

文章编号: 1674-599X(2020)02-0058-08

## 全曲线波形板-UHPC 组合桥面板优化设计

戴杜伟, 刘扬, 鲁乃唯

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为提高正交异性钢桥面板疲劳性能, 提出了一种全曲线截面形式的波形板-UHPC 组合桥面板结构, 研究了各截面设计参数对结构疲劳性能的影响。基于响应面法, 优化了结构设计参数, 并对优化后的结构的疲劳性能进行了数值分析。研究表明: 横向投影长度、纵向投影长度及曲线次数都是影响结构力学性能的重要结构设计参数, 增加纵向投影长度会明显增加结构自重和刚度, 增加曲线次数会增加弯折处的应力集中程度; 响应面法建立的回归模型拟合程度较好, 实验值与响应面法预测值之间的误差为 0.236%, 优化后的设计参数较为理想; 相比传统正交异性板, 优化后组合桥面板结构的疲劳性能明显提高, 顶板焊趾处疲劳寿命提高了 4.9 倍, 横隔板焊趾处接近无限疲劳寿命。

**关键词:** 钢桥面板; 疲劳性能; 组合结构; 优化设计; 响应面法

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.010

### Optimization design of wave plate-UHPC composite bridge deck with full curvilinear section

DAI Du-wei, LIU Yang, LU Nai-wei

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to improve the fatigue performance of orthotropic steel deck, a new type of wave plate-UHPC composite bridge deck structure with full curvilinear section was proposed. The influence of each design parameter of section on the mechanical properties of the structure was studied. The response surface method was used to optimize the design parameters, and the fatigue performance of the optimized structure was carried out. The research results show that the transverse projection length, longitudinal projection length and curve degree are important structural design parameters that affect the mechanical properties of the structure. The self weight and stiffness of the structure will be significantly increased, induced by the increase of longitudinal projection length. And the level of stress concentration at the bending position can be enhanced by the increase of curve degree. The regression model established by response surface method has a high fitting precision. The error between the experimental value and the predicted value by response surface method is 0.236%, and the optimized design parameters are satisfactory. Compared with the traditional orthotropic plate, the fatigue performance of the optimized composite deck structure is significantly improved, the fatigue life at the weld toe of the roof plate is increased by 4.9 times, and the fatigue life of the weld toe of the diaphragm plate is considered as nearly infinite.

**Key words:** steel bridge deck; fatigue performance; composite structure; optimal design; response surface method

收稿日期: 2018-03-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB057705); 国家自然科学基金项目(51908068); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3540)

作者简介: 戴杜伟(1994-), 男, 长沙理工大学硕士生。

正交异性钢桥面板因其质量轻、强度高及跨越能力强等特点, 在国内、外各类桥梁建设中应用广泛。正交异性钢桥面板结构焊缝数量多、构造复杂、焊接残余应力大<sup>[1]</sup>, 在循环应力的作用下容易出现裂纹, 对桥梁结构的服役寿命有影响。因此, 疲劳问题已成为严重影响正交异性钢桥面板性能和使用寿命的关键性问题, 如何提高其疲劳寿命是制约其推广应用的关键所在。

众多学者从材料性能、构造形式及构造细节等方面对正交异性钢桥面板的疲劳问题进行了研究。余波<sup>[2]</sup>等人选取某实桥钢桥面板的 2 个疲劳细节进行了疲劳试验, 发现疲劳裂纹首先在横隔板与纵肋焊接处的下部出现, 纵肋与顶板焊接处疲劳损伤较大且均位于顶板外侧。张玉玲<sup>[3]</sup>等人针对钢桥面板的 6 种疲劳细节进行试验, 提出利用准热点应力统计来获取正交异性板构造细节的名义应力, 并对增强正交异性板的疲劳设计验算方法的可操作性和准确性给出了建议。蒋永<sup>[4]</sup>等人对典型疲劳细节进行了疲劳性能分析, 发现减少焊缝数量或提高焊缝强度能提高正交异性板结构的抗疲劳性能, 并提出 2 种改进后的构造细节的设想。Fryba<sup>[5]</sup>针对正交异性板结构进行了疲劳试验, 发现开孔形状对结构的疲劳性能影响很大。苹果形开孔结构的疲劳性能比圆形开孔强, 单圆孔与对称双圆孔结构的疲劳性能相同, 非对称挖孔结构的疲劳性能最差。叶华文<sup>[6]</sup>等人对不同铺装层厚度、横隔板厚度和挖孔形式的正交异性板进行了疲劳性能研究, 其结果表明: 相比于挖孔形式, 铺装层及横隔板厚度对结构疲劳性能的影响更大; 苹果型开孔的疲劳性能最好。邵旭东<sup>[7]</sup>等人提出一种正交异性钢板与薄层 UHPC 的组合结构, 建立了有限元模型和足尺条带模型。通过静载试验, 研究其受力性能。试验结果表明: 新结构可明显提高桥面系刚度, 减轻疲劳开裂的风险。苏庆田<sup>[8]</sup>等人提出一种折形钢板-混凝土组合桥面板结构, 优化了其截面形式并进行了足尺桥面板加载试验, 得出新结构的抗弯极限承载力远大于规范要求, 验证了其用于工程结构的可行性。张清华<sup>[9]</sup>等人提出波形顶板-UHPC 组合桥面板结构, 并采用 BP 神经网络进行参数优化, 优化后结构的疲劳性能相比传统正交异性板有明显提升, 对解决正交异性板的疲劳问题提供了一种较好的解决方案。

学者们围绕着影响传统正交异性板疲劳性能

的 3 个因素提出了各类解决方案。针对材料性能因素, 引入超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, 简称为 UHPC), 以提升结构刚度; 针对构造的形式和细节因素, 提出新的结构形式, 以减少结构的几何构型不连续(应力集中)和焊缝数量<sup>[10]</sup>。其中: 波形顶板与 UHPC 的组合桥面板结构能同时减少几何构型不连续部位和焊缝的数量, 并提升结构刚度, 是一种较好的解决方案, 但由于其波形顶板结构的弯折处存在着应力集中现象, 可能出现疲劳裂纹。作者拟提出一种全曲线截面形式的波形板-UHPC 组合桥面板结构(也称为“全曲线波形板-UHPC 组合桥面板”), 研究其设计参数对结构力学性能的影响, 并利用响应面法对其设计参数进行优化, 对比传统正交异性板, 对结构的疲劳性能进行研究。

## 1 新型组合桥面板设计参数的确定及其影响规律

### 1.1 新型组合桥面板的介绍

针对传统正交异性板疲劳开裂, 提出一种全曲线波形板-UHPC 组合桥面板结构。它由 UHPC、波形钢板、组合销及横隔板组成, 如图 1 所示。相比传统正交异性板, 这种结构用 UHPC 代替钢桥面顶板, 同时消除了顶板与 U 肋及 U 肋与横隔板的连接焊缝, 取消了横隔板开孔, 直接由 UHPC、整体性的波形钢板及横隔板组合而成。其中, UHPC 与波形钢板由组合销连接, 波形钢板与横隔板采用焊缝连接。此结构由于采用 UHPC, 增强了结构的整体刚度, 减小了结构易损部位的应力幅。同时, 只存在波形钢板与横隔板的焊缝, 大幅减少了焊缝的数量。采用全曲线形式, 降低了截面弯折处的应力集中程度, 明显减轻了结构疲劳开裂的风险。该结构的截面形式如图 2 所示。一个完整波形截面由 4

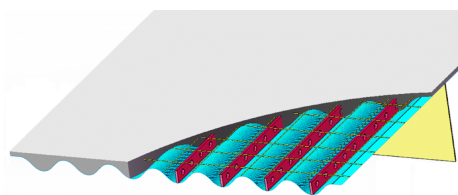


图 1 全曲线波形板-UHPC 组合桥面板结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wave plate-UHPC composite bridge deck with full curvilinear section

条完全相同的  $n$  次曲线组成: 标准曲线的横向投影长度为  $a$ , 纵向投影长度为  $b$ 。

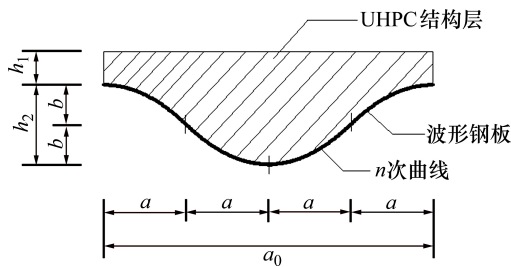


图2 全曲线波形板-UHPC组合桥面的截面示意

Fig. 2 Section form of wave plate-UHPC composite bridge deck with full curvilinear section

## 1.2 有限元模型的建立

全曲线波形板-UHPC组合桥面板结构的截面设计参数有: 上部 UHPC 结构层厚度为  $h_1$ , 波形板高度为  $h_2$ , 一个完整波形宽度为  $a_0$ 。由于一个完整波形由 4 条标准曲线组成, 由图 2 可知,  $h_2=2b$ ,  $a_0=4a$ 。以波形最低点为原点, 水平向右为  $x$  轴, 竖直向上为  $y$  轴, 则图 2 中从左向右数的第三段曲线的数学表达式为:

$$y = \frac{b}{a^n} \times x^n. \quad (1)$$

式中:  $x$  为横向投影长度变量;  $y$  为纵向投影长度变量。

结合式(1)可知, 该结构截面形式的关键设计参数为 4 个: 上部 UHPC 结构层厚度  $h_1$ 、横向投影长度  $a$ 、纵向投影长度  $b$  及曲线次数  $n$ 。由于上部 UHPC 结构层自重较大, 对结构的疲劳性能影响明显。 $h_1$  取值过大会明显增加自重, 取值太小会导致结构刚度不足。为简化分析, 参考 UHPC 组合桥面板的研究结果, 将上部 UHPC 结构层厚度  $h_1$  的取值定为 45 mm, 仅对后 3 个关键设计参数进行了研究。参考国内、外学者对传统正交异性板及 UHPC 组合桥面板的研究结果, 取横隔板高度 800 mm, 板厚 14 mm, 横隔板间距 3 000 mm; 参考普通正交异性板 U 肋, 波形板厚度取 8 mm。

采用 ANSYS 软件, 建立了模型。由于正交异性板主要应用于大跨度桥梁结构, 为使分析模型更接近实际工程结构的受力状态及边界条件状况, 结构模型纵向长度取 12 m(包含 4 个横隔板间距), 横向截面宽度取 7 个标准波形截面。UHPC 采用 Solid45 实体单元, 波形板和横隔板在纵向跨中 0.5

m 范围内采用 Solid45 实体单元, 其余部分采用 Shell63 板壳单元, 跨中焊缝采用 Solid45 实体单元。UHPC 与波形钢板由于使用组合销连接, 可认为无相对滑移, 处于完全粘接状态, 故实体单元与板壳单元采用共节点方式进行连接, 边界条件为对所有横隔板两端施加  $Y$  方向约束和  $Z$  方向转动约束, 同时在最右部的横隔板两端施加  $X$  和  $Z$  方向约束。钢材取 q345qd, 弹性模量和泊松比分别为  $2.06 \times 10^5$  MPa 和 0.3; UHPC 取 RPC200, 弹性模量和泊松比分别为  $4.26 \times 10^4$  MPa 和 0.2。在结构最不利位置处进行加载, 即沿纵向中间两跨跨中分别施加 2 个车轮荷载, 每个轮载 70 kN, 车轮面积为  $600 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 作为均布荷载施加。模型共有 362 024 个单元(其中: 实体单元 325 680 个, 板壳单元 36 344 个)。有限元模型结构如图 3 所示。

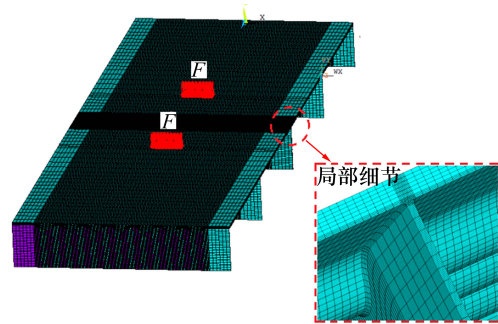


图3 有限元模型

Fig.3 Finite element model diagram

参考传统正交异性板及 UHPC 组合桥面板的研究, 取初始截面尺寸为:  $a=115$ ,  $b=40$ ,  $n=2$ , 其变化范围分别为:  $a$  取 115~140 mm,  $b$  取 40~70 mm,  $n$  取 2~7。对模型进行了受力分析。在考虑自重及车辆荷载最不利加载的情况下, 分析设计参数变化对结构受力性能的影响。采用控制变量法, 分别改变标准曲线的横向投影长度、纵向投影长度及曲线次数, 选取如图 4 所示的 4 个位置对应的应力  $\sigma_1$ ~ $\sigma_4$  作为结构受力性能的考察对象, 研究各设计参数的影响规律。其中:  $\sigma_1$  为钢板拉应力,  $\sigma_4$  为钢板压应力,  $\sigma_2$  及  $\sigma_3$  均为混凝土拉应力, 且应力方向均取结构纵向( $Z$  方向)。各设计参数对结构受力性能的影响结果分别如图 5~7 所示。在图 5~7 中, 拉、压应力均取正值。

从图 5~7 中可以看出: ①随着  $a$  的不断增大, 结构各处应力  $\sigma_1$ ~ $\sigma_4$  均呈现出先增大后变小再增大的趋势, 并在  $a=120$  mm 附近出现最大值, 在  $a=135$

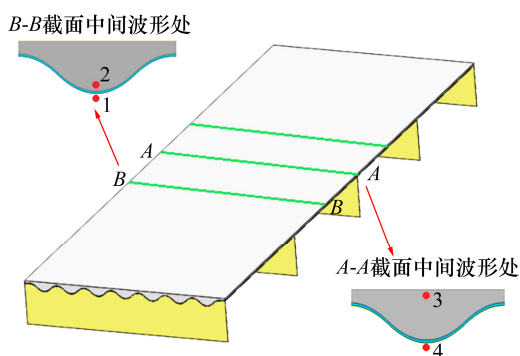


图 4 应力关注点的位置

Fig. 4 Location of interest point of stress

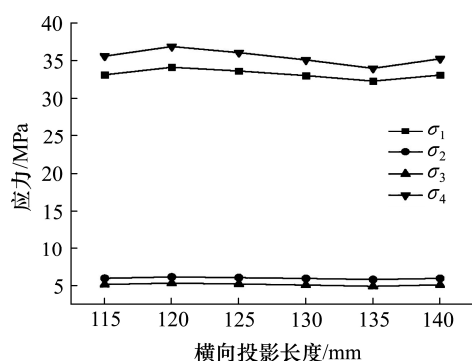


图 5 横向投影长度与关注点应力的关系

Fig. 5 The relationship between the transverse projection length and the stress at the interest point

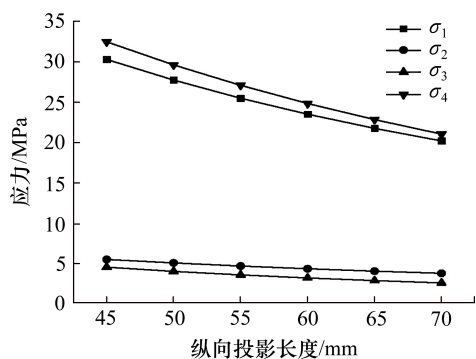


图 6 纵向投影长度与关注点应力的关系

Fig. 6 The relationship between the longitudinal projection length and the stress at the interest point

mm 附近出现最小值; 混凝土处的应力总变化幅度不超过 1 MPa, 钢板处的应力总变化幅度不超过 3 MPa。表明:  $a$  对结构受力性能的影响较小, 且存在波动现象。考虑到结构参数的优化设计, 将  $a$  的取值范围定为最小值附近, 即取 130~140 mm。②结构各处应力  $\sigma_1 \sim \sigma_4$  随  $b$  的增大而不断减小, 其中, 钢板应力  $\sigma_1$  及  $\sigma_4$  减小幅度明显, 应力变化幅度超过 10 MPa, 混凝土应力  $\sigma_2$  及  $\sigma_3$  减小幅度不明

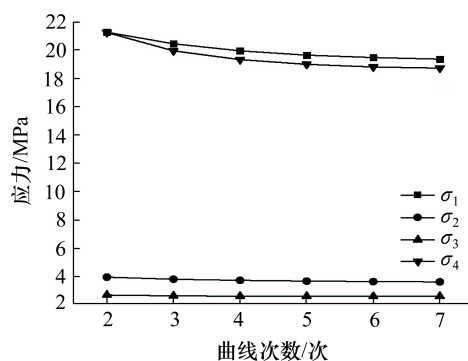
图 7  $n$  曲线次数与关注点应力的关系

Fig. 7 The relationship between the times of the curve and the stress at the interest point

显, 应力变化幅度不超过 1 MPa。表明:  $b$  对钢板应力影响较大, 对混凝土应力影响较小。考虑到增大  $b$  会显著增加结构自重, 故  $b$  取值不能过大, 因此, 将  $b$  取值范围定为 55~65 mm。③随着  $n$  的增大, 结构各处应力  $\sigma_1 \sim \sigma_4$  呈不断减小趋势, 其中, 混凝土应力  $\sigma_2$  及  $\sigma_3$  变化较小, 钢板应力  $\sigma_1$  及  $\sigma_4$  变化幅度稍大, 均未超过 3 MPa; 钢板应力  $\sigma_1$  及  $\sigma_4$  随着  $n$  的增大变化率逐渐减小, 表明:  $n$  对结构受力性能影响较小, 且随  $n$  增大, 影响越不明显。同时, 随  $n$  增大, 曲线的最大弯折处的曲率将不断增大, 会造成明显的应力集中现象, 不利于结构的疲劳性能, 因此, 将  $n$  取值范围定为 2~4。所以各设计参数对结构的受力性能都有一定影响, 其中,  $b$  影响较大,  $a$  及  $n$  影响相对较小。 $a, b$  和  $n$  的取值范围分别为 130~140 mm, 55~65 mm 和 2~4。

## 2 优化设计

### 2.1 响应面优化设计方案

研究采用 Design-Expert 软件与响应面法<sup>[11]</sup>进行了优化分析。Design-Expert 软件操作方便, 三维图形效果直观, 在优化分析领域的运用较为广泛。根据各设计参数对结构的力学性能的影响规律分析, 确定了各参数的合理取值范围。因此, 基于此单因素试验基础上, 采用响应面法进行参数优化。利用 Design-Expert 软件, 采取 Box-Behnken 试验设计方案, 以  $a, b, n$  3 个因素为自变量, 考虑到结构的疲劳性能, 取结构的疲劳细节控制部位, 即跨中横隔板中间波形钢板最低点焊缝处的应力  $\sigma_0$  为因变量, 进行三因素三水平的响应面试验, 中心点



重复 3 次, 共进行 15 次试验。在试验设计中, 定义  $a$  为因素 A,  $b$  为因素 B,  $n$  为因素 C, 最低点焊缝处的应力  $\sigma_0$  为响应值  $Y$ 。试验因素与水平见表 1, 试验设计方案与结果见表 2。

表 1 试验因素与水平

Table 1 Test factors and levels			
水平	因素		
	横向投影长度/mm	纵向投影长度/mm	曲线次数/次
-1	130	55	2
0	135	60	3
1	140	65	4

表 2 试验设计方案与结果

Table 2 Test design scheme and results				
编号	横向投影长度/mm	纵向投影长度/mm	曲线次数/次	焊缝处应力/MPa
1	130	55	3	24.894 2
2	140	55	3	24.900 2
3	130	65	3	20.741 4
4	140	65	3	20.692 2
5	130	60	2	24.109 3
6	140	60	2	24.090 3
7	130	60	4	21.998 2
8	140	60	4	21.973 6
9	135	55	2	25.435 1
10	135	65	2	21.244 0
11	135	55	4	23.305 0
12	135	65	4	19.322 9
13	135	60	3	21.853 5
14	135	60	3	21.869 2
15	135	60	3	21.832 7

2.2 模型的建立与分析

利用 Design-Expert8.0.5 软件, 对试验结果进行了二次多元回归拟合, 得到波形板焊缝处的应力  $Y$  与  $a$ 、 $b$ 、 $n$  3 个因素的多元二次回归模型方程为:  
 $Y=21.85-0.011a-2.07b-1.03n-0.014ab-0.0014an+0.052bn+0.84a^2+0.12b^2+0.36n^2$ 。

从表 3 中可以看出, 模型  $P<0.000\ 1$ , 达到极显著水平, 表明该模型成立。失拟项  $P=0.110\ 0>0.05$ , 故失拟项不显著, 表明: 回归方程拟合程度较好, 该模型可用于分析和预测实验结果。其中,  $a$  对波形板焊缝处应力的影响为不显著( $P>0.05$ ),  $b$  与  $n$  的影响为极显著( $P<0.000\ 1$ ), 交互项 AB、AC 和 BC 的影响均不显著( $P>0.05$ ), 表明  $ab$ 、 $an$  和  $bn$ 、 $b$  与  $n$  之间对焊缝处应力影响的交互作用不显著。已知模型中影响因素的  $P$  值越小,  $F$  越大, 表明: 该因素

表 3 方差分析结果

Table 3 Results of ANOVA					
来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$
模型	$4.57\times10^1$	9	5.07	$2.83\times10^3$	$<0.000\ 1$
$a$	$9.42\times10^{-4}$	1	$9.42\times10^{-4}$	$5.30\times10^{-1}$	0.501 2
$b$	$3.42\times10^1$	1	$3.42\times10^1$	$1.91\times10^4$	$<0.000\ 1$
$n$	8.57	1	8.57	$4.78\times10^3$	$<0.000\ 1$
$ab$	$7.62\times10^{-4}$	1	$7.62\times10^{-4}$	$4.20\times10^{-1}$	0.543 4
$an$	$7.84\times10^{-6}$	1	$7.84\times10^{-6}$	$4.37\times10^{-3}$	0.949 8
$bn$	$1.00\times10^{-2}$	1	$1.00\times10^{-2}$	6.09	0.056 7
$a^2$	2.58	1	2.58	$1.44\times10^3$	$<0.000\ 1$
$b^2$	$5.00\times10^{-2}$	1	$5.00\times10^{-2}$	$2.94\times10^1$	0.002 9
$n^2$	$4.70\times10^{-1}$	1	$4.70\times10^{-1}$	$2.60\times10^2$	$<0.000\ 1$
残差	$8.97\times10^{-3}$	5	$1.79\times10^{-3}$	—	—
失拟项	$8.30\times10^{-3}$	3	$2.77\times10^{-3}$	8.25	0.110 0

注:  $F$  为组间均方与组内均方之比;  $P$  为  $F$  的置信区间( $P<0.05$  时, 显著;  $P<0.01$  时, 极显著); 残差为实际值与预测值之差。

对响应值的影响越大。从表 3 中还可以看出, 波形板焊缝处应力影响因素由大到小的主次顺序为: 纵向投影长度、曲线次数和横向投影长度。校正决定系数  $R^2$  为 0.999 8, 表明: 此模型能够阐述 99.98% 的响应值变化。三因素对波形板焊缝处应力的三维响应面结果如图 8 所示。

2.3 优化结果分析

据优化波形板焊缝处应力的最优设计参数,  $a$  为 134.95 mm,  $b$  为 64.97 mm,  $n$  为 3.9。在此条件下, 波形板焊缝处的应力为 19.320 1 MPa。为了检验预测结果的可靠性, 需要对预测的最优设计参数进行验证。为了实际工程结构应用的方便性与标准化, 将最优设计参数修正为横向投影长度 135 mm, 纵向投影长度 65 mm, 曲线次数为 4。在此最优设计参数条件下利用 ANSYS 软件进行了验证试验。有限元模型下波形板焊缝处的应力为 19.322 9 MPa, 与响应面法预测值 19.277 4 MPa 的相对误差为 0.236%。表明: 验证值与模型预测值吻合较好, 优化后的设计参数较为理想。

3 优化后的结构疲劳寿命研究

为研究该结构疲劳性能, 分析其可能的易损疲劳细节。对于传统正交异性板, 结构应力集中的位置易出现疲劳损伤, 如: 横隔板弧形开口处, 纵肋与横隔板及纵肋与顶板的焊缝连接处。对于本研究提出的全曲线波形板-UHPC 组合桥面板结构而言,

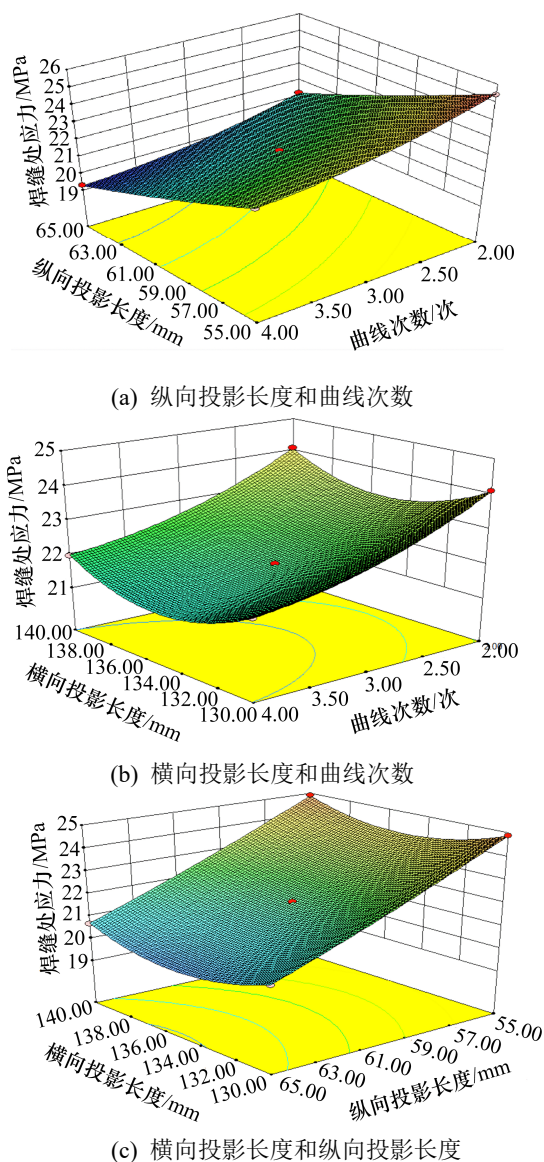


图 8 横向投影长度、纵向投影长度和曲线次数对焊缝处应力的三维响应面

Fig. 8 Three dimensional response surface of transverse projection length, longitudinal projection length and curve times to the stress at the weld

由于 UHPC 刚度大, 在车辆荷载的反复作用下, 产生的应力较小, 不易出现疲劳开裂; 而钢桥面板由于其弹性模量相对较小, 且厚度小, 刚度较小, 更容易出现疲劳裂纹。从单因素试验中的有限元分析可以看出, 应力最大位置均出现在钢桥面板处, 且位于应力集中最为明显的顶板中间波形最低点。因此, 取顶板与横隔板交接位置中间波形最低点的焊缝处为可能的易损疲劳细节(如图 9 所示), 以此来考察结构的疲劳性能。

利用 ANSYS 软件, 建立结构有限元模型。取

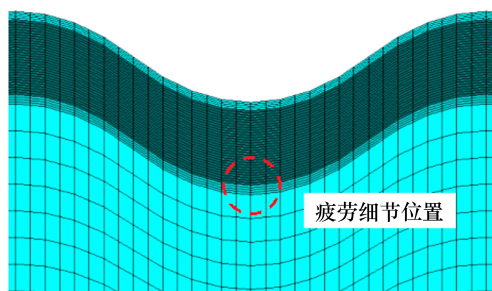


图 9 疲劳细节位置

Fig. 9 Location of fatigue detail

优化后的设计参数  $a=135$  mm、 $b=65$  mm、 $n=4$ , 其整体模型尺寸、单元类型、材料参数及边界条件均与单因素试验时相同, 钢桥面板在中间横隔板 0.5 m 范围内的结构为实体单元, 其余的结构为板单元, UHPC 与焊缝均为实体单元。根据国际焊接协会(Internation Institute of Welding, 简称为 IIW)建议的两点线性外推方法, 提取疲劳易损细节处焊缝距离焊趾  $0.4t$  和  $1.0t$  处的主应力, 利用外推公式, 计算出焊趾处的热点应力。外推公式为:

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{hs}$  为焊趾处的热点应力;  $\sigma_{0.4t}$  为距焊趾处  $0.4t$  处的主应力;  $\sigma_{1.0t}$  为距焊趾处  $1.0t$  处的主应力;  $t$  为板厚(顶板厚 8 mm, 横隔板厚 14 mm)。

采用 Eurocode 中的标准疲劳车辆荷载模型 III 进行加载。车辆荷载模型为 4 轴车, 每轴重为 120 kN, 轮间横向间距为 2 m, 4 轴纵向间距分别为 1.2、6 及 1.2 m。每个车轮的作用面积为  $400$  mm  $\times$   $400$  mm, 如图 10 所示。取单个轮轴进行横向加载, 确定横向最不利位置, 共有 24 个工况, 疲劳细节处的横向应力历程如图 11 所示, 得到横向最不利加载位置为  $x=0.25$  m。取一个标准疲劳车, 保持横向最不利位置不变, 沿纵向进行加载, 得到纵向的应力历程如图 12 所示。

采用热点应力法, 计算结构疲劳强度。取 FAT90 级  $S-N$  曲线来评价焊趾处热点应力的疲劳强度等

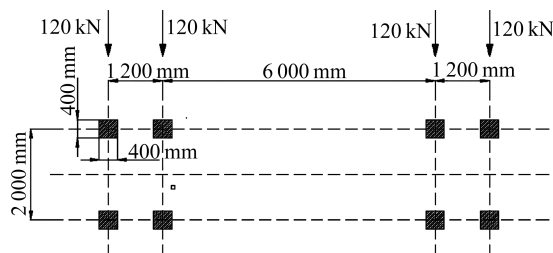


图 10 标准疲劳车

Fig. 10 Standard fatigue load

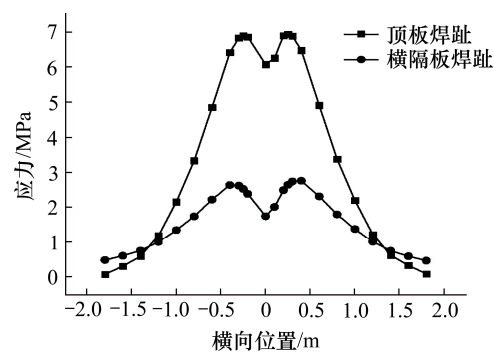


图 11 横向应力历程

Fig. 11 Transverse stress history

级。在 FAT90 级  $S-N$  曲线中，200 万次对应疲劳应力幅为 90 MPa，1 000 万次对应常幅疲劳极限为 52.63 MPa，10 000 万次对应变幅疲劳截止限为 33.2 MPa。偏保守地按重车年通行量取 500 000 次。根据纵向应力历程图，利用泄水法，求出应力幅和

作用次数，见表 4。再根据 Miner 线性累积损伤理论，计算结构损伤度<sup>[12]</sup>。将得到的结构疲劳寿命与传统正交异性板<sup>[13]</sup>的疲劳寿命进行比较，计算结果见表 5。

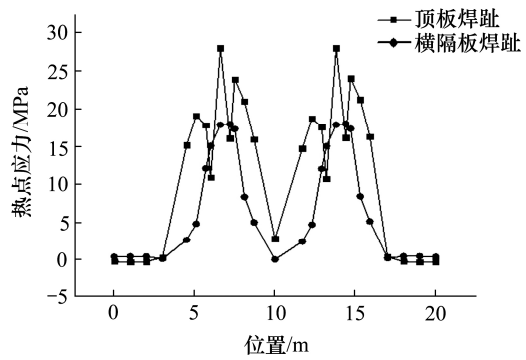


图 12 纵向应力历程

Fig. 12 Longitudinal stress history

表 4 应力幅及作用次数

Table 4 Stress amplitude and action times			
面板类型	疲劳细节	应力幅/MPa	作用次数/次
传统正交异性板	纵肋横隔板焊缝处	46.2, 22.5	500 000
全曲线波形板-UHPC 组合桥面板	顶板焊趾处	25.19, 7.80, 8.02	500 000
全曲线波形板-UHPC 组合桥面板	横隔板焊趾处	18.01	500 000

表 5 结构损伤度与疲劳寿命

Table 5 Structural damage degree and fatigue life			
面板类型	疲劳细节	损伤度	疲劳寿命/a
传统正交异性板	纵肋横隔板焊缝处	0.034 5	28.9
全曲线波形板-UHPC 组合桥面板	顶板焊趾处	0.005 8	171.8
全曲线波形板-UHPC 组合桥面板	横隔板焊趾处	0.002 0	>200.0

4 结论

为提高正交异性钢桥面板的疲劳性能，提出一种全曲线截面形式的波形板-UHPC 组合桥面板结构。通过有限元法，对其截面设计参数进行了力学性能影响分析及优化，并对其疲劳性能进行了初步研究。得到的结论为：

- 1) 横向投影长度、纵向投影长度及曲线次数都是影响结构力学性能的重要结构设计参数。其中：纵向投影长度的影响较大，横向投影长度及曲线次数的影响相对较小；纵向投影长度的增大会明显增大结构自重和刚度，曲线次数的增大会增加弯折处的应力集中程度，须合理取值。
- 2) 利用响应面法，建立回归模型。经显著性和

方差分析，拟合程度较好，可用于分析和预测实验结果；3 个设计参数对焊缝处应力影响的交互作用不显著。焊缝处应力影响因素由大到小的主次顺序为：纵向投影长度、曲线次数和横向投影长度。实验值与响应面法预测值误差为 0.236%，优化后的设计参数较为理想。

3) 基于热点应力法的结构疲劳性能研究表明，相比于传统正交异性板，优化后的组合桥面板结构的疲劳性能提升明显，顶板焊趾处疲劳寿命提升 4.9 倍，横隔板焊趾处疲劳寿命接近无限疲劳寿命。

参考文献(References):

[1] 李传习,肖雄,陈卓异.U 肋双侧焊的钢桥面板残余应力数值分析[J].交通科学与工程,2019,35(2):38-44.(LI

- Chuan-xi, XIAO Xiong, CHEN Zhuo-yi. Numerical analysis of residual stress of steel bridge deck under double side welding U-shaped ribs[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 38–44. (in Chinese))
- [2] 余波,邱洪兴,王浩.正交异性钢桥面板构造细节疲劳性能及损伤演化研究[J].公路交通科技, 2009(9): 64–69. (YU Bo, QIU Hong-xing, WANG Hao. Experimental research on fatigue behavior and damage development of welded conformation of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009(9): 64–69. (in Chinese))
- [3] 张玉玲,辛学忠,刘晓光.对正交异性钢桥面板构造抗疲劳设计方法的分析[J].钢结构, 2009, 24(5): 33–37. (ZHANG Yu-ling, XIN Xue-zhong, LIU Xiao-guang. Analysis of fatigue design method for orthotropic steel deck structure[J]. Steel Construction, 2009, 24(5): 33–37. (in Chinese))
- [4] 蒋永,陈惟珍,钱骥.正交异性板疲劳分析及构造细节改进设想[J].武汉工程大学学报, 2012(7): 23–27, 36. (JIANG Yong, CHEN Wei-zhen, QIAN Ji. Fatigue analysis of orthotropic steel bridge deck and improvement of ideas of structural details[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2012(7): 23–27, 36. (in Chinese))
- [5] Frýba L, Gajdoš L. Fatigue properties of orthotropic decks on railway bridges[J]. Engineering Structures, 1999, 21(7): 639–652.
- [6] 叶华文,徐勋,强士中.开口肋正交异性钢桥面疲劳设计参数研究[J].西南交通大学学报, 2012, 47(3): 379–386. (YE Hua-wen, XU Xun, QIANG Shi-zhong. Fatigue design parameters for orthotropic steel decks of single plane cable-stayed bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(3): 379–386. (in Chinese))
- [7] 邵旭东,曹君辉,易笃韬.正交异性钢板-薄层RPC组合桥面板基本性能研究[J].中国公路学报, 2012(2): 44–49. (SHAO Xu-dong, CAO Jun-hui, YI Du-tao. Research on basic performance of composite bridge deck system with orthotropic steel deck and thin RPC layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012(2): 44–49. (in Chinese))
- [8] 苏庆田,田乐,曾明根.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. (SU Qing-tian, TIAN Le, ZENG Ming-gen. Research on basic performance of composite bridge deck with orthotropic corrugated steel plates and concrete[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(S1): 138–142. (in Chinese))
- [9] 张清华,程震宇,廖贵星.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): 14–22. (ZHANG Qing-hua, CHENG Zhen-yu, LIAO Gui-xing. Study on optimal design of corrugated steel deck plate-UHPC layer composite deck[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 14–22. (in Chinese))
- [10] 张清华,卜一之,李乔.正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J].中国公路学报, 2017, 30(3): 14–30, 39. (ZHANG Qing-hua, BU Yi-zhi, LI Qiao. Review on fatigue problem of orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14–30, 39. (in Chinese))
- [11] 吴碧中,魏淑艳.基于响应面法的桥梁仿真模型修正方法研究及应用[J].公路工程, 2018, 43(5): 260–263, 319. (WU Bi-zhong, WEI Shu-yan. Research and application of bridge simulation model correction method based on response surface method[J]. Highway Engineering, 2018, 43(5): 260–263, 319. (in Chinese))
- [12] 陶永亮.新型正交异性钢桥面板疲劳性能研究与寿命评估[D].广州:广州大学, 2013. (TAO Yong-liang. Research on the fatigue property and life evolution of a new orthotropic steel bridge deck[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2013. (in Chinese))
- [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. (LIAO Gui-xing. Fatigue performance study of the innovative corrugated orthotropic steel-RPC layer composite deck [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))