

JTG

中华人民共和国行业标准

JTG ×××—20××

钢-高韧性混凝土轻型组合桥面结构 设计与施工规范

Specifications for Design and Construction of Steel-Super Toughness
Concrete Lightweight Composite Deck Structure

（征求意见稿）

2021-××-××发布

2021-××-××施行

中华人民共和国交通运输部发布

征求意见稿

中华人民共和国行业标准

钢-高韧性混凝土轻型组合桥面结构 设计与施工规范

Specifications for Design and Construction of Steel-Super
Toughness Concrete Lightweight Composite Deck Structure

(征求意见稿)

主编单位：湖南大学

批准部门：

实施日期日期：2021 年×月×日

XXX 出版社

征求意见稿

前 言

根据《交通运输部关于下达 2020 年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》（交公路函[2020] 471 号）的要求，由湖南大学作为主编单位承担《钢-高韧性混凝土轻型组合桥面结构设计与施工规范》的制订工作。

为总结国内已完成的钢-STC 轻型组合桥面结构工程经验，对 STC 原材料及性能等级，轻型组合桥面结构设计计算、施工、检验与验收等做出明确规定，形成轻型组合桥面结构设计与施工规范。

本规范共分为 6 章和 2 个附录，分别是：1 总则、2 术语与符号；3 材料、4 设计、5 施工、6 质量检验与验收；附录 A、附录 B 和附录 C。

本规范由 负责起草第 1 章， 负责起草第 2 章， 负责起草第 3 章， 负责起草第 4 章， 负责起草第 4 章， 负责起草第 5 章，负责起草第 6 章， 负责起草附录 A， 负责起草附录 B， 负责起草附录 C。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理者，联系人：曹君辉（地址：湖南省长沙市岳麓区湖南大学土木工程学院，邮编：410082；电话：15802536124；电子邮箱：caojunhui@hnu.edu.cn），以便修订时参考。

主 编 单 位： 湖南大学

参 编 单 位：

主 编： 邵旭东

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

征求意见稿

目次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	2
3	材料	7
3.1	STC 原材料	7
3.2	STC 混合料	9
3.3	钢材	12
3.4	黏结层材料	13
3.5	磨耗层材料	13
4	设计	14
4.1	一般规定	14
4.2	作用效应	15
4.3	强度计算	18
4.4	疲劳计算	20
4.5	STC 抗裂计算	22
4.6	变形计算	34
4.7	连接件计算	34
4.8	构造要求	37
5	施工	46
5.1	一般规定	46
5.2	施工准备	46
5.3	钢桥面处理	46
5.4	连接件焊接	47
5.5	钢筋网铺设和 Z 型钢板设置	48
5.6	STC 摊铺与养护施工	48
5.7	磨耗层施工	51
6	质量检验与验收	52
6.1	一般规定	52
6.2	进场检验	52
6.3	质量检验	53
	附录 A STC 用钢纤维性能检验方法	59

附录 B STC 试件的制作及试验方法.....	61
附录 C NC-STC 组合桥面结构.....	62
本规范用语用词说明.....	68

征求意见稿

1 总 则

1.0.1 为规范钢-高韧性混凝土（STC）轻型组合桥面结构的设计、施工、质量检验与验收，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于公路钢-高韧性混凝土（STC）轻型组合桥面结构。

1.0.3 公路钢-高韧性混凝土（STC）轻型组合桥面结构的设计、施工、质量检验与验收除应符合本规范规定外，尚应符合现行国家和行业标准的规定。

条文说明

正交异性钢桥面板在钢桥中应用广泛，但在长期运营中暴露出以下两类典型病害问题：（1）在高频重载行车作用下，钢桥面易疲劳开裂；（2）钢桥面沥青铺装频繁破损，翻修成本巨大。上述病害影响钢桥桥面系的耐久性和行车舒适性，甚至危及桥梁的安全性。

引起传统钢桥面系上述病害的根本原因是：钢桥面局部抗弯刚度较低，导致钢桥面和沥青铺装均处于高应力运营状态。为综合解决上述难题，本规范编制团队提出了钢-高韧性混凝土组合桥面结构。与传统钢桥面系相比，组合桥面结构具有以下优点：（1）提高桥面局部抗弯刚度 30 倍以上，大大降低钢桥面在车辆荷载作用下的疲劳应力，从而大幅延长钢桥面疲劳寿命；（2）将传统的钢桥面铺装转变为混凝土桥面铺装，降低铺装层的巨额维护成本。

经过多年的科研攻关，本规范编制团队探明了组合桥面结构的基本力学性能，掌握了设计、施工、质量检验与验收方法。目前组合桥面结构已推广应用于我国 100 多座实桥（竣工 60 多座），涵盖了梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥等基本桥型，既有旧钢桥桥面铺装翻修，也有新建钢桥桥面建设，为本规范编制积累了宝贵的经验。

本规范的编制以组合桥面结构研究和应用成果为基础，并以我国现行国家和行业标准为框架进行编制。此外，组合桥面结构的设计、施工、质量检验与验收尚应符合国家现行相关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 高韧性混凝土 super toughness concrete (STC)

由水泥、矿物掺合料、细集料、钢纤维（体积含量不低于 2.0%）、纳米二氧化硅或纳米碳酸钙、外加剂等材料，或由上述材料制成的干混料，加水拌和凝结硬化后形成的，抗弯拉强度在 22MPa 以上的高强高韧性水泥基复合材料，简称“STC”。

2.1.2 轻型组合桥面结构 lightweight composite deck structure

由正交异性钢桥面板和 STC 层通过连接件组合而成，组合桥面结构顶面宜设置磨耗层。

2.1.3 蒸汽养护 steam curing

浇筑的 STC 终凝后在 80~90℃蒸汽环境中持续养护 72 小时，或 90℃以上蒸汽环境中持续养护 48 小时后达到强度等级的养护过程。

2.2 符号

2.2.1 材料性能有关符号

STC22	——	抗弯拉强度标准值为 22 MPa 的高韧性混凝土；
α_c	——	STC 的温度线膨胀系数；
$\varepsilon_{\text{crack,d}}$	——	STC 的初裂应变设计值；
ε_{td}	——	STC 的极限拉应变设计值（不考虑配筋）；
E_s	——	钢材的弹性模量；
E_r	——	钢筋的弹性模量；
E_c	——	STC 的弹性模量；
f	——	钢筋、钢梁及 STC 的强度设计值或容许值；
f_{fk}	——	STC 抗弯拉强度标准值；
f_{fd}	——	STC 抗弯拉强度设计值；

$f_{cu,k}$	——	STC 立方体抗压强度标准值，试件边长 100mm；
f_{ck}	——	STC 轴心抗压强度标准值；
f_{cd}	——	STC 轴心抗压强度设计值；
f_{stud}	——	焊钉连接件的抗拉强度；
f_{td}	——	不配筋 STC 的轴拉强度设计值；
f_y	——	钢材的屈服强度；
$[f_{t,trans}^{serv}]$	——	配筋 STC 的横桥向名义抗裂强度容许值；
$[f_{t,longi}^{serv}]$	——	配筋 STC 的纵桥向名义抗裂强度容许值；
$[f_{t,trans}^{ulti}]$	——	配筋 STC 的横桥向名义抗拉强度容许值；
$[f_{t,longi}^{ulti}]$	——	配筋 STC 的纵桥向名义抗拉强度容许值；
$[f_{t,trans,joint}^{serv}]$	——	施工接缝处 STC 的横桥向名义抗裂强度容许值；
$[f_{t,longi,joint}^{serv}]$	——	施工接缝处 STC 的纵桥向名义抗裂强度容许值；
$[f_{t,trans,joint}^{ulti}]$	——	施工接缝处 STC 的横桥向名义抗拉强度容许值；
$[f_{t,longi,joint}^{ulti}]$	——	施工接缝处 STC 的纵桥向名义抗拉强度容许值；
τ_{wud}	——	焊接钢筋网连接件中，纵向钢筋-钢板连接焊缝抗剪强度设计值；
τ_{cud}	——	焊接钢筋网连接件中，纵筋与 STC 间的黏结强度设计值；
μ_c	——	STC 的泊松比；
k	——	连接件的抗剪刚度；
$W_{eff,i}$	——	不同应力计算阶段，钢梁或组合梁的抗弯模量。
$f_{cd,nc}$	——	普通混凝土抗压强度设计值；
$f_{yd,nc}$	——	NC 层中钢筋屈服强度设计值；
$f_{yd,c}$	——	STC 层中钢筋的屈服强度设计值；

2.2.2 作用和作用效应有关符号

$M_{d,i}$	——	对应不同应力计算阶段，作用于钢梁或组合梁的弯矩设计值；
M_{sc}	——	抗裂计算中，受压区钢板所承担的弯矩；
M_{st}	——	抗裂计算中，受拉区钢结构所承担的弯矩；
M_{cc}	——	抗裂计算中，受压区 STC 所承担的弯矩；
M_{ct}	——	抗裂计算中，受拉区 STC 所承担的弯矩；
M_{sr}	——	抗裂计算中，钢筋所承担的弯矩；
M_{load}	——	抗裂计算中，外荷载引起的截面弯矩；
N_{sc}	——	抗裂计算中，受压区钢板所承担的轴力；
N_{st}	——	抗裂计算中，受拉区钢结构所承担的轴力；
N_{cc}	——	抗裂计算中，受压区 STC 所承担的轴力；

N_{ct}	——	抗裂计算中，受拉区 STC 所承担的轴力；
N_{sr}	——	抗裂计算中，钢筋所承担的轴力；
N_{load}	——	外荷载引起的轴力；
V_{sd}	——	正常使用极限状态下的连接件剪力设计值；
V_d	——	承载能力极限状态下的连接件剪力设计值；
V_u	——	连接件的抗剪承载力设计值；
$V_{0.025mm}$	——	焊接钢筋网连接件荷载-滑移曲线对应 0.025mm 滑移时的荷载；
σ_{global}	——	整体受力状态下的正应力；
σ_{local}	——	局部受力状态下的正应力；
σ	——	组合桥面结构考虑整体和局部叠加后的正应力；
σ_{ss}	——	按作用（或荷载）频遇组合计算的 STC 层中钢筋拉应力；
S_{max}	——	正常使用极限状态下结合面的最大滑移值；
S	——	连接件荷载-滑移曲线中的特征滑移值；
S_{lim}	——	正常使用极限状态下结合面的滑移限值；
T_1	——	温度梯度效应计算中，STC 层顶面的温度；
T_2	——	温度梯度效应计算中，STC 层底面的温度；
w_{smax}	——	STC 表面的最大裂缝宽度；
$M_{R,D}$	——	NC-STC 组合结构受弯时的疲劳弯矩；
M_{Rd}	——	NC-STC 组合结构抗弯承载力设计值。

2.2.3 几何参数有关符号

A_{sc}	——	焊钉连接件钉杆横截面面积；
A_t	——	抗裂计算中，受拉区钢筋截面面积；
A_{te}	——	抗裂计算中，有效受拉 STC 截面面积；
b_c	——	抗裂计算中，STC 层的宽度；
b'_c	——	抗裂计算中，换算截面 STC 层的宽度；
b_t	——	抗裂计算中，截面顶部钢板宽度；
b_f	——	抗裂计算中，截面腹板厚度；
b_l	——	抗裂计算中，纵肋下翼缘宽度；
c_s	——	STC 层受拉钢筋外边缘至受拉侧表面的距离；
d_s	——	抗裂计算中，验算方向上（纵桥向或横桥向）受拉区钢筋直径；
ϕ	——	抗裂计算中，截面弯曲曲率；
d_r	——	钢筋的公称直径；
h_f	——	抗裂计算中，截面腹板高度；

h_l	——	抗裂计算中，截面下翼缘厚度；
h_t	——	抗裂计算中，钢面板厚度；
h_i	——	抗裂计算中，受拉钢筋重心位置至受拉 STC 上表面的距离；
h_y	——	抗裂计算中，受压钢板屈服高度；
h_{yt}	——	STC 比例极限拉应变高度；
h_s	——	计算模型中纵向钢筋形心到 STC 上表面距离（mm）；
h_{yt}	——	STC 比例极限拉应变高度；
h_{td}	——	抗裂计算中，受拉区未开裂的 STC 高度；
H	——	组合梁截面高度；
d_{wc}	——	焊钉根部焊缝的直径；
l_w	——	焊接钢筋网连接件中，纵筋-钢面板连接焊缝的长度；
l_{wc}	——	焊钉根部焊缝的高度；
l_c	——	焊接钢筋网连接件中，纵向钢筋黏结长度；
h_c	——	STC 层的厚度；
h_w	——	焊接钢筋网连接件中，纵筋-钢面板连接焊缝的焊脚尺寸；
y_0	——	抗裂计算中，受拉 STC 上表面到中性轴的距离；
y_t	——	抗裂计算中，中性轴到钢板底面的距离。
b_w	——	NC 层宽度或腹板厚度；
x	——	受压区高度；
$y_{s,nc}$	——	NC 层中受拉钢筋高度；
y_c	——	STC 层高度；
$y_{s,c}$	——	STC 层中钢筋高度；
A_{nc}	——	NC 层截面面积；
$A_{s,nc}$	——	NC 层受拉钢筋的截面面积；
A_{sc}	——	STC 层中钢筋的截面面积；
$A_{sw,nc}$	——	NC 层竖向抗剪钢筋的截面面积；
A_c	——	STC 层的截面面积。

2.2.4 计算系数及其他有关符号

α_{cr}	——	抗裂计算中，构件受力特征系数；
α_c	——	NC 层中弯矩和剪力共同作用下产生的斜裂缝倾角，其取值范围： $20^\circ \leq \alpha_c \leq 60^\circ$ （初步设计时， α_c 可取 35° ）；
β_{bc}	——	STC 的徐变系数终值；
$\varphi_b(t, t_0)$	——	加载龄期为 t_0 ，计算考虑龄期为 t 时的 STC 徐变系数；

$\phi_{c\infty}(t_{\infty}, t_0)$	——	STC 的终期徐变系数（具体数值可经试验测定），若无实验数据，自然养护下可取 0.8，蒸养下可取 0.2。
ζ_c	——	组合结构中 STC 层约束度；
$\sigma_{ce,max}$	——	完全约束状态下 STC 的约束应力；
$\varepsilon_{cs,\infty}$	——	STC 材料的终期收缩应变，自然养护下可取 0.6-0.95‰（具体数值需经试验测定），蒸压养护下可取 0；
ψ	——	裂缝间受拉钢筋应变不均匀系数；
γ_0	——	桥梁结构重要性系数；
γ_v	——	焊钉连接件的抗力分项系数；
η	——	焊缝尺寸对焊钉抗剪强度的贡献系数；
n_s	——	钢材与 STC 的弹性模量之比
t	——	计算考虑时刻的 STC 龄期；
t_0	——	加载时的 STC 龄期；
ρ_{te}	——	抗裂计算中，按有效受拉 STC 截面面积计算的受拉钢筋配筋率。

3 材料

3.1 STC 原材料

3.1.1 水泥宜采用不低于 42.5 级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，并符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》（GB 175）的规定。

条文说明

STC 是一种经过改性和强化的超高性能混凝土，专用于正交异性钢桥面板。与常规超高性能混凝土相比，STC 通过掺入纳米材料提高基体的致密性和抗裂性，通过掺入混杂钢纤维实现协同增韧，通过重配筋阻滞裂缝发展，从而大幅提高材料的抗裂强度；同时，结合蒸汽养护工艺，水化物在养护期间迅速致密，使得 STC 的收缩在养护期间基本完成，从而消除了钢桥面中 STC 层的收缩开裂风险。因此，STC 克服了传统超高性能混凝土抗裂强度低、易收缩开裂等不足，是正交异性钢桥面板专用的超高性能混凝土。

STC 是我国为根治常规钢桥面系病害问题而自主研发的一种超高性能混凝土，为了与常规超高性能混凝土区分，并体现该材料高抗裂性能等优点，本规范将这种材料称为“高韧性混凝土（STC）”。

STC 的水胶比较低，一般为 0.16~0.22，其中凝胶材料包括水泥和矿物掺合料。

3.1.2 矿物掺合料宜采用 I 级粉煤灰、S95 等级以上的粒化高炉矿渣粉、二氧化硅含量不低于 90% 的硅灰等材料，且应符合现行国家标准《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）的规定。当采用其它矿物掺合料时，应通过试验进行验证。

3.1.3 细集料宜为石英砂，性能指标应符合表 3.1.3 的规定。

表 3.1.3 石英砂的技术指标（单位%）

项目	技术指标
二氧化硅含量	≥97

氯离子含量	≤0.02
硫化物及硫酸盐含量	≤0.50
云母含量	≤0.50

3.1.4 石英砂和石英粉的筛分试验和粒径应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387) 的规定。

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

3.1.6 掺用改善拌和物和 STC 性能的其它外加剂时, 其性能应符合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。

3.1.7 钢纤维应采用高强度钢纤维(可镀铜), 其性能指标应符合表 3.1.7 的规定。钢纤维的性能检验应符合本规范附录 A 的规定。

表 3.1.7 钢纤维的性能指标

项目	性能指标
抗拉强度 (MPa)	≥2000
长度合格率 (12 mm~14mm 或 7mm~8mm 纤维比例) (%) ¹	≥96
直径合格率 (0.18 mm~0.22mm 或 0.12mm~0.14mm 纤维比例) (%) ²	≥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 7mm~8mm 范围内;

2. 50 根试样的直径平均值应在 0.18mm~0.22mm 或 0.12mm~0.14mm 范围内。

3.1.8 纳米碳酸钙 (CaCO₃) 的性能指标应符合表 3.1.8 的规定。

表 3.1.8 纳米碳酸钙的性能指标

项目	性能指标
CaCO ₃ 含量	>90%
平均粒径	60nm

3.1.9 纳米二氧化硅 (SiO₂) 的性能指标应符合表 3.1.9 的规定。

表 3.1.9 纳米二氧化硅的性能指标

项目	性能指标
SiO ₂ 含量 (%)	>99.9
平均粒径 (nm)	10

比表面积（ cm^2/g ）	6.45×10^6
氯离子含量（%）	<0.028

3.1.10 拌和用水应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）的规定。

3.2 STC 混合料

3.2.1 STC 的强度等级、抗弯拉强度、抗压强度标准值和设计值应符合表 3.2.1 的规定。

表 3.2.1 STC 强度等级

强度等级	抗弯拉强度/MPa		抗压强度/MPa		
	标准值 f_{tk}	设计值 f_{td}	立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$	轴心抗压强度标准值 f_{ck}	轴心抗压强度设计值 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

条文说明

本条中， $f_{td} = f_{tk} / 1.45$ ， $f_{cd} = f_{ck} / 1.45$ ，其中 1.45 为 STC 的材料性能分项系数； $f_{ck} = f_{cu,k} / 1.55$ ，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。

3.2.2 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} 宜分别取 7 MPa、8 MPa、9 MPa，极限拉应变设计值 ε_{td} 宜取 $2000 \mu\varepsilon$ 。初裂应变设计值 $\varepsilon_{crack,d}$ 应根据轴拉应力强度设计值 f_{td} 和本规范第 3.2.3 条规定的 STC 的弹性模量 E_c 计算确定（图 3.2.2）。

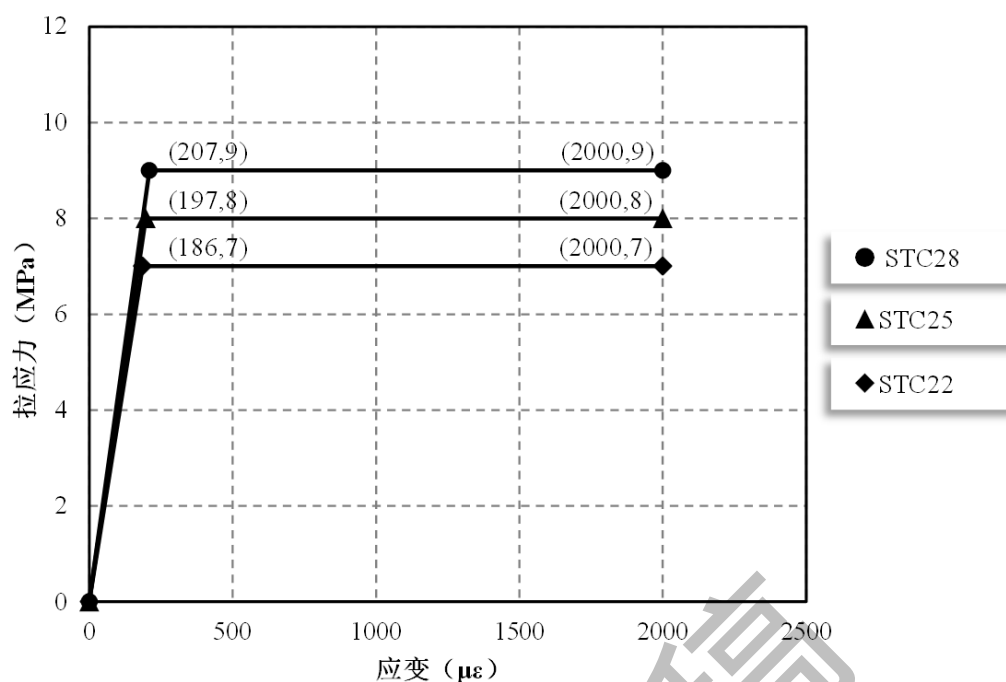


图 3.2.2 STC 的轴拉应力-应变曲线

条文说明

编制团队对多组不配筋的 STC 试件开展了轴心抗拉试验研究，结果表明：STC 在轴拉荷载下具有应变硬化特性，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。利用这一优越性能，在 STC 内密布钢筋可充分发挥钢筋的抗裂效应，有效限制裂缝宽度的发展。

3.2.3 STC 的弹性模量 E_c 应按现行国家标准《活性粉末混凝土》（GB/T 31387）的规定通过试验确定，当无相关试验资料时，可参考表 3.2.3 的规定。

表 3.2.3 不同强度等级 STC 的弹性模量 E_c (GPa)

STC 强度等级	STC22	STC25	STC28
弹性模量	37.6	40.7	43.5

条文说明

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）的相关研究。根据该文献，当无试验结果时，可按公式 3.2.3 计算取值：

$$E_c = 3435.6 \sqrt{f_{cu, k}} \quad (3.2.3)$$

式中： E_c —— STC 的抗压/抗拉弹性模量(MPa);

$f_{cu,k}$ —— STC 的立方体抗压强度标准值(MPa)。

将表 3.2.1 所示不同强度等级 STC 的立方体抗压强度标准值代入公式(3.2.3) 可得 STC 的抗压/抗拉弹性模量，具体如表 3.2.3 所示。

3.2.4 STC 的剪切变形模量 G_c 可按表 3.2.3 中 E_c 值的 0.4 倍采用，STC 的泊松比 μ_c 可取为 0.2。

条文说明

STC 剪切变形模量的计算公式参考了我国现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定。

3.2.5 STC 的温度线膨胀系数 α_c 可取为 $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

条文说明

温度线膨胀系数的取值参考了法国超高性能混凝土规范（《National Addition to Eurocode2 – Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-HighPerformance Fibre-Reinforced Concrete(UHPFRC)》(NFP 18-710,2016)）的有关规定。

3.2.6 STC 宜采用蒸汽养护，养护结束后，收缩应变和徐变系数终值可参考表 3.2.6 的规定。

表 3.2.6 STC 的收缩应变和徐变系数终值

养护条件	收缩应变（ $\mu\epsilon$ ）	徐变系数
蒸汽养护	0	0.2

条文说明

组合桥面结构中 STC 层的收缩变形受到钢板和钢筋的强力约束。根据 2013 版法国 UHPC 技术规程《Ultra High Performance Fibre-Reinforced Recommendations》(AFGC)，若不采用蒸汽养护，超高性能混凝土在 28 天龄期完成收缩仅约 60-70%，而收缩全部完成需要大约 30 年。这意味着在钢桥面的强力约束下，STC 的收缩应力将长期存在并不断发展，在运营中存在较高的收缩开

裂风险。根据编制团队的研究,采用蒸汽养护后,钢桥面上 STC 的收缩应变一般不超过 $80\mu\varepsilon$,由此产生的收缩应力较小。因此,本规范规定,用于正交异性钢桥面的 STC 应采用蒸汽养护,以确保 STC 的收缩在养护阶段基本完成,从而消除其收缩开裂风险。

蒸汽养护能够显著降低 STC 的徐变,徐变系数终值的取值参考了法国规范《National Addition to Eurocode2 – Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-HighPerformance Fibre-Reinforced Concrete(UHPFRC)》(NFP 18-710,2016)的有关规定。

3.2.7 钢筋在 STC 中的锚固长度取值应符合下列规定:当钢筋达到其极限强度时,锚固长度为 $10d_r$,其中 d_r 为钢筋的公称直径。

条文说明

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)的相关研究成果:当钢筋达到其极限强度时,锚固长度不应小于 $9d_r$ 。为便于取值,本规范取 $10d_r$ 。

3.2.8 STC 的抗氯离子渗透性应不大于 100C(电通量法),吸水孔隙率应不大于 9.0%。

条文说明

STC 的抗氯离子渗透指标参考了《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)的相关规定;吸水孔隙率指标则参考了法国规范《Concrete — Ultra-high performance fibre-reinforced concrete — Specifications, performance, production and conformity》(NF P 18-470)的相关规定。

3.3 钢材

3.3.1 焊钉连接件的材料性能应符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》(GB/T 10433)的规定。

3.3.2 STC 中的普通钢筋宜选用 HRB400 或 HRB500 钢筋，钢筋的材料性能设计指标应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定取用。

3.3.3 STC 强化接缝处 Z 型钢板的材料性能应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定。

3.4 黏结层材料

3.4.1 黏结层材料宜采用高黏高弹沥青、环氧沥青黏结剂、改性环氧树脂黏结剂，主要性能指标及要求应符合表 3.4.1 的规定。

表 3.4.1 黏结层养护固化后主要技术指标及要求

序号	项目		技术要求	
			I 型（高黏高弹沥青、环氧沥青黏结剂）	II 型（改性环氧树脂黏结剂）
1	复合试件剪切强度 (MPa)	25°C	≥0.8	≥1.6
		60°C	≥0.4	≥0.8
2	附着力拉拔强度（与 STC） (MPa)	25°C	≥1.0	≥2.0
		60°C	≥0.3	≥0.8
3	抗冻性	-20°C~20°C 冻融循环	20 次不开裂	
4	耐腐蚀性（20°C）	Ca(OH) ₂ 中浸泡 15d	无异常	
		3% 盐水浸泡 15d	无异常	
5	抗硌破	轮碾机碾压 30 次	不穿孔	

注：附着力拉拔试验可采用圆形拉拔头(直径 50mm) 或正方形拉拔头(边长 50mm)。

3.5 磨耗层材料

3.5.1 磨耗层材料性能应符合现行行业标准《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》（JTG/T 3364-02）的规定。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 组合桥面结构应根据建设条件、结构受力性能等因素，确定合理的结构形式、截面构造等。

4.1.2 组合桥面结构应按持久状况承载能力极限状态，进行承载能力计算，其作用（或荷载）组合应采用基本组合，结构材料性能应采用其强度设计值。

4.1.3 组合桥面结构的持久状况设计应按正常使用极限状态的要求进行计算，裂缝宽度验算的作用（或荷载）组合应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）取用，挠度和连接件滑移验算的作用（或荷载）组合应按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）取用。

4.1.4 组合桥面结构应进行疲劳计算，计算中仅考虑疲劳荷载。

4.1.5 组合桥面结构的计算应按第一、第二和第三体系考虑，并对计算结果进行线性叠加。

1 第一体系：组合桥面结构作为钢主梁全截面的上翼缘，承受整体荷载，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支撑在主梁腹板、横隔板上的桥面板，承受车辆局部荷载，称为“桥面体系”。

3 第三体系：STC 层与钢面板共同形成支撑在桥面纵向加劲肋上的连续组合板，板体承受车轮的局部荷载，称为“面板体系”。

其中，第一体系按整体受力计算、第二和第三体系按局部受力计算。

4.1.6 整体受力应按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》

(JTG/T D64-01) 的规定进行计算。

4.1.7 局部受力应建立节段有限元模型进行计算，应选用适宜的单元类型及网格尺寸。

4.1.8 磨耗层设计和计算应符合《公路沥青路面设计规范》(JTG D50) 的规定。

条文说明

组合桥面结构受力复杂，且局部受力突出，因而计算应该分为整体计算和局部计算两方面，以全面反映组合桥面结构的受力状态。

在设计中，第一体系按整体受力计算，而第二和第三体系则一般按局部受力计算。对于组合桥面结构的纵桥向应力或变形，应考虑整体和局部计算结果的代数叠加，而对于横桥向应力或变形，仅需考虑局部受力计算结果。

整体建模时，模型宜以梁单元或桁架单元为主；局部建模时，钢梁宜采用板壳单元，STC 层宜采用实体单元，连接件宜采用弹簧单元，建模时应注意钢桥面疲劳细节附近的网格划分加密。

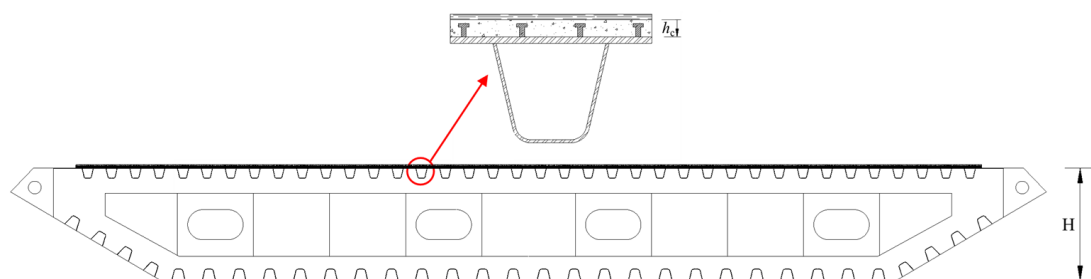
4.2 作用效应

4.2.1 组合桥面结构的作用效应计算应符合下列规定：

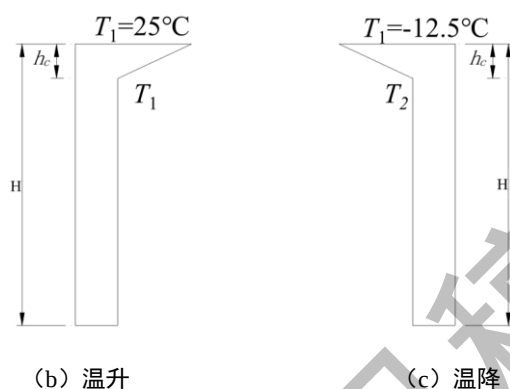
- 1 应按弹性方法进行计算。
- 2 当计算桥梁的整体受力时，组合桥面结构作用效应计算可不计入正交异性钢桥面板和 STC 层间的滑移效应；当计算桥面局部受力时，应计入两者间的滑移效应。

4.2.2 组合桥面结构温度效应的计算应符合下列规定：

- 1 组合桥面结构的整体温度效应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 的规定计算。
- 2 组合桥面结构的温度梯度效应计算应按图 4.2.2 所示的竖向温度梯度分布形式计算，温度梯度的取值应按式 (4.2.2) 计算。



(a) 横断面示意



(b) 温升

(c) 温降

图 4.2.1 温度梯度计算图示

h_c —STC 层厚度； H —组合截面全高

1) 温升时， T_2 按照下式计算：

$$T_2 = 25 - \frac{25 - 6.7}{100} h_c \quad (4.2.2-1)$$

式中： h_c ——STC 层的厚度（mm）。

2) 温降时， T_2 按照下式计算：

$$T_2 = -12.5 - \frac{-12.5 + 3.3}{100} h_c \quad (4.2.2-2)$$

条文说明

组合桥面结构的温度梯度效应计算参考了我国现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的规定。根据该规范，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。

本规范组合桥面结构中的 STC 层较薄，其厚度远小于 100mm，因此，对于

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。由于 STC 层顶面的磨耗层厚度同样较薄，计算中偏保守地忽略了磨耗层的有利影响，即按纯混凝土桥面板温度梯度的计算方式考虑 STC 的温度梯度。以 50mm 厚的 STC 为例，其温度梯度的分布如图 4.2.1 所示。

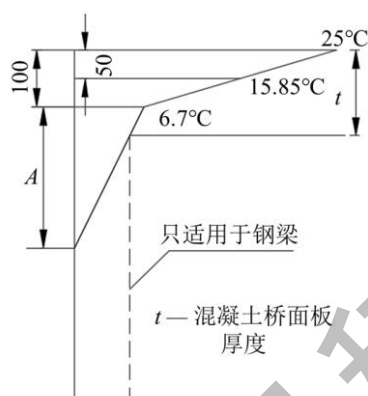


图 4.2.1 STC 温度梯度计算示意（以升温为例）

在前期研究中，本规范编制团队对钢-STC 组合桥面结构的温度梯度取值进行了计算分析，验证了这一取值方式的合理性及适用性。本条文仅以钢箱梁示意了温度梯度的分布，对于其他形式的钢梁，该计算方法同样适用。

4.2.3 STC 蒸汽养护完成之后的收缩应变为 0，无需计算收缩应力。

条文说明

蒸汽养护后 STC 的收缩基本消除，因此，计算中无需考虑 STC 收缩引起的次应力。

4.2.4 STC 徐变效应计算可假定徐变与 STC 应力呈线性关系。当缺乏符合当地实际条件的数据和计算方法时，按下列规定计算。

蒸汽养护结束后，STC 的徐变系数随时间的发展可按式（4.3.4-1）计算：

$$\varphi_b(t, t_0) = \beta_{bc} \frac{\sqrt{t - t_0}}{\sqrt{t - t_0} + 10} \quad (4.3.4-1)$$

式中： $\varphi_b(t, t_0)$ —— 蒸汽养护结束后，加载龄期为 t_0 ，计算考虑龄期为 t 时的 STC 徐变系数；

- β_{bc} —— STC 的徐变系数终值，按表 3.2.6 采用；
- t —— 计算考虑时刻的 STC 龄期，从蒸汽养护结束开始计算（天）；
- t_0 —— 加载时的 STC 龄期，从蒸汽养护结束开始计算（天）。

条文说明

STC 徐变系数计算公式参考了法国规范《National Addition to Eurocode2 – Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-HighPerformance Fibre-Reinforced Concrete(UHPFRC)》(NFP 18-710,2016)的规定。

4.3 强度计算

4.3.1 强度计算中，整体和局部受力计算荷载均应按《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的规定取用。

4.3.2 组合桥面结构抗弯承载力验算应符合下列规定：

1 整体受力状态下的正应力应采用线弹性方法，按公式（4.3.2-1）计算：

$$\sigma_{\text{global}} = \sum_{i=1}^{\text{II}} \frac{M_{d,i}}{W_{\text{eff},i}} \quad (4.3.2-1)$$

式中： σ_{global} —— 整体受力状态下的正应力（MPa）；

i —— 变量，表示不同的应力计算阶段，其中， $i=I$ 表示未形成组合桥面结构的应力计算阶段； $i=II$ 表示形成组合桥面结构之后的应力计算阶段；

$M_{d,i}$ —— 对应不同应力计算阶段，作用于钢梁或组合梁的弯矩设计值（N·mm）；

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

2 局部受力状态下的正应力 σ_{local} 应采用线弹性方法，进行有限元计算。

3 应按公式（4.3.2-2）计算考虑整体和局部叠加后的正应力。

$$\sigma = \sigma_{\text{global}} + \sigma_{\text{local}} \quad (4.3.2-2)$$

式中： σ —— 组合桥面结构相应计算方向上考虑整体和局部叠加后的正应力（MPa）。

4 应按公式（4.3.2-3）验算抗弯承载力：

$$\gamma_0\sigma\leq f$$

(4.3.2-3)

式中： σ —— 组合桥面结构相应计算方向上考虑整体和局部叠加效应后的正应力(MPa)；

f —— 钢筋、钢梁及 STC 的强度设计值或容许值 (MPa)，其中 STC 轴心抗压强度设计值按表 3.2.1 采用、极限抗拉强度容许值按表 4.5.4-2 采用，钢筋和钢梁的强度设计值分别按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)、《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64) 的规定取值；

γ_0 —— 桥涵结构重要性系数，应按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 规定的结构设计安全等级采用，对应于设计安全等级为一级、二级、三级的桥涵结构，分别取 1.1、1.0、0.9。

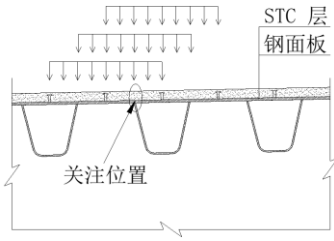
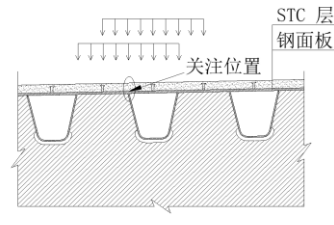
条文说明

组合桥面结构的抗弯承载力验算参考了现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01) 的规定，其中，对于 STC 应注意其强度采用“名义抗拉极限强度容许值”。

其中对于局部受力状态计算，负弯矩区 STC 的主要关注区域可参考 4.3.1 采用。

表 4.3.1 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

4.4 疲劳计算

4.4.1 组合桥面结构的疲劳计算应符合下列规定：

- 1 正交异性钢桥面板、连接件、STC 层应进行疲劳验算。
- 2 组合桥面结构疲劳验算应采用弹性分析方法计算。

条文说明

在长期运营中，组合桥面结构所承受的主要荷载是车辆荷载的反复作用，因此，疲劳验算是组合桥面结构设计的重要内容。

4.4.2 组合桥面结构疲劳可按名义应力法计算。

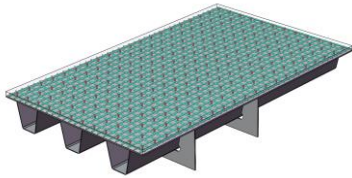
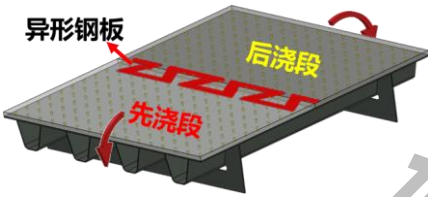
条文说明

本条与现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的基本原则保持一致，但对于受力复杂的疲劳细节，若难以采用名义应力法进行疲劳评估，宜采用热点应力法。

4.4.3 疲劳荷载的选取应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定。

4.4.4 STC 层的抗裂疲劳强度取值应符合表 4.4.4 的规定。

表 4.4.4 STC 层的疲劳细节及分类

疲劳强度(MPa)	细节位置及示意图	细节描述和施工要求
$0.70[f_{t,trans}^{serv}]$ —横桥向 $0.70[f_{t,longi}^{serv}]$ —纵桥向	STC 层连续区域 	STC 层连续浇筑。
$0.70[f_{t,trans,joint}^{serv}]$ —横桥向 $0.70[f_{t,longi,joint}^{serv}]$ —纵桥向	STC 施工接缝区域 	先浇-后浇交界区域, 设置 STC 施工接缝

条文说明

编制团队对钢-STC 组合梁开展了负弯矩作用下的抗弯疲劳试验, 试验中控制 STC 层的弯拉应力幅为 21.3MPa, 试验结果表明, 当经历 310 万次疲劳应力循环后, STC 层未出现任何疲劳开裂现象, 此时试件中的钢梁已严重疲劳开裂。该试验中的 STC 材料等级为 STC25, 根据本规范第 4.5.4 条, 当配筋间距为 30mm 时, STC 层的横桥向名义抗裂强度容许值为 20.1 MPa, 根据第 4.4.4 条, 疲劳强度则为 $0.7 \times 20.1 = 14.07$ MPa。根据 Miner 准则, 偏保守取 STC 的 S-N 曲线斜率为 $m=3$, 则可得在该疲劳强度下, STC 的疲劳寿命将超过 $310 \times (21.3/14.07)^3 = 1075$ 万次, 超过了桥面结构的疲劳极限循环次数 (一般为 1000 万次), 因此, 理论上 STC 具有无限疲劳寿命。

本条文中系数 0.7 来源于瑞士洛桑理工大学 Tohru Makita 和 Eugen Brühwiler 对超高性能混凝土开展的轴拉疲劳试验研究成果 (《Tensile Fatigue Behaviour of Ultra-High Performance fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) 》, Materials and Structures, 2014)。研究表明, 超高性能混凝土的疲劳极限约为 $0.70f_t$, f_t 为超高性能混凝土的抗拉弹性强度, 该研究中对疲劳极限的定义为 1000 万次。由于 STC 中密配钢筋, 当裂缝宽度达到 0.05mm 时, 仍处于裂缝扩展阶段的初始阶段。因此, 本条结合上述研究成果, 定义 STC 在 1000 万次疲劳寿命下的疲劳强度为 0.7 倍名义抗裂强度容许值, 能够确保工程结构安全。

4.4.5 正交异性钢桥面板、焊钉以及焊接钢筋网连接件的疲劳强度应按现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定取用。

条文说明

对于焊接钢筋网连接件，因焊缝主要承受剪应力幅，可参考《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）对角焊缝抗剪疲劳细节的规定，200 万次疲劳强度取为 80MPa，S-N 曲线斜率取为 $m=5$ 。

4.5 STC 抗裂计算

4.5.1 负弯矩抗裂计算

在正常使用极限状态下，组合桥面结构负弯矩区 STC 层表面的最大裂缝宽度按式（4.5.1-1）~（4.5.1-3）计算：

$$w_{\text{smax}} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{ss}}}{E_{\text{r}}} (1.06c_{\text{s}} + 0.152 \frac{d_{\text{s}}}{\rho_{\text{te}}}) \frac{y_0 - h_{\text{td}}}{y_0 - h_{\text{td}} - h_{\text{r}}} \quad (4.5.1-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.12 \frac{f_{\text{td}}}{\rho_{\text{te}} \sigma_{\text{ss}}} \quad (4.5.1-2)$$

$$\rho_{\text{te}} = \frac{A_{\text{r}}}{A_{\text{te}}} \quad (4.5.1-3)$$

式中：

- w_{smax} —— STC 表面的最大裂缝宽度（mm）；
- α_{cr} —— 构件受力特征系数，按表 4.5.1 采用；
- ψ —— 裂缝间受拉钢筋应变不均匀系数：当 $\psi < 0.2$ 时，取 $\psi = 0.2$ ；
当 $\psi > 1.0$ 时，取 $\psi = 1.0$
- σ_{ss} —— 按作用（或荷载）频遇组合计算的 STC 层中钢筋拉应力（MPa）；
- E_{r} —— 钢筋的弹性模量（MPa）；
- c_{s} —— 验算方向上（纵桥向或横桥向），STC 层受拉钢筋外边缘至受拉侧表面的距离（mm）；
- ρ_{te} —— 按有效受拉 STC 截面面积计算的受拉钢筋配筋率；
- A_{r} —— 受拉区钢筋截面面积（mm²）；
- A_{te} —— 有效受拉 STC 截面面积（mm²），纵桥向 STC 层按轴心受拉构件计算，取计算模型中 STC 层截面面积 $A_{\text{te}} = b_{\text{c}} h_{\text{c}}$ ，横桥向 STC 层按偏心受拉构件计算，取 $A_{\text{te}} = 0.5b_{\text{c}} h_{\text{c}}$ ， b_{c} 、

- h_c 分别为计算模型中 STC 层的宽度和厚度；
- d_s —— 验算方向上（纵桥向或横桥向），受拉区钢筋直径（mm）；
- f_{td} —— 不配筋 STC 的轴拉强度设计值（MPa）；
- y_0 —— 受拉 STC 上表面到中性轴的距离（mm）；
- h_{td} —— 受拉区未开裂的 STC 高度，即拉应力在 0 到 f_{td} 之间的高度（mm）；
- h_t —— 受拉钢筋重心位置至受拉 STC 上表面的距离（mm）。

表 4.5.1 构件受力特征系数

类型	α_{cr}
横桥向	1.6
纵桥向	1.8

条文说明

根据钢-STC 组合桥面结构试验数据，对平均裂缝间距和钢筋应变进行统计和分析，并结合《混凝土结构设计规范》（GB50010）中裂缝宽度计算公式，对平均裂缝间距计算公式和钢筋应变不均匀系数计算公式进行了修正，建立了钢-STC 轻型组合结构最大裂缝宽度公式，公式的保证率达到 95%。

与《混凝土结构设计规范》（GB50010）裂缝宽度计算公式相比，本计算公式具有以下特点：

- （1）根据实测数据拟合修正了平均裂缝间距计算公式；
- （2）根据实测数据提出了考虑 STC 应变硬化受力特征的钢筋拉应力计算方法；
- （3）考虑到组合桥面结构中的 STC 层主要承受活载，计算公式中未考虑长期作用影响；
- （4）横桥向按偏心受拉构件计算、纵桥向按轴心受拉构件计算，构件受力特征系数与《混凝土结构设计规范》（GB50010）相同。

对于正常使用极限状态，无论是纵桥向还是横桥向，组合桥面结构中 STC 层表面的最大裂缝宽度均控制为 0.05mm，结合此定义和本条计算公式，可计算得到表 4.5.4-1 的 STC 名义抗裂强度容许值。

对于承载能力极限状态，根据试验研究，分别以 STC 表面最大裂缝宽度达到 0.2mm 和 0.08mm 作为组合桥面结构沿横桥向、纵桥向达到承载能力极限状

态的标志，结合此定义和本条公式，可计算得到表 4.5.4-2 的 STC 名义抗拉极限强度容许值。

4.5.2 由作用（或荷载）频遇组合效应引起的 STC 层中受拉钢筋拉应力 σ_{ss} 应按以下步骤计算：

1 横桥向 STC 层中受拉钢筋应力计算

横桥向 STC 层中受拉钢筋应力计算见图 4.5.2-1 和公式 4.5.2。

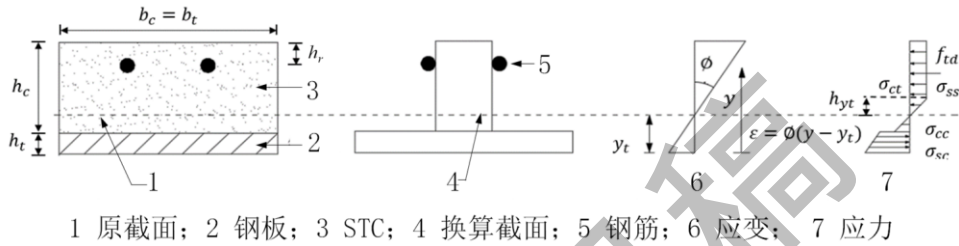


图 4.5.2-1 横桥向受力模型中钢筋应力计算示意图

1) 假设中性轴位于 STC 层内，外荷载作用下裂后截面内力和弯矩平衡方程如式（4.5.2-1）所示：

$$\begin{aligned} N_{sr} + N_{ct} + N_{cc} + N_{sc} &= 0 \\ M_{sr} + M_{ct} + M_{cc} + M_{sc} - M_{load} &= 0 \end{aligned} \quad (4.5.2-1)$$

式中： N_{sc} 、 M_{sc} —— 分别为受压区钢面板所承担的轴力（N）和弯矩（N·mm）；
 N_{cc} 、 M_{cc} —— 分别为受压区 STC 所承担的轴力（N）和弯矩（N·mm）；
 N_{ct} 、 M_{ct} —— 分别为受拉区 STC 所承担的轴力（N）和弯矩（N·mm）；
 N_{sr} 、 M_{sr} —— 分别为钢筋所承担的轴力（N）和弯矩（N·mm）；
 M_{load} —— 为外荷载引起的截面弯矩（N·mm）。

2) 对图 4.5.2-1 的截面应力分布进行积分，得到式（4.5.2-1）中各项的表达式，如式（4.5.2-2）所示：

$$\begin{aligned}
N_{sc} &= b_t E_s \phi h_t (h_t / 2 - y_t) \\
N_{cc} &= -b_c E_c \phi (h_t - y_t)^2 / 2 \\
N_{rt} &= A_t E_r \phi (h_t + h_c - h_s - y_t) \\
N_{ct} &= b_c E_c \phi f_{td} h_{yt} + b_c f_{td} (h_c + h_t - y_t - h_{yt}) \\
M_{sc} &= b_t E_s \phi \left[y_t^3 - (y_t - h_t)^3 \right] / 3 \\
M_{cc} &= b_c E_c \phi (y_c - h_t)^3 / 3 \\
M_{rt} &= A_t E_r \phi (h_t + h_c - h_t - y_t)^2 \\
M_{ct} &= b_c E_c \phi f_{td} h_{yt}^2 / 2 + b_c f_{td} \left[(h_c + h_t - y_t)^2 - h_{yt}^2 \right] / 2
\end{aligned} \tag{4.5.2-2}$$

式中： b_c —— 抗裂验算时，计算模型中 STC 层的宽度（mm）；
 h_c —— 计算模型中 STC 层的厚度（mm）；
 b_t —— 计算模型中钢面板的宽度（mm）；
 h_t —— 计算模型中钢面板的厚度（mm）；
 A_t —— 计算模型中横向钢筋的截面面积（mm²）；
 E_r —— 钢筋的弹性模量（MPa）；
 E_s —— 钢材的弹性模量（MPa）；
 E_c —— STC 的弹性模量（MPa）；
 ϕ —— 计算模型中截面的弯曲曲率（1/mm）；
 y_t —— 计算模型中性轴到钢板底面的距离（mm）；
 h_r —— 横桥向钢筋形心到 STC 层表面的距离（mm）；
 f_{td} —— 不配筋 STC 的轴抗强度设计值（MPa）；
 h_{yt} —— STC 比例极限拉应变高度， $h_{yt} = \varepsilon_{crack,d} / \phi$ （mm）。

将式(4.5.2-2)代入式(4.5.2-1)，方程组仅含截面曲率（ ϕ ）和中性轴高度（ y_t ）两个未知参数，可通过迭代计算，得到钢筋应力。

2 纵桥向 STC 层中受拉钢筋应力计算

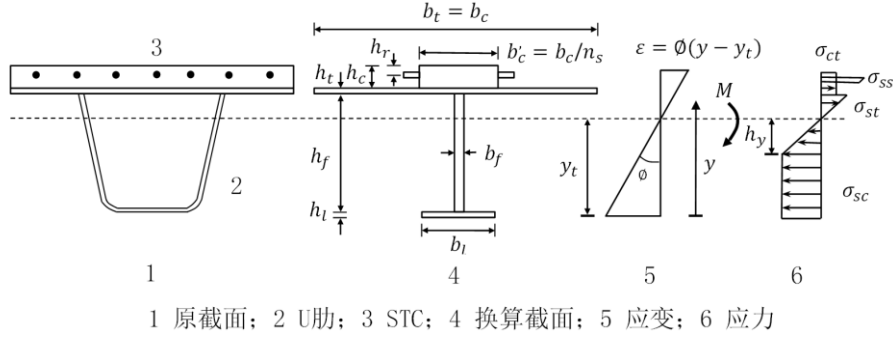


图 4.5.2-2 纵桥向计算模型中钢筋应力计算示意图

1) 外荷载下初裂截面内力和弯矩平衡方程：

$$N_{sr} + N_{ct} + N_{st} + N_{sc} - N_{load} = 0 \quad (4.5.2-3)$$

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

式中： N_{sc} 、 M_{sc} —— 分别为受压区钢结构所承担的轴力(N)和弯矩(N·mm)；
 N_{st} 、 M_{st} —— 分别为受拉区钢结构所承担的轴力(N)和弯矩(N·mm)；
 N_{ct} 、 M_{ct} —— 分别为受拉区 STC 所承担的轴力(N)和弯矩(N·mm)；
 N_{sr} 、 M_{sr} —— 分别为钢筋所承担的轴力(N)和弯矩(N·mm)；
 N_{load} 、 M_{load} —— 分别为外荷载引起的轴力(N)和截面弯矩(N·mm)。

2) 对图 4.5.2-2 的截面应力分布进行积分，得到式(4.5.2-3)中各项的表达式，如公式(4.5.2-4)所示：

$$N_{sc} = f_y b_f (h_l - y_t) - f_y b_l h_l + f_y b_f h_y / 2 \quad (4.5.2-4)$$

$$N_{st} = b_t h_t E_s \phi (h_f + h_l - y_t + h_l / 2) + b_f E_s \phi (h_f + h_l - y_t)^2 / 2$$

$$N_{sr} = A_s E_s \phi (h_c + h_t + h_f + h_l - y_t - h_r)$$

$$N_{ct} = f_{td} b_c h_c$$

$$M_{sc} = b_f E_s \phi h_y^3 / 3 + b_f f_y [(y_t - h_l)^2 - h_y^2] / 2 + f_y b_l h_l (y_t - h_l / 2)$$

$$M_{st} = b_t E_s \phi [(y_t - h_f - h_l)^3 - (y_t - h_f - h_l - h_t)^3] / 3$$

$$+ b_f E_s \phi (h_l + h_f + 2h_t - y_t)^3 / 3$$

$$M_{sr} = N_{sr} (h_c + h_t + h_f + h_l - y_t - h_r)$$

$$M_{ct} = N_{ct} (h_t + h_f + h_l - y_t + h_c / 2)$$

式中： y_t —— 计算模型中性轴到 U 肋底面距离 (mm)；
 h_t —— 计算模型中纵向钢筋形心到 STC 上表面距离 (mm)；

- f_{td} —— 不配筋 STC 的轴心抗拉强度设计值 (MPa) ;
 f_y —— 钢材的屈服强度 (MPa) ;
 b_c —— 计算模型中 STC 的宽度 (mm) ;
 b'_c —— STC 等效换算宽度 (mm) , $b'_c = b_c / n_s$, n_s 为钢材与 STC 弹性模量之比;
 b_t —— 计算模型中纵肋顶部钢板宽度 (mm) ;
 h_t —— 计算模型中纵肋顶部钢板厚度 (mm) ;
 b_f —— 计算模型中换算截面腹板厚度 (mm) ;
 h_f —— 计算模型中换算截面腹板高度 (mm) ;
 h_l —— 计算模型中换算截面下翼缘厚度 (mm) ;
 b_l —— 计算模型中换算截面纵肋下翼缘宽度 (mm) 。

其中受压钢板屈服区域高度可表示为:

$$h_y = f_y / \phi \quad (4.5.2-5)$$

将式(4.5.2-4)和(4.5.2-5)代入式(4.5.2-3), 方程组仅含截面曲率(ϕ)和中性轴高度(y_t)两个未知参数, 可通过迭代计算, 得到钢筋应力。

条文说明

钢筋应力的计算是 STC 层最大裂缝宽度计算的重要内容。为便于理解本条文中的公式, 现给出一个算例:

(1) STC 最大拉应力计算

以某大桥为工程背景, 建立全桥和局部计算模型。组合桥面结构方案中, STC 层厚 45mm。局部计算模型在横桥向取全幅宽 35.6m, 纵桥向取 3 组吊杆的梁段长 24m, 按 2 跨连续计算, 横隔板间距 4m; U 肋高 260mm, 开口宽 320mm, 底板 210mm, 钢箱梁桥面板厚 12mm, U 肋厚 6mm, 纯钢梁中原沥青铺装层考虑为二期恒载, 组合箱梁的 STC 层作为桥面结构的一部分。局部车轮荷载作用范围为 200mm (纵桥向) × 600mm (横桥向), 加载模型如图 4.5.2-1 所示。

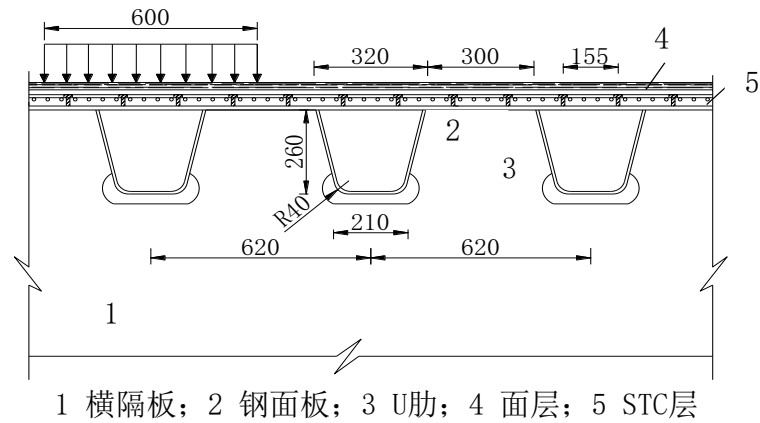


图 4.5.2-1 计算模型示意图（单位：mm）

根据有限元计算结果，组合桥面结构中 STC 的应力如表 4.5.2-1 所示。

表 4.5.2-1 STC 层拉应力峰值

受力方向	拉应力/MPa
纵桥向	10.08
横桥向	6.41

（2）钢筋应力的计算

对于横桥向，取一个宽度为 200mm 的钢-STC 组合板模型，其横断面构造如图 4.5.2-2a 所示；对于纵桥向，取一个宽度为 620mm 的钢-STC 组合梁模型，其横断面构造如图 4.5.2-2b 所示。钢的弹性模量为 206 GPa，STC25 的弹性模量为 40.7 GPa。

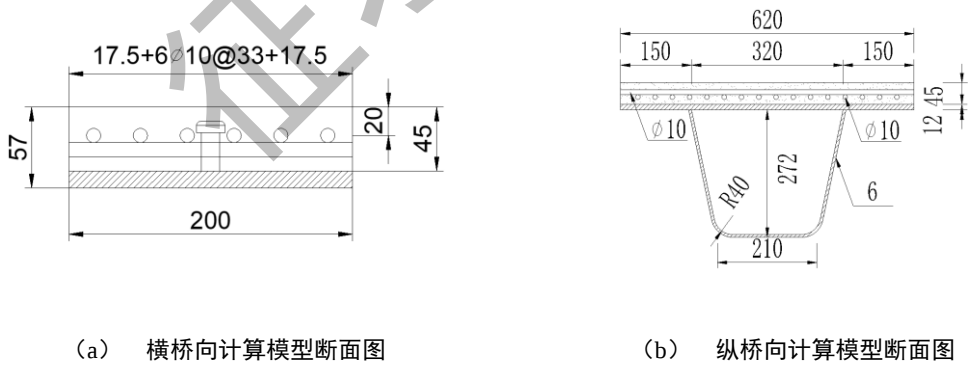


图 4.5.2-2 条带模型构造示意图（单位：mm）

根据材料力学公式 $M=\sigma W$ ，并结合 STC 层的最大拉应力值和计算模型的截面特性值，可得到截面弯矩值 M 。由 4.5.2 中的计算公式可以计算得到 STC 层中受拉钢筋应力。

(3) 最大裂缝宽度计算

由公式 4.5.1 可计算得到 STC 顶面的最大裂缝宽度，主要计算结果见表 4.5.2-2。可以看出，对于本例，STC 顶面的最大裂缝宽度小于 0.05mm，满足设计要求。

表 4.5.2-2 STC 表面裂缝宽度计算结果

受力方向	σ_{ss} (MPa)	截面弯矩 M (kN·m)	STC 表面最大裂缝宽度 w_{smax} (mm)
横桥向	16.5	1.19	0.0051
纵桥向	45.4	97.9	0.022

4.5.3 正常使用极限状态下，组合桥面结构中 STC 表面的最大裂缝宽度限值为 0.05mm。

条文说明

根据 Rafiee Alireza 的研究（Computer Modeling and Investgation on the Steel Corrosion in Cracked Ultra-High Performance Concrete, Kassel University, 2012），当 UHPC 中的裂缝宽度不超过 0.05mm 时，对其耐久性无影响，因此，在正常使用极限状态下，组合桥面结构中 STC 层的纵、横桥向裂缝宽度限值均定义为 0.05mm。根据本规范编制团队的研究，在承载能力极限状态下，组合桥面结构的破坏模式均为钢板屈服，且纵、横桥向试件破坏时 STC 层表面最大裂缝宽度分别为 0.08mm 和 0.2mm，因此，在承载能力极限状态下，组合桥面结构中 STC 层的纵、横桥向裂缝宽度限值分别定义为 0.08mm、0.2mm。

4.5.4 当钢面板厚 12mm，STC 厚度为 45mm，横桥向钢筋（位于上层，净保护层厚度为 15mm）、纵桥向钢筋（位于下层）直径均为 10mm 时，配筋 STC 的名义抗裂强度容许值和名义抗拉极限强度容许值分别符合表 4.5.4-1、4.5.4-2 的规定；对于其他情形，相应的强度值应根据本节公式计算确定。

表 4.5.4-1 各强度等级下 STC 的名义抗裂强度容许值

强度等级	钢筋间距 (mm)	横桥向名义抗裂强度容许值 $[f_{t,trans}^{serv}]$ (MPa)	纵桥向名义抗裂强度容许值 $[f_{t,longi}^{serv}]$ (MPa)
STC22	75	13.5	15.1
	50	15.0	15.5

STC22	37.5	16.7	16.3
	30	18.3	17.2
STC25	75	15.2	17.3
	50	16.7	17.6
	37.5	18.4	18.2
	30	20.1	19.0
STC28	75	16.9	19.3
	50	18.4	19.6
	37.5	20.2	20.0
	30	21.9	20.7

表 4.5.4-2 各强度等级下 STC 的名义抗拉极限强度容许值

强度等级	钢筋间距 (mm)	横桥向名义抗拉 极限强度容许值 $[f_{t,trans}^{ulti}]$ (MPa)	纵桥向名义抗拉 极限强度容许值 $[f_{t,longi}^{ulti}]$ (MPa)
STC22	75	22.0	19.0
	50	29.3	20.2
	37.5	37.1	21.3
	30	44.7	22.2
STC25	75	23.9	21.2
	50	31.4	22.1
	37.5	39.2	23.1
	30	47.1	23.9
STC28	75	25.9	23.3
	50	33.4	23.9
	37.5	41.3	24.7
	30	49.3	25.4

条文说明

本条表 4.5.4-1、4.5.4-2 中的 STC 名义抗裂强度容许值和名义抗拉极限强度容许值均根据上述规定，按本规范第 4.5 节中 STC 裂缝宽度计算公式确定，具体思路为：根据组合桥面结构的受力特点，对纵桥向、横桥向的名义抗裂强度分别计算，其中纵桥向的计算模型为含一个纵肋的钢-STC 组合梁构件，横桥向计算模型为一定宽度的钢面板-STC 组合板构件。

计算过程为：首先假定截面弯矩，根据第 4.5 节的方法计算 STC 表面的最大裂缝宽度，并对截面弯矩进行迭代计算，直到 STC 表面的最大裂缝宽度达到前述限制，最后根据公式 4.5.4 得到 STC 的名义抗裂强度容许值或名义抗拉极限强度容许值：

$$[f_t^{\text{serv}}] \text{ 或 } [f_t^{\text{ulti}}] = \frac{M}{n_s W} \quad (4.5.4)$$

式中: $[f_t^{\text{serv}}]$ 或 $[f_t^{\text{ulti}}]$ —— 配筋 STC 的名义抗裂强度容许值或名义抗拉极限强度容许值 (MPa);

n_s —— 钢材与 STC 的弹性模量之比;

M —— 计算模型 (组合梁构件) 中, STC 层表面最大裂缝宽度达到限值时的截面弯矩 (N·mm);

W —— 计算模型 (组合梁构件) 的弹性抵抗矩 (mm^3), 其中 STC 层的宽度应根据弹性模量比 n 换算至钢材。

4.5.5 当施工中需要对 STC 进行分块、分幅浇筑时, 应在先浇-后浇连接处设置施工接缝。施工接缝处 STC 的名义抗裂强度容许值 ($[f_{t,\text{trans},\text{joint}}^{\text{serv}}]$ 或 $[f_{t,\text{longi},\text{joint}}^{\text{serv}}]$) 和名义抗拉极限强度容许值 ($[f_{t,\text{trans},\text{joint}}^{\text{ulti}}]$ 或 $[f_{t,\text{longi},\text{joint}}^{\text{ulti}}]$) 应分别按表 4.5.4-1 和表 4.5.4-2 值的 0.7 倍。

条文说明

由于本节裂缝宽度计算公式较为复杂, 为便于设计人员选取, 本条给出了特定情况下, 各强度等级下 STC 的名义抗裂强度容许值和名义抗拉极限强度容许值。对于其他情况, 可根据本节公式计算确定名义抗裂或名义抗拉极限强度容许值。

本规范编制团队对组合桥面结构提出了多种施工接缝构造, 通过对比, 优选了 Z 型钢板强化接缝, 其构造详见本规范第 4.8 节。根据试验结果, 该类施工接缝处 STC 的名义抗裂强度可达连续浇筑 STC 名义抗裂强度的 79%, 因此, 本规范偏保守地按 0.7 倍取值。

4.5.6 正弯矩抗裂计算

当 STC 应用于钢桥面板重度疲劳开裂时, STC 底面应配以栓钉钢板条, 在正常使用极限状态下, 组合桥面结构正弯矩区 STC 层底面的最大裂缝宽度按 (4.5.7-1) 计算:

$$w_{\max} = \alpha \left(\varepsilon_{t,a} - \frac{f_{tk}}{KE_c} \right) l_c \quad (4.5.7-1)$$

式中: α —— 修正系数, 取 4.4;

- $\varepsilon_{t,a}$ —— 受拉区 STC 的应变；
 f_{tk} —— 不配筋 STC 的轴心抗拉强度标准值（MPa）；
 K —— STC 中纤维取向系数，取 1.25；
 E_c —— STC 的弹性模量（MPa）；
 l_c —— 正弯矩 STC 的平均裂缝间距（mm），取 $2/3 h_c$ ；
 h_c —— 计算模型中 STC 层的厚度（mm）。

4.5.7 STC 拉应变计算

横桥向 STC 层中受拉应变计算

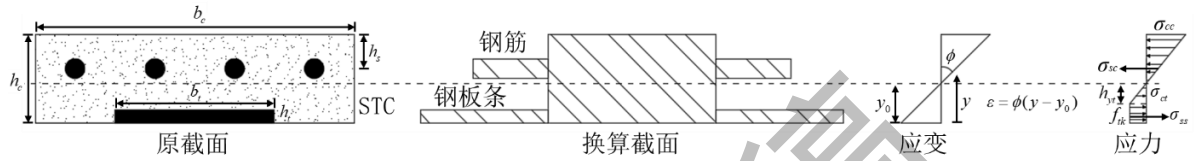


图 1 横桥向受力模型中钢板条应力计算示意图

(1) 外荷载作用下裂后截面内力和弯矩平衡方程如式（4.5.8-1）所示：

$$\begin{aligned}
 N_{sc} + N_{cc} + N_{ct} + N_{st} &= 0 \\
 M_{sc} + M_{cc} + M_{ct} + M_{st} - M_{load} &= 0
 \end{aligned}
 \quad (4.5.8-1)$$

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

(2) 对图 1 的截面应力分布进行积分，得到式（4.5.8-1）中各项的表达式，如（4.5.8-2）所示：

$$\begin{aligned}
N_{sc} &= -A_s E_r \phi (h_c - y_t - h_s) \\
N_{cc} &= -b_c E_c \phi (h_c - y_t)^2 / 2 \\
N_{ct} &= b_c E_c \phi h_{yt}^2 / 2 + b_c f_{ct} (y_t - h_{yt}) \\
N_{st} &= b_t E_s \phi h_t (h_{yt} - h_t / 2) \\
M_{sc} &= -A_s E_r \phi (h_c - y_t - h_s)^2 \\
M_{cc} &= b_c E_c \phi (h_c - y_t)^3 / 3 \\
M_{ct} &= b_c E_c \phi h_{yt}^3 / 3 + b_c f_{ct} (y_t^2 - h_{yt}^2) / 2 \\
M_{st} &= b_t E_s \phi h_t (y_t - h_t / 2)^2
\end{aligned} \tag{4.5.8-2}$$

式中：

- b_c —— 抗裂验算时，计算模型中 STC 层的宽度（mm）；
- h_c —— 计算模型中 STC 层的厚度（mm）；
- b_t —— 计算模型中钢板条的宽度（mm）；
- h_t —— 计算模型中钢板条的厚度（mm）；
- A_s —— 计算模型中横向钢筋的截面面积（mm²）；
- E_r —— 钢筋的弹性模量（MPa）；
- E_s —— 钢材的弹性模量（MPa）；
- E_c —— STC 的弹性模量（MPa）；
- ϕ —— 计算模型中截面的弯曲曲率（1/mm）；
- y_0 —— 计算模型中性轴到钢板条底面的距离（mm）；
- h_s —— 横桥向钢筋形心到 STC 层表面的距离（mm）；
- f_{tk} —— 不配筋 STC 的轴心抗拉强度标准值（MPa）；
- h_{yt} —— STC 比例极限拉应变高度（mm）。

条文说明

为对组合桥面结构在正交异性钢桥面板存在重度疲劳开裂情况时，正弯矩作用下构建相适应的 STC 裂缝宽度计算方法和公式，考虑钢板条宽度和 STC 厚度两个因素开展试验，制作了 12 个钢板条-STC 组合板试件，探明了在正弯矩作用下 STC 层底面沿横桥向抗裂性能。

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

4.6 变形计算

4.6.1 组合桥面结构桥梁的整体挠度应按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG-T 64-01）的规定计算。

4.6.2 组合桥面结构的局部挠度不应超过 $l/1000$ ，其中 l 为纵肋（或横隔板）腹板的中心间距。

条文说明

本条规定了组合桥面结构局部挠度的限值，目的是控制桥面系的局部挠度，以避免磨耗层因局部变形过大而出现脱层等病害问题，同时能够确保行车舒适性。桥面相对挠度的限值参考了现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定。

4.7 连接件计算

4.7.1 应根据 STC 层的厚度选取适宜的连接件。

4.7.2 连接件应保证钢桥面与 STC 层有效结合，共同承担作用力，并应具有一定的变形能力。

4.7.3 计算连接件剪力设计值时，应按照不同剪力方向进行作用组合。

4.7.4 连接件的抗剪刚度计算：

1 焊钉连接件的抗剪刚度按公式（4.7.4-1）计算：

$$k = \frac{\alpha V_u}{S} \quad (4.7.4-1)$$

式中： k —— 焊钉连接件的抗剪刚度（N/mm）；

V_u —— 焊钉连接件的抗剪承载力设计值（N）；

α —— 计算焊钉连接件抗剪刚度时的系数，建议取为 0.3~0.4；

S —— 焊钉连接件荷载-滑移曲线中，荷载 αV_u 对应的滑移值（mm）。

以上数据可通过推出试验获得，当无试验数据时，对于 STC 中常用的 $\Phi 13\text{mm}$ 焊钉连接件，抗剪刚度可取为 270000 N/mm。

2 焊接钢筋网连接件的抗剪刚度按公式（4.7.4-2）计算：

$$k = \frac{V_{0.025\text{mm}}}{S} \quad (4.7.4-2)$$

式中： k —— 焊接钢筋网连接件的抗剪刚度 (N/mm)；
 $V_{0.025\text{mm}}$ —— 焊接钢筋网连接件荷载-滑移曲线对应 0.025mm 滑移时的荷载 (N)；
 S —— 焊接钢筋网连接件荷载-滑移曲线上特征滑移值，取为 0.025mm。

以上数据可通过推出试验获得，当无试验数据时，对于直径为 10mm 的焊接钢筋网连接件，单侧单位长度 (1mm) 双面焊缝的抗剪刚度可取为：30000 N/mm。

4.7.5 连接件的承载能力极限状态和正常使用极限状态验算：

1 承载能力极限状态应按公式 (4.7.5-1) 进行验算：

$$\gamma_0 V_d \leq V_u \quad (4.7.5-1)$$

式中： V_d —— 承载能力极限状态下连接件剪力设计值 (N)；
 V_u —— 承载能力极限状态下连接件抗剪承载力设计值 (N)。

2 正常使用极限状态应按公式 (4.7.5-2) 进行验算：

$$S_{\max} \leq S_{\lim} \quad (4.7.5-2)$$

式中： $S_{\max}$ —— 正常使用极限状态下结合面的最大滑移值 (mm)；
 $S_{\lim}$ —— 正常使用极限状态下结合面的滑移限值 (mm)，可取 0.05mm。

承载能力极限状态下，连接件的抗剪承载力计算：

1 焊钉连接件按公式 (4.7.6-1) 计算 (焊钉剪断破坏)：

$$V_u = (0.85 A_{sc} f_{stud} + \eta f_{ck} d_{wc} l_{wc}) / \gamma_v \quad 4.7.6-1)$$

式中： V_u —— 承载能力极限状态下焊钉连接件的抗剪承载力设计值 (N)；
 A_{sc} —— 焊钉钉杆横截面面积 (mm²)；
 f_{stud} —— 焊钉抗拉强度 (MPa)，取为 400 MPa；
 η —— 焊缝尺寸对焊钉抗剪强度的贡献系数，取为 2.5；
 f_{ck} —— STC 的轴心抗压强度标准值 (MPa)；
 d_{wc} —— 焊钉根部焊缝的直径 (mm)，可根据现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》(GB/T 10433) 的规定取值；

- l_{wc} —— 焊钉根部焊缝的高度（mm），可根据现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》（GB/T 10433）的规定取值；
- γ_v —— 焊钉抗力分项系数，取为 1.25。

2 焊接钢筋网连接件按公式（4.7.6-2）计算：

$$V_u = \min \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} h_w l_w \tau_{wud} \frac{1}{2} \pi d_r l_c \tau_{cud} \right\} \quad (4.7.6-2)$$

- 式中： V_u —— 焊接钢筋网的抗剪承载力设计值（N）；
- h_w —— 纵筋-钢面板连接焊缝的焊脚尺寸（mm）；
- l_w —— 纵筋-钢面板连接焊缝的长度（mm）；
- l_c —— 纵向钢筋黏结长度，即纵筋-钢面板连接焊缝的纵向间距（mm）；
- τ_{wud} —— 纵向钢筋-钢板连接焊缝的抗剪强度设计值，取为 295 MPa，已考虑 1.2 的材料分项系数；
- τ_{cud} —— 纵筋与 STC 间的黏结强度设计值，取为 22MPa，已考虑 1.45 的材料分项系数；
- d_r —— 焊接钢筋网的公称直径（mm）。

4.7.6 正常使用极限状态下，结合面最大滑移值按公式（4.7.7）计算：

$$S_{\max} = \frac{V_{sd}}{k} \quad (4.7.7)$$

- 式中： $S_{\max}$ —— 正常使用极限状态下的结合面最大滑移值（mm）；
- V_{sd} —— 正常使用极限状态下的连接件剪力设计值（N）；
- k —— 连接件的抗剪刚度（N/mm）。

条文说明

组合桥面结构中的 STC 层较薄，连接件设计时应结合此特点选取适宜的矮剪力键。

本规范编制团队分别对焊钉连接件和焊接钢筋网连接件进行了推出试验。具体如下：

对于焊钉，推出试验结果表明，试件的破坏形式是钉身被整齐剪断，而 STC 层保持完好。因此，本条的焊钉承载力计算公式对应的破坏形态是焊钉被整齐剪断，该破坏现象与 STC 具有高抗压强度有关。根据研究结果，提出了薄层 STC

中焊钉的抗剪承载力计算公式。

对于焊接钢筋网,推出试验结果表明,试件有两种破坏模式:一种是纵筋-钢板间的焊缝剪断,另一种是横筋-纵筋间的点焊破坏,同时纵筋被拔出。基于试验结果,建立了抗剪承载力计算公式。

连接件临界滑移值以结构耐久性为考量依据,借鉴《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG-T D64-01)的取值方法,并结合本规范对 STC 耐久性的要求,定为 0.05mm。

4.8 构造要求

4.8.1 组合桥面结构中各层的厚度应符合下列规定:

- 1 钢面板厚度不应小于 12 mm;
- 2 STC 层的厚度不宜小于 35mm;
- 3 黏结层宜采用高黏高弹沥青、环氧沥青、改性环氧树脂等材料,用量宜为:高黏高弹沥青 1.4-1.8 kg/m²、环氧沥青 0.7-1.0 kg/m²、改性环氧树脂 0.6-0.7 kg/m²;
- 4 磨耗层可采用沥青混凝土和树脂类,厚度宜为 7~40mm。

条文说明

目前国内外正交异性钢桥面板设计中,钢面板厚度一般不小于 14mm。对于组合桥面结构,考虑到 STC 层对桥面系刚度的贡献,钢面板厚度可以适当减薄,故本条文中规定不小于 12mm。STC 层顶面的磨耗层可采用改性沥青玛蹄脂碎石(SMA)、改性沥青混凝土(AC)、超薄聚合物磨耗层(Thin Polymer Overlay)等。

4.8.2 钢筋网的设置应符合下列规定:

- 1 钢筋直径不宜小于 10mm;
- 2 钢筋净间距不宜小于 1.5 倍的钢纤维长度,中心间距不宜大于 50mm;
- 3 钢筋的上净保护层厚度不应小于 10mm,也不应大于 20mm,宜采用 15 mm;

4 钢筋接头宜设置在相邻横隔板中间 1/3 区域， l 为横隔板间距；搭接长度不宜小于 20 倍的钢筋直径；

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

条文说明

根据本规范编制团队的研究，STC 层的横桥向抗弯受力更为不利，故一般将横桥向钢筋置于上层。

4.8.3 焊钉连接件的设置应符合下列规定：

- 1 焊钉连接件直径不宜大于钢面板厚度的 1.5 倍；
- 2 焊钉连接件的间距宜为 150mm，不应小于焊钉直径的 5 倍，且不宜超过 250mm；
- 3 焊钉连接件的外侧边缘与钢面板边缘的距离不应小于 25mm；
- 4 当焊钉连接件间距为 250mm 时，应对桥面板四周的焊钉加密一倍。

4.8.4 焊接钢筋网连接件的设置应符合下列规定：

- 1 焊接钢筋直径宜为 10mm~14mm；
- 2 纵向钢筋与钢面板间连接件单面焊缝的长度不宜小于 20mm，应采用双面焊；
- 3 连接件的纵、横向间距不宜小于 200mm，且不宜大于 500mm。

条文说明

连接件的作用是确保 STC 层与钢板结合紧密。

4.8.5 STC 预制拼装或分段浇筑时，应设置施工接缝，宜采用 Z 型钢板接缝（图 4.8.5），且应符合下列规定：

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

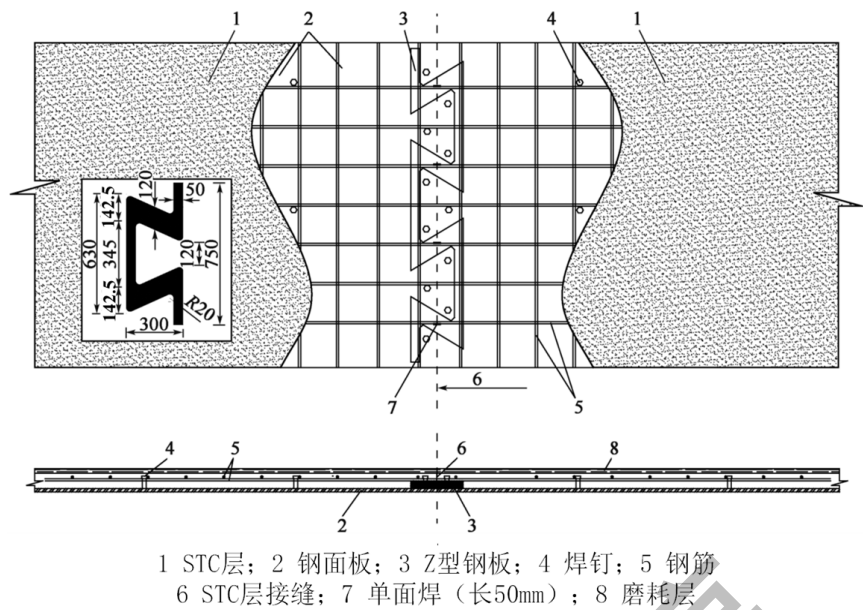
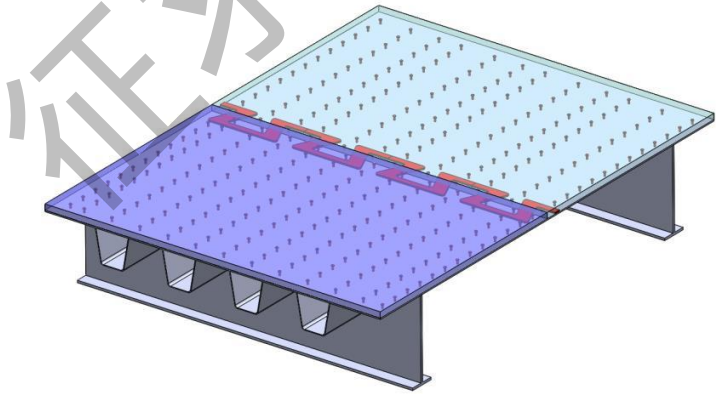


图 4.8.5 Z 型钢板强化施工接缝构造示意（单位：mm）

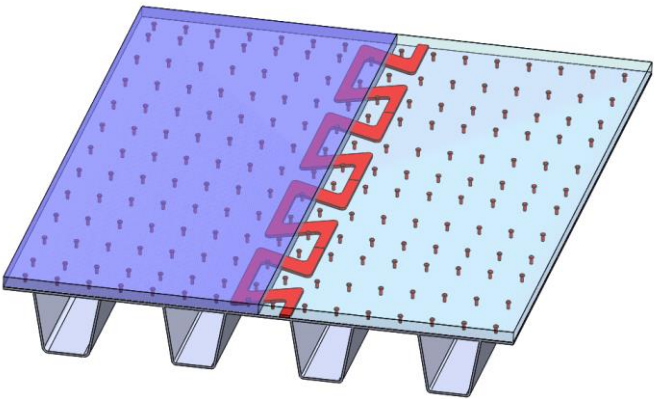
条文说明

施工接缝处 STC 中随机分布的钢纤维被人为地阻断，因而必须对接缝进行强化，以提高接缝的抗裂强度。

4.8.6 横向施工接缝应在相邻横隔板中间 1/3 区域，1 为横隔板间距，纵向施工接缝应设置在相邻纵肋的中间位置（图 4.8.6）。



(a) 横向接缝



(b) 纵向接缝

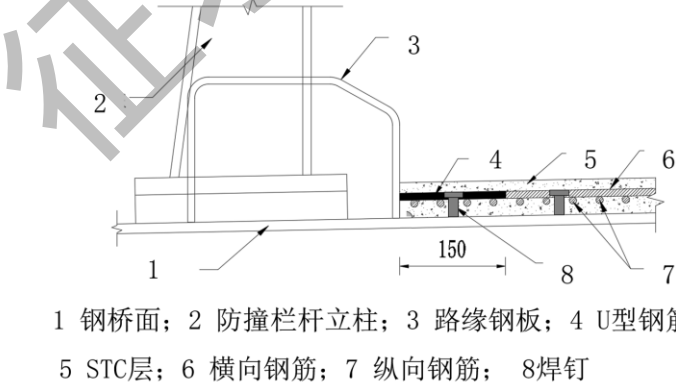
图 4.8.6 STC 施工接缝布置位置示意

条文说明

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压应力区。

4.8.7 STC 层连接周边钢结构时，连接构造应符合下列规定。

1 焊接 U 型钢筋时，应按图 4.8.7-1、图 4.8.7-2 进行设计，U 型钢筋应与 STC 中的钢筋同型号；U 型钢筋与钢结构边界面之间采用单面满焊方式；U 型钢筋两肢长度不宜低于 150mm；U 型钢筋开口端宽度宜为 150mm；相邻 U 型钢筋间距不宜大于 300mm。



1 钢桥面；2 防撞栏杆立柱；3 路缘钢板；4 U型钢筋；
5 STC层；6 横向钢筋；7 纵向钢筋；8 焊钉

图 4.8.7-1 STC 层与钢结构连接断面示意图（U 型钢筋连接，单位：mm）

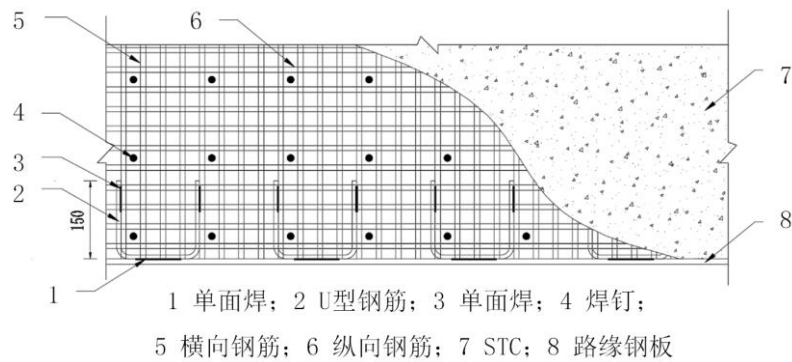


图 4.8.7-2 STC 层与钢结构连接平面示意图（U 型钢筋连接，单位：mm）

2 采用焊钉时，焊钉位置宜位于 STC 的一半厚度处，间距不宜大于 300mm；焊钉直径不宜低于 13mm，长度不宜小于 35mm。

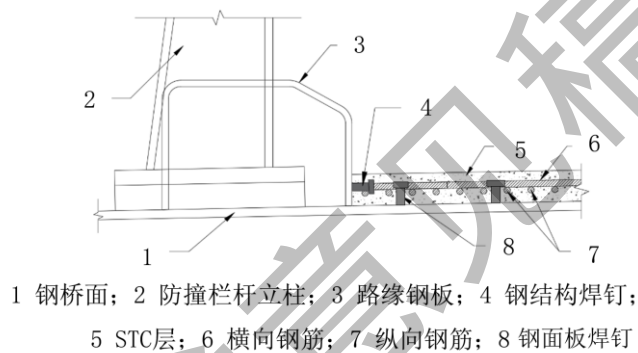


图 4.8.7-3 STC 层与钢结构连接断面示意图（焊钉连接）

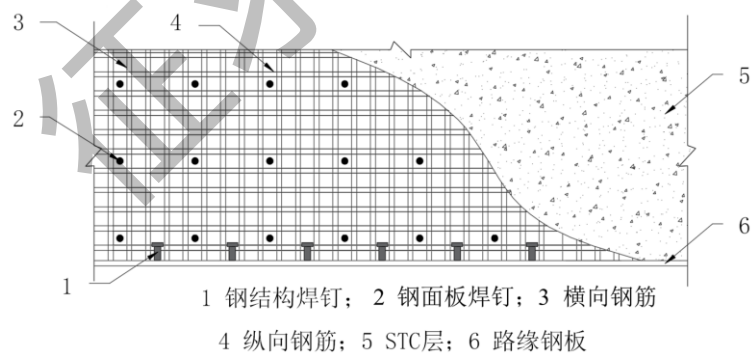


图 4.8.7-4 STC 层与钢结构连接平面示意图（焊钉连接）

4.8.8 STC 层连接周边混凝土结构时，连接构造应符合下列规定：

1 应在混凝土结构中预埋锚固钢筋，钢筋的型号应与 STC 内的钢筋相同，并处于同一平面，间距应不大于 300mm，搭接长度不小于 15d；

2 锚固钢筋预埋长度 L 按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定取值。

3 植筋代替预埋钢筋时，应按现行行业标准《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T J22）的规定实施。STC 层与混凝土结构的边界连接构造可参照图 4.8.8-1 和 4.8.8-2 设置。

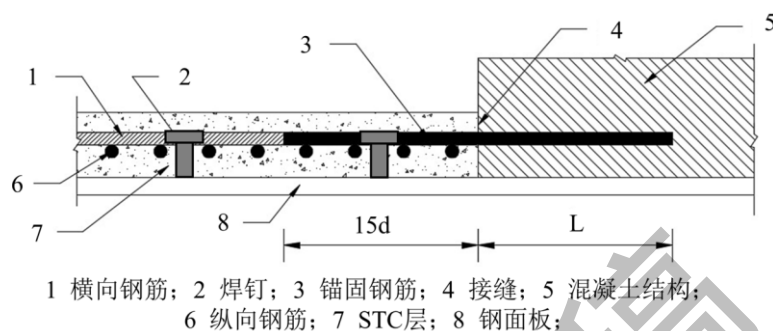


图 4.8.8-1 STC 层与混凝土结构连接立面示意图（单位：mm）

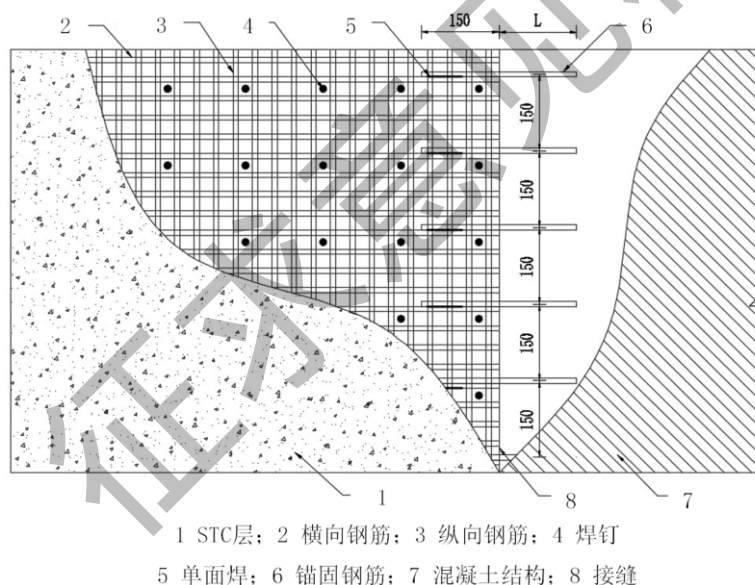


图 4.8.8-2 STC 层与混凝土结构连接平面示意图（单位：mm）

条文说明

规定了 STC 与边界构造物（如路缘石）的构造措施，以避免该位置开裂。

4.8.9 组合桥面结构应用于栓接钢桥面板时，宜将钢桥面螺栓区域一半数量的纵向钢筋焊接在拼接板顶面；螺栓带前、后与螺栓带等宽范围内的焊钉连接件数量加密一倍。

起，焊缝长度为 50mm；方案四：同时采取局部加密剪力钉和部分纵向钢筋与拼接钢板局部焊接的两项措施。

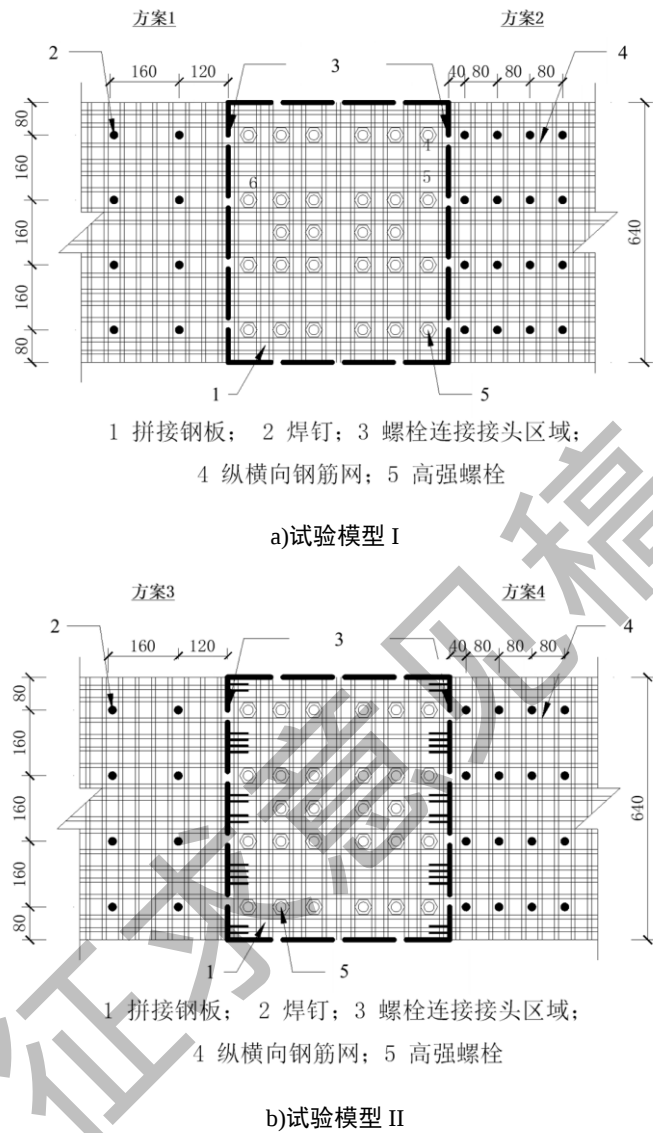


图 4.8.9-2 钢桥面栓接区域强化接缝构造示意（单位：mm）

试验结果表明（见表 4.8.9），方案 1 与方案 2 对应区域的 STC 层分别发生开裂时，其接缝截面处 STC 层顶面的拉应变均大于一般截面处应变，而方案 3 与方案 4 对应区域的 STC 层分别发生开裂时，其接缝截面处 STC 层顶面的拉应变仅为一般截面处应变的 82%和 72%。由此可见，方案 1 与方案 2 对应区域的 STC 层顶面接缝截面处均会先于一般截面处开裂，而方案 3 与方案 4 对应区域的 STC 层顶面接缝截面处则不会先于一般截面处开裂。

表 4.8.9 STC 层顶面拉应变

试件	方案	名义开裂荷载/kN	接缝截面应变 $a/\mu\epsilon$	一般截面应变 $b/\mu\epsilon$	应变比 $(a/b) / \%$
试件 I	方案 1	130.5	575	410	140
	方案 2	148.2	582	560	104
试件 II	方案 3	155.2	457	555	82
	方案 4	160.3	447	622	72

相比于方案 1, 方案 2~4 均能在不同程度上阻滞 STC 层顶面接缝截面处微裂纹宽度的发展, 减小局部变形, 延缓开裂。但不同方案的阻裂效果不同, 只有采用方案 3 或方案 4 时, 才能确保 STC 层顶面接缝截面处晚于一般截面处发生开裂。换言之, 当采用方案 3 或方案 4 时, 可确保控制 STC 设计的截面为一般截面, 而不是接缝截面, 使得设计计算大大简化, 因此, 本条推荐方案 4 作为钢桥面栓接区域的 STC 强化接缝构造。

4.8.10 STC 局部损坏需修补时, 应符合下列规定:

- 1 STC 修补前, 应对原 STC 层进行凿除处理, 露出 STC 层中钢筋头, 凿除的宽度应符合设计要求, 宜大于 10 倍钢筋直径;
- 2 浇筑 STC 前, 应对接缝面 STC 进行凿毛, 凿毛要求应符合本规范 5.6.6 的要求;
- 3 应检查钢桥面板上栓钉是否有破损、锈蚀等情况, 不满足要求应敲除, 并在原位置重新焊接;
- 4 绑扎纵横向钢筋前, 应采用短钢筋将纵向接长钢筋与桥面钢板焊接, 焊接长度满足构造要求。

5 施工

5.1 一般规定

5.1.1 施工前，应编制施工组织设计。

5.1.2 应进行封闭施工，工作面应洁净。

5.1.3 施工环境气温范围为 0℃~38℃，风力不大于 7 级。

条文说明

本节规定了组合桥面结构的施工步骤，以及施工要点。

5.2 施工准备

5.2.1 应根据设计要求进行 STC 混合料配合比设计。

5.2.2 正式施工前应进行试验段施工，通过试验段施工确定 STC 的拌和设备、摊铺设备选型及工艺参数，确保拌和能力、摊铺能力满足施工现场需求，确保拌和料均匀稳定，不得出现粉团或钢纤维结团。

5.2.3 原材料、袋装干混料储存应防潮、防雨、防涝，并按品种、批号分别堆放，不应混堆。应备足养护设备和材料。

条文说明

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，尤其是焊钉焊机、STC 搅拌机和摊铺机、振动梁等重要设备。

5.3 钢桥面处理

5.3.1 应对钢桥面进行联测，测定基面的纵向和横向线形。

5.3.2 新建钢桥可保留钢面板车间底漆，直接在钢桥面板顶面进行 STC 施工。

5.3.3 旧桥 STC 施工前，基面处理应符合下列规定：

- 1 应按设计严格控制原桥面铺装层铣刨深度，不应损伤桥面钢板；
- 2 检查钢桥面板有无损伤，并按设计要求做相应修补；
- 3 应清除桥面污垢；
- 4 喷砂除锈及防腐涂装应符合现行行业标准《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT 722）的规定及设计要求。

5.3.4 焊钉焊接前，应对焊钉处的钢桥面板局部打磨，焊接处钢面板应表面平整、光滑。

条文说明

本节规定了组合桥面结构桥面处理的基本要求。

5.4 连接件焊接

5.4.1 焊接焊钉时，应符合下列规定：

- 1 应按焊钉的布置位置在钢桥面板上划线定位；
- 2 当焊钉的设计位置与钢主梁拼接焊缝位置冲突时，应将焊钉偏离焊缝边界 2-3 cm，不应将焊钉直接焊接在拼接焊缝顶面；
- 3 应采用电弧螺柱焊机焊接焊钉；
- 4 焊接完后应对焊钉进行敲击检查。

5.4.2 设置 STC 施工接缝时，应预留焊钉的焊接位置。

5.4.3 焊接完焊钉后，应在钢桥面板四周 500mm 宽局部区域内进行防腐涂装。

条文说明

本节规定了焊接焊钉工序中的要点，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防腐漆即可（一般为 0.5m 宽）。

5.5 钢筋网铺设和 Z 型钢板设置

5.5.1 钢筋网铺设应根据设计图纸进行纵向、横向、竖向定位，钢筋直径、搭接长度、钢筋网高度及间距应满足表 6.3.4 要求，钢筋应平直，扎丝头不应位于钢筋顶面。

5.5.2 设置 STC 接缝时，应将 Z 型强化钢板焊接在钢面板上，并在中间位置设竖向模板。Z 型钢板与钢面板采用间断焊，焊缝高度、宽度、长度应满足表 6.3.3 要求。

条文说明

本节规定了绑扎钢筋网、接缝处 Z 型钢板布置的要点。

5.6 STC 摊铺与养护施工

5.6.1 STC 混合料制备应符合下列规定：

1 STC 混合料宜提前进行工厂预混干拌，应采用专用设备，且应确保钢纤维不结团。干拌时各原材料计量容许偏差不应大于 1%；每盘拌和的材料应置于同一包装件中。

2 采用现场集中拌和方式时，除钢纤维外各原材料的容许计量偏差不应大于 $\pm 2\%$ ，钢纤维宜待 STC 其它混合料加水拌和流化之后计量投入。

5.6.2 STC 的湿拌应采用强制式搅拌机，配料机构计量系统的精度应满足下列要求：

1 采用预拌干混料方式时，干混料的容许计量偏差不应大于 $\pm 2\%$ ，水的容许计量偏差不应大于 1%；拌和时置于同一包装件中的干混料应一次搅拌完成，不得分盘搅拌。

- 2 采用现场集中拌和方式时，钢纤维与水的容许计量偏差不应大于 1%；
- 3 搅拌前应清理搅拌机，湿润搅拌缸，但不能有积水，且应满足下列规定：
 - 1) 搅拌时间应根据混合物的黏聚性、均质性及搅拌机类型，经试拌确定，且每盘混合料的净搅拌时间不宜少于 5min。待 STC 流化之后继续搅拌 2min。
 - 2) 搅拌应保证拌和物均匀，出料口拌和物中不得有粉团或钢纤维结团现象。
 - 3) 搅拌结束后，应及时清洗搅拌设备。

5.6.3 宜采用专用摊铺机进行 STC 摊铺施工，布料应均匀，振捣应充分，表面平整密实。摊铺过程中应按表 5.6.3 中的要求进行摊铺厚度及钢筋保护层厚度控制。

表 5.6.3 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	$\leq 3\text{mm}$	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 100m ² 检测 1 处
2	净保护层厚度	$\leq 2\text{mm}$	摊铺过程中，将直钢丝插入到横向钢筋顶部，以直尺测量钢丝的浸润深度，每 100m ² 检测 1 处

5.6.4 STC 摊铺完成后，应立即覆盖养护薄膜进行保湿养护，并应符合下列规定：

- 1 养护薄膜应搭接铺设，搭接位置宜采用压板或砂粒覆盖，搭接宽度应大于 20cm；
- 2 保湿养护过程中发现 STC 表面缺水变干时应及时补水；
- 3 STC 终凝后，应撤除养护薄膜，开始蒸汽养护。

5.6.5 蒸汽养护应符合下列规定：

- 1 应根据现场条件和养护要求确定网架搭设、蒸汽发生器、管道布置及养护方案。
- 2 养护温度在 90℃ 及以上时，养护时间不少于 48h；养护温度在 80℃~90℃ 时，养护时间不应少于 72h；养护过程中蒸汽养护棚内的相对湿度不应低于 95%。

3 蒸汽养护时的升温阶段，升温速度不应大于 $12^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ；养护结束后，降温速度不应大于 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

4 对于 STC 分幅、分段施工，蒸汽养护棚覆盖范围至少应超过接缝 2m。

5 蒸汽养护应按表 5.6.5 中的要求进行温度及湿度监测。

表 5.6.5 STC 层蒸汽养护实测项目

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	$+5^{\circ}\text{C}$	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	$+1\text{h}$	计时器，每小时检查 2 次

5.6.6 STC 分段施工界面应进行凿毛处理，凿毛宽度 2cm。

条文说明

本节规定了 STC 铺筑与养护施工的要点。

STC 的蒸汽养护中应确保养护环境中的温度和湿度符合要求。

STC 摊铺主要包含三部分内容：布料、振密、刮（整）平。目前根据不同施工单位的技术装备能力的差别，主要有以下四种不同摊铺方式：

1、采用布料、振密、刮平一体式摊铺机摊铺。此摊铺方式，辅助性工作最少，作业面最紧凑，受天气影响最小，摊铺效率最高。无需设置轨道系统。

2、采用桁车和数控布料仓（可适时自动对布料厚度、宽度、速度进行综合逻辑计算后完成定量出料）进行布料+桁架式振动整平机进行摊铺。需设置具备标带功能的轨道系统。

3、采用天泵配合人工布料+桁架式振动整平机进行摊铺。此摊铺方式，因整平机往前“赶”料的能力有限，故要求人工布料的“松铺”厚度要适当，避免料多赶不动或料少导致摊铺厚度不足，需配置较多的布料工人。

4、采用天泵（或地泵或翻斗车）配合人工布料+简易三角振动梁进行摊铺。此摊铺方式主要用于摊铺面积小，摊铺面形状不规则，或摊铺面不适合使用大型摊铺设备的场合。因振动梁往前“赶”料的能力更有限，需配置较多的布料工人。受天气的影响较大，摊铺效率较低。

无论采用哪种设备进行摊铺，密实度、摊铺厚度和平整度都是必须得到控

制的指标。机械化程度越高，摊铺厚度和平整度越能得到稳定准确控制。

5.7 磨耗层施工

5.7.1 STC 表面宜采用抛丸方式处理，抛丸后应注意防止 STC 表面防污染。

5.7.2 黏结层施工应按《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40）执行。

5.7.3 磨耗层施工应按《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40）执行。

征求意见稿

6 质量检验与验收

6.1 一般规定

6.1.1 组合桥面结构验收应按照现行行业标准《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1）执行。

条文说明

本节规定了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。

6.2 进场检验

6.2.1 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，外加剂产品应具有使用说明书。

6.2.2 材料进场检验的检验样品应随机抽取。

6.2.3 焊钉进场检验项目及要求的按现行行业标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》（GB/T 10433）执行，同一工程、同一原材料来源的焊钉，检验批量不应大于 20 万个。

6.2.4 钢筋进场检验项目及要求的按现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）执行，同一工程、同一原材料来源的钢筋，检验批量不应大于 120t。

6.2.5 工厂预拌 STC 混合料进场时，按本规范表 6.3.6-1 的要求进行检验；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。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 拌制新拌混凝土流动性应符合本规范表 6.3.6-1 的要求；

4 抗弯拉强度应大于相应强度等级标准值的 1.05 倍。

6.2.6 STC 各原材料按本规范 3.1 节要求进行检验，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 50t。

条文说明

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。

6.3 质量检验

6.3.1 焊接焊钉应符合下列要求：

1 基本要求

焊钉的规格、技术性能应符合国家现行标准规定和设计要求；

2 实测项目应符合表 6.3.2 的规定。

表 6.3.2 焊钉焊接实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率	要求
1	焊钉高度	$\leq 3\text{mm}$	钢尺测量，每 100m ² 检测 1 处	按设计图纸
2	焊钉间距	$\leq 10\text{mm}$	钢尺测量，每 100m ² 检测 1 处	按设计图纸
3	焊缝可靠性	$\leq 5\%$	重锤平击钉帽，每 100m ² 检测 1 处	—

3 外观质量应符合下列规定：

1) 焊钉无锈蚀，位置准确，磁环应干燥；

2) 焊钉保持竖直，无明显倾角；

3) 焊缝外形应饱满，无气孔、夹渣、裂纹等明显缺陷。

6.3.2 焊接 Z 型强化钢板应符合下列要求：

1 基本要求

Z 型强化钢板的规格、技术性能应符合国家现行标准规定和设计要求。

2 实测项目应符合表 6.3.3 的规定。

表 6.3.3 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	$\leq 1\text{mm}$	钢尺测量，每 5m 加强板检测 1 处
2	焊缝宽度	$\leq 1\text{mm}$	钢尺测量，每 5m 加强板检测 1 处
3	焊缝长度	$\leq 1\text{mm}$	钢尺测量，每 5m 加强板检测 1 处

3 外观质量应符合下列规定：

- 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。

6.3.3 钢筋网铺设应符合下列要求：

1 基本要求

- 1) 钢筋、焊条等的品种、规格和技术性能应符合国家现行标准规定和设计要求；
- 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。

2 实测项目应符合表 6.3.4 的规定。

表 6.3.4 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	钢筋直径	$\leq 0.2\text{mm}$	游标卡尺测量，每 100m ² 检测 1 处
2	钢筋搭接长度	$\leq 10\text{mm}$	钢尺测量，每 100m ² 检测 1 处
3	钢筋网高度	$\leq 3\text{mm}$	钢尺测量，每 100m ² 检测 1 处
4	钢筋网间距	$\leq 10\text{mm}$	钢尺或游标卡尺测量，每 100m ² 检测 1 处

3 外观质量应符合下列规定：

- 1) 垫块应布置合理，密度均匀；
- 2) 钢筋网纵、横桥向间距均匀；
- 3) 钢筋搭接布置合理，位置错开，搭接长度满足要求，搭接绑扎应牢固。

6.3.4 STC 与边界的连接钢筋焊接应符合下列要求：**1 基本要求**

- 1) 连接钢筋的规格、技术性能应符合现行相关标准规定和设计要求；
- 2) 连接钢筋的布置位置应准确；

2 实测项目应符合表 6.3.5 的规定。

表 6.3.5 STC 与边界的连接钢筋焊接实测项目

项次	检查项目	允许偏差	检测方法和频率
1	焊缝高度	$\leq +1\text{mm}$	钢尺测量，每 5m 连接钢筋检测 1 处
2	焊缝宽度	$\leq +1\text{mm}$	钢尺测量，每 5m 连接钢筋检测 1 处
3	焊缝长度	$\leq +1\text{mm}$	钢尺测量，每 5m 连接钢筋检测 1 处

3 外观质量应符合下列规定：

- 1) 连接钢筋应与 STC 中的受力钢筋在同一水平面上，无明显偏差；
- 2) 连接钢筋焊缝外形应饱满，无气孔、夹渣、裂纹等明显缺陷。

6.3.5 STC 层摊铺施工应符合下列要求：**1 基本要求**

STC 所用的水泥、石英砂、掺合料、钢纤维、水等材料的质量和规格应符合有关规范的要求。

材料配合比应满足本规范的要求，按规定的配合比施工。

接缝的位置、规格及尺寸的设置应符合设计要求。

模板高度和安装位置应符合设计规定；

- 5) 施工完后按本规范要求进行养护。

2 实测项目应符合表 6.3.6-1、表 6.3.6-2、表 6.3.6-3 的规定。

表 6.3.6-1 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 100m ³ 检测 1 组	$f_{cu,m} - 1.1S_{fcu} \geq f_{cu,k}$ $f_{cu,min} \geq 0.95 f_{cu,k}$
2	抗弯拉强度	100mm×100mm×400mm 棱柱体试件抗弯拉试验，每 100m ³ 检测 1 组	$f_{t,m} \geq 1.05 f_{tk}$ $f_{t,min} \geq 0.95 f_{tk}$
3	弹性模量	100mm×100mm×300mm 棱柱体试件轴压试验，每 100m ³ 检测 1 组	按设计要求
4	坍落扩展度	水泥混凝土坍落扩展度试验标准方法，每 100m ³ 检测 1 次	≥450mm；≤700mm

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

表 6.3.6-2 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	STC 表面纵、横坡	≤0.2%	水准仪、皮尺测量，每 100m ² 检测 1 处
2	平整度	≤5mm	3m 铝合金直尺，每 100m ² 检测 1 处

表 6.3.6-3 STC 耐久性实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检测方法和频率
1	抗氯离子渗透性	$Q \leq 100C$	电量法*，当 STC 的耐久性设计需要实测指标时进行检测，每座桥不超过 1 次
2	吸水孔隙率	≤9.0%	ASTMC642-13 规定的测试方法，当 STC 的耐久性设计需要实测指标时进行检测，每座桥不超过 1 次

注：采用电量法测试 STC 的抗氯离子渗透性时，试件不应掺入钢纤维等电介质。

3 外观质量应符合下列要求：

- 1) 养护结束后，STC 层应均匀完好，且目视观测 STC 表面无收缩裂缝；
- 2) STC 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。

6.3.6 STC 表面抗滑构造设置应符合下列要求：

1 基本要求

抛丸施工应进行工艺试验，确定抛丸机器行走速度、丸料粒径等参数。

2 实测项目应符合表 6.3.7 的规定：

表 6.3.7 STC 表面构造深度实测项目

项次	检查项目	规定值	检测方法和频率
1	构造深度 TD (mm)	0.4~0.55	铺砂法，每 200m 检测 1 处

3 外观质量应符合下列要求：

1) 不得遗留光滑的 STC 表面，纹理和构造深度应均匀一致。

6.3.7 磨耗层铺筑应符合下列要求：

1 基本要求

- 1) 黏结材料的质量和技术性能应符合设计和有关技术规范的要求。
- 2) 对 STC 层表面进行糙化处理，应进行防护，防止灰尘、油污和其他污物，并及时进行黏结层施工。
- 3) 当桥面潮湿或环境温度低于 5℃时，严禁洒布黏结层。
- 4) 严格控制黏结层材料的加热温度和洒布温度。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。

2 实测项目应符合表 6.3.8 的规定。

表 6.3.8 磨耗层的允许偏差及检验规定

项次	检验项目	允许偏差	检验频率	检验方法
1	压实度	马歇尔密度的 98% 最大相对密度的 94%	每 200m 检验 1 处	T 0924
2	厚度	-5~+10mm	每 200m 检验 1 处	T 0912

4	平整度	符合设计要求	全桥每车道连续检验，每 100m 计算一次	T 0932
3	桥面横坡	$\leq 0.3\%$	每 200m 测 4 处	T 0911
6	抗滑构造深度	符合设计要求	每 200m 检验 1 处	T 0961

注：检测方法参见现行行业标准《公路路基路面现场测试指南》（JTG E60）

3 外观质量应符合下列要求：

- 1) 厚度均匀，压实紧密，无松散料，且不应出现泛油现象；
- 2) 边角位置的磨耗层铺装应良好，且无脱空现象；
- 3) 桥面应整体整洁干净，且应达到通车要求。
- 4) 表面应平整密实，不应有泛油、裂缝、粗细料集中等现象。有上述缺陷的面积（单条裂缝则按其长度乘以 0.2m 宽度，折算成面积）之和不得超过受检面积的 0.03%。
- 5) 表面无明显碾压轮迹。
- 6) 搭接处应紧密、平顺。
- 7) 磨耗层与其他构筑物应接顺，不得有积水现象。

条文说明

本节规定了组合桥面结构各工序的质量检验内容及指标，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。

附录 A STC 用钢纤维性能检验方法

A.1 钢纤维形状与尺寸检验

A.1.1 钢纤维形状合格率检验应符合下列要求：

1 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，目视逐根检查其形状。记录钢纤维形状呈弯曲和其他形状等的纤维根数 N_f 。

2 钢纤维形状合格率按式 (A.1.1) 计算，计算结果精确至 0.1%。

$$P_f = \frac{50 - N_f}{50} \times 100 \quad (\text{A.1.1})$$

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。

A.1.2 钢纤维长度和直径合格率检验应符合下列要求：

1 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 7mm~8mm 范围内的钢纤维根数和 0.18mm~0.22mm 或 0.12mm~0.14mm 范围内的钢纤维根数。

2 钢纤维长度和直径合格率按式 (A.1.2-1) 和 (A.1.2-2) 计算，计算结果精确至 0.1%。

$$P_l = \frac{50 - N_l}{50} \times 100 \quad (\text{A.1.2-1})$$

$$P_d = \frac{50 - N_d}{50} \times 100 \quad (\text{A.1.2-2})$$

式中： P_l —— 长度合格率，单位为百分数（%）；

N_l —— 长度不在 12mm~14mm 或 7mm~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~0.14mm 范围内的钢纤维根数，单位为根。

A.2 杂质含量检验

A.2.1 每批次钢纤维中用感量 0.01g 的天平称取 500g 钢纤维两份，分别对每份样品用目视观察钢纤维的表面是否污染，用人工挑拣出杂质（包括粘连的钢纤维束、锈蚀钢纤维以及其他杂质等），并用感量 0.01g 的天平称重。杂质含量按式（A.2.1）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。

$$W = \frac{m}{500} \times 100 \quad (\text{A.2.1})$$

式中： W —— 杂质含量，单位为百分数（%）；
 m —— 杂质质量，单位为克（g）。

A.3 抗拉强度试验

A.3.1 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。

A.3.2 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 mm^2 ），计算时应保留到小数点后四位。

A.3.3 采用量程为 100N~200N 的电子拉力试验机，加载速度 $(1 \pm 0.2) \text{ mm/min}$ ，测得极限拉伸荷载 $P_{\max}$ 。

A.3.4 钢纤维的抗拉强度按式（A.3.4）计算：

$$f_u = \frac{P_{\max}}{A} \quad (\text{A.3.4})$$

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（ mm^2 ）。

A.3.5 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 2000MPa。

附录 B STC 试件的制作及试验方法

B.0.1 STC 拌合物的取样应符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204)的有关规定。

B.0.2 现场取样应从同一次搅拌或同一车运送的 STC 中取出,取样量不应小于试样需要量的 1.5 倍,且不宜小于 20L。

B.0.3 STC 试件制作所用试模应符合现行行业标准《混凝土试模》(JG 237)的有关规定。试件制作时,应将拌和物一次性装入试模,并略高出试模上口;振捣应在振动台上振动 30s 或持续到 STC 表面出浆为止,振捣密实后刮去多余的拌和物并用抹刀抹平。振动台应无磁性,防止钢纤维排向和下沉,棱柱体试件应采用卧式成型。

B.0.4 试件与实际施工时的桥面同条件进行蒸汽养护。养护条件应符合本规范 9.4.11 的相关规定。

B.0.5 在试件进行抗压试验前,应检验试件表面平整度。试件表面平整度应小于 0.04%。

B.0.6 STC 的力学性能试验应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387)的规定。

B.0.7 抗压强度与抗弯拉强度试验值均不应乘以尺寸换算系数。

B.0.8 其他检验项目的试验方法应符合国家现行有关标准的规定。

附录 C NC-STC 组合桥面结构

C.1 一般规定

C.1.1 为规范 STC 在普通混凝土（NC）桥面板加固工程中的设计及施工，制定本附录。

C.1.2 STC 加固层与原 NC 桥面板形成 NC-STC 组合桥面结构，如图 C.1.2 所示。

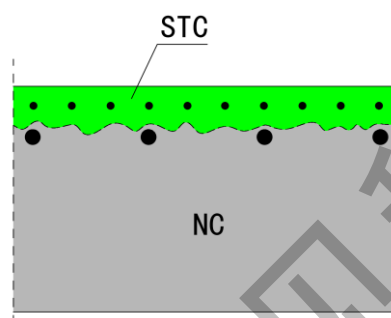


图 C.1.2 NC-STC 组合桥面结构

C.1.3 本附录适用于公路桥梁 NC-STC 组合桥面结构。

条文说明

NC 桥面板在公路桥梁中应用广泛，但在长期运营及恶劣环境下极易开裂及剥落，导致钢筋锈蚀，影响桥梁桥面结构的安全性和耐久性。为解决上述难题，本规范编制团队成员——瑞士洛桑联邦理工大学（EPFL）Eugen Brühwiler 教授于 1999 年首次提出采用 STC 薄层加固在役 NC 桥面板，形成 NC-STC 组合桥面结构。该结构具有以下优点：（1）在不增加结构自重的前提下，显著提高桥面结构的抗弯、抗剪、抗裂及抗疲劳性能；（2）可直接作为防水层，耐久性强。

自 1999 年至今，Eugen Brühwiler 教授及其团队探明了 NC-STC 组合结构的基本力学性能，建立了设计、施工、质量检验与验收方法。2004 年，该结构在瑞士首次应用，目前已推广应用于欧洲（主要在瑞士）200 多座实桥，其中竣工 160 多座，并于 2016 年编制了瑞士规范 SIA 2052《Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cement-based Composites: Construction Material, Dimensioning and Application》。

考虑到我国重载交通量大且超载严重,导致公路桥梁中 NC 桥面板开裂及耐久性问题尤为突出,因此引入基于 STC 的新型加固方法,以期一体化解决上述问题。目前该新型加固技术已经在我国赤石特大桥、广州南华大桥 NC 桥面板加固工程中得到成功应用。为总结经验、便于推广应用,在汇总瑞士及中国相关研究和应用成果的基础上,编制本附录。

本附录以瑞士规范 SIA 2052 为基础,并结合我国现行国家和行业标准为框架进行编制。本附录仅给出瑞士规范 SIA 2052 中的核心内容,详细规定请参考 SIA 2052 原文。

C.2 设计

C.2.1 一般规定

C.2.1.1 NC-STC 组合桥面结构设计荷载的选取应符合本规范 4.1~4.4 节的规定。

C.2.1.2 STC 约束收缩应力 σ_{ce} 按公式 (C-1) 计算

$$\sigma_{ce} = \zeta_c \frac{\sigma_{ce,max}}{1 + \phi_{c\infty}(t_{\infty}, t_0)} \quad (C-1)$$

式中: ζ_c —— 组合结构中 STC 层约束度,按照 C.2.1.6 取值;
 $\sigma_{ce,max}$ —— 完全约束状态下 STC 的约束应力, $\sigma_{ce,max} = \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_c$;
 $\varepsilon_{cs,\infty}$ —— STC 材料的终期收缩应变,自然养护下可取 0.6-0.95‰(具体数值需经试验测定),蒸压养护下可取 0;
 E_c —— STC 的弹性模量;
 $\phi_{c\infty}(t_{\infty}, t_0)$ —— STC 的终期徐变系数(具体数值可经试验测定),若无实验数据,自然养护下可取 0.8,蒸养下可取 0.2。

条文说明

在 NC 桥面上浇筑 STC 层时,STC 层中因其自收缩引起的变形受到约束,会在组合构件中产生约束应力,而 STC 的徐变可减小上述约束应力。

C.2.2 承载能力极限状态计算

C.2.2.1 抗弯计算

C.2.2.1.1 NC-STC 组合结构的抗弯极限承载力设计值按图 C.2.2.1 中所示的模型计算。

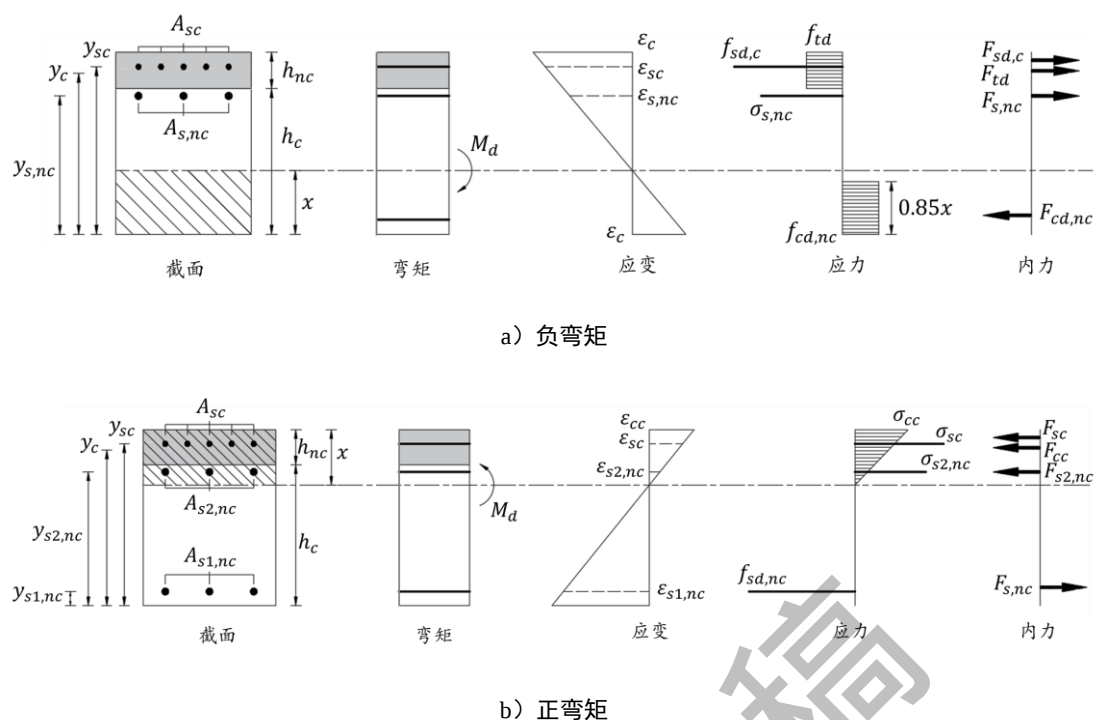


图 C.2.2.1 NC-STC 组合结构抗弯极限承载力计算模型

C.2.2.3 抗剪计算

NC-STC 组合桥面结构抗剪计算应符合以下要求：

- 1 当+且 STC 层处于受拉状态时，组合结构的抗剪承载力由 NC 层和配筋 STC 层的抗剪承载力叠加而成，计算模型如式(C-3)及图 C.2.2.3-1 所示。

$$V_{Rd} = V_{Rd,nc} + V_{Rd,s} + V_{Rd,c} \quad (C-3)$$

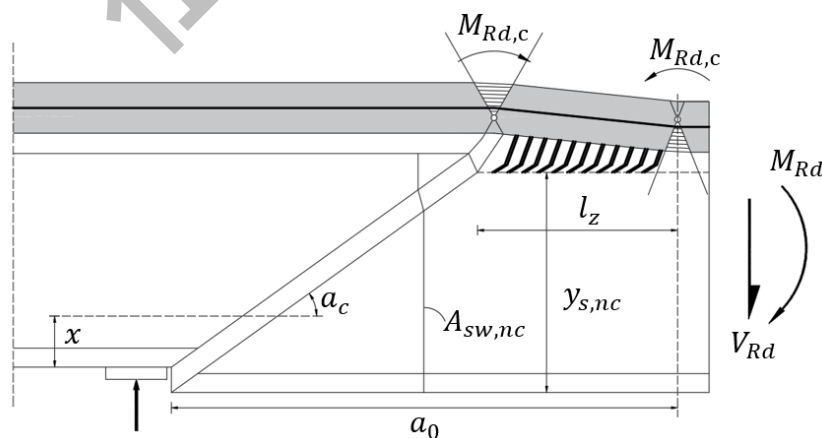


图 C.2.2.3-1 抗剪承载力（上限）计算模型

- 1) NC 桥面板的抗剪承载力设计值 $V_{Rd,nc}$ 按下式计算：

$$V_{Rd,nc} = \frac{f_{cd,nc} b_w}{2} \left[\frac{x}{\sin \alpha_c} (1 - \cos \alpha_c) \right] \quad (C-4)$$

$$x = 0.9 \frac{y_{s,nc} A_{s,nc} f_{yd,nc} + y_c A_c f_{td} + y_{sc} A_{sc} f_{yd,nc}}{A_{nc} f_{cd,nc}} \quad (C-5)$$

- 式中：
- α_c —— NC 层中弯矩和剪力共同作用下产生的斜裂缝倾角，其取值范围： $20^\circ \leq \alpha_c \leq 60^\circ$ （初步设计时， α_c 可取 35° ）；
 - $f_{cd,nc}$ —— 普通混凝土抗压强度设计值；
 - $f_{yd,nc}$ —— NC 层中钢筋屈服强度设计值；
 - f_{td} —— STC 轴心抗拉强度设计值；
 - $f_{yd,c}$ —— STC 层中钢筋的屈服强度设计值；
 - b_w —— NC 层宽度或腹板厚度；
 - x —— 受压区高度；
 - $y_{s,nc}$ —— NC 层中受拉钢筋高度；
 - y_c —— STC 层高度；
 - $y_{s,c}$ —— STC 层中钢筋高度；
 - A_{nc} —— NC 层截面面积；
 - $A_{s,nc}$ —— NC 层受拉钢筋的截面面积；
 - A_{sc} —— STC 层中钢筋的截面面积；
 - $A_{sw,nc}$ —— NC 层竖向抗剪钢筋的截面面积；
 - A_c —— STC 层的截面面积。

2) 竖向抗剪钢筋的抗剪承载力设计值 $V_{Rd,s}$ 按下式计算：

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw,nc}}{s} \cdot (y_{s,nc} - x) \cdot \cot \alpha_c \cdot f_{yd,nc} \quad (C-6)$$

- 式中：
- s —— 竖向钢筋间距。

3) 配筋 STC 的抗剪承载力设计值 $V_{Rd,c}$ 按下式计算：

$$V_{Rd,c} = \frac{2 \cdot M_{Rd,c}}{l_z} \quad (C-7)$$

$$l_z = a_0 - \frac{y_{s,nc}}{\tan \alpha_c} \quad (C-8)$$

- 式中：
- $M_{Rd,c}$ —— STC 层的抗弯承载力设计值，按照图 C.2.2.3-2 所示的计算模型计算：

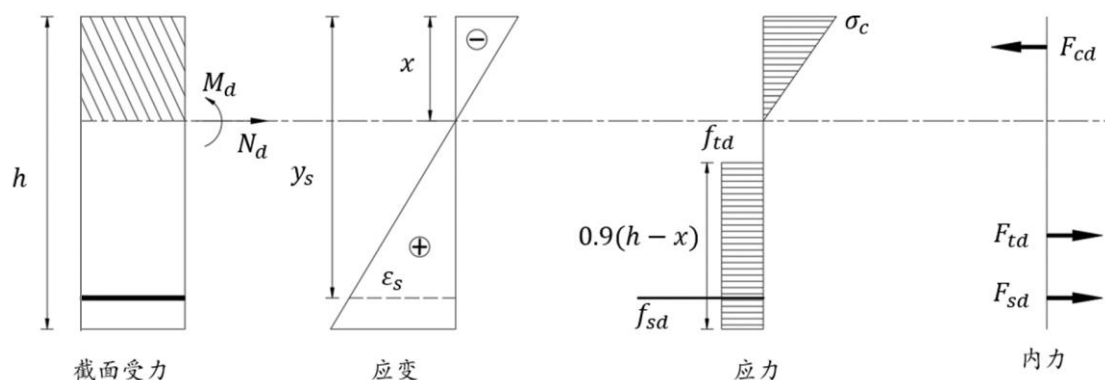


图 C.2.2.3-2 STC 层抗弯承载力计算模型

- l_z —— STC 层的有效长度；
 a_0 —— 抗剪设计截面与支座间的距离。

2 当 $h_c / h_{nc} < 0.1$ 时，可通过有限元模型进行分析。

C.2.3 疲劳计算

C.2.3.1 NC-STC 组合结构的疲劳计算应分别对材料和结构进行计算：

- 1 组合结构中 STC 材料的疲劳极限取值参照本规范条文 4.4.4 规定。
- 2 NC-STC 组合结构受弯疲劳极限计算：

$$M_{R,D} = 0.5 \cdot M_{Rd} \quad (C-9)$$

式中：
 $M_{R,D}$ —— 组合结构受弯时的疲劳弯矩；
 M_{Rd} —— 组合结构抗弯承载力设计值。

条文说明

本条文中系数 0.5 来源于编制团队前期研究成果（《Biaxial Flexural Fatigue Behavior of Strain-Hardening UHPFRC Thin Slab Elements》，International Journal of Fatigue, 2020；《Fatigue Behaviour of Bridge Deck Slab Elements Strengthened with Reinforced UHPFRC》，Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability, 2012）：STC 板及 NC-STC 组合梁的疲劳极限分别为 $0.54F_P$ 和 $0.5F_P$ 。因此本条结合上述研究成果，定义 NC-STC 组合结构的疲劳极限为 $0.5M_{Rd}$ ，能够确保结构工程安全。

C.2.4 正常使用极限状态计算

C.2.4.1 在正常使用状态下，STC 层表面的最大的裂缝宽度应不超过 0.05mm。

C.3 施工

C.3.1 NC-STC 界面可采用以下几种连接方式：

1 采用高压水枪喷射或其它方式凿除表面铺装层，露出 NC 结构层。确保完全清除可能减弱界面粘结性能的松动颗粒或物质（如润滑剂、油脂等），NC 表面粗糙度深度要求在 3mm 到 5mm 之间。

2 在 NC 表面植入栓钉或钢筋。

条文说明

不同的连接方式均需保证 NC 层与 STC 层有效结合，共同受力，且界面强度应高于 NC 层强度。若采用连接方式 1，应通过试验验证其可靠性。

C.3.2 新拌 STC 混合料应在预先洒水湿润过的 NC 表层上浇筑。NC 表层应湿润、清洁且无任何残留积水。严禁在大雨中浇筑 STC。

C.3.3 STC 浇筑完成后，应立即用塑料薄膜覆盖保护，避免失水干燥；随后进行自然养护或者蒸汽养护；在 STC 终凝后应立即进行洒水保湿养护（ ≥ 5 天）。

条文说明

STC 浇筑完成后，养护方式需根据工程实际情况及施工条件进行选择。无论采取何种养护方式，都需避免 STC 收缩引起的早期开裂问题。

本规范用语用词说明

1 本规范执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

2) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

3) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合现行《×××××》（×××）的规定”。

2) 当引用标准中的其他规定时，应表述为“应符合本规范第×章的规定”、“应符合本规范第×.×节的规定”、“应按规程第×.×.×条的规定执行。”。