

车辆荷载和疲劳荷载作用下钢桥面板有效工作宽度计算分析

赵 秋,郭杨斌,黄冠铭

(福州大学土木工程学院,福建 福州 350108)

摘 要 目的 研究车辆和疲劳荷载作用下钢桥面板有效工作宽度的计算方法. 方法 选取国内某大桥主跨建立节段钢箱梁有限元模型和单个 U 肋模型,对车辆荷载纵桥向和横桥向加载形式、计算截面位置及加载位置进行分析. 结果 当车辆相邻车轮横向间距为 1.3、1.8、2 m 时,其有效工作宽度未发生重叠,可采用横向单侧车轮加载计算钢桥面板的有效工作宽度.当车辆纵向轴距为 1.2 m 和 1.4 m 时,其前后轴的作用效应发生重叠,因此需考虑前后轴共同作用计算钢桥面板有效工作宽度.在靠近中腹板各 600 mm 左右,中腹板附近 U 肋下缘应力变化很大,在 55.4% 左右,超出这个范围 U 肋下缘应力变化很小,各 U 肋下缘应力值在 5.2% 左右变化.相对于顶板厚度为 16 mm 模型,不同顶板板厚的 U 肋下缘应力、顶板应力和桥面板变形的有效工作宽度系数变化分别在 20%、2%、14% 以内. 结论 提出的钢桥面板顶板有效工作宽度和 U 肋下缘应力有效工作宽度及变形有效分布宽度计算方法,为钢桥面板第二体系与疲劳的计算提供简便方法.

关键词 钢桥面板;有效工作宽度系数;车辆荷载;疲劳荷载;计算方法

中图分类号 TU318;U442

文献标志码 A

Calculation and Analysis of Effective Working Width of Steel Bridge Deck under Vehicle Load and Fatigue Load

ZHAO Qiu, GUO Yangbin, HUANG Guanming

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, China, 350108)

Abstract: In order to study the calculation method of effective working width of steel deck under vehicle and fatigue loads, the finite element model of steel box girder and single U-rib model are established for the main span of a domestic bridge, and the loading forms, calculated section positions and loading positions of longitudinal and transverse bridge directions under vehicle loads are analyzed. The results show that when the lateral spacing of adjacent wheels is 1.3, 1.8 and

收稿日期:2019-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51478120)

作者简介:赵秋(1976—),男,副教授,博士,主要从事桥梁工程方面研究.

2 m, the effective working width does not overlap. The effective working width of steel bridge deck can be calculated by lateral unilateral wheel loading. When the longitudinal spacing of vehicle is 1.2 m and 1.4 m, the effect of front and rear axles overlaps, so the front and rear axles should be considered together when the effective working width is calculated. Near the 600mm of the middle web, the stress on the lower edge of the U rib near the middle web changes greatly, and the variation range is about 55.4%. Beyond this range, the stress change at the lower edge of the U rib is small, and the stress value of the lower edge of each U rib is about 5.2%. Compared with the model of 16 mm roof thickness, the stress of different roof plates varies greatly. The effective working width coefficients of the thick U-rib lower edge stress, roof stress and bridge deck deformation are less than 20%, 2% and 14% respectively. The calculation methods of effective working width of steel bridge deck roof, effective working width of stress and effective distribution width of deformation at the lower edge of U-rib can provide a simple method for the second system and fatigue calculation of steel bridge deck.

Key words: steel deck panels; effective working width factor; vehicle load; fatigue load; calculation method

正交异性板钢桥面板因其质量轻、强度大、施工速度快等优点,在世界各国大跨度桥梁中获得了广泛的应用^[1-4]. 由于组成正交异性桥面板的各板件以比较复杂的方式连接在一起,在车辆荷载作用下,钢桥面板及主梁各组成构件相互影响,使得正交异性桥面板受力行为分析十分复杂. 为了能够清楚地描述正交异性钢桥面板的复杂结构行为,传统方法是根据车轮荷载的传力途径将整体结构系统分解为3个基本结构体系,对各体系进行逐层计算. 其中结构第二体系是由纵肋、横肋和盖板组成的桥面结构,盖板被看成纵肋、横肋上翼缘的一部分,结构第二体系把桥面上的荷载传递到主梁和刚度较大的横梁^[1]. 在局部分布荷载的作用下,对于结构第二体系不仅直接承压部分的板带参加工作,与其相邻的部分板带也会分担一部分荷载共同参与工作. 因此,在结构第二体系的计算中,就需要确定板的有效工作宽度,或者需要建立板壳模型直接计算其荷载效应. 正交异性板钢桥面板在使用过程中出现较多疲劳破坏的问题,严重地影响了结构的运营质量、耐久性和使用安全^[2-4]. 根据疲劳裂纹检测结果分析,在钢桥面板内易产生疲劳裂纹的位置主要有三类^[5-7]:纵肋与顶板焊缝部位、横向联

结系焊缝或母材部位以及纵肋对接焊缝. 进行疲劳寿命评定时,其中U肋对接焊缝处的名义应力计算也需要先得到荷载作用下板的有效工作宽度.

国内对钢箱梁有效分布宽度的研究多集中于波纹钢腹板组合桥梁和混凝土箱梁桥. 赵品等^[8]为了研究波形钢腹板箱梁的桥面板有效分布宽度,制作了一片模型试验梁,对其进行了静载非破坏性试验,研究了此种结构桥面板的有效分布宽度变化规律,结果表明:按现行公路桥规计算的有效分布宽度值相比试验值、有限元结果略小,应对桥规值乘以大于1.0的修正系数,使之适用于波形钢腹板箱梁的有效分布宽度计算. 王富平等^[9]人以南宁大桥引桥为例,分别采用中国公路桥梁规范、美国AASHTO规范和有限元分析方法对比研究了桥梁在自重和移动荷载作用下典型截面的翼缘有效宽度. 蔺鹏臻等^[10]为了研究考虑剪力滞效应后的箱梁弯曲变形计算问题,由箱梁弯曲的曲率方程出发,探讨了剪力滞效应对箱梁挠曲变形的影响机理,结果表明:剪力滞系数的修正方法精度较高;考虑到设计的方便性,建议在剪力滞系数未知的情况下采用有效翼缘分布宽度修正方法来考虑剪力滞效应对刚度的影响. 罗如登等^[11]

对比了现有的国内外钢桥规范中计算钢桥面板有效宽度的计算方法和公式,提出了计算正交异性整体钢桥面板有效宽度的原则.但研究成果对于正交异性钢桥面板第二体系和U肋对接焊缝的疲劳计算无法直接参考,因此,笔者提出车辆荷载和疲劳荷载作用下钢桥面板有效工作宽度(EWW)的简化计算方法,为正交异性钢桥面板第二体系和疲劳荷载效应计算提供参考.

1 有效工作宽度分析模型

1.1 钢箱梁有限元模型

正交异性板钢桥面板利用板壳有限元模型计算出的应力,因模型网格划分、模型约束设置及应力提取部位的不同而不同.因此,需要对有限元模型网格划分、加载方式、应力提供部分研究基础上,进行正交异性钢桥面板的有效工作宽度分析^[12].由于在车轮荷载作用下正交异性钢桥面板的荷载效应是局部的,因此为了降低有限元建模分析的复杂程度和提高效率,在保证受力情况和变形状态基本不变的条件下,可以采用局部钢箱梁节段模型进行分析^[13-15].

以港珠澳大桥为例,利用 Abaqus 软件,取出其中六道横隔板的节段长度建立钢箱梁节段有限元分析模型,模型的顶板和腹板厚均为 24 mm,U 型加劲肋厚 10 mm,U 肋间距 600 mm,横隔板厚 14 mm,横隔板间距为 4 m.为了降低模型的计算量,忽略风嘴等次要部分,横桥向采用了半幅箱梁结构,在道路中心线设置了横向对称约束.模型采取的约束方式为横隔板下端全部固结,关注位置的细节处采用精细的网格进行划分^[15].

从文献[17]分析可知,纵肋对接焊缝处的纵向应力在纵肋底部水平段和圆弧过渡区较大,且在外侧圆弧过渡区存在应力集中,因此分别提取模型中间横隔板间 1/8、1/4、1/2 跨度截面处 U 肋下缘水平段圆弧过渡区的应力,应力提取位置如图 1 所示.

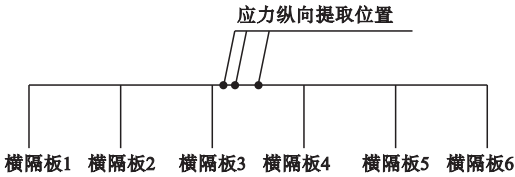


图 1 应力提取点位置

Fig. 1 Location of stress extraction point

1.2 车辆加载分析

1.2.1 车轮横向间距影响分析

《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中的疲劳荷载 III 的后轴或前轴的车轮间距为 2.0 m,而《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中的车辆荷载的两车轮间距为 1.8 m,车辆之间车轮间距最小值为 1.3 m,车轮横向共有 3 种间距.因此,在进行有效工作宽度分析前,需要解决不同车轮间距是否对有效工作宽度有影响,两相邻车轮的有效工作宽度是否发生重叠.因此,分析时选择单个车轮和 3 种横向间距的双车轮分析进行加载,加载方式和加载横向位置如图 2 所示.

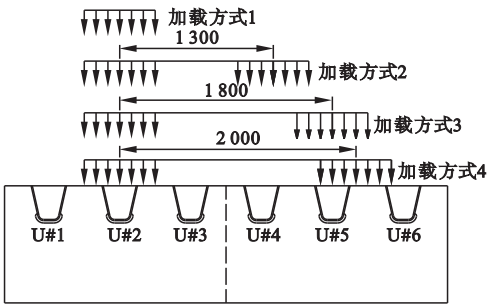


图 2 横向加载位置

Fig. 2 Horizontal loading position

以 U#2 处作为应力重点关注位置,分别按图 2 中各加载方式进行纵向移动加载,各加载方式作用下各截面应力历程如图 3 所示.由图 3 可知,各加载方式作用下各截面的应力历程曲线基本一致,当荷载纵向移动到各截面正上方时应力值最大.与单侧车轮相比,双车轮的轮载横向距离为 1.3、1.8、2 m 时,应力历程相对于单个车轮的最大变化分别为 0.97%、0.84%、0.62%,一侧轮载位于 U 肋正上方,另一侧的轮载对 U 肋对接细节

处的影响很小. 因此,为简化计算,可采用加载方式 1(单侧车轮)进行加载分析.

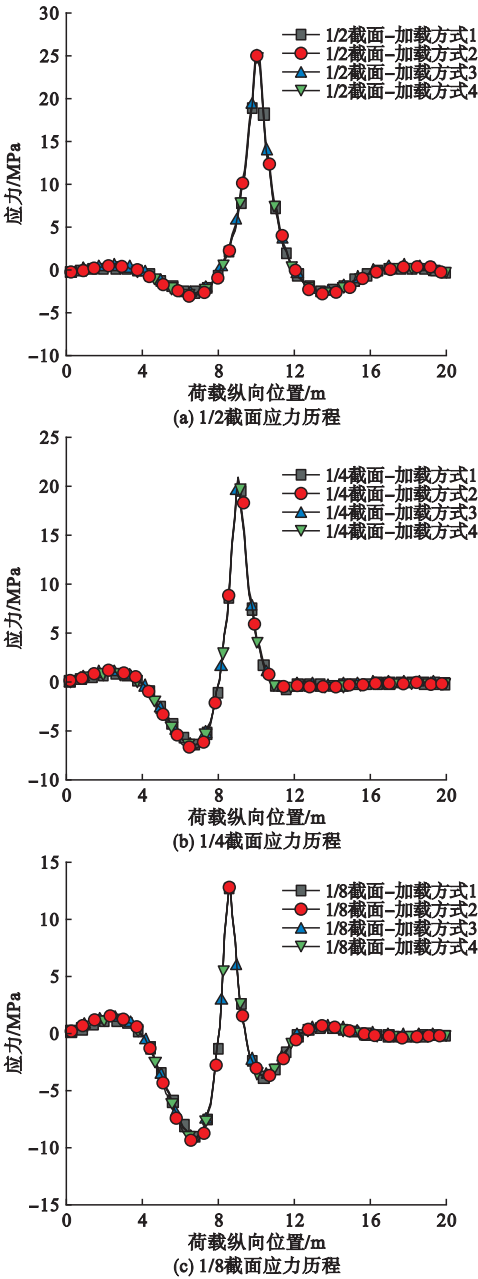


图 3 不同加载方式下各截面应力历程

Fig. 3 Stress history of different sections under different loading modes

1.2.2 车轮纵向轴距影响分析

在车轮横向影响分析的基础上,为考虑车轮轴距的影响,分别取单轴和《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中的疲劳荷载 III 的后轴组或前轴组和《公路桥涵

设计通用规范》(JTG D60—2015)中的车辆荷载双轴组对钢桥面板模型进行单侧车轮加载分析,加载车轮轴距如图 4 所示.

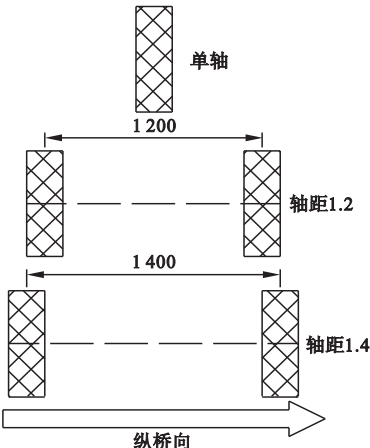
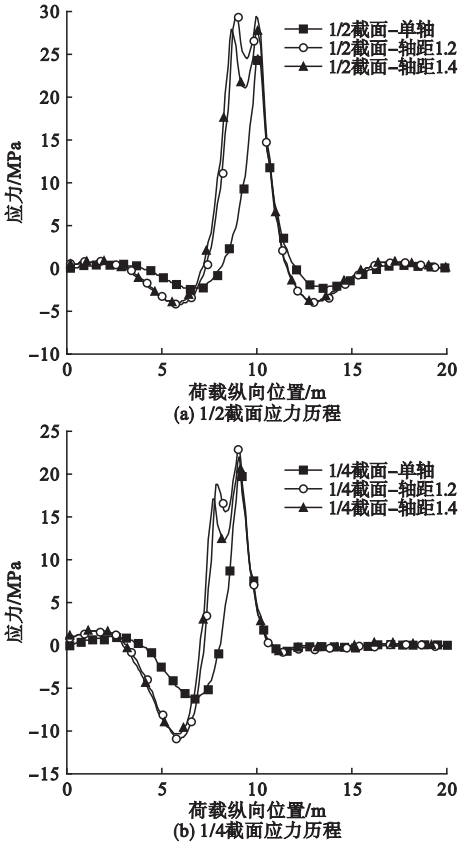


图 4 车轮轴距

Fig. 4 Wheel wheelbase

以 U#2 处作为应力重点关注位置,按照图 4 不同轴距的荷载,按图 2 中加载方式 1 所示位置分别进行纵向移动加载,不同轴距作用下各截面应力历程如图 5 所示.



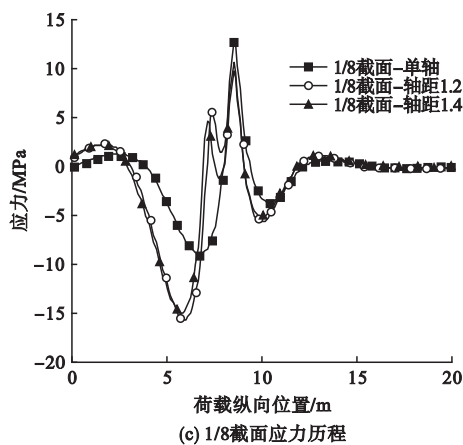


图5 不同轴距各截面应力历程

Fig. 5 Stress history of different axle base sections

由图5可知,在单侧车轮不同轴距加载的情况下,1/2和1/4截面时双轴加载比单轴加载应力值大,且轴距1.2 m时的应力比轴距1.4 m的大;1/8截面单轴加载时的应力比双轴加载时的大,轴距1.2 m时的应力比轴距1.4 m的大,说明在双轴轴距1.2 m和1.4 m时,两车轴是相互影响的.与图4对比可知,单轴加载情况下各截面只有一个波峰,双轴加载各截面均有两个波峰,两个波峰更符合实际受力,因此计算时采用单侧双轮轴距1.2 m的荷载进行计算,单个轮重60 kN.

1.3 不同横桥向位置影响分析

荷载横向移动下各对接细节最大应力值如图6所示.

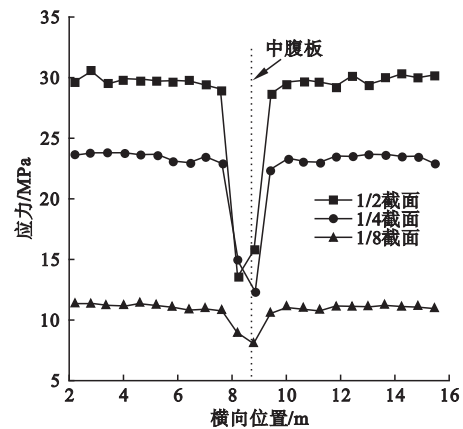


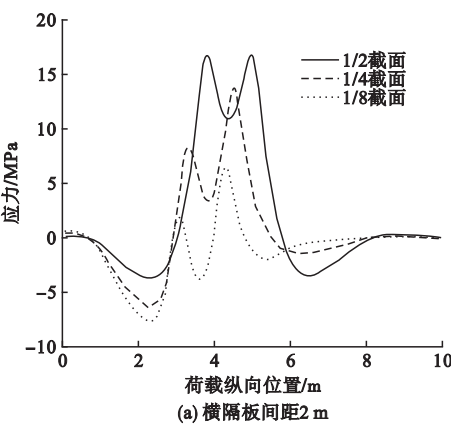
图6 荷载横向移动下各对接细节最大应力值
Fig. 6 Maximum stress values of docking details under lateral load movement

在荷载分析的基础上,选取横隔板间1/2跨截面、1/4跨截面和1/8跨截面U肋下缘

应力进行分析,采取双轴单侧轮载进行纵向加载(轴距为1.2 m),确定最不利纵向位置,再将最不利纵向荷载进行横向移动,提取节段模型中3个截面U肋下缘应力^[17](见图6).从图6可得,荷载在横桥向移动的情况下,在靠近中腹板各600 mm左右,中腹板附近U肋下缘应力变化很大,变化范围在55.4%左右,超出这个范围U肋下缘应力变化很小,各U肋下缘应力值在5.2%左右变化.因此,在后面的有效工作宽度分析中,选择非腹板影响范围更具代表性.

1.4 不同横隔板间距U肋应力分析

为了分析不同横隔板间距下的最不利应力及最不利应力所对应的荷载位置,采用单侧车轮加载,车轮轴距1.2 m,变化横隔板间距,建立横隔板间距为2 m、3 m、4 m、5 m、6 m节段钢箱梁模型分析,提取各截面U肋下缘应力历程(见图7).从图7可知,横隔板间距为2、3、4、5、6 m时,1/8截面最大应力分别为6.6、7.8、10.7、14.1、16.6 MPa,1/4截面最大应力为13.6、18.8、23.1、28.4、29.8 MPa,1/2截面最大应力为16.8、24.4、29.6、34.1、35.9 MPa,这说明越靠近横隔板的截面的U肋最大应力值越小,且随着横隔板间距的增大,各截面的U肋最大应力值也越大;各截面的最小应力对应的荷载位置均在横隔板2和横隔板3之间,在同一横隔板间距下的各截面最小应力对应的荷载位置都在同一个位置,2、3、4、5、6 m横隔板间距各截面最小应力对应的荷载位置分别在横隔板2和3之间1/5、11/30、17/40、12/25、1/2处.



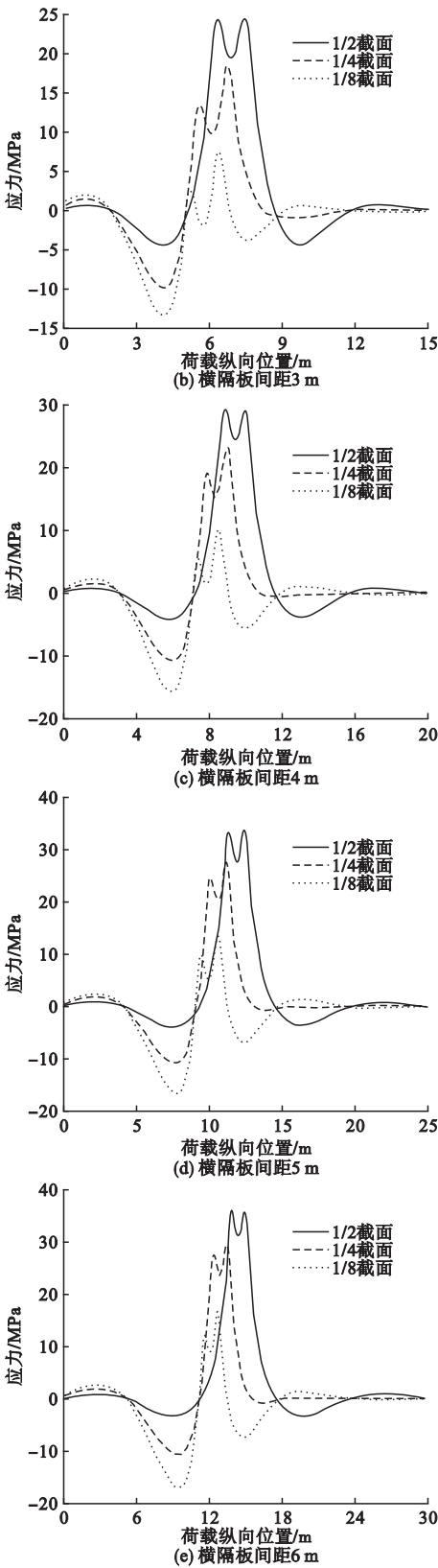


图 7 不同横隔板间距各截面应力历程曲线

Fig. 7 Stress history curves of different diaphragm spacing sections

2 基于初等梁理论的简化分析

在节段钢箱梁模型分析的基础上,取单个 U 肋单元用梁单元建立单个 U 肋有限元模型进行加载分析,单个 U 肋单元顶板宽度取相邻 U 肋间距的一半.

梁单元对单个 U 肋单元进行建模,横隔板作为弹性支承,在纵向形成连续梁(见图 8). 忽略横向车轮面的影响,根据纵桥向轮载范围采用均布线力加载.

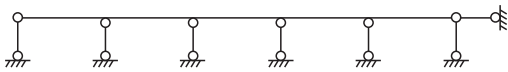
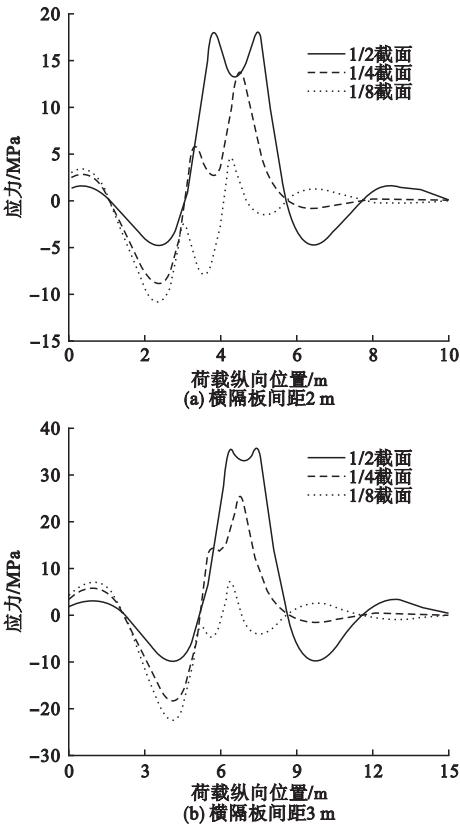


图 8 五跨连续梁简化模型

Fig. 8 Simplified model of five-span continuous beam

提取梁单元中各截面的最大应力位置和最小应力位置及对应的应力值,梁单元的最大应力和最小应力值如图 9 所示. 从图 9 可知,在轮载位于截面正上方时,梁单元模型各截面的应力值最大,2、3、4、5、6 m 横隔板间



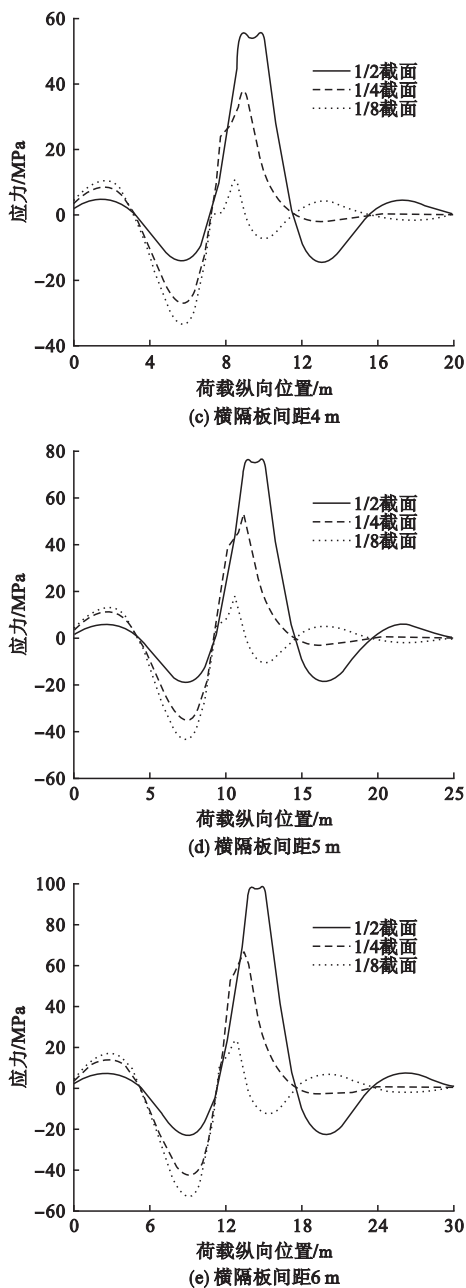


图9 梁单元模型各截面应力历程曲线

Fig.9 Stress history curves of each section of beam element model

距各截面最小应力对应的荷载位置分别在横隔板2和3之间1/5、11/30、17/40、12/25、1/2处.与图8对比可知梁单元计算的最不利应力的加载位置与节段钢箱梁模型的一致,但是应力值均比节段钢箱梁模型计算的应力值要大,这是因为车轮的横向影响范围比单个U肋截面要大.

3 有效工作宽度分析

3.1 顶板厚度对有效工作宽度的影响

分别定义梁单元模型与节段钢箱梁模型的应力最大值比值、最小值比值为最大、最小应力有效工作宽度系数;定义梁单元模型与节段钢箱梁模型的变形最大值比值为变形有效工作宽度系数,通过有效工作宽度系数来进行有效工作宽度的分析.以横隔板间距4 m为例,对顶板厚度为16、18、20、22、24 mm的钢桥面板的有效工作宽度进行分析.不同顶板厚度情况下模型U肋下缘应力有效工作宽度系数、顶板应力有效工作宽度系数和变形有效工作宽度系数变化如图10、11、12所示.

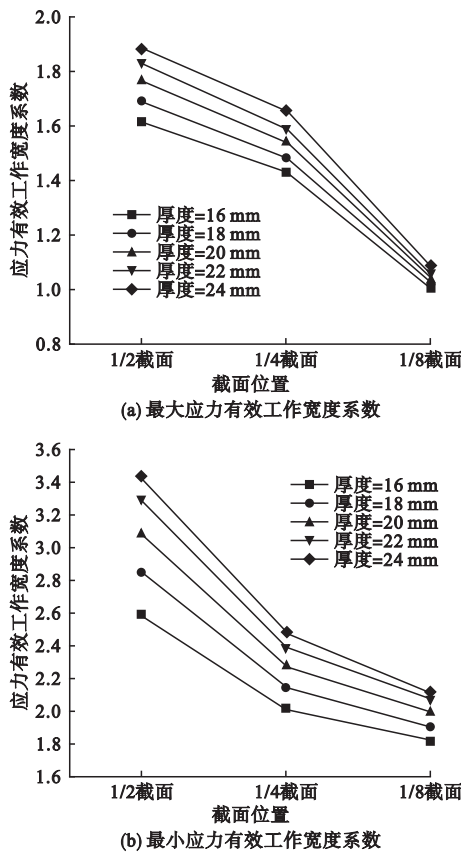


图10 U肋底部应力有效工作宽度系数

Fig.10 Effective working width coefficient of U-rib bottom stress

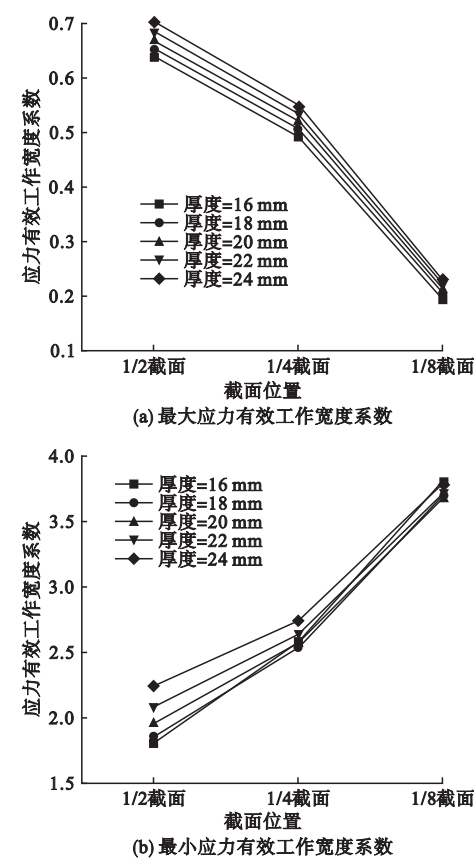


图 11 顶板应力有效工作宽度系数

Fig. 11 Effective working width coefficient of roof stress

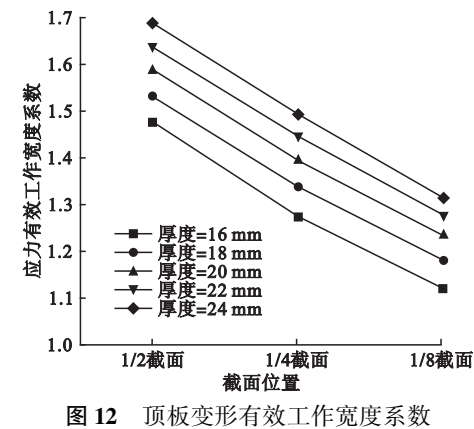


图 12 顶板变形有效工作宽度系数

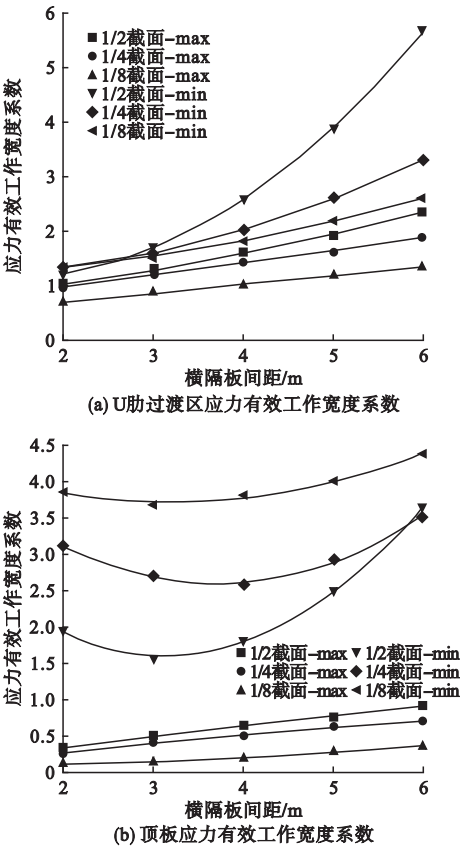
Fig. 12 Effective working width coefficient of roof deformation

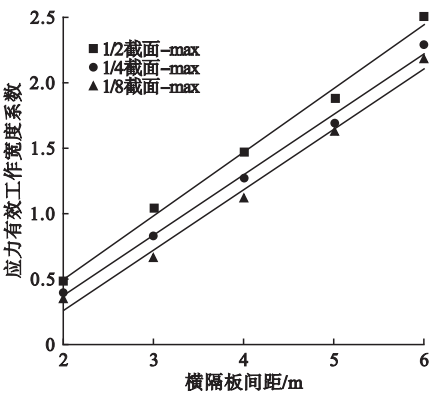
由图 10 可知,U 肋底部应力有效工作宽度系数随着顶板厚度的增加而变大,越靠近 1/2 截面增大的越多,各不同顶板厚度的有效工作宽度系数相对于顶板厚度为 16 mm 的模型变化在 20% 以内;顶板厚度越小,最大应力值也越大,荷载的有效工作宽度也随

之增大.由图 11、12 可知,随着顶板厚度的增加,顶板应力的有效工作宽度系数相对于顶板厚度为 16 mm 模型变化在 2% 以内,这说明顶板厚度的变化对顶板应力的有效工作宽度影响很小;顶板变形有效工作宽度系数随着顶板厚度的增加而增加,荷载作用下的变形有效工作宽度也随之增大,各不同顶板厚度的有效工作宽度系数相对于顶板厚度为 16 mm 模型变化在 14% 以内.

3.2 有效工作宽度计算

在对不同顶板厚度有效分布宽度分析的基础上可知,顶板厚度为 16 mm 时的 U 肋底部应力的有效工作宽度系数和顶板变形有效工作宽度系数是最小的,且其他厚度情况下的有效工作宽度系数变化相对于 16 mm 最大为 20%,因此采用顶板 16 mm 的有效分布宽度系数计算应力和变形有效工作宽度相对于 18、20、22、24 mm 是偏保守的.拟合曲线如图 13 所示.





(c) 顶板变形有效工作宽度系数

图 13 拟合曲线图

Fig. 13 Fitting curve

表 2 各截面有效工作宽度系数公式参数值

Table 2 Formula parameters of effective working width coefficient for each section

不同位置	1/2 截面			1/4 截面			1/8 截面		
	c_0	c_1	c_2	c_0	c_1	c_2	c_0	c_1	c_2
U 肋过渡区最大应力处	0.676	0.025	0.025	0.511	0.229	0	0.382	0.161	0
U 肋过渡区最大应力处	1.564	-0.596	0.213	1.235	-0.100	0.075	1.117	0.035	0.036
顶板最大应力处	0.075	0.141	0	0.079	0.106	0	0.103	-0.171	0.011
顶板最小应力处	4.087	-1.579	0.250	5.005	-1.300	0.176	4.573	-0.539	0.085
顶板最大变形处	-0.468	0.487	0	-0.551	0.463	0	-0.656	0.462	0

4 结 论

(1)当车辆相邻车轮横向间距为 1.3、1.8、2 m 时,其有效工作宽度未发生重叠,可采用横向单侧车轮加载计算钢桥面板的有效工作宽。

(2)当车辆纵向轴距为 1.2 m 和 1.4 m 时,其前后轴的作用效应发生重叠,因此需考虑前后轴共同作用计算钢桥面板有效工作宽度。

(3)在靠近中腹板各 600 mm 左右,中腹板附近 U 肋下缘应力变化很大,在 55.4% 左右,超出这个范围 U 肋下缘应力变化很小,各 U 肋下缘应力值在 5.2% 左右变化。

(4)相对于顶板厚度为 16 mm 模型,不同顶板板厚的 U 肋下缘应力、顶板应力和桥面板变形的有效工作宽度系数变化分别在 20%、2%、14% 以内。

取顶板厚度为 16 mm,在其他板件厚度不变的情况下变化横隔板间距,并对不同横隔板间距下的最大应力有效工作宽度系数、最小应力有效工作宽度系数和位移有效工作宽度系数采用最小二乘法进行拟合。

根据最小二乘法原理,拟合得到:

$$f(x) = c_0 + c_1x + c_2x_2.$$
 (2)

式中: $f(x)$ 为有效工作宽度系数; x 为横隔板间距; c_0 、 c_1 、 c_2 为参数。

利用 Origin 软件拟合得到的公式参数如表 2 所示,拟合度均在 97% 以上。

(5)通过对顶板为 16 mm 且不同横隔板间距下的 U 肋下缘应力有效工作宽度系数、顶板应力有效工作宽度系数和变形有效工作宽度系数进行分析,提出了 U 肋下缘应力有效工作宽度系数、顶板应力有效工作宽度系数计算公式,为钢桥面板第二体系和疲劳计算提供参考。

参考文献

[1] 赵秋. 钢桥: 钢结构与组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
(ZHAO Qiu. Steel bridge: steel structure and composite structure bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2017.)
[2] WOLCHUK R. Lessons from weld cracks in orthotropic decks on three european bridges [J]. Journal of structural engineering, 1992, 116(1): 75 - 78.
[3] ZHANG Qinghua, GUI Chang, BU Yizhi, et al. Fatigue tests and fatigue assessment approaches for rib-to-diaphragm in steel orthotropic decks[J]. Journal of constructional steel reasearch, 2015, 114: 110 - 118.

- [4] 王春生,付炳宁,张芹,等. 正交异性钢桥面板足尺疲劳试验[J]. 中国公路学报,2013,26(2):69-76.
(WANG Chunsheng,FU Bingning,ZHANG Qin, et al. Fatigue test on full-scale orthotropic steel bridge deck [J]. China journal of highway and transport,2013,26(2):69-76.)
- [5] 朱琦,吉伯海,姚悦,等. 基于影响面范围的钢桥面板构造细节应力分析[J]. 工业建筑,2018,48(10):15-21.
(ZHU Qi,JI Bohai,YAO Yue,et al. Analysis on structural stress of steel bridge deck based on influence scope[J]. Industrial construction,2018,48(10):15-21.)
- [6] YAO B,LI F,WANG X,et al. Evaluation of the shear characteristics of steel-asphalt interface by a direct shear test method[J]. International journal of adhesion & adhesives,2016,68:70-79.
- [7] BOCCI E,CANESTRARI F. Experimental evaluation of shear resistance of improved steel-asphalt interface [J]. Transportation research record journal of the transportation research board,2013(2370):145-150.
- [8] 赵品,荣学亮,叶见曙. 波形钢腹板组合箱梁横向受力有效分布宽度研究[J]. 湖南大学学报,2016,43(7):105-110.
(ZHAO Pin,RONG Xueliang, YE Jianshu. Research on the lateral effective width of composite box-girders with corrugated steel webs[J]. Journal of Hunan university,2016,43(7):105-110.)
- [9] 王富平,蔺鹏臻. 单箱多室宽箱梁的翼缘有效宽度取值研究[J]. 铁道建筑,2017,57(10):6-11.
(WANG Fuping,LIN Pengzhen. Research on effective flange width of wide box girder with single box multi room [J]. Railway engineering,2017,57(10):6-11.)
- [10] 蔺鹏臻,杨子江,冀伟,等. 考虑剪力滞效应影响的箱梁变形修正计算方法[J]. 中国公路学报,2013,26(1):93-97.
(LIN Pengzhen,YANG Zijiang,JI Wei,et al. Modified calculation method of deflection for box girders with consideration of shear lag effect [J]. China journal of highway and transport,2013,26(1):93-97.)
- [11] 罗如登,叶梅新. 高速铁路钢桁梁桥正交异性整体钢桥面板有效宽度的计算原则[J]. 钢结构,2009,5(24):38-41.
(LUO Rudeng,YE Meixin. Calculation principles of effective width of orthotropic monolithic steel deck of high-speed railway truss bridges [J]. Steel construction,2009,5(24):38-41.)
- [12] 赵秋,陈孔生. 钢桥面板 U 肋-顶板连接焊缝疲劳细节分析方法[J]. 沈阳建筑大学学报,2018,34(1):54-65.
(ZHAO Qiu,CHEN Kongsheng. Analysis method for fatigue details of U-rib to deck welded joint in steel bridge deck [J]. Journal of Shenyang jianzhu university,2018,34(1):54-65.)
- [13] 孟凡超,苏权科,卜一之,等. 正交异性钢桥面板的抗疲劳优化设计研究[J]. 公路,2014,59(10):1-5.
(MENG Fanchao, SU Quanke, BU Yizhi, et al. Optimized design of anti-fatigue for orthotropic steel bridge deck [J]. Highway,2014,59(10):1-5.)
- [14] 崔闯,卜一之,张清华,等. 基于热点应力法的正交异性钢桥面板疲劳寿命评估[J]. 桥梁建设,2014,44(4):62-67.
(CUI Chuang, BU Yizhi, ZHANG Qinghua, et al. Fatigue life assessment of orthotropic steel deck plate based on hot spot stress method [J]. Bridge construction,2014,44(4):62-67.)
- [15] 陈孔生. 钢桥面板系统的疲劳受力行为及 UHPC 铺装层影响研究[D]. 福州:福州大学,2018.
(CHEN Kongsheng. Study on the fatigue behavior of steel deck system and influence of UHPC pavement [D]. Fuzhou: Fuzhou University,2018.)
- [16] XIAO Zhigang,KENTARO Y,JIROU I,et al. Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck [J]. International journal of fatigue,2006,28(4):409-416.
- [17] 陈世鸣,马家欢,程栋柱. 正交异性钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳性能研究[J]. 桥梁建设,2018,48(1):48-53.
(CHEN Shiming, MA Jiahuan, CHENG Dongzhu. Study of fatigue performance of butt weld joints for longitudinal ribs of orthotropic steel bridge deck [J]. Bridge construction,2018,48(1):48-53.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)