

新型正交异性钢桥面板选型与分析

吴丽丽¹, 安丽佩^{1,2}, 孙天明³

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 浙江中隧桥波形钢腹板有限公司, 浙江 杭州 311200)

摘要: 针对传统正交异性钢桥面板在运营过程中, 顶板-纵肋焊接处及其上一构造细节位置一顶板、纵肋与横隔板三者交接处的疲劳问题和在车轮荷载作用下, 桥面板横桥向局部效应显著等问题, 从结构构造出发, 提出了 6 种新型正交异性钢桥面板, 在用钢量相同的条件下, 确定了它们的细部尺寸. 并采用有限元软件 ABAQUS 对传统正交异性钢桥面板和 6 种新型正交异性钢桥面板的静力承载性能对比分析, 得出: 因桥面板挠度值超出了规范限值, 故折弯型钢桥面板 A 构造不合理; 以桥面板竖向最大位移为指标, 与传统正交异性钢桥面板 O 相比, 双连续波形钢桥面板 E 和添底部钢板双连续波形钢桥面板 F 的减小幅度仅为 3.22% 和 4.83%; 而折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 则分别减小了 58.3%、50.6% 和 31.7%. 最后, 经挠度、横向应力及横隔板支反力三方面系统分析确定折线型钢桥面板 B 为最佳方案.

关键词: 正交异性钢桥面板; 车辆荷载; 横桥向; 竖向位移; 支反力

中图分类号: TU 391; U443.31

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0771-08

Selection and analysis of new types of orthotropic steel bridge deck

WU Lili¹, AN Lipei^{1,2}, SUN Tianming³

(1. College of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Zhejiang Tunnel Bridge with Corrugated Steel Webs Co. Ltd, Hangzhou 311200, China)

Abstract: For the traditional orthotropic bridge deck, the connections between the top plate and the longitudinal stiffener are prone to fatigue damage during the operation phase. This also occurs at the junction of the tabula, the longitudinal stiffener and the top plate. At the same time, the local wheel load can't be effectively transmitted in the transverse bridge, which results in the obvious stress concentration in the transverse direction of the orthotropic steel bridge deck. This paper puts forward six new types of the orthotropic bridge deck, which was based on the structural improvement of the traditional orthotropic bridge deck. On the basis of the same steel consumption as the traditional orthotropic bridge deck, the detailed dimensions of the six new orthotropic steel bridge decks were designed. The static bearing performance of these types of decks were compared herein by the finite element software ABAQUS. Results showed that the steel bridge deck scheme with bending plate "A" was not reasonable because the deflection of bridge deck exceeded the limit value specified in the code. Taking the maximum vertical deflection of bridge deck as an index, compared with the traditional orthotropic steel deck "O", the reduction range of the steel deck scheme with double continuous wave plate "E" and the steel bridge deck scheme with double continuous wave plate and bottom plate "F" were only 3.22% and 4.83% respectively. However, the steel deck scheme with polygonal plate "B", the steel bridge deck scheme with triangular tube "C" and the steel bridge deck scheme with sine wave shaped plate "D" decreased significantly, which were 58.3%, 50.6% and 31.7%, respectively. Finally, it was determined that the steel deck scheme with polygonal plate "B" was the best scheme through the analysis of the vertical deflection, the transverse stress and the reaction force on tabula ribs.

Key words: orthotropic steel deck; vehicular loads; cross bridge direction; vertical displacement; reaction force

伴随着社会经济生活的进步和生活品质的提升, 人们的出行量激增, 对桥梁各方面性能的要求也越来越高, 故具有建造周期短、使用寿命长、可实现工厂化配置的正交异性钢桥面板则应运而生,

甚至成为目前大型桥梁主要的桥面形式之一^[1-2]. 该结构首次应用于实际桥梁是 1934 年德国 Feld-coeg 桥, 但由于当时焊接技术的问题, 效果未如预想, 故未能得到广泛使用^[3].

收稿日期: 2019-05-19

修改稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678564)

第一作者: 吴丽丽(1977—), 女, 教授, 博导. 主要从事钢结构、钢-混凝土组合结构方面的研究. E-mail: jennywll@163.com

正交异性钢桥面板结构是在顶板底部设置纵横交叉的钢板来增强顶板的刚度,顶板与纵横交叉的钢板组成了一个体系,并以体系的形式来承受顶部车辆荷载的作用,如图1所示。该桥面板创新点:除去基本功能外,盖板还发挥了纵向加劲肋、横隔板以及主梁的上翼缘的作用,以较少的钢材发挥其最大化效用,显著节省材料,故二次世界大战后,在技术工艺低且钢材储量不足的情况下得到了推广。

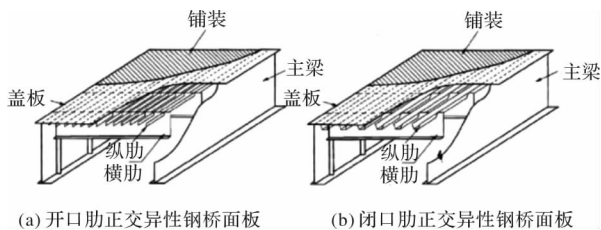


图1 正交异性桥面板组成部件

Fig. 1 Orthotropic bridge deck component diagram

但这种正交异性钢桥面板在使用过程中也呈现出了疲劳、开裂等一系列问题。在国外, Cuninghame^[4-5]针对出现疲劳裂纹的英国 Severn 桥钢梁的横隔板与纵肋交汇处、纵肋与顶板结合处等3个细节处所出现的开裂原因进行了分析,得出顶板、纵肋及横隔板三者汇聚处的局部应力过大是引起裂缝的主要原因。Jun-Hyeok Choi 和 Do-hwan Kim^[6]基于韩国釜山 Kwang-Ahn 桥对纵肋与横梁连接处进行足尺模型疲劳试验,结果表明:裂缝最初是在纵肋与横梁交叉处的焊趾位置以及纵肋与顶板结合处的焊缝上出现,止裂孔对其阻碍作用突出。

在国内,同济大学童乐为,沈祖炎等^[7-8]以上海市内环线中山路3号桥为背景,通过开口截面纵肋与横隔板结合处的静力试验和疲劳试验,对正交异性钢桥面板应力分布情况以及从疲劳方面看汽车荷载下钢桥面板的荷载作用效果和其分析方法进行了研究。刘晓光等^[9]对随着荷载位置改变,钢桥面板的挠度和U型肋与横隔板交叉处的局部应力变化规律进行了研究,得出了荷载在桥长和桥宽两方向的影响范围。田洋等^[10]对顶板、U型肋和横隔板三者交汇处,横隔板开口边缘处等的应力进行了研究。结果表明:在顶板、U型肋和横隔板三者交汇处应力问题最为突出,横隔板腹板开口处亦处在应力较集中的部位,该部位最大应力发生的位置是开口下端的圆弧部位。

综上,国内外学者的研究表明:(1)正交异性钢桥面板疲劳易发位置为纵肋与顶板的焊接接头、纵肋间的拼接焊缝、纵肋与顶板焊接处和纵肋与横梁连接处,其中以纵肋-顶板焊接处最为常见,顶板、纵肋和横梁三者相交处为结构最为敏感的部位。

(2)因钢桥面板横桥向的纵肋是以一定的间距设置的,致使结构在该方向上刚度差异很大,故在车轮荷载作用下,横桥向得不到有效传递,产生了特别显著的局部效应。

Kazuyuki Mizuguchi 等^[11]提出一种在原有结构的基础上,加宽或加大钢桥面板各组成部件(如顶板厚度、纵向加劲肋间距等)尺寸的正交异性板。美国学者 Roman Wolchuk^[12]基于 Kazuyuki Mizuguchi 推荐的大纵肋型式建议将其中的纵肋采用热轧方式来替代会在拐角处产生残余应力和应变的冷压方式。在此基础上,邓文中院士^[13]提出了一种新的构思,即(1)纵肋采用肋的下缘加厚的热轧型钢,可以使纵肋的刚度显著增加,减少变形和增加跨度。(2)在纵肋顶部局部加厚进而改善纵肋和桥面板之间的焊接,如图2所示。

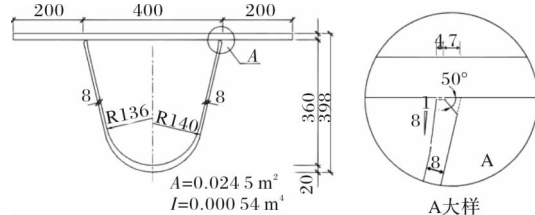


图2 邓文中建议的热轧肋骨

Fig. 2 Hot-rolled rib recommended by Deng Wenzhong

国内外学者的主要工作集中在以下两方面:(1)增加结构的刚度,降低可能发生疲劳位置点的应力幅;(2)加大或加宽结构的尺寸,减少焊缝数量,但这种方法同时会使某一些部位的应力幅变得更大,反而加剧了疲劳问题的出现。针对以上两个问题,虽然从结构体系自身出发通过对构造细节和设计参数的优化设计改善确实可行且产生了不错的效果,但并没有从根本上解决问题,故对传统正交异性钢桥面板进行结构创新从而消除敏感位置则是更为有效措施。

基于以上考虑,本文提出了6种新型正交异性钢桥面板方案,旨在从构造上缓解或消除疲劳最常见的部位即顶板-纵肋焊接处以及其上一构造细节位置—顶板、纵肋与横隔板三者相交处,且兼顾让桥面板在受荷时横向分布的面积有一定程度拓宽;在用钢量基本保持一致的原则下,采用有限元数值模拟从横桥向纵向应力、挠度和横隔板上支反力三方面对比分析了新型与传统正交异性钢桥面板的静力承载性能,暂不做具体疲劳分析。

1 传统正交异性钢桥面板及有限元模型

参照国内外较大钢桥的正交异性钢桥面板的设计方案确立了传统正交异性钢桥面板中构件的尺寸

和材料,并以如下4点假定^[14-15]为前提,以钢桥面板体系局部区段为研究对象,根据《公路桥涵设计通用规范》[JTGD60-2015]^[16]及《公路工程技术标准》[JTGB01-2014]^[17]中重车为550 kN的后轴重力标准值为荷载标准,即加载面积为 $0.2\text{ m}\times 0.6\text{ m}$,大小为70 kN的荷载,在不考虑冲击系数的情况下,采用有限元软件ABAQUS分析了当车辆荷载处于最不利荷载位置时钢桥面板的力学性能。前期工作已针对车轮荷载在桥面板的横桥向和纵桥向施加位置的改变确定出最不利荷载位置:横桥向为荷载中心处于纵向加劲肋的边缘处,纵桥向为荷载中心与横隔板跨中重合处。

(1)沥青铺装层是完全弹性、均匀连续的各向同性体;

(2)考虑到黏结层与铺装层材料相近,故在模型中将两者放在一起考虑,不单独列出;

(3)铺装层与钢板刚接在一起,它们之间不存在任何滑移;

(4)不计入模型的所有组成件的重量。

1.1 传统正交异性钢桥面板有限元模型

因桥面板受局部车轮荷载作用,应力影响线较短,故传统正交异性钢桥面板局部模型的基本尺寸如图4所示,取行车方向为纵桥向,其中横桥向宽度为4 m,包括8个加劲肋;纵桥向取三跨,两横隔板间距为3.75 m,总长11.25 m。钢桥面板所用钢材全部为Q345,其弹性模量为206 GPa,屈服强度为345 MPa,泊松比为0.3;采用60 mm厚的单层沥青进行铺装(文中未将沥青混凝土铺装层作为研究对象,即其研究对象主要是铺装层以下的结构构造,故仅按照一般情况只考虑其对荷载的扩散作用。),其参数设置为弹性模量为1 600 MPa,泊松比为0.4,有限元模型如图5所示。有限元模型尺寸选取考虑以下因素:(1)当车辆在正交异性钢桥面板上移动时,仅在荷载作用处的桥面板及其附近部位应力值较大,远离荷载附近的应力值很小,这个范围远小于车辆的轴距,分析计算可仅用重车为550 kN的一个后轴重力标准值;(2)只有车轮荷载作用在计算点附近的1~2个横梁范围内时,对相应构造细节的应力有较大影响;(3)当仅考虑荷载工况位于中间跨内,桥面模型纵向取3跨及3跨以上长度,横向取6个即6个以上加劲肋宽度时,不同的端部边界约束设置对计算结果影响已经很小^[18]。故本文的边界条件设置如下:铺装层与顶板绑定在一起,桥面板纵桥向的两边设为可以有竖向挠度,但不能水平移动,横隔板底部完全

固结。

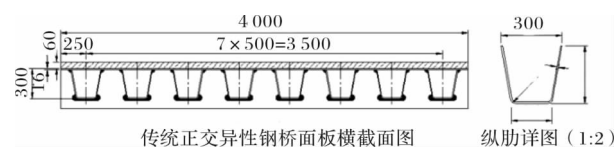


图4 传统正交异性钢桥面板横断面图

Fig. 4 Cross section of orthotropic steel bridge deck

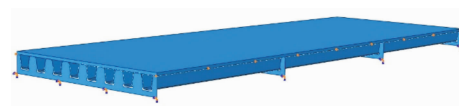


图5 传统正交异性钢桥面有限元模型

Fig. 5 Finite element model of orthotropic steel bridge deck

1.2 有限元结果分析

在桥面板荷载最不利点添加车轮荷载时,传统正交异性钢桥面板放大1 000倍后横桥向挠度变化图及应力云图分别如图6~7所示,结果表明:因传统正交异性钢桥面板纵向加劲肋以一定的间距在顶部钢板的下方设置,使桥面板的横向刚度在某些位置突出,而在某些位置的刚度仅仅只有顶部钢板,故在局部车轮荷载作用下,桥面板横桥向的挠度变化范围和横桥向应力影响宽度偏小,仅影响与它相邻的左右各1~2个纵向加劲肋的宽度,较纵桥向影响宽度小得多,表明局部车轮荷载作用下,传统正交异性钢桥面板在横桥向局部效应显著,即局部车轮荷载在横桥向得不到有效的传递。

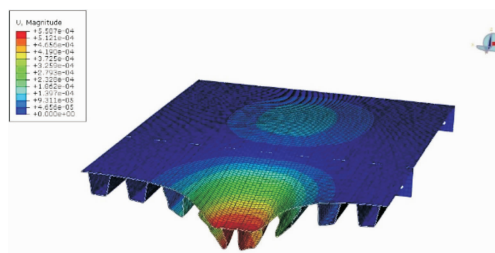


图6 放大1 000倍后横桥向的挠度变化图

Fig. 6 Deflection of transverse direction bridge after 1 000 times magnification

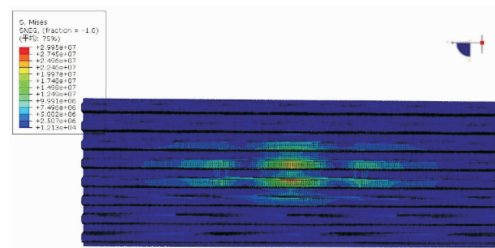


图7 正交异性桥面板应力云图

Fig. 7 Stress diagram of orthotropic bridge deck

从结构构造可知铺装层通过顶板、纵向加劲肋

将其上所承受的车轮荷载传递给横隔板,然后通过横隔板将荷载传递给主梁,最终荷载经主梁传递给了支座。考虑到本文采用的是正交异性钢桥面板局部模型,故为更加直观分析荷载沿桥面板横桥向的传力情况,以横隔板支反力的分布情况为对象进行研究,横隔板支反力云图如图8所示。结果表明:车轮荷载作用下,传统正交异性钢桥面板横隔板支反力主要分布在中间2.5个纵向加劲肋的宽度范围内,且在此范围内主要集中在两纵向加劲肋之间,其直接反映出局部车轮荷载作用下,桥面板横桥向的传力范围偏窄,未得到有效的传递。此外,在纵向加劲肋和顶板的交接线上以及这两个构件同时与横隔板交叉处的应力较结构其他位置点要高得多,若在纵向加劲肋、顶部钢板与横隔板交叉处采用过焊孔,则在过焊孔的边缘处出现了应力集中现象,如图9所示,传统正交异性钢桥面板在施工过程中,纵向加劲肋与顶板及它们与横隔板汇聚位置的连接是利用焊接完成的,施工质量难以保证,这样更加剧了这两处在荷载作用下疲劳问题的出现。

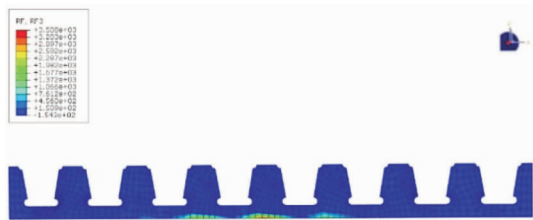


图8 正交异性钢桥面板横隔板支反力分布云图

Fig. 8 Reaction force distribution on lateral ribs diagram of orthotropic steel bridge deck

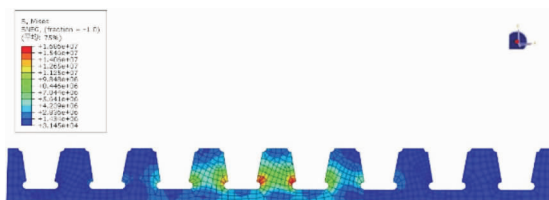


图9 横隔板应力图

Fig. 9 Diaphragm stress diagram

2 新型正交异性钢桥面板方案提出及初选

2.1 新型正交异性钢桥面板方案提出

经上节分析可知,传统正交异性钢桥面板主要存在两个问题:(1)荷载在横桥向得不到有效的传递;(2)某些部位疲劳敏感现象,如最常见的疲劳部位—顶板-纵肋相交处以及其上一敏感位置即顶板、纵肋与横隔板三者汇聚处。为解决以上两个问题,本课题组联合浙江中隧桥波形钢腹板有限公司提出了6种新型正交异性钢桥面板方案,并在保证

新型与传统钢桥面板用钢量基本一致的原则上,对6种新型正交异性钢桥面板进行了尺寸的初步推算,如图10所示。

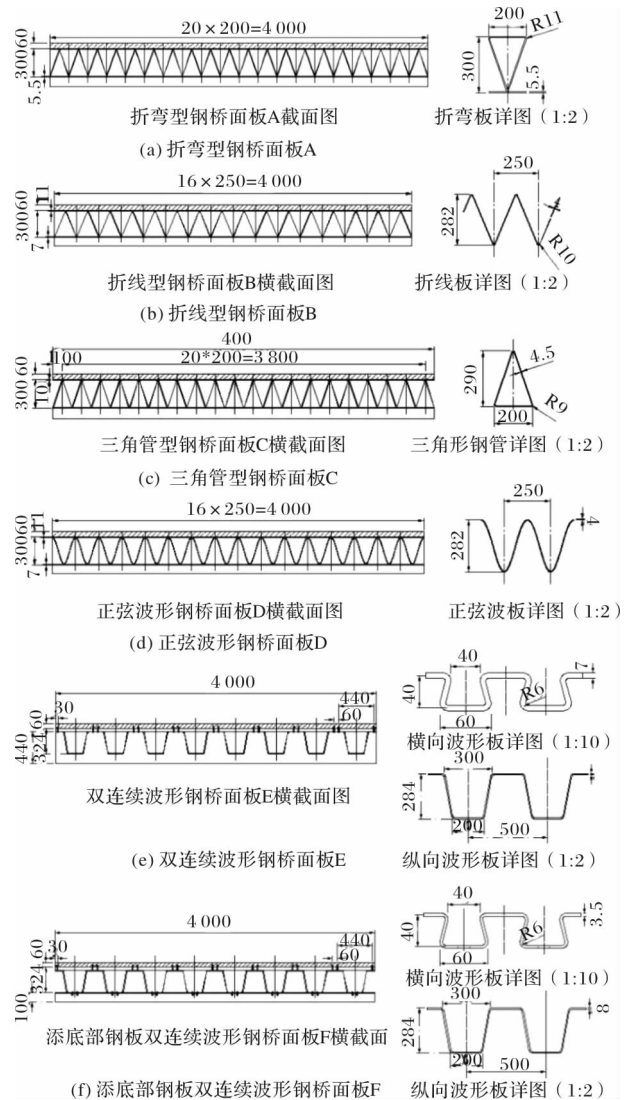


图10 新型正交异性钢桥面板方案

Fig. 10 Scheme of new orthotropic steel bridge deck

以上为6种新型正交异性钢桥面板方案的初始设计。折弯型钢桥面板A采用闭口式压型钢板替代传统方案中的顶板和纵肋,且压型钢板的底部连接在一起相当于在传统方案基础上添加了底板;折线型钢桥面板B和正弦波形钢桥面板D分别是采用折线板和正弦波形板替代传统方案中的纵肋,且还在传统方案基础上增添了底板,采用螺栓将折线板或正弦波形板与顶板、底板进行栓接,以整体形式参与受力,提高桥面板横向传力性能;三角管型钢桥面板C采用密排三角形钢管代替传统方案中的纵肋,密排三角管底部钢板起到了添加底板的作用;双连续波形钢桥面板E采用连续横向波形板和纵向波形板分别代替传统方案中的顶板和纵肋,用密排螺栓将横向波形板和纵向波形板牢固栓接;

添底部钢板双连续波形钢桥面板 F 则是在双连续波形钢桥面板 E 基础上增添了底板, 其中纵向波形板和底部钢板间也采用密排螺栓栓接。6 种新型正交异性钢桥面板方案不仅均避免了应力集中部位一纵肋与顶板及它们与横隔板三者汇聚处的焊接工作量, 解决了这些疲劳易发部位的疲劳问题, 且还兼顾提高了钢桥面板横向刚度的均匀性和大小。与此同时还兼具自己的特性, 折弯型钢桥面板 A 和三角管型钢桥面板 C 增加了构件之间的接触连接和相互作用, 间接提高了结构整体性和桥面板横向荷载传递性能; 其余 4 种方案除在横隔板与部件连接处采用焊接, 其他部位均采用螺栓连接, 整体上大幅度降低了焊接工程量以及焊接可能带来的损害, 此外双连续波形钢桥面板 E 和添底部钢板双连续波形钢桥面板 F 通过将顶板替换为横向波形板来达到提高桥面板横向刚度的作用。

2.2 新型正交异性钢桥面板方案初选

基于相同的边界条件和材料特性, 以钢桥面板竖向最大位移为指标, 采用有限元 ABAQUS 对 6 种新型正交异性钢桥面板和传统正交异性钢桥面板在确定的最不利荷载位置处施加车轮荷载时的力学性能进行了初步分析, 确定了其中较优方案。

首先根据《公路钢结构桥梁设计规范》[JGT D64-2015]^[19]中的相关规定, 对传统和新型正交异性钢桥面板的初步设计中采纳的结构尺寸的合理性进行了检验, 结果表明除折弯型钢桥面板 A 的挠度值超出了规范限值外, 其余方案钢桥面板挠度值均小于公路钢结构桥梁设计规范中的限值, 故结构设计尺寸合理。鉴于折弯型钢桥面板 A 是在与传统钢桥面板用钢量保持一致的原则下确定的, 结合此方案的结构构造可以得出此方案存在一定问题, 故暂时淘汰。传统和其余新型正交异性钢桥面板竖向最大位移如表 1 所示。

表 1 车轮荷载下正交异性钢桥面板竖向最大位移
Tab. 1 The maximum vertical displacement of orthotropic steel bridge deck under wheel load

正交异性钢桥面板方案	钢桥面板竖向最大位移/mm
传统正交异性钢桥面板 O	0.559
折线型钢桥面板 B	0.233
三角管型钢桥面板 C	0.276
正弦波形钢桥面板 D	0.382
双连续波形钢桥面板 E	0.541
添底部钢板双连续波形钢桥面板 F	0.532

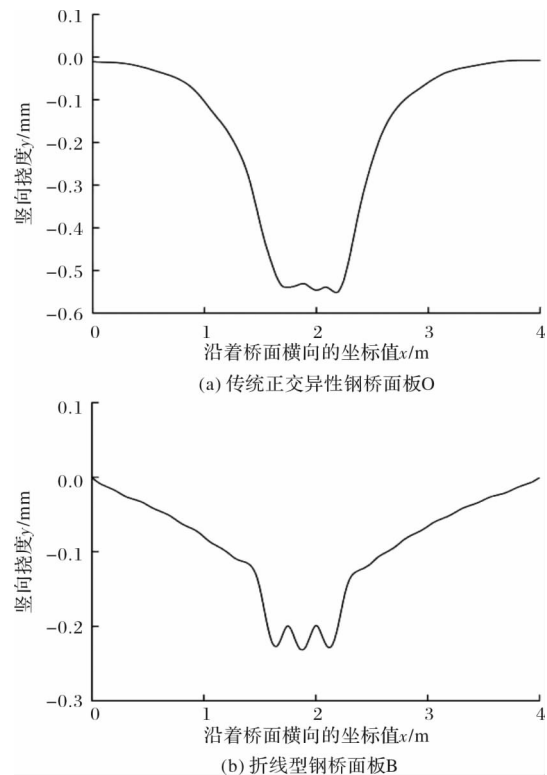
由表 1 可以得出: 与传统钢桥面板 O 相比, 所有新型正交异性钢桥面板竖向最大位移均有不同程度的降低。双连续波形钢桥面板 E 和添底部钢板双连续波形钢桥面板 F 竖向最大位移减小幅度分别为 3.22%、4.83%, 改进效果一般; 折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 竖向最大位移的降低值较理想, 其中以折线型钢桥面板 B 最满意, 减小幅度高达 58.3%; 三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 次之, 减小幅度分别为 50.6%和 31.7%。故以竖向最大位移为指标进行初选时, 折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 为其中较优方案, 且以折线型钢桥面板 B 为最优。

2.3 新型正交异性钢桥面板方案静力性能分析

通过上节的初步分析筛选出了力学性能较好的方案: 折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D。本节将从挠度、应力和横隔板支反力三方面对此三种新型和传统正交异性钢桥面板的静力性能进行探讨和对比, 进而遴选出新型正交异性钢桥面中的最佳方案。

2.3.1 挠度分析

本节将对传统正交异性钢桥面板 O、折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 在车轮荷载下的变形情况进行对比分析, 正交异性钢桥面板穿过车轮荷载中心沿桥面板横向的顶板挠度的变化曲线如图 11 所示。



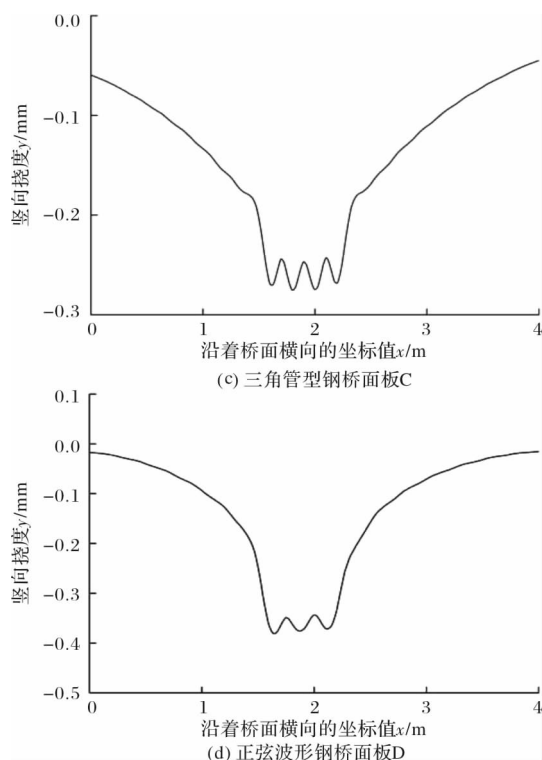


图 11 正交异性钢桥面板顶板挠度沿横桥向变化曲线

Fig. 11 Deflection distribution of orthotropic steel bridge deck along the transverse direction

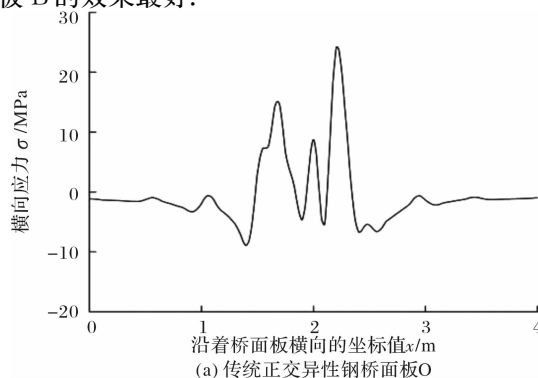
由图 11 可以看出,传统正交异性钢桥面板沿着桥面板横向的挠度变化集中在较小的范围内完成,竖向最大挠度和最大竖向挠度差分别为 0.559 mm、0.552 mm;折线型钢桥面板 B 和三角管型钢桥面板 C 的竖向最大挠度为 0.233 mm 和 0.276 mm,竖向最大挠度差为 0.233 mm 和 0.236 mm,相对于传统正交异性钢桥面板而言,这两种方案的挠度减小幅度为 58.3% 和 50.6%,挠度差减小幅度为 57.8% 和 57.2%,表明折线型钢桥面板 B 和三角管型钢桥面板 C 均增强了钢桥面板横桥向刚度和整体刚度,此外虽然这两种方案也在横桥向直接承受局部车轮荷载的边缘的较小范围内出现了挠度骤增现象,但在此较小范围内,折线型钢桥面板 B 和三角管型钢桥面板 C 的挠度增值分别为 0.11 mm 和 0.09 mm,且其挠度变化遍布整个横桥向范围,并在距离局部作用荷载较远位置处也产生了与距离呈线性减小的挠度。正弦波形钢桥面板 D 的竖向最大挠度和最大竖向挠度差为 0.382 mm、0.366 mm,较传统正交异性钢桥面板而言,其降低的幅度分别为 31.7% 和 33.7%,即正弦波形钢桥面板 D 横桥向和整体刚度均大于传统正交异性钢桥面板,其也同样在较小的范围内变形集中,但变化的速率要缓于传统正交异性钢桥面板。综上所述,折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 横桥向和整体刚度

较传统正交异性钢桥面板均有不同程度的增强,以折线型钢桥面板 B 最为显著。

2.3.2 应力分析

经上一节分析可知,通过提高桥面板的横向刚度显著减小了传统桥面板在局部荷载下的挠度,且桥面铺装常出现纵向的规整裂缝,故本小节对传统正交异性钢桥面板 O、折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 在车轮荷载下的横向应力变化情况进行对比分析,正交异性钢桥面板穿过车轮荷载中心沿桥面板横桥向的顶板应力的变化曲线如图 12 所示。

从图 12(a)可以看出,在局部车轮荷载作用下,传统正交异性钢桥面板 O 沿着桥面板横向方向上横向应力分布不均匀,在某些部位会出现横向应力陡然增加、由拉应力变为压应力或由压应力变为拉应力的现象,且横向应力的变化范围主要集中在桥面板横向范围的 1~3 m 内,而在 0~1 m 和 3~4 m 内横向应力几乎保持不变,最大横向拉应力为 29.37 MPa。由图 12(b)、(c)、(d)可知,折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形板钢桥面板 D 也在某些位置出现了横向应力陡然增加、由拉应力变为压应力或由压应力变为拉应力的现象,未能完全解决横向应力不均匀的问题,且横向应力的变化范围也集中在横桥向 1~3 m 范围内,但是其在 0~1 m 及 3~4 m 的范围内,横向应力出现波浪状的起伏现象,说明在这两个范围内,折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 也存在荷载的传递,以折线型钢桥面板 B 最为显著。折线型钢桥面板 B 的最大横向拉应力为 15.32 MPa,其相对于传统正交异性钢桥面板 O 降低了 47.8%,三角管型钢桥面板 C、正弦波形板钢桥面板 D 的最大横向拉应力分别为 22.42 MPa、21.16 MPa,与传统正交异性钢桥面板 O 相比分别降低了 23.7%,28.0%。综上所述,折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 的横向拉应力和横桥向传力在某一程度上有所改善,其中折线钢桥面板 B 的效果最好。



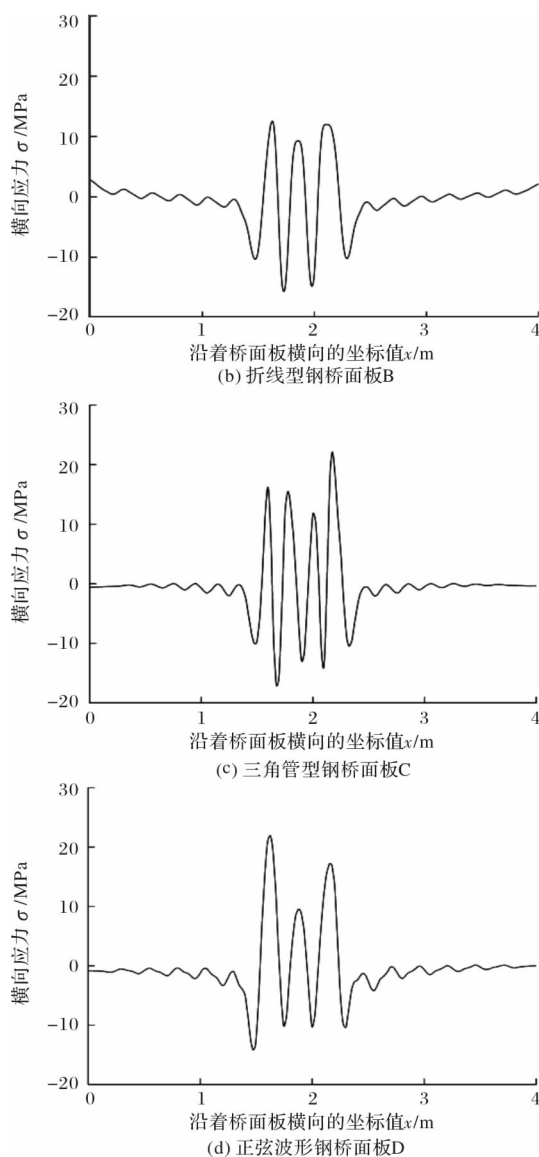


图 12 穿过加载面中心点的顶板横向应力变化曲线

Fig. 12 Transverse stress distribution at the top plate through the centre of the loading surface

2.3.3 横隔板支反力分析

从结构构造可知铺装层通过顶板、纵向加劲肋将其上所承受的车辆荷载传递给横隔板,再通过横隔板将荷载传递给主梁,最终荷载经主梁传递给了支座。本文采用的是正交异性钢桥面板局部模型,故本小节以横隔板支反力的分布情况为研究对象,分析正交异性钢桥面板在桥梁横向的传力情况,横隔板支反力沿着桥面板横向的变化情况如图 13 所示。

由图 13 可以看出,传统正交异性钢桥面板 O、折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 横隔板支反力分布呈不均匀的波浪状起伏,传统正交异性钢桥面板 O 最大支反力为 3 507.76 N,出现在跨中的两纵向加劲肋间的中心,而在纵向加劲肋中心线处横隔板支反力数值接近 0,

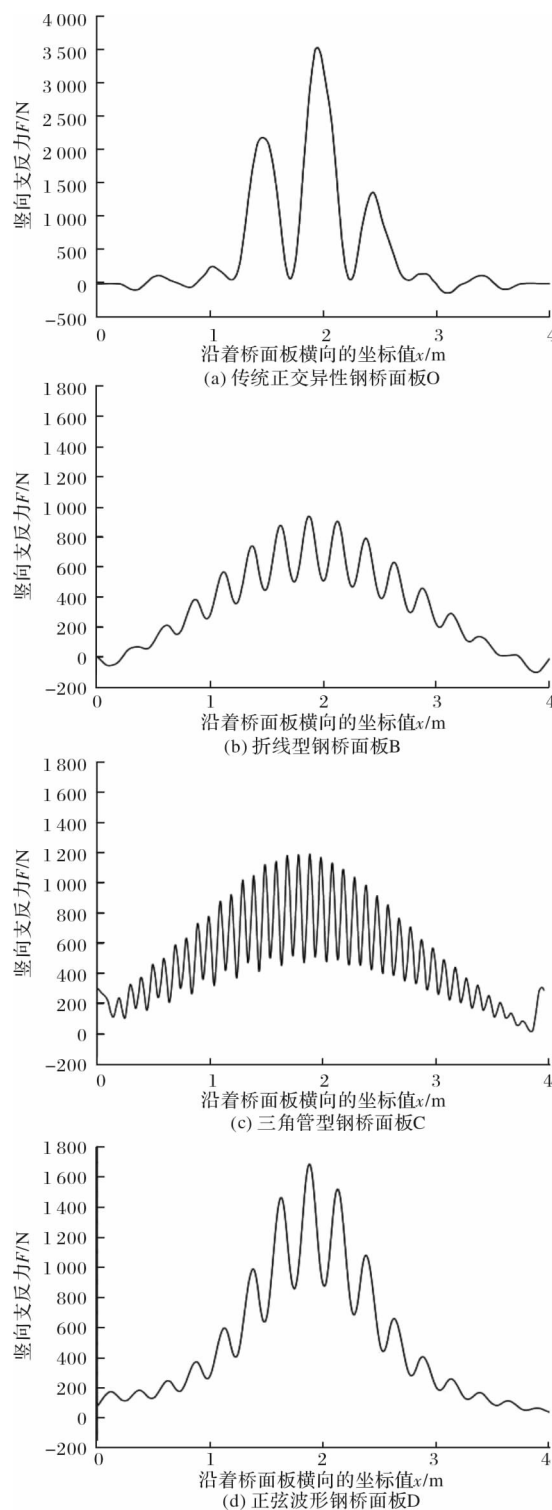


图 13 正交异性钢桥面板的横隔板支反力变化曲线

Fig. 13 Reaction force along the on lateral ribs of orthotropic steel bridge deck

波浪状曲线变化最大幅值约为最大支反力 3 507.76 N;折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 的支反力则布满了整个横隔板底部,最大值为 951.8 N、1 247.0 N,其波浪状曲线变化最大幅值分别为 505.6 N、829.9 N,较传统正交异性钢桥面板支反力最大值分别降低了 72.9%、64.5%,支反力变化最大幅度分别降低了 87.4%、76.3%,这说明折线型钢桥

面板 B, 三角管型钢桥面板 C 横隔板上支反力分布相对均匀; 而正弦波形钢桥面板 D 横隔板支反力虽仍集中在中间的 1~3 m, 但与传统方案 O 相比, 在此范围内其上支反力的波浪状曲线变化最大幅值为 577.1 N, 降低了 83.5%, 且在横隔板 0~1 m、3~4 m 范围内存在较小支反力, 说明与传统钢桥面板相比, 正弦波形钢桥面板 D 支反力分布均匀, 且其横隔板上支反力最大值为 1 713.0 N, 减小了 51.2%。综上所述, 折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 不仅拓宽了支反力的分布宽度, 减小了支反力最大值, 而且还降低了支反力在分布范围内的最大变化幅值, 使得横隔板上支反力分布更为均匀。仅横隔板支反力而言, 折线型钢桥面板 B 为最优方案, 正弦波形钢桥面板 D 则为三者中的最差方案。

3 结论

针对传统正交异性钢桥面板在运营过程中, 顶板一纵肋焊接处及其上一构造细节位置一顶板、纵肋与横隔板三者交接处的疲劳问题和在车轮荷载作用下, 桥面板横桥向局部效应显著等问题, 从结构构造出发, 本文提出了 6 种新型正交异性钢桥面板, 在用钢量相同的条件下, 确定了它们的细部尺寸, 并采用有限元软件 ABAQUS 对传统正交异性和 6 种新型正交异性钢桥面板的静力承载性能对比分析, 主要结论如下:

(1) 以桥面板竖向最大位移为指标, 双连续波形钢桥面板 E 和添底部钢板双连续波形钢桥面板 F 改进效果一般, 均在 5% 以下; 折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C、正弦波形钢桥面板 D 改善效果较突出, 均在 30% 以上, 其中折线型钢桥面板 B 高达 58.3%。

(2) 折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C 和正弦波形钢桥面板 D 的横桥向刚度和整体刚度较传统钢桥面板均有不同程度提高, 故其在桥面板横向上挠度分布也更为均匀且沿着桥面板横向的传力范围均有所增加; 而从横隔板支反力分布也侧面验证了新型正交异型钢桥面板增大了桥面板的横向传力范围。

(3) 从横桥向挠度、应力和横隔板支反力三个方面对传统桥面板和折线型钢桥面板 B、三角管型钢桥面板 C、正弦波形型钢桥面板 D 对比分析表明, 折线型钢桥面板 B 为最佳方案。

参考文献 References

[1] ROMAN Wolchuk. Steel orthotropic decks develop-

ments in the 1990s [J]. Transportation Research Record 1688, 1999: 30-37.

[2] DOWLING P J. The behaviors of orthotropic steel deck bridges[C]//Proceedings of the International Conference on Development in Bridge Design and Construction, United Kingdom, Cardiff, 1971: 557-576.

[3] 李丽娟. 铺装层对正交异性钢桥面板疲劳性能影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

LI Lijuan. Research on the influences of pavement on the fatigue performance of orthotropic steel bridge deck[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[4] CUNINGHAME T R. Strengthening fatigue prone details in a steel bridge deck[J]. Proceedings of International Conference on Fat of Welded Structures, 1987: 3-5.

[5] CUNINGHAME T R. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel Bridge decks [R]. TRRI, Research Report 259, 1990.

[6] CHOI Junhyeok, KIM Dohwan. Stress characteristics and fatigue crack behavior of the longitudinal rib-to-cross beam joints in an orthotropic steel deck[J]. Advances in Structural Engineering, 2008, 11(2): 189-198.

[7] 童乐为, 沈祖炎. 正交异性钢桥面板静力试验和有限元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1997, 25(6): 617-622.

TONG Lewei, SHEN Zuyan. Static test and finite element analysis of orthotropic steel bridge decks[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 1997, 25(6): 617-622.

[8] 童乐为, 沈祖炎, 陈忠延. 正交异性钢桥面板疲劳验算时的结构分析[J]. 上海力学, 1998, 19(3): 204-212.

TONG Lewei, SHEN Zuyan, CHEN Zhongyan. Structural analysis for fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks [J]. Shanghai Journal of Mechanics, 1998, 19(3): 204-212.

[9] 陶晓燕, 刘晓光, 张玉玲. 正交异性钢桥面板受力特征研究[J]. 钢结构, 2010, 25(7): 12-15.

TAO Xiaoyan, LIU Xiaoguang, ZHANG Yuling. Study on the stress characteristics of orthotropic steel deck[J]. Steel Construction, 2010, 25(7): 12-15.

[10] 田洋, 李运生, 张彦玲, 等. 高速铁路正交异性桥面板疲劳细节的应力分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2011, 30(4): 729-733.

TIAN Yang, LI Yunsheng, ZHANG Yanling, et al. Stress analysis of fatigue detail of deck of orthotropic bridges in high-speed railway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2011, 30(4): 729-733.

(下转第 796 页)

- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for high strength bolt connections in steel structures; JGJ 82-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [12] ALINIA M M, SHIRAZI R S. On the design of stiffeners in steel plate shear walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(10): 2069-2077.
- [13] 兰涛, 郭琳颖, 门进杰, 等. 箱板式钢结构住宅底部加强区组合钢板墙有限元分析和抗剪承载力计算式[J]. 工业建筑, 2018, 48(9): 28-35.
- LAN Tao, GUO Linying, MEN Jinjie, et al. Finite element analysis and shear capacity formula of the composite steel plate shear wall at the bottom reinforced area of box-type steel structure residential buildings[J]. Industrial Construction, 2018, 48(9): 28-35.
- [14] 兰涛, 廖钊志, 门进杰, 等. 带肋箱板式钢结构住宅底部加强区墙体抗震性能有限元分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(9): 63-69, 197.
- LAN Tao, LIAO Fanzhi, MEN Jinjie, et al. Finite element analysis of seismic behavior of the wall at the bottom reinforced area of box-type steel structure residential buildings with stiffening ribs[J]. Industrial Construction, 2018, 48(9): 63-69, 197.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢板剪力墙技术规程; JGJ/T 380-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the people's Republic of China. Technical specification for steel plate shear walls; JGJ/T 380-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [16] 缪友武. 两侧开缝钢板剪力墙结构性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- MIAO Youwu. The investigation to structural behavior of steel plate shear wall slotted at two edges[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 778 页)

- [11] KAZUYUKI Mizuguchi, KENTARO Yamada, et al. Rationalized steel deck structure and large model test of developing new type of structure[C]//Proceedings of 2004 Orthotropic Bridge Conference, USA; Sacramento, [s. n.], 2004.
- [12] ROMAN Wolchuk. Prefabricating standard orthotropic steel decks[J]. Model Steel Construction, 2006(12): 49-51.
- [13] TANG Manchung. A new concept of orthotropic steel bridge deck[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011(7): 587-595.
- [14] 华东水利学院. 弹性力学问题的有限单元法[M]. 北京: 水利水电出版社, 1978.
- East China University of Water Resources. Finite element method for elastic problems[M]. Beijing: China Water Power Press, 1978.
- [15] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- ZHU Bofang. The finite element method theory and applications[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.
- [16] 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.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. General specifications for design of highway bridges and culverts; JTG D60-2015[S]. Beijing: China communication press, 2015.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准; JTG B01-2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard of highway engineering; JTG B01-2014[S]. Beijing: China Communication Press, 2014.
- [18] 崔晨, 孙立军. 正交异性钢桥面铺装的力学分析[J]. 公路工程, 2010, 35(6): 49-50.
- CUI Chen, SUN Lijun. Mechanical analysis of pavement on orthotropic steel bridge deck[J]. Highway Engineering, 2010, 35(6): 49-50.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范; JGT D64-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway steel bridge; JGT D64-2015[S]. Beijing: China Communication Press, 2015.

(编辑 吴海西 沈 波)