

大跨斜拉桥型钢组合桥面的结构设计 with 方案比选

李盛家¹, 杨川琪², 何 广², 党思雨¹, 覃子轩¹

(1. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530028; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 为取消正交异性钢桥面板, 提出了一种新的型钢开口肋-UHPC组合桥面板, 即采用T型钢替代加工复杂的U肋。以某双塔双索面大跨斜拉桥为背景, 通过整体与局部受力分析相结合的方式, 研究了新型组合桥面在大跨斜拉桥领域应用的可行性与优势, 并与传统的正交异性钢桥面进行了在结构受力和技术经济性层面的对比。结果表明: 在大跨斜拉桥的横向简支受力状态下, 两种方案的整体受力性能较为接近; 在正常使用极限状态下, 新型组合桥面中UHPC层的最大纵、横向拉应力分别为7.96、6.92 MPa, 均满足抗裂需求; 在整体和局部受力分析中, 新型组合桥面方案中的钢顶板应力较原方案均有较为明显的改善, 最大应力分别下降了16%、81.9%; 新型组合桥面的各疲劳细节应力幅均远在规范疲劳强度限值以下, 表明新型组合桥面具有优异的疲劳性能, 且具有较高的安全储备。新型组合桥面方案的桥面板重量与正交异性钢桥面方案的基本持平, 但每平方米造价减少约34.4%, 表明新型组合桥面在大跨斜拉桥领域有较好的应用前景。

关键词: 桥梁工程; 大跨斜拉桥; 型钢-UHPC组合桥面; 开口肋; 正交异性钢桥面; 有限元分析

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0114-06

Structural Design and Scheme Comparison of Structural Steel Composite Deck of Long-span Cable-stayed Bridge

LI Shengjia¹, YANG Chuanqi², HE Guang², DANG Siyu¹, QIN Zixuan¹

(1. Guangxi Xinfazhan Communications Group Co., Ltd., Nanning 530028, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To cancel the orthotropic steel deck (OSD), a new type of structural steel open rib - UHPC composite deck is proposed, that is to use T-shaped steel instead of complex U-ribs. Taking a double-cable double-plane long-span cable-stayed bridge as the background, through the combination of overall and local mechanical analysis, the feasibility and advantages of the application of the new composite deck in the field of long-span cable-stayed bridges are studied, and the comparison with the traditional OSD is carried out in terms of structural mechanical performance and technical economy. The results show that the overall mechanical performance of the two schemes is relatively close under the transverse simply supported state of the long-span cable-stayed bridge. Under the normal usage limit state, the maximum longitudinal and transverse tensile stresses of the UHPC layer in the new composite deck are 7.96 MPa and 6.92 MPa, respectively, which all meet the crack resistance requirements. In the overall and local mechanical analysis, the stresses of the steel top plate in the new composite deck scheme are obviously improved compared with the original scheme, and the maximum stresses are reduced by 16% and 81.9% respectively. The stress amplitudes of each fatigue detail of the new composite deck are far below the fatigue strength limit in the specification, indicating that the new composite deck has the excellent fatigue performance and higher safety reserve. The deck weight of the new composite deck scheme is basically the same as that of the OSD scheme, but the cost per square meter is reduced by about 34.4%, indicating that the new composite deck also has a good application prospect in the field of long-span cable-stayed bridges.

Keywords: bridge engineering; long-span cable-stayed bridge; structural steel - UHPC composite deck; open rib; orthotropic steel deck (OSD); finite element analysis

收稿日期: 2025-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378236); 2019年度广西交通运输行业重点科技项目(创新项目)

作者简介: 李盛家(1978—), 男, 本科, 高级工程师, 从事交通土建及高速公路施工管理工作。

通信作者: 何广(1996—), 男, 博士在读, 从事桥梁与隧道工程方向研究。E-mail: heguang@hnu.edu.cn

0 引 言

正交异性钢桥面体系具有自重轻、施工速度快、不受主梁形式限制等优点, 在国内外钢桥上得到了广泛的应用, 是目前大跨径桥梁的主要结构形式^[1]。但由于钢桥面为全焊结构, 且采用的是钢桥面专用

沥青铺装,导致造价较高。此外,实践表明,钢桥面体系仍然存在两大顽疾尚未解决:一是钢桥面存在多个易开裂的疲劳细节,导致其在重载车反复作用下极易出现疲劳开裂等病害^[2-4];二是钢桥面专用的沥青铺装层极易在重载车、温度及雨水等因素的耦合作用下破损,使得运维成本大大增加^[4-5]。

为解决上述难题,基于超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)优异的力学性能^[6-13],钢-UHPC 轻型组合桥面结构被首次提出^[14-16]。其原理是通过在钢桥面上增设 UHPC 薄层作用永久结构层,使得桥面系的局部抗弯刚度提升 30 倍以上,从而大幅延长疲劳寿命;且将钢桥面专用铺装转换为普通的混凝土桥面铺装,可使运维成本显著降低。该组合桥面形式已经得到了广泛应用。

然而,钢-UHPC 轻型组合桥面结构由于没有取消正交异性钢桥面板,导致造价仍然较高,且切割和焊接量巨大。并且,对于部分疲劳细节的应力降幅还不明显,仍然存在疲劳开裂的可能性^[17]。因此,该组合桥面还存在继续优化的可能。

为了取消正交异性钢桥面板,一种新的型钢开口肋-UHPC 组合桥面板(以下简称型钢组合桥面)被提出,如图 1 所示。原理是采用 T 型钢替代了加工复杂的 U 肋,并取消了横隔板开孔,从而可以大幅简化加工,并避免疲劳开裂的问题。能够采取这种替代的主要原因是钢面板上的 UHPC 薄层可以大幅度提高面板的局部刚度,使得 U 肋可以被大幅简化。以某 Y 型连续刚构-拱组合体系桥为背景,型钢组合桥面在纵向负弯矩下的静力与疲劳性能以及横向受力性能得到了相应的试验研究^[18-19],证明了该结构的可行性与优势。

本文以某双塔双索面大跨斜拉桥为背景,旨在研究型钢组合桥面在大跨斜拉桥领域应用的可行性与优势。论文以正交异性钢桥面和型钢组合桥面作为两个对比方案,首先介绍了相应的工程背景,然后建立了全桥的整体计算模型以对背景桥进行整体受力分析,并建立了主梁节段局部有限元模型以进行静力与疲劳计算分析,最后进行了对两种方案的技术经济性比较。该研究成果有望为型钢组合桥面的设计与应用提供参考。

1 工程背景

某大跨斜拉桥桥跨布置如图 2 所示,主跨长 658 m,全长 1 108 m,采用了双塔双索面半漂浮结构

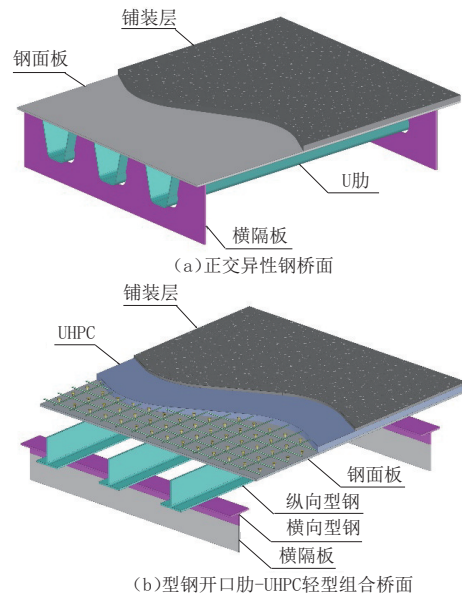


图 1 两种桥面方案对比^[18]

体系,西侧边跨及东侧大堤外边跨采用混凝土箱梁结构,主跨则采用了轻质、便于施工的钢箱梁。大桥设计道路为双向 6 车道+非机动车道+人行道。

东西边跨的混凝土箱梁截面采用分离式双箱结构,其桥面横向布置、结构外形与钢箱梁断面基本保持一致,材料使用 C60 等级混凝土,混凝土箱梁采用三向预应力体系。主跨梁段的设计采用了扁平流线形钢箱梁,总宽 51.85 m,横向中心线处梁高 3.8 m,左右两箱中间通过钢横梁连接,斜拉索锚固于两侧的外腹板,因此可以看作主梁在横向为简支受力状态。原方案采用正交异性钢桥面板构造,如图 3(a)所示。标准梁段长 3.75 m,其中顶板厚 16 mm,并采用高 280 mm、厚 8 mm 以及横向间距 600 mm 的 U 肋加劲,部分板肋厚 16 mm、高 160 mm;底板分为外斜底板、中底板和内斜底板,考虑主梁的受力特点,不同区段的外斜底板、中底板、内斜底板采用了不同的厚度,标准梁段外斜底板、中底板厚 12 mm,内斜底板厚 14 mm;内腹板和外腹板厚度分别为 20、30 mm,横隔板厚 12 mm,横隔板间距 3.75 m,钢横梁间距 15 m。

拟设计的型钢组合桥面方案如图 3(b)所示,钢顶板 12 mm,桥面板铺设 50 mm 厚 UHPC 层,在 UHPC 层上设置 35 mm 沥青铺装,将顶板 U 肋和板肋替换为热轧 T 型钢。T 型钢包括 TN200×200 的型钢纵肋和 TW100×200 的型钢横肋两种规格,型钢纵肋的横向间距为 600 mm。

2 整体受力分析

建立了两种方案的 MIDAS Civil 全桥整体有限元

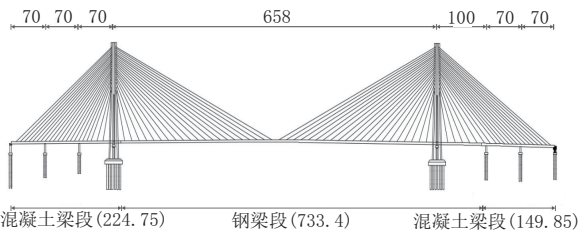


图2 桥跨立面布置图(单位:m)

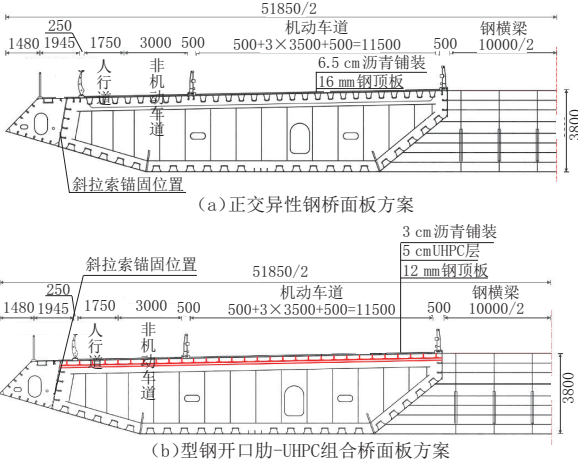


图3 主跨钢箱梁方案

模型,如图4所示,其中主梁、索塔采用梁单元模拟,斜拉索采用索单元模拟,模型计算考虑的荷载主要包括恒载、汽车荷载、人群荷载、温度荷载和风荷载。这些荷载均按照规范进行相应取值与计算。

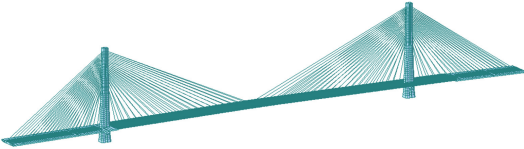


图4 整体有限元模型

计算得到两种方案的对比结果如表1所列,可以看出,两种方案在汽车荷载作用下的主梁挠度相近,挠跨比为1:1 452,远小于规范中1:400的限值,满足受力要求。在正常使用极限状态下,采用型钢组合桥面方案后钢顶板应力较原方案有较为明显的改善,最大应力下降了16%。UHPC层的纵向应力保持在较低水平,如图5所示。UHPC的纵向最大拉应力为4.02 MPa,出现在跨中区域,最大压应力为28.3 MPa,出现在靠近索塔区域,纵向加劲肋的拉、压应力均略有增加。可见,在采用型钢组合桥面后,除了钢顶板应力有较为明显的改善外,对其他结构整体受力影响较小,且UHPC同样能够表现出较为良好的应力状态。

3 局部受力分析

3.1 疲劳计算分析

3.1.1 有限元模型建立

采用ANSYS软件建立了主梁节段的局部有限元

表1 两种方案整体计算对比			
项目	类型	原桥面方案	型钢组合桥面方案
UHPC桥面板	横向应力/MPa	—	—
	纵向应力/MPa	—	-28.30~4.02
钢面板	纵向应力/MPa	-139.28~33.43	-117.07~15.12
	纵肋	纵向应力/MPa	-121.42~19.09
主梁	最大挠度/cm	45.22	45.27

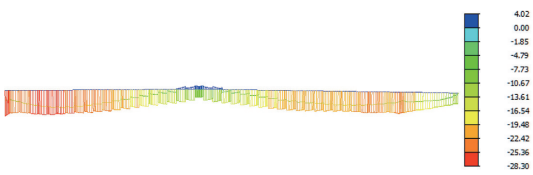


图5 正常使用极限状态主跨UHPC层的纵向应力分布(单位:MPa)

模型,考虑圣维南效应的影响,纵桥向选取6个梁段共22.5 m,横桥向取半幅桥宽20.9 m进行计算。在模型的中部区域进行加载,边界条件的选取以对远离边界位置受力的影响较小为准。建立的有限元模型如图6所示。钢板采用SHELL181单元模拟,UHPC薄层采用SOLID95单元模拟。UHPC、钢材的弹性模量分别取为49、206 GPa,泊松比分别取为0.2、0.3。

将UHPC与钢面板的节点对应,并将对应节点在3个方向的自由度进行耦合,以模拟栓钉的连接。为了防止模型产生刚体位移,对其两个端面进行纵向平动自由度的约束及绕竖轴和横轴的转动自由度的约束。由于模型中没有建立钢横梁,因此在主梁与钢横梁的连接位置处添加横桥向的对称约束,约束吊索位置外腹板节点的竖向自由度。疲劳车辆仅考虑后轴荷载,其纵横向布置方式参考邵旭东等人的研究。

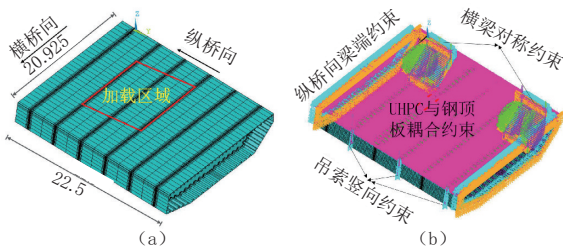


图6 疲劳计算模型示意图(单位:m)

3.1.2 计算结果

分析重点关注了如图7所示的10处疲劳细节^[18],汇总各个荷载工况下所有疲劳位置处的最大疲劳应力幅结果如表2所列,并同《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[20]中考虑1.15倍安全系数后的各疲劳细节强度限值进行对比。结果表明:在疲劳车辆荷载作用下,型钢组合桥面的各疲劳细节应力幅均远在规范疲劳强度限值以下,表明型钢

组合桥面的疲劳性能可满足规范要求。

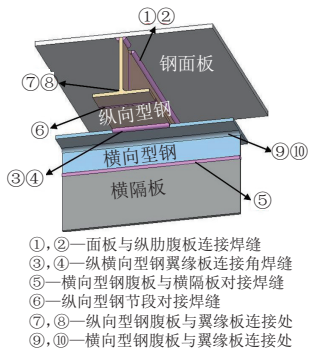


图7 型钢组合桥面疲劳细节^[10]

表2 疲劳应力幅计算结果 单位:MPa

疲劳位置	细节编号	疲劳应力幅	疲劳强度限值
顶板-纵肋连接	①	13.63	60.87
	②	14.56	60.87
纵肋-横肋连接	③	29.43	47.83
	④	30.23	47.83
横肋-横横隔板连接	⑤	40.71	69.57
纵肋连接	⑥	55.88	69.57
型钢母材	⑦	81.13	139.13
	⑧	55.81	139.13
	⑨	62.05	139.13
	⑩	73.13	139.13

3.2 静力计算分析

静力计算的边界条件、单元选择与疲劳计算模型一致,但由于需要考虑整车荷载故增加主梁节段为7个节段,纵向长度增加至26.25 m,模型荷载考虑二期铺装、人群荷载,车辆荷载按3车辆设置,考虑0.78的横向折减系数,纵横向车辆荷载工况的布置方式同样参考邵旭东等人的研究。

型钢组合桥面方案在3种车辆荷载工况下的计算结果如图8至图10和表3所列,可以看出,3种工况下UHPC层的横向拉应力均大于纵向拉应力,桥面局部挠度较为接近,最大横向拉应力值随车辆荷载移动的影响较小,应力峰值出现在各个纵向T形开口肋腹板上方。

选择横向拉应力最大工况作为最不利车辆荷载工况,汇总其他荷载工况的计算结果如表4所列,在正常使用极限状态的频遇组合下,UHPC层的横向最大拉应力为6.92 MPa,纵向最大拉应力4.66 MPa,钢结构应力较小,根据整体计算结果进行应力叠加,得到在正常使用极限状态下UHPC的纵向拉应力为7.96 MPa。

为验证型钢组合桥面局部受力的优越性,计算其在同等车辆荷载作用下同正交异性钢桥面方案的

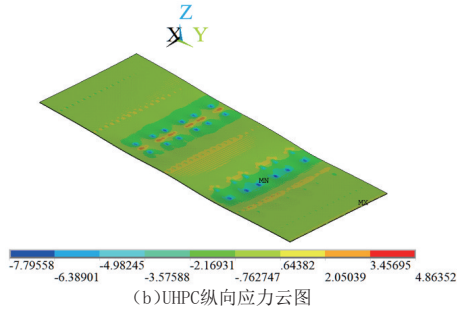
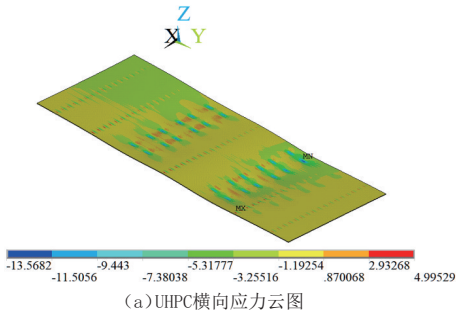


图8 隔板对称工况的UHPC应力云图(单位:MPa)

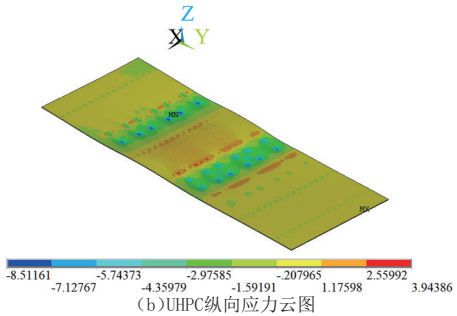
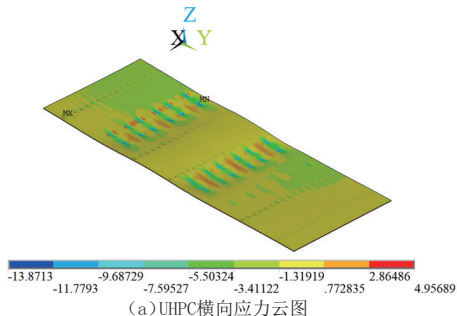


图9 跨横隔板工况的UHPC应力云图(单位:MPa)

应力、变形对比,得到结果如图11至图13和表5所示。在轮载作用下,采用型钢组合桥面后钢顶板应力较正交异性钢桥面方案减少了81.9%,纵向加劲肋、横隔板应力和桥面板挠度基本一致,表明采用新型组合桥面结构后,在不影响其他结构受力状态的前提下,桥面板局部受力能得到极大改善。

4 技术经济性比较

对两种方案的技术经济性对比如表6所列,由于两种方案仅在桥面板和横隔板两个部分有所区别,故仅计算了两种方案中桥面板结构和横隔板的技术指标,尚未计算其他钢结构部分的内容。对于大跨

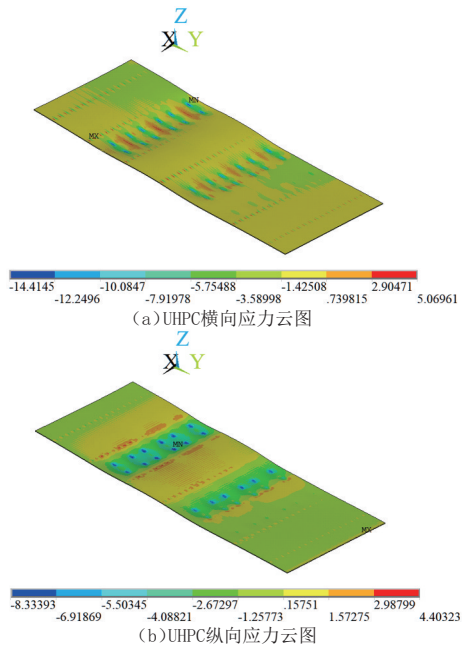


图 10 隔板跨中工况的 UHPC 应力云图(单位:MPa)

表 3 不同车辆荷载计算结果

应力/变形	隔板对称	跨横隔板	隔板跨中
UHPC 最大横向拉应力/MPa	5.00	4.96	5.07
UHPC 最大纵向拉应力/MPa	4.86	3.94	4.40
UHPC 挠度/mm	7.32	7.39	7.35

表 4 型钢组合桥面方案计算结果

应力	荷载工况			
	桥面铺装	人群荷载	车辆荷载	频遇组合 [恒载+0.7 汽车荷载+0.4 人群]
UHPC 横向拉应力/MPa	3.35	0.04	5.07	6.92
UHPC 纵向拉应力/MPa	1.58	0.07	4.40	4.66
钢顶板最大拉应力/MPa	1.71	0.29	15.57	12.73
纵向型钢最大拉应力/MPa	31.98	0.72	50.90	67.90
横隔板最大拉应力/MPa	28.32	0.43	53.92	66.24

钢桥,桥面板自重的影响不可忽略,而采用型钢组合桥面板后,其桥面板重量与正交异性钢桥面板方案中的基本持平,但每平方米造价减少了约 34.4%。综上所述,型钢组合桥面在大跨桥梁领域同样有较好的应用前景。

5 结 语

本文主要研究了型钢组合桥面在大跨斜拉桥领域应用的可行性与优势。通过进行整体受力和局部受力分析(静力、疲劳),以探明型钢组合桥面在受力方面的可行性,并进行了与正交异性钢桥面方

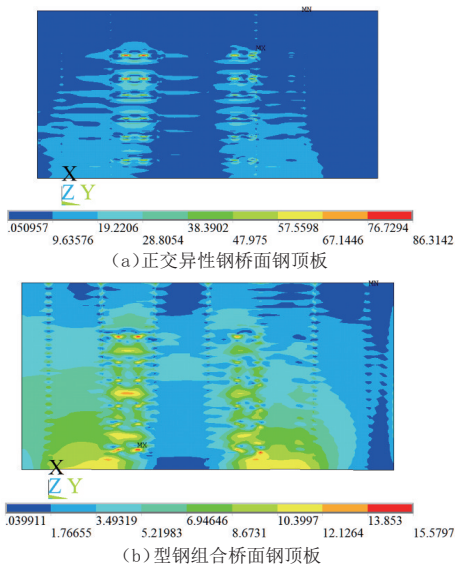


图 11 两种方案钢顶板应力云图(单位:MPa)

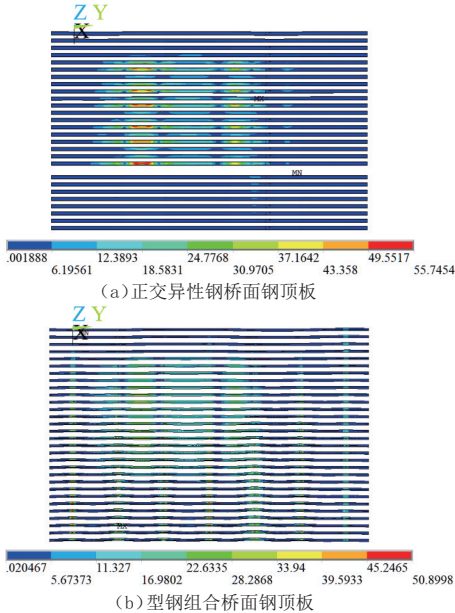


图 12 两种方案纵向加劲肋应力云图(单位:MPa)

案的技术经济性对比,以探明型钢组合桥面在经济性方面的可行性。研究得到的主要结论如下所列。

(1)在大跨斜拉桥的横向简支受力状态下,两种方案的整体受力性能较为接近,表明采用型钢组合桥面结构对斜拉桥的整体受力性能影响较小。在正常使用极限状态下,桥面 UHPC 层的最大纵向拉应力为 7.96 MPa,最大横向拉应力为 6.92 MPa,均满足抗裂需求,且 UHPC 表现出较好的受力状态。

(2)在整体受力和局部受力分析(静力计算)中,型钢组合桥面方案中的钢顶板应力较原方案均有较为明显的改善,最大应力分别下降了 16%、81.9%,表明采用型钢组合桥面后,桥面板局部受力能得到极大改善。

(3)在疲劳车辆荷载作用下,型钢组合桥面的各

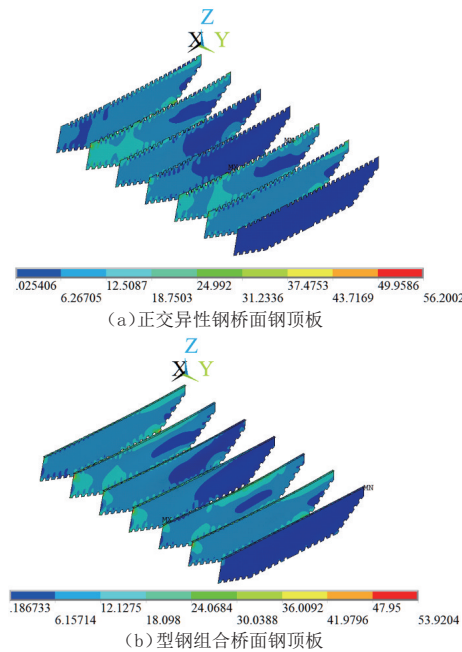


图 13 两种方案横隔板应力云图(单位:MPa)

表 5 车辆荷载作用下应力及变形对比结果

应力/变形	正交异性钢 桥面方案	型钢组合桥 面方案
钢板最大拉应力/MPa	86.31 (100%)	15.58 (18.1%)
纵向加劲肋最大拉应力/MPa	55.75	50.90
横向加劲肋(横隔板)最大拉应力/MPa	56.20	53.92
桥面板挠度/mm	7.04	7.35

表 6 技术经济性对比

材料指标		每平方米重/(kg·m ⁻²)		每平方米造价/(元·m ⁻²)	
		正交异性 钢桥面	型钢组合 桥面	正交异性 钢桥面	型钢组合 桥面
桥面铺装	50 mm UHPC	—	108.72	—	427.12
	65 mm 专用 沥青铺装	121.15	—	1 400	—
	30 mm 普通 沥青铺装	—	55.91	—	200
钢结构	钢顶板 (16/12 mm)	125.6	94.2	1 632.8	1 244.6
	纵向 T 型 加劲肋	—	46.14	—	369.15
	纵向 U 型 加劲肋	57.74	—	750.56	—
	横向加劲肋	—	6.28	—	50.25
	纵向板肋	4.08	—	62.42	—
	横隔板	64.07	59.71	832.91	776.26
	合计	372.64 (100%)	370.96 (99.5%)	4 678.69 (100%)	3 067.38 (65.6%)

疲劳细节应力幅均远在规范的疲劳强度限值以下,表明型钢组合桥面具有优异的疲劳性能,能够满足

规范要求,且具有较高的安全储备。

(4)型钢组合桥面方案中的桥面板重量与正交异性钢桥面方案基本持平,但每平方米造价减少约 34.4%,表明型钢组合桥面在大跨斜拉桥领域同样有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 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.

[2] 项海帆.21 世纪中国桥梁的发展之路——中国距离桥梁强国还有多远[C]//第二十一届全国桥梁学术会议论文集(上册).北京:人民交通出版社,2014.

[3] 张喜刚,刘高,马军海,等.中国桥梁技术的现状与展望[J].科学通报,2016,61(4):415-425.

[4] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述[J].中国公路学报,2014,27(5):1-96.

[5] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007,40(9):65-77.

[6] 万志勇,陈健平,贺绍华,等.UHPC-NC 界面抗剪性能试验研究[J].中外公路,2024,44(4):138-147.

[7] HE Guang, SHAO Xudong, CHEN Yubao, *et al.* Preliminary Design of a Steel - UHPFRC Composite Truss Arch Bridge and Model Tests of K-Joints[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(10): 04022090.

[8] 袁明,韩怀志,颜东煌,等.纤维长度对 UHPC 轴拉性能的影响试验研究[J].中外公路,2023,43(6):94-100.

[9] 张杰,蔺鹏臻.UHPC 加固钢筋混凝土简支梁后可靠度分析[J].中外公路,2023,43(5):72-77.

[10] HE Guang, SHAO Xudong, WU Suiwen, *et al.* Sliding Connectors for Cyclic Construction of Steel-UHPC Composite Truss Arch Bridges: Design Method and Feasibility Study[J]. Engineering Structures, 2024(316): 118451.

[11] 廖万成,赵华,安家禾.预制拼装钢-UHPC 组合桥面板湿接缝抗弯性能研究[J].中外公路,2024,44(1):102-110.

[12] 张欣,李瑜,刘勇.大跨度自锚式悬索桥钢-UHPC 轻型组合加劲梁构造设计研究[J].中外公路,2023,43(4):147-152.

[13] SHAO Xudong, HE Guang, SHEN Xiujiang, *et al.* Conceptual Design of 1000 m Scale Steel-UHPFRC Composite Truss Arch Bridge[J]. Engineering Structures, 2021(226): 111430.

[14] SHAO Xudong, YI Dutao, HUANG Zhengyu, *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.

[15] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等.正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J].中国公路学报,2012,25(2):40-45.

[16] 邵旭东,胡建华.钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[17] 北京铁科工程检测中心.佛山市佛陈大桥高性能轻型组合桥面结构实桥试验[R].北京:北京铁科工程检测中心,2014.

[18] 邵旭东,杨川琪,孙璇,等.型钢开口肋-UHPC 轻型组合桥面横向受力性能研究[J].土木工程学报,2024:1-17.

[19] 孙璇,邵旭东,邹德强.型钢开口肋-UHPC 轻型组合桥面新结构静力与疲劳性能研究[J].中国公路学报,2023:1-14.

[20] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].