

加劲肋形式对钢箱梁桥面板受力性能的影响

陈红

云南省交通规划设计研究院股份有限公司,云南 昆明 650011

摘要:为分析钢箱梁不同加劲肋形式的桥面板受力情况,采用软件 ANSYS 对上部结构跨径为(32+40+32)m 的单箱双室连续钢箱梁建立整体模型及空间全板壳局部模型,获取主梁体系和桥面体系效应,对比分析常用的开口截面(倒 T 型)加劲肋和闭口截面(U 型)加劲肋桥面板结构效应。结果表明:1)由整体模型得到钢箱梁主梁体系受力情况,基本组合作用和疲劳荷载作用下,倒 T 型加劲肋和 U 型加劲肋模型的桥面板位移和所受应力相差不大。2)在车辆局部荷载作用下,倒 T 型加劲肋桥面板纵、横向应力是 U 型加劲肋桥面板的 2 倍多;倒 T 型加劲肋的最大纵向应力比 U 型加劲肋大,竖向剪应力比 U 型加劲肋小,比桥面板小;U 型加劲肋钢箱梁横隔板横向及竖向应力比倒 T 型加劲肋显著增大,最大约 3.5 倍,设计中应通过调整纵向、横向加劲肋刚度使各构件受力均衡;倒 T 型加劲肋和 U 型加劲肋模型的桥面板局部变形趋势相同,倒 T 型加劲肋模型下桥面板局部变形较 U 型加劲肋模型大,前者位移约为后者的 1.2 倍。

关键词:钢结构;钢梁;桥面板;加劲肋;局部应力;桥面板

中图分类号:U448.21⁺3

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)03-0053-08

引用格式:陈红. 加劲肋形式对钢箱梁桥面板受力性能的影响[J]. 山东交通学院学报,2025,33(3):53-60.

CHEN Hong. The impact of stiffener form on the load-bearing performance of steel box girder bridge deck [J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2025,33(3):53-60.

0 引言

在桥梁建设领域,工业化水平与智能建造技术快速发展。由工厂化预制的钢结构桥梁施工建设高效、安装精准,智能化施工便捷、安全,在中等跨径公路桥梁工程中应用越来越广泛。钢桥面板是主梁结构的一部分,直接承受车轮荷载作用,受力较复杂。目前按 3 种受力体系研究钢桥面板:1)在结构分析中钢桥面板作为主梁体系参与结构共同受力,是钢箱梁的整体组成部分;2)包括顶板及其纵、横向加劲肋在内的钢桥面板结构体系,主要把结构荷载传递到主梁结构;3)支撑于纵、横向加劲肋上的各向同性的连续盖板体系,主要把车辆轮荷载传递到各加劲肋上。钢桥面板的内力由主梁体系、桥面板体系及盖板体系各自产生的内力相互叠加而成^[1]。加劲肋是增强结构稳定性的关键部件,在局部荷载下的力学表现对桥梁整体性能至关重要。

唐细彪^[2]建立并分析正交异性钢桥面板车轮荷载作用下的有限元模型,发现纵向 U 型加劲肋、横隔板和桥面板连接处局部应力集中较明显,纵向正应力普遍小于横向正应力;纵肋与横梁相接处和横梁腹板开孔部位疲劳寿命最短。崔海军^[3]以梯形及矩形截面形状的纵向加劲肋与多种缺口形式的横隔板组合形成正交异性钢桥面板结构体系,铺设不同厚度和弹性模量的沥青混凝土铺装层,建立有限元实体模型,对其加载,分析纵向加劲肋截面形状、横隔板缺口形式、铺装层弹性模量和厚度对钢桥面板力学性能的影响,结果表明:加劲肋上口间距越小,钢桥面板受力性能改善越明显;顶板与纵向加劲肋连接处应力高,为力学性能敏感区域;铺装层弹性模量增大,钢桥面板最大主应力减小;铺装层厚度增大,钢桥面板和

收稿日期:2024-11-07

作者简介:陈红(1982—),女,山东菏泽人,高级工程师,工学硕士,主要研究方向为桥梁结构设计及养护,E-mail:273852360@qq.com。

沥青表面最大主应力均减小,需综合设计铺装层弹性模量与厚度。林茂盛等^[4]采用软件 ANSYS 对正交异性钢桥面板在板-肋连接处的应力进行数值计算,结果表明钢桥面板应力一般大于纵肋应力,在横截面加设内横隔板可改善结构受力。邵旭东等^[5]提出带大 U 肋的轻型组合桥面板方案,基于热点应力法对体系的典型疲劳细节进行疲劳验算,对薄层超高韧性混凝土层进行负弯矩条带足尺试验,结果表明带大 U 肋的轻型组合桥面板有较好的抗疲劳和静力性能。张清华等^[6]对比新型大纵肋钢-超高性能混凝土正交异性组合桥面板和传统正交异性钢桥面板的受力性能,发现二者钢箱梁控制点的位移和应力相差不大,前者在中等跨度连续梁桥中适用性较好,疲劳性能显著优于后者。郑小博等^[7]采用数值分析方法研究局部荷载作用下曲线钢箱梁桥面板力学行为,并基于正交试验方法开发曲线钢箱梁桥面板构造优化程序,优化桥面板多目标构造参数,结果发现边跨最大正弯矩截面为最不利荷载控制截面,车轮荷载作用于纵肋正上方和中间时产生的主应力较相近,通过多目标优化构造运算确定的曲线钢箱梁正交异性组合桥面板可显著改善桥面板力学特性。目前针对细部构造对钢桥面板受力性能影响的研究成果较多,在局部荷载作用下,不同加劲肋形式对钢箱梁桥面板力学特性影响的研究较少。

为分析钢箱梁不同加劲肋形式的桥面板的受力情况,本文采用有限元数值分析方法,从整体和局部获取不同桥面板加劲肋下结构效应,合理设计钢桥面板细部构造,防止出现应力集中和不利受力,避免结构的疲劳破坏或其他形式的脆性破坏,分析加劲肋形式与桥面板受力的内在关联,以期同类钢桥的建造、维护及病害防治提供分析方法和设计思路。

1 两类桥面板加劲肋

在设计中,钢桥面板的加劲肋常采用开口截面与闭口截面两种结构形式,倒 T 型、I 型和 L 型为开口截面加劲肋,U 型(梯形截面)、V 形及 U 形截面为闭口截面加劲肋。本文分析倒 T 型和 U 型(梯形截面)加劲肋的受力情况。按常规设计方法,在钢箱梁顶板处,取钢桥面板倒 T 型、U 型加劲肋的间距分别为 310、600 mm,倒 T 型、U 型加劲肋断面如图 1 所示。

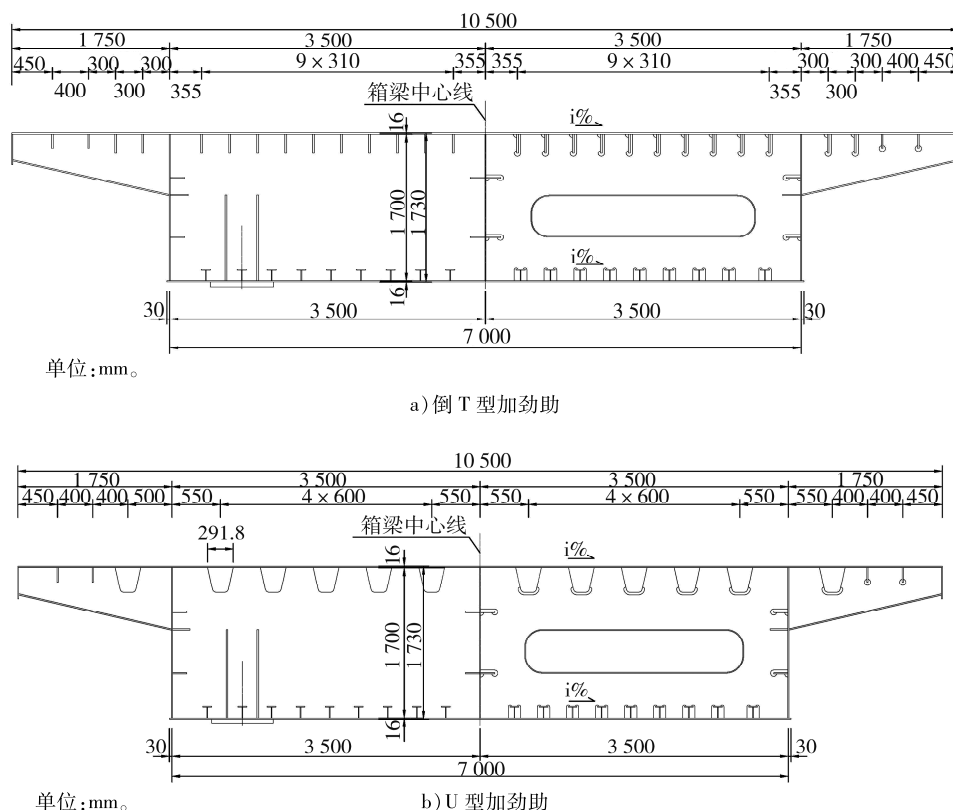


图 1 钢桥面板倒 T 型、U 型加劲肋断面

2 结构模型

钢桥面板应力计算包括两类:一类是通过计算机完成整体计算方法,将钢箱梁等效为板壳结构单元,建立全桥空间有限元模型,较真实地模拟结构的实际受力情况,但需用空间薄壳单元模拟结构,计算过程复杂,耗时较多,对设计人员要求较高;另一类是采用叠加法,即将钢桥面板的受力按主梁体系、桥面板体系及盖板体系3种结构体系分别计算后叠加^[8-11]。

传统的计算方法为应力叠加法,按整体结构模型和钢箱梁局部模型分别计算钢桥面板应力后叠加,由于薄膜应力效应,盖板体系应力通常较小,可忽略不计^[1]。采用基于钢桥面板的应力叠加法,对钢桥面板不同加劲肋下的主梁整体受力、钢箱梁桥面板体系局部受力进行对比分析^[12]。

2.1 整体模型

选取上部结构跨径为 $(32+40+32)$ m的单箱双室连续钢箱梁。箱梁梁高1 700 mm,箱梁顶宽10 500 mm,两侧悬臂长1 750 mm,腹板间距3 500 mm。箱梁顶板厚16 mm,顶板下设U型加劲肋,箱梁悬臂下设板式加劲肋(长160 mm,宽14 mm)及U型加劲肋(长220 mm,宽20 mm);箱梁底板厚14 mm,设置倒T型加劲肋(加劲肋腹板长120 mm,宽8 mm;翼缘长100 mm,宽10 mm);箱梁腹板厚12 mm,腹板设置两道板式加劲肋,长160 mm,宽14 mm,桥梁纵向横隔板间距2 500 mm,厚10 mm,在箱梁简支支撑处设置厚20 mm横隔板,连续支撑处设厚25 mm横隔板。

钢箱梁主梁体系模型如图2所示。

采用空间有限元软件MIDAS计算主梁体系模型,按实际加劲肋布置形式模拟箱梁截面,采用节点弹性支撑模拟盆式橡胶支座刚度,荷载考虑结构自重、车辆荷载、温度应力、风力荷载、支座沉降应力及疲劳荷载等。

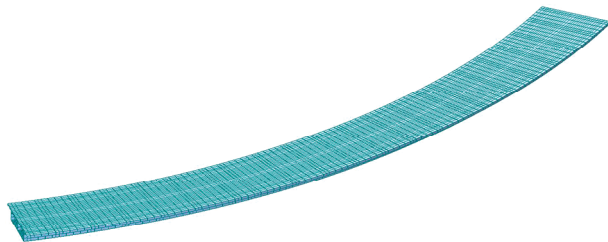


图2 钢箱梁主梁体系模型

2.2 局部模型

根据桥梁结构形式及局部受力范围,选取长7.5 m钢结构节段进行桥面板、加劲肋及横隔板局部验算,桥梁设计荷载为两车道车辆荷载,选取标准车辆荷载的四后轮荷载进行布载计算^[13-16],按车轮着地宽度及长度(考虑铺装层的扩散)计算荷载作用面积,以面荷载的形式布置到模型上,并考虑车辆冲击作用。通过不同的布载计算得到钢桥面板最不利应力,横桥向荷载按车轮偏载,纵桥向荷载为车辆荷载作用于两横隔板中间位置。

采用软件ANSYS建立倒T型加劲肋和U型加劲肋空间板壳模型,如图3所示。为准确反映活荷载偏心作用下桥梁结构的翘曲、畸变变化,按边长10 cm划分板壳单元,共划分为68 596个节点,65 923个单元。

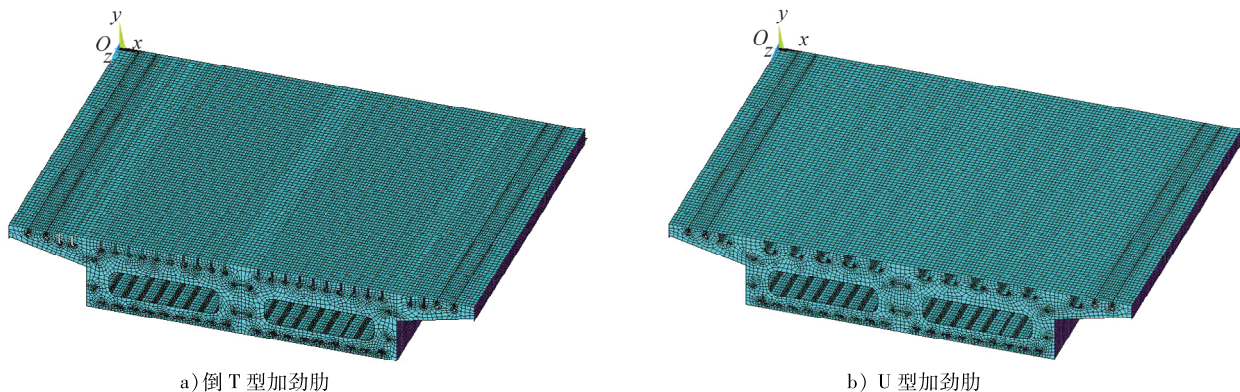


图3 两种桥面板加劲肋局部空间板壳模型

3 模型受力对比

3.1 主梁体系对比

由整体模型得到钢箱梁主梁体系受力情况,主要对比分析基本组合作用下桥面板应力、疲劳荷载作用下桥面板应力及车辆荷载作用下桥面板变形,如图 4~6 所示。

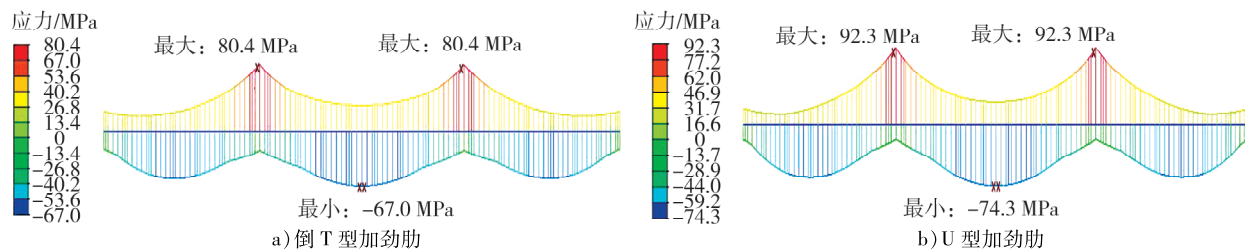


图 4 基本组合作用下两种加劲肋桥面板应力

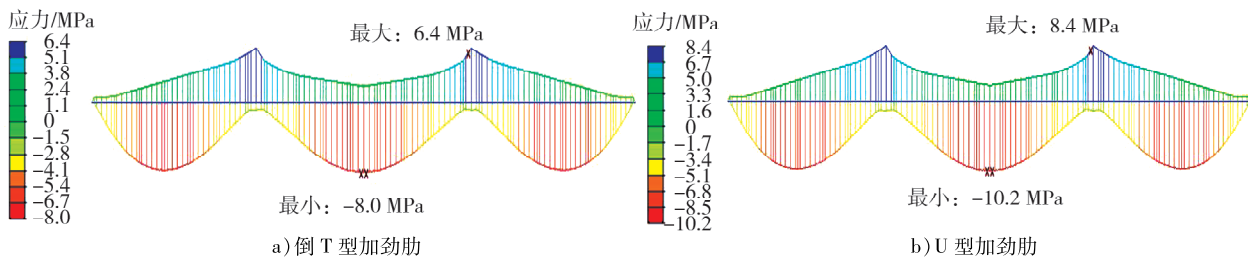


图 5 疲劳荷载作用下两种加劲肋桥面板应力

由图 4~6 可知:在基本组合作用下,U 型加劲肋桥梁支点位置应力、跨中截面应力比倒 T 型加劲肋桥面板分别大 10%、7%;在相同的车辆荷载作用下,U 型加劲肋桥面板 40 m 中跨箱梁的竖向挠度较倒 T 型加劲肋桥面板大;疲劳荷载作用下,U 型加劲肋桥面板最大应力较倒 T 型加劲肋桥面板增大约 31%。

3.2 桥面体系对比

3.2.1 桥面板纵桥向、横桥向应力

在车辆局部荷载作用下,桥面板纵桥向、横桥向应力突出,倒 T 型加劲肋和 U 型加劲肋桥面板纵向应力和横向应力如图 7、8 所示。由图 7、8 可知:倒 T 型加劲肋桥面板最大纵、横桥向应力是 U 型加劲肋桥面板的 2 倍多,在车辆荷载作用下,桥面板桥面体系受力表现为高度的非均匀性。原因是倒 T 型加劲肋的刚度显著低于 U 型加劲肋,前者对桥面板的支撑和刚度贡献不足,桥面板承受更多荷载引起的应力^[18-21]。

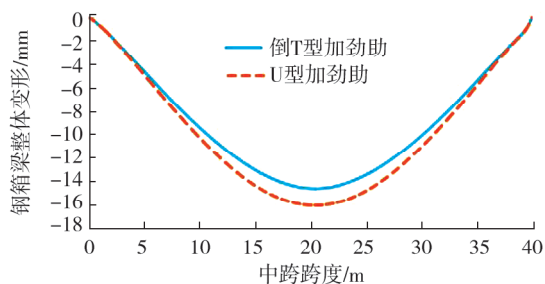


图 6 车辆荷载作用下两种加劲肋中跨竖向挠度对比

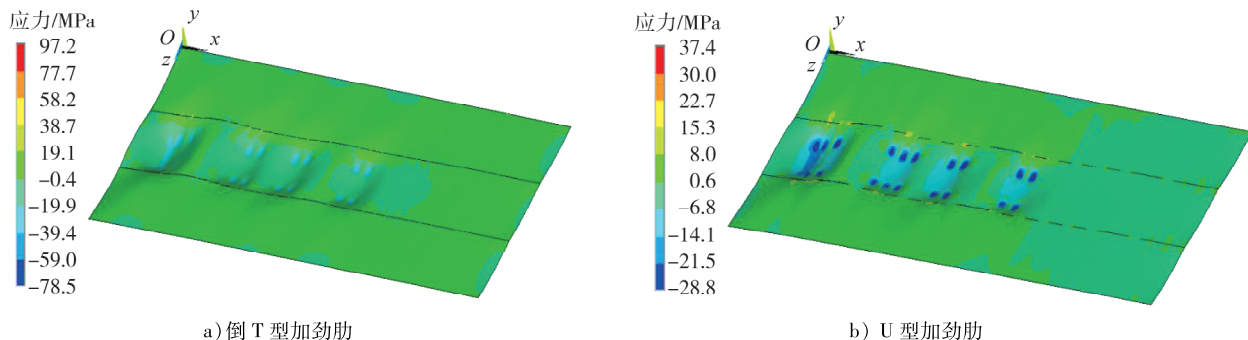


图 7 两种加劲肋桥面板纵向应力

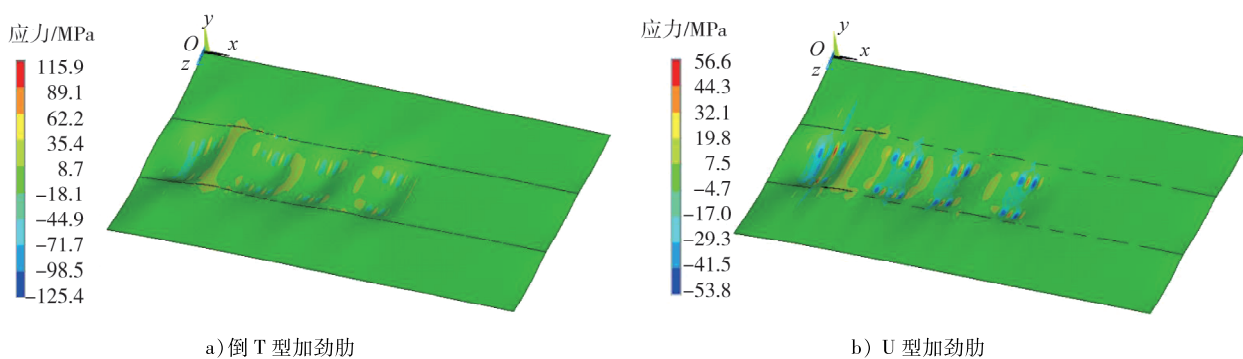


图8 两种加劲肋桥面板横向应力

3.2.2 桥面板加劲肋应力

在车辆局部荷载作用下,加劲肋纵向应力和竖向应力为加劲肋设计的控制因素,倒 T 型加劲肋和 U 型加劲肋纵向应力和竖向剪应力分布如图 9、10 所示。由图 9、10 可知:倒 T 型加劲肋纵向拉、压应力分别比 U 型加劲肋约大 32%,竖向剪应力比 U 型加劲肋小;两种模型加劲肋最大纵向拉应力差、最大纵向压应力差较桥面板小;倒 T 型加劲肋最大竖向剪应力较桥面板小,原因是倒 T 型加劲肋刚度较小。

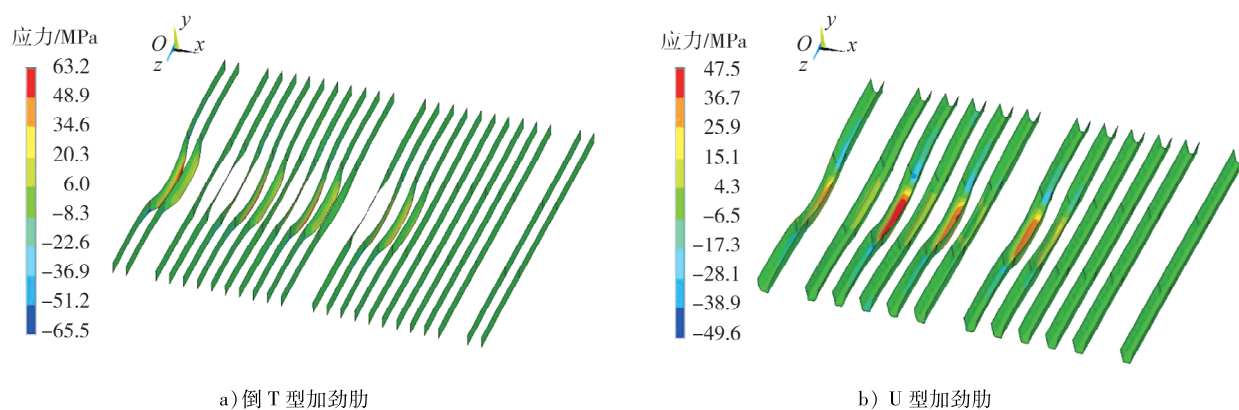


图9 两种模型加劲肋纵向应力

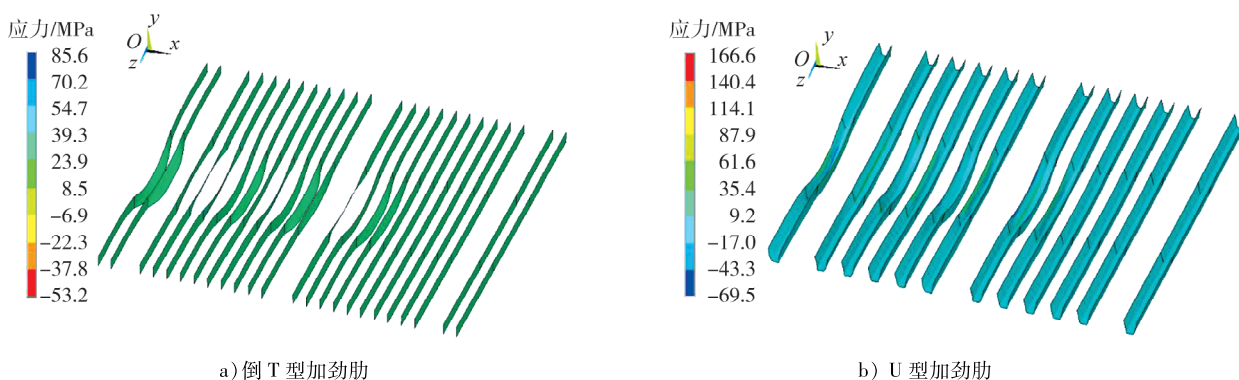


图10 两种模型加劲肋竖向剪应力

3.2.3 横隔板应力

在车辆局部荷载作用下,横隔板横向及竖向应力为控制因素,倒 T 型加劲肋和 U 型加劲肋模型横隔板面内横向、纵向应力如图 11、12 所示。由图 11、12 可知:U 型加劲肋钢箱梁横隔板横向及竖向应力比倒 T 型加劲肋显著增大,最大约 3.5 倍。抗扭惯性矩较大的 U 型加劲肋钢箱梁框架效应明显,纵向加劲肋及横隔板在桥面体系受力中耦合作用明显,设计中应通过调整纵向、横向加劲肋刚度,确保构件受力均衡^[22-24]。

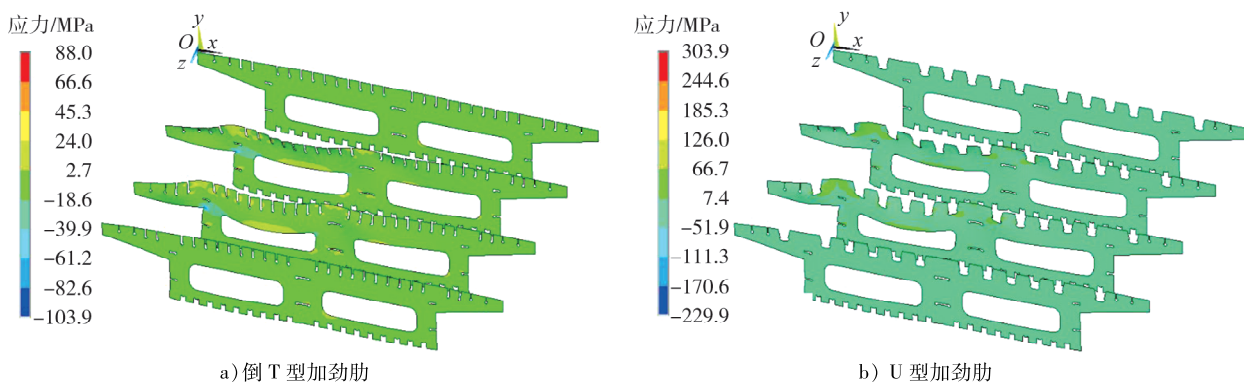


图 11 两种模型横隔板面内横向应力

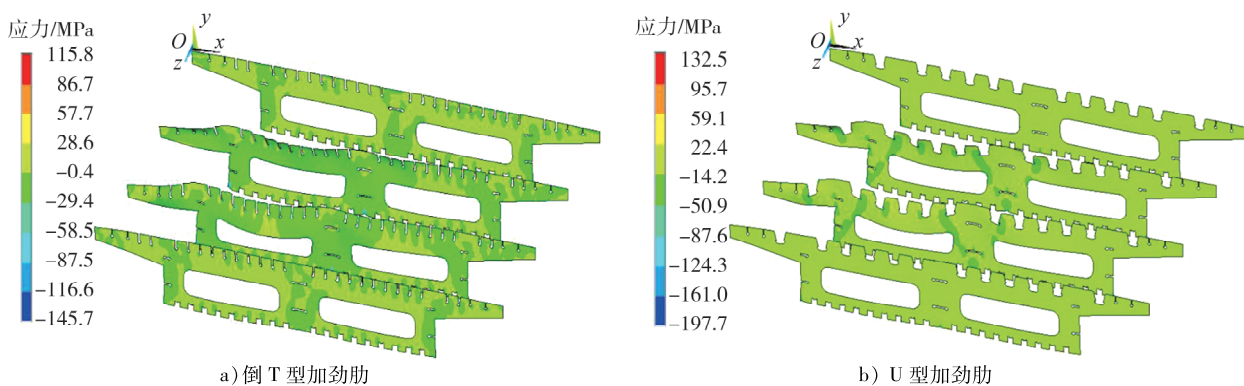


图 12 两种模型横隔板面内竖向应力

3.2.4 桥面板局部变形

设置边界条件为:假定在桥面用钢板和隔板(或腹板)间的接合部不限制转动,桥面板和隔板间的接合部为固定垂直方向、桥轴直角方向;桥面板和腹板间的接合部为固定垂直方向、桥轴方向^[25-27]。

将二期恒载作为均布荷载施加于桥面板。桥轴直角方向加载位置如图 13 所示,设冲击系数为 0.4,考虑桥面铺装的扩散作用,按 45°扩散至钢箱梁顶面。计入冲击系数后的单轮荷载为 98 kN,按车轮着地面积换算为均布荷载为 306.3 kPa。两种加劲肋桥面板局部变形对比如图 14 所示。

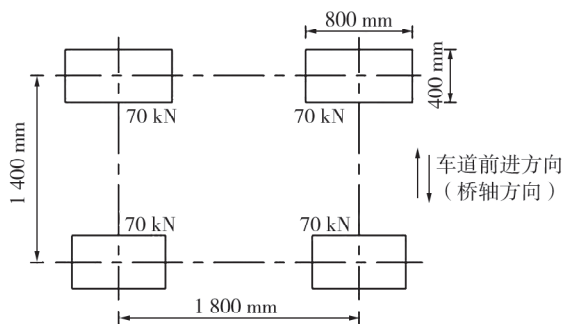


图 13 桥轴直角方向加载位置

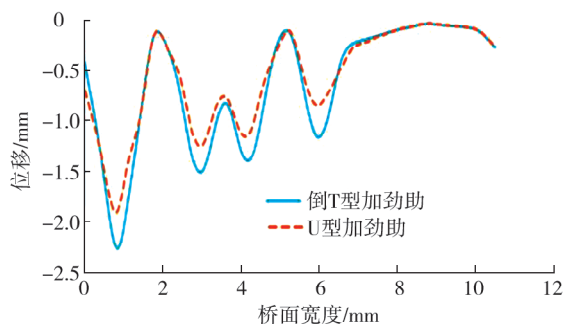


图 14 两种加劲肋桥面板局部变形对比

由图 14 可知:倒 T 型加劲肋和 U 型加劲肋模型的桥面板局部变形趋势相同,倒 T 型加劲肋模型下桥面板局部变形较 U 型加劲肋模型大,约为后者位移的 1.2 倍。

4 结论

根据钢桥面板的力学特性及有限元计算方法,以及工程中常用的开口截面加劲肋和闭口截面加劲肋

两种类型,建立整体模型及空间全板壳局部模型,对比主梁体系和桥面体系下钢桥面的受力及变形、加劲肋的应力及横隔板应力。

1)主梁体系中,倒T型加劲肋和U型加劲肋模型钢桥面板的应力及位移相差较小,钢桥面作为主梁的组成部分,参与主梁共同受力,整体刚度较接近。

2)在车辆荷载作用下,桥面板桥面体系受力表现为高度的非均匀性。纵向加劲肋及横隔板在桥面体系受力中耦合作用明显,在设计中应综合考虑各构件的刚度贡献,确保构件受力均衡。

桥梁跨径较小或桥面板整体应力水平较低时,可考虑开口截面加劲肋,方便快捷施工,且满足结构受力要求。在大跨径或结构受力复杂的钢结构设计中,若整体结构计算中桥面板应力已较大,宜考虑采用闭口截面加劲肋,减少桥面板局部应力,主梁体系和桥面体系应力叠加不超规范限值。

参考文献:

- [1] 吴冲. 现代钢桥(上册)[M]. 北京:人民交通出版社,2025.
- [2] 唐细彪. 某桥正交异性钢桥面板结构受力分析[J]. 世界桥梁,2015,43(1):32-37.
- [3] 崔海军. 桥面构造及铺装层对正交异性钢桥面板力学性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):454-461.
- [4] 林茂盛,顾萍,周聪. 闭口肋正交异性钢桥面板应力分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2010,23(4):32-35.
- [5] 邵旭东,曲宛桐,曹君辉,等. 带大U肋的轻型组合桥面板基本力学性能[J]. 中国公路学报,2018,31(8):94-103.
- [6] 张清华,张鹏,刘益铭,等. 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.
- [7] 郑小博,蒋昆昆,侯炜,等. 曲线钢箱梁桥面板力学行为及构造优化研究[J]. 铁道工程学报,2024(5):19-27.
- [8] 中华人民共和国交通运输部,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] 中华人民共和国交通运输部,中交公路规划设计院有限公司. 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.
- [10] 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.
- [11] 王伟,王亚飞,周尚猛. 面板-纵肋连接疲劳试验及残余应力分布研究[J]. 铁道工程学报,2021(5):60-64.
- [12] 苏庆田,贺欣怡,曾明根. 球扁钢肋组合桥面板局部与整体力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(7):877-883.
- [13] 孔丹丹,孙全胜,刁万民,等. 正交异性钢桥面板U肋足尺静力荷载试验研究[J]. 森林工程,2022,38(1):145-151.
- [14] 詹健,邵旭东,曲宛桐等. 钢STC轻型组合桥面结构多参数分析[J]. 公路交通科技,2018,35(5):73-81.
- [15] 吴丽丽,姚超,郑贺崇. 正交异性钢桥面板的研究进展[J]. 公路与汽运,2022(3):112-117.
- [16] 张龙,吉伯海,房亮,等. 非对称铺装对钢桥面板典型疲劳细节受力特征的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版). 2024,46(6):666-673.
- [17] 吉伯海,陈念念. 钢桥面板U肋与横隔板焊缝疲劳强度分析[J]. 北京交通大学学报,2020,44(6):110-117.
- [18] 王春生,翟慕赛,王雨竹. 钢桥疲劳研究进展[J]. 交通运输工程学报,2024,24(1):9-42.
- [19] 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.
- [20] 陈绍藩,顾强. 钢结构(上册):钢结构基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [21] 黄炬银. 正交异性钢箱梁桥面结构体系优化设计[J]. 铁路建设技术,2025(2):89-92.
- [22] LAIMA S J, LI H, CHEN W L, et al. Effects of attachments on aerodynamic characteristics and vortex-induced vibration of twin-box girder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 77: 115-133.
- [23] TANG H J, SHUM K M, LI Y L. Investigation of flutter performance of a twin-box bridge girder at large angles of attack[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 186: 192-203.
- [24] 陈辉,于力,要荆荆. 正交异性钢桥面板疲劳病害分析及改造措施研究[J]. 公路工程,2021,46(2):54-59.
- [25] 安然,王有志,王希岗,等. 正交异性钢桥面板双轴疲劳性能评估[J]. 桥梁建设,2024,54(2):91-98.
- [26] 王新敏,李义强,许宏伟. ANSYS结构分析单元与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2011:258-262.
- [27] 姜磊,元敏,邹博文,等. 开口T形加劲肋正交异性钢桥面板疲劳性能研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2025,55(1):78-88.

The impact of stiffener form on the load-bearing performance of steel box girder bridge deck

CHEN Hong

Broadvision Engineering Consultants Co., Ltd., Kunming 650011, China

Abstract: To analyze the stress conditions of bridge deck panels with different stiffener forms in steel box girders, the software ANSYS is used to establish a comprehensive model and a spatial shell local model for a single box double-chamber continuous steel box girder with a span of (32+40+32) m. The effects of the main girder system and bridge deck system are obtained, and a comparative analysis is conducted on the structural effects of commonly used open section (inverted T-shaped) stiffeners and closed section (U-shaped) stiffeners in bridge deck panels. The results indicate that: 1) The overall model reveals that the stress situation of the main girder system in the steel box girder, under basic combination effects and fatigue load effects, shows that the displacements and stresses of the bridge deck panels with inverted T-shaped stiffeners and U-shaped stiffeners are quite similar. 2) Under local vehicle load, the longitudinal and transverse stresses of the inverted T-shaped stiffener bridge deck panel are more than twice those of the U-shaped stiffener bridge deck panel; the maximum longitudinal stress of the inverted T-shaped stiffener is greater than that of the U-shaped stiffener, while the vertical shear stress is smaller than that of the U-shaped stiffener and is lower than that of the bridge deck panel; the transverse and vertical stresses of the U-shaped stiffener steel box girder web are significantly increased compared to the inverted T-shaped stiffener, with a maximum increase of about 3.5 times. In design, adjustments should be made to the stiffness of the longitudinal and transverse stiffeners to ensure balanced stress in all components; the local deformation trends of the bridge deck panels in the inverted T-shaped and U-shaped stiffener models are similar, but the local deformation of the bridge deck panel under the inverted T-shaped stiffener model is larger than that of the U-shaped stiffener model, approximately 1.2 times the displacement of the latter.

Keywords: steel structure; steel beam; bridge deck slab; stiffener; localized stress

(责任编辑:王惠)