

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2022.0905

考虑正负弯曲的连续桥面简支梁桥力学分析与结构优化

石鑫磊¹, 丁勇^{2*}, 陈隆², 游玖昂³

(1.宁波市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315192; 2.宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 3.重庆市铜梁区交通局, 重庆 402560)

摘要: 连续桥面简支梁桥的桥面连续段是结构受力的薄弱部位, 容易出现开裂、渗水等问题, 因此有必要对连续桥面段的力学性能进行详细分析. 本文首先建立了包含主梁与桥面连续段的有限元分析模型, 然后根据常见桥梁受力状况, 确定最不利汽车荷载工况时, 连续桥面段的最大负弯矩、温度梯度工况下连续桥面段的最大正弯矩. 再分别求解最大正、负弯矩作用下的连续桥面段的应力应变, 发现汽车荷载下的连接桥面段顶部受拉, 温度梯度下的连接桥面段底部受拉, 最大拉应力都可能超过普通混凝土的拉伸强度. 最后通过增加脱黏区长度、采用超高性能混凝土材料(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)等改进措施, 对连续桥面段进行结构优化, 减小了最大应力, 使连续桥面板安全耐久.

关键词: 连续桥面板; 有限元; 桥梁工程; 结构优化; 超高性能混凝土

中图分类号: U443.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2023)05-0037-07

多跨简支梁桥连续布置能在提高桥梁总跨径的同时, 控制工程造价^[1]. 但这种多跨连续布置的简支梁桥也会带来大量伸缩缝, 使桥梁伸缩缝容易损坏的不足更加明显, 并且带来额外的收缩缝跳车噪声污染^[2-5]. 为解决此问题, 桥梁工作者提出简支梁桥桥面连续的想法^[6-8], 即取消在相邻两跨简支梁间的伸缩装置, 将桥面板部分或桥面铺装部分连成一体构造. 对于多跨简支梁桥, 桥面应尽量做到连续, 使多孔简支梁桥在保留结构简支的受力体系下, 保证行车的平稳和舒适性^[9].

简支梁桥桥面连续结构设计简单方便, 在简支梁设计中得到广泛运用, 国内外学者也对该类桥梁的结构性能开展了研究. 其中, 张秀林等^[6]、王岗等^[10]对混凝土桥面板的简支梁桥桥面连续结构的受力性能进行了研究; 李少莉等^[11]对桥面连续简支梁桥的破损机理以及防治措施进行了研究; Wing 等^[12]、Ulkue 等^[13]对桥面连续结构的无黏结段进行了研究; 庄一舟等^[14]进行了桥面连续结构

厚度与面层材料及无黏结段长度的相关研究; 丁勇等^[1]对桥面连续简支梁桥静动力学特性的理论方法进行了研究; 部分学者对采用 ECC、FRP 等材料铺装桥面连续结构的性能影响进行了研究^[15-17]. 然而, 这些研究并未详细分析简支梁桥中桥面连续结构的最不利受力状态, 以及由此引发的对连续桥面段破坏原因进行定量分析.

根据上述分析, 本文针对连续桥面段力学性能分析上的不足, 建立了包含主梁与连续桥面段的有限元模型, 确定了连续桥面板最大负弯矩对应最不利汽车荷载和最大正弯矩对应温度梯度的关系, 分析了最大正、负弯矩作用下连续桥面板的应力和强度破坏情况, 最后从改进材料和结构等方面, 提出了防止结构破坏的优化措施.

1 分析方法

本文采用有限单元法分析连续桥面板在最不利汽车荷载和温度梯度荷载下的力学响应.

收稿日期: 2022-09-02.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(52078256); 浙江省自然科学基金(LY19E080009); 宁波市交通运输科技项目(202104).

第一作者: 石鑫磊(1987-), 男, 浙江宁波人, 高级工程师, 主要研究方向: 道路与桥梁工程. E-mail: 624102541@qq.com

*通信作者: 丁勇(1975-), 男, 浙江余姚人, 教授, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

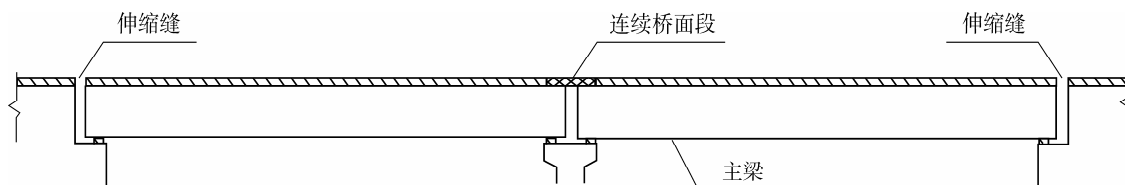


图1 连续桥面两跨简支梁桥

1.1 结构模型

本文计算模型采用典型的连续桥面两跨简支梁桥,其建构如图1所示.确定好连续桥面段的基本构造后,需要对具体结构参数进行设计,包括主梁与连续桥面段的尺寸、脱黏区和锚固区的长度、钢筋的设置等.

1.1.1 主梁与连续桥面段的尺寸

主梁采用跨径为20 m的C50混凝土空心板梁,外截面宽度为100 cm,高度为85 cm,中心圆孔半径为31 cm.主梁支座采用橡胶支座,梁端距支座中心线为28 cm,主梁接缝宽为4 cm.连续桥面段和桥面铺装厚度相同,本文取10 cm,钢筋保护层厚度为3 cm.连续桥面段宽度需要根据桥宽设计,对纵向受力计算影响不大,文中为方便计算,取值与主梁宽度相同,即1 m宽.此外,连续桥面段的长度需要对脱黏区、锚固区的长度进行综合考虑.

1.1.2 脱黏区、锚固区的长度

连续桥面段的脱黏区长度对其受力性能有较大影响,过短难以满足受力要求,过长则增加成本.锚固区长度则需要保证连续段与主梁之间的连接强度,不宜过短.Caner等^[18]通过理论分析,发现当

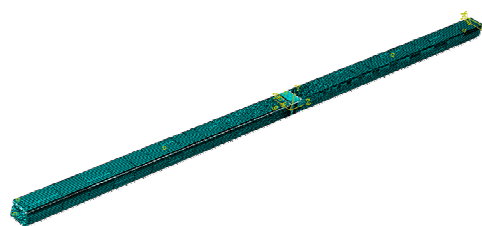
连续桥面段工作长度取桥梁跨径5%以上时,桥面连续段受负弯矩影响不再随着长度的增大而变化.本文按5%相邻跨径取连续段总长1 m,其中,脱黏区长度40 cm,两侧锚固区长度各30 cm.

1.1.3 材料性质

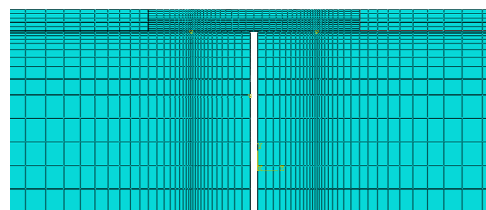
文中不考虑连续桥面段受力进入塑性状态的问题,假设整个结构处在线弹性范围内.模型普通桥面铺装为C40混凝土,主梁和连续桥面段为C50混凝土,材料性质见表1,其中,混凝土材料的强度为标准值,UHPC抗拉则为弯拉强度.

1.1.4 整体模型

将主梁、桥面铺装、连续桥面段、钢筋等组装后,形成1 m宽的典型两跨桥梁结构.采用有限元软件ABAQUS进行建模计算,除连续桥面段的脱黏区与主梁无黏结,其余各层间相互黏结,采用绑定约束方式连接连续部分,钢筋嵌入在混凝土中.本文混凝土采用六面体八结单元(DC3D8),钢筋采用桁架单元(truss element)模拟,对连续桥面段、脱黏与锚固区交界处等关键位置进行有限元网格加密,最小网格边长为10 mm.如图2所示,整体模型由36 600个单元,45 935个节点组成.



(a) 整体构件



(b) 连续桥面段

图2 桥梁结构有限元模型

表1 材料性质

材料类型	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
C40 混凝土	32.5	0.20	2.39	26.8	1.0×10^{-5}
C50 混凝土	34.5	0.20	2.64	32.4	1.0×10^{-5}
UHPC 混凝土	43.9	0.24	10.00	120.0	1.0×10^{-5}
钢筋	200.0	0.30	330.00	330.0	1.0×10^{-5}

将上述有限元模型的单元平衡方程集成后, 得到桥梁整体结构的有限元方程如下:

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{P}_V + \mathbf{P}_T, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为整体刚度矩阵; $\mathbf{u}$ 为节点位移向量; $\mathbf{P}_V$ 为汽车荷载; $\mathbf{P}_T$ 为温度梯度等效荷载. 式(1)中只考虑了对连续桥面段影响最大的外部荷载, 即汽车荷载和温度梯度等效荷载.

1.2 荷载分析

1.2.1 最不利汽车荷载

最不利汽车荷载作用如图 3 所示. 由图可见, 连续桥面段承受负弯矩, 处于上拉下压的受力状态, 此时顶部混凝土容易开裂. 汽车荷载取车道荷载^[9], 由均布荷载和集中荷载组成. 公路 I 级车道荷载的均布荷载标准值 $q_k = 10.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 集中荷载标准值随计算跨径而变, 当前为 310 kN. 考虑多车道折减系数 0.78, 横向分布系数 0.26^[19], 故单梁局部均布荷载取 $2.13 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 集中荷载取 62.8 kN. 荷载作用具体方式如图 4 所示.

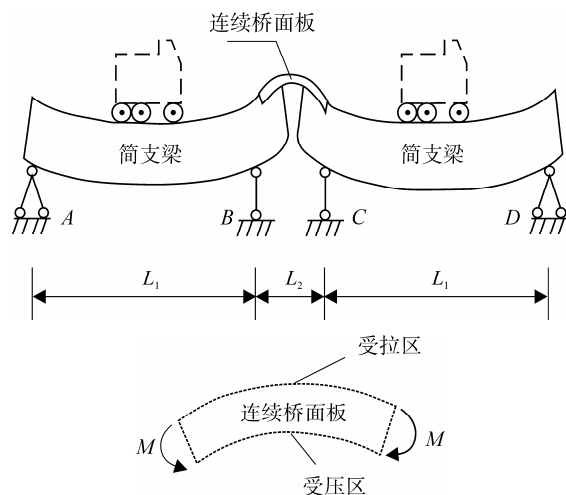
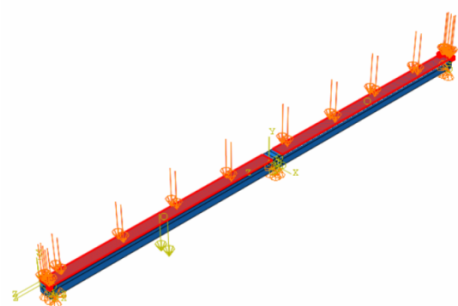


图3 最不利汽车荷载作用下的桥面连续板

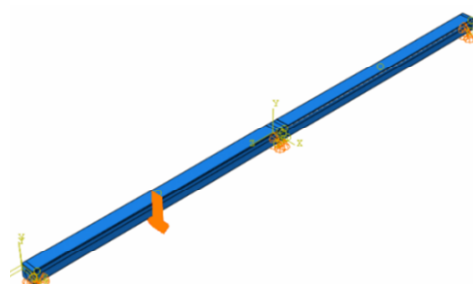
1.2.2 温度梯度作用

温度梯度工况如图 5 所示. 由图可见, 连续桥面段承受正弯矩, 处于下拉上压的受力状态, 此时底部混凝土容易开裂. 温度作用一般分为均匀温度和温度梯度两种, 由于桥两端可以自由伸缩, 故均匀温度可以忽略. 而温度梯度受到主梁沿高度方向的热膨胀程度影响, 从而产生热变形. 本文采用图 6 所示的竖向温度曲线, 其中的温度梯度基数可取 $A=300 \text{ mm}$, $T_1=25 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=6.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[9].

在有限元计算中, 通过给定梁不同高度处的



(a) 均布荷载



(b) 集中荷载

图4 汽车荷载

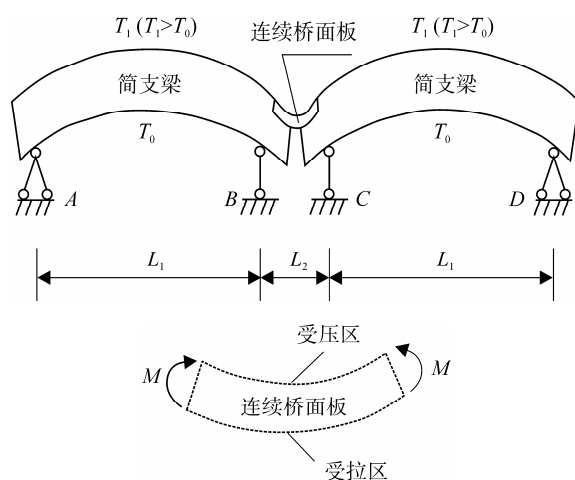


图5 温度梯度荷载作用下的桥面连续板

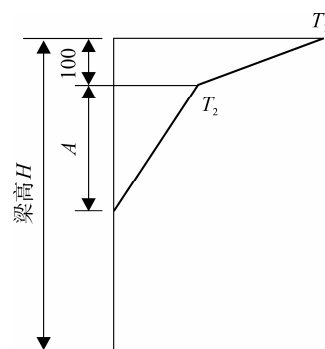


图6 竖向温度曲线

温度数值来计算相应的热变形与热应力,相应的连续桥面简支梁桥的温度场变化如图7所示。

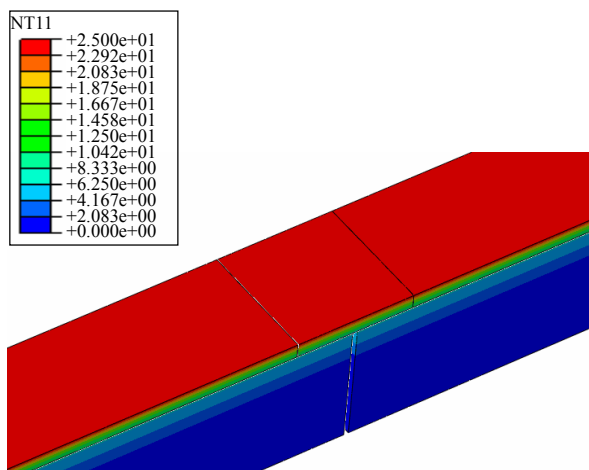
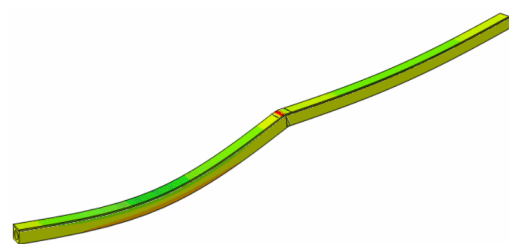


图7 连续桥面简支梁桥的温度场

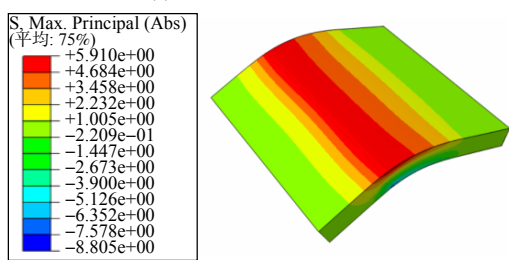
2 计算结果与讨论

2.1 汽车荷载下的计算结果

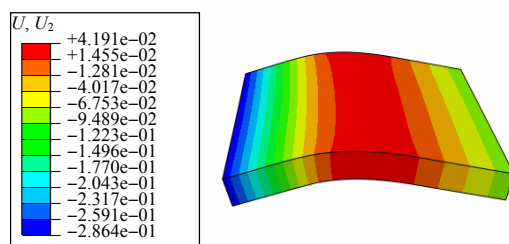
在最不利汽车荷载作用下,连续桥面简支梁



(a) 全桥变形与主拉应力



(b) 桥面连续段的变形与主拉应力



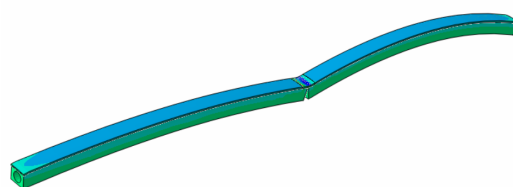
(c) 桥面连续段的挠度值

图8 汽车荷载下桥面连续段的最大主拉应力及挠度

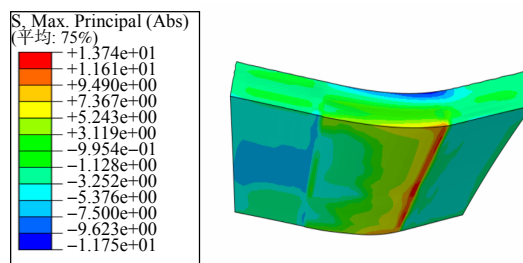
桥的变形与最大主拉应力如图8所示。桥面连续段在上部受拉和下部受压时,最大拉应力 5.91 MPa,其位置位于板顶两个锚固区与脱黏区交界线之间。计算结果表明,桥面连续段顶部的主拉应力超过了 C50 混凝土的抗拉强度标准值(2.64 MPa),因此桥面连续段顶面的混凝土将发生开裂损坏。

2.2 温度梯度下的计算结果

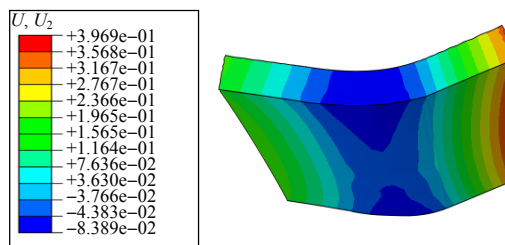
在温度梯度作用下,连续桥面简支梁桥的变形与最大主拉应力如图9所示。在桥面连续段上部受压和下部受拉时,最大拉应力 13.70 MPa,其位置位于板底锚固区与脱黏区交界线处。计算结果表明,桥面连续段底部拉应力超过了 C50 混凝土的抗拉强度设计值(2.64 MPa),因此桥面连续段底面的混凝土将发生开裂损坏。



(a) 全桥变形与主拉应力



(b) 桥面连续段的变形与主拉应力



(c) 桥面连续段的最大挠度值

图9 温度梯度作用下桥面连续段的最大主拉应力及挠度

比较图8与图9可知,桥面连续段在温度梯度工况时的最大主拉应力大于汽车荷载工况,原因在于温度梯度工况时的桥面连续段变形更为显著,最大挠度为 0.083 9 mm(图9(c)),大于汽车荷载工

况时的最大挠度 0.041 9 mm(图 8(c)), 这也导致其受到了更大的结构应力。

3 结构优化

上述最不利作用下的计算结果表明, 桥面连续段顶部混凝土在汽车荷载作用下可能开裂损坏, 底部混凝土在温度梯度作用下, 同样可能产生开裂损坏, 因此需要对其结构进行优化, 以降低混凝土的拉应力。

3.1 增加连续桥面段的长度

分析表明, 连续桥面段的长度越长, 弯曲刚度就越小, 因此可采用增加连续桥面段长度的方法来降低最大拉应力。当把连续桥面段的脱黏区长度增加到 60 cm 后, 其主拉应力的计算结果如图 10 所示。图 10(a)表明, 在汽车荷载作用下, 连续桥面段的最大主拉应力在连续桥面段顶部(4.91 MPa), 位于板顶两个锚固区与脱黏区交界线之间。图 10(b)表明, 在温度梯度作用下, 连续桥面段的最大主拉应力在连续桥面段底部(10.01 MPa), 位于板底锚固区与脱黏区交界线处。上述结果表明, 虽然连续桥面段长度增加后, 主拉应力有所降低, 但仍然超过混凝土的抗拉强度设计值, 因此仍然会产生混凝土开裂损坏。

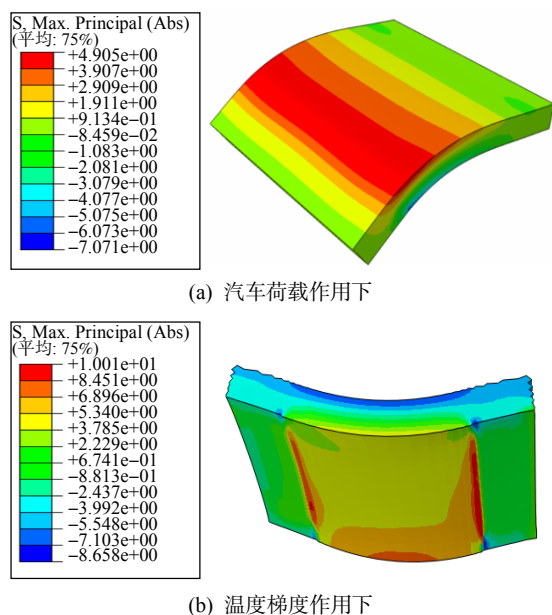


图 10 桥面连续段增加到 60 cm 后的主拉应力

3.2 采用高强混凝土材料

为了抵抗连续桥面段顶部、底部的最大拉应力,

可引入抗拉强度更高的 UHPC 材料。采用 UHPC 材料制备桥面连续段后, 其主拉应力计算结果如图 11 所示。图 11(a)表明, 在汽车荷载作用下, UHPC 连续桥面段的最大主拉应力在连续桥面段顶部(7.27 MPa), 位于板顶两个锚固区与脱黏区交界线之间。图 11(b)表明, 在温度梯度作用下, 连续桥面段的最大主拉应力在连续桥面段底部(16.44 MPa), 位于板底锚固区与脱黏区交界线处。上述结果表明, 连续桥面段采用 UHPC 材料后, 汽车荷载下的顶部主拉应力小于 UHPC 的抗拉强度, 因此不会开裂, 但温度梯度下的底部主拉应力超过了 UHPC 的抗拉强度, 仍然会开裂。考虑到连续桥面段底部不直接承受雨水的腐蚀作用, 允许带裂缝工作, 因此只需在连续桥面段下半部配置钢筋, 即可使 UHPC 连续桥面段能够安全耐久地用于该桥型。

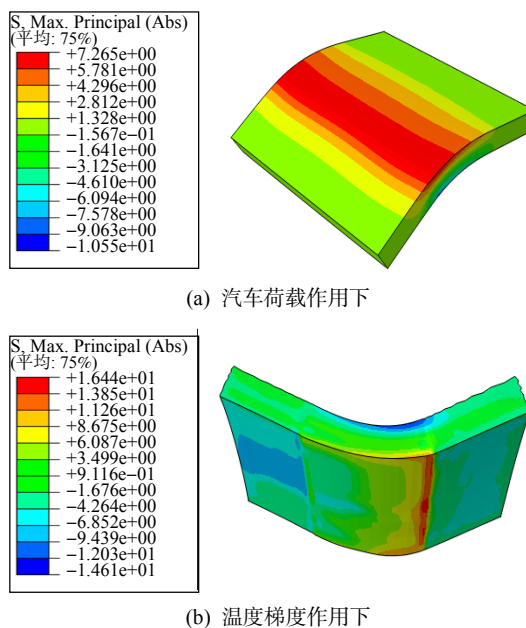


图 11 桥面连续段采用 UHPC 材料后的主拉应力

3.3 采用高强混凝土材料并增加连续桥面段长度

增加连续桥面段脱黏区至 60 cm 并采用 UHPC 材料后, 主拉应力的计算结果如图 12 所示。图 12(a)表明, 在汽车荷载作用下, UHPC 连续桥面段的最大主拉应力在连续桥面段顶部(6.08 MPa)。图 12(b)表明, 在温度梯度作用下, 连续桥面段的最大主拉应力在连续桥面段底部(12.15 MPa)。上述结果表明, 连续桥面段采用 UHPC 材料后, 汽车荷载下的顶部主拉应力小于 UHPC 的抗拉强度, 因此不会开裂, 但是温度梯度下的底部主拉应力超过 UHPC

的抗拉强度, 因此仍然会开裂, 考虑到连续桥面段底部允许带裂缝工作, 因此可在此连续桥面段下半部配置钢筋。

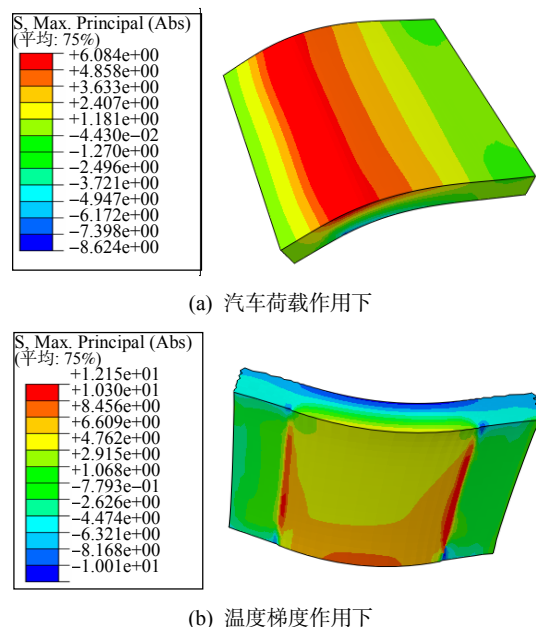


图 12 桥面连续段采用 UHPC 并增加到 60 cm 后主拉应力

4 结论

针对中小桥型中常用的多跨简支梁桥, 本文以桥面连续的两跨简支梁桥为例, 对连续桥面段在汽车荷载和温度梯度作用下的最不利受力情况进行了有限元分析和结构优化, 得到如下结论:

(1) 在汽车荷载下, C50 混凝土连续桥面段顶部受拉, 最大拉应力超过其抗拉强度, 会发生顶部开裂; 在温度梯度作用下, 最大拉应力也超过其抗拉强度, 最大拉应力位于连续桥面段底部, 会发生底部开裂。因此, 普通混凝土连续桥面段在桥梁最不利荷载工况下, 顶部和底部都可能开裂损坏。

(2) 通过增加连续桥面段脱黏区长度可有效降低连续桥面段承受的拉应力。将脱黏区由 40 cm 增加至 60 cm, 连续桥面段在汽车荷载下顶面的拉应力由 5.91 MPa 降为 4.91 MPa, 降幅为 17%; 在温度梯度作用下, 最大拉应力由 13.70 MPa 降为 10.01 MPa, 降幅 27%。但仍会使连续桥面段开裂。

(3) 改用 UHPC 高强度混凝土作为连续桥面段材料, 会增大最不利汽车荷载以及温度荷载下连续桥面段的拉应力, 最不利汽车荷载下的顶部最大拉应力为 7.27 MPa, 温度梯度下的底部最大拉

应力为 16.44 MPa。因为 UHPC 材料的抗拉强度约为 10.00 MPa, 所以采用 UHPC 材料可以防止连续桥面段顶部开裂, 但底部仍然会开裂。

(4) 同时采用 UHPC 材料并增加连续桥面脱黏区长度, 可以进一步降低最大拉应力, 最不利汽车荷载下的顶部拉应力为 6.08 MPa, 不会产生开裂; 在温度梯度作用下, UHPC 连续桥面段底部最大拉应力为 12.15 MPa, 仍然会造成开裂。考虑到连续桥面段底部不直接承受雨水作用, 允许带裂缝工作, 因此只需在连续桥面段下半部配置钢筋, 即可使 UHPC 连续桥面段能够安全耐久地用于该桥型。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李扬海, 程潮扬, 鲍卫刚, 等. 公路桥梁伸缩装置[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999:62-67.
- [3] Song X D, Wu D J, Li Q, et al. Structure-borne low-frequency noise from multi-span bridges: A prediction method and spatial distribution[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 367:114-128.
- [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] Eric J A, Gordon J C, Stephen C B. Dynamic anomalies in a modular bridge expansion joint[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5):541-554.
- [6] 张秀林, 卞怡, 王志成, 等. 谈简支梁桥的桥面连续构造[J]. 工程建设与设计, 2020(21):25-26; 39.
- [7] 李少莉, 蒋小鹏. 简支梁桥桥面连续常见病害成因分析及处治措施[J]. 中国公路, 2012(13):121.
- [8] Huang J J, Su Q, Zhang L C, et al. Rapid treatment technique of diseases of the rocking axle bearing of railway simply supported beam bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351/352:1440-1444.
- [9] JTG D60—2015. 公路桥涵设计通用规范[S].
- [10] 王岗, 谢旭, 王城泉, 等. 简支梁桥拱型桥面连续构造的受力性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6): 1049-1057.
- [11] 杨敏, 刘艳莉, 邓旭东. 桥面连续简支板桥损伤动力机理分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(3): 234-238.
- [12] 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.

- [13] Ulku E, Attanayake U, Aktan H. Jointless bridge deck with link slabs: Design for durability[J]. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 2009, 2131(1):68-78.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Lepech M D, Li V C. Application of ECC for bridge deck link slabs[J]. Materials and Structures, 2009, 42:1185-1195.
- [17] Saber A, Aleti A R. Behavior of FRP link slabs in jointless bridge decks[J]. Advances in Civil Engineering, 2012, 2012:452987.
- [18] Caner A, Zia P. Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks[J]. PCI Journal, 1998, 43(3):68-80.
- [19] 朱梦艳. 预应力 UHPC 连续桥面板工作性能研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2020.

Mechanical analysis and structural optimization of simply supported girder bridge with continuous deck considering positive and negative bending

SHI Xinlei¹, DING Yong^{2*}, CHEN Long², YOU Jiu'ang³

(1.Ningbo Communications Planning Institute Co., Ltd., Ningbo 315192, China;

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

3.Transport Bureau of Tongliang District of Chongqing City, Chongqing 402560, China)

Abstract: The continuous deck on the simply supported girder bridge with continuous deck is the weak part of the structure, which is prone to crack, water seepage and other diseases. Therefore, it is necessary to analyze the mechanical properties of the continuous deck in detail. In this paper, a finite element model including the continuous deck and the main girder is established. The maximum negative bending moment of the continuous deck under the most unfavorable vehicle loads and the maximum positive bending moment of the continuous deck under the temperature gradient application are determined by considering the common working conditions of bridges. Then, the stress and strain of the continuous deck under the maximum positive and negative bending moments are solved respectively. It is found that the top of the continuous deck under the vehicle load is in tension, and the bottom of the connecting deck under the temperature gradient is in tension. The maximum tensile stress may exceed the allowable tensile strength of the ordinary concrete. Finally, by increasing the length of debonded zone and adopting ultra-high performance concrete (UHPC), the structure of continuous deck is optimized and the maximum stress is reduced, which makes the continuous deck safe and durable.

Key words: continuous deck; finite element; bridge engineering; structural optimization; ultra-high performance concrete

(责任编辑 章践立)