住房和城乡建设部备案号：J×××××-2021 **DB**

**重庆市工程建设标准**

**DBJ50/T -×××-2021**

**超高性能轻型组合钢桥面结构技术标准**

**Technical standard for ultra-high performance light composite steel Bridge deck structure in Chongqing**

**（征求意见稿）**

**20\*\*-\*\*-发布 20\*\*-\*\*-\*\*实施**

**重庆市住房和城乡建设委员会 发布**

**重庆市工程建设标准**

**超高性能轻型组合钢桥面结构技术标准**

**Technical standard for ultra-high performance light composite steel Bridge deck structure in Chongqing**

**DBJ50/T-xxx-20**XX

主编单位：重庆市市政设计研究院有限公司

批准部门：重庆市住房和城乡建设委员会

施行日期：20XX年XX月XX日

**前言**

根据重庆市住房和城乡建设委员会《关于下达2019年度重庆市工程建设标准制定修订项目计划的通知》（渝建【2019】151号）文件要求，由重庆市市政设计研究院有限公司会同有关单位经过深入调查研究，参考和借鉴了国内、外相关标准，结合重庆市实际，认真总结实践经验，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本规程的主要技术内容是1.总则；2.术语和符号；3.材料；4.基本规定；5.正常使用极限状态设计；6.承载能力极限状态设计；7.剪力连接件；8.构造要求；9.施工；10.检验与验收

本标准由重庆市住房和城乡建设委员会负责管理，由重庆市市政设计研究院有限公司负责具体技术内容解释。在本规程的实施和应用过程中，希望各单位注意收集资料，总结经验，并将需要修改、补充的意见和有关资料反馈给重庆市市政设计研究院有限公司（地址：重庆市江北区洋河一路69号，邮编：400012，电话：023-67737337，邮箱：18908345656@189.cn），以便今后修订时参考。

本标准（规程、规范）主编单位、参编单位、主要起草人和审查专家：

主编单位： 重庆市市政设计研究院有限公司

主要起草人：

审查专家：

**目次**

[1 总 则 1](#_Toc57903468)

[2 术语和符号 2](#_Toc57903469)

[2.1 术 语 2](#_Toc57903470)

[2.2 符 号 3](#_Toc57903471)

[3 超高性能混凝土 6](#_Toc57903472)

[4 基本规定 11](#_Toc57903473)

[4.1 一般规定 11](#_Toc57903474)

[4.2 承载能力极限状态计算 13](#_Toc57903475)

[4.3 正常使用极限状态验算 14](#_Toc57903476)

[4.4 持久状况与短暂状况应力验算 15](#_Toc57903477)

[4.5 倾覆稳定计算 16](#_Toc57903478)

[4.6 疲劳计算 16](#_Toc57903479)

[4.7 设计流程和内容 17](#_Toc57903480)

[5 承载能力极限状态设计 18](#_Toc57903481)

[5.1 抗弯承载力计算 18](#_Toc57903482)

[5.2 抗剪承载力计算 20](#_Toc57903483)

[5.3 整体稳定计算 20](#_Toc57903484)

[5.4 疲劳验算 22](#_Toc57903485)

[6 正常使用极限状态设计 33](#_Toc57903486)

[6.1 一般规定 33](#_Toc57903487)

[6.2 应力验算 35](#_Toc57903488)

[6.3 栓钉内力验算 37](#_Toc57903489)

[6.4 UHPC抗裂验算 38](#_Toc57903490)

[6.5 挠度验算 39](#_Toc57903491)

[7 剪力连接件 40](#_Toc57903492)

[8 构造要求 42](#_Toc57903493)

[9 施工 44](#_Toc57903494)

[9.1 一般规定 44](#_Toc57903495)

[9.2 施工准备 44](#_Toc57903496)

[9.3 栓钉施工 45](#_Toc57903497)

[9.4 钢筋网施工 45](#_Toc57903498)

[9.5 UHPC浇筑施工 45](#_Toc57903499)

[9.6 接缝区及边界施工 46](#_Toc57903500)

[9.7 面层施工 47](#_Toc57903501)

[9.8 养护施工 47](#_Toc57903502)

[9.9 特殊气候条件下施工 48](#_Toc57903503)

[10 施工质量检查与验收 49](#_Toc57903504)

[10.1 一般规定 49](#_Toc57903505)

[10.2 施工前的材料与设备检查 49](#_Toc57903506)

[10.3 质量检验 50](#_Toc57903507)

[本规程用词说明 53](#_Toc57903508)

[引用标准名录 54](#_Toc57903509)

**1 总 则**

**1.0.1** 为规范超高性能轻型组合钢桥面结构技术在重庆的设计和施工，改善正交异性钢桥面结构及铺装的使用性能，减少后期维护，提高行车舒适性和耐久性，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于采用超高性能轻型组合钢桥面结构技术的新建和改建钢结构桥梁。

***条文说明：****界定本规范的适用工程性质，有特殊的桥梁或施工环境时，可依据合同规定参照使用本标准*

**1.0.3**  超高性能轻型组合钢桥面结构的UHPC层设计基准期与主体桥梁结构一致。

**1.0.4** 面层的铺装层应根据不同的材料规格，设计对应的使用寿命。

**1.0.5** 超高性能轻型组合钢桥面结构的设计和施工应满足环境保护和资源节约的有关要求。

**1.0.6**  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。

***条文说明：****桥梁工程施工质量的各阶段 除应符合本标准外，在施工过程中涉及到现行国家有关强制性要求执行的标准或标准条文均应贯彻执行。*

**2 术语和符号**

**2.1 术 语**

**2.1.1** 超高性能混凝土 Ultra-High Performance Concrete

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、高性能、高耐久性的水泥基复合材料，统称UHPC。

**2.1.2** 钢纤维 Steel Fiber

用钢质材料加工制成的短纤维。

**2.1.3** 栓钉 Shear Stud

起到钢板与超高性能混凝土层的连接作用。

**2.1.4** 正交异性钢桥面板

用纵横向互相垂直的加劲肋（纵肋和横肋）连同桥面盖板所组成的共同承受车轮荷载的结构。

**2.1.5** 结构层structure layer

UHPC混凝土层，位于正交异性钢桥面板与面层铺装之间，与正交异性钢桥面板组合成受力结构。

**2.1.6** 粘结层Bonding Layer

存在于UHPC混凝土层与最上层面层之间，起粘结作用。

**2.1.7** 面层Surface Course

位于超高性能轻型组合桥面结构顶面的沥青铺装层，简称面层。

**2.1.8** 超高性能轻型组合钢桥面结构 ultra-high performance light composite steel Bridge deck structure

由正交异性钢桥面板、栓钉、钢筋网、超高性能混凝土层组成。

**2.2 符 号**

**2.2.1** 材料性能

UHPC ——超高性能混凝土；

Ec ——超高性能混凝土的抗压/抗拉弹性模量；

Es ——钢材的弹性模量；

Er ——钢筋的弹性模量；

Gc ——超高性能混凝土的剪切性模量；

Gs ——钢材的抗剪弹性模量；

fck、fcd ——不配筋的超高性能混凝土的轴心抗压强度标准值、设计值；

fcu ,k ——边长 100mm 的超高性能混凝土立方体抗压强度标准值；

ffk、ffd ——超高性能混凝土抗弯拉强度标准值、设计值；

ftd ——不配筋的超高性能混凝土的轴心抗拉强度设计值；

**ε**crack,d ——不配筋的超高性能混凝土的轴心受拉初裂应变设计值；

**ε**td ——不配筋的超高性能混凝土的轴心受拉极限应变设计值；

——配筋的超高性能混凝土的名义弯拉应力容许值；

 ——接缝处配筋的超高性能混凝土的名义弯拉应力容许值；

fy ——钢材的屈服强度；

fd ——钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

fvd ——钢材抗剪强度设计值；

fccd ——钢材断面承压强度设计值；

 、——栓钉的屈服强度和抗拉强度；

fsk、fsd ——普通钢筋抗拉强度标准值、设计值；

、——普通钢筋抗压强度标准值、设计值；

—疲劳验算中，超高性能混凝土的容许应力幅；

—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；

Ns ——计算荷载下单个剪力连接件所承受的剪力；

——剪力连接件的抗剪承载力设计值；

V——剪力设计值；

——UHPC层的应力；

——钢主梁应力；

 ——标准疲劳车作用下，超高性能混凝土层的应力幅；

——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

Ac ——超高性能混凝土层的截面面积；

As ——钢主梁的截面面积；

Asc ——钢主梁受压区的截面面积；

Ast ——钢主梁受拉区的截面面积；

Ar ——正弯矩区超高性能混凝土层有效宽度范围内的纵向钢筋截面积；

Art ——负弯矩区超高性能混凝土层有效宽度范围内的纵向钢筋截面积；

 ——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；

 ——组合梁截面的换算截面惯性矩；

 ——超高性能混凝土层的有效宽度；

 ——超高性能混凝土层的厚度；

 ——栓钉纵向间距；

 ——栓钉横向间距。

**2.2.4**  计算系数及其他有关符号

γF ——疲劳荷载分项系数；

γM ——疲劳抗力分项系数；

μ——荷载冲击系数。

**3 超高性能混凝土**

**3.0.1** UHPC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。

***条文说明：****超高性能混凝土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。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UHPC的耐久性不利。*

**3.0.2** 水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175的规定，宜采用42.5级以上硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。

***条文说明：****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UHPC，便于掺用较多的矿物掺合料来改善混凝土的性能。*

**3.0.3** 粉煤灰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的规定，粒化高炉矿渣粉应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046的规定，硅灰应符合现行国家标准《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690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UHPC性能满足工程应用要求后方可使用。

***条文说明：****UHPC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UHPC的性能。本条规定了UHPC中掺入粉煤灰、硅灰的要求。*

**3.0.4** 骨料应为单粒级石英砂和石英粉，性能指标符合表3.0.4的规定。

**表3.0.4 石英砂和石英粉的技术指标（单位%）**

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 | 试验方法 |
| 二氧化硅含量 | ≥95 |
| 氯离子含量 | ≤0.02 |
| 硫化物与硫酸盐含量 | ≤0.50 |
| 云母含量 | ≤0.50 |

***条文说明：****UHPC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UHPC中石英砂和石英粉的质量要求。*

**3.0.5** 石英砂和石英粉的筛分试验应符合现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52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《水泥用硅质原料化学分析方法》JC/T 874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《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》的规定JGJ 52。

***条文说明：****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。*

**3.0.6** 粉石英砂应分为粗粒径砂（1.25～0.63mm）、中粒径砂（0.63～0.315mm）和细粒径砂（0.315～0.16mm)三个粒级。不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量限制值应符合表3.0.6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3.0.6 石英砂和石英粉的技术指标**

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

***条文说明：****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。*

**3.0.7** 减水剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076和现行国家标准《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，相关技术指标应符合表3.0.7的规定。

**表3.0.7 减水剂的技术指标**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 检测项目 | | 技术要求 |
| PH值 | | 5.0±1.0 |
| 密度g/cm3 | | 1.070±0.02 |
| 氯离子含量%（折固计） | | ≤0.6 |
| 硫酸钠含量%（折固计） | | ≤5.0 |
| 甲醛含量%（折固计） | | ≤0.05 |
| 碱含量%（折固计） | | ≤10 |
| 减水率% | | ≥25 |
| 泌水率比% | | ≤50 |
| 含气量% | | ≤6.0 |
| 抗压强度比% | 1d | ≥180 |
| 3d | ≥170 |
| 7d | ≥145 |
| 28d | ≥130 |
| 凝结时间差 | 初凝 | -90min～+90min |
| 终凝 |
| 收缩率比% | | ≤110 |
| 应说明对钢筋有无锈蚀危害 | | |

***条文说明：****粉煤灰国家现行标准《混凝土外加剂》GB 8076是我国关于外加剂产品的主要标准。国家现行标准《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119规定了不同品种外加剂的应用技术要求。UHPC的水泥用量大、水胶比很低，为保证UHPC的性能，宜用高性能减水剂，且减水率大于30%，相关技术指标应符合表3.0.7的规定。*

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

***条文说明：****UHPC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。*

**3.0.9** 钢纤维应采用镀铜高强度纤维，其技术指标应符合表3.0.9的规定。

**表3.0.9 钢纤维的技术指标**

|  |  |
| --- | --- |
| 检测项目 | 技术要求 |
| 抗拉强度 | ≥ 3000 MPa |
| 长度 | 13 ± 1 mm |
| 等效直径 | 0.18 - 0.23 |
| 长径比 | 60 - 80 |

***条文说明：****本条规定了UHPC用钢纤维的性能指标和检验方法。*

**3.0.10** 拌合用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63的规定。

***条文说明：****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。*

**3.0.11** UHPC材料的技术指标应符合表3.0.11的规定。

**表3.0.11 UHPC材料的技术指标**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 检测项目 | 技术要求 | |
| 标准值 | 设计值 |
| 抗弯拉强度 | 22 MPa | 15.2 MPa |
| 立方体抗压强度 | 120 MPa | 53.4 MPa |
| 轴心抗压强度 | 77.4 MPa |
| 轴拉强度 | 9 MPa | 7 MPa |
| 抗拉压弹性模量 | 37.6 GPa | 25.1 GPa |

***条文说明：****对UHPC材料各项技术指标进行规定以保障其性能。*

**3.0.12** 当施工中需要对UHPC进行分跨、分幅或分段浇筑时，应在先浇-后浇连接位置设置接缝。接缝处UHPC的名义弯拉应力容许值可按应按表 3.0.11中UHPC名义弯拉应力容许值的0.65倍取值。

***条文说明：****本条偏保守地，将接缝处UHPC的名义弯拉应力容许值取为0.65倍。*

**3.0.13** UHPC的抗剪强度可通过试验确定。当无试验资料时，可按公式3.0.13计算取值：

 （3.0.13）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *τ*c | — | UHPC的抗剪强度（MPa）； |
|  | *γ* | — | 计算系数，一般取0.095 ~ 0.121，本规范建议取0.095； |
|  | *f*ck | — | UHPC的轴心抗压强度标准值（MPa）。 |

***条文说明：****本条文UHPC抗剪强度的计算公式参考了文献《混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量》（施士异；1999）*

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

当无试验资料时，可按公式3.0.14计算取值：

 （3.0.14）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： ： | *E*c | — | UHPC的抗压/抗拉弹性模量（MPa）； |
|  | *f*cu,k | — | UHPC的立方体体抗压强度标准值（MPa）。 |

***条文说明：****本条文中UHPC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。*

**3.0.15** UHPC的剪切模量*G*c可按公式（3.0.15）取值：

 （3.0.15）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *G*c | — | UHPC的剪切模量（MPa）； |
|  | *E*c | — | UHPC的抗压/抗拉弹性模量（MPa）； |
|  | *μ*c |  | UHPC的泊松比，按照本规范第3.0.19条取值。 |

***条文说明：****本条文UHPC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。*

**3.0.16** UHPC的泊松比*μ*c可取为0.2。UHPC的温度线膨胀系数αc可取为1×10-5/℃。

***条文说明：****UHPC的实测泊松比为0.19，本条文中近似取0.2。*

**3.0.17** 在不同养护条件下，UHPC的收缩应变和徐变系数按表3.0.17取值。

**表3.0.17 钢纤维的技术指标**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 养护条件 | 收缩应变/με | 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 |

***条文说明：****本条文中UHPC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UHPC的后期收缩。*

**3.0.18** 钢筋在UHPC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6*d*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9*d*r，其中*d*r为钢筋的公称直径。

***条文说明：****本条文中钢筋在 UHPC 内锚固长度的取值参考了文献《Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections》（FHWA; 2013）的研究。*

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

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

**3.0.20** 钢材相关要求参考《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917的相关条款。普通钢筋相关要求本节参考了《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。

***条文说明：****所用的钢材和普通钢筋与钢-混凝土组合桥梁相同，因此参考《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917的相关条款。*

**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与剪力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与偶然状况的承载力、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。

***条文说明：****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。在作用与荷载的组合中，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。详见《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917中的第4.1.1条相关内容。*

**4.1.2**超高性能轻型组合桥面结构桥梁的设计基准期应为100年。设计使用年限应按表4.1.2采用。

**表4.1.2 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的设计使用年限**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 类别 | 设计使用年限（年） | 桥梁类型 |
| 1 | 30 | 小桥 |
| 2 | 50 | 中桥、重要小桥 |
| 3 | 100 | 特大桥、大桥、重要中桥 |

注：对有特殊要求结构的设计使用年限，可在上述规定基础上经技术经济论证后予以调整。

***条文说明：****超高性能轻型组合桥面结构桥梁的设计基准期和设计使用年限参考《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917中的第4.1.2条和第4.1.3条相关内容。*

**4.1.3** 超高性能轻型组合桥面结构中，UHPC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中的第4.1.5条取值。

***条文说明：****本条文参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917的中的第4.1.5条相关内容。*

**4.1.4** 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取值。材料线膨胀系数应按本规范第3.0.19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4.1.4所示的竖向温度梯度分布形式。温度梯度取值按照式（4.1.4）进行。

温升时，*T*2按照式（4.1.4-1）计算：

 （4.1.4-1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *h*c | — | UHPC层的厚度（mm）。 |

温降时，*T*2按照式（4.1.4-2）计算：

 （4.1.4-2）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *h*c | — | UHPC层的厚度（mm）。 | | |
|  | | | | |
| （a）断面尺寸示意 | | | | |
|  | | | |  |
| （b）温升 | | | | （c）温降 |

**图4.1.4 温度梯度计算图示**

***条文说明：****根据《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917中的第4.1.8条相关内容可知，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UHPC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，UHPC层始终落在第一段折线内。简化起见，本条文根据UHPC的设计厚度计算出UHPC底面的温度，并假设从UHPC底面至钢主梁底面，截面的温度保持恒定。*

**4.1.5** 超高性能轻型组合桥面结构的设计计算除应符合本规范的规定外，尚应符合现行行业标准《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917和《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。

***条文说明：****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。*

**4.1.6** 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实施。

***条文说明：****面层（铺装层）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** 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。

***条文说明：****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》GB50513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** 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：

 （4.2.2）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *γ*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。 |

***条文说明：****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** 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。

***条文说明：****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。*

**4.3 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下式计算：

 （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。 |

***条文说明：****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、频遇组合与准永久组合，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** 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 对短期挠度验算与UHPC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中长期效应组合；计算值不得超过本规范规定的各相应限值；

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UHPC收缩（当未采用高温蒸汽养护或未添加膨胀剂时）、徐变、基础不均匀沉降以及温度变化等引起的次效应。

***条文说明：****未采用高温蒸汽养护时，需增加膨胀剂，否则需要考虑UHPC的收缩影响。*

**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之和，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。

***条文说明：****本条参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917中的第4.3.3条相关规定。*

**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第6.4节的相关要求。

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

***条文说明：****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0.05 mm时，可认为裂缝对于超高性能混凝土的耐久性没有影响。*

**4.4 持久状况与短暂状况应力验算**

**4.4.1** 对短暂状况的设计，应计算构件在制作、运输以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，均应采用标准组合；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 UHPC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 UHPC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。

***条文4.1.1~4.4.3说明：****应力限值的取值源于工程实践经验，并与目前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 倾覆稳定计算**

**4.5.1** 超高性能轻型组合桥面结构桥梁的抗倾覆稳定计算应采用下式：

 （4.5.1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *γ*qf | — | 抗倾覆稳定系数，不应小于2.5； |
|  | *S*sk | — | 不平缓作用效应的标注组合； |
|  | *S*bk | — | 平衡作用效应的标注组合。 |

***条文说明：****结构的倾覆稳定是属于结构承载能力极限状态的问题，其破坏具有突然性与验证性。详细内容参考《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917中的第4.5.1条相关内容。*

**4.5.2** 计算倾覆稳定的汽车荷载及其组合应符合下列规定：

1 验证倾覆稳定的汽车荷载应采用现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60或《城市桥梁设计规范》CJJ 11中的车道荷载，集中荷载标准值应乘以1.2的系数；

2 汽车荷载横向应按相应规范的最不利位置布置，多车道桥梁的汽车荷载产生的效应不得折减；

3 汽车荷载应计入冲击作用；

4 应计入风荷载与汽车荷载的共同作用。

***条文说明：****同向两个车道以上的折减，对于倾覆影响不大，折减系数偏安全的取为1.0（不折减）；与汽车荷载同时作用的风荷载，可按工程所在地10年一遇和25 m/s风速中的小值计算。汽车荷载的冲击作用系数是基于支撑力的系数，宜适当取大。*

**4.6 疲劳计算**

**4.6.1** 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。

**4.6.2** 超高性能轻型组合桥面结构的疲劳计算应采用下式：

超高性能轻型组合桥面结构桥梁的抗倾覆稳定计算应采用下式：

 （4.6.2-1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | Δ*σ* | — | 应力幅；对于常幅疲劳，Δ*σ* = *σ*max *- σ*min；对于变幅疲劳，Δ*σ*可取为等效常幅应力幅； |
|  | [Δ*σ*] | — | 容许应力幅。 |

**4.6.3** 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范第5.4节的有关规定。

**4.6.4** 超高性能轻型组合桥面结构的构件与剪力连接件应进行疲劳验算。

**4.6.5** 剪力连接件的疲劳验算应符合本规范第7章的规定。

***条文4.6.1~4.6.5说明：****本规范的疲劳验算方法采用容许应力幅法，与现行有关标准一致，具体验算可参照相应钢结构规范。UHPC层和剪力连接件的疲劳验算应符合本规范的相关条文规定。*

**4.7 设计流程和内容**

**4.7.1** 超高性能轻型组合桥面结构的设计流程如图4.7.1所示：



**图4.7.1 超高性能轻型组合桥面结构设计流程示意图**

***条文说明：****设计流程来自目前已积累的实桥设计经验，可供设计人员参考。*

**4.7.2** 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-UHPC结合面剪力连接件的形式与布置间距；

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。

***条文4.7.1~4.7.2说明：****设计内容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** 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*rt*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*rt为负弯矩区UHPC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）。

***条文说明：****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）。*

**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UHPC层较薄，一般情况下均能满足*A*c*f*cd + *A*r*f*cd < *A*s*f*d，因此，塑性中和轴始终在钢主梁截面内（图5.1.2），抗弯承载能力应符合下列公式要求：



**图5.1.2 正弯矩塑性极限状态下，组合梁截面与应力图形**

 （5.1.2-1）

 （5.1.2-2）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *γ*0 | — | 桥梁结构重要性系数，按本规范第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 | — | UHPC层的截面面积（mm2）； |
|  | *A*sc | — | 钢主梁受压区的截面面积（mm2）； |
|  | *A*r | — | 正弯矩区UHPC层有效宽度范围内的纵向钢筋截面积（mm2）； |
|  | *A*s | — | 钢主梁的截面面积（mm2）； |
|  | *x*1 | — | UHPC层截面形心至钢主梁受拉区截面形心的距离（mm）； |
|  | *x*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）； |
|  | *x*3 | — | UHPC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 | — | UHPC的抗压强度设计值（MPa）； |
|  | *f*d | — | 钢材的抗拉强度设计值（MPa）； |
|  | *f*sd | — | UHPC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UHPC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，组合梁截面与应力图形**

 （5.1.3-1）

 （5.1.3-2）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *γ*0 | — | 桥梁结构重要性系数，按本规范第4.2.2条的规定取值； |
|  | *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 | — | UHPC层的截面面积（mm2）； |
|  | *A*sc | — | 钢主梁受压区的截面面积（mm2）； |
|  | *A*r | — | 正弯矩区UHPC层有效宽度范围内的纵向钢筋截面积（mm2）； |
|  | *A*s | — | 钢主梁的截面面积（mm2）； |
|  | *y*1 | — | UHPC 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 | — | UHPC层内钢筋截面形心至钢主梁受拉区截面形心的距离（mm）； |
|  | *f*td | — | UHPC的轴拉强度设计值（MPa）； |
|  | *f*d | — | 钢材的抗拉强度设计值（MPa）； |
|  | *f*sd | — | UHPC桥面板内纵向钢筋的抗拉强度设计值（MPa）。 |

***条文5.1.2~5.1.3说明：****按塑形理论计算超高性能轻型组合桥面结构在正、负弯矩作用下的极限承载能力。*

**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：

 （5.2.1-1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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：

 （5.2.2-1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *σ* | — | 钢主梁腹板计算高度边缘同一点上同时产生的正应力（MPa）； |
|  | *τ* | — | 钢主梁腹板计算高度边缘同一点上同时产生的剪应力（MPa）； |
|  | *f*d | — | 钢材抗拉强度设计值（MPa）。 |

***条文5.2.1~5.2.2说明：****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** 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 | 跨中无侧向支撑点的梁 | 跨中有侧向支撑点的梁 |
| 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。

***条文说明：****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。*

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

***条文说明：****在UHPC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**  钢主梁与UHPC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：

 （5.3.3-1）

 （5.3.3-2）

 （5.3.3-3）

 （5.3.3-4）

 （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 | — | 按本规范第5.1节规定计算的结构截面抗弯承载力（N•mm）； |
|  | *χ*LT | — | 超高性能轻型组合桥面结构侧扭屈曲的折减系数； |
|  | *ϕ*LT | — | 计算过程中简写符号； |
|  |  | — | 换算长细比； |
|  | *α*LT | — | 缺陷系数，应按表5.3.3-1和表5.3.3-2取值； |
|  | *M*Rk | — | 钢主梁腹板计算高度边缘同一点上同时产生的剪应力（MPa）； |
|  | *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）； |
|  | *f*y | — | 钢材的屈服强度（MPa）； |
|  | *W*n | — | 组合截面的净截面模量（mm3）。 |

**表5.3.3-1 缺陷系数*α*LT**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 屈曲曲线类型 | a | b | c | d |
| 缺陷系数*α*LT | 0.21 | 0.34 | 0.49 | 0.76 |

**表5.3.3-2 缺陷系数*α*LT**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 横截面形式 | 屈曲方向 | 屈曲曲线类型 |
| 轧制I形截面 | *h* / *b* ≤ 2 | a |
| *h* / *b* ＞ 2 | b |
| 焊接I形截面 | *h* / *b* ≤ 2 | c |
| *h* / *b* ＞ 2 | d |
| 其他截面 | — | d |

***条文说明：****参考《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** 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2种疲劳荷载模型：

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。

***条文说明：****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** 验算伸缩缝附近构件时，疲劳荷载应乘以额外的方法系数，放大系数Δ*ϕ*应按下式取值。

 （5.4.2-1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *D* | — | 验算截面到伸缩缝的距离（m）。 |

***条文说明：****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。*

**5.4.3** 疲劳荷载模型I与疲劳验算公式。

1 疲劳荷载模型I为等效的车道荷载。集中荷载为0.7*P*K，均布荷载为0.3*q*K。*P*K和*q*K按公路—I级车道荷载标准取值；应考虑多车道的影响，横向车道布置系数应按现行《公路桥涵设计通用规范》JTG D60的相关规定选用。

2 疲劳荷载模型I采用以下公式验算：

 （5.4.3-1）

 （5.4.3-2）

 （5.4.3-3）

 （5.4.3-4）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *γ*Ff | — | 疲劳荷载分项系数，取1.0； |
|  | *γ*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； |
|  | Δ*σ*p | — | 按疲劳荷载模型I计算得到的正应力幅； |
|  | Δτp | — | 按疲劳荷载模型I计算得到的剪应力幅； |
|  | Δ*σ*D | — | 正应力常幅疲劳极限，取值参考本规范第5.4.5和5.4.6条； |
|  | ΔτL | — | 剪应力疲劳截止限，取值参考本规范第5.4.5和5.4.6条； |
|  | *σ*pmax | — | 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正应力； |
|  | *σ*pmin | — | 将疲劳荷载模型I按最不利情况加载于影响线得出的最小正应力； |
|  | *τ*pmax | — | 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剪应力； |
|  | *τ*pmin | — | 将疲劳荷载模型I按最不利情况加载于影响线得出的最小剪应力。 |

***条文说明：****疲劳荷载模型Ⅰ适用于全局受力构件疲劳验算。*

**5.4.4** 疲劳荷载模型II与疲劳验算公式。

1 疲劳荷载模型II为单车模型，模型车轴荷载与分布规定如图5.4.4-1所示。



**图5.4.4-1 疲劳车模型II（m）**

2 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。

 （5.4.4-1）

 （5.4.4-2）

 （5.4.4-3）

 （5.4.4-4）

 （5.4.4-5）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *γ*Ff | — | 疲劳荷载分项系数，取1.0； |
|  | *γ*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； |
|  | Δ*σ*p | — | 按疲劳荷载模型I计算得到的正应力幅； |
|  | Δτp | — | 按疲劳荷载模型I计算得到的剪应力幅； |
|  | Δ*σ*D | — | 正应力常幅疲劳极限，取值参考本规范第5.4.5和5.4.6条； |
|  | *λ* | — | 损伤等效系数，*λ* = *λ*1·*λ*2·*λ*3·*λ*4，且*λ* ≤ *λ*max，其中*λ*max按图5.4.4-5取值； |
|  | *σ*pmax | — | 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正应力； |
|  | *σ*pmin | — | 将疲劳荷载模型II按最不利情况加载于影响线得出的最小正应力； |
|  | *τ*pmax | — | 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剪应力； |
|  | *τ*pmin | — | 将疲劳荷载模型II按最不利情况加载于影响线得出的最小剪应力。 |

3 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5.4.4-2。



**图5.4.4-2 疲劳荷载模型II中心线横桥向分布概率**

4 *λ*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5.4.4-3取值。当*l*大于80m时，按80m计，当*l*小于10m时，按10m计。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）跨中部分 | （b）支座部分 |

**图5.4.4-3 针对弯矩的*λ*1取值图**

5 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5.4.4-4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5.4.4-4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5.4.4-4所示），取验算截面所在跨的跨径值；

对于跨中部分截面（如图5.4.4-4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5.4.4-4 跨中部分与支承部分的范围划分**

6 *λ*2为交通流量系数，由下式计算确定：

 （5.4.4-6）

 （5.4.4-7）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *Q*0 | — | 疲劳荷载模型车II总重，为480kN； |
|  | *N*ly | — | 疲劳抗力分项系数，对重要构件取1.35，对次要构件取1.15； |
|  | *N*y | — | 按疲劳荷载模型I计算得到的正应力幅； |
|  | *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5.4.4-1 缺陷系数αLT**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 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 *λ*3为设计寿命系数，由下式计算确定：

 （5.4.4-8）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *t*Ld | — | 构件的设计使用寿命。 |

8 *λ*4为多车道效应系数，由下式计算确定：

 （5.4.4-9）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *k* | — | 慢车道和主车道数量和； |
|  | *Nj* |  | 每年在*j*车道行驶的重车车辆数； |
|  | *ηj* |  | 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 *λ*max根据图5.4.4-5取值。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）跨中部分 | （b）支承部分 |

**图5.4.4-5 针对弯矩的*λ*max取值**

***条文说明：****疲劳荷载模型Ⅱ适用于局部受力构件疲劳验算。*

**5.4.5** 疲劳验算时，应采用名义应力法或热点应力法，其中UHPC层的疲劳验算应采用名义应力法，钢主梁的疲劳验算宜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。

***条文说明：****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。*

**5.4.6** UHPC层的疲劳强度应符合以下规定：

1 UHPC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UHPC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UHPC的容许等效最大应力水平为0.48，200万次疲劳寿命时UHPC的容许等效最大应力水平为0.51。疲劳验算时，UHPC的设计等效最大应力水平应按照下式计算。

 （5.4.6-1）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *S*max | — | UHPC中的最大应力水平*σ*max / *f*tr； |
|  | *S*min |  | UHPC中的最小应力水平*σ*min / *f*tr； |
|  | *f*tr |  | 配筋UHPC的静力名义弯拉应力容许值。 |

***条文说明：****基于大连理工大学的相关研究得出此条数据。*

2 以容许等效最大应力水平0.48或0.51乘以表3.0.10配筋UHPC（含接头）的静力名义弯拉应力容许值，可得UHPC层的疲劳细节分类如表5.4.6所示。

**表5.4.6 UHPC层的疲劳细节与分类**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 500万次  疲劳强度（MPa） | 200万次  疲劳强度（MPa） | 细节位置与示意图 | 细节描述和施工要求 |
| 0.48 | 0.51 | UHPC层连续区域 | ① UHPC层连续浇筑。 |
|  |
| 0.48f | 0.51f | UHPC接缝区域 | ② 先浇-后浇交界区域，设置UHPC接缝。 |
|  |

**5.4.7** 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logΔ*σ*R - log*N*曲线和logΔ*τ*R - log*N*曲线（图5.4.7）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Δ*σ*c和Δ*τ*c定义。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）正应力幅 | （b）剪应力幅 |

**图5.4.7-1 *S-N*曲线**

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5.4.7 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） | 细节位置与示意图 | 细节描述与施工要求 |
| 74 | 100 | 顶板-纵肋焊接构造细节 | ① 满足*a* ≥ *t*的部分熔透坡口焊。 |
|  |
| 66 | 90 | ② 贴角焊或不满足①的部分熔透坡口焊。 |
| 83 | 112 | 纵肋对接焊接构造细节 | 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。 |
|  |
| 66 | 90 | 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。 |
| 118\* | 160\* | 横隔板弧形切口 | 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。 |
|  |
| 66 | 90 | 纵肋-横隔板焊缝（横隔板弧形切口起点位置） | ⑥ 位于纵肋-横隔板焊缝处，横隔板弧形切口的起点位置。 |
|  |
| 66 | 90 | 纵肋-横隔板焊缝（纵肋腹板中的焊缝端部位置） | ⑦ 位于纵肋-横隔板焊缝处，纵肋腹板中的焊缝端部位置。 |
|  |
| 54\*  (m=8) | 60\*  (m=8) | 栓钉 | ⑧ 计算栓钉的剪应力幅；疲劳验算宜采用名义应力法。 |
|  |
| 66 | 90 | 栓钉根部的钢面板 | ⑨ 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5.4.7-2 降低设计应力幅的计算方法**

**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。

***条文说明：****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** 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。

***条文说明：****短暂状况是指构件在制作、运输以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** 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在第4章中的相应限值。

***条文说明：****本条规定了持久状况与短暂状况一般应验算的效应内容。*

**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UHPC的收缩（当未采用高温蒸汽养护或未添加膨胀剂时）、徐变与温度等作用的效应。

***条文说明：****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。应力与变形应按照组合截面的形成方式以及对应的荷载或作用进行累计计算。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** 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UHPC均为理想线弹性体，必要时可以遵循本规范第3.0.10条考虑UHPC的非线性轴拉应力-应变关系。

2 组合桥面结构弯曲时，UHPC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：UHPC 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在一个局部模型中，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。

***条文说明：****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** 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UHPC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。

***条文说明：****在计算总体荷载效应时（第一体系），可以认为UHPC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UHPC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、环境温度以及运营状态（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** 计算中可偏安全地，不考虑UHPC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。

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

**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、《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中桥梁设计计算相关条文的规定。

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

**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UHPC层，剪力连接件，UHPC接缝与钢结构。

***条文说明：****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** 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UHPC层与钢主梁法向应力可按下列公式计算：

UHPC层顶面应力：

 （6.2.2-1）

钢主梁下翼缘应力：

 （6.2.2-2）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *σ*c | — | 剪力设计值（N）； |
|  | *σ*s | — | 钢主梁下翼缘应力（MPa）； |
|  | *Mk* | — | 截面弯矩值（N•mm）； |
|  | *n*0 | — | 钢材弹性模量与UHPC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（mm4）； |
|  | *y*c | — | UHPC 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）。 |

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

**表6.2.3 桥梁的安全等级**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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 |

***条文说明：****在超高性能组合桥面结构中，控制UHPC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UHPC层。本条列出了计算中应该重点关注的不利位置。*

**6.2.4** UHPC装配化施工或分段浇筑时，都会出现UHPC接缝。由于接缝处UHPC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。UHPC的接缝形式宜为以下两种方案之一。由于接缝处UHPC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。

1 含异型加强钢板的接缝方案（图6.2.4-1）。



**图6.2.4-1 UHPC接缝方案一：异型加强钢板（mm）**

2 矩形接缝方案（图6.2.4-2）。



**图6.2.4-2 UHPC接缝方案二：矩形接缝**

***条文说明：****超高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。接缝的布置位置应位于低拉应力区，甚至位于压应力区。*

**6.3 栓钉内力验算**

**6.3.1** 对于钢-UHPC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范的第7.1节。

***条文说明：****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** 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）**

***条文说明：****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 UHPC抗裂验算**

**6.4.1** 当UHPC的应力验算符合本规范第6.2节的有关规定，且UHPC的设计拉应力不大于表3.0.14规定的配筋UHPC的名义弯拉应力容许值时，可确保UHPC层的裂缝宽度小于0.05mm。

***条文说明：****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。*

**6.4.2** 当施工中需要对 UHPC 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范第6.2.4条的规定。当接缝处UHPC的设计拉应力不大于表3.0.15规定的接缝UHPC的名义弯拉应力容许值时，可确保接缝处UHPC层的裂缝宽度小于0.05mm。

***条文说明：****UHPC接缝的抗裂理念同第6.4.1条。*

**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中第6.3节计算。

***条文说明：****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** 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**

***条文说明：****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**

**7.0.1** 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UHPC与钢主梁能有效地组合和共同承担作用，而且还需满足UHPC层厚度薄这一重要特性。

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

**7.0.2** 超高性能轻型组合桥面结构中剪力连接件宜采用栓钉。

***条文说明：****本规范推荐的连接件形式是短栓钉。*

**7.0.3** 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。

***条文说明：****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。*

**7.0.4** 单个栓钉连接件的抗剪承载力设计值如下（栓钉剪断破坏）：

 （7.0.4）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 式中： | *N*v | — | 栓钉的抗剪承载力设计值（N）； |
|  | *E*c | — | UHPC的弹性模量（MPa） |
|  | *E*s | — | 栓钉的弹性模量（MPa） |
|  | *f*cu | — | 边长为100mm的UHPC的立方体抗压强度标准值（MPa）； |
|  | *A*stud | — | 栓钉钉杆截面面积（mm2）； |
|  | *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。 |

***条文说明：****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。*

**7.0.5** 剪力连接件疲劳验算细则应遵循本规范第5.4节的规定。

**7.0.6** 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范第5.4.2和5.4.3条的规定。

***条文7.0.5~7.0.6说明：****剪力连接件的疲劳计算细则在本规范第5.4节中。*

**7.0.7** 为确保UHPC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，UHPC层底面的最大拉应力不得超过其轴拉强度（不考虑配筋），按本规范第3.0.10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。

***条文说明：****本条建议采用弹性设计法来计算剪力连接件的布置数量。*

**8 构造要求**

**8.0.1** 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（UHPC层）的厚度不宜小于35mm；

3 面层（铺装层）的厚度不宜小于10 mm，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）。

***条文说明：****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UHPC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。*

**8.0.2** 钢筋网的设置应符合下列规定：

1 最小UHPC保护层厚度不应小于10 mm，宜采用15 mm；

2 钢筋直径不宜小于10 mm，钢筋中心间距不宜大于50 mm；

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 UHPC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）UHPC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%。

***条文说明：****UHPC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。*

**8.0.3** 栓钉的设置应符合下列规定：

1 栓钉的钉柱直径不宜小于9 mm；

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250 mm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150 mm。

4 本规范推荐的栓钉布置间距如下：

1）当桥面纵肋腹板间距≤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。

***条文说明：****栓钉的作用是确保 UHPC层与钢板结合紧密，充分发挥组合板的作用。*

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

1 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。

***条文说明：****本条规定了UHPC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** UHPC层上表面的处理，按不同的铺装，采用不同的界面处理技术。

***条文说明：****UHPC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** 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** 施工前应对相关人员进行培训，建立质量控制体系，并制定详细的施工组织设计，保证对施工质量的有效控制。

**9.1.3** 钢桥面铺装施工前，应对全桥实行封闭。施工时，除铺装施工必需的机具外，任何下层工作面都不允许其他车辆和机具通行，必须确保下层工作面洁净、干燥，切实防止施工过

程中对下层表面的污染，同时保证施工过程中桥面铺装的整齐性。

**9.1.4** 施工前，宜先进行试验段施工，待每道工序完成后对其进行检查，检查不合格时需返工，直到检验合格为止，确保施工设备及施工工序的正确性。

**9.1.5** 工期安排应避开雨季施工，施工的每道工序均不得在雨天进行，施工中遇到下雨时应及时停工，待消除雨水带来的危害后才能继续施工，施工宜在 10℃以上，且不宜在夜间施工。

**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** 本规程未规定的按国家现行相关标准执行。

***条文说明：****本节规定了超高性能轻型组合桥面结构的施工要点，承担施工、检测、监理工作的单位应具有相应的资质，人员应具有相应的资格。*

**9.2 施工准备**

**9.2.1** 对于新建和存在较大面积维修的桥梁，施工前须对桥面钢板进行喷砂除锈处理，除锈等级不小于Sa2.5级，粗糙度不小于60~100um。对子小面积维修和无法进行喷砂除锈的桥梁，其桥面钢板可采用打磨等其他工艺进行除锈。

**9.2.2** 施工前，应根据工程所在地的实际情况制定施工组织方案。

**9.2.3**  干拌产量应足以提供现场的湿拌量，以免耽误工期。干拌完成后装入贮存桶注意防潮，运输过程严格防止潮湿、扬尘等问题发生。运输至施工现场材料堆放区做好防潮、防尘措施。

**9.2.4** 施工前应对材料、设备最好检验工作。

***条文说明：****本节规定了超高性能轻型组合桥面结构的施工前的注意事项，应予以重视。*

**9.3 栓钉施工**

**9.3.1**  栓钉焊接前，采用墨线在桥面板上弹出栓钉位置。

**9.3.2** 应对每个栓钉位置进行局部打磨，直径为3~5cm，确保焊接处钢面板表面平整、光滑。

**9.3.3**  在焊接栓钉时，应符合下列规定：

1 应根据设计要求对栓钉位置进行定位标注，确保栓钉位置。

2栓钉与桥面钢板纵、横向对接焊缝冲突时，可适当调整栓钉位置，焊接部位需偏离主梁拼接焊缝不少于2cm。

3 栓钉焊接采用电弧螺柱焊，焊接前通过焊接工艺评定确定焊接电流、电压、焊接时间等工艺参数。

4 焊接完成后，需进行敲击检查，采用锤子平击钉帽；若敲击声音响脆、焊缝位置无裂缝、栓钉无脱落迹象，可认为焊接合格；否则，需敲除重焊。

5 桥面潮湿或雨雪天气不得进行栓钉焊接

**9.3.4**  焊接完栓钉后，应在钢桥面板四周区域进行防腐涂装，涂装区域尺寸宜不小于0.5m。

**9.3.5**  栓钉焊接及其他施工应符合现行国家标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650-2020的有关规定。

***条文说明：****本节规定了栓钉的施工要点，应确保栓钉的定位、焊接的精度。*

**9.4 钢筋网施工**

**9.4.1**  纵向钢筋宜设置在下层，横向钢筋设置在上层。

**9.4.2**  钢筋铺设前，应在钢桥面上摆放好钢筋垫块。

**9.4.3**  钢筋的搭接可采用焊接，焊接方式应符合相关规范规定。

**9.4.4**  接缝区域的钢筋网进行加密。如钢筋位置与栓钉布置有冲突，可适当调整钢筋位置。

***条文说明：****本节规定了钢筋网的施工要点。*

**9.5 UHPC浇筑施工**

**9.5.1** 加工后的干混料运送至现场后应符合下列规定：

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 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。

3 浇筑前应对钢桥面板进行润湿，但不可有积水。

**9.5.2** 超高性能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。

**9.5.3**  场内输送布料宜采用专用布料机均匀、准确布料。

**9.5.4**  宜采用专用摊铺机或振平梁摊铺，使模板内各部位混凝土摊铺平整、振捣密实，同时宜采用平板振动器进行辅助振捣，避免出现拌合物离析、分层以及纤维裸露出结构表面的情况。

***条文说明：****UHPC的浇筑施工应确定各工序及设备正常工作的基础之上进行。*

**9.6 接缝区及边界施工**

**9.6.1** 接缝区应在钢桥面板顶设置异型加强钢板，钢板设置应满足以下规定：

1 加强钢板应根据纵向接缝或横向接缝分别设置在相邻两横隔板或两腹板跨中位置。

2 应确保该区域的钢桥面板清洁、平整、光滑。

3 应在接缝位置设置竖向模板，保证模板稳定。

4 湿接缝浇筑前应对接缝面进行凿毛处理，确保有大量钢纤维裸露。

5 加强钢板与钢桥面板可采用搭接角焊缝连接。

**9.6.2** UHPC层与边界的施工应满足以下规定：

1 边界遇钢护栏或钢制构筑物时，应焊接U形钢筋，钢筋两肢与UHPC层内钢筋连接，形成整体。

2 边界遇混凝土构筑物时应对其进行植筋，植筋接头与UHPC层内钢筋连接，形成整体。

***条文说明：****遇接缝及边界施工时按本条执行。*

**9.7 面层施工**

**9.7.1** 铺装层的施工应符合现行国家标准《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40-2004的有关规定。

**9.8 养护施工**

**9.8.1** 超高性能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。

**9.8.2** 超高性能混凝土摊铺完成后，应及时喷水雾使UHPC结构层处于湿润状态，后采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，不宜损坏超高性能混凝土，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 超高性能混凝土终凝后（一般为48小时），应撤除养生薄膜并及时开始高温蒸汽养护。

**9.8.3** 高温蒸汽养护宜通过蒸汽锅炉、蒸汽管道和蒸汽养护棚等设施实现，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 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。

**9.8.4** 高温蒸汽养护结束后，应检查UHPC结构层外观，发现有局部变形部位，应采用打磨机打磨，确保UHPC层表面平整。

**9.8.5** 面层铺装前应在UHPC结构层上喷涂粘结层，粘结层宜采用改性乳化沥青、水性环氧沥青等。

***条文说明：****超高性能混凝土结构层施工完毕后均应进行养护作业。*

**9.9 特殊气候条件下施工**

**9.9.1** 施工遇特殊天气时应符合下述规定：

1 遇降雨、大风等不良天气环境时，不得进行浇筑施工。

2 雨期施工时应准备好防雨棚、塑料布等防雨措施。

3 夏季施工，应通过洒水保湿、避开高温时间段等措施使混凝土拌和物的温度不得超过35℃。夏季高温季节施工时，应随时加测温度。

4 冬季施工，当施工气温低于5℃时，应停止施工。当施工气温处于5℃~10℃时，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。

***条文说明：****本节规定了特殊气候下的施工注意事项。*

**10 施工质量检查与验收**

**10.1 一般规定**

**10.1.1** 钢桥面铺装施工应根据全面质量管理的要求，建立和健全有效的质量保证体系，对施工各阶段的质量进行检查、控制，达到所规定的质量标准，确保施工质量的稳定性。

**10.1.2**  钢桥面铺装施工除施工单位进行自检外，工程监理单位应按有关规定进行质量检查与控制，并由业主和质量监督部门认可的钢桥铺装设计研究单位配合质量检测机构对钢桥铺装质量进行监督检查和验收。

**10.1.3** 所有与钢桥铺装施工有关的原始记录，如试验检测、计算数据和声像资料等，均应如实保存。

***条文说明：****工程验收是一项非常重要的控制环节，对特大型桥梁工程宜邀请一些专家以个人名义参加，使验收过程更加公正、科学反应实际质量水平。*

**10.2 施工前的材料与设备检查**

**10.2.1**  工程开工前必须检查材料来源和质量。

1 防锈漆、栓钉、UHPC原材料、面层沥青等材料来源应限定于通过设计单位试验认证的材料供应商范围内。

2 对于集料应检测生产单位的生产条件、加工机具和覆盖层的清理情况。

3 所有铺装用材料，在施工前应取样由业主指定的有资质的试验检测机构进行检测，提出试验检查报告，证明被检材料与工程合同要求的符合性，经质量认可后方可使用。

**10.2.2** 施工前集料的质量检查应以同一料源、同一次购进的相同品种的集料为一批检查。集料试验的取样数量与频率应按现行试验规程的规定，每批集料的质量应符合相关规范及本标准的规定。

**10.2.3** 材料到场后，应根据材料的特性按相应的规定储存与管理。

**10.2.4** 施工前应对打砂机具、拌和厂、运输搅拌罐、路面工程施工机具和设备的配套情况、性能、计量精度等进行检查。

**10.2.5** 各种原材料试验结果及混合料配合比设计结果、施工机具和设备的检查结果，应在使用前规定的期限内向监理工程师或质量监督部门提出止式报告，待取得正式认可后，方可使用。

***条文说明：****各材料、设备等检查过程及结果应记录在册，供后期使用。*

**10.3 质量检验**

**10.3.1** 对旧钢桥桥面铺装翻修施工时，桥面清理除锈后表面应光亮、清洁和干燥，桥面板应无损伤和坑洞，且应满足表10.3.1的规定：

表 10.3.1 桥面清理除锈要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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 200m2 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 100m2 检测 1 处 |
| 4 | 桥面清洁度 | ≥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 200m2 检测 1 处 |
| 5 | 桥面粗糙度 | 满足设计要求 | 比较样块法，G B/T 13288《涂装前钢材表面粗糙度等 级的评定》，每 200m2 检测 1 处 |

**10.3.2** 焊接栓钉除应按有关技术要求和操作规程实施外，还应符合表10.3.2的规定：

表 10.3.2 栓钉焊接实测要求

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项 次 | 检查项目 | 允许偏差 | 检测方法和频率 | 要求 |
| 1 | 栓钉高度 | ≤3mm | 钢尺测量，每 50m2 检测 1 处 | 按设计图纸 |
| 2 | 栓钉倾角 | ≤10° | 钢尺及量角器测量，每 50m2 检测 1 处 | 90° |
| 3 | 栓钉间距 | ≤10mm | 钢尺测量，每 50m2 检测 1 处 | 按设计图纸 |
| 4 | 焊缝可靠性 | ≤5% | 重锤平击钉帽，每 50m2 检测 1 处 | 97.5% |

**10.3.3**  钢筋网检验

1 钢筋网应符合设计要求和国家现行标准，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。

2 钢筋网与钢桥面之间应铺设等尺寸的垫块，垫块应与钢筋网绑扎牢固。

3 钢筋铺设完后，应对钢筋网高度、间距等应符合表10.3.3的规定，不符合要求时，应进行局部调整。

表 10.3.3 钢筋网铺设要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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 100m2 检测 1 处 |
| 2 | 钢筋网高度 | ≤3mm | 钢尺测量，每 100m2 检测 1 处 |
| 3 | 钢筋网间距 | ≤10mm | 钢尺或游标卡尺测量，每 100m2 检测 1 处 |

**10.3.4** UHPC摊铺施工要求

1 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。

2 UHPC摊铺应能填充满栓钉与钢筋网之间的间距。

3 UHPC层摊铺实测要求应满足表10.3.4的规定：

表 10.3.4 UHPC层摊铺施工要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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UHPC的底部，以直尺测量钢丝的浸润深度，每 40m2 检测 1 处 |
| 2 | 桥面纵、横坡 | ≤0.2% | 水准仪、皮尺测量，每 40m2 检测 1 处 |
| 3 | 平整度 | ≤3mm | 3m 铝合金直尺，每 40m2 检测 1 处 |

**10.3.5** 养护要求

1 UHPC结构层宜进行高温养护，养护后，结构层应均匀完好，且无收缩裂纹。

2 养护要求应满足表10.3.5的规定：

表 10.3.5 UHPC 层高温蒸汽养护实测项目

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

**10.3.6**  沥青铺装层施工及验收应符合现行国家标准《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40-2004的有关规定外，尚应符合表10.3.6的规定。

表 10.3.6 沥青铺装层施工要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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 200m2 检测 1 处 |
| 3 | 平均厚度 | ≤3mm | 按沥青混凝土实际用量推算每 200m2 检测 1 处 |
| 4 | 铺装层抗滑性能 | ≤5% | 摆式仪法，每 200m2 检测 1 处 |
| 5 | 桥面纵、横坡 | ≤0.2% | 水准仪、皮尺测量，每 200m2 检测 1 处 |

***条文说明：****本节规定了超高性能组合桥面结构各工序的质量检验内容及指标，每完成一道工序后应及时对其进行检验，确保质量后再进行下一道工序。*

**本规程用词说明**

**1** 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：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

**2**）表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

**3**）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

**4**）表示有选择，在一定条件下可以这样做的：采用“可”。

**2** 规程中指明应按其他有关标准执行时，写法为：“应符合……的规定（或要求）”或“应按……执行”。

**引用标准名录**

《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

《钢筋混凝土用热扎带肋钢筋》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 3362

《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