

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0503

基于实例分析的 UHPC 延伸桥面无缝桥力学性能研究

陈 隆¹, 石鑫磊², 丁 勇^{1*}, 韩春旭³, 熊 群¹

(1. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315192;

3. 宁波象山交通开发建设集团有限公司, 浙江 宁波 315700)

摘要: 延伸桥面无缝桥作为一种新型的桥梁结构, 其力学性能是关注的重点。为此, 以一座实际工程中的延伸桥面无缝桥为例, 建立包含主梁、超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)连续桥面板与桥头延伸路面的整体有限元模型; 并针对该桥的薄弱部位(延伸桥面板), 分析最不利汽车荷载工况、梯度温度工况、均匀温差(随季节变化)工况下的应力。结果表明: UHPC 延伸桥面板在上述 3 种工况下均能满足强度要求。最后对实桥进行汽车荷载下桥面板钢筋应力与主梁应变的测试发现, 延伸桥面板、连续桥面板中存在较大的钢筋应力, 有必要采用全桥分析理论计算其数值; 延伸桥面板、连续桥面板对主梁有边界约束作用, 可有效降低主梁的应变。

关键词: 无缝桥; 实例分析; 延伸桥面板; 有限元方法; 车辆荷载试验

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 03-0086-09

简支梁桥因其结构简单、成本低、施工难度小等特点, 在我国中小跨径桥梁中应用十分广泛。然而, 传统的多跨简支梁桥为了抵抗主梁的温度变形, 通常需要在桥台端部以及主梁之间设置较多的伸缩缝, 这些伸缩缝不仅容易产生损坏, 还会造成额外的噪声和渗水问题^[1-4]。为了解决这些问题, 相关学者通过分析和优化, 提出了新形式的无伸缩缝桥梁。

经过数十年发展, 无伸缩缝桥梁已开始在工程中应用, 延伸桥面无缝桥梁是其中一种桥型^[5]。这种桥梁不仅在主梁之间安装了连续桥面板, 而且将两侧桥头的桥面板延伸到了桥台后部, 并与桥头的引道相连接。由于整个桥梁没有设置任何伸缩缝, 因此连续桥面板成为重要的受力区域。

国内外学者已对连续桥面板的结构性能开展了研究, 如 Caner 等^[6]和 Wing 等^[7]对连续桥面板的无黏结段长度进行了研究, 并提出了连续桥面板的设计方法; 庄一舟等^[8]推导了连续桥面板在汽车

荷载、温度效应等作用下的简化算法; 丁勇等^[9]提出了一种带有边界转动弹簧的简支梁模型, 用以分析连续桥面板的静动力特性; 石鑫磊等^[10]分析了桥头有伸缩缝的多跨简支梁桥连续桥面板的破坏原因, 提出用超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)材料提高结构强度; 李积泉等^[11]和胡志坚等^[12]对钢-混组合梁桥的 UHPC 连续桥面板的力学性能进行了研究; Luo 等^[13]采用一种新的连续桥面板分析方法, 提出了梁端旋转折减系数的概念。还有学者^[14-16]针对连续桥面板易开裂的特点, 进行了工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)、纤维增强塑料(Fiber Reinforced Plastics, FRP)等材料对连续桥面板力学性能影响的研究。然而, 这些研究主要集中在桥头有伸缩缝的传统连续桥面简支梁桥, 未对延伸桥面无缝桥梁进行分析, 温度荷载也仅考虑梯度温度, 且结合实际工程的理论分析与实测研究鲜见报道。

收稿日期: 2024-05-06 宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LTGS24E080002); 宁波市交通运输科技项目(202447); 浙江省教育厅一般科研项目(Y202455432)

第一作者: 陈 隆, 硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁工程。E-mail: 1161495977@qq.com

*通信作者: 丁 勇, 教授, 主要研究方向: 桥梁工程。E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

笔者结合实际工程, 研究了 UHPC 延伸桥面无缝桥的力学性能。通过对实际桥梁结构的力学分析, 得到了该类桥梁的薄弱部位, 即延伸桥面板在最不利汽车荷载、温度梯度等效荷载下的最大应力部位, 验证了桥梁结构的强度; 并得出延伸桥面板在一年不同季节的均匀温差荷载作用下最大拉应力随温度变化的规律, 证明了在均匀温差荷载下, 延伸桥面板的安全性能能够满足要求。同时, 测试了实际桥梁结构在汽车荷载作用下的应变, 通过与数值模拟结果的比较, 分析 UHPC 延伸桥面板、连续桥面板的受力状况及其对桥梁整体力学性能的影响, 证明采用整体结构分析方法对延伸桥面无缝桥梁设计和计算的重要性。

1 无缝桥工程实例

笔者分析的实际工程为 2022 年新建的线外南

岙桥, 位于浙江省宁波市象山县泗洲头镇。线外南岙桥是一座两跨延伸桥面无缝桥(图 1), 由主梁、普通桥面板、UHPC 延伸桥面板、连续桥面板、橡胶支座、桥台、搭板、延伸路面等组成。线外南岙桥每跨由长 3 m 的矮 T 梁构成, 横向由 5 块矮 T 梁连接而成, 矮 T 梁截面宽 120 cm, 高 75 cm, 桥面铺装厚 10 cm。主梁材料采用 C50 混凝土。

延伸桥面板是该桥的关键节点, 为此须进行专项设计。根据以往的研究成果^[10], 延伸桥面板采用 UHPC 材料以确保强度, 材料抗压强度为 120 MPa, 抗拉强度为 10 MPa。延伸桥面板的厚度和桥面铺装相同, 取 10 cm, 其中布置间距为 5 cm 的纵横向钢筋, 下部保护层厚 3 cm。延伸桥面板长 100 m。根据 Caner 等^[6]理论分析, 下部设置 20 cm 锚固区与 60 cm 脱黏区, 使其在具有足够的锚固强度情况下能够承受主梁端部转角造成的弯矩。

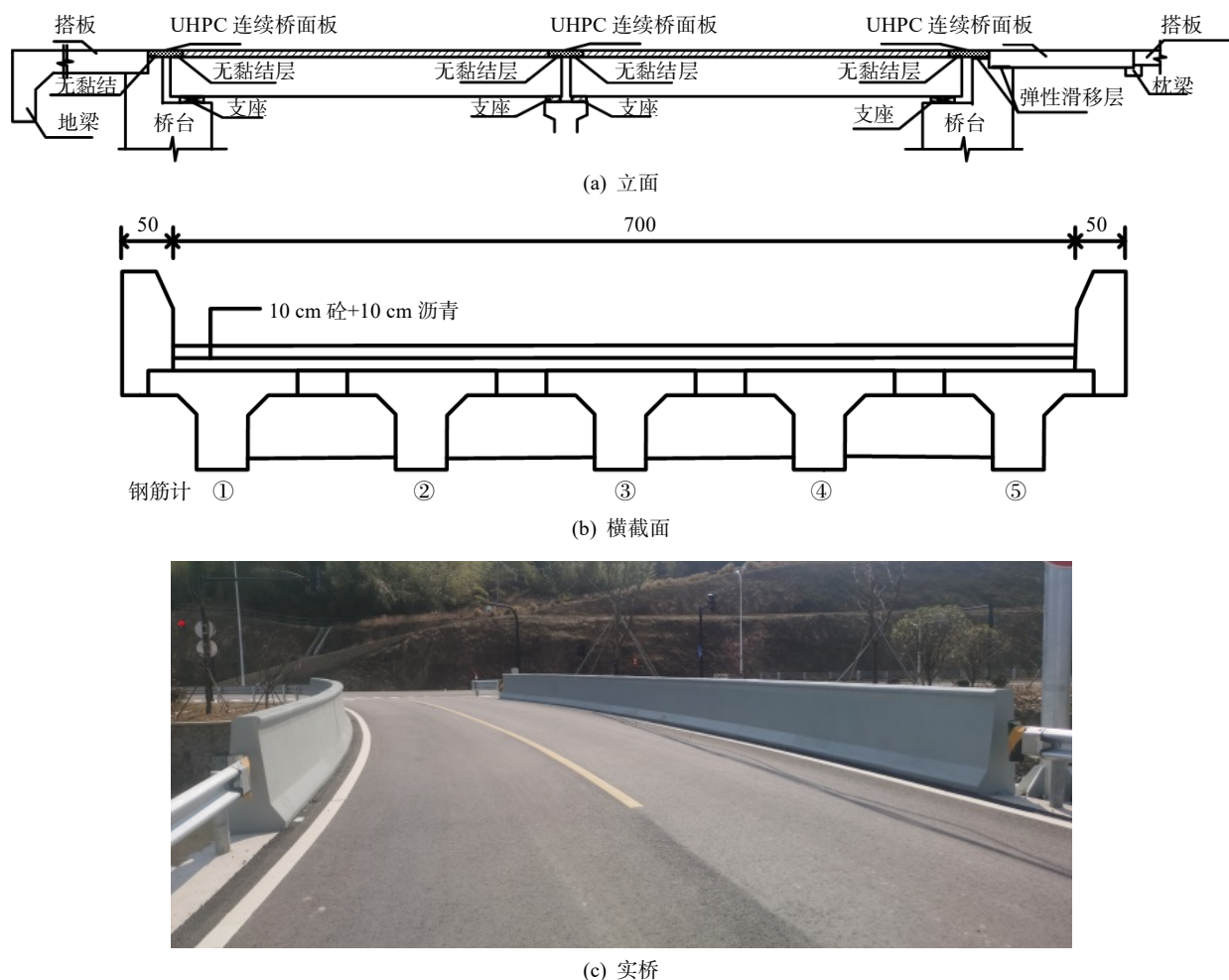


图 1 线外南岙桥及其结构(单位: cm)

2 结构力学分析

2.1 计算模型

计算模型采用有限元方法建立,如图2所示。考虑到对全桥建模计算成本过大,选取单根1.2m宽度的T梁代表整体桥梁结构。混凝土采用六面体单元,钢筋采用桁架单元,延伸桥面板为关键受力区域,因此网格进行了加密处理,最小网格边长为10mm。整体模型由30288个单元、40041个节点组成,采用ABAQUS软件进行建模计算。桥梁的主梁1、主梁2都支撑在橡胶支座上,延伸桥面因为支撑在基础上,由此给予竖向支撑,顺桥向边界自由,1号延伸桥面板一侧固定在桥台上。

上述结构的有限元求解方程为

$$Ku = P_v + P_T \quad (1)$$

式中: K 为整体刚度矩阵; u 为节点位移向量; P_v 为汽车荷载; P_T 为温度荷载。

式(1)仅计算对延伸桥面板产生主要影响的荷载,包含汽车荷载、温度梯度等效荷载以及均匀温

差荷载。

2.2 汽车荷载作用效应分析

通常延伸桥面板、连续桥面板是这类桥梁的薄弱部位。连续桥面板已在文献[10]中研究,笔者主要分析延伸桥面板。考虑最不利汽车荷载下延伸桥面板的应力,以1号延伸桥面板为例,其最不利荷载分布由影响线分析得到(图3)。汽车荷载取公路I级车道荷载^[17],包括均布荷载和集中荷载,考虑横向分布系数为0.307^[18],故单梁的均布荷载取 $2.417 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,集中荷载取68.154 kN。采用类似方法,可得2号延伸桥面板的最不利汽车荷载。

在最不利汽车荷载作用下,UHPC延伸桥面板的最大主拉应力计算结果如图4所示。桥两端的延伸桥面板均为上部受拉、下部受压,其中1号延伸桥面板、2号延伸桥面板的最大拉应力分别为5.499、4.639 MPa,均位于板顶锚固区与脱黏区交界线之间,均未超过UHPC材料的抗拉强度(10 MPa)。因此,在最不利汽车荷载作用下延伸桥面板能够满足安全性要求,不会开裂破坏。

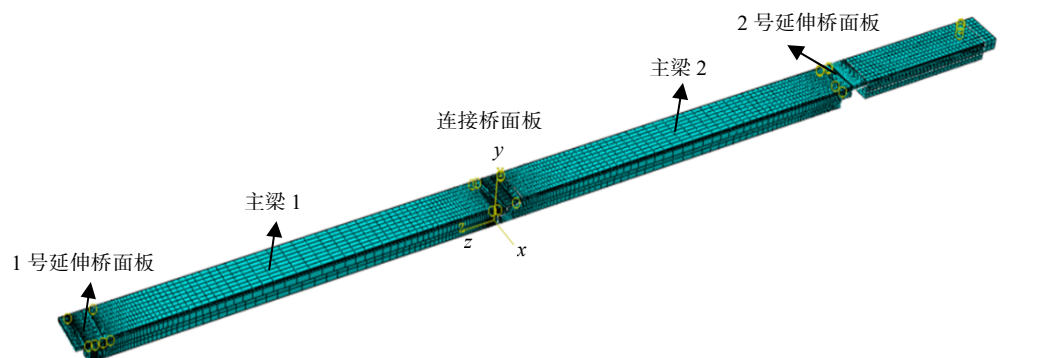


图2 无缝桥结构的有限元模型

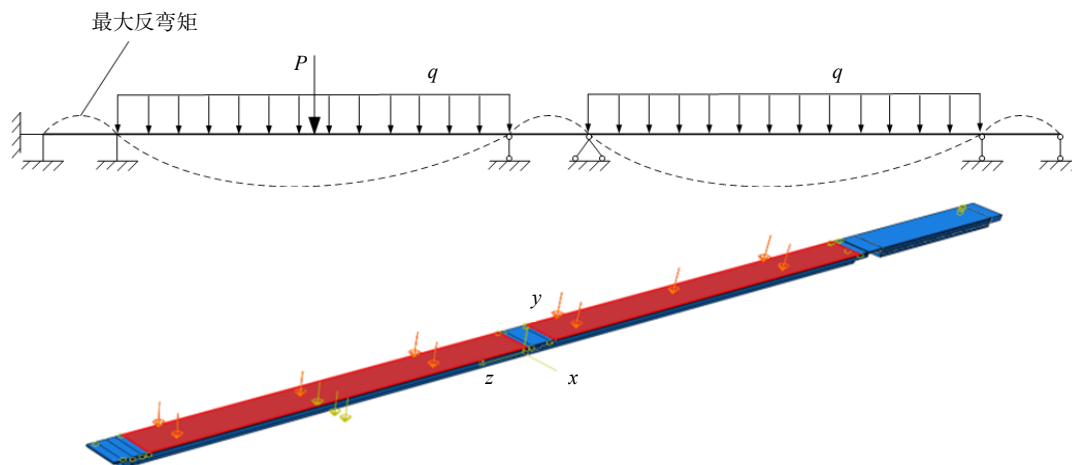


图3 1号延伸桥面板的最不利荷载

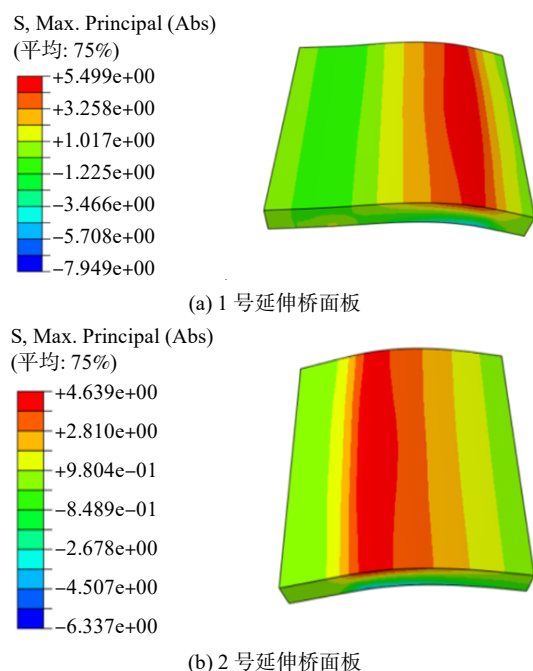
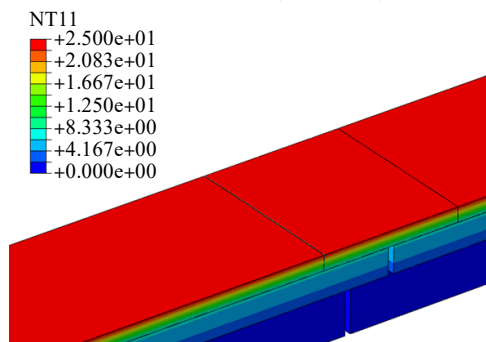
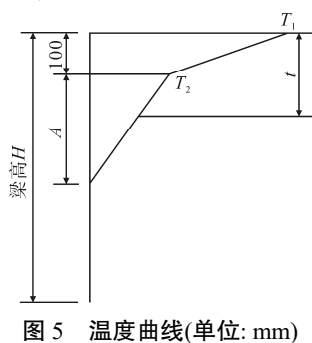


图4 汽车荷载下延伸桥面板最大主应力(单位: MPa)

2.3 温度梯度作用效应分析

太阳的辐射作用使主梁沿梁高方向的温度呈现非线性变化,从而引发因膨胀不均匀产生的热变形。文中所用的竖向温度曲线如图5所示,其中 A 为300 mm, T_1 为25℃, T_2 为6.7℃^[17]。有限元计算的温度场分布如图6所示。



温度梯度作用下 UHPC 延伸桥面板的最大主

拉应力计算结果如图7所示。桥两端的延伸桥面板均为上部受压、下部受拉。1号、2号延伸桥面板的板底最大拉应力分别为11.24、5.313 MPa。1号延伸桥面板底部拉应力略超过 UHPC 材料的抗拉强度,板底会产生开裂破坏。但延伸桥面板底部不受雨水侵蚀,可带裂缝工作,因此通过钢筋加强 UHPC 延伸桥面板的下半部分,以满足安全性要求。

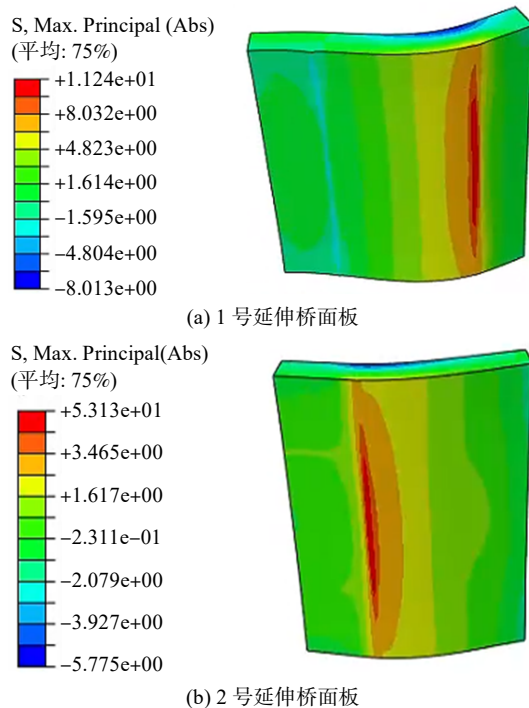


图7 温度梯度下延伸桥面板最大主应力(单位: MPa)

2.4 均匀温差作用效应分析

桥梁除受温度梯度荷载作用外,还会受均匀温度变化产生的温差作用。随着季节的变化,延伸桥面无缝桥的均匀温度将发生变化,从而产生胀缩变形。在工程实例中,为确保胀缩变形完全由延伸路面吸收,对1号延伸桥面板以及该侧主梁进行了固定约束,2号延伸桥面板连接的搭板末端补充C30延伸路面段。这时边界的固定约束、钢筋与混凝土之间的黏结力、搭板与基础之间的摩阻力以及延伸路面与基础之间的摩阻力会抑制混凝土变形,从而引起连续桥面板内部的温度应力。分析均匀温差作用效应的结构模型,如图8所示。

分析延伸桥面无缝桥在一年不同季节的均匀温差作用下延伸桥面板的应力。由于线外南岙桥建成于2022年5月,且该地区位于温热地区^[17],根据国家气象信息中心中国地面气象观测历史数据

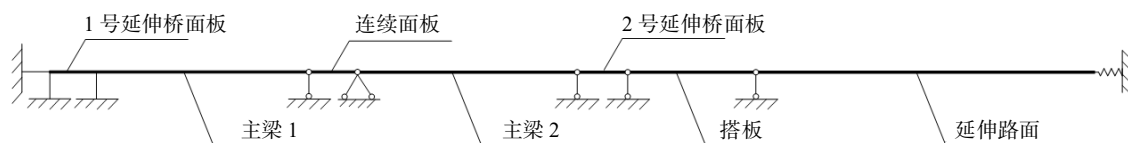


图8 分析均匀温差作用效应的结构模型示意图

集得到初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，宁波地区的平均最高温度和平均最低温度分别为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可得极限温度与初始温度的温差为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[19]。在有限元计算中，通过设置随时间变化的桥梁均匀温度场来计算均匀温差的作用效应。每年温度变化过程为：(1)6月至8月，温度 $20\rightarrow 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(2)9月至11月，温度 $40\rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(3)12月至翌年2月，温度 $20\rightarrow 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；(4)翌年3月至5月，温度 $0\rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

考虑均匀温差荷载作用初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时热应力为0，夏季温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和冬季温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时热应力最大，得到 UHPC 延伸桥面板的主拉应力计算结果，如图9和图10所示。图9为均匀温度从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时线外南岙桥两端延伸桥面板的应力。主梁受到偏心的顺桥向约束，产生一定的挠度，导致延伸桥面板处于弯曲压缩状态，主要还是分析混凝土材料的主拉应力。图9中1号、2号延伸桥面板均为上部受拉、下部受压，最大拉应力分别为 5.285 、 5.822 MPa 。

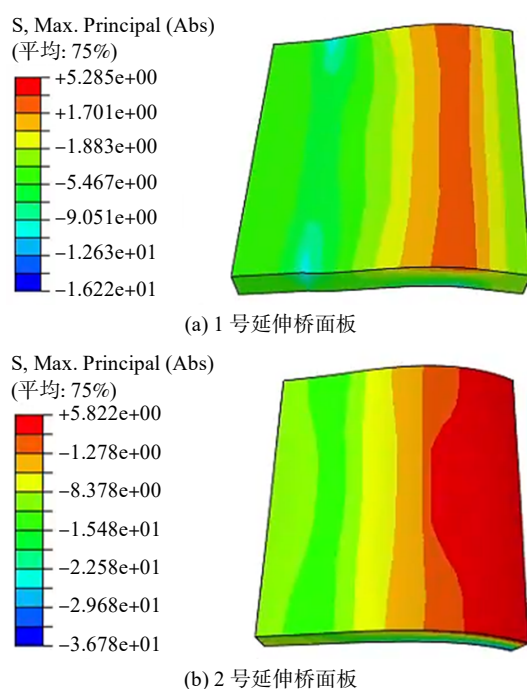
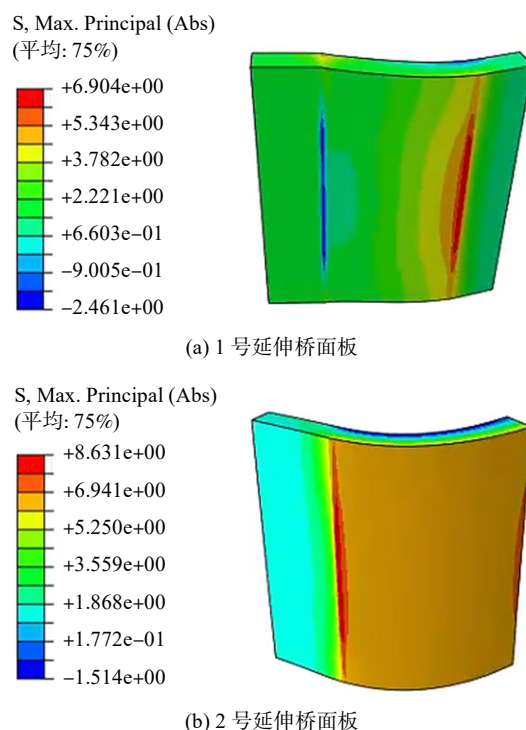
图9 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时延伸桥面板最大主应力(单位: MPa)

图10为均匀温度从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时两端延伸

桥面板的应力，与升温时相反，处于弯曲拉伸状态时1号、2号延伸桥面板均为下部受拉、上部受压，最大拉应力分别为 6.904 、 8.631 MPa 。在整个均匀温度变化过程中，1号、2号延伸桥面板的最大拉应力均未超过 UHPC 材料强度，因此在均匀温差荷载下该桥的延伸桥面板不会发生开裂破坏。

图10 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时延伸桥面板最大主应力(单位: MPa)

3 试验研究

对线外南岙桥进行汽车荷载试验，并与有限元模拟结果比较，以验证 UHPC 延伸桥面板、连续桥面板的受力状况及其对整体桥梁力学性能的影响。

3.1 试验方案

在线外南岙桥施工阶段，提前在全桥东侧的桥面铺装中设置①~⑤号钢筋计，设置位置如图11所示，用以长期测试钢筋应力。同时，在桥梁东侧两跨的边梁跨中设置应变片，每跨跨中应变测点从梁底到梁顶共计5处(图12)，用以测试汽车加载时梁底的应变。

试验采用的加载车辆及各轴重如图 13 所示。试验时车辆横桥向尽量靠近东侧护栏, 使桥东侧

的边梁荷载尽量大。顺桥向车辆布置分 2 种工况, 如图 14 所示, 分别使车轮位于第一跨的跨中和第

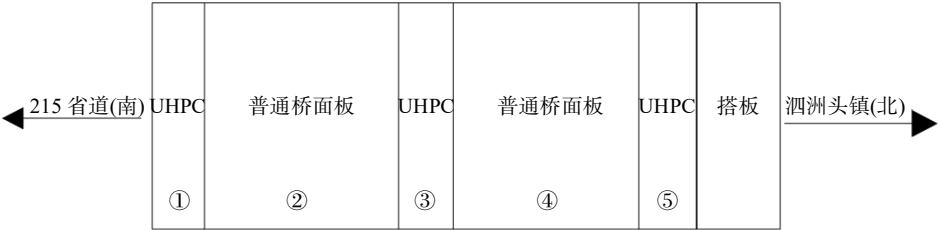


图 11 钢筋计的布置

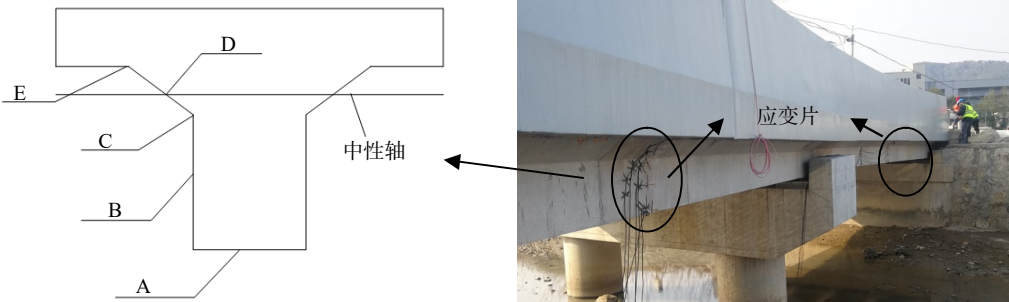


图 12 应变片的布置

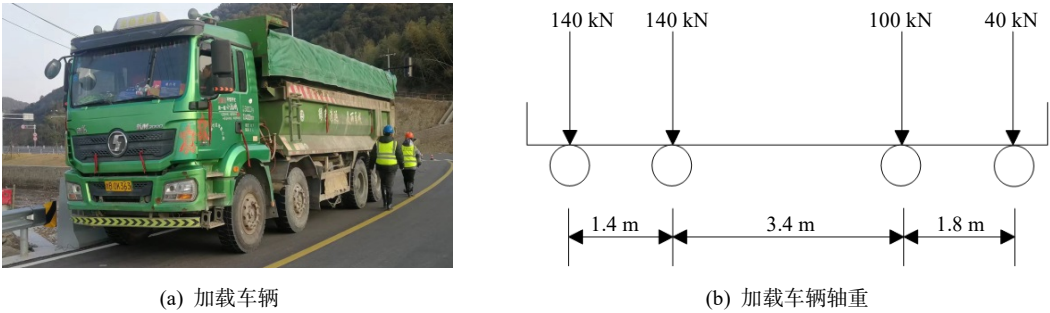
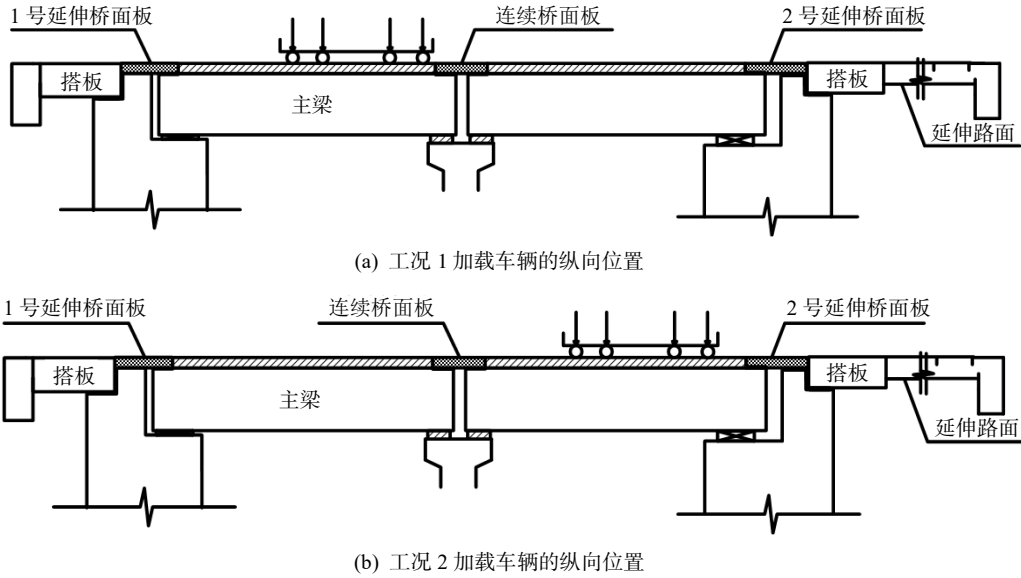
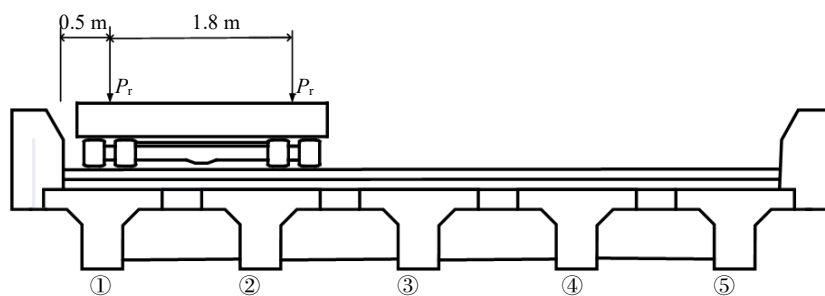


图 13 加载车辆及轴重





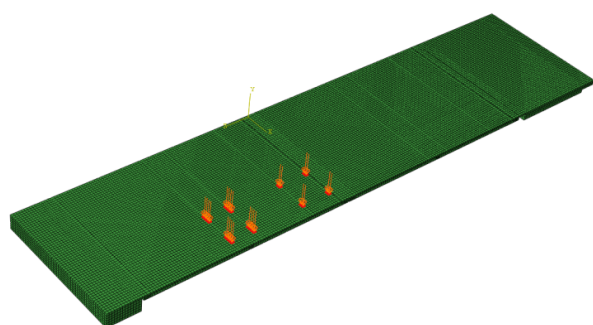
(c) 加载车辆的横向位置

图 14 加载车辆的布置

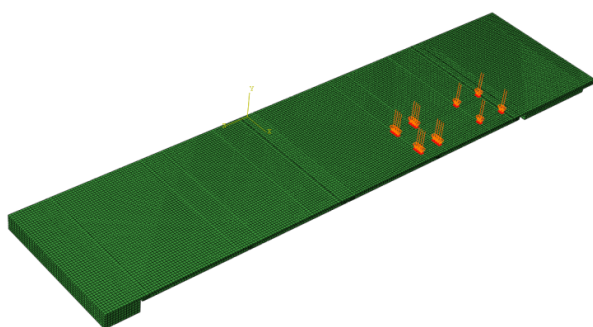
二跨的跨中。

3.2 试验方案的有限元模拟

为了验证有限元分析的可靠性,建立全桥有限元模型对试验工况进行模拟,如图 15 所示。为了说明延伸桥面板、连续桥面板的影响,有限元模拟中分别计算了考虑桥面连续和不考虑桥面连续 2 种情形。



(a) 工况 1



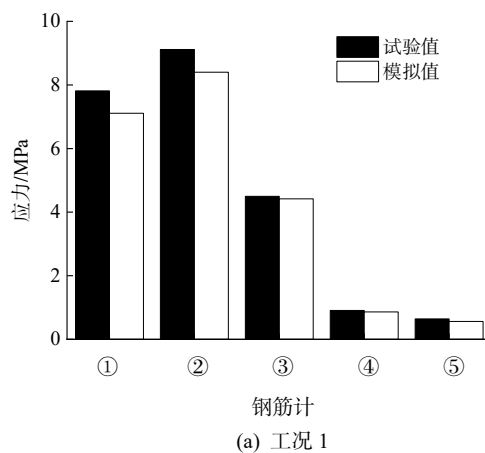
(b) 工况 2

图 15 车辆加载试验的有限元模拟

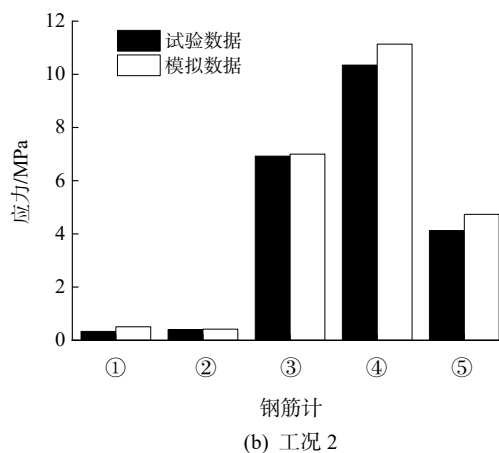
3.3 试验结果分析

2 种加载工况下钢筋计所在位置的钢筋应力变化如图 16 所示。从图 16 可见,2 种加载工况下试验与模拟得到的测点钢筋应力值接近,两者最大差分别为 7.85% 和 7.08%,表明理论分析精度较高。需要指出的是,钢筋计①和⑤位于桥梁两端的

延伸桥面板中,钢筋计③位于中部的连续桥面板中,采用简支梁理论无法计算其应力值,必须采用全桥分析理论计算。试验表明,延伸桥面板、连续桥面板都起到了承受结构内力的作用。



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图 16 不同工况下加载前后钢筋应力的变化

实桥东边的梁跨中混凝土应变测试结果、考虑连续桥面的全桥模型计算结果、不考虑连续桥面的简支梁模型计算结果比较,如图 17 所示。从图 17 可见,2 种加载工况下,应变测试结果与考虑连续桥面的全桥模型计算结果接近,2 种工况下的最大

应变差值分别为 8.19% 和 5.49%。模拟值略大于试验值,表明全桥有限元分析偏保守,实际结构更加刚性。不考虑连续桥面的简支梁模型计算结果偏大,工况 1 与工况 2 的梁底最大应变值分别相差 31.3% 和 18.8%,表明延伸桥面板、连续桥面板对主梁都是一种边界约束,能够有效减小车辆荷载下主梁的应变,提高了主梁的安全性。因此,为了准确获取连续桥面无缝桥的力学响应,有必要改变以往仅分析简支梁结构的方法,对包含连续桥面的多跨结构进行整体分析。

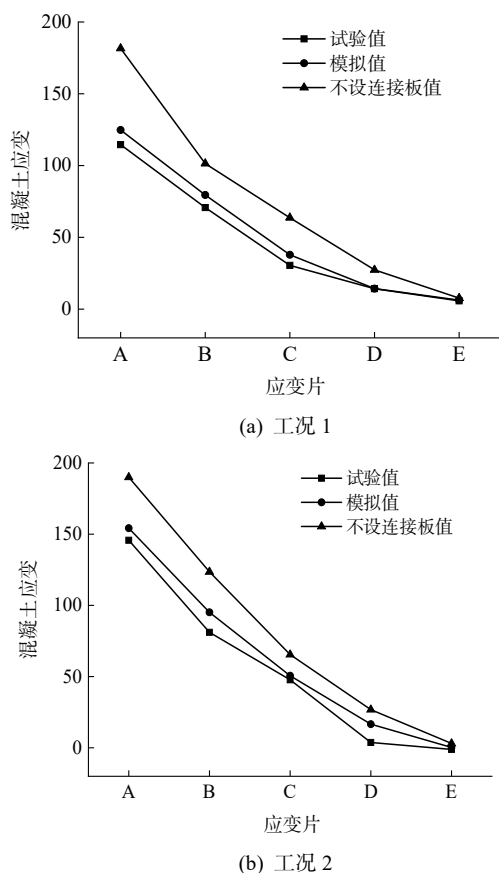


图 17 应变片测点混凝土应变试验与模拟结果

4 结论

(1) 在最不利汽车荷载作用下,无缝桥的延伸桥面板上部受拉、下部受压,实桥的拉应力值未超过 UHPC 材料的抗拉强度,延伸桥面板不会发生开裂破坏。

(2) 在温度梯度作用下,延伸桥面板上部受压、下部受拉,实桥 1 号延伸桥面板的底部拉应力略超过 UHPC 材料的抗拉强度,因此板底混凝土

土会开裂。但延伸桥面板底部不受雨水侵蚀,可带裂缝工作,因此通过钢筋加强 UHPC 延伸桥面板的下半部,可以满足安全性要求。

(3) 在均匀温差荷载作用下,温度升高 20 ℃ 时桥两侧的延伸桥面板均为上部受拉、下部受压,而温度降低 20 ℃ 时桥两侧的延伸桥面板均为下部受拉、上部受压,且在整个均匀温度变化过程中,1 号和 2 号延伸桥面板的最大拉应力均未超过 UHPC 材料的抗拉强度。

(4) 实桥实测钢筋应力值接近数值模拟值,表明理论分析具有较高精度。延伸桥面板、连续桥面板中存在较大的钢筋应力,说明连续桥面起到了承受结构内力的作用。采用简支梁理论无法计算其应力值,必须采用全桥分析理论进行计算。

(5) 实桥实测主梁应变与考虑连续桥面的全桥模型计算结果接近,与不考虑连续桥面的简支梁模型计算结果差异较大,表明连续桥面对主梁起到了边界约束作用,可有效降低主梁应变。为了准确获取该类桥梁的力学响应,有必要对包含连续桥面的多跨结构进行整体分析。

参考文献:

- [1] MARQUES L J, DE BRITO J. Inspection survey of 150 expansion joints in road bridges[J]. Engineering structures, 2009, 31(5):1077-1084.
- [2] 丁勇, 黄奇, 谢旭, 等. 载重汽车桥梁伸缩缝跳车动力荷载计算方法与影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7):98-107.
- [3] GHIMIRE J P, MATSUMOTO Y, YAMAGUCHI H, et al. Numerical investigation of noise generation and radiation from an existing modular expansion joint between prestressed concrete bridges[J]. Journal of sound and vibration, 2009, 328(1/2):129-147.
- [4] 张鹤, 谢旭, 山下幹夫. 交通荷载引起的钢箱梁桥振动辐射瞬态噪声评估[J]. 振动工程学报, 2011, 24(3):221-228.
- [5] 邵旭东. 半整体式无缝桥梁新体系[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [6] CANER A, ZIA P. Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks[J]. PCI journal, 1998, 43(3):68-80.
- [7] WING K M, KOWALSKY M J. Behavior, analysis, and design of an instrumented link slab bridge[J]. Journal of bridge engineering, 2005, 10(3):331-344.
- [8] 庄一舟, 徐亮, 程俊峰, 等. 简支梁桥桥面连续结构力学特性理论分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7):73-85.

- [9] 丁勇, 黄奇, 黄剑源. 连续桥面简支梁桥静动力特性的理论分析方法研究[J]. 工程力学, 2015, 32(9):100-110.
- [10] 石鑫磊, 丁勇, 陈隆, 等. 考虑正负弯曲的连续桥面简支梁桥力学分析与结构优化[J]. 宁波大学学报(理工版), 2023, 36(5):37-43.
- [11] 李积泉, 肖靖林, 郭立贤, 等. 钢-UHPC 组合连续桥面板足尺模型试验研究与理论分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(7):92-104.
- [12] 胡志坚, 于媛媛. 钢-混组合梁简支桥面连续处新型构造抗裂分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(6):1159-1165, 1172.
- [13] LUO Y F, YAN Q S, YUE X G, et al. A new analytical method for link slab analysis[J]. KSCE journal of civil engineering, 2024, 28(2):800-816.
- [14] 田稳苓, 崔磊涛, 李帆, 等. PVA-ECC 桥面连接板的力学性能[J]. 低温建筑技术, 2013, 35(2):30-32.
- [15] SABER A, ALETI A R. Behavior of FRP link slabs in jointless bridge decks[J]. Advances in civil engineering, 2012, 2012(1):452987.
- [16] CHU K, HOSSAIN K M A, LACHEMI M. Experimental and numerical study on joint-free bridges with steel or gfrp-reinforced ecc link slab subjected to static loading[J]. Construction and building materials, 2022, 327:127035.
- [17] 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.
- [18] 谢家腾. 基于 UHPC 连续桥面板的延伸桥面无缝桥研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2023.
- [19] 中国气象数据网. 中国地面气象观测历史数据集(月值)[EB/OL]. [2024-04-06]. <https://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0019.0001.S001.html>.

Research on mechanical performance of the jointless bridge with UHPC extended bridge deck based on case analysis

CHEN Long¹, SHI Xinlei², DING Yong¹, HAN Chunxu³, XIONG Qun¹

(1.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Communications Planning Institute Co., Ltd., Ningbo 315192, China;

3.Ningbo Xiangshan Transportation Development and Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315700, China)

Abstract: As a new type of bridge structure, the mechanical performance of the jointless bridge with extended deck has drawn significant attention. In this paper, an actual jointless bridge with extended deck is taken as an example for research. Firstly, an overall finite element model is established that incorporates the main girder, UHPC (Ultra-High Performance Concrete) link slab, and extended pavement at the bridge end. Then, the stress in the UHPC extended bridge decks, which exhibits the weak point of the bridge, is analyzed under the most unfavorable vehicle loads, gradient temperature and uniform temperature difference with seasonal variation, respectively. The results show that the UHPC extended bridge deck meets the strength requirements under these three working conditions. Finally, the real bridge under vehicle load is tested for the stresses in the deck reinforcement and the strains in the main girder. The results indicate significant rebar stresses in the extended bridge decks and in the link slab as well, necessitating full bridge analysis. The extended bridge decks and the link slab play a role of boundary constraint for the main girder, effectively reducing the strains in the main girder.

Keywords: jointless bridge; case analysis; extended bridge deck; finite element method; vehicle load test

(责任编辑 史小丽)