

钢-STC 组合桥面板静力及疲劳性能分析

邓德伦¹, 李新春¹, 杨盼杰²

(1. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060; 2. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530022)

摘要: 传统正交异性钢桥面板结构易疲劳开裂, 掺入钢纤维的超高性能混凝土因其优异的韧性和抗拉强度, 可提高桥面结构的刚度和耐久性, 缓解疲劳开裂问题。然而, 目前结合实际工程对考虑超高性能混凝土作为结构层受力与传统正交异性桥面板性能的差异的量化分析仍较欠缺。因此, 以清远市北江某桥为背景建立节段箱梁精细化有限元模型, 对纯钢桥面板和钢-STC 组合桥面板的结构进行超高性能混凝土层参与受力对桥面结构静力及疲劳差异的量化分析。结果表明, 铺设超高性能混凝土层后可显著提高主梁刚度, 较大幅度降低箱梁顶板应力, 基本消除钢桥面的疲劳开裂病害问题。

关键词: 大跨斜拉桥; 钢-STC 组合桥面板; 精细化有限元模型; 静力分析; 疲劳性能分析

中图分类号: U 488.27

文献标识码: A

Static and Fatigue Performance Analysis of Steel-STC Combined Bridge Deck Slabs

DENG Delun¹, LI Xinchun¹, YANG Panjie²

(1. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd, Guangzhou, 510060, Guangdong, China;
2. Guangxi Transportation Design Group Co., Ltd, Nanning 530022, Guangxi, China)

Abstract: Traditional orthotropic steel bridge deck structures are prone to fatigue cracking, and ultra-high-performance concrete incorporated with steel fibers can improve the stiffness and durability of the bridge deck structure and alleviate the fatigue cracking problem due to its excellent toughness and tensile strength. However, quantitative analysis of the differences in the performance of bridge decks considering ultra-high performance concrete as a structural layer and traditional orthotropic anisotropic bridge decks in conjunction with practical engineering is still lacking. Therefore, the refined finite element model of segmental box girder was established in the background of a bridge in Beijiang, Qingyuan, to quantitatively analyze the difference in static force and fatigue of the bridge deck structure with the participation of ultra-high-performance concrete layer in the force on the structure of the pure steel bridge deck and the structure of the steel-STC combination bridge deck. The results show that the laying of ultra-high performance concrete layer can significantly improve the stiffness of the main girder, reduce the top plate stress of the box girder, and basically eliminate the fatigue cracking problem of the steel bridge deck.

Key words: long span cable-stayed bridge; steel-STC composite bridge deck; refined finite element model; static analysis; fatigue performance analysis

大跨度斜拉桥的箱形主梁常采用正交异性钢桥面板, 但其存在疲劳开裂的问题^[1-3]。传统方法是采用混凝土桥面板替代钢主梁的正交异性钢桥面板, 以提高斜拉桥刚度、改善结构抗风性

能, 同时避免正交异性钢桥面板疲劳开裂的问题。然而, 混凝土桥面板存在自重大、桥面板易破损等缺点。

针对正交异性桥面板易疲劳开裂, 混凝土桥

收稿日期: 2023-10-27

作者简介: 李新春, 高级工程师, 硕士, 研究方向为城市桥梁设计与研究

面板自重大的难题,以湖南大学邵旭东团队为代表的国内学者引入超高性能混凝土(ultra-high performance concrete,简称UHPC)开展了一系列桥面板优化研究。包括探究了薄层UHPC轻型组合桥面板的疲劳性能,试件疲劳破坏时UHPC板保持完好而未开裂^[4];以虎门大桥为背景,通过多尺度有限元分析,对轻型组合桥面中抗剪栓钉的疲劳性能进行了疲劳评估,并提出了满足疲劳要求的栓钉布置形式^[5];采用热点应力法对不同厚度的UHPC层进行了应力幅分析,并依据足尺模型疲劳试验对UHPC层的抗弯拉疲劳性能进行评价^[6];提出可用短钢筋以及超短栓钉作为剪力连接件解决UHPC层过薄而不适合采用常规剪力连接件的问题^[7];以枫溪大桥为工程背景,对钢-STC轻型组合桥面板典型疲劳细节进行了分析和评估,为推进钢-STC轻型组合桥面在实际工程中的应用提供了最为直接的参考依据^[8]。最终,其团队提出以5~6 cm密配筋UHPC作为超高韧性混凝土(super toughness concrete,简称STC)层部分替代正交异性钢桥面板的提出钢-STC组合轻型组合桥面板方案,达到降低结构自重、增大桥面板刚度、提高耐久性的目的。钢-STC组合桥面板已在天津海河桥、广东佛陈大桥、广东肇庆马房大桥等工程中应用。

清远市北江某桥采用了钢-STC组合桥面板的结构形式,然而,由于铺设STC层后桥面板材料及钢材厚度与传统正交异性钢桥面板不同,钢-STC组合桥面板力学性能尚不明确,有必要探明其与传统正交异性桥面板性能的差异。本研究基于精细化有限元模型分析了静力及疲劳性能,可为后续钢-STC组合桥面板的设计应用提供参考。

1 工程背景

该项目斜拉桥为双塔三跨超宽幅钢箱混合梁斜拉桥,跨径为(100+218+100)m,塔梁固结,墩-梁间设支座。上部结构主梁顶板宽42 m,底板宽22 m,悬臂长10 m,梁高4 m。主梁采用单箱五室钢箱梁外加挑臂结构,主跨钢箱梁全长197.8 m,边跨钢箱梁单边全长99.4 m(含牛腿)。钢箱梁纵向设有两道32 mm厚中腹板、两道16 mm厚侧腹板、两道14 mm厚边腹板,横隔板间距4.0 m。正交异性钢桥面车行道范围内顶板厚16 mm,非机动车道范围内顶板厚14 mm,下设U型纵肋厚8 mm,I肋厚16 mm,间距600 mm,

中间6.8 m范围内底板16 mm,边侧底板12 mm。横隔板为实腹式结构,普通横隔板厚14 mm,横隔板加劲肋厚10 mm。全桥桥型及标准节段横断面如图1、图2所示。

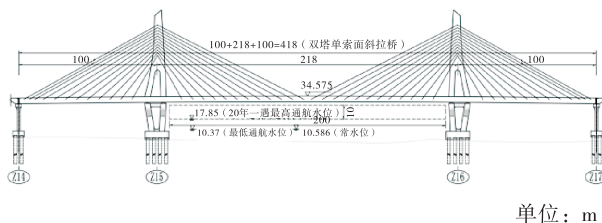


图1 桥型布置图

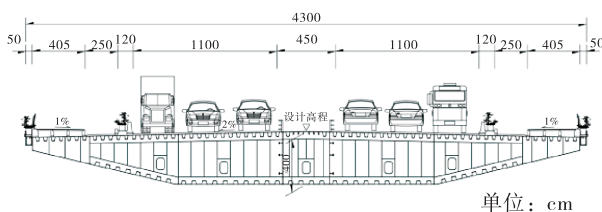


图2 桥梁横断面布置图

2 精细化有限元分析

该桥桥面宽43 m,横隔板间距4 m,钢顶板厚度14~16 mm,组合桥面由顶板上铺5 cm超高性能混凝土以及3 cm磨耗层组成。通过建立局部精细化模型,明确超高性能混凝土层和钢桥面板的受力状态,分析反复荷载作用下钢桥面板疲劳细节的疲劳应力,并采用热点应力法对其疲劳寿命进行评估。

2.1 模型及本构

局部精细化模型采用通用有限元ANSYS进行建模,模型长度为32 m,包含4根斜拉索吊点、8块横隔板,为精简模型方便计算,取横桥向1/2建模进行分析。模型中钢桥面板的顶板、底板、U肋、斜腹板与横隔板均采用板单元,STC层采用实体单元单元模拟。钢-STC层间通过栓钉连接,栓钉间距为150 mm×150 mm。由于栓钉间距较密,STC层与钢板间的连接作用较强,根据文献^[9]两者间无相对位移,故模型将钢箱梁的壳单元与STC层的实体单元进行耦合处理,钢箱梁局部精细有限元模型划分350万个单元,示意图如图3所示。

根据《超高性能轻型组合桥面结构技术规范》(GDJTG/T A01—2015)^[10],STC层弹性模量 $E_u=42.6$ GPa,泊松比 $\mu_u=0.2$ ^[9]。钢结构和栓钉的材料弹性模量 $E_s=210$ GPa,泊松比 $\mu_s=$

0.3^[11],材料屈服强度参考《桥梁用结构钢》(GB/T 714—2015)^[12]。

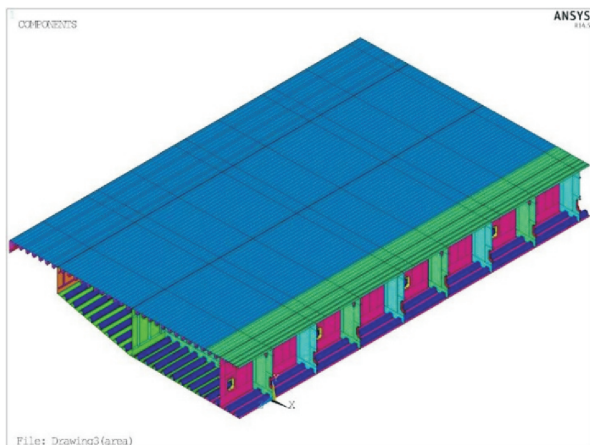


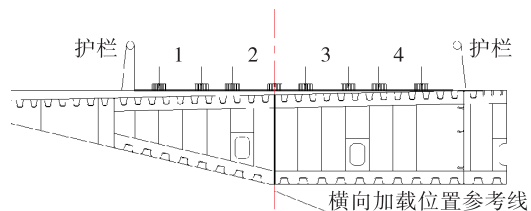
图3 钢箱梁局部精细化有限元模型

2.2 荷载及边界

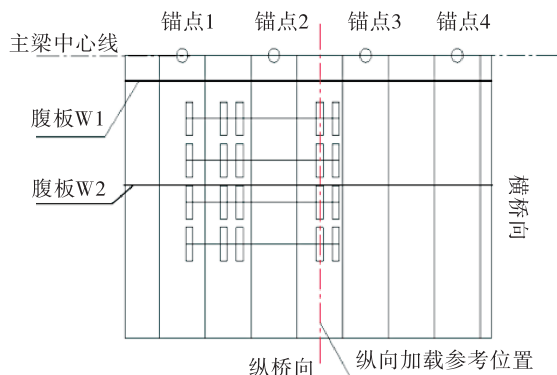
根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[13],局部箱梁模型的恒载取钢容重 78.5 kN/m^3 , STC 层容重 26 kN/m^3 , 均布人群荷载取 2.5 kN/m^2 , 汽车荷载的车辆重力标准值为 550 kN , 静力分析考虑 1.3 的冲击系数, 轮载均布在 $0.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ (纵向 $\times$ 横向) 的接触范围内, 车辆荷载按最不利荷载位置考虑, 如图 4 所示。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[14] 规定的疲劳荷载模型, 仅考虑后轴的双轴作用, 疲劳加载不考虑冲击系数。疲劳车加载作用于正交异性钢桥面板横桥向和纵桥向的最不利车轮荷载工况示意图, 如图 5 所示。

节段箱梁模型的两端横断面上约束纵向平动自由度, 纵断面上施加横向对称约束, 在斜拉索吊点的钢锚箱范围内约束竖向自由度。根据圣维南原理, 上述边界条件对应力计算影响小。

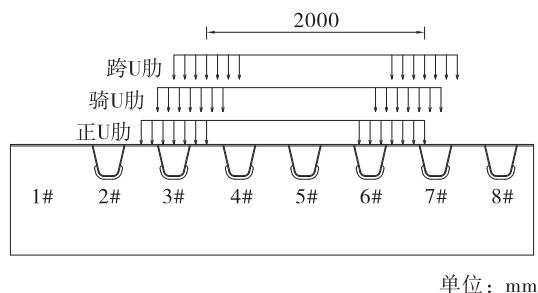
根据车辆不同布置位置考虑荷载工况。横桥向考虑四种位置: ①最左侧 (人行道侧); ②最右侧; ③腹板 W2 上; ④腹板 W2 的两侧。纵向放置一排车辆, 以后轴前轮轴线为参考, 考虑其作用在横隔板、斜拉索锚固点所在跨跨中、非斜拉索锚固点所在跨跨中三种位置, 共有 12 种



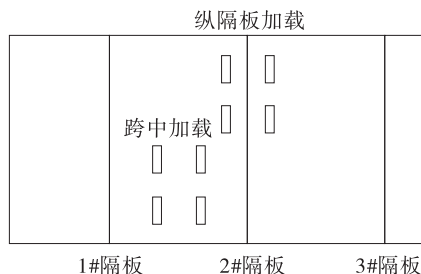
(a) 横向位置: 正腹板加载



(b) 纵向位置: 非斜拉索锚固点跨中
图4 最不利车辆荷载加载示意图



(a) 横向加载位置



(b) 纵向加载位置

图5 疲劳车加载位置示意图

工况。经计算分析, 顶板最不利荷载布置如图 4 所示。

2.3 疲劳细节及评估方法

钢桥面板容易发生疲劳开裂构造细节如图 6 所示, 主要有 6 种类型: ①面板与 U 形肋焊缝的面板处; ②U 形肋与面板焊缝的 U 形肋处; ③U 形肋与横隔板交叉部位 U 形肋处; ④U 形肋与横

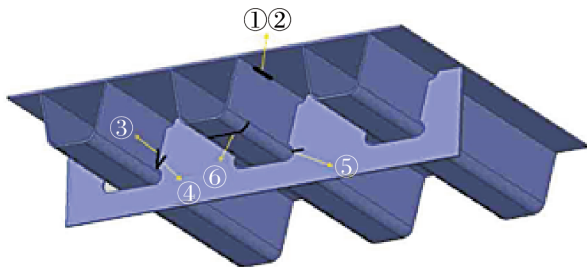


图6 钢桥面典型疲劳损伤细节

隔板交叉部位的横隔板处; ⑤横隔板弧形切口处; ⑥U 形肋下缘对接焊缝处。疲劳评估采用两点线性外推的热点应力法, 外推点为外推点 0.4 t/1.0 t, 如式 (1) 所示:

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t}$$

(1)

3 结果与分析

3.1 静力性能

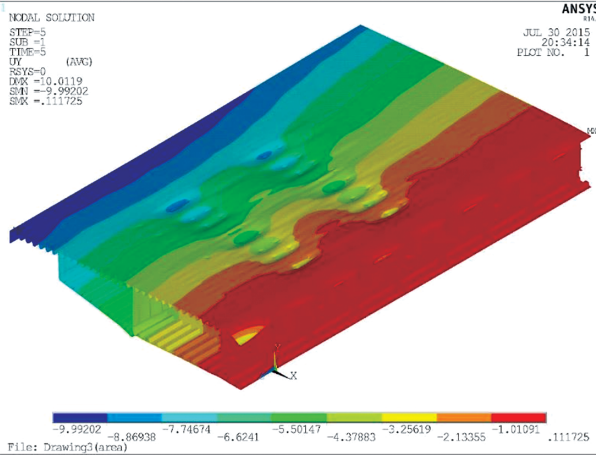
通过全过程节段箱梁有限元模型加载研究超宽幅钢-STC 轻型组合桥面的静力性能, 节段箱梁主要构件最大应力值如表 1 所示。铺设 STC 后节段箱梁刚度提高, 竖向位移有所下降, 纯钢梁的最大竖向挠度为 10.0 mm, 铺设 50 mm 厚 STC 层后钢箱梁的最大竖向挠度减小为 8.5 mm, 如图 7 所示。节段箱梁顶板钢板应力如图 8 所示, 可见顶板在车轮局部荷载作用下后轮与腹板相交位置处有最大拉应力为 163.8 MPa, 最大压应力为 155.9 MPa, 当铺设 50 mm STC 层后, 顶板钢板最大拉应力降低至 48.1 MPa。铺设 50 mm STC 层的应力状态如图 9 所示, STC 层的最大拉应力为 9.5MPa, 出现在车轮荷载所在的横隔板与腹板相交位置。

节段箱梁精细有限元静力性能分析表明, 在铺设 50 mm 厚的 STC 层后, 顶板在车轮荷载的作用下局部应力大幅降低。STC 层对于顶板和顶

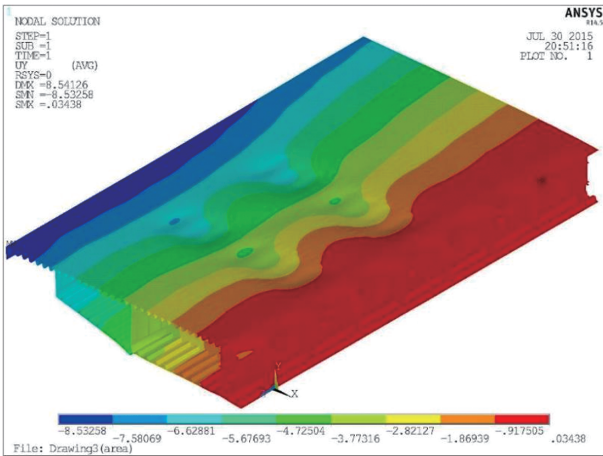
表 1 节段箱梁主要构件最大应力值

单位: MPa

结构形式	顶板	底板	横隔板	腹板	顶板 U 肋	底板 U 肋	横隔板加劲	腹板加劲
纯钢	163.8	-100.6	181.1	44.4	-150.0	116.3	55.1	28.1
组合桥面板	48.1	-96.7	173.7	42.8	-86.1	112.1	51.8	27.0

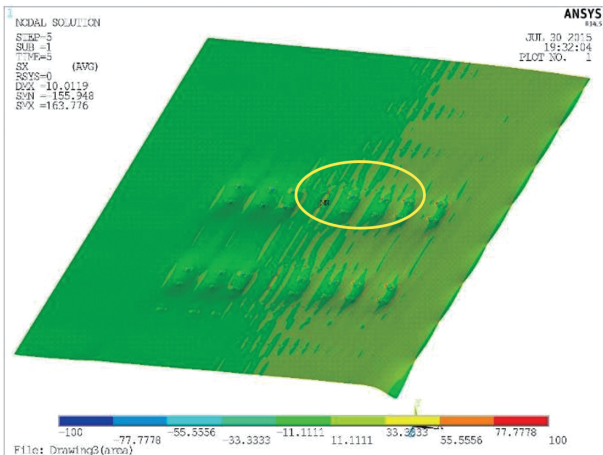


(a) 纯钢桥面板

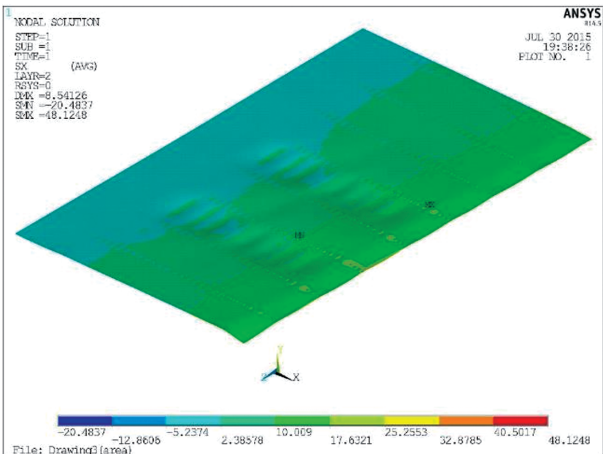


(b) 钢-STC 组合桥面板

图 7 节段箱梁竖向位移图



(a) 纯钢桥面板



(b) 钢-STC 组合桥面板

图 8 节段箱梁顶板钢板应力图

板加劲肋应力的削减起十分明显的作用, 对其他各板件的应力也有一定的削减作用。

3.2 疲劳性能

节段精细化模型桥面板各细节最大疲劳应力如表 2 所示, 可见采用钢-STC 轻型组合桥面板

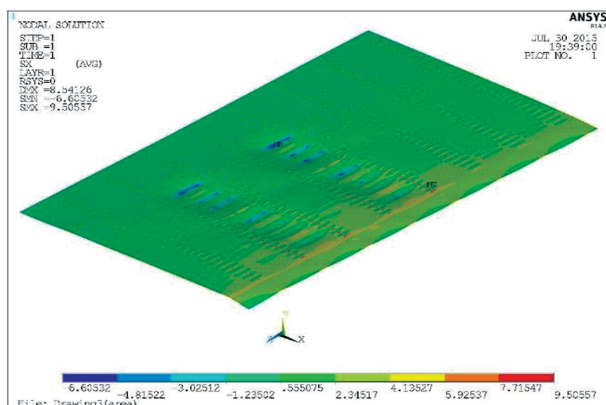
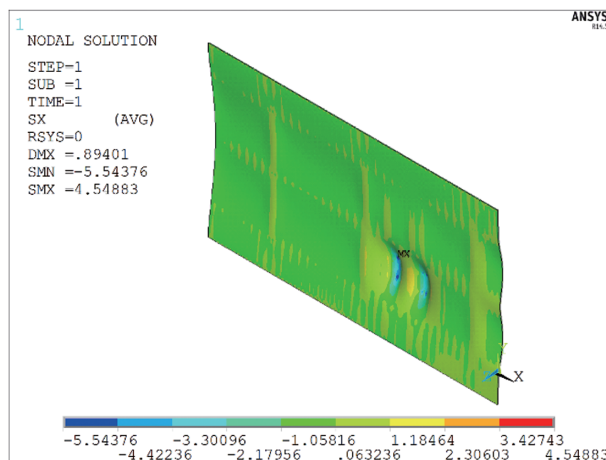


图9 节段箱梁组合桥面板 STC 层应力图

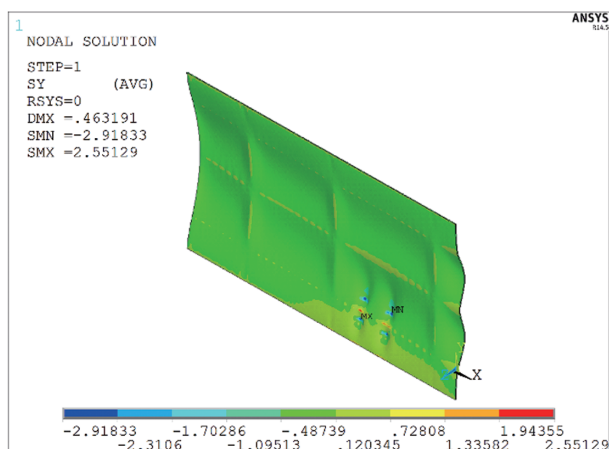
后, 钢桥面板的疲劳细节应力大幅度减小, 正交异性钢桥面 6 类典型疲劳细节在疲劳车作用下疲劳应力在 26.06 ~ 58.41 MPa 之间, 疲劳细节应力幅降幅在 35.94% ~ 55.65%, 铺设 50 mm STC 层后疲劳应力幅均小于规范要求的 200 万次疲劳强度 (70 MPa)。疲劳荷载下 STC 层的纵桥向和横桥向最大拉应力状态如图 10 所示, 可见 STC 层横桥向在“骑 U 肋—跨中”工况下最大拉应力为 4.55 MPa, 纵桥向在“正 U 肋—隔板”工况下最大拉应力为 2.55 MPa, 远小于其名义弯拉应力容许值 21.7 MPa, 没有疲劳开裂风险。

表2 桥面板各细节最大疲劳应力

疲劳 细节	纯钢桥面 板/MPa	钢-STC 组合 桥面板/MPa	应力降幅/%	疲劳容许 值/MPa
细节 1	102.35	58.41	42.93	70
细节 2	79.16	35.11	55.65	70
细节 3	108.75	57.50	46.94	70
细节 4	53.75	32.36	39.80	55
细节 5	98.06	47.09	51.98	70
细节 6	40.68	26.06	35.94	70



(a) 横桥向



(b) 纵桥向

图10 STC 层最大应力状态

4 结论

本文以清远市北江某桥为背景, 通过局部精细化节段箱梁有限元模型对纯钢桥面板和钢-STC 组合桥面板的结构进行了静力及疲劳分析, 探明了考虑 STC 作为结构层桥面板与传统正交异性桥面板性能的差异, 量化铺设 STC 层前后疲劳易损细节削弱作用, 验算了 STC 层的疲劳应力及其开裂风险, 可为后续钢-STC 组合桥面板的设计应用提供参考。具体结论如下:

(1) STC 层可以提高箱梁的刚度, 铺设 50 mm STC 层后节段模型最大竖向挠度由 10 mm 减小到 8.5 mm, 刚度显著提高。

(2) STC 层对于顶板和顶板加劲肋应力的削减作用明显, 对其他各板件的应力也有一定的削减作用。铺设 50 mm STC 层后节段箱梁顶板钢板应力显著下降, 最大拉应力由 163.8 MPa 下降至 48.1 MPa, STC 层的最大拉应力为 9.5 MPa, 远小于弯拉强度值。

(3) 采用钢-STC 组合结构可以解决正交异性桥面疲劳开裂问题, STC 层可大幅降低钢桥面板疲劳细节的应力, 铺设 50 mm STC 层后疲劳应力在 26.06 ~ 58.41 MPa 之间, 疲劳应力幅降幅超 35.94%。STC 层最大拉应力为 4.55 MPa, 远小于其名义弯拉应力容许值 21.7 MPa, 满足疲劳耐久性。

参考文献:

- [1] 向泽. 钢-UHPC 组合正交异性桥面板的合理构造研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [2] 冯峥, 李传习, 邓帅, 等. 钢-STC 组合梁桥面板静承载力比较分析 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学

- 版),2019,51(04):551-558.
- [3] 汤明. 双塔单索面大悬臂钢-STC组合桥面斜拉桥受力性能的研究[J]. 公路,2018,63(07):216-221.
- [4] 张士红. 带开口肋的轻型组合桥面板基本性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [5] 邵旭东,蔡文涌,曹君辉,等. 型钢-UHPC轻型组合桥面板及其抗弯性能研究[J]. 土木工程学报,2024,57(6):152-168.
- [6] 丁楠,邵旭东. 轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报,2015,48(01):74-81.
- [7] 邵旭东,郑晗,黄细军,等. 钢-UHPC轻型组合桥面板横向受力性能[J]. 中国公路学报,2017,30(09):70-77,85.
- [8] 裴必达,李立峰,邵旭东,等. 钢-UHPC轻型组合桥面板实桥试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(01):76-84.
- [9] 广东省交通运输厅. 超高性能轻型组合桥面结构技术规范:GDJTG/T A01—2015[S]. 2015.
- [10] 戴君. 钢-UHPC组合桥面板力学性能分析与试验研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- [11] 段林利. 抗拔不抗剪连接钢-混凝土组合框架结构受力性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2020.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 桥梁用结构钢:GB/T 714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.

(上接第20页)

集隧道断面的点云数据和高程数据,通过联邦学习算法融合采集的隧道多源数据,通过综合不同类型的测量仪器和传感器的数据,扩展测量覆盖范围的同时消除各种误差,大幅提高了测量精度和可靠性。

(2) 利用隧道结构中心线方法批量切片处理融合后的数据,快速提取地铁隧道断面。相比传统的手动切片方法,这种自动化的批量处理方式能够大大提高效率,节约时间和人力成本。

(3) 对以上数据进行转换后构建隧道断面独立平面坐标,并拟合隧道半径结果和设计结果之间的差值,可获取断面收敛变形量,从而精准评估隧道断面的收敛变形量。

(4) 实验结果显示,本文方法具有较好的应用效果,能够可靠完成隧道数据采集并完成断面拟合,计算断面收敛变形结果。角度在 100° 和 340° 时,断面收敛变形量最大,最大值达到30.1 mm。

参考文献:

- [1] 廖胤齐,王智. 移动三维扫描支持下的地铁盾构隧道收敛测量技术应用研究[J]. 测绘通报,2022(S2):77-80.
- [2] 刘新根,许敏娟,邢智馨. 基于激光扫描的地铁隧道收敛变形快速检测技术[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(09):63-68.
- [3] 潘东峰,杨超,吴一同,等. 利用TLS技术进行地铁隧道断面提取及变形监测分析[J]. 测绘通报,2022,541(04):130-133.
- [4] 陈虹宇,吴贤国,张浩蔚,等. 基于物联网的运营地铁隧道结构健康监测系统软件平台开发[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(01):93-96,106.
- [5] 张鸿飞,王小龙,薛亚东,等. 基于知识图谱的盾构隧道服役状态评估[J]. 现代隧道技术,2022,59(04):58-68.
- [6] 贺磊,蔡乾广,许诚权,等. 地铁盾构断面椭圆度检测及数据分析研究[J]. 都市快轨交通,2021,34(03):104-107,118.
- [7] 李翔宇,李新源,李明宇,等. 基于实测数据的地铁隧道长期沉降预测模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(02):186-193.
- [8] 李照众,王浩,畅翔宇,等. 基于组合模型的高铁隧道围岩收敛变形预测[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(05):851-858.
- [9] 王姝,任玉,关展旭,等. 基于差异信息量的多源数据融合方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(09):1246-1253.
- [10] 莫慧凌,郑海峰,高敏,等. 基于联邦学习的多源异构数据融合算法[J]. 计算机研究与发展,2022,59(02):478-487.
- [11] 李瀚源,李兴高,刘浩. 隐伏正断层运动下盾构隧道结构力学响应分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(S1):29-39.
- [12] 丁孝兵,高志强,杨坤. 基于惯导和CPⅢ控制点的地铁隧道移动激光扫描三维点云重建[J]. 测绘通报,2021,534(09):112-115,129.
- [13] 张研沁,狄宏规,徐永刚. 基于机器学习的地铁盾构隧道长期沉降预测[J]. 都市快轨交通,2022,35(03):89-94.
- [14] 赵宁宁,王嘉伟,芦斌,等. 光电测量方法在盾构隧道收敛监测中的可行性研究[J]. 铁道标准设计,2022,66(12):111-114,136.
- [15] 张立伟. 特大断面公路隧道力学响应数值仿真[J]. 计算机仿真,2021,38(02):101-105.