.2.2** 应按施工组织计划,组织施工设备、试验仪器进场,并应做好安装、调试及标定工作。

**9.2.3** 应按材料使用计划,组织材料进场,并应做好试验、检验及复检工作。

**9.2.4** 应根据设计要求、工程经验和原材料性能指标,按拟定初始配合比进行试配、调整及检验,得出施工配合比。

**9.2.5** 应按工程用量、进度计划等提前预拌干混料,且应按下列规定储存:

1 原材料、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 散装干混料储存于散装筒仓中,不得混存混用;

3 散装干混料在储存及使用过程中,当对质量的均匀性有疑问或争议时,应按产品要求的有关规定进行检验。

### 9.3 焊接栓钉

**9.3.1** 旧钢桥桥面铺装翻修施工时,应在焊接栓钉前,清除原桥面铺装层及粘结层等,并应清洗桥面,进行钢桥面板喷砂除锈。对于新建钢桥,在钢桥面板直接焊接栓钉,无需进行喷砂除锈工序,但应对每个栓钉位置进行局部打磨,确保焊接处钢面板表面平整、光滑。

**9.3.2** 旧钢桥桥面铺装翻修施工时,清除原桥面铺装层及粘结层的过程中,应符合以下规定:

- 1 铣刨原铺装层的过程中,应严格控制铣刨深度,不得损伤桥面钢板。
- 2 清除完毕后,应清除桥面的油、油脂、盐分及其它污垢,并应采用高压清洗机喷射清洁,直至钢板洁净、干燥。
- 3 清洗完桥面后,应对全桥锈蚀、污染状况进行检查;
- 4 清洗完桥面后,应检查钢桥面板范围内有无孔洞(如栓接区域个别高强螺栓缺失)。若有,应在焊接栓钉前将孔洞填补,以防止 STC 在摊铺施工过程中的流失。

**9.3.3** 旧钢桥桥面铺装翻修施工时,钢桥面板的喷砂除锈施工应符合下列规定:

- 1 钢板表面若有锐边、飞溅、不光滑焊缝及边割边缘等缺陷,应先用工具打磨。
- 2 现场喷砂除锈应采用全自动无尘喷砂设备,严禁二次污染。
- 3 应采用部分带棱角的磨料,比例应按粗糙度要求、钢板表面状况通过试验确定。
- 4 大气相对湿度不宜大于 85%,并应保持通风,严禁雨淋。
- 5 喷砂除锈完成后,应立即检查钢板的清洁度和粗糙度。

**9.3.4** 无论是旧钢桥桥面铺装翻修施工还是新建钢桥,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划墨线定位。当栓钉加密时,定位中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 2-3 cm,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。

**9.3.5** 设置 STC 接缝时，应在接缝区域的钢面板顶面焊接加强钢板。该区域附近的栓钉布置不同于其他区域，施工时应注意栓钉位置的变化。该区域内栓钉的焊接位置应预留，待加强钢板焊接完成之后再焊接栓钉。

**9.3.6** 设置 STC 接缝时，加强钢板的焊接施工应满足以下规定：

- 1 加强钢板的焊接位置应严格按照设计图纸设置。设计图纸未明确位置时，加强钢板应设置在钢主梁中两道相邻横隔板间的跨中位置。
- 2 焊接加强钢板前，应确保该区域的钢桥面板清洁、平整、光滑。
- 3 加强钢板的周围与钢面板通过角焊缝连接，应严格按照设计图纸施焊，宜采用间断焊缝。
- 4 焊接施工完成后，应清除接缝区域的焊渣和杂物。

**9.3.7** 焊接完栓钉后，应在钢桥面板四周区域进行防腐涂装。

## 9.4 铺筑施工

**9.4.1** 钢筋网铺设应符合下列规定：

- 1 钢筋网铺设前，应根据设计图纸对钢筋网进行纵向、横向定位，并应摆放好钢筋垫块。
- 2 应先铺设纵向钢筋，再铺设横向钢筋。
- 3 钢筋的搭接长度应符合构造要求的相关规定，不得随意变动；搭接位置应错开，同一断面位置，搭接钢筋的面积不应超过 50%。
- 4 如钢筋位置与栓钉布置有冲突，可适当调整钢筋位置。
- 5 钢筋网的绑扎应采用镀锌钢丝，绑扎完毕后，扎丝末端应朝向钢面板。
- 6 应按照设计图纸，对接缝区域的钢筋网进行加密。

**9.4.2** 当需要设置 STC 接缝时,浇筑 STC 前应在加强钢板中间位置设置竖向模板,以明确区分先浇-后浇区域的界限。模板宜采用木板,安放后板身应稳固,且应保持竖直。

**9.4.3** 超高韧性混凝土宜采用干混料集中湿拌或现场加水拌和,并应符合下列规定:

- 1 拌和前,应检查搅拌设备状态,并应严格按施工配合比进行拌和。
- 2 设备搅拌能力应大于现场摊铺能力。设备计量偏差应小于 $\pm 2\%$ ,使用前计量设备应归零,并应定期校准。
- 3 应通过试验确定投料顺序、数量及分段搅拌时间等工艺参数。
- 4 应采用具有计量系统的强制式搅拌设备拌和,搅拌时间不宜少于 8min;待 STC 流化之后继续搅拌 2min。
- 5 搅拌结束后,应及时清洗搅拌设备。

**9.4.4** 超高韧性混凝土运输宜采用混凝土搅拌车。采用混凝土搅拌运输车运输时,应符合下列规定:

- 1 混凝土搅拌车的性能必须良好,其运输能力应大于现场摊铺能力。
- 2 接料前,应排净混凝土搅拌车罐内的积水。
- 3 在运输途中及等候卸料时,应保持混凝土搅拌车罐体正常转速,不得停转。
- 4 卸料前,混凝土搅拌车罐体宜快速旋转搅拌 20s 以上后再卸料;卸料后,应及时采用清水清洗干净。
- 5 施工现场车辆出入口处应设置交通安全指挥人员,施工现场道路应顺畅;夜间施工时,应有良好的照明。

**9.4.5** 场内输送布料宜采用管道泵送、专用布料机或手推车,并应符合下列规定:

- 1 作业前,应仔细检查设备状态,并应空转运行,且应使设备处于湿润状态。
- 2 专用布料机布料时,可采用地泵或手推车进行送料。
- 3 无专用布料机布料时,应采用车泵送料,并应移动泵管,确保布料均匀。
- 4 手推车送料时,应布料均匀,宜采用人工布料。

**9.4.6** 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，应及时按要求进行输送泵和管道的清洗工作。

**9.4.7** STC 摊铺振捣应能使模板内各部位混凝土摊铺平整、振捣密实，宜采用专用摊铺机或振平梁摊铺，同时宜采用平板振动器进行辅助振捣，并应符合下列规定：

- 1 摊铺前，应检查设备状态，且应使设备处于湿润状态。
- 2 摊铺前，应根据摊铺厚度、塌落度大小，确定摊铺速度和振捣频率。
- 3 摊铺前，应根据摊铺厚度立模并固定，宜采用角钢或工字钢作为侧向模板。
- 4 摊铺过程中，应派专人进行摊铺厚度检查并及时反馈修正。
- 5 控制好摊铺速度，应根据布料进度调整，保证连续摊铺作业。

**9.4.8** 超高韧性混凝土养护应包括摊铺后的保湿养护和终凝后的高温蒸汽养护。**9.4.9** 超高韧性混凝土摊铺完成后，应及时用养生薄膜覆盖进行保湿养护，并应符合下列规定：

- 1 养生薄膜应搭接铺设，搭接位置宜采用方木或砂粒覆盖，搭接宽度应大于 20cm。
- 2 覆盖养生薄膜时，不宜损坏超高韧性混凝土，宜搭设架子覆盖养生薄膜。
- 3 保湿养护过程中，应加强巡查力度，发现有缺水部位时，应及时补水养护。
- 4 超高韧性混凝土终凝后（一般为 48 小时），应撤除养生薄膜并及时开始高温蒸汽养护。

**9.4.10** 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实现，并应符合下列规定：

- 1 养护前，应根据养护面积计算好蒸汽锅炉功率、架子和保温棚的规格、数量。
- 2 养护前，应根据现场条件和养护要求确定架子搭设、锅炉布置及养护方案。
- 3 养护过程中的温度和湿度宜通过传感器调整蒸汽量的大小实现。
- 4 养护温度恒定在 80℃ 时，养护时间不应少于 72h；养护温度恒定在 90℃，养护

时间不少于 48h。养护过程中蒸汽养护棚内的相对湿度不低于 95%。

5 蒸汽高温养护时的升温阶段，升温速度不应大于 12℃/h；养护结束后，以不超过 15℃/h 的降温速度将温度逐渐降至现场气温。

**9.4.11** 高温蒸汽养护结束后，应撤除养护设备并清扫干净。对明显凹凸不平部位，应采用打磨机打磨，确保 STC 层表面平整。

**9.4.12** 当 STC 采用分段施工时，待先浇段施工完成后，应对先浇段的 STC 进行小范围凿毛处理后，再浇筑下一节段的 STC 层。凿毛施工应符合以下规定：

- 1 凿毛应从接缝处断面开始，凿毛的宽度应严格按照设计图纸的要求。原则上，凿毛宽度为 10 cm。
- 2 凿毛面应竖直，不应出现明显偏斜的情况。
- 3 凿毛后，应以风机吹除遗留在钢桥面板上的 STC 屑末。

**9.4.13** 面层铺装前应喷洒粘层油，粘层油宜采用改性乳化沥青、水性环氧沥青等。

**9.4.14** 铺装层的施工应按现行行业标准 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求实施。

## 9.5 特殊气候条件下施工

### 9.5.1 一般规定

超高性能轻型组合桥面结构 STC 层浇筑时，应有专人负责接收和报告气象预报工作，遇有降雨、大风（6 级及以上）和寒流侵袭（气温低于 5℃）时，不得进行浇筑施工。

**9.5.2** 超高性能轻型组合桥面结构在特殊气候条件的施工应符合下述规定：

#### 1 雨天施工

超高性能轻型组合桥面应避开雨季施工。STC 层浇筑摊铺过程中遭遇降雨，当降雨

影响 STC 层表面质量时应停止施工。施工时应准备足够的防雨篷或塑料薄膜。防雨篷支架宜采用焊接钢结构，材料宜使用帆布或编织布，以便在突发雷阵雨时，遮盖刚铺好的桥面结构层。已被阵雨轻微冲刷过的结构层顶面，及时进行局部修整使其能够符合要求的。对被暴雨冲刷后，层面破坏严重的部位，应尽早铲除重铺。

## 2 刮风天施工

在日照较强，空气干燥的春秋多风季节或山区、沿海经常刮风地区，要做好防护措施防止刚浇筑完成的 STC 层面发生塑性收缩开裂。影响塑性收缩开裂的首要因素是风速，STC 层施工完一个节段后要及时进行保湿养生。刮风天，要用风速计在现场定量测风速或观测刮风引起的自然现象，确定风级。风力达到 6 级及以上时，要及时停止 STC 层浇筑施工，同时对已形成的结构层面覆盖保湿养生膜防止塑性收缩开裂。

## 3 热天施工

夏季，当现场气温高于 30℃时，宜避开中午施工，可选择在早晨、傍晚或夜间施工。若不能避开，应及时对成型后覆盖保湿养生膜的 STC 层洒水保湿养生。无论在什么情况和条件下，混凝土拌和物的温度不得超过 35℃。夏季高温季节施工时，应随时加测气温和水泥、拌和水、拌和物及路面温度。

## 4 冬季施工

超高性能轻型组合桥面应避开冬季施工。当施工气温低于 5℃时，应立即停止施工。当施工气温处于 5℃~10℃时，超高性能轻型组合桥面施工应采取适当的保温覆盖措施施工，施工时应随时检测气温和混合料、拌和水及路面的温度。

## 10 检验与验收

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 超高性能轻型组合桥面结构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《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1）的有关规定。

**10.1.2** 应根据全面质量管理要求，建立健全有效的质量保证体系，对施工各工序的质量进行检查、控制，并应达到所规定的质量要求，确保施工质量。

**10.1.3** 沥青混凝土铺装层的施工检验可参考行业标准《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40-2004）的有关规定执行。

**10.1.4** 所有与超高性能轻型组合桥面结构施工有关的原始记录均应如实保存。

### 10.2 进场检验

**10.2.1** 原材料进场时，应按规定批次验收出厂检验报告或合格证等质量证明文件，外加剂产品还应具有使用说明书。

**10.2.2** 原材料进场检验的检验样品应随机抽取。

**10.2.3** 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的成型钢筋，检验批量不应大于60t；同一工程、同一原材料来源、同一组生产设备生产的钢纤维，检验批量不应大于30t；同一工程、同一原材料来源的栓钉，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STC干混料应作为一个检验批。

**10.2.4** 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 散装干混料应外观均匀，无结块、受潮现象。
- 2 袋装干混料应包装完整，无破袋、受潮现象。
- 3 按推荐用水量拌制新拌混凝土，流动性应符合施工要求。
- 4 按推荐用水量拌制新拌混凝土，抗弯拉强度应大于相应强度等级标准值的 1.15 倍。

**10.2.5** 干混料半成品应抽查容重及相应的钢纤维体积率。

- 1 一跨桥面铺装应至少检测一次。
- 2 抽检频率为每 100m<sup>3</sup> STC 检测一次。

## 10.3 质量检验

**10.3.1** 对旧钢桥桥面铺装翻修施工时，桥面清理除锈应满足以下规定：

- 1 基本要求
  - 1) 桥面板表面应彻底干净和干燥，不得留有垃圾、污垢、杂物及活浆；
  - 2) 应按工艺要求施工，施工相对湿度宜不大于 85%，并应保持通风，严禁雨淋；
  - 3) 桥面板表面应无损伤、无坑洞；
  - 4) 喷砂除锈后，桥面板的粗糙度、清洁度应达到设计要求。

### 2 实测项目

实测项目见表 10.3.1。

**表 10.3.1 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，ISO 8502-9 《水溶性盐的现场电导测定法标准》，每 200m <sup>2</sup> 检测 1 处
3	锈蚀情况	无蓝点	氰化钾试纸测试，ISO 8502-1 《可溶铁腐蚀产物的现场测试标准》，每 100m <sup>2</sup> 检测 1 处

4	桥面清洁度	$\geq$ Sa2.5 级	目视比较法, GB 8923《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》, 每 200m <sup>2</sup> 检测 1 处
5	桥面粗糙度	满足设计要求	比较样块法, GB/T 13288《涂装前钢材表面粗糙度等级的评定》, 每 200m <sup>2</sup> 检测 1 处

### 3 外观鉴定

- 1) 桥面板表面应光亮、清洁和干燥, 不符合要求时必须进行处理;
- 2) 桥面板应无损伤和坑洞, 但近距离应能观察到经喷砂除锈后形成的局部压痕。

## 10.3.2 焊接栓钉

### 1 基本要求

- 1) 栓钉和瓷环应符合设计要求和国家现行标准, 栓钉应无锈蚀;
- 2) 栓钉焊接应按有关技术要求和操作规程实施;
- 3) 栓钉焊接位置应准确, 焊缝饱满, 钉身竖直;
- 4) 当栓钉设计位置与钢主梁拼接焊缝位置冲突, 应将栓钉偏离焊缝位置 2-3 cm;
- 5) 个别栓钉的焊接质量不满足要求时, 应锤除栓钉, 并在原位置附近重新焊接栓钉。

### 2 实测项目

实测项目见表 10.3.2。

**表 10.3.2 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	$\leq 3\text{mm}$	钢尺测量, 每 50m <sup>2</sup> 检测 1 处	按设计图纸
2	栓钉倾角	$\leq 10^\circ$	钢尺及量角器测量, 每 50m <sup>2</sup> 检测 1 处	90°
3	栓钉间距	$\leq 10\text{mm}$	钢尺测量, 每 50m <sup>2</sup> 检测 1 处	按设计图纸
4	焊缝可靠性	$\leq 5\%$	重锤平击钉帽, 每 50m <sup>2</sup> 检测 1 处	97.5%

### 3 外观鉴定

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

### 10.3.3 焊接接缝处的加强钢板

#### 1 基本要求

- 1) 接缝处加强钢板的布置位置应准确;
- 2) 间断焊缝应饱满, 焊缝表面平整。

#### 2 实测项目

实测项目见表 10.3.3。

**表 10.3.3 加强钢板焊接实测项目**

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率
1	焊缝高度	≤0.5mm	钢尺测量, 每 5m 加强板检测 1 处
2	焊缝宽度	≤0.5mm	钢尺测量, 每 5m 加强板检测 1 处
3	焊缝长度	≤1mm	钢尺测量, 每 5m 加强板检测 1 处

#### 3 外观鉴定

- 1) 接缝处加强钢板的摆放平齐, 无明显偏差, 各加强板块间相互紧靠;
- 2) 间断焊缝外形应饱满, 无气孔、夹渣、裂纹等明显缺陷。

### 10.3.4 钢筋网铺设

#### 1 基本要求

- 1) 钢筋应符合设计要求和国家现行标准;
- 2) 钢筋的冷拉调直、加工、弯制等操作应满足国家现行标准要求;
- 3) 钢筋的连接接缝应布置在结构内力较小的位置, 并应当错开布置;
- 4) 钢筋网铺设时, 其级别、直径、间距、层数及相对位置应符合设计规定;
- 5) 绑扎钢筋前, 应在钢桥面上设置垫块, 垫块高度应符合设计规定。垫块应错开设置在钢筋与桥面板之间, 并应与钢筋网绑扎牢固;
- 6) 钢筋网宜采用镀锌钢丝绑扎, 丝径宜为 0.7mm~2.0mm, 且铁丝丝头应朝向桥面板;
- 7) 钢筋铺设完后, 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。

#### 2 实测项目

实测项目见表 10.3.4。

表 10.3.4 钢筋网铺设实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率
1	钢筋搭接长度	≤10mm	钢尺测量, 每 100m <sup>2</sup> 检测 1 处
2	钢筋网高度	≤3mm	钢尺测量, 每 100m <sup>2</sup> 检测 1 处
3	钢筋网间距	≤10mm	钢尺或游标卡尺测量, 每 100m <sup>2</sup> 检测 1 处

### 3 外观鉴定

- 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) 钢筋接缝布置合理, 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。

## 10.3.5 STC 层摊铺施工

### 1 基本要求

- 1) 模板高度和安装位置应符合设计规定;
- 2) 摊铺机性能应满足其摊铺宽度、摊铺高度、摊铺速度等施工要求;
- 3) 原材料质量应符合本规程的规定;
- 4) 摊铺前, 应进行试拌, 确定水灰比及搅拌时间。并应对强度、弹性模量、坍落度等进行检验, 且应满足现行国家标准及设计要求;
- 5) 摊铺前, 应通过试验或施工经验确定松铺厚度、摊铺速度;
- 6) 摊铺过程中, 应按设计要求检验摊铺厚度, 并应及时调整;
- 7) 摊铺时, 布料应均匀, 振捣应充分, 确保铺装密实, 表面平整;
- 8) 摊铺完, 应及时覆盖塑料养生薄膜, 并应洒水保湿养生;
- 9) 高温蒸汽养护前, 应对养护设备、供热管道及保温棚进行安装和调试。

### 2 实测项目

实测项目见表 10.3.5-1、表 10.3.5-2、表 10.3.5-3。

表 10.3.5-1 STC 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 <sup>3</sup> 检测 1 组	$f_{cu,m} - 1.1 \cdot S_{f_{cu}} \geq f_{cu,k}$ $f_{cu,min} \geq 0.95 \cdot f_{cu,k}$
2	抗弯拉强度	100mm×100mm×400mm 棱柱体试件抗弯拉试验，每 40m <sup>3</sup> 检测 1 组	$f_{f,m} \geq 1.05f_{fk}$ $f_{f,min} \geq 0.95 \cdot f_{fk}$
3	弹性模量	100mm×100mm×300mm 棱柱体试件轴压试验，每 40m <sup>3</sup> 检测 1 组	按设计要求
4	坍落度	水泥混凝土坍落度试验标准方法，每 40m <sup>3</sup> 检测 1 次	≥180mm ≤280mm

注：\*  $f_{cu,m}$  和  $f_{cu,min}$  分别为 STC 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 STC 的抗弯拉强度的平均值和最小值。

表 10.3.5-2 STC 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	≤3mm	摊铺过程中，将直钢丝插入到 STC 的底部，以直尺测量钢丝的浸润深度，每 40m <sup>2</sup> 检测 1 处
2	桥面纵、横坡	≤0.2%	水准仪、皮尺测量，每 40m <sup>2</sup> 检测 1 处
3	平整度	≤3mm	3m 铝合金直尺，每 40m <sup>2</sup> 检测 1 处

表 10.3.5-3 STC 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

### 3 外观鉴定

- 1) 摊铺过程中，STC 应色泽正常，无发干或发亮现象；
- 2) STC 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, STC 层应均匀完好, 且不应有龟裂现象;
- 4) 养护完成后, STC 层应均匀完好, 且应无收缩裂纹;
- 5) 混凝土层的边角处、不同浇筑时期接缝处等位置应衔接良好, 无脱空、台阶现象;
- 6) 接缝区域先浇段 STC 侧面凿毛处理后, 表面粗糙, 断面上有大量钢纤维裸露在外。

### 10.3.6 沥青铺装层施工

#### 1 基本要求

- 1) 沥青混合料的矿料质量及矿料级配应符合设计要求和施工规范的规定;
- 2) 沥青材料及混合料的各项指标应符合设计和施工规范的要求, 对每日生产的沥青混合料应做抽提试验 (包括马歇尔稳定度试验);
- 3) 严格控制各种矿料和沥青用量及各种材料和沥青混合料的加热温度, 碾压温度应符合要求;
- 4) 拌和后的沥青混合料应均匀一致, 无花白、粗细料分离和结团成块现象;
- 5) 桥面泄水孔进水口的布置应有利于桥面和渗入水的排除, 其数量不得少于设计要求, 出水口不得使水直接冲刷桥体;
- 6) 蒸养后 STC 层表面应清洁, 无杂物、油渍和粉尘等物质;
- 7) 检查沥青铺装层摊铺机, 确保摊铺范围、摊铺厚度应能满足设计要求。

#### 2 实测项目

实测项目见表 10.3.6。

表 10.3.6 沥青铺装层施工实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率
1	压实度	符合设计要求	按碾压吨位与遍数检查
2	铺装层平整度	≤1mm	3m 铝合金直尺, 每 200m <sup>2</sup> 检测 1 处
3	平均厚度	≤3mm	按沥青混凝土实际用量推算每 200m <sup>2</sup> 检测 1 处
4	铺装层抗滑性能	≤5%	摆式仪法, 每 200m <sup>2</sup> 检测 1 处
5	桥面纵、横坡	≤0.2%	水准仪、皮尺测量, 每 200m <sup>2</sup> 检测 1 处

#### 3 外观鉴定

- 1) 沥青混凝土料厚度应均匀, 压实紧密, 无松散料, 且不应出现泛油、裂缝、粗细料集中等现象, 表面无明显碾压轮迹;
- 2) 边角位置的铺装层铺装应良好, 且无应有脱空现象;

- 3) 搭接处应紧密、平顺，不得有积水现象；
- 4) 桥面应整体整洁干净，且应达到通车要求。

## 10.4 质量验收

### 10.4.1 质量验收评定工作应在符合下列规定的前提下进行：

- 1 使用的原材料、半成品、成品及施工工艺应符合基本要求的规定，检验结果应经监理工程师检查认可。
- 2 无严重外观缺陷，且质量保证资料应真实齐全。

### 10.4.2 质量保证资料应包括下列内容：

- 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、STC 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。

**10.4.3** 对工程质量验收不合格的，监理单位应责令施工单位进行缺陷修补或返工，并应重新进行质量验收。

## 附录 A STC 用钢纤维性能检验方法

### A.0.1 钢纤维形状与尺寸检验

#### 1 钢纤维形状合格率的检验:

每批次钢纤维中用感量 0.1g 的天平称取 1000g 钢纤维,从中随机取 50 根钢纤维.肉眼逐根检查其形状。记录钢纤维形状呈弯曲和其他形状等的纤维根数  $N_f$ 。

钢纤维形状合格率按式 (A.0.1-1) 计算, 计算结果精确至 0.1%。

$$P_f = \frac{50 - N_f}{50} \times 100 \quad (\text{A.0.1-1})$$

式中:  $P_f$ —形状合格率, 单位为百分数 (%);

$N_f$ —形状不符合要求的纤维根数, 单位为根。

#### 2 钢纤维长度和直径合格率的检验:

每批次钢纤维中用感量 0.1g 的天平称取 1000g 钢纤维, 从中随机取 50 根钢纤维, 用游标卡尺 (分辨率 0.01mm) 逐根测量其长度, 用千分尺 (分辨率 0.001mm) 测量其直径。记录长度不在 12mm~14mm 或 6mm~8mm 范围内的钢纤维根数和直径不在 0.18mm~0.22mm 或 0.12mm~0.16mm 范围内的钢纤维根数。

钢纤维长度和直径合格率按式 (A.0.1-2) 和 (A.0.1-3) 计算, 计算结果精确至 0.1%。

$$P_l = \frac{50 - N_l}{50} \times 100 \quad (\text{A.0.1-2})$$

$$P_d = \frac{50 - N_d}{50} \times 100 \quad (\text{A.0.1-3})$$

式中:  $P_l$ ——长度合格率, 单位为百分数 (%);

$N_l$ ——长度不在 12mm~14mm 或 6mm~8mm 范围内的钢纤维根数, 单位为根;

$P_d$ ——直径合格率, 单位为百分数 (%);

$N_d$ ——直径不在 0.18mm~0.22mm 或 0.12mm~0.16mm 范围内的钢纤维根数，单位为根。

### A.0.2 杂质含量检验

每批次钢纤维中用感量 0.01g 的天平称取 500g 钢纤维两份，分别对每份样品用肉眼观察钢纤维的表面是否污染。用人工挑拣出粘连的钢纤维束、锈蚀钢纤维以及其他杂质，并用感量 0.01g 的天平称重。杂质含量按式 (A.0.2) 计算，计算结果精确至 0.1%。两次结果的平均值作为评定结果。

$$W = \frac{m}{500} \times 100 \quad (\text{A.0.2})$$

式中：W——杂质含量，单位为百分数（%）；

$m$ ——杂质质量，单位为克（g）。

### A.0.3 抗拉强度试验

1 钢纤维抗拉强度采用母材大试样进行试验。每批次钢纤维随机取 600mm 长的母材试样 5 根。

2 采用分辨率为 0.001mm 千分尺，在试样的断面相互垂直方向测量试样的截面直径，取平均值计算圆形钢纤维的截面积  $A$ （单位为  $\text{mm}^2$ ），计算时应保留到小数点后四位。

3 采用量程为 100N~200N 的电子拉力试验机，加载速度（ $1 \pm 0.2$ ）mm/min，测得极限拉伸荷载  $P_{\max}$ ；

4 钢纤维的抗拉强度按式 (A.0.3) 计算：

$$f_u = \frac{P_{\max}}{A} \quad (\text{A.0.3})$$

式中： $f_u$ ——钢纤维抗拉强度，单位为兆帕（MPa）；

$P_{\max}$ ——钢纤维极限拉伸荷载，单位为牛顿（N）；

$A$ ——钢纤维截面面积，单位为平方毫米（ $\text{mm}^2$ ）。

5 五根试样抗拉强度测定值的算术平均值作为评定结果，精确至 0.1MPa。如 5 个测定值中有一个超出平均值的  $\pm 10\%$ ，应剔除该值，再以剩下 4 个测定值的平均值作为

抗拉强度评定结果。如果这 4 个测定值中再有超过它们的平均值 $\pm 10\%$ 的, 则该组试验结果作废。单根试样的抗拉强度不应低于 1600MPa。

## 附录 B 开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩计算

**B.0.1** 开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩宜采用数值分析方法计算。

**B.0.2** 开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩可采用弹性约束压杆模型（图 B.0.2），按下列公式简化计算：

$$M_{cr} = \frac{N_{cr} W_{0s}}{A_{sb} + A_{sw} / 2} \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E_s I_{sby}}{l_0^2} \quad (\text{B.0.2-2})$$

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{m^2 + \frac{k_s l^4}{m^2 \pi^4 E_s I_{sby}}}} \quad (\text{B.0.2-3})$$

$$m^2 (m + 1)^2 = \frac{k_s l^4}{\pi^4 E_s I_{sby}} \quad (\text{B.0.2-4})$$

$$k_s = \frac{3E_s I_w}{h_s} \quad (\text{B.0.2-5})$$

$$I_w = \frac{1 \times t_w^3}{12} \quad (\text{B.0.2-6})$$

$$I_{sby} = \frac{t_{sb} b_{sb}^3}{12} \quad (\text{B.0.2-7})$$

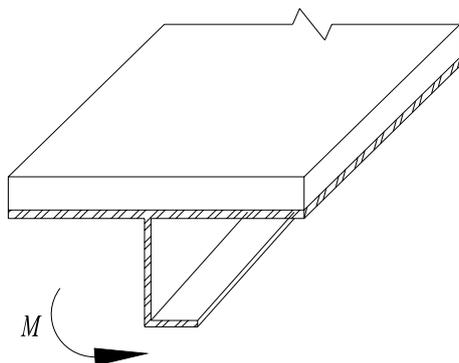
式中：  $M_{cr}$  ——开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩（N•mm）；

$N_{cr}$  ——等效弹性约束压杆的临界力（N）；

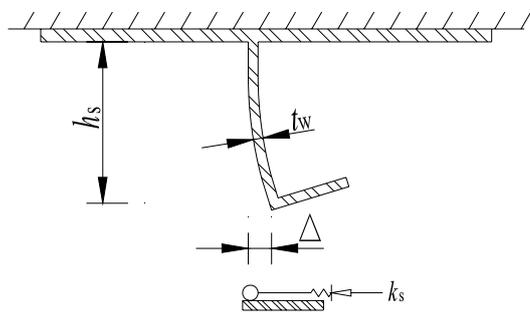
$W_{0s}$  ——不考虑开裂 STC 的截面模量（mm<sup>3</sup>）；

$A_{sb}$ 、 $A_{sw}$  ——受压下翼缘和腹板的面积（mm<sup>2</sup>）；

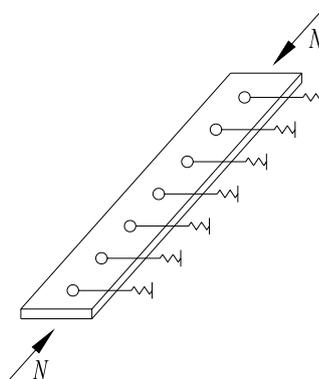
- $E_s$  —— 钢材弹性模量 (MPa) ;
- $I_{sby}$  —— 等效弹性约束压杆关于 y 轴的惯性矩 ( $\text{mm}^4$ ) ;
- $l_0$  —— 弹性约束压杆的计算长度 (mm) ;
- $l$  —— 弹性约束压杆的长度 (mm) ;
- $m$  —— 计算过程中无量纲数;
- $k_s$  —— 单位梁长的转动约束刚度 (N) ;
- $I_w$  —— 单位宽度腹板出平面的截面惯性矩 ( $\text{mm}^3$ ) ;
- $h_s$  —— 钢主梁翼缘剪力中心间的距离 (mm) ;
- $t_w$  —— 钢主梁腹板厚度 (mm) ;
- $b_{sb}$ 、 $t_{sb}$  —— 钢主梁下翼缘的宽度和厚度 (mm) 。



(a) 受负弯矩作用的超高性能轻型组合桥面结构



(b) 弹性侧向约束



(c) 计算模式

### B.0.2 弹性约束压杆模型

## 本规程用词说明

为了便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1 表示很严格，非这样做不可的用词：
  - 1) 正面词采用“必须”；
  - 2) 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：
  - 1) 正面词采用“应”；
  - 2) 反面词采用“不应”或“不得”。
- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的用词：
  - 3) 正面词采用“宜”；
  - 4) 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”。

规程中指定应按其他有关规程和规范执行时，写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

下列文件对于本规程的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本规程。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

- 《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
- 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》 GB/T 18046
- 《砂浆和混凝土用硅灰》 GB/T 27690
- 《混凝土用水标准》 JGJ 63
- 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》 JGJ52
- 《水泥用硅质原料化学分析方法》 JC/T874
- 《钢纤维混凝土》 JG/T 3064
- 《混凝土外加剂》 GB 8076
- 《混凝土外加剂应用技术规范》 GB 50119
- 《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》 GB 1499.2
- 《电弧螺柱焊用柱头焊钉》 GB/T 10433
- 《改性乳化沥青技术标准》 JTJ 052
- 《干混砂浆散装移动筒仓》 SB/T 10461
- 《公路沥青路面施工技术规范》 JTG F40
- 《桥梁用结构钢》 GB/T 714-2008
- 《低合金高强度结构钢》 GB/T 1591
- 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60
- 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG D62
- 《钢-混凝土组合桥梁设计规范》 GB 50917
- 《公路沥青路面设计规范》 JTG D50
- 《公路工程技术标准》 JTG B01

- 
- 《AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (SI unit)》 AASHTO
- 《Eurocode 1: Actions on structures — Part 2: Traffic loads on bridges》 ECS
- 《Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-9: Fatigue》 ECS
- 《Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 2—General Rules and Rules for Bridges》 ECS
- 《Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》  
FHWA
- 《Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete: Recommendations》 AFGC



# 超高性能轻型组合桥面结构技术规程

(GDJTG/T A01—2015)

条文说明



# 1 总则

**1.0.1** 目前我国已经制定了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917-2013。但是该规范的适用范围是常规的钢-混凝土组合桥梁。本规程的适用对象是超高性能轻型组合桥面结构，即将超高韧性混凝土应用在正交异性钢桥面板上，形成一种新型的组合桥梁结构。在设计、施工等诸多方面，超高性能轻型组合桥面结构不同于常规的钢-混凝土组合桥梁。因此，本规程是专门为超高性能轻型组合桥面结构而编写的。规程的编写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** 本规程的超高性能轻型组合桥面结构即适用于新建钢桥，也适用于旧钢桥的铺装层翻修与钢桥面板的加固。

**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问题：（1）在高频重载行车下，钢桥面板的焊缝位置易出现疲劳裂缝；（2）钢桥面的常规沥青铺装层易破损，需要频繁维修。这两类病害问题影响了桥梁的耐久性和行车的舒适性，并增加了桥梁维护成本。本规程的目的是为解决这两类典型病害问题提供一种新的思路。因此，在超高性能轻型组合桥面结构中，钢主梁特指具有正交异性钢桥面板的主梁结构。

**1.0.4** 按照极限状态法进行设计是现行国家标准《工程可靠性设计统一标准》GB 50513 的基本要求。极限状态分为承载能力和正常使用两类。

以概率理论为基础的极限状态设计，在基准期内结构的可靠指标满足目标指标，结构安全是指在统计基准期中概率意义上的安全。

**1.0.5** 在超高性能轻型组合桥面结构中，STC 层是主结构层，按不开裂设计，否则耐久性受影响，其设计寿命与钢桥的其他主要构件相同。

**1.0.6** 铺装层不属于本规程中超高性能轻型组合桥面结构的范畴，其设计应采用相应的现行行业规范。

**1.0.7** 本规程的编写是以对超高性能轻型组合桥面结构的系列研究成果为基础，并以国家现行行业标准为框架。因此，超高性能轻型组合桥面结构的设计、施工与验收还应符合国家现行行业标准的规定。

## 2 术语和符号

术语列出了组合桥梁相关的专业性术语，以达到概念解释与表达统一的目的。符号按材料性能、作用与作用效应、计算系数等几个部分列出。主体符号参照公路桥梁规范，以达到设计使用习惯的一致性。

## 3 材料

### 3.1 STC

**3.1.1** 超高韧性混凝土本质上是一种超高性能混凝土，其组成部分中没有粗骨料，并掺入了大量钢纤维，以改善其抗拉性能。在组成特点上，超高韧性混凝土结合了改性活性粉末混凝土（Reactive Powder Concrete, RPC）和密配筋混凝土（Compact Reinforced Composite, CRC）的特点，即以改性 RPC 为基体材料，并密布钢筋，以提高材料的抗拉强度与韧性，适应其在钢桥面中的不利受力。因而，为与传统的 RPC 相区分，并体现材料具备高抗拉性能的特性，本规程中称之为“超高韧性混凝土”。

有关研究表明水胶比大于 0.22 后，硬化水泥石中的毛细孔可能形成连通孔，对 STC 的耐久性不利。

**3.1.2** 硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥胶砂强度较高并且掺加混合材较少，适合配制 STC，便于掺用较多的矿物掺合料来改善混凝土的性能。

**3.1.3** STC 的胶凝材料需进行颗粒调配，优质的掺合料有利于掺合料的颗粒调配，以保证 STC 的性能。本条规定了 STC 中掺入粉煤灰、硅灰的要求。

**3.1.4** STC 的力学性能是基于石英砂和石英粉为骨料而得到的，目前没有采用其他骨料的性能参数，使用单粒级的骨料有利于级配调整。本条列出了 STC 中石英砂和石英粉的质量要求。

**3.1.5** 本条规定了石英砂和石英粉的质量和级配指标的检测方法。

**3.1.6** 为了利于骨料的级配调整，本条列出了对石英砂和石英粉的级配要求。

**3.1.7** 国家现行标准《混凝土外加剂》（GB 8076-2009）是我国关于外加剂产品的主要标准。国家现行标准《混凝土外加剂应用技术规范》（GB 50119-2013）规定了不同品种外加剂的应用技术要求。STC 的水泥用量大、水胶比很低，为保证 STC 的性能，宜用高性能减水剂，且减水率大于 30%。

**3.1.8** STC 掺用膨胀剂、防冻剂等其它外加剂时，外加剂性能除应符合国家现行相关标准的规定外，其用量和应用效果应通过试验确定。

**3.1.9** 本条规定了STC用钢纤维的性能指标和检验方法，其中：直径为0.18 mm～0.22mm的纤维长度为12 mm～14mm；直径为0.12mm～0.16mm的纤维长度为6mm～8mm。

**3.1.10** 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。

**3.1.11** 湖南大学对多组不配筋STC试件开展了轴心抗拉试验研究。结果表明，STC 具有应变硬化特性，即STC的抗拉强度等于其初裂强度，并伴随着多裂缝的出现和发展。根据这一特性，若在STC内密布钢筋，将有效限制STC裂缝宽度的发展。因此，不配筋和配筋STC的抗拉强度差异性大，本规程中区分对待。

**3.1.12** STC的强度等级按照抗弯拉强度划分，主要原因是：在设计荷载作用下，超高性能轻型组合桥面结构中STC层的拉应力较大，往往成为控制设计的关键因素，而其压应力则远小于材料的抗压强度。

本条中， $f_{fd} = f_{fk} / 1.45$ ， $f_{cd} = f_{ck} / 1.45$ ，其中1.45为STC的材料性能分项系数； $f_{cd} = f_{cd,k} / 1.55$ ，其中1.55为STC立方体抗压强度标准值与轴心抗压强度标准值的比值。

**3.1.13** 本规程中充分利用了STC的轴心抗拉应变硬化特性。基于试验结果，本条文将STC的极限拉应变设计值定为 $3000 \mu\varepsilon$ 。

**3.1.14** 在超高性能轻型组合桥面结构中,须对 STC 层进行密配筋。湖南大学已开展了多种钢-STC 组合梁的模型试验。研究表明,当钢面板厚 12mm,上铺 STC 层厚度为 50mm,横桥向配筋(位于上层)、纵桥向配筋(位于下层)直径为 10mm、钢筋中心间距分别为 67mm、50mm、40mm、33mm 时,STC 的开裂强度(最大裂缝宽度为 0.05mm)如本规程表 3.1.14 所示。

配筋 STC 的抗拉强度同配筋率、保护层厚度密切相关,当钢筋间距减小时,配筋 STC 的弯拉强度会进一步增大,当减小保护层厚度时,配筋 STC 的弯拉强度也增大。

试验模型中钢面板的厚度偏保守地取为 12mm,而目前正交异性钢桥面中的钢面板厚度一般为 $\geq 14\text{mm}$ 。因此,在工程应用中,当钢面板厚度大于 12mm 时,可偏保守地,仍然采用本规程第 3.1.14 条进行设计。

**3.1.15** 湖南大学对接缝开展了模型试验。根据试验结果,当接缝开裂时(裂缝宽度为 0.03mm),多个接缝的 STC25 层中应力均大于 21.0 MPa。因而,本条偏保守地,将接缝处 STC 的名义弯拉应力容许值取为配筋 STC 的 0.65 倍。

**3.1.16** 本条文 STC 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》(施士异;1999)。

**3.1.17** 本条文中 STC 弹性模量的计算公式参考了文献《Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》(FHWA;2013)的研究。

**3.1.18** 本条文 STC 剪切模量的取值参考了《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62。

**3.1.19** 根据湖南大学的研究,STC 的实测泊松比为 0.19,本条文中近似取 0.2。

**3.1.20** 本条文中 STC 收缩应变和徐变系数取自参考文献《Recommendations of Ultra High Performance Fiber-reinforced Concretes》(Association Française de Génie Civil;2013)。高温蒸汽养护基本消除了 STC 的后期收缩。

**3.1.21** 本条文中钢筋在 STC 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）的研究。

**3.1.22** 本条文 STC 的抗渗级别定义参考了《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011 第 3.2.2 条，测试方法应采用逐级加压法。考虑到 STC 良好的致密性，本条规定其渗透压压强为 2.0MPa，意味着 STC 在 2.0MPa 的静水压力作用下不会渗水。

## 3.2 钢材

**3.2.1~3.2.7** 本节参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 的相关条款。

## 3.3 普通钢筋

**3.3.1~3.3.4** 本节参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 的相关条款。不同的是，超高性能轻型组合桥面结构中适用的钢筋均为带肋钢筋，且为 HRB400 级别以上。

## 4 基本规定

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 承载能力极限状态计算包括了持久状况和偶然状况下构件截面的承载能力计算, 以及稳定、倾覆、疲劳等方面的计算。在作用及荷载的组合中, 截面抗弯、抗剪承载能力以及整体稳定计算时效应组合按照基本组合; 倾覆计算和疲劳计算时效应组合按照标准组合。

**4.1.2** 本条文参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 的相关条款计算 STC 层的有效分布宽度。

**4.1.3** 在《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 中, 由于普通混凝土板较厚, 组合桥梁的温度按照多折线考虑, 其中折线的第一段(从混凝土顶面开始)的范围为 100mm。考虑到超高性能轻型组合桥面结构中 STC 层较薄, 其厚度一般小于 100mm。因此, 对于超高性能轻型组合桥面结构, STC 层始终落在第一段折线内。简化起见, 本条文根据 STC 的设计厚度计算出 STC 底面的温度, 并假设从 STC 底面至钢主梁底面, 截面的温度保持恒定。

**4.1.4** 超高性能轻型组合桥面结构的设计计算尚应符合现行行业标准的相关规定。

**4.1.5** 面层的设计应符合相应的行业标准。

### 4.2 承载能力极限状态计算

**4.2.1** 本条是关于超高性能轻型组合桥面结构桥梁安全等级的选用。表 4.2.1 中的安全等级划分是按照现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50513 的相关规

定，并考虑超高性能轻型组合桥面结构桥梁的特点给出的，与现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 保持一致。

**4.2.2** 本条给出了承载力极限状态计算的表达式，适用于本规范结构构件的承载力计算。本条为强制性条文。

**4.2.3** 本条规定了不同类别的承载能力极限状态计算时的作用组合方式。

**4.2.4** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的抗倾覆性计算应参考《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917。

### 4.3 正常使用极限状态验算

**4.3.1** 式(4.3.1)为持久状况正常使用极限状态的验算表达式。作用的效应组合一般采用标准组合、频遇组合及准永久组合，不含安全等级决定的重要性系数；限值的取值源于工程实践的经验。

**4.3.2** 未采用高温蒸汽养护时，需要考虑 STC 的收缩影响。

**4.3.3** 本条参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 的相关规定。

**4.3.4** 本条参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 的相关规定。

**4.3.5** 根据参考文献《Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete》(Rafiee A.; 2012)的研究，当裂缝宽度不超过 0.05mm 时，可认为裂缝对于超高性能混凝土的耐久性没有影响。STC 是一种超高性能混凝土。因此，本条规定，在正常使用极限状态下，STC 中的最大裂缝宽度不得超过 0.05mm。

#### 4.4 持久状况及短暂状况应力验算

4.4.1~4.4.3 应力限值的取值源于工程实践经验，并与现行的有关规范基本一致。部分控制值作为强度验算的补充。

#### 4.5 疲劳计算

4.5.1~4.5.2 本规程的疲劳验算方法采用容许应力法，与现行有关行业标准一致。

#### 4.6 设计流程和设计内容

4.6.1~4.6.2 本节是由超高性能轻型组合桥面结构派生出来的设计内容。设计流程和设计内容均来自目前已积累的实桥设计经验，可供设计人员参考。

## 5 承载能力极限状态设计

### 5.1 抗弯承载力计算

**5.1.1** 对于简支梁，一般不会出现截面弯矩和剪力均较大的情况（除了在跨中弯矩最大处还有较大的集中力作用）。

对于连续梁的中支点处截面，受弯受剪最大必然同时出现。但根据试验表明，当混凝土层的纵向配筋率较大，满足  $A_n f_{sd} \geq 0.15 A_s f_d$  时，即普通钢筋与钢主梁的力比大于 0.15 时，抗剪承载能力有较大的提高，抗弯承载能力也可不考虑抗剪的影响。

**5.1.2~5.1.3** 以马房大桥为例，计算超高性能轻型组合桥面结构的抗弯承载力。马房桥的截面尺寸如图 1 所示。其中行车道全宽约 9m，STC 层布满行车道，厚度为 50mm，其内布置间距为  $32 \times 32$ mm 的钢筋网，钢筋的型号为 HRB400，直径为  $\Phi 10$ mm，单向配筋率为 4.9%。

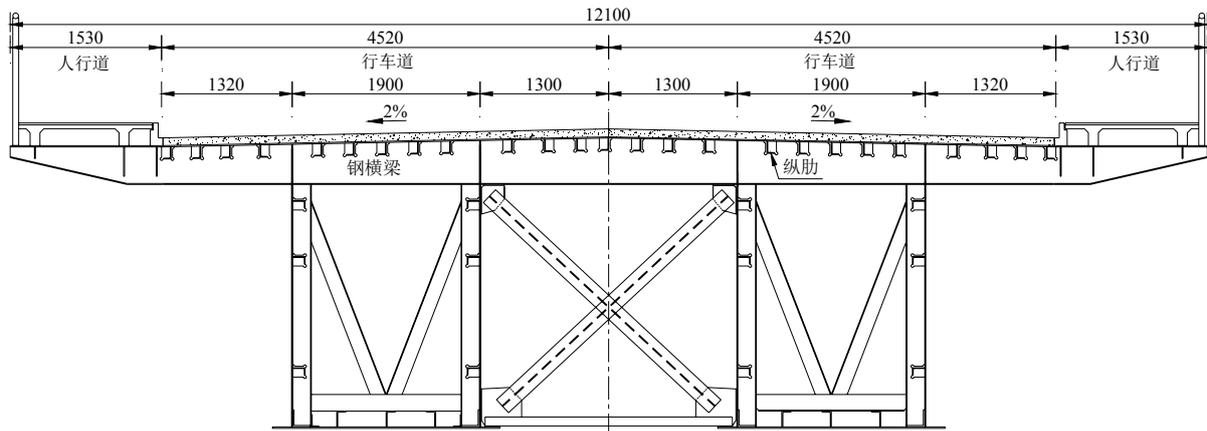


图 1 马房大桥横断面图（单位：mm）

根据马房大桥的横断面尺寸可以求得： $A_s = 0.3615 \text{ m}^2$ ， $A_c = b_c h_c = 9.0 \times 0.05 = 0.45 \text{ m}^2$ ， $A_r = A_c \rho = 0.45 \times 4.9\% = 0.02205 \text{ m}^2$ 。材料参数方面， $f_d = 275 \text{ MPa}$ ， $f_{sd} = 330 \text{ MPa}$ 。而对于 STC 层，假设其为 STC25 等级，故抗压强度设计值和抗拉强度设计值分别取为  $f_{cd} = 62.3$

MPa 和  $f_{td}=8$  MPa。

当截面承受正弯矩时，根据式 (5.1.2-2)，钢结构受压区面积为， $A_{sc}=0.1165$  m<sup>2</sup>，可以进一步求得  $y_1=1.771$  m， $y_2=1.739$  m， $y_3=1.771$  m。根据式 (5.1.2-1) 可以求得组合截面的承载力为  $M_u=118,260$  kN·m。其中钢箱梁、STC 层、普通钢筋对组合截面正弯矩承载力的贡献分别为 47%，42%和 11%。

当截面承受负弯矩时（由于实桥为简支梁，截面总是承受正弯矩，此处计算的目的在于说明计算过程，与实桥的受力模式无关），根据式 (5.1.3-2)，钢结构受压区面积为， $A_{sc}=0.1610$  m<sup>2</sup>，可以进一步求得  $y'_1=2.129$  m， $y'_2=2.061$  m， $y'_3=2.129$  m。根据式 (5.1.3-1) 可以求得组合截面的承载力为  $M'_u=-114,395$  kN·m。其中钢箱梁、STC 层、普通钢筋对组合截面负弯矩承载力的贡献分别为 80%，7%和 13%。

## 5.2 抗剪承载力计算

**5.2.1~5.2.2** 本节参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 的相关规定。

## 5.3 整体稳定计算

**5.3.1** 当超高性能轻型组合桥面结构采用闭口纵肋时，由于加劲肋的扭转刚度较大，无需验算其稳定性。但是当采用开口纵肋时，纵肋的抗扭刚度小，且其侧向约束仅来自于横隔板，若开口加劲肋的自由长度和总宽度之比超过了表 5.3.1 的限值，应进行整体稳定计算。

现以马房大桥为例进行计算。马房大桥的正交异性钢桥面板含开口角钢纵肋，截面断面如图 2 所示。开口纵肋厚 8mm，其下翼缘板受钢横梁的约束，钢横梁每 2m 布置一道。

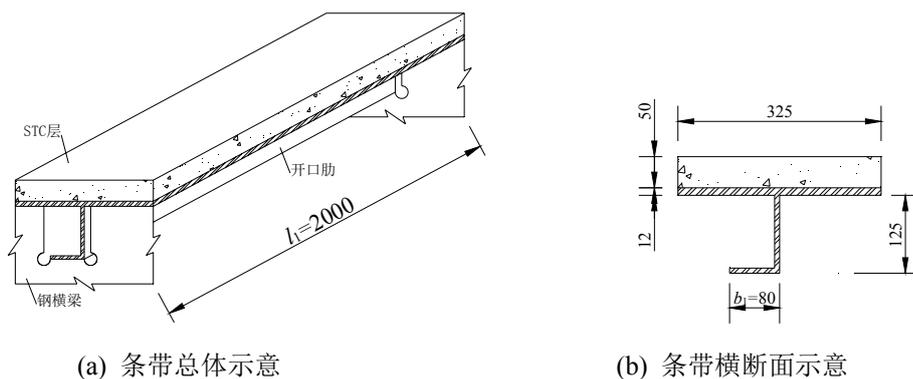


图 2 马房大桥轻型组合桥面结构局部示意图 (单位: mm)

计算按照步骤如下:

(1) 计算  $l_1/b_1$

根据已知条件, 开口肋下翼缘的自由长度为  $l_1=2.0\text{m}$ , 总宽度为  $b_1=0.08\text{m}$ , 则开口肋下翼缘的自由长度与总宽度之比为  $l_1/b_1=2/0.08=25$ , 超过了表 5.3.1 所规定的不需要进行稳定验算的限值 10.5, 须进行稳定验算。

(2) 计算组合截面在负弯矩作用下的抗弯承载力  $M_{Rd}$

基于图 2 (b) 的断面参数和本规程第 5.1.3 条可计算截面在负弯矩作用下的抗弯承载力  $M_{Rd}$ 。

STC 的面积钢梁截面面积  $A_s=0.0055\text{ m}^2$ , STC 层截面面积  $A_c=0.01625\text{ m}^2$ , STC 内钢筋截面面积  $A_r=A_c\rho=0.01625\times 4.9\%=0.00079625\text{ m}^2$ , 其中  $\rho$  为配筋率。对于钢梁和钢筋分别有,  $f_d=275\text{ MPa}$ ,  $f_{sd}=330\text{ MPa}$ 。而 STC25 的抗压强度设计值和抗拉强度设计值分别取为  $f_{sc}=62.3\text{ MPa}$  和  $f_{st}=8\text{ MPa}$ 。

根据式 (5.1.3-2) 可得钢梁受拉区截面面积为  $A_{st}=0.0020\text{ m}^2$ 。根据式 (5.1.3-1) 可得  $M_{Rd}=54.61\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

(3) 按初等材料力学原理计算组合截面的抗弯承载力  $M_{Rk}$

根据本规程第 5.3.3 条, 计算的几何参数同步骤 (2), 但材料强度参数应使用材料强度标准值, 对于  $f_y=345\text{ MPa}$ , 钢材的弹性模量为  $E_s=206\text{ GPa}$ , STC 的弹性模量为

$E_c=40.7$  GPa, 则换算弹性模量比为  $n_0 = \frac{E_s}{E_c} = 5.06$ 。将 STC 等效为钢材, 可得组合

截面的净截面模量  $W_n = 0.0001497 \text{ m}^3$ , 根据式 (5.3.3-5) 可得,  $M_{Rk} = 51.65 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

(4) 计算侧扭屈曲弹性临界弯矩  $M_{cr}$

本步计算基于附录 B 的有关公式。

根据图 (2) 的几何参数, 开口肋下翼缘有  $t_{sb} = 0.008 \text{ m}$ ,  $b_{sb} = 0.08 \text{ m}$ , 基于式 (B.0.2-7)

可得  $I_{sby} = \frac{t_{sb} b_{sb}^3}{12} = 3.4133 \times 10^{-7} \text{ m}^4$ 。开口肋腹板厚度  $t_w = 0.008 \text{ m}$ , 则基于式 (B.0.2-6) 可

得  $I_w = \frac{1 \times t_w^3}{12} = 4.2667 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 。开口肋翼缘剪切中心间的距离近似假设为上下翼缘板截

面中心的间距, 由图 2 (b) 可得  $h_s = 0.127 \text{ m}$ 。将上述数据代入到式 (B.0.2-5) 可得,

$$k_s = \frac{3E_s I_w}{h_s} = 207622.0472 \text{ (N)}。$$

将上述数据代入式 (B.0.2-4) 可得,  $m^2$  的两个根, 即  $m^2 = 0.2236$  或  $m^2 = 2.1693$ , 以任意一个根代入到式 (B.0.2-3) 可得弹性约束压杆的计算长度  $l_0 = 1.2929 \text{ m}$ 。将结果代入到式 (B.0.2-2) 可得, 等效弹性约束压杆的临界力为  $N_{cr} = 415.15 \text{ kN}$ 。

根据图 2 (b) 可得, 受压下翼缘和腹板的面积分别为  $A_{sb} = 0.08 \times 0.008 = 0.00064 \text{ m}^2$ ,  $A_w = 0.008 \times (0.125 - 0.008) = 0.000936 \text{ m}^2$ 。而当不考虑 STC 开裂时, 其截面模量为  $W_{0s} = W_n = 0.0001497 \text{ m}^3$ 。基于以上结果和式 (B.0.2-1) 可得, 开口加劲肋侧扭屈曲的弹性临界弯矩为  $M_{cr} = 56.09 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

(5) 计算换算长细比  $\lambda_{LT}$

根据本规程第 5.3.3 条式 (5.3.3-4), 可得换算长细比  $\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{RK}}{M_{cr}}} = 0.96$ 。

(6) 确定计算系数  $\phi_{LT}$

根据本规程第 5.3.3 条表 5.3.3-2, 角钢的侧向失稳曲线为 d 类, 故根据表 5.3.3-1,

缺陷系数  $\alpha_{LT}=0.76$ 。按照式 (5.3.3-3)，计算系数  $\phi_{LT}=1.234$ 。

(7) 计算侧扭屈曲折减系数  $\chi_{LT}$

按照式 (5.3.3-2) 可得，侧扭屈曲折减系数  $\chi_{LT}=0.497$ 。

(8) 计算负弯矩下的组合截面的抗弯承载力

按照式 (5.3.3-1)，考虑整体稳定性后，超高性能轻型组合桥面结构（含单个纵肋）在负弯矩作用下的抗弯承载力为： $\chi_{LT}M_{Rd}=0.497\times 54.61=27.16\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

**5.3.2** 在 STC 硬化前，应对纯钢主梁的整体稳定性进行计算，计算方法可参考钢结构设计规范。

**5.3.3** 本条参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 的相关规定。

## 5.4 疲劳验算

**5.4.1** 本条分别定义了两种疲劳荷载模型，疲劳验算中应注意各自的适用范围。

**5.4.2** 疲劳荷载模型 I 适用于全局受力构件疲劳验算。

**5.4.3** 疲劳荷载模型 II 适用于局部受力构件疲劳验算。

**5.4.4** 考虑到正交异性钢桥面板构造复杂，焊缝数量多，疲劳验算时建议以热点应力法为主，并辅助采用名义应力法。当建立有限元模型，并基于热点应力法进行疲劳验算时，应注意网格划分的要求，且应对有限元模型进行收敛分析。文献《Recommendations Fatigue Design of Welded Joints and Components, XIII-2151-07/XV-1254-07》(Hobbacher A.; 2007) 对疲劳应力的计算方法有详细介绍。

**5.4.5** 湖南大学对钢-STC 超高性能轻型组合梁开展了弯拉疲劳试验研究。试验中，STC 的拉应力幅为  $\sigma_{\min}=9.8\text{MPa}$ ， $\sigma_{\max}=24.3\text{MPa}$ ，其实测静力弯拉强度为  $f_{tk}^r=42.7\text{MPa}$ ，

可得应力水平为,  $S_{\min} = \sigma_{\min} / f_t^r = 0.23$ ,  $S_{\max} = \sigma_{\max} / f_t^r = 0.57$ 。本次疲劳试验经加载 310 万次后由于组合梁模型中的钢结构出现疲劳裂缝而被迫终止, 但 STC 保持完好, 未发现任何疲劳裂缝。

为便于数据分析, 基于大连理工大学研究得到的普通混凝土的轴心抗拉疲劳寿命计算公式 (1) (宋玉普; 2006), 可将试验中的实际疲劳应力水平换算为等效疲劳应力水平。

$$\log_{10} N = 16.67 - 16.76S_{\max} + 5.17S_{\min} \quad (1)$$

式中:  $S_{\max}$ —STC 中的最大应力水平  $\sigma_{\max} / f_t^r$ ;

$S_{\min}$ —STC 中的最小应力水平  $\sigma_{\min} / f_t^r$ ;

$f_{tk}^r$ —配筋 STC 的名义弯拉应力容许值。

根据疲劳寿命相等的原则, 式 (1) 可转化为:

$$S_{\max}^e - \frac{5.17}{16.76} S_{\min}^e = S_{\max} - \frac{5.17}{16.76} S_{\min} \quad (2)$$

在疲劳试验中, 有  $S_{\min} = 0.23$ ,  $S_{\max} = 0.57$ , 假设  $S_{\min}^e = 0$ , 基于式 (2) 可得  $S_{\max}^e = 0.5$ 。这意味着, 本次试验的实际应力水平 ( $S_{\min} = 0.23$ ,  $S_{\max} = 0.57$ ) 等效于应力水平 ( $S_{\min}^e = 0$ ,  $S_{\max}^e = 0.5$ )。使用等效应力水平后, 可以认为混凝土的轴心抗拉疲劳寿命仅与等效最大应力水平有关, 而与等效最小应力水平无关, 此时, 式 (1) 可简化为  $10^{16.76S_{\max}^e} N = C$ 。本次疲劳试验虽然未测得 STC 的疲劳寿命, 但可偏保守地, 假设 STC 的疲劳寿命为  $N=310$  万次。换算可得, 当 STC 的疲劳寿命为 200 万次时, 等效最大应力水平为 0.511; 当 STC 的疲劳寿命为 500 万次时, 等效最大应力水平为 0.488; 当疲劳寿命为 2000 万次时, 等效最大应力水平为 0.452; 当疲劳寿命为 1 亿次时, 等效最大应力水平为 0.410。

考虑到本规程编制时, 项目组尚未形成配筋 STC 的疲劳寿命计算公式, 本条基于前述疲劳试验结果和分析, 偏保守地, 将 STC 层和接缝在 500 万次疲劳寿命时的容许等效最大应力比取为 0.48, 并以此值确定 STC 层和接缝的疲劳强度等级。

疲劳验算中, 需根据 STC 的设计最大和最小应力, 以及配筋 STC 的静力抗拉强度标准值, 得到等效的最大应力水平, 计算公式如式 (3) 所示, 该公式已经暗含了

$S_{\min}^e = \sigma_{\min} / f_{tk}^r = 0$  这一假设。该公式就是本条的公式 (5.4.5) :

$$S_{\max}^e = S_{\max} - \frac{5.17}{16.76} S_{\min} \quad (3)$$

**5.4.6** 本条参考了《Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-9: Fatigue》的有关规定。本规程推荐首选热点应力法，因此，本条主要依照焊缝构造定义各细节的强度等级，当个别疲劳细节不适合采用热点应力法时，则依照细节的受力特性按照名义应力定义疲劳强度等级。当设计中拟采用名义应力法时，可参考《Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-9: Fatigue》的有关规定。

**5.4.7** 受桥梁伸缩缝的影响，在疲劳验算时，仅对靠近桥梁伸缩缝附近的截面考虑冲击系数。

**5.4.8** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的疲劳验算不应与国家相关行业标准相抵触。考虑到欧洲规范对疲劳的规定较为全面和完备，设计中可参考。

## 6 正常使用极限状态设计

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 短暂状况是指构件在制作、运输及安装等的施工阶段，持久状况是指建成后承受自重、车辆荷载等持续时间很长的状况。

**6.1.2** 本条规定了持久状况及短暂状况一般应验算的效应内容。各项效应的限值在第4章中进行了规定。

**6.1.3** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的成桥受力状态与施工顺序紧密相关。应力及变形应按照组合截面的形成方式及对应的荷载或作用进行累计计算。一般而言，超高性能轻型组合桥面结构桥梁的施工顺序可以分为两种：一是钢主梁架设后，在钢桥面板上浇筑或者安装 STC 层，结合后形成组合梁，钢主梁需先承受一部分的荷载；二是钢主梁与 STC 层结合成整体后开始承受全部的荷载。在正常使用阶段设计验算时需要充分考虑施工顺序对结构受力状态的影响。

**6.1.4** 正常使用极限状态设计计算一般均采用简便的初等材料力学方法，基本假定是在满足设计精度的前提下，规范的公式可采用初等材料力学公式。通过对 STC 的弹性模量折减，使得计算时可将材料均视为弹性。

**6.1.5** 本条文中，超高性能轻型组合桥面结构中的三个受力体系是参考了传统正交异性钢桥面板受力体系的划分。正交异性钢桥面板三个受力体系的详细描述，可参阅文献《Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges》（American Institute of Steel Construction; 1963）。

**6.1.6** 由于超高性能轻型组合桥面结构中的栓钉布置较密，在计算总体荷载效应时

(第一体系)，可以认为 STC 层同钢桥面板间是没有滑移的。但是在计算局部荷载效应时（第二和第三体系），由于正交异性钢桥面板普遍偏柔，钢板与 STC 层间会出现滑移现象。此时须考虑栓钉产生的滑移效应。

本条的第二个假设是忽略铺装层对桥面系的贡献。在一定程度上，沥青混凝土铺装层能够与正交异性钢桥面板形成协同受力。这取决于沥青混凝土材料的性能、环境温度及运营状态（如是否出现铺装层开裂等病害问题）。对于超高性能轻型组合桥面结构，铺装层仅起到一个铺装作用，其预期寿命为 8-15 年。而且，超高性能轻型组合桥面结构自身的局部刚度相对较大，铺装层对其刚度的提高作用十分有限。因此，本条建议忽略铺装层的贡献。

**6.1.7** 当计算中考虑了 STC 的非线性轴心抗拉应力-应变关系时，需要考虑 STC 内的配筋。

**6.1.8** 本条列出了正常使用极限状态设计计算时，除本规程外，尚需参考的行业相关规范。

## 6.2 应力验算

**6.2.1** 超高性能轻型组合桥面结构中的全部构件均须进行应力验算；

**6.2.2** 在计算总体荷载效应时，本条的计算方法和传统的钢-混凝土组合桥梁相同。一般采用弹性模量比的方法，将两种材料的截面换算成一种材料的截面，按照初等材料力学的公式进行计算。

**6.2.3** 根据湖南大学的研究，在超高性能组合桥面结构中，控制 STC 设计的主要是车轴荷载作用下，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 STC 层。本条列出了计算中应该重点关注的有利位置。

**6.2.4** 本条文提出的强化接缝形式在施工上具有灵活性，既能够适应节段拼装的施工

方式,也能够满足在大跨宽幅桥面施工时设置施工缝的需求。接缝方案一具有以下特点:接缝内增设的 S 形加强钢板能够提高桥面结构接缝处的局部刚度,降低接缝处 STC 层内的应力水平,同时,加强钢板的企口能够约束住 STC 层的受拉变形,提高超高性能轻型组合桥面结构的受力效率。接缝方案二由清华大学提出,其构造特点是将 STC 接缝设计呈矩形,并对接缝区域的钢筋进行局部加密。

根据清华大学的受拉试件试验结果,含异型钢板接缝和矩形接缝的名义轴拉应力分别为 19.5MPa、20.3MPa,表明这两种接缝均具有良好的抗拉性能。

**6.2.5** 接缝的布置位置应位于低拉应力区,甚至位于压应力区。因此,原则上,横缝应布置在相邻两道横隔板的跨中断面位置,纵缝应布置在相邻两道 U 肋的中间断面位置。

### 6.3 栓钉内力验算

**6.3.1** 在正常使用极限状态,应计算单个剪力连接件所承受的最大剪力,并确保该值不超过剪力连接件承载力的 75%。

**6.3.2** 计算栓钉内力时,应考虑整体荷载效应和局部荷载效应的叠加。其中局部荷载效应的计算更为复杂,宜建立有限元模型,栓钉宜以弹簧单元等方式进行模拟。计算中的车辆荷载应考虑刹车产生的水平力,车轮与桥面铺装层间的摩擦系数取为 0.5。

### 6.4 STC 抗裂验算

**6.4.1** 根据湖南大学的研究,当钢面板厚 12mm,STC 层厚度为 50mm,横桥向配筋(位于上层,净保护层厚 15mm)、纵桥向配筋(位于下层)直径为 10mm 时,各等级配筋 STC 的初裂强度如表 3.1.14 所示。研究结果同时表明,配筋 STC 的名义弯拉应力容许值同 STC 的保护层厚度、钢筋间距密切相关。根据已有的试验数据,若设计方案中 STC 的构造同试验试件的构造相同,即符合本规程第 3.1.14 条的有关规定,在正常使用极限状态下,当 STC 的最大拉应力不超过本规程表 3.1.14 规定的名义弯拉应力容

许值时，配筋 STC 不会出现受拉开裂，其抗裂性可以满足设计要求。

**6.4.2** STC 接缝的抗裂理念同 6.4.1。本条同样基于湖南大学开展的 STC 接缝足尺模型实验结果。

## **6.5 挠度验算**

**6.5.1** 本条规定了超高性能轻型组合结构桥梁的总体挠度计算方法；

**6.5.2** 本条规定了超高性能轻型组合桥面结构局部挠度的加载模式和限值，目的是确保桥面系的局部挠度不会过大，以减小在车载作用下，铺装层因局部变形过大而出现脱层等病害问题，同时也能确保行车的舒适性。

## 7 剪力连接件

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 超高性能轻型组合桥面结构中的 STC 层较薄，对剪力连接件进行设计时应充分考虑这一特性。

**7.1.2** 基于湖南大学的研究，本规程推荐的连接件形式是：短栓钉和焊接钢筋网。

**7.1.3** 本条规定了在正常使用极限状态下，单个剪力连接件的剪力限值。

### 7.2 抗剪承载力设计值

**7.2.1** 湖南大学对短栓钉进行了推出试验研究，结果表明，栓钉的破坏形式是钉身被整齐剪断，但 STC 层保持完好。因此，本条的栓钉承载力计算公式对应的破坏形态是栓钉被整齐剪断。

**7.2.2** 湖南大学对焊接水平钢筋网剪力连接件开展了推出试验，共包含 4 个试件，试验结果如表 1 所示。

表 1 试件参数及试验结果

试件 编号	抗剪钢筋直径 (纵/横, mm)	单侧抗剪钢筋 数量 (纵/横)	纵筋-钢面板焊缝 尺寸 (长/宽, mm)	试件抗剪承 载力 (kN)	破坏模式
1	10/10	2/2	50/15	950	(1) STC 层连同横向 抗剪钢筋拔出
2	12/10	2/2	50/15	1147	(2) 纵向抗剪钢筋- 钢面板焊缝剪断
3	12/10	2/2	50/15	950	(1) STC 层连同横向

					抗剪钢筋拔出
4	12/10	2/2	50/15	970	(1) STC 层连同横向 抗剪钢筋拔出

从上表可以看出，推出试件存在两种破坏模式：（1）STC 层连同横向抗剪钢筋拔出，（2）纵向抗剪钢筋-钢面板焊缝剪断，且前者的承载力小于后者。

当出现破坏模式（2）时，根据试件 2 的实测结果，可计算纵筋-钢面板焊缝（焊缝 1）的抗剪强度为： $1147000/8/(50 \times 15) = 191.2 \text{ MPa}$ 。由于试件数量有限，不能得到该抗剪强度值的统计规律，故假设纵筋-钢面板焊缝（焊缝 1）的材料分项系数为 1.6，则可取焊缝的抗剪强度设计值为  $f_{weld,1} = 191.1/1.6 = 120 \text{ MPa}$ 。

当出现破坏模式（1）时，试件的抗剪承载力稍低。此时试件的抗剪承载力主要由 STC 层-纵向抗剪钢筋间的粘结提供，而横向钢筋-纵向钢筋间点焊（焊缝 2）的贡献较小。因此，可以偏保守地，认为 STC 层-纵向钢筋间出现粘结破坏时，试件即破坏。基于此，可计算纵向抗剪钢筋-STC 层的粘结强度，如表 2 所示。

**表 2 破坏模式 2 的结果分析**

试件编号	试件抗剪承载力 (kN)	纵向抗剪钢筋数目	纵向抗剪钢筋直径 (mm)	纵向抗剪钢筋长度 (mm)	单根纵筋-STC 层接触面积 (mm <sup>2</sup> )	纵筋-STC 层粘结强度 (MPa)
1	950	4	10	400	12566.4	18.9
3	950	4	12	400	15079.6	15.7
4	970	4	12	400	15079.6	16.1
统计结果	平均值：16.9，标准方差：1.7，具有 95%置信度的特征值：14.1					

假设纵向抗剪钢筋-STC 层粘结的材料分项系数为 1.6，则可取粘结抗剪强度设计值为  $\tau_{stc-rebar} = 14.1/1.6 = 8.8 \text{ MPa}$ ，本规程取为 0.5 的倍数，即 8.5 MPa。

### 7.3 剪力连接件疲劳计算

**7.3.1~7.3.2** 剪力连接件的疲劳计算细则在本规程第 5.4 节中。

## 7.4 剪力连接件的数量计算与布置

**7.4.1** 一般而言,钢-混凝土组合结构中剪力连接件有两种设计方法:弹性设计法和塑性设计法。其中塑性设计法假设,当结构达到承载能力极限状态时,所有栓钉均应达到抗剪承载力,此时各栓钉的剪力趋于一致,该假设简化了计算过程,使得该方法应用更广泛。但是应用该方法的前提是,剪力连接件应具有良好的延性。例如,欧洲规范 4 规定,剪力连接件的特征相对滑移应不小于 6mm,其中特征相对滑移是取多组推出试件结果中极限相对滑移最小值的 0.9 倍。

根据项目组的推出试验结果,推出试件破坏时,埋在 STC 层中的剪力连接件的极限滑移量较小,对于短栓钉一般约为 0.7-1.8 mm,对于焊接水平钢筋网一般约为 0.25-0.6 mm,均小于 6mm,分析其原因主要是,STC 层厚度薄,且抗压强度高。文献 Kim 等 (2015) 也观测到了类似的现象,作者对埋在超高性能混凝土 (UHPC) 中的栓钉进行了推出试验,结果表明,栓钉的特征相对滑移平均在 4.36-5.16 mm 之间,同样小于 6 mm。

因此,本条建议采用弹性设计法来计算剪力连接件的布置数量,而不建议采用塑性设计法。对于一般的钢-混凝土组合桥梁,弹性设计法首先计算桥梁在荷载组合下的剪力分布,然后结合单个剪力连接件的抗剪承载力  $N_v^c$  来计算不同区域的剪力连接件数量。根据这一方法,桥梁在跨中区域和支座区域的剪力连接件布置密度可能会不同。对于本规程的超高性能轻型组合桥面结构,其受力不同于一般的钢-混凝土组合桥梁,主要由局部荷载控制。因此,本条建议根据局部计算结果来布置剪力连接件,并控制 STC 层底面在设计荷载下不会出现开裂。局部受力状态计算时,宜建立线弹性有限元模型。

对剪力连接件数量的计算应按承载能力极限状态考虑各种作用(或荷载),因此,计算中的作用(或荷载)的效应组合应采用现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的基本组合。

## 8 构造要求

**8.1.1** 目前国内外正交异性钢桥面板的设计中，钢面板厚度一般不小于 14mm。而对于超高性能轻型组合桥面结构，考虑到 STC 层对桥面系刚度的贡献，钢面板厚度可以较薄，故本条文中规定不小于 12mm。

**8.1.2** 根据湖南大学的研究，STC 层的横桥向受力更为不利，故本条文中规定将横桥向钢筋置于上层的作用。

**8.1.3** 栓钉的作用是确保 STC 层与钢板结合紧密，充分发挥组合板的作用。

**8.1.4** 本条规定了 STC 接缝的设置位置，原则上应该设置在低拉应力区，或者设置在压应力区。

**8.1.5** STC 层上表面的处理可根据需求和施工条件进行灵活处理。

## 9 施工

### 9.1 一般规定

**9.1.1~9.1.10** 本节规定了超高性能轻型组合桥面结构的施工步骤，以及施工要点。

### 9.2 施工准备

**9.2.1~9.2.5** 施工组织设计应科学、全面、具体，并对施工中可能出现的紧急情况有预案。

设备进场前，应检查并落实桥梁施工现场的供水、供电、供油情况，确保开工条件完备；设备进场后，在施工前应完成各施工设备的安装、调试工作，尤其是栓钉焊机、STC 搅拌机和摊铺机、振动梁等重要设备。

### 9.3 焊接栓钉

**9.3.1~9.3.7** 本节规定了焊接栓钉工序中的要点

考虑到 STC 层对钢面板的保护作用，防腐层可不必涂满整个钢面板表面，而在 STC 层摊铺施工单元四周一定范围内涂刷即可。

### 9.4 铺筑施工

**9.4.1~9.4.14** 本节规定了绑扎钢筋网、浇筑 STC 层、STC 层的高温蒸汽养护工序中的要点。

STC 的高温蒸汽养护中应确保养护环境中的温度和湿度符合要求。

## 9.5 特殊气候条件下施工

**9.5.1~9.5.2** 本节规定特殊气候条件下,超高性能轻型组合桥面结构层施工的注意事项。

## 10 检验与验收

### 10.1 一般规定

**10.1.1~10.1.5** 本节规定了超高性能轻型组合桥面结构检验和验收的总体原则。为积累经验，检验和验收中的原始记录资料应妥善存档。

### 10.2 进场检验

**10.2.1~10.2.5** 本节规定了原材料进场检验的内容。

采用干混料制备 STC 时，干混料的性能检验和容重及钢纤维体积率抽查是质量保证的基本措施，若发现不合格的产品，供货商应进行更换。

### 10.3 质量检验

**10.3.1~10.3.6** 本节规定了超高性能轻型组合桥面结构各工序的质量检验内容及指标。

栓钉的检验指标及实验规程应符合《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》（GB/T 10433）的规定，钢筋的检验指标及实验规程应符合现行《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》（GB1499.2）的规定。

超高性能轻型组合桥面结构质量检验贯穿施工中的每一道工序，即在施工过程中须对各道工序进行检验，确保质量合格后方可进入下一道工序。

### 10.4 质量验收

**10.4.1~10.4.3** 本节规定了超高性能轻型组合桥面结构验收的要点，监理方应按此执行。