

夹心钢板系统加固正交异性钢桥面板的性能分析

崔春雷¹, 李运生¹, 王元清²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:正交异性钢桥面板广泛应用在现代钢桥中,但在车辆荷载作用下,由于较高的应力集中易引起关键焊接部位的疲劳裂纹,采用夹心钢板系统(SPS)对正交异性钢桥面板进行加固。通过ANSYS软件建立了正交异性钢桥面板及其SPS加固层的三维有限元模型,在不同的荷载工况下,分析了按我国现行规范规定的车辆荷载的两个后轴共同作用下桥面板的应力分布特征,并与加固前的应力状态进行了对比。结果表明:骑U肋加载在桥面板时U肋焊接处产生的横桥向应力最大;采用SPS对正交异性钢桥面板进行加固的效果良好,与加固前相比,可较大幅度地降低钢桥面板的应力,更有助于抵抗钢桥面板疲劳裂纹的产生。

关键词:钢桥;正交异性桥面板;夹芯钢板系统;有限元模型;荷载工况

中图分类号:U448.36 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)03-0019-06

0 引言

正交异性钢桥面板是现代钢桥中的标准部件,具有轻质、高强、便于安装的优点,然而正交异性钢桥面板直接承受车轮荷载的反复冲击,产生较高的局部应力,桥面板和肋板的焊接连接处易发生疲劳破坏,出现疲劳裂纹,并导致其上的原有桥面铺装层开裂,影响桥梁的使用寿命^[1-2]。

对于发生裂纹的正交异性钢桥面板的加固方法有多种,其中夹芯钢板系统——sandwich plate system (SPS)是一种效果较好,且施工便捷的方法。SPS是由Intelligent Engineering(IE)公司与Badische Anilin-und-Soda-Fabrik(BASF)公司合作开发的,并且已经注册了专利权。在该方法中,首先是在现有的桥面钢板上添加周界板坯,然后在其上添加新的钢板。在这之后,便形成一个浅的水密空腔,然后在其中注入两种组分混合组成的弹性材料。在大约十分钟之内这两种组分会发生反应形成一种固态的弹性夹层,把两块钢板永久地粘合在一起,如图1所示^[3]。

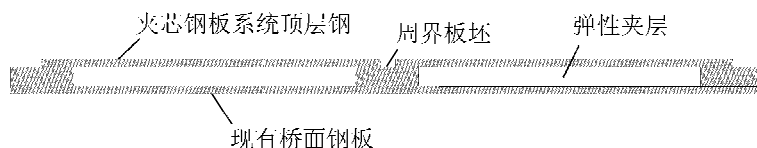


图1 夹芯钢板系统覆盖法组成部分

SPS最初应用于船体加固,由于其便于拼接和拆除的优点,后来逐渐应用于活动桥、临时便桥中^[4],在Kennedy的分析中还指出,用SPS对正交异性钢桥面板进行加固,或直接取而代之,均是比较可行的方案^[5]。本文以我国某悬索桥为原型,采用SPS对出现裂纹的正交异性钢桥面板进行加固,通过ANSYS软件对SPS加固层进行空间有限元分析(忽略周界板坯),研究在当前设计规范规定的车辆荷载作用下,桥面夹芯钢板加固层(SPS)的应力分布情况,并与加固前的情况作以对比,验证加固的效果。

收稿日期:2009-09-09

作者简介:崔春雷 男 1983年出生 硕士研究生

基金项目:铁道部科技研究开发计划(2009G003-C)

1 有限元分析模型

本文所选悬索桥桥面结构形式为下设槽型闭口肋,肋高 262 mm,肋上口宽 316 mm,肋下部宽 201 mm,肋间距 304 mm,横隔板间距 4 m,如图 2 所示。

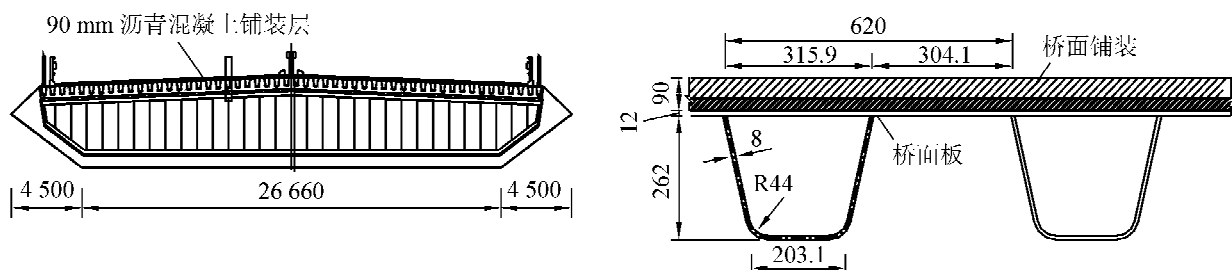


图 2 加劲梁及正交异性桥面板构造(单位:mm)

由于原桥面铺装沥青层厚度为 90 mm,故加固时 SPS 总厚度仍控制为 90 mm,在 12 mm 厚的原桥面钢板和 8 mm 厚盖板之间填充 25 mm 厚的弹性填充层,其上再覆盖 57 mm 厚沥青层,如图 3 所示。

1.1 车辆荷载模型

由于我国公路桥梁设计规范中,没有专门的疲劳设计荷载,在本文的有限元分析中,车轮局部荷载暂按照《公路桥梁设计通用规范》(JTG60—2004)^[6]的强度设计荷载进行分析,如图 4 所示。

1.2 荷载工况

为了全面考察桥面板和桥面加固后在车辆荷载作用下的应力状态,对多种荷载工况进行了分析。纵桥向:车轮荷载作用在

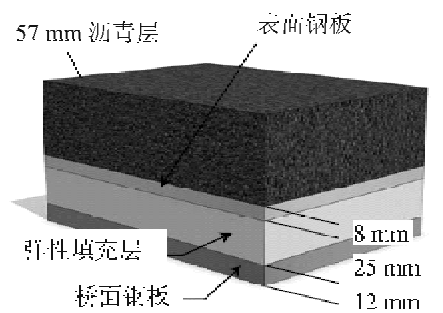


图 3 SPS 加固层 8-25-12

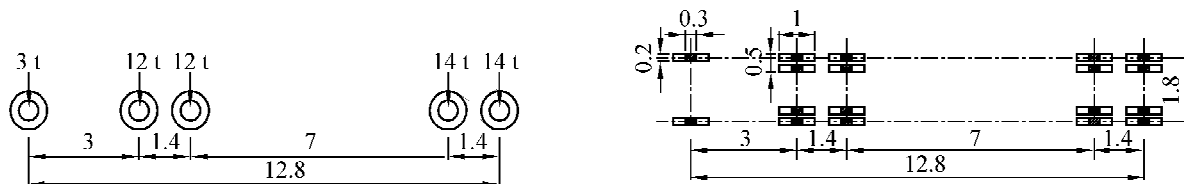


图 4 公路车辆标准荷载(单位:m)

跨中和横隔板;横桥向:分为骑在 U 肋上,在 U 肋上和 U 肋间三种工况。如图 5 所示。

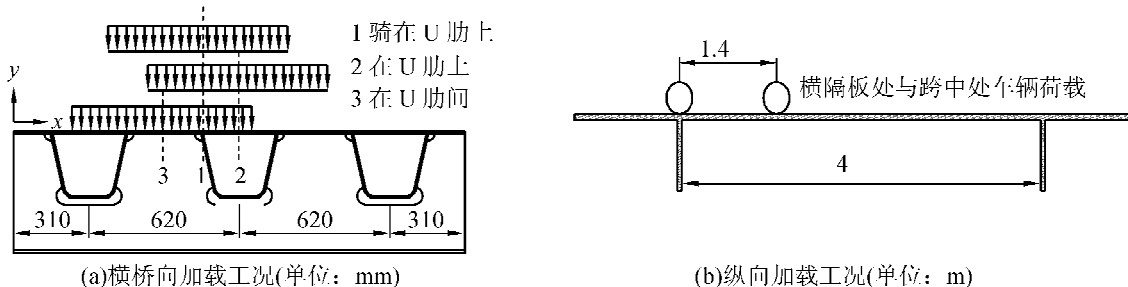


图 5 荷载工况图

1.3 单元类型及材料特性

分析中采用板壳单元 SHELL63 模拟正交异性钢桥面板各部分(包括 SPS 的上下层钢板),SHELL63 单元有 4 个节点,每个节点有 6 个自由度,既能体现桥面板的弯曲应力特性,又能体现结构的薄膜应力,符合钢桥面板的应力特征和几何特性;采用 SOLID45 单元模拟加固层部分(包括弹性夹芯和沥青层),SOLID45 单元有 8 个节点,每个节点有 3 个沿 xyz 方向平移的自由度,具有塑性,蠕变,膨胀,应力强化,大变形

和大应变能力,符合桥面加固层的应力特征和几何特性。SPS 加固层所用材料及材料特性见表 1。

表 1 材料特性

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
16Mnq 钢	206 000	0.3	7.85
弹性材料	7.84	0.47	—
沥青	1 000	0.25	—

1.4 有限元模型

在进行有限元分析时,将荷载沿梁轴纵向的作用位置取在跨中,横向位置取在 U 肋上部(如图 5(a)中的工况 2)作为代表性工况,首先对整体模型进行分析,分析结果显示在车辆作用下桥面钢板局部会出现较大的应力,且这种局部应力主要集中在较小的区域以内(约在 2~3 个 U 肋的范围内),各处轮压造成的应力分布情况相对独立,应力分布影响范围很小。为了提高计算效率,在整体模型分析的基础上,建立了 3U 肋 1 跨(含 2 个横隔板)的局部模型。模型长 6 m,宽 1.86 m,在横隔板底部施加固端约束,有限元模型如图 6 所示。在跨中加载时整体钢箱梁模型和桥面板系局部模型的应力云图比较见图 7。

由图 7 可知,两种模型的应力云图是比较接近的,可以采用局部模型进行桥面板的应力分析。

2 车辆荷载作用下桥面板应力分析

研究表明^[7,8],正交异性钢桥面板的破坏形式主要是桥面板裂纹的产生,而正交异性钢桥面板结构中出现的裂纹主要包括以下四类:桥面板的裂纹;桥面板与 U 肋纵向焊接裂纹;U 肋嵌补段的裂纹;U 肋和横隔板连接处裂纹,以下分别称为 I 型、II 型、III 型和 IV 型裂纹,其中以 I 型裂纹最为突出,其分布情况见

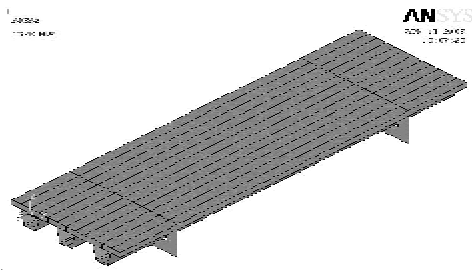
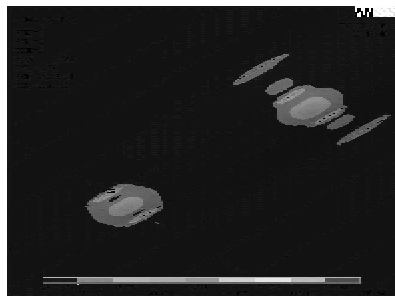
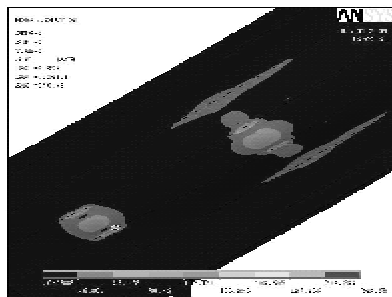


图 6 局部有限元模型



(a)整体模型应力云图



(b)局部模型应力云图

图 7 整体与局部模型应力对比

图 8 所示。

由图 8 可知,横桥向应力是桥面板疲劳开裂的主要因素,原有铺装层实际上也是参与受力的,但在其开裂破坏后,荷载则全部由主体结构承担,因此本文仅对 SPS 加固层有限元模型的夹芯层底层(即桥面板结构层)进行桥面板横桥向应力进行分析,横桥向荷载类型按骑 U 肋、U 肋上和 U 肋间三种工况进行分析。

2.1 骑 U 肋加载工况下的受力分析

以下分别给出了桥面板加固前后横隔板处与跨中处的应力分布情况,如图 9 所示。图 9 中应力以受压为正,受拉为负,以下各图相同。

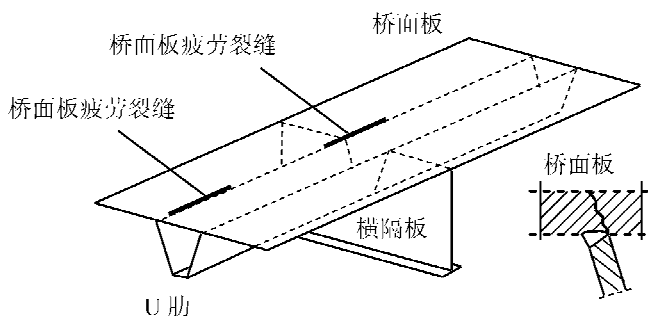


图 8 裂纹分布情况

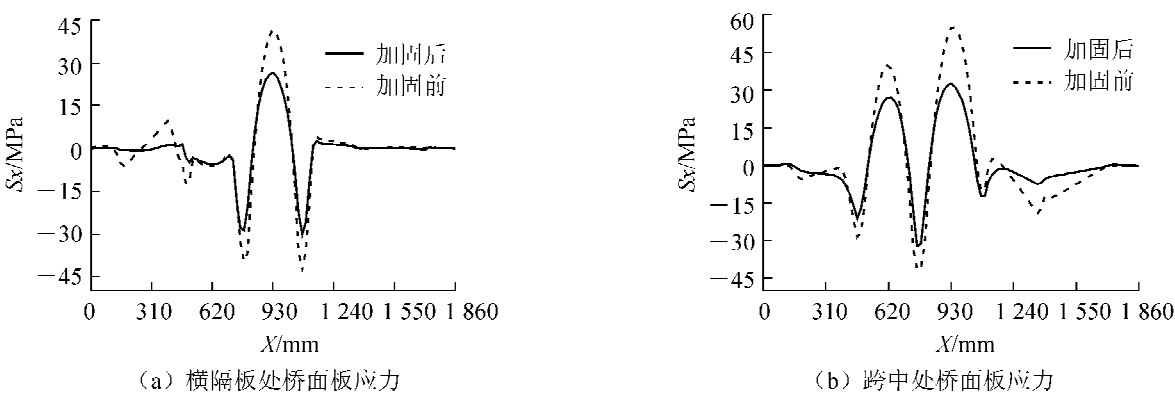


图 9 骑 U 肋加载工况下加固前后桥面板受力分析

根据图 9 加固前后桥面板受力分析情况可知:① 加固前后,由于骑 U 肋加载工况在局部模型上存在偏载问题,故沿梁轴纵向的横隔板和跨中处应力分布不对称,跨中更明显;② 桥面板顶面最大压应力均发生在 U 肋中间,最大拉应力均发生在 U 肋与桥面板连接处;③ 横隔板处桥面板顶面压应力在加固前后都小于跨中处,拉应力则基本相当;④ 由于横隔板只在 U 肋外部有,故横隔板处仅在 U 肋内部产生了较大的横向应力。应力的详细数据见表 2,表中数值均为绝对值,以下各表同。由表 2 可以看出:SPS 加固后有效地降低了桥面板的应力。

表 2 骑 U 肋加载工况下桥面板顶面应力 MPa

位置	最大压应力			最大拉应力		
	SPS 加固	加固前	有效比/%	SPS 加固	加固前	有效比/%
跨中处	32.69	54.90	40.5	32.22	43.86	21.1
横隔板处	26.77	42.27	36.7	31.56	42.62	26.9

2.2 U 肋上加载工况下的受力分析

以下分别给出了桥面板加固前后横隔板处与跨中处桥面板上表面的应力分布情况,如图 10 和表 3 所示,可以看出:① 加固前后,U 肋上加载工况相对于局部模型为对称加载,故沿梁轴纵向的横隔板和跨中处应力都是对称分布;② 横隔板处桥面板顶面拉应力在加固前后都小于跨中处,而压应力则大于跨中;③ 与骑 U 肋加载工况相同,桥面板顶面最大压应力均发生在 U 肋中间,最大拉应力均发生在 U 肋与桥面板连接处,且横隔板处仅在 U 肋内部产生较大的应力;④ 可以明显看出,加固后桥面板应力有了明显下降。

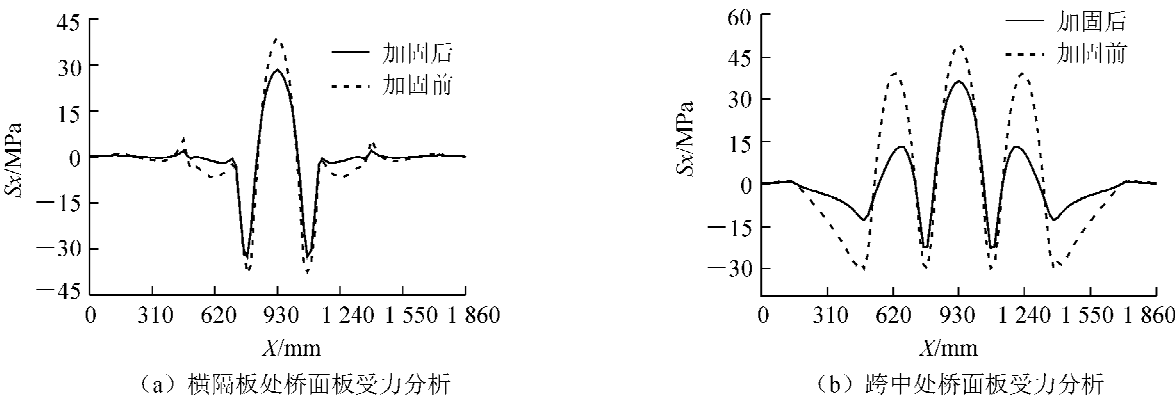


图 10 U 肋上加载工况下加固前后桥面板受力分析

表 3 U 肋上加载工况下桥面板顶面应力 MPa

位置	最大压应力			最大拉应力		
	SPS 加固	加固前	有效比/%	SPS 加固	加固前	有效比/%
跨中处	36.41	49.63	26.6	22.58	30.03	24.8
横隔板处	28.39	39.04	27.2	31.54	37.54	13.3

2.3 U 肋间加载工况下的受力分析

以下分别给出了桥面板加固前后横隔板处与跨中处桥面板上表面的应力分布情况,如图 11 和表 4 所示。可以看出:① U 肋间加载工况属于偏载;② 横隔板处应力比跨中处明显减小;③ U 肋间加载工况下同样显示了 SPS 加固的良好效果,应力分布的其他特征与上两种工况相同。

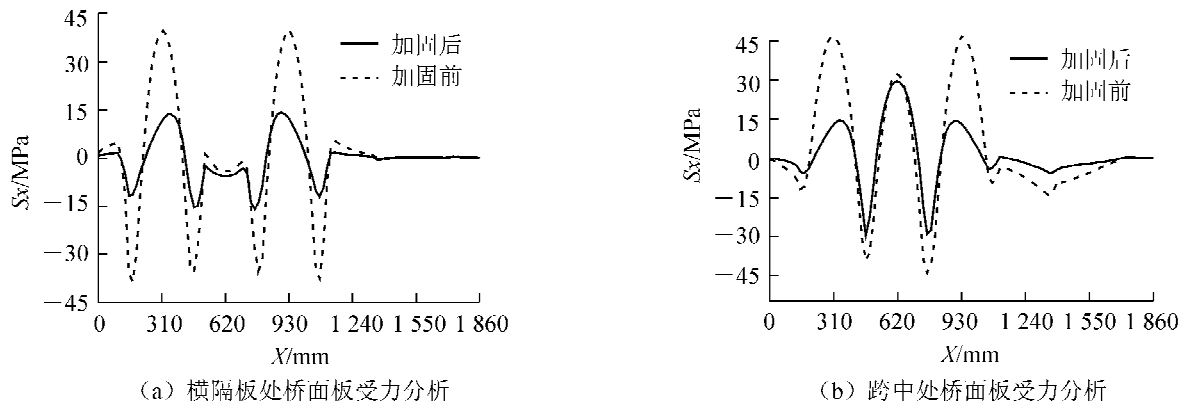


图 11 U 肋间加载工况下加固前后桥面板受力分析

表 4 U 肋间加载工况下桥面板顶面应力

位置	最大压应力			最大拉应力		
	SPS 加固	加固前	有效比/%	SPS 加固	加固前	有效比/%
跨中处	29.54	46.70	36.7%	29.65	43.14	32.8%
横隔板处	14.04	40.00	64%	25.30	38.59	34.4%

2.4 各工况之间的比较

为了全面考察 SPS 加固系统在车辆荷载作用下的应力状态,对三种荷载工况进行了比较,加固前跨中和横隔板处桥面板最大拉应力均发生在骑 U 肋工况下,虽然最大拉应力不到 50 MPa,但由于焊缝中通常存在残余拉应力,再加上车辆荷载的长期反复作用使桥面板疲劳强度降低,故在桥面板顶部易出现疲劳裂纹;加固后三种工况下应力差别不大,最大拉应力明显下降,骑 U 肋工况下仍然为最不利工况。SPS 系统不但加固了原有桥面板,而且操作过程中没有焊接环节,不产生新的焊接残余应力,大大降低了疲劳破坏的风险,使桥梁的使用寿命延长。

3 结语

以某实桥为研究对象,采用桥面夹芯钢板系统 (SPS) 对正交异性钢桥面板进行加固,通过 ANSYS 软件建立了正交异性钢桥面板的三维板壳有限元模型,分析了车辆局部荷载下 SPS 加固层的受力情况,并与桥面板加固前的情况进行了对比。通过分析可知:① 在各种工况下,桥面板顶面最大压应力均发生在 U 肋中间,最大拉应力均发生在 U 肋与桥面板连接处。U 肋与桥面板连接处应力集中现象严重,在轮压作用范围内的 U 肋与桥面板连接处的应力变化非常陡峭,表明 U 肋与桥面板连接处存在应力集中现象;② 横桥向加载时,骑 U 肋加载为最不利工况,骑 U 肋加载在桥面板和 U 肋焊接处产生的横桥向应力最大;③ 采用夹芯钢板系统 (SPS) 对原桥面板进行加固能有效地降低桥面板应力,且不产生新的焊接残余应力,能够显著提高桥面板抗疲劳破坏能力,应用前景良好。通过对车辆局部荷载作用下正交异性钢桥面板加固前后的应力分析,为进一步分析其抵抗疲劳开裂问题打下基础。

参 考 文 献

- [1] Xiao Zhigang, Kentaro Yamada, Samol Ya, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 10:1-11.
- [2] Michèle S Pfeila, Ronaldo C Battista. Stress concentration in steel bridge orthotropic decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61:1172-1184.

- [3] M Feldmann, G Sedlacek, A GeBler. A system of steel-elastomer sandwich plates for stengthening orthotropic bridge decks[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2007, 43(2): 271-282.
- [4] Devin K Harris, Tommy Cousins, Thomas M Murray, et al. Field investigation of a sandwich plate system bridge deck[J]. *Journal of performance of constructed facilities*, 2008(1): 305-315.
- [5] Kennedy D J L, Dorton R A, Alexander S D B. The sandwich plate system for bridge decks[J]. *International Bridge Conference*, 2002(6): 1-11.
- [6] 中华人民共和国交通部. JTGD60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京, 人民交通出版社, 2004.
- [7] Z X Li, T H T Chan, J M Ko. Fatigue damage model for bridge under traffic loading application made to Tsing Ma Bridge[J]. *Theoretical and applied fracture mechanics*, 2001(35): 81-91.
- [8] Yuan Zhao, P E, W M Kim Roddis. Fatigue behavior and retrofit investigation of distortion-induced web gap cracking[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2007(12): 737-745.

Behavior Analysis of Orthotropic Steel Bridge Decks Strengthened by SPS

Cui Chunlei¹, Li Yunsheng¹, Wang Yuanqing²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Orthotropic steel bridge decks are widely used in modern steel bridges, but under the wheel loading, fatigue cracks are prone to happen at typical deck weld joints due to the much higher stress concentration. In this paper, the orthotropic steel bridge deck is strengthened by the sandwich plate system (SPS). Three-dimensional finite element model of orthotropic steel bridge deck and its' strengthening SPS layer is established by ANSYS software, and the stress characteristics due to the combined action of two wheel loads of the vehicle defined in China current code are analyzed under different load conditions, and are compared with those of before strengthened. The results show that the largest transverse stresses of bridge deck and U rib are generated when the distributed load riding through U ribs. The behaviors of orthotropic steel bridge deck are much better after strengthened by SPS compared with those before strengthened, with the stress of deck decreased obviously, and can better resist the fatigue cracks of orthotropic steel bridge decks.

Key words: steel bridge; orthotropic deck; the sandwich plate system; finite element model; load condition