

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.010

基于精细化有限元分析的钢-UHPC组合 桥面板疲劳性能研究

蔡丁锡

(福州海峡建设发展有限责任公司, 福州 福建 350028)

摘要: 正交异性钢桥面板结构多样,性能优异,是大跨度桥梁的不二之选。为了研究 UHPC-钢组合桥面板的疲劳性能,以一座采用 UHPC-钢组合桥面板的桥梁为研究对象,建立实体有限元模型并通过足尺的疲劳性能模型试验验证其精确性,在此基础上探究不同构造参数对 UHPC-钢组合桥面板热点应力和疲劳性能的影响。结果表明:与模型试验结果相比,建立的实体有限元模型计算结果的误差在 15% 以内;增加混凝土板厚度、钢顶板的厚度均能有效提升整体结构的刚度,可显著降低桥面板各疲劳细节的热点应力等级;增加 U 肋腹板厚度及横隔板厚度虽然也能有效提升整体结构的刚度,但对不在 U 肋和横隔板上的疲劳细节热点应力等级影响较小。

关键词: UHPC-钢组合桥面板;有限元;疲劳性能;热点应力

中图分类号: TU997

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0068-07

Fatigue Performance of Steel-UHPC Composite Bridge Decks Based on Refined Finite Element Analysis

CAI Dingxi

(Fuzhou Strait Construction and Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350028, China)

Abstract: Orthotropic steel bridge decks feature diverse structures and outstanding performance, making them the optimal choice for long-span bridges. To analyze the fatigue performance of orthotropic steel bridge decks, a UHPC-steel composite bridge deck from a bridge widening and reconstruction project was taken as the research object. A solid finite element model was established and validated by full-scale fatigue performance model tests for its accuracy. The effects of different structural parameters on the hot-spot stresses and fatigue performance of the UHPC-steel composite bridge deck were then investigated. The research results show that compared with the model test results, the calculation results of the established solid finite element model have an error of less than 15%. Increasing the thickness of the concrete slab and the steel top plate can effectively enhance the overall stiffness of the structure and significantly reduce the hot-spot stress levels of various fatigue details of the bridge deck. Increasing the thickness of the U-rib web and the diaphragm plate can also effectively enhance the overall stiffness of the structure, but their impact on the hot-spot stress levels of fatigue details not on the U-rib and diaphragm plate is relatively small.

Keywords: UHPC-steel composite bridge deck; finite element; fatigue performance; hot-spot stress

正交异性钢桥面板因其高承载能力、质量轻、整体性强、施工便利性及施工周期短等优点而备受青睐,在现代桥梁工程中得到广泛应用^[1]。然而,随着使用年限的增长和其他因素的影响,其钢桥面板

也随之出现了一些问题和病害,严重损害钢桥面系统的可靠度与服役寿命,主要表现为钢桥面铺装病害、钢结构疲劳开裂等。为了提高正交异性钢桥面板在服役过程中的抗疲劳性能,减小钢桥面板的焊

接疲劳开裂问题,国内外学者进行了一系列研究。Wu 等^[2]对正交异性钢桥面加劲肋-桥面板焊缝中脚趾和根部加劲肋裂纹的疲劳行为进行了试验和数值研究。王本劲等^[3]研究了带裂纹的正交异性钢桥面板的工作性能,探讨了不同的裂纹深度对桥面板刚度的影响。李毅等^[4]则通过正交异性钢桥面板足尺节段模型疲劳试验,分析比较了三种桥面板裂纹识别方法的优缺点,为后续的相关试验和工程实践提供参考。吴红林等^[5]针对正交异性钢桥面板纵肋与横隔板的连接问题,通过有限元软件建模计算探讨了结构优化的可行性。Chen 等^[6]对张靖皋长江大桥采用的一种新型开肋正交异性钢桥面板疲劳性能进行了试验和数值研究。郭增伟等^[7]建立了正交异性钢桥面轮载横向效应的解析分析模型,并以某钢箱梁为例证明了模型的合理性。

尽管正交异性钢桥面板主要构造细节的疲劳性能得到了一定改善,但随着交通量的不断增加,仍然会出现一定程度的疲劳开裂。因此,发展新型的正交异性钢桥面板结构体系,已经成为提升其疲劳性能的主要途径。杜向南^[8]通过开展实桥局部足尺模型的疲劳性能试验和有限元分析,研究 T 型加劲肋钢顶板-纤维混凝土组合桥面板疲劳性能。肖涵等^[9]通过开展足尺模型试验研究了钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面板中梯形湿接缝的抗裂机理及裂缝宽度计算方法。王志宏等^[10]采用试验与有限元相结合的方式,对型钢开口肋-UHPC 组合桥面板构造细节疲劳性能进行研究。苏庆田等^[11]对钢-UHPC 组合桥面板中焊钉-钢板连接处钢板的疲劳行为与疲劳失效机理进行研究。

本文在总结已有研究的基础上,开展了 UHPC-钢组合桥面板参数分析,以某座桥梁拓宽改建工程中 UHPC-钢组合桥面板为研究对象,建立实体有限元模型,通过足尺的疲劳性能试验验证模型的精确性,探究组合桥面板的混凝土板厚度、钢顶板厚度、U 肋腹板厚度及横隔板厚度对钢桥面板热点应力和疲劳性能的影响,研究结果可以推动 UHPC-钢组合桥面板结构体系的发展。

1 有限元模型

1.1 背景工程

以一座主跨 150 m 自锚式悬索桥的 UHPC-钢组合桥面板为工程背景,钢桥面板纵肋为闭口 U 型肋,铺装层采用了多层复合材料,其布置依次为 2 mm 环氧类防腐层+60 mm 超高性能混凝土+应力吸收层+40 mm 高粘 SMA 沥青混凝土铺装层,UH-

PC-钢组合桥面板(UCSD, UHPC composite steel deck)构造如图 1 所示。构件钢材采用 Q345qD,弹性模量为 206.2 GPa;钢筋采用 HRB500,弹性模量为 210.0 GPa;UHPC 的抗压强度为 145.0 MPa,抗拉强度为 9.1 MPa,弹性模量为 44.9 GPa。

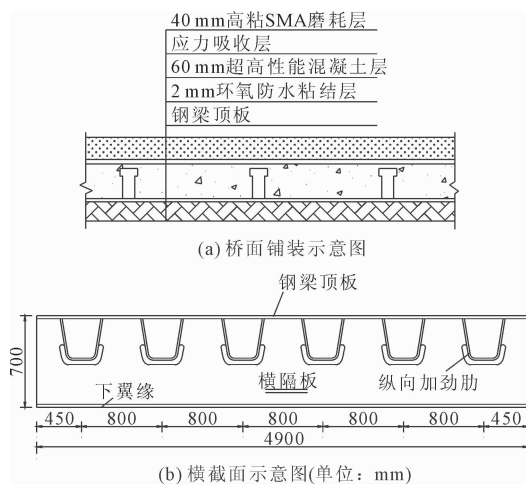


图 1 UCSD 构造示意图

1.2 网格划分

1.2.1 整体网格划分

采用通用有限元软件 MSC. MARC 进行 UCSD 有限元建模分析,研究各疲劳细节所属焊缝区域的受力情况。为了使有限元模型能够有效模拟 UHPC 与钢顶板接触面及相互的受力特点,网格单元采用 7 号六面体单元 HEX8,同时,对试件 UCSD 的实体模型进行手动网格划分以确保计算结果的精确性,整体模型的网格单元划分如图 2 所示。采用软件中的 Truss9 线单元来模拟 UHPC 桥面板中的钢筋,钢筋单元网格如图 3 所示。整体 UCSD 有限元模型共有 743 908 个节点,541 512 个单元。

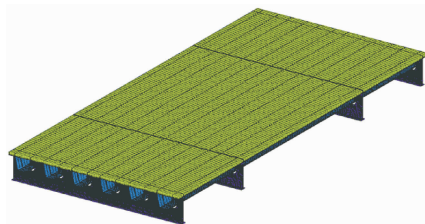


图 2 UCSD 整体模型网格单元划分

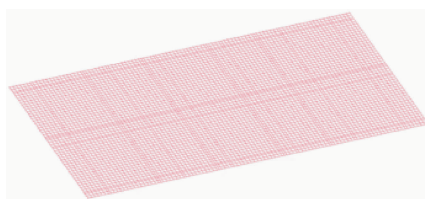


图 3 钢筋模拟图

1.2.2 焊缝精细网格划分

参考国内外研究结果及结合本文试件的结构形式,并根据我国《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[12]中的相应规定,将试件划分出六类疲劳细节,具体分布如图 4 所示。六类疲劳细节分别为:

- (1) 钢顶板与 U 肋单面角焊缝的疲劳细节①与②;
- (2) U 肋与横隔板双面角焊缝的疲劳细节③、④;
- (3) 横隔板弧形开口处的疲劳细节⑤;
- (4) U 肋纵向对接焊缝的疲劳细节⑥。

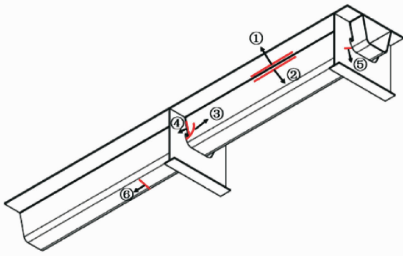


图 4 构件疲劳细节分布示意图

上述六种疲劳细节中,除细节⑤为非焊接细节外,其余五种细节分别属于三类焊缝。其中细节④热点应力采用固定点法,细节⑥所属的焊缝为纵肋对接焊缝,该疲劳细节不存在几何不连续,且应力集中主要由焊缝缺口效应引起。因此,为保证焊缝质量,本文对细节①、细节②所对应的钢顶板-U 肋单面角焊缝区与细节③所对应的 U 肋-横隔板双面角焊缝区采用精细化网格划分,将主要研究细节位置进行实体分割优化。主要的优化方式如图 5 所示,将焊缝与钢顶板、U 肋腹板重新拼接组合,构成规整的焊缝区域,将此焊缝区域与热点应力外推区域作为重点,采用精细化网格划分方式,对其它非重点研究区域则采用稀疏化网格划分。试件 UCSD 实体有限元模型精细化网格划分见图 6 所示。

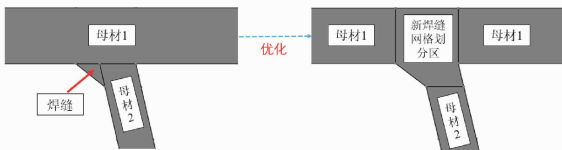


图 5 焊缝网格优化方式图示

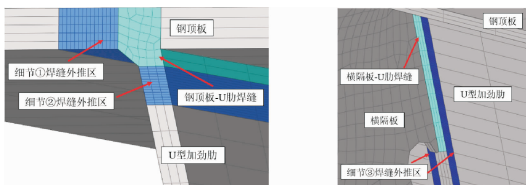


图 6 有限元模型精细化网格处理图示

1.3 钢-UHPC 结合面接触模拟参数设置

为提高有限元模型非线性分析计算效率,将 UHPC 桥面板和栓钉看成一个整体,将其整体与钢顶板设置接触面模拟。接触面设置采用文献[13]提出的钢-UHPC 界面关系,UHPC 与钢顶板接触面的粘结滑移曲线如图 7 所示。

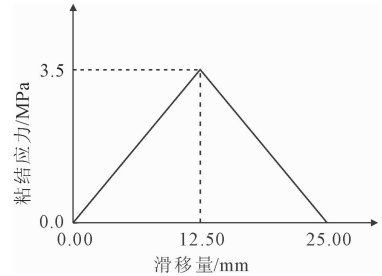


图 7 钢-UHPC 结合面粘结滑移曲线图

1.4 边界条件

为准确模拟实际工程中 UCSD 的受力性能,有限元模型的边界条件布置为:

- (1) 将主跨支点截面横隔板下部翼缘板全部节点的连接设置为铰接,仅释放 X 轴(横桥向)的转动自由度;
- (2) 将边跨支点截面的横隔板下部翼缘板的全部节点设置为固结。

边界条件设置如图 8 所示。

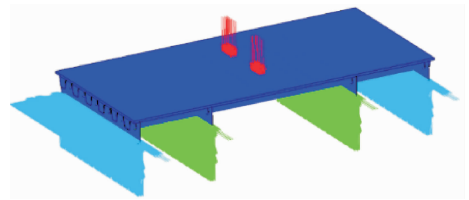


图 8 有限元模型边界条件设置

综上,采用精细化的网格划分及合理的钢-UHPC 结合面接触模拟、边界条件设置,确保了有限元模型计算结果的准确性。

2 有限元模型精度验证

2.1 足尺 UCSD 疲劳性能模型试验设计

为验证有限元建模方法的准确性,根据实桥背景设计足尺 UCSD 疲劳性能模型试验。试验构件为(2.5 m+5 m+2.5 m)三跨连续梁,两侧外伸 0.2 m,总长 10.4 m。立面布置如图 9(a)所示。横桥向布置六道 U 型加劲肋,总宽度为 4 900 mm,U 型加劲肋尺寸为高 330 mm×板厚 9 mm×两侧腹板上顶宽 440 mm×下腹板宽 290 mm。

加载设备选用 MTS 244.51 型 1 000 kN 伺服加载作动器,分配梁与试验模型之间放置橡胶块,用以模拟车轮的集中荷载。试验疲劳荷载根据《公路工程技术标准》^[14] (JTGB01—2014) 的规定,选取公路-I 级车辆荷载的后轴(2 × 140 kN)作为车轮荷载,选取安全系数为 1.25,两加载点间的横向间距为 1 780 mm。试验选用频率为 2.5 Hz 的常幅正弦波荷载作为试验反复荷载,加载的循环次数为加载至模型出现典型破坏或循环 200 万次。足尺 UCSD 疲劳性能模型试验加载如图 9(b) 所示。



(a) 试件立面布置(单位: mm)



(b) 试件加载

图 9 足尺 UCSD 疲劳性能模型试验

2.2 位移对比分析

UCSD 主跨跨中截面测点竖向位移的试验结果和有限元计算结果对比如图 10 所示,从图中可得,在荷载作用下,UCSD 竖向位移试验结果与有限元计算结果趋势较为一致,其中,UCSD 竖向位移峰值点处试验值为 1.68 mm,对应有元值为 1.43 mm,误差为 14.88%,该误差较大是由于有限元中焊缝处网格设置均匀,而试验中焊缝存在人工误差,因此导致试验与有限元误差较大,但整体来说小于 15%。竖向位移峰值点处的荷载-位移曲线对比如图 11 所示,二者均保持线性增长且趋势一致,说明都处于弹性变化阶段。因此可以断定,本文的有限元模型能够准确模拟试验构件的刚度。

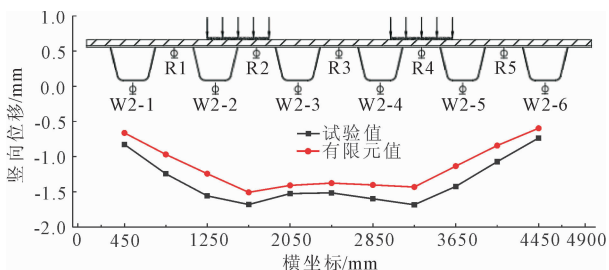


图 10 主跨跨中截面竖向位移对比图

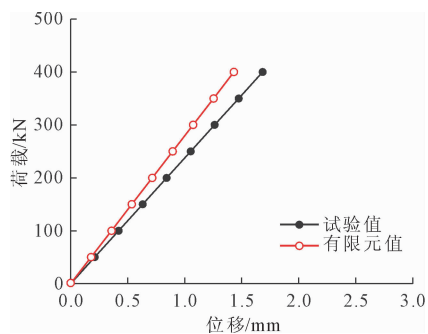
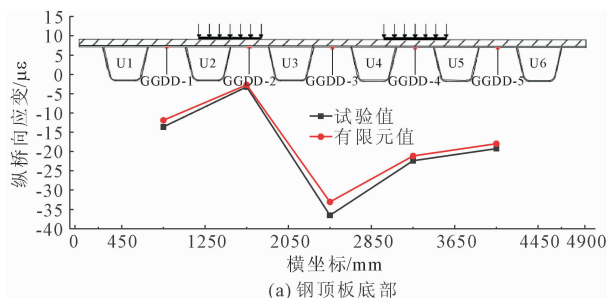


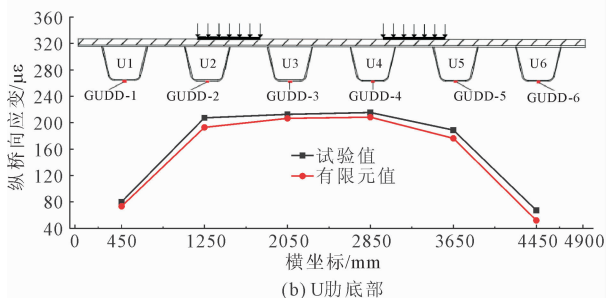
图 11 竖向位移峰值测点处荷载-位移曲线对比图

2.3 应变对比分析

主跨跨中截面下钢顶板底部及 U 肋底部应变的试验结果与有限元模型对比如图 12 所示。其中,UCSD 钢顶板底部应变峰值点处试验值为 $-36.51 \mu\epsilon$,对应的有限元数值为 $-33.07 \mu\epsilon$,误差为 10.40%,U 肋底部应变峰值点处对应的试验值为 $207.43 \mu\epsilon$,有限元计算结果为 $193.00 \mu\epsilon$,最大误差仅为 6.9%。故在荷载作用下,有限元计算结果与试验结果的分布趋势较为一致。



(a) 钢顶板底部



(b) U肋底部

图 12 主跨跨中截面应变对比图

UCSD 与有限元模型钢顶板底部及 U 肋底部应变峰值点处的荷载-应变曲线对比如图 13 所示,在荷载作用下,峰值点处的应变均保持线性增大,变化趋势吻合程度较高。由此可以说明实体有限元模型能够准确模拟在试验中的受力情况。

综上所述,本文所建立的实体有限元模型计算结果与开展的 UCSD 疲劳性能试验结果吻合,误差较小,通过对比分析验证了本文所建立的实体有限元模型的准确性。

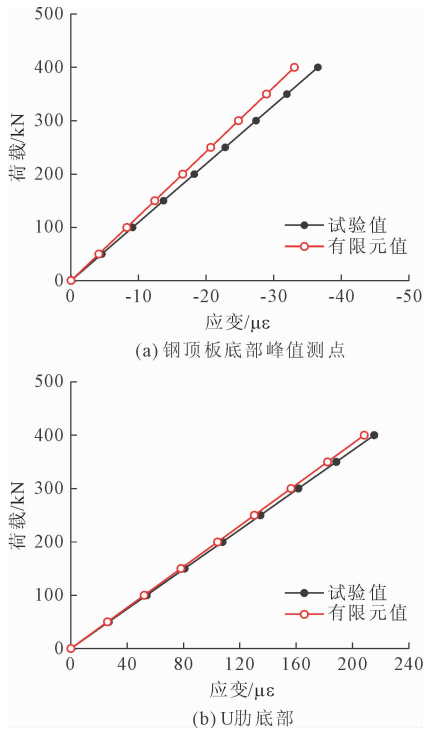


图 13 应变峰值测点处荷载-应变曲线对比图

3 UHPC-钢组合桥面板参数分析

依据以往正交异性钢桥面板疲劳细节位置及相关钢-混凝土组合桥面板受力与疲劳性能相关研究成果^[15],得出混凝土板厚度、钢顶板厚度、U肋腹板厚度及横隔板厚度等是影响组合桥面板疲劳性能关键参数,据此开展 UCSD 疲劳性能参数分析。

3.1 混凝土板厚度影响

混凝土桥面板的厚度变化对整体桥面板的刚度有直接影响,选取了 UHPC 桥面板厚度为 50、55、60、65、70 mm 五种不同厚度进行有限元参数分析,以研究混凝土板厚度对整体结构刚度及受力性能的影响。不同 UHPC 桥面板厚度下试件 UCSD 竖向位移峰值测点的荷载-位移曲线图如图 14 所示。随着 UHPC-钢组合桥面板厚度的增加,峰值位移从 1.62 mm 下降到 1.40 mm,最大位移相差 0.22 mm。说明增加 UHPC 板的厚度能有效提升整体结构的刚度。

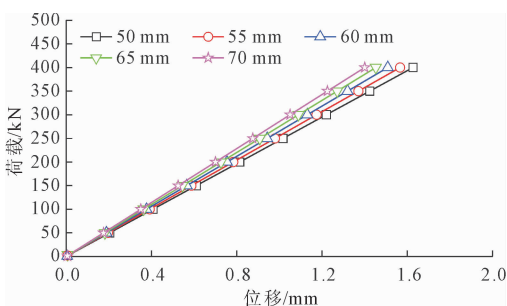


图 14 混凝土板厚度变化时荷载-位移曲线图

不同的 UHPC 桥面板厚度下试件 UCSD 各疲劳细节峰值测点的热点应力如图 15 所示,当组合桥面板的 UHPC 板层厚度从 50 mm 增加到 70 mm 时,试件 UCSD 六类疲劳细节的热点应力均呈递减趋势。其中,疲劳细节①的热点应力降幅最大,为 33%,疲劳细节②到⑤的降幅均超过 20%,而热点应力降幅最低的细节⑥降幅也有 9%。

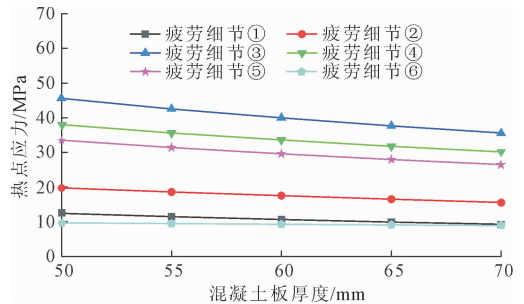


图 15 混凝土板厚度对热点应力的影响图

上述结果表明,适当增加混凝土桥面板的厚度能显著降低试件 UCSD 各疲劳细节的热点应力等级,同时提升整体结构的刚度,有助于改善 UHPC-钢组合桥面板的疲劳性能。

3.2 钢顶板厚度影响

不同国家针对正交异性钢桥面板的钢顶板厚度均有规定,各国钢桥设计规范对于钢顶板厚度的相关要求汇总如表 1 所示。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[16]的规定,采用 14、16、18、20 mm,共 4 种厚度进行有限元计算分析,以探究不同厚度下的整体刚度和应力水平。

表 1 正交异性钢桥面板钢顶板厚度规定

各国规范	钢顶板厚度(t)要求
美国 AASHTO	$t \geq 14$ mm; $t \geq$ 纵向加劲肋腹板间距的 4%
欧洲 Eurocode3	混凝土厚度 ≥ 40 mm 时, $t \geq 16$ mm; 混凝土厚度 ≥ 70 mm 时, $t \geq 14$ mm
日本 JIS	t 根据加劲肋的强度和板跨确定
中国 JTG D64—2015	车行道下 $t \geq 14$ mm; 人行道 $t \geq 10$ mm

钢顶板厚度变化时竖向位移峰值测点的荷载-位移曲线如图 16 所示,随着 UHPC-钢组合桥面板的钢顶板厚度增加,UCSD 峰值竖向位移从 1.50 mm 逐渐减小到 1.37 mm,最大相差 0.13 mm。说明增加钢顶板的厚度能有效提升整体结构的刚度。

不同钢顶板厚度下试件 UCSD 各疲劳细节峰值测点的热点应力变化趋势如图 17 所示,当 UHPC-钢组合桥面板的钢顶板厚度从 14 mm 增加到 20 mm 时,试件 UCSD 六类疲劳细节的热点应力呈递减趋

势。其中,疲劳细节①的热点应力降幅最显著,为25%;疲劳细节②到⑤的降幅均超过15%,热点应力降幅最低的细节⑥降幅为6%。

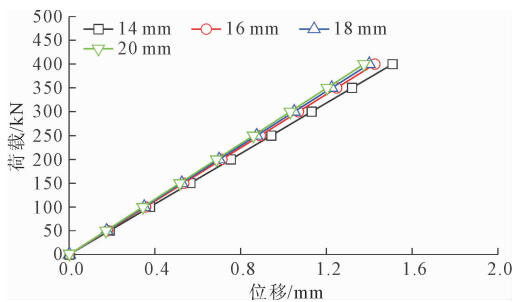


图 16 钢顶板厚度变化时荷载-位移曲线图

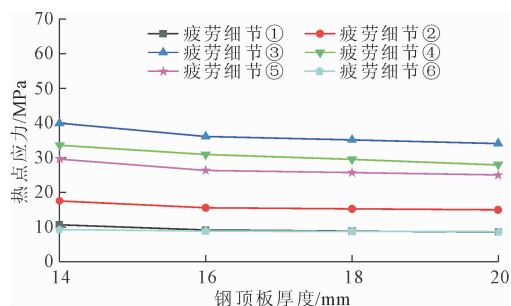


图 17 钢顶板厚度对热点应力的影响图

上述结果表明,钢顶板厚度的增加可以有效提高试件 UCSD 结构的整体刚度,降低试件 UCSD 各疲劳细节的热点应力水平,有助于改善 UHPC-钢组合桥面板的疲劳性能。

3.3 U 肋腹板厚度影响

正交异性钢桥面板的 U 肋沿纵桥向贯穿整个结构,它的厚度变化会改变相连区域的刚度,继而影响整个桥面系的刚度。因此,需以 U 肋腹板厚度为参数进行有限元计算分析。《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[16]中通过式(1)与式(2)规定了闭口肋结构的构造参数。结合试件 UCSD 的 U 肋厚度,选取了 9、10、11 mm 共 3 种 UHPC-钢组合桥面板的 U 肋厚度,进行有限元参数分析。

$$\frac{b_s}{t_s} \leq 30 \sqrt{\frac{345}{f_y}} \quad (1)$$

$$\frac{h_s}{t_s} \leq 40 \sqrt{\frac{345}{f_y}} \quad (2)$$

式中: b_s 为 U 肋底部腹板宽度; t_s 为 U 肋腹板厚度; f_y 为钢材屈服强度; h_s 为 U 肋腹板斜向高度。

U 肋腹板厚度变化时 UCSD 构件竖向位移峰值测点的荷载-位移曲线如图 18 所示。从图 18 可以得到,随着 UHPC-钢组合桥面板的 U 肋厚度不断增大,UCSD 的峰值竖向位移从 1.50 mm 下降到 1.13 mm,最大位移相差 0.37 mm。说明 U 肋厚度的增加

能有效提升整体结构的刚度。

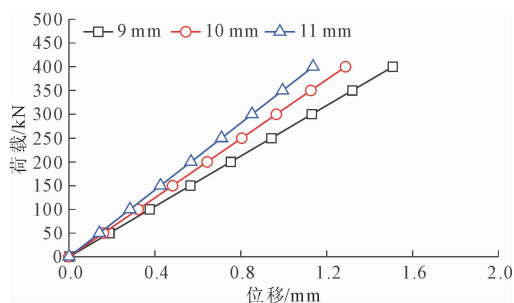


图 18 U 肋腹板厚度变化时的荷载-位移曲线图

不同 U 肋腹板厚度下试件 UCSD 各疲劳细节峰值测点的热点应力如图 19 所示,当 UHPC-钢组合桥面板的 U 肋腹板厚度从 9 mm 增加到 11 mm 过程中,加劲肋上的疲劳细节②、③和⑥的热点应力呈下降趋势,降幅依次为 23%、19%、30%;而疲劳细节①与疲劳细节④、⑤的热点应力呈现小幅下降趋势,变化程度依次为 14%、10%、7%。这说明 U 肋厚度的增加可以有效降低 UCSD 各疲劳细节的水平,显著提升其抗疲劳性能;且 U 肋腹板的厚度变化对不在 U 肋上的疲劳细节影响较小。

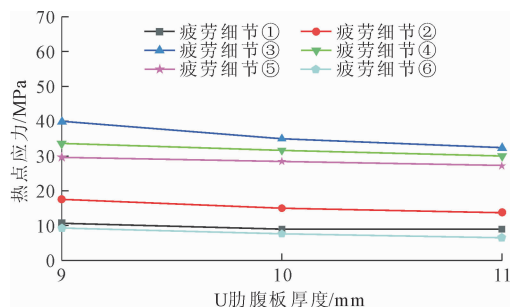


图 19 U 肋腹板厚度对热点应力的影响图

3.4 横隔板厚度影响

横隔板作为结构中的关键受力构件,改变横隔板厚度可能会改变其应力水平。根据文献[17]可知,正交异性钢桥面板的横隔板厚度一般在 8 mm ~ 14 mm,结合 UHPC-钢组合桥面板中横隔板实际厚度,选取 10、12、14 mm 三种厚度进行不同横隔板厚度下的有限元参数分析,以探究不同厚度下试件 UCSD 的整体刚度和应力水平。

横隔板厚度变化时 UCSD 构件竖向位移峰值测点的荷载-位移曲线如图 20 所示,随着横隔板厚度的增加,试件 UCSD 的峰值竖向位移从 1.51 mm 下降到 1.49 mm,基本保持不变,说明仅改变横隔板的厚度对试件 UCSD 结构的整体刚度影响较小。

不同横隔板厚度下试件 UCSD 各疲劳细节峰值测点的热点应力变化趋势如图 21 所示,当 UHPC-

钢组合桥面板的横隔板厚度从 10 mm 增加到 14 mm 时,横隔板上的疲劳细节④、⑤的热点应力呈递减趋势,降幅依次为 11%、13%。而对于非横隔板上的疲劳细节①~③及细节⑥的热点应力的影响程度均在 3% 以内。上述结果表明,试件 UCSD 横隔板厚度增加可以有效降低自身疲劳细节的水平,而对于非横隔板上的疲劳细节影响较小,在实际工程设计中,需合理控制横隔板厚度以获得良好的抗疲劳性能。

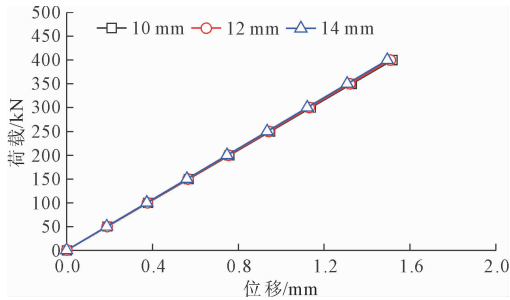


图 20 横隔板厚度变化时的荷载-位移曲线图

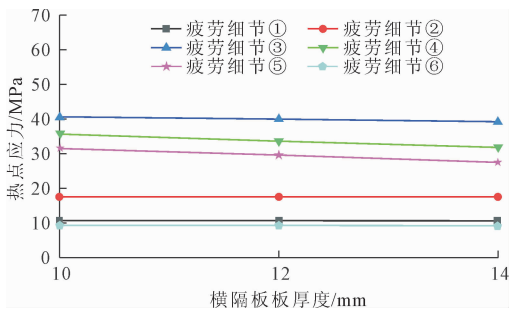


图 21 横隔板厚度对热点应力的影响图

4 结 论

(1) 当增加 UHPC 桥面板厚度 5~20 mm 时,UCSD 竖向峰值位移减小 0.22 mm,细节①到细节⑤的热点应力降幅均超过 20%;增加钢顶板厚度 2~6 mm 时,UCSD 的竖向峰值位移减小 0.13 mm,细节①到细节⑤的热点应力降幅均超过 15%。说明增加 UHPC 桥面板、钢顶板厚度能够有效提升结构的整体刚度,改善 UHPC-钢组合桥面板的疲劳性能。

(2) 当增加 U 肋厚度 1~2 mm 时,UCSD 的峰值竖向位移减小了 0.37 mm,对于加劲肋上的疲劳细节②、③和⑥的热点应力降幅均超过 19%,其余的变化程度均小于 14%;增加横隔板厚度 2~4 mm 时,UCSD 的峰值竖向位移基本保持不变,横隔板上的细节④、⑤的热点应力下降 10% 左右,其余降幅则在 3% 以内。说明增加 U 肋腹板、横隔板厚度虽然也能有效提升结构的整体刚度,有效降低自身疲劳细节的水平,但对不在 U 肋和横隔板上的疲劳细节热点应力等级影响较小。

参考文献:

- [1] 王洪国,韩乐冰,褚 锋,等. 钢-UHPC 轻型组合桥面板研究进展[J]. 中国水运,2025(07):147-149.
- [2] Wu Weijian, Veljkovic M, Kolstein H, et al. Fatigue behaviour of toe and root stiffener cracks in stiffener-to-deck plate weld of orthotropic bridge decks[J]. Engineering Structures, 2024, 305:117740.
- [3] 王本劲,贾耀翔,王达磊,等. 正交异性钢桥面板带裂纹工作性能[J]. 同济大学学报(自然科学版),2025, 53(02):167-176.
- [4] 李 毅,邹 威,张亚妮,等. 正交异性钢桥面板疲劳试验及裂纹识别方法研究[J]. 桥梁建设,2025, 55(03):113-119.
- [5] 吴红林,李长凯,余金山,等. 正交异性钢桥面板横隔板及内隔板结构优化[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(11):16-24.
- [6] Chen Yejing, Yuan Zhenglin, Zhou Hongzong, et al. Fatigue performance of innovative open-rib orthotropic steel deck for super-long suspension bridge[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 222:108984-108984.
- [7] 郭增伟,徐 华,贺焯博. 正交异性钢桥面板轮载横向效应的解析分析方法[J]. 计算力学学报,2022, 39(04):479-487.
- [8] 杜向南. T 型加劲肋钢顶板-纤维混凝土组合桥面板疲劳性能分析[J]. 水利与建筑工程学报,2024, 22(01):177-185,204.
- [9] 肖 涵,王 巍,马 磊,等. UHPC 组合桥面板梯形形连接缝抗裂机理与计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2025,53(11):1637-1647.
- [10] 王志宏,李秉海,黄 云,等. 型钢开口肋-UHPC 组合桥面板构造细节疲劳性能研究[J]. 建筑钢结构进展,2026,28(01):47-55.
- [11] 苏庆田,刘凤瑶,史占崇,等. 钢-UHPC 组合桥面板焊钉-钢板连接处钢板疲劳行为:失效机理与寿命预测[J]. 中国公路学报,2025,38(11):21-33.
- [12] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [13] Wolchuk R. Lessons from weld cracks in orthotropic decks on three European bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990,116(01):75-84.
- [14] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S]. 北京:人民交通出版社,2014.
- [15] 吴丽丽,姚 超,郑贺崇. 正交异性钢桥面板的研究进展[J]. 公路与汽运,2022(03):112-117,121.
- [16] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [17] Fryba L, Gajdos L. Fatigue properties of orthotropic decks on railway bridges[J]. Engineering Structures, 1999,21(07):639-652.