

## 波形钢板-UHPC 组合桥面板结构截面优化

孙 瑜<sup>1</sup>, 王焕然<sup>1\*</sup>, 王 飞<sup>2</sup>, 朋 茜<sup>2</sup>

(1. 宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波工程学院 浙江省土木工程工业化建造工程技术研究中心, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 对实腹式波形顶板-UHPC(超高性能混凝土)组合桥面板进行了改进, 采用空腹式结构建立波形钢板-UHPC 组合桥面板有限元模型, 研究 UHPC 层厚度、波形钢板厚度、波形长度、下缘板宽度和波形高度等截面参数变化对组合桥面板受力特性的影响, 并确定其合理取值范围. 在此基础上, 通过理想点法对参数组合进行优化, 得到合理的参数匹配. 研究结果表明: 相较于实腹式组合桥面板, 优化后的组合桥面板自重减小 35%, 钢板弯折处应力减小 16%; 相较于正交异性钢板桥面板, 桥面板用钢量减小 7%, 顶板与 U 肋连接位置应力减小 47%.

**关键词:** 组合结构; 波形钢板; 超高性能混凝土; 桥面板; 参数优化

**中图分类号:** U443.32

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2020) 03-0105-06

近年来, 我国道路交通压力与日俱增, 超限超载等问题突出<sup>[1]</sup>. 正交异性钢桥面板在局部轮载直接作用下, 相互连接且相互约束部位和几何不连续部位会出现应力集中, 并在反复荷载作用下逐渐扩展成疲劳裂缝<sup>[2-3]</sup>. 因此, 解决疲劳开裂的关键是减少这些部位的应力集中.

文献[4-5]提出在正交异性钢板上铺设 UHPC. 文献[6]研究表明, 由于 UHPC 具有超高的力学性能和耐久性, 可通过增加桥面板刚度来减缓整桥受力, 从而减少钢板疲劳易损部位的应力集中程度. 文献[7-8]提出加大 U 肋断面尺寸, 减少焊缝数量, 可改善结构疲劳性能. 由于顶板与 U 肋交点是疲劳裂缝最易发生部位, 上述方法仍不能有效解决该疲劳问题. 对此文献[9]提出了用折形钢板代替传统顶板-U 肋结构, 通过减少几何构型不连续部位和焊缝数量来改善结构疲劳. 但在钢板夹角位置仍易出现应力集中.

波形钢板是折形钢板的一种改进型式, 钢板夹角位置通过弯折处理能有效减少应力集中. 目前波形钢板在桥梁工程中主要应用于箱梁腹板和路侧护栏结构<sup>[10]</sup>. 文献[11]提出用波形钢板与普通

混凝土板组合, 通过减小焊接残余应力来降低结构的应力集中. 为了更好地改善桥面板的力学性能, 文献[12-13]提出在波形钢板上铺设 UHPC, 将 UHPC 高强度和波形钢板少焊缝的特点相结合, 既可提高结构强度又能有效解决桥面板疲劳问题. 但这类实腹式组合桥面板对 UHPC 用量需求大, 会增加结构自重和造价.

基于实腹式组合桥面板, 本文考虑用 UHPC 板代替填充在钢板上的 UHPC, 这种改型既可保留 UHPC 超高的抗拉和抗压性能, 又可通过波形钢板焊缝数量和几何不连续位置少的特点有效控制构造细节的应力集中问题. 波形钢板和 UHPC 板通过剪力连接件连成一个整体, 并在 UHPC 层内配置钢筋网以提高材料的抗拉强度, 波形钢板-UHPC 组合桥面板(以下简称组合桥面板)整体还包括铺筑在 UHPC 层上的黏结层和面层(图 1). 采用有限元软件 ANSYS 建立组合桥面板的局部模型, 分析 UHPC 层厚度、波形钢板厚度、波形长度、下缘板宽度和波形高度等参数组合对结构力学性能的影响; 并基于理想点法, 以抗弯承载力和抵抗弹性变形能力为指标, 确定合理的截面尺寸. 最后选取实

收稿日期: 2019-09-25.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51478437); 浙江省自然科学基金(LQ20E080012, LQ20E080013).

第一作者: 孙瑜(1994-), 女, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 结构力学. E-mail: sunyuachiyu@qq.com

\*通信作者: 王焕然(1976-), 男, 河南睢县人, 博士/副教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: wanghuanran@nbu.edu.cn

腹式组合桥面板和正交异性钢桥面板与优化后的组合桥面板进行力学性能对比。

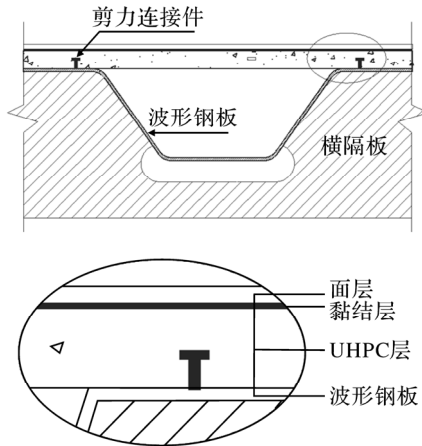


图1 波形钢板-UHPC 组合桥面板

## 1 设计模型

建立组合桥面板的局部模型,分析不同荷载工况下的应力分布,并定义应力较大的节点作为易出现破坏的关注细节,即截面参数分析的关注对象。

### 1.1 模型参数

在有限元模型中设钢结构的弹性模量为  $2.10 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.3,采用 4 节点壳单元 Shell 181 模拟;UHPC 层的弹性模量为  $4.26 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.2,采用 8 节点实体单元 Solid 65 模拟。通过设置单元实常数考虑钢筋的作用<sup>[8]</sup>。模型不考虑钢板和 UHPC 之间的滑移效应,为防止钢板发生掀起,壳单元和实体单元采用耦合形式,面层的影响以自重方式作用在桥面板上。

为了使模型受力情况尽可能与结构实际受力相似,并控制单元数量不至于过多,模型横桥向取 7 个完整波段,纵桥向取 1 个横隔板间距。横隔板可视为竖向支座约束,在与横隔板垂直的 2 个平面上,约束顶板节点的竖向平动自由度,并约束 U 肋节点的竖向和横向平动自由度及绕纵轴(Z 向)和横轴(X 向)的转动自由度。在横隔板所在的平面上,约束钢板节点的竖向和纵向平动自由度以及绕竖轴(Y 向)和横轴的转动自由度,如图 2 所示。

### 1.2 荷载工况

桥面板应力分布的局部性较强,纵横向影响线较短,同一车辆轴重间的相互影响可忽略不计<sup>[14]</sup>。

本文参考文献[9,15]在桥面板研究中采用单点加载形式,根据文献[16]车辆荷载的后轴单轮进行加载( $P=70$  kN)。荷载组合分项系数  $k_1=1.2$ ,车轮着地面积  $600 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ;考虑车辆局部冲击效应,取分项系数  $k_2=1.4$ 。

桥面板体系计算时先确定最不利荷载的位置,参考文献[8]有关传统正交异性钢桥面板体系的计算方法,车轮荷载分别在横桥向按 U 肋间、骑 U 肋和正 U 肋 3 种工况进行加载,结果如图 3 所示。车轮荷载作用在正 U 肋时,UHPC 拉应力最大,对结构受力最不利。因此,按正 U 肋加载工况进行分析。

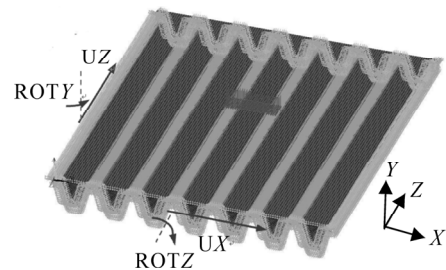


图2 局部有限元模型

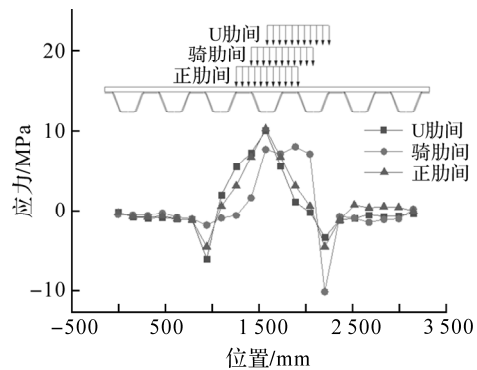


图3 不同工况下横桥向应力分布

### 1.3 关注细节

选取 UHPC 层直接受轮载作用位置、波形钢板弯折处和下缘板位置,将这些应力较大的细节作为易出现破坏的关注细节,具体位置和参数见表 1 和图 4。

表1 关注的细节位置

| 应力符号       | 符号含义描述                        | 应力类型       |
|------------|-------------------------------|------------|
| $\sigma_1$ | 位置 1 <sup>#</sup> 处 UHPC 的压应力 | 纵桥向应力      |
| $\sigma_2$ | 位置 2 <sup>#</sup> 处 UHPC 的拉应力 | 纵桥向应力      |
| $\sigma_3$ | 位置 3 <sup>#</sup> 处钢板的拉应力     | Mises 等效应力 |
| $\sigma_4$ | 位置 4 <sup>#</sup> 处钢板的拉应力     | Mises 等效应力 |

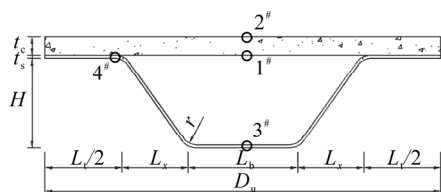


图4 组合桥面板关注细节和参数示意图

## 2 截面参数分析

以桥面板的抗弯承载力和抵抗弹性变形的能力为控制指标,用控制单参数变化的设计方法确定结构合理的构造参数。选取UHPC层厚度 $t_c$ 、钢板厚度 $t_s$ 、下缘平钢板长度 $L_b$ 、单波长度 $D_u$ 和波形钢板高度 $H$ 为主要设计指标。根据规范<sup>[17]</sup>,下缘平钢板长度等于上缘平钢板长度,即 $L_b=L_t$ ,转角半径 $r=15t_s$ 。

参考传统正交异性钢桥面板中的纵肋尺寸<sup>[18-19]</sup>,并结合波形钢腹板的几何尺寸<sup>[17]</sup>,拟定组合桥面板基准尺寸 $t_c$ 、 $t_s$ 、 $L_b$ 、 $D_u$ 、 $H$ 分别取值为50、10、150、450、280 mm。

### 2.1 UHPC层厚度

UHPC层厚度 $t_c$ 变化范围为35~90 mm,增幅 $\Delta=5$  mm,计算结果如图5所示。从图5可看出:增大UHPC层厚度对结构受力有利,随着 $t_c$ 的增大,4个关注细节位置的应力呈线性减小,其中 $\sigma_4$ 影响最大,厚度增大25 mm,应力减小47%。由于增大 $t_c$ 会增大结构自重,对桥梁受力不利。因此当 $t_c>60$  mm后,力学性能受 $t_c$ 变化的影响变小, $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 降幅均为9%, $\sigma_3$ 和 $\sigma_4$ 趋于稳定。

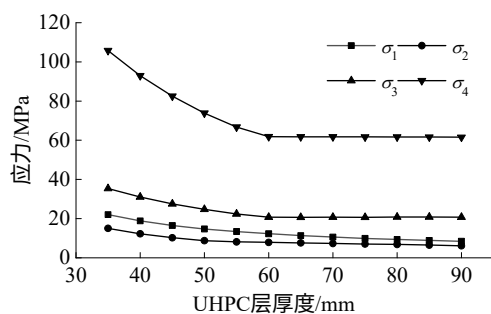


图5 UHPC厚度—应力关系

### 2.2 波形钢板厚度

波形钢板厚度 $t_s$ 变化范围为6~30 mm,增幅 $\Delta=3$  mm,计算结果如图6所示。从图6可看出:增大波形钢板厚度对结构受力有利。随着 $t_s$ 的增大,4个关注细节位置的应力减小,其中对 $\sigma_3$ 和 $\sigma_4$ 影响较

大,厚度增大10 mm,应力减小57%。当 $t_s>18$  mm后,力学性能受 $t_s$ 变化的影响变小,4个关注细节应力降幅分别为10%、5%、40%和90%。此外,钢板厚度还需满足机械加工相关要求<sup>[20]</sup>。

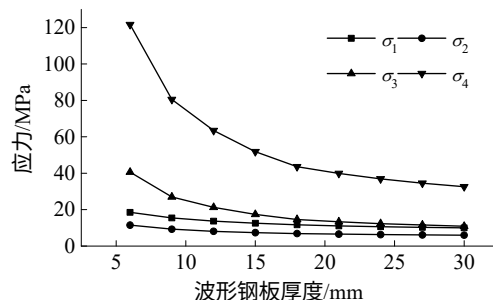


图6 钢板厚度—应力关系

### 2.3 下缘钢板宽度

波形钢板下缘平钢板宽度 $L_b$ 变化范围为120~270 mm,增幅 $\Delta=8$  mm,此时 $D_u$ 取值固定,计算结果如图7所示。从图7可看出:随着 $L_b$ 的增大, $\sigma_3$ 和 $\sigma_4$ 以2%和6%的幅度线性增大。 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 始终变化很小,说明桥面板受力对 $L_b$ 变化不敏感。

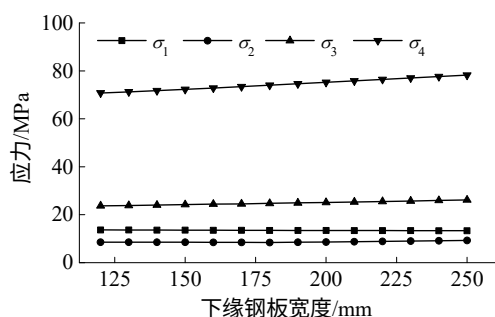


图7 下缘钢板宽度—应力关系

### 2.4 波形长度

单个波形长度 $D_u$ 变化为390~900 mm,增幅 $\Delta=30$  mm,此时 $L_b$ 取值固定,计算结果如图8所示。从图8可看出:关注细节的应力对 $D_u$ 变化非常敏感,增大波形长度对结构受力不利。随着 $D_u$ 增大,

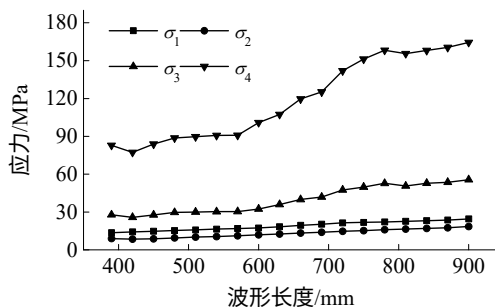


图8 波形长度—应力关系

$\sigma_1$  和  $\sigma_2$  始终以 3% 的幅度线性增大; 在  $D_u$  超过后轮着地宽度 600 mm 后,  $D_u$  增加 180 mm,  $\sigma_3$  最大增加了 63%;  $D_u=900$  mm 时,  $\sigma_4$  有最大值, 增幅为 13%。

## 2.5 波形高度

波形高度  $H$  变化范围为 70~310 mm, 增幅  $\Delta=20$  mm, 计算结果如图 9 所示。从图 9 可看出: 增大波形高度对结构受力有利。随着  $H$  的增大, 4 个关注细节的应力减小, 其中  $\sigma_3$  和  $\sigma_4$  影响较大,  $H$  增大 120 mm, 应力均减小 53%; 此时  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  均以 7% 的幅度线性减小。  $H>230$  mm 后,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  趋于稳定,  $\sigma_4$  有缓慢增长趋势, 增幅为 8%。

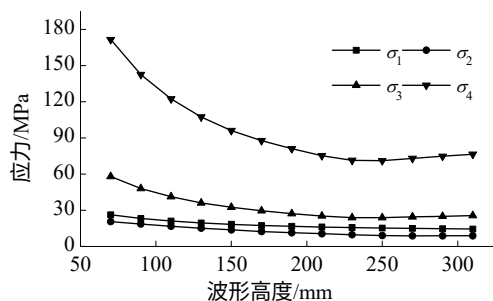


图 9 波形高度—应力关系

## 3 最优截面研究

通过建立有限元模型, 得到局部车轮荷载作用下单参数变化对结构力学性能的影响。定义一个评价函数, 将多目标的优化问题简化为单一目标的优化问题, 得到最优截面构造尺寸, 并与实腹式组合桥面板和正交异性钢桥面板进行对比。

### 3.1 目标函数

采用理想点法<sup>[21]</sup>构造评价函数。目标函数选取 5 个截面参数为设计变量, 选择的参数样本具有代表性, 且均匀分布在该参数的取值范围(表 2)。

表 2 参数变化范围

| 参数  | $t_c$ | $t_s$ | $L_b$ | $D_u$ | $H$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-----|
| 最大值 | 70    | 21    | 150   | 480   | 230 |
| 最小值 | 55    | 12    | 120   | 390   | 170 |
| 增幅  | 5     | 3     | 10    | 30    | 20  |

根据正交试验的方法, 影响因素共 5 个, 根据每个因素的变化范围可以确定因素水平为 4。因此, 可以构造  $L_{16}(4^5)$  正交表<sup>[22]</sup>, 见表 3。

本文的评价指标包括 4 个应力指标, 考虑到工程实际, 混凝土较钢板易发生破坏, 且混凝土抗拉

性不足以抗压性, 因此混凝土的抗拉性优先考虑。同时, 因 4#钢板易发生破坏, 因此较 3#优先考虑。模型中指标重要性排序为  $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_4 > \sigma_3$ , 其对应的权重值  $\omega_k$  为  $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3 > \omega_4$ 。

根据序关系分析法<sup>[23]</sup>对指标权重排序后相邻指标的重要程度确定重要系数  $r_k$ , 取值见表 4, 其中  $r_k = \omega_{k-1} / \omega_k$ 。

表 3  $L_{16}(4^5)$  正交表

| 试验号 | 列号 |   |   |   |   |
|-----|----|---|---|---|---|
|     | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1   | 1  | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2   | 1  | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3   | 1  | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4   | 1  | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 5   | 2  | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 6   | 2  | 2 | 1 | 4 | 3 |
| 7   | 2  | 3 | 4 | 1 | 2 |
| 8   | 2  | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 9   | 3  | 1 | 3 | 4 | 2 |
| 10  | 3  | 2 | 4 | 3 | 1 |
| 11  | 3  | 3 | 1 | 2 | 4 |
| 12  | 3  | 4 | 2 | 1 | 3 |
| 13  | 4  | 1 | 4 | 2 | 3 |
| 14  | 4  | 2 | 3 | 1 | 4 |
| 15  | 4  | 3 | 2 | 4 | 1 |
| 16  | 4  | 4 | 1 | 3 | 2 |

表 4  $r_k$  赋值

| $r_k$ | 说明                                       |
|-------|------------------------------------------|
| 1.0   | 指标 $\omega_{k-1}$ 与指标 $\omega_k$ 具有同样重要性 |
| 1.2   | 指标 $\omega_{k-1}$ 比指标 $\omega_k$ 稍微重要    |
| 1.4   | 指标 $\omega_{k-1}$ 比指标 $\omega_k$ 明显重要    |
| 1.6   | 指标 $\omega_{k-1}$ 比指标 $\omega_k$ 强烈重要    |
| 1.8   | 指标 $\omega_{k-1}$ 比指标 $\omega_k$ 极端重要    |

根据表 4 赋值可得:

$$r_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 1.8, r_3 = \frac{\omega_2}{\omega_3} = 1.4, r_4 = \frac{\omega_3}{\omega_4} = 1.8.$$

最后得到的结果为:

$$\omega_1 = 0.4602, \omega_2 = 0.2557, \omega_3 = 0.1826, \omega_4 = 0.1015.$$

将计算得到的权重值代入优化函数中, 得到完整的优化模型为:

$$X_{ij} = \omega_1 \sigma_2 + \omega_2 \sigma_1 + \omega_3 \sigma_4 + \omega_4 \sigma_3,$$

式中:  $X_{ij}$  为优化函数值.

3.2 优化结果

计算分析所有参数组合可得到相应的单目标优化参数指标, 再对输出值按式(1)进行归一化处理, 将输出结果归一到[0,1]内, 计算可得单目标优化结果. 表 5 列出了优化后最优前 3 项参数.

$$Z_{ij} = X_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^{16} X_{ij}^2}, \tag{1}$$

式中:  $Z_{ij}$  为单目标函数值.

根据优化结果可知, 第 13 种结构组合方式最优. 优化后组合桥面板基本尺寸如图 10(左)所示.

表 5 单目标优化结果

| 最优排序 | $t_c$ | $L_b$ | $L_x$ | $H$ | 函数值     |
|------|-------|-------|-------|-----|---------|
| 1    | 65    | 140   | 80    | 200 | 0.196 5 |
| 2    | 55    | 150   | 45    | 200 | 0.207 4 |
| 3    | 60    | 140   | 50    | 160 | 0.223 6 |

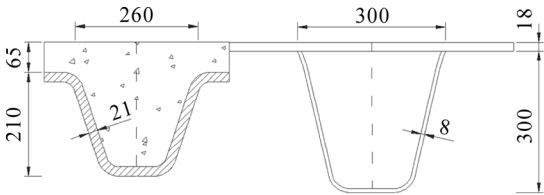


图 10 实腹式组合桥面板(左)与正交异性钢桥面板(右)的基本尺寸(单位: mm)

3.3 方案对比

优化后的组合桥面板分别与实腹式波形钢板-UHPC 组合桥面板和正交异性钢桥面板对比(图 10), 其中正交异性钢桥面板采用 300 mm×300 mm×8 mm 纵肋尺寸, 该结构应用于港珠澳大桥桥面板<sup>[24]</sup>. 以单位梁段长度进行恒载分析, 结果见表 6.

表 6 3 种桥面板单位长度恒载对比  $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$

| 各类桥面板      | 波形钢板            | UHPC | 合计   |
|------------|-----------------|------|------|
| 优化后组合桥面板   | 1.02            | 0.68 | 1.70 |
| 实腹式组合桥面板   | 1.02            | 1.66 | 2.62 |
| 传统正交异性钢桥面板 | 顶板 0.84 纵肋 0.26 |      | 1.10 |

从表 6 可知, 优化后组合桥面板与实腹式组合桥面板相比, UHPC 用量减少 59%, 有效减少了结构自重. 与正交异性钢桥面板相比, 用钢量减小 7%, 由于增加了 UHPC 层, 自重增加了 54%.

局部轮载作用下的受力状态对比结果见表 7. 从表 7 可知, 优化后的组合桥面板各个细节应力分别为 8.80、8.40、16.06、47.73 MPa. 与实腹式组合

桥面板相比, 受压区 UHPC 层应力增加了 3.4 MPa, 远小于抗压强度<sup>[25]</sup>, 其他 3 处细节分别减小了 30%、16%、16%; 与正交异性钢桥面板相比, 钢板细节的应力分别减小了 37%、47%, 其中顶板与 U 肋连接位置的拉应力减小约 43 MPa, 说明用波形钢板代替正交异性钢板能有效解决焊接造成的应力集中问题.

表 7 应力计算结果

| 桥面板类型      | 应力/MPa     |            |            |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|
|            | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ |
| 优化后的组合桥面板  | 8.80       | 8.40       | 16.06      | 47.73      |
| 实腹式组合桥面板   | 5.41       | 10.93      | 19.03      | 56.65      |
| 传统正交异性钢桥面板 | -          | -          | 30.24      | 90.57      |

4 结论

(1)UHPC 层及钢板厚度增大对结构受力有利, 分别不宜小于 55、12 mm. 同时, 波形长度的增加对结构受力不利, 且受力性能对该参数变化非常敏感, 因此保守考虑, 波形长度不宜大于 600 mm.

(2)波形高度增大对结构受力有利, 但高度大于 230 mm 时, 钢板拉应力有增长趋势, 因此波形高度不宜大于 230 mm. 同时, 结构对钢板下缘板宽度变化敏感度较弱, 因此钢板下缘板宽度选取主要考虑构造要求.

(3)优化后的组合桥面板与实腹式组合桥面板相比, 除自重减小 35%以外,  $\sigma_2$  减小 30%, 能降低受拉区域 UHPC 开裂风险,  $\sigma_3$  和  $\sigma_4$  均减少约 16%, 能缓解钢板细节的应力集中.

(4)优化后的组合桥面板与正交异性钢桥面板相比用钢量减小了 7%, 顶板与 U 肋连接位置应力减小约 47%, 说明用波形钢板代替正交异性钢板能有效减小应力集中, 改善桥面板由于焊接产生的疲劳开裂问题.

参考文献:

[1] 交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2019-04-12(2).  
[2] Xiao Z, Yamada K, Ya S, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(8):1387-1397.  
[3] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications [EB/OL]. [2019-07-10]. <https://ebookpdf.com/aashto-lrfd>

- bridge-design-specifications.
- [4] Shao X D, Yi D T, Huang Z Y, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(5):417-428.
- [5] Deng M, Huo N F, Shi G Y, et al. Shear strength analysis of the stud in steel-UHPC composite bridge deck[EB/OL]. [2019-07-10]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/100/1/012176/pdf>.
- [6] 阎培渝. 超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J]. 混凝土世界, 2010(9):36-41.
- [7] 张清华, 刘益铭, 卜一之, 等. 大纵肋正交异性组合桥面板疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):226-235.
- [8] 邵旭东, 曲宛桐, 曹君辉, 等. 带大 U 肋的轻型组合桥面板基本力学性能[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8):94-103.
- [9] 胡苏, 苏庆田, 吴冲. 正交异性钢-混凝土组合桥面板截面优化研究[J]. 结构工程师, 2015, 31(2):131-137.
- [10] Chen Y Y, Dong J C, Xu T H. Composite box girder with corrugated steel webs and trusses—A new type of bridge structure[J]. Engineering Structures, 2018, 166:354-362.
- [11] 李斐然, 张旭慧, 王东威, 等. 应用于大跨径桥梁和城市桥梁上的组合桥面板: CN104594194A[P]. 2015-05-06.
- [12] 张清华, 程震宇, 廖贵星, 等. 波形顶板-UHPC 组合桥面板优化设计[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4): 670-678.
- [13] 廖贵星. 新型波形顶板正交异性钢板-RPC 组合桥面板疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [14] 童乐为, 沈祖炎. 正交异性钢桥面板疲劳验算[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3):16-21; 70.
- [15] 苏庆田, 田乐, 曾明根, 等. 正交异性折形钢板-混凝土组合桥面板基本性能研究[J]. 工程力学, 2016, 33(S1):138-142.
- [16] JTG D60-2015. 公路桥涵设计通用规范[S].
- [17] JT/T 784-2010. 组合结构桥梁用波形钢腹板[S].
- [18] Tang M C. A new concept of orthotropic steel bridge deck[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(7/8):587-595.
- [19] 陈沁恺, 柳俊哲, 王飞. U 型加劲板稳定极限承载力影响因素分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2018, 31(6): 74-80.
- [20] 任晓东. 厚钢板加工中常见问题及其质量控制[J]. 装备制造, 2009(6):195.
- [21] 邓兰梅. 基于相对有效性的理想点法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [22] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇伟, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9):52-55.
- [23] 陈陌, 郭亚军, 于振明. 改进型序关系分析法及其应用[J]. 系统管理学报, 2011, 20(3):352-355.
- [24] 苏权科, 谢红兵. 港珠澳大桥钢结构桥梁建设综述[J]. 中国公路学报, 2016, 29(12):1-9.
- [25] DB43/T 1173-2016. 钢-超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范[S].

## Section optimization of the innovative corrugated steel-UHPC composite bridge deck

SUN Yu<sup>1</sup>, WANG Huanran<sup>1\*</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, PENG Xi<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Impact and Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Engineering Research Centre of Industrial Construction in Civil Engineering of Zhejiang Province, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** Based on the spandrel-filled innovative corrugated steel-UHPC composite bridge deck, the FEM of the improved structure is developed by choosing an open-wed structure in this study. The effects of varied parameters including the UHPC layer thickness, the corrugated steel thickness, the wave length, the lower edge plate width, and the wave depths are studied and the feasible ranges are determined. The parameters' combination is further optimized by the Ideal Point solution method, with which the reasonable parameter matching is established. Comparing with the spandrel-filled composite bridge deck, the weight is reduced by 35%, and the tensile stress in the bend of steel is reduced by 16%. Comparing with the orthotropic steel bridge deck, the steel quantity is reduced by 7%, and the tensile stress in the rib-to-deck weld joints is reduced by 47%.

**Key words:** composite structure; corrugated steel plate; UHPC; bridge deck; parameters optimization

(责任编辑 史小丽)