

加劲肋形式对钢 - UHPC组合桥面力学性能的分析研究

李爱纯*, 张 慧

兰州交通大学, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年1月29日; 录用日期: 2022年2月18日; 发布日期: 2022年2月25日

摘 要

研究不同加劲肋形式对正交异性组合桥面板力学性能的影响, 基于某大桥应用有限元软件ANSYS建立局部有限元实体模型进行加载, 对比波形、梯形和U形三种不同截面形状的闭口加劲肋对正交异性桥面板性能的影响。结果表明, 波形正交异性桥面板相比于U形和梯形正交异性桥面板来说可以显著的增强其局部力学性能, 提高局部车轮荷载的纵向和横向分布能力。

关键词

正交异性桥面板, 有限元分析, 闭口纵肋

Analysis and Research on Mechanical Properties of Steel-UHPC Composite Bridge Deck by Stiffening Rib Form

Aichun Li*, Hui Zhang

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Jan. 29th, 2022; accepted: Feb. 18th, 2022; published: Feb. 25th, 2022

Abstract

The influence of different stiffening rib forms on the mechanical properties of orthotropic composite bridge deck was studied. Based on a bridge, the finite element software ANSYS was used to establish a local finite element solid model for loading, and the influence of three closed stiffening

*通讯作者。

ribs with different section shapes such as waveform, trapezoid and U-shape on the mechanical properties of orthotropic composite bridge deck was compared. The results show that compared with the U-shaped and trapezoidal orthotropic bridge panels, the waveform orthotropic bridge panels can significantly enhance the local mechanical properties and improve the longitudinal and transverse distribution of local wheel load.

Keywords

Orthotropic Bridge Panel, Finite Element Analysis, Silent Longitudinal Rib

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

改革开放以来,随着国民经济以及交通线路的发展,国内外桥梁结构发展迅速,桥面板体系作为桥梁中极为重要的组成部分之一,其工作状态直接影响着行车的舒适性以及结构的耐久性。正交异性钢桥面板构造复杂、焊缝数量多且沥青铺装层刚度低等原因,在车轮荷载反复作用下,桥面板出现不同程度的损伤。根据其出现损坏和疲劳开裂的位置我们可将病害大体分为三种,分别为桥面板疲劳开裂、铺装层开裂以及粘结界面损害。针对正交异性钢桥面板由于局部刚度较低而易出现的这三类病害问题,主要有两种解决思路:一是发展新型正交异性钢桥面板结构,二是发展新型组合正交异性钢桥面板。

张清华[1]利用单维的横向波形钢顶板取代传统U肋正交异性钢板,通过试验和数值有限元分析的方式分析了横向波形钢-混凝土组合桥面板。崔海军[2]以梯形及矩形截面形状的纵向加劲肋的正交异性钢桥面板结构体系,分析其对钢桥面板力学性能的影响规律。但是从我国现阶段的研究现状可以看出,针对正交异性钢桥面板的相关研究还不是很充分,国内制定的相关规范也不是很完善,许多细部构造的设计标准都还没有给出规定,难以为正交异性钢桥面板的设计和施工提供详细的参考。

本文利用ANSYS建立3种不同纵肋截面形式的正交异性钢桥面板的局部节段模型,比较车辆荷载作用下的变形及应力,并对研究成果进行总结、归纳,为将来类似桥梁的设计提供理论支持和技术储备。

2. 建立有限元模型

根据各国关于正交异性钢桥面板的设计规范[3][4][5],并结合我国现在的桥梁运营荷载的特点,拟定了钢-UHPC正交异性桥面板的顶板厚度、铺装层厚度、纵肋尺寸等构造细节参数。有限元模型横向选取全桥宽度33.1m,纵肋的中心间距为600mm;纵向选取4个横隔板3跨,长度为 $1.0 + 4 \times 3.0 + 1.0 = 14$ m(横隔板间距为4.0m)。主梁桥面板设计方案采用U肋、波肋、梯肋的钢-UHPC组合桥面板[6][7]。纵向U肋上口宽300mm,下口宽170mm,高度为300mm,厚度8mm;波肋上口宽300mm,波肋高度300mm,厚度8mm;纵向梯肋上口宽300mm,底宽170mm,梯肋高度300mm,厚度8mm,铺装层均使用50mm的超高性能混凝土。纵向加劲肋截面如图1所示。

车辆荷载按照我国《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2015)[8]中规定的标准重车大小施加为70KN,即一个车轮的重量,加载面积为 200×600 mm,不考虑冲击系数。背景桥梁设计为双幅6车道,荷载工况分为以下5种,见表1。主梁结构顶板、纵肋、腹板等采用四节点的弹性壳单元SHELL63模拟,SOLID45模拟沥青混凝土层,SOLID65模拟UHPC层,ANSYS网格划分采用扫掠网格划分法,模型如图2所示。

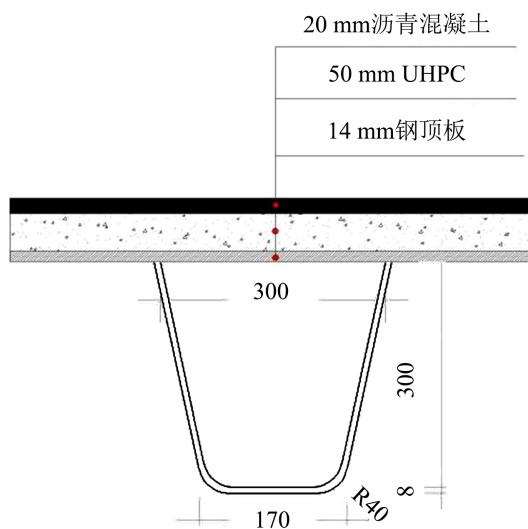


Figure 1. Section form of U-shaped stiffener
图 1. U形加劲肋截面形式

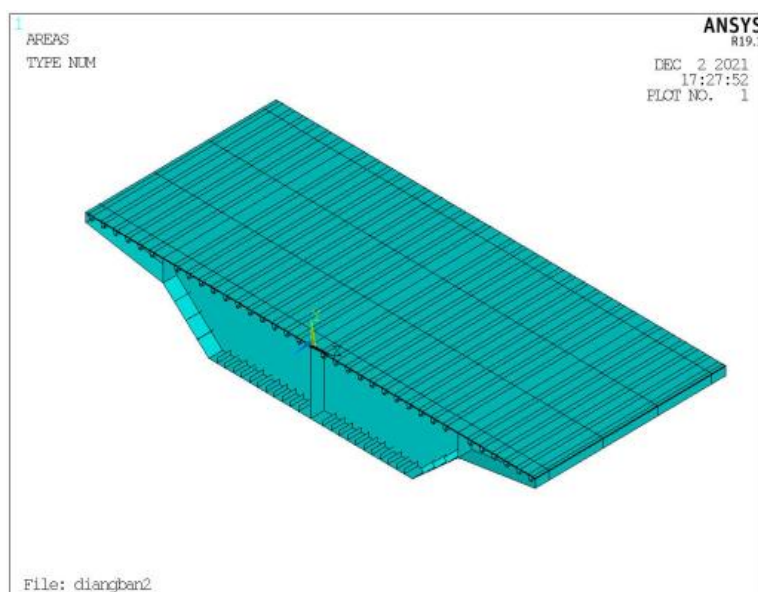


Figure 2. Local model
图 2. 局部模型

Table 1. Different load conditions
表 1. 不同荷载工况

序号	荷载组合
1	自重、车道 1、车道 2、车道 3、车道 4
3	自重、车道 1、车道 2
4	自重、车道 1、车道 3
5	自重、车道 2、车道 3

正交异性桥面板的横向刚度弱于纵向刚度, 所以正交异性桥面板的横向挠度值偏大, 从而出现挠度分布不均匀的情况, 由此可知, 增大正交异性桥面板的横向刚度, 探究其较于传统 U 肋正交异性桥面板的优势是新型桥面板的重要思想, 增加参与受力的桥面板结构, 加强桥面板的横向分布能力, 从而大大改善车轮两端挠度分布不均匀的现象(加劲肋截面尺寸划分如图 3 所示)。

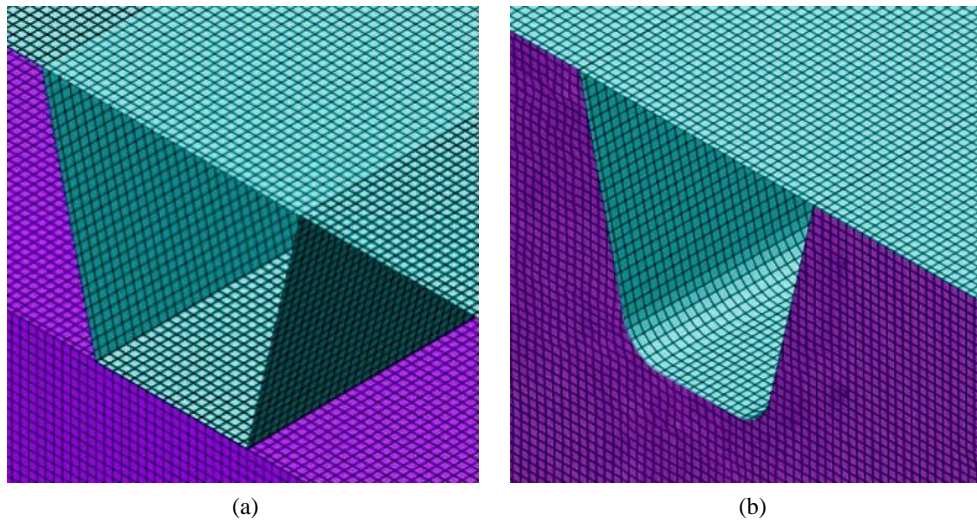
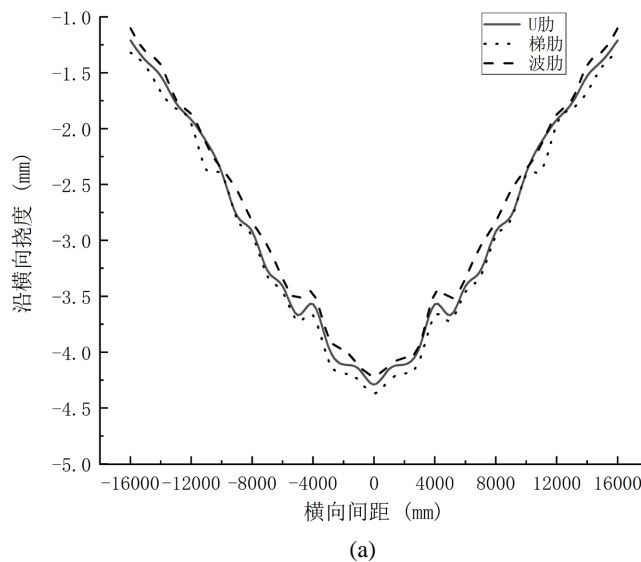


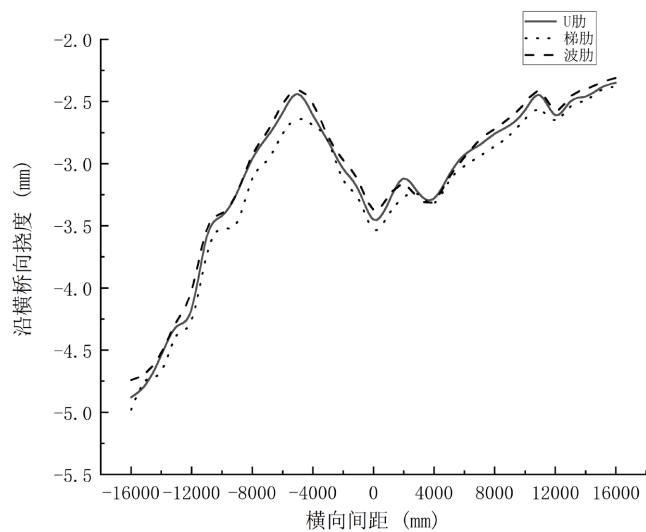
Figure 3. Section form and size division
图 3. 截面形式尺寸划分

3. 桥面板变形比较

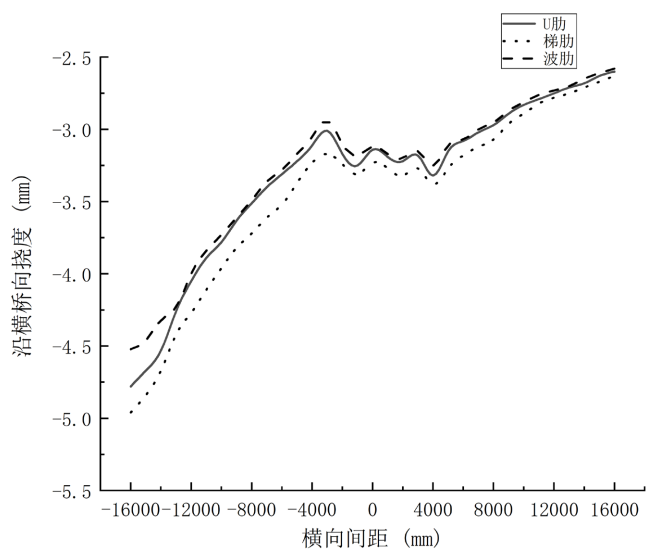
3.1. 竖向挠度沿横桥向变化规律

正交异性桥面板其纵向和横向的刚度呈不均匀分布状态, 导致了钢桥面铺装提前破坏。将三种不同纵肋形式的新型正交异性桥面板沿横桥向的竖向挠度进行分析对比, 图 4 为不同荷载工况下竖向挠度沿跨中截面的横向分布曲线:

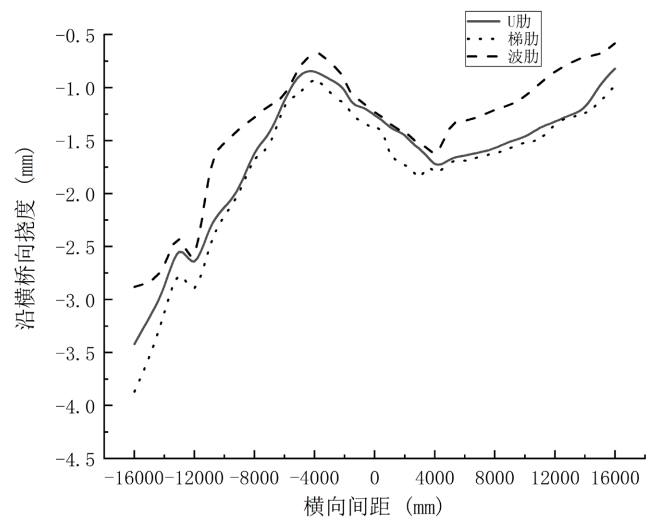




(b)



(c)



(d)

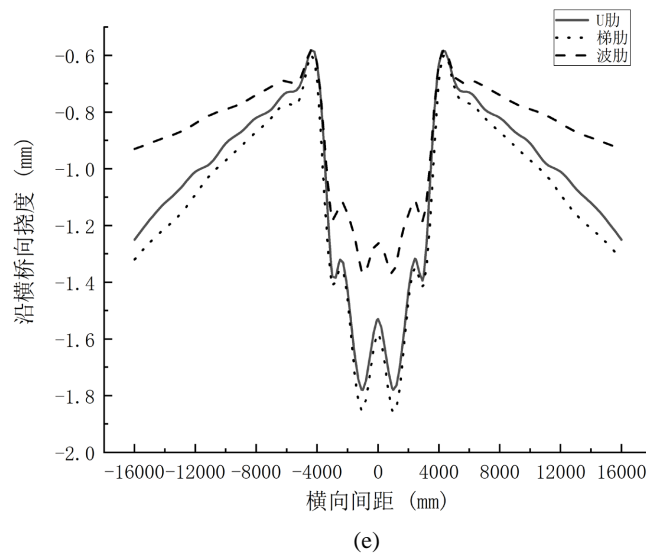


Figure 4. Deflection diagram of mid-span section of steel bridge panel along transverse bridge direction under different working conditions

图 4. 不同工况下钢桥面板跨中截面沿横桥向挠度图

从图中可以看出工况 1 到工况 5, 在 5 种不同荷载工况作用下跨中沿横向的挠度图, 波形纵肋正交异性桥面板的竖向挠度均小于传统 U 形、梯形正交异性桥面板的竖向挠度, 且波形纵肋正交异性钢桥面板沿横向的最大挠度差相较于传统 U 形、梯形的交异性桥面板的挠度差也是较小的, 因此说明波形纵肋桥面板局部轮载作用下的横向分布效果优于传统的正交异性桥面板。尤其在工况 5 作用下三种桥面板产生的横桥向挠度差最明显, 波型纵肋结构正交异性桥面板在车轮中部和车轮两侧的挠度分别是 1.28 mm 和 1.35 mm, 挠度差为 0.07 mm; 而传统 U 形和梯形正交异性桥面板在车轮中部和车轮两侧的挠度分别是 1.61 mm 和 1.74 mm 与 1.68 mm 和 1.83 mm, 挠度差分别为 0.13 mm 和 0.15 mm。因此可得出传统 U 形桥面板的横向挠度差是波形桥面板的 1.86 倍, 传统梯形桥面板是波形桥面板的 2.14 倍, 这证明波形纵肋桥面板在轮载作用下其横向分布效果更优渥。

Table 2. Comparison of deflection values at center points of three bridge panels
表 2. 三种桥面板中心点处挠度值对比

荷载工况	U 形正交异性钢桥面板(mm)	梯形正交异性钢桥面板(mm)	波形正交异性钢桥面板(mm)
工况 1	6.21	6.37	5.83
工况 2	3.45	3.53	3.37
工况 3	3.14	3.23	3.12
工况 4	1.26	1.38	1.23
工况 5	1.53	1.58	1.26

由上表 2 可得, 在 5 种车轮工况下, 波形正交异性桥面板跨中截面中心点的挠度绝对值均小于传统 U 形、梯形正交异性桥面板, 在工况 5 作用下, 波形正交异性桥面板挠度绝对值较两种传统桥面板中心

挠度值降幅最大, 分别为 0.27 mm 和 0.32 mm。三种桥面板分别在工况 1 和工况 4 的荷载作用下, 中心点挠度的绝对值分别达到最大值和最小值, 其中波形纵肋正交异性桥面板中心点挠度最大值和最小值分别为 5.83 mm 和 1.23 mm, 最大的挠度差值为 4.6 mm; 传统 U 形正交异性桥面板的中心点挠度绝对值的最大值为 6.21 mm, 最小挠度值为 1.26 mm, 其最大挠度差为 4.95 mm; 传统梯形正交异性桥面板的中心点挠度绝对值的最大值为 6.37 mm, 最小挠度值为 1.38 mm, 其最大挠度差为 4.99 mm。传统 U 形和梯形纵肋桥面板较波形桥面板的挠度差的差值分别为 0.35 mm 和 0.39 mm。根据表中可以得出, 工况 1 是三种桥面板横桥上中部挠度的最不利加载工况, 进一步说明波形纵肋正交异性桥面板的整体性能优于传统 U 形、梯形正交异性桥面板, 新型正交异性桥面板的局部横向刚度作用相较于传统正交异性钢桥面板是更明显的, 因此波形正交异性桥面板的挠度分布更均匀, 可以从某种程度上改善桥面板开裂和铺装层疲劳破坏等问题。

3.2. 竖向挠度沿纵桥向变化规律

竖向挠度沿纵桥向的分布情况可以反映出纵桥向刚度的分布状态, 在最不利荷载工况 1 作用下研究其竖向挠度沿纵桥向分布情况, 下图 5 为三种桥面板在车轮荷载工况 1 作用下的竖向挠度沿纵桥向的变化规律图:

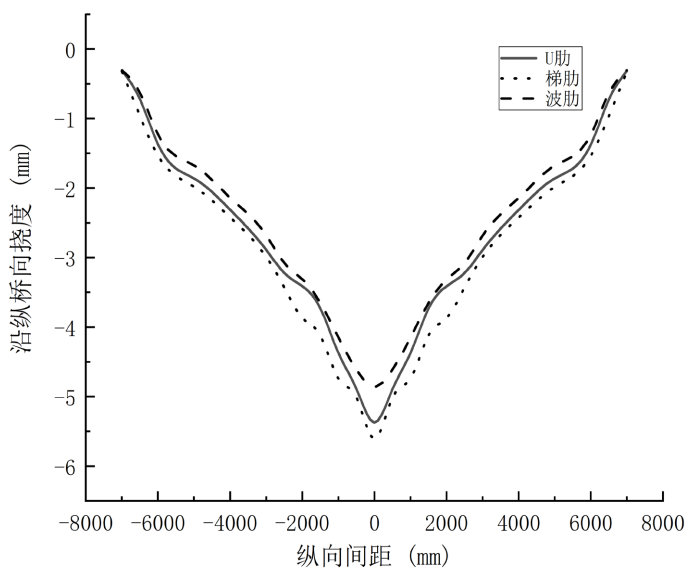


Figure 5. Deflection of mid-span section of bridge panel along longitudinal bridge under working condition 1

图 5. 工况 1 作用下桥面板跨中截面沿纵桥向挠度

由图 5 可以得出, 波形纵肋正交异性桥面板沿纵桥向的竖向挠度变化均低于传统 U 形和梯形正交异性桥面板的挠度变化, 尤其在轮载施加位置更为明显。在距离中心点 700 mm 的位置, 三种正交异性桥面板波形、U 形和梯形的竖向挠度分别为 4.32 mm、4.67 mm 和 4.85 mm; 在中心点位置处, 三种桥面板沿纵桥向的竖向挠度达到最大值, 分别为 4.86 mm、5.37 mm 和 5.61 mm, 所以三种桥面板从中心点位置处到 700 mm 处之间的割线斜率为 0.77‰, 1‰和 1.08‰。波形纵肋加劲肋正交异性桥面板的挠度曲线斜率相较于传统 U 型和梯形加劲肋正交异性桥面板是较小的, 这也进一步证明波形纵肋结构拥有优于传统纵肋结构的纵向分布能力, 波形纵肋正交异性桥面板的纵向刚度更好。

4. 局部轮压下钢顶板的肋间相对挠度和曲率半径

桥面板顶板强度不足够大, 车轮荷载作用下的局部变形就会加大[9] [10], 纵肋上方的 UHPC 结构层的拉应力也会更大, 频繁的车轮荷载便会导致桥面板出现强度开裂破坏。桥面板的顶板刚度决定着铺装层的受力情况, 《公路钢箱梁桥面铺装设计与施工技术指南》对于有关曲率半径以及肋间相对挠度的规定采用的是日本的《道桥示方书》的规定, 曲率半径 $\gamma \geq 20 \text{ m}$,

肋间相对挠度 $\Delta \leq 0.4 \text{ mm}$, 并对于该取值做出了相应的计算公式:

$$\Delta = \frac{k_1 k_2 p}{384} \times \frac{12b^4}{E_s t^3 + E_A h^3} \quad (1)$$

$$r = \frac{b^2}{16\Delta} \quad (2)$$

Δ —均布荷载产生的中央挠度; r —肋间曲率半径; K_1 —动载系数, 此处取 1.3; K_2 —为重载系数, 此处取 1.4; p —轮压标准值; b —为纵 U 肋开口宽度; E_s —为钢材弹性模量; E_A —为铺装层弹性模量。

根据表 3 中的数据可以分析出, 在荷载作用下三种不同纵肋形式的肋间挠度的相对最大值以及曲率半径均满足《公路钢箱梁桥面铺装设计与施工技术指南》的规定。

Table 3. Maximum intercostal relative deflection Δ and radius of curvature r under load conditions

表 3. 荷载工况最大肋间相对挠度 Δ 和曲率半径 r

加劲肋	指标	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
U 形	Δ/mm	0.14	0.12	0.1	0.08	0.09
	γ/m	40.18	46.88	56.25	70.31	62.5
梯形	Δ/mm	0.21	0.16	0.14	0.12	0.13
	γ/m	26.79	35.16	40.18	46.88	43.27
波形	Δ/mm	0.11	0.09	0.07	0.06	0.06
	γ/m	51.14	62.5	80.36	93.75	93.75

5. 结论

通过 ANSYS 建立三种不同加劲肋形式的正交异性桥面板, 在五种不同荷载工况下三种正交异性桥面板的竖向挠度变化情况得出以下结论:

1) 三种桥面板跨中中心点的挠度值分别在工况 1 和工况 4 下达到最大值和最小值, 其按照波形、U 形和梯形顺序三者之间最大挠度差分别为 4.95 mm、4.99 mm 和 4.6 mm, 三者最大挠度差值之间的差值为 0.35 mm 和 0.39 mm, 可以发现波形纵肋的正交异性桥面板挠度差比 U 形和梯形的挠度差小。

2) 当挠度沿纵桥向分布时, 三种桥面板从中心点位置处到 700 mm 处之间的割线斜率分别为 0.77‰, 1‰和 1.08‰, 波形纵向加劲的正交异性桥面板的挠度曲线割线斜率相比于 U 形和梯形的正交异性桥面板是明显较低的, 这也证明了波形纵向加劲的正交异性桥面板具有更强的纵向刚度, 其纵向分布能力效果较优。

初步研究成果表明, 波形桥面板对疲劳性能的改善是显著的, 是一种很有潜力的钢箱梁正交异性桥面板形式。

参考文献

[1] 张清华, 张鹏, 刘益铭, 余佳, 叶仲韬. 新型大纵肋正交异性组合桥面板力学性能研究[J]. 桥梁建设, 2017,

- 47(3): 30-35.
- [2] 崔海军. 横隔板缺口形式对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响研究[J]. 施工技术, 2016, 45(1): 119-123.
- [3] 周艳香. 连续钢箱梁桥正交异性板细部构造对其应力影响及疲劳寿命预测[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [4] 张凯斌. 正交异性钢桥面板截面形式与疲劳性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [5] 刘玉龙. 新型钢箱梁正交异性桥面板力学性能分析研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.
- [6] 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]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [7] 吴文清, 张娴. 基于波形钢板的钢箱梁正交异性桥面板静力特性研究[J]. 钢结构, 2019, 34(1): 49-55.
- [8] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [9] 赵欣欣, 刘晓光, 潘永杰, 张玉玲. 正交异性钢桥面板纵肋腹板与面板连接构造的疲劳试验研究的[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(2): 41-45.
- [10] 张清华, 崔闯, 卜一之, 等. 正交异性钢桥面板足尺节段疲劳模型试验研究机[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 72-83.