

# 钢桥面板 U 肋 - 顶板连接焊缝疲劳 细节分析方法

赵 秋, 陈孔生

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要** 目的 对正交异性钢桥面板 U 肋 - 顶板连接焊缝的疲劳性能的分析方法进行系统研究, 探讨有限元模型中关注细节附近网格划分大小以及疲劳荷载的加载方式对关注细节应力提取结果的影响, 确定 U 肋 - 顶板连接焊缝细节的应力幅分析过程. 方法 应用有限元软件 ABAQUS 建立了局部的钢箱梁节段模型, 利用壳单元对 U 肋 - 顶板连接焊缝细节进行疲劳分析, 与实体单元的分析结果差别不大. 结果 横向加载分析时, 将疲劳荷载布置于 U 肋正上方、U 肋间和 U 肋腹板上方的加载方式既简化了加载步骤, 又能得到细节的实际最不利荷载位置; 纵向加载分析时, 加载区网格大小不大于 50 mm, 荷载步大小不大于 100 mm 时可以得到比较精确的结果; 车轮位置与纵肋 - 顶板连接焊缝横桥向距离大于 1 500 mm, 或纵桥向距离大于 1 500 mm 时, 对焊缝的影响可以忽略. 结论 对于 U 肋 - 顶板连接焊缝细节应力幅分析过程为: 确定各个细节应力最大值纵向加载点位置; 在该纵向位置进行横向加载确定细节的最不利横向位置及对应的最不利加载位置; 在最不利横向加载位置进行纵向加载得到最不利细节的纵向应力历程曲线, 通过应力历程曲线计算该细节的应力幅.

**关键词** 钢桥面板; U 肋 - 顶板连接焊缝; 疲劳分析方法; 网格; 疲劳加载; 有限元模拟  
中图分类号 TU318; U442 文献标志码 A

## Analysis Method for Fatigue Details of U Rib to Deck Welded Joint in Steel Bridge Deck

ZHAO Qiu, CHEN Kongsheng

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

**Abstract:** The analysis method for fatigue behavior of U rib to deck welded joints in orthotropic steel bridge deck is systematically studied. The influence of mesh size and loading mode on the stress extraction of attention detail in finite element model is discussed, the analysis process of stress range of U rib to deck welded joint detail is also determined. And the analysis results of shell element and solid element are compared. A segmental model of local steel box girder was set up u-

收稿日期: 2017-07-13

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, 主要从事桥梁工程方面研究.

using a finite element software called ABAQUS. In transversal loading analysis, not only the loading method that set the fatigue load above U rib, between U rib and above web of U rib simplify the loading procedure, but also the actual unfavorable load position of the details is obtained; In longitudinal loading analysis, accurate results can be obtained when the mesh size of deck is not greater than 50 mm and loading step size is not greater than 100 mm. When the distance between the wheel position and the longitudinal rib roof connection is greater than 1 500 mm, or the distance of the longitudinal bridge is greater than 1 500 mm, the influence on the weld seam can be neglected. Therefore, the amplitude analysis procedure is: First, the longitudinal loading position corresponding to the maximum stress is determined. Then, lateral loading is carried out at the longitudinal position to determine the most unfavorable lateral position of the details and the corresponding unfavorable loading position. Finally, the longitudinal stress history curve of the most unfavorable details is obtained by longitudinal loading at the most unfavorable lateral loading position, and the stress range of the detail is calculated by the stress history curve.

**Key words:** steel bridge deck; U rib to deck welded joint; fatigue analysis method; mesh; fatigue loading; finite element simulation

正交异性钢桥面板由于其自重轻,承载能力强,跨越能力大,施工速度快等优点,自德国建成第一座正交异性钢桥面板结构桥梁以来,它的优势逐渐显现出来,并在世界上大部分国家的大跨度桥梁中得到应用和发展<sup>[1-4]</sup>.但是随着正交异性钢桥面板桥梁使用时间增加,该结构的缺点也逐渐显现出来.其中最为突出的一个问题就是钢面板的疲劳开裂问题.而疲劳开裂的部位大多数位于焊缝位置,经过国内外大量研究发现钢桥面板共有4个相关部位上的6个疲劳细节出现裂纹的概率最大<sup>[5-8]</sup>.其中出现最多且危害较大的是钢桥面板顶板与纵肋连接焊缝处的疲劳裂纹.该处的疲劳裂纹一旦萌生,会逐渐沿着顶板厚度方向和钢桥面板的纵桥向发展.随后裂纹会逐渐穿透桥面的铺装层,造成桥面板腐蚀,并严重威胁行车安全<sup>[9-10]</sup>.XIAO Zhigang等<sup>[11]</sup>通过建立正交异性钢桥面板的有限元模型对纵肋-顶板焊缝的疲劳性能进行研究.研究表明增加车轮荷载的轮载面积以及顶板的厚度将减小该细节的应力幅大小并且明显的增加了焊缝的疲劳寿命.冯亚成等<sup>[12]</sup>以国内某大桥正交异性钢桥面板为例,对标准桥面板节段进行有限元分析,并采用欧洲规范进行疲劳寿命评估,研究表明桥面

板厚度宜设置在14~16 mm,并保证纵肋与桥面板焊缝厚度大于1.1倍的纵肋厚度,焊喉熔深不小于80%,这样可以有效地控制纵肋与桥面板处的疲劳裂纹.王秀伟等<sup>[13]</sup>对正交异性钢桥面板整体模型进行了有限元分析.顶板-纵肋连接处的纵向和横向应力影响线很短,当荷载位于目标细节正上方时,应力绝对值达到最大.增加顶板厚度可大大降低顶板的应力幅,铺装层的完整性对钢桥面板十分重要.JI B等<sup>[14]</sup>建立了正交异性钢桥面板局部有限元模型对横隔板处焊根-顶板裂缝进行分析当每一个轴载位于横隔板正上方时,该处细节产生一个压应力峰值点,且细节的应力影响线很短.但研究成果对于正交异性钢桥面板设计无法直接参考,而在疲劳分析时,往往不同的布载方式和不同的有限元模型网格划分将对各个疲劳细节的应力计算结果有所影响.因此,笔者对开展纵肋-顶板连接焊缝处疲劳细节的疲劳分析方法进行研究,为正交异性钢桥面板设计提供参考.

## 1 疲劳分析模型

### 1.1 纵肋-顶板连接相关疲劳细节

对于目前使用最为广泛的U形闭口纵肋的纵肋-顶板连接焊缝细节,国内外学者

通过大量的研究与总结,将该处的疲劳裂纹分为4种(见图1)。 $\textcircled{1}$ 产生于焊缝根部,沿顶板厚度方向发展的疲劳裂纹1; $\textcircled{2}$ 产生于焊缝焊趾,沿顶板厚度方向发展的疲劳裂纹2; $\textcircled{3}$ 产生于焊缝根部,沿焊缝焊喉方向发展的疲劳裂纹3; $\textcircled{4}$ 产生于焊缝焊趾,沿纵肋腹板厚度方向发展的疲劳裂纹4。由于焊缝的质量难以控制、焊缝类型的不同、焊缝根部和焊缝焊趾处的疲劳强度并不相同,在对纵肋 - 顶板连接细节进行疲劳分析时,两个部位的疲劳强度需要分别考虑<sup>[13-15]</sup>。参考文献[8]的研究表明,当焊缝的熔透率为75%的时候,纵肋 - 顶板连接焊缝细节的顶板应力远大于纵肋应力,充分说明扩展到面板厚度的疲劳裂纹决定了该接头的疲劳强度。

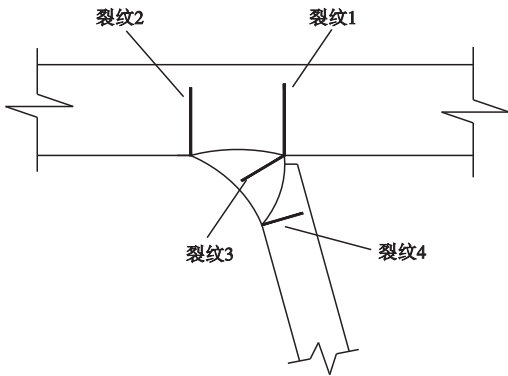


图1 纵肋 - 顶板连接处疲劳裂纹

Fig. 1 Fatigue cracks at rib to deck welded joint

目前国内外大部分规范均有对这些细节进行疲劳等级分类,纵肋 - 顶板焊缝处相关疲劳细节如图2所示。美国规范《AASHTO LRFD Bridge Design Specifications》(2012)(简称美国规范)规定:如果纵肋 - 顶板连接处焊缝有足够的熔透率(70%,并且纵肋与顶板之间的焊根间隙(0.5 mm,以保证焊缝根部不会出现疲劳裂纹,那么该焊缝的疲劳强度将由顶板焊趾处的裂缝或者纵肋腹板焊趾处的裂缝控制,并将该细节的疲劳等级定为C类(见图2(a))。欧洲规范《Eurocode 3, Design of Steel Structures, Part 2 - Steel bridges》(ENV 1993 - 2)(简称欧洲规范)和我国

的《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)(简称中国规范)根据连接处焊缝类别将纵肋 - 顶板连接处疲劳细节分为两类:一类为部分熔透焊缝(见图2(b));一类为角焊缝或除图2(b)以外的其他类型部分熔透焊缝(见图2(c))。图中a表示焊缝的焊脚尺寸。3本规范的200万次常幅疲劳极限对比如表1所示。从表1可以看出,中国规范基本是参考欧洲规范编制的,分类比较详细。不足的地方是没有对纵肋 - 顶板连接处焊缝的4类裂纹进行分别讨论并给定相应的疲劳等级。美国规范虽然考虑到了4类裂纹的疲劳强度的不同,但是并没有进行详细的疲劳等级分类。

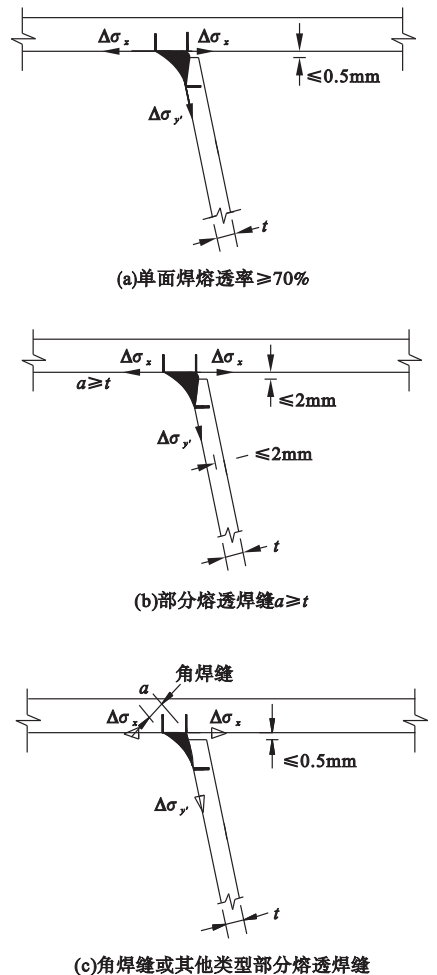


图2 纵肋 - 顶板焊缝处相关疲劳细节

Fig. 2 Fatigue details at rib to deck welded joint

表1 纵肋-顶板连接处疲劳细节比较表

Table 1 Comparison of fatigue detail at Rib to deck welded joint

规范	疲劳细节示意图	常幅疲劳极限 $\sigma_0/\text{MPa}$
美国规范	图2(a)	69
欧洲规范	图2(b)	71
中国规范	图2(b)	70
欧洲规范	图2(c)	50
中国规范	图2(c)	50

## 1.2 有限元计算模型

由于在轮载作用下,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,在保证受力情况和实际情况基本不变的条件下,可以采用局部的钢箱梁节段模型<sup>[16-18]</sup>。以某扁平钢箱梁桥为例,钢箱梁结构主要参数见表2。

表2 钢箱梁参数

Table 2 Parameters of steel box girder mm

梁宽	梁高	横隔间距	横隔板厚	桥面板厚	U肋厚	U肋间距
35 400	4 000	4 000	14	12	10	600

取出其中6道横隔板的节段长度,利用Abaqus软件,采用四节点薄壳(S4R)单元建立钢箱梁局部梁段的疲劳分析有限元模型(见图3)。



图3 钢箱梁节段模型

Fig. 3 Segment model of steel box girder

横向采用了半幅箱梁结构,在箱梁中心线设置了横向对称约束。根据圣维南原理和各细节的应力影响线长度,该模型着重考虑各个细节周围的局部情况而受节段模型约

束条件的影响并不是很显著。所以,节段模型采取的约束方式为在所选取的钢箱梁节段的两个端横隔板下端固结<sup>[19-20]</sup>。

## 2 网格划分大小分析

美国规范规定,在所关注细节附近,应该对网格进行细化并逐步过渡到较大的尺寸。在横隔板处,横梁腹板靠近纵肋的网格单元的尺寸应与横梁腹板厚度相同,远离纵肋区域的网格可逐渐增大以限制模型的总体自由度;纵肋腹板靠近横梁的网格单元的尺寸应与纵肋腹板厚度相同。但并没有对不同桥面板疲劳细节的网格划分给出详细推荐。笔者讨论横隔板与U肋连接处及顶板网格大小对纵肋-顶板焊接细节应力变化的影响,以便桥面板疲劳分析时正确选取网格大小。

### 2.1 横隔板网格大小分析

首先分析横隔板网格大小变化对纵肋-顶板焊接细节的影响,为了使计算结果偏于保守,取顶板网格大小为顶板板厚度 $t$ 的0.5 $t$ ;横隔板与U肋连接处附近的U肋网格大小为U肋厚度 $t_1$ 的0.5 $t_1$ ;横隔板网格大小分别为横隔板板厚 $t_2$ 值的0.5 $t_2$ 、 $t_2$ 、 $2t_2$ 、 $4t_2$ 和 $8t_2$ ,对计算结果进行比较,以 $t_2$ 、 $4t_2$ 网格大小为例,横隔板与U肋连接处细部网格划分如图4所示。

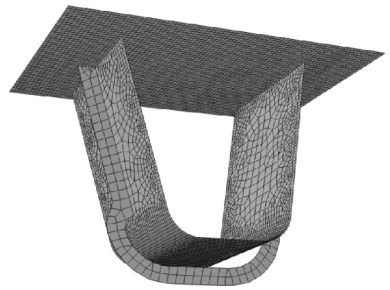


图4 网格划分

Fig. 4 Mesh partition

使双轴轮载中有一个轮载置于U肋与横隔板相交处正上方进行加载,分析横隔板断面处U肋与顶板焊接细节(RDF)U肋腹板外侧6mm处顶板横桥向正应力 $\sigma_x$ 及距



顶板 5 mm 处 U 肋竖向应力  $\sigma_y$  与网格大小的关系,应力提取点位置及计算结果如图 5、图 6 所示。

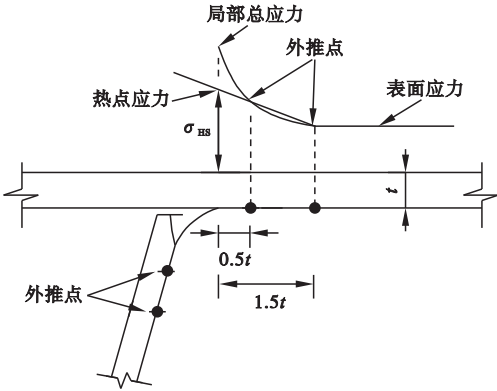


图 5 U 肋 - 顶板连接处细节应力外推点位置  
Fig. 5 stress extrapolation point of U rib to deck welded joint

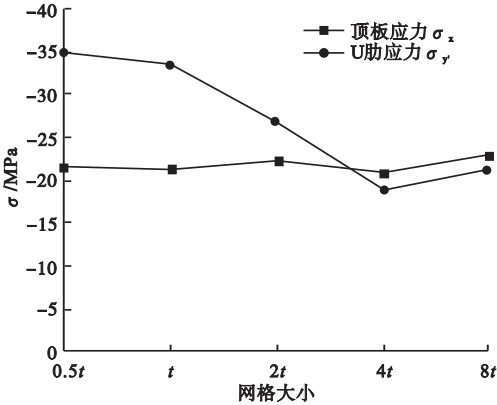


图 6 不同横隔板网格大小的应力对比

Fig. 6 Stress contrast under different mesh size

在有限元计算当中,网格越小,所计算出来的应力精度越高,所以以  $0.5 t_2$  为标准进行分析.由图 6 可知,横隔板网格划分大小由  $0.5 t_2$  变化为  $8 t_2$ ,该细节顶板应力  $\sigma_x$  大小相对于  $0.5 t_2$  时变化分别为 0.0%、2.5%、2.8%、6.7%;该细节 U 肋应力  $\sigma_y$  大小相对于  $0.5 t_2$  时变化分别为 4.06%、23.48%、46.31%、39.34%.横隔板网格大小的变化对 RDF 细节顶板  $\sigma_x$  应力影响较小;而对于 RDF 细节 U 肋腹板处,当网格大小大于  $t_2$  时,  $\sigma_y$  应力变化较大.若网格大小选择规定为应力变化控制在 5% 以内,由此综合以上

结果确定在确保一定的精确度情况下,横隔板与 U 肋连接处附近的横隔板网格大小可取到横隔板板厚  $t_2$ .

### 2.2 U 肋网格大小分析

进一步分析 U 肋网格大小选择,其加载方式为双轴轮载中有一个轮载置于 U 肋与横隔板相交处正上方.取顶板网格大小为其厚度值一半  $0.5 t$ ,横隔板与 U 肋连接处附近的横隔板网格大小为其厚度值一半  $0.5 t_2$ ,U 肋网格大小分别为  $0.5 t_1$ 、 $t_1$ 、 $2 t_1$ 、 $4 t_1$  和  $8 t_1$  进行应力分析,计算结果如图 7 所示。

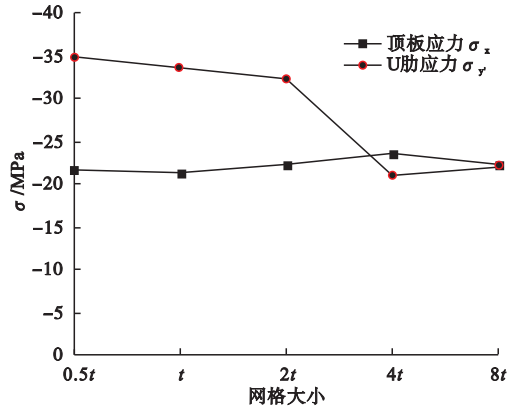


图 7 不同 U 肋网格大小的应力对比

Fig. 7 Stress contrast under different mesh size

从图 7 可知,U 肋网格大小由  $0.5 t_1$  变化为  $8 t_1$ ,RDF 细节顶板应力  $\sigma_x$  大小相对于  $0.5 t_1$  时变化分别为 0.9%、3.2%、8.9%、2.9%;RDF 细节 U 肋应力  $\sigma_y$  大小相对于  $0.5 t_1$  时变化分别为 3.9%、7.7%、39.8%、37.2%;U 肋网格大小的变化对 RDF 细节顶板  $\sigma_x$  应力影响较小;而对于 RDF 细节 U 肋腹板处,网格大于  $t_1$  时,  $\sigma_y$  应力变化较大,综合以上结果可以确定在确保一定的精确度情况下,横隔板与 U 肋连接处附近的 U 肋网格大小可取到  $t_1$ .

### 2.3 顶板网格大小分析

进一步分析顶板网格大小选择,其加载方式为双轴轮载中有一个轮载置于 U 肋与横隔板相交处正上方.取横隔板与 U 肋连接处附近横隔板网格大小为  $0.5 t_2$ ,U 肋网格大小为  $0.5 t_1$ ,顶板局部区域网格大小分别

取  $0.5t$ 、 $t$ 、 $2t$ 、 $4t$ 、 $8t$  进行应力分析, 计算结果如图 8 所示。

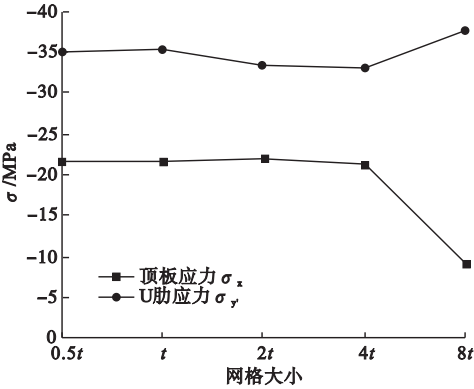


图 8 不同顶板网格大小下提取的应力对比

Fig. 8 Stress contrast under different mesh size

从图 8 可知, 顶板网格大小由  $t$  变化为  $8t$ , RDF 细节顶板应力  $\sigma_x$  大小相对于  $0.5t$  时变化分别为 0.5%、2.4%、1.4%、56.7%; RDF 细节 U 肋应力  $\sigma_y$  大小相对于  $0.5t$  时变化分别为 0.9%、4.4%、5.3%、7.9%。顶板网格大小的变化对 U 肋细节的影响较小, 而对于 RDF 细节 U 肋腹板处, 当网格大小大于  $4t$  时,  $\sigma_y$  应力变化较大。综合以上结果可以确定在确保一定的精确度情况下, 顶板网格大小可取到  $4t$ 。

## 3 疲劳荷载分析

### 3.1 疲劳荷载

为研究纵肋-顶板焊接细节的疲劳性能, 利用中国规范中的疲劳荷载模型 III 对钢桥面板模型进行加载。疲劳荷载模型 III 如图 9 所示。

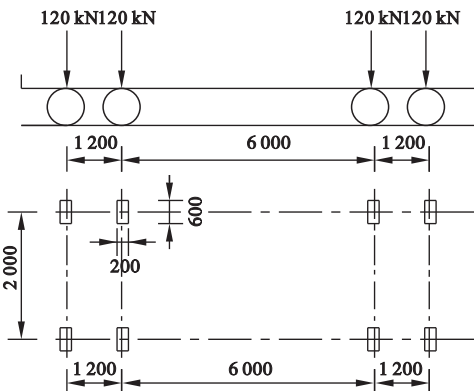


图 9 疲劳荷载模型

Fig. 9 Model of fatigue load

车轮荷载对正交异性钢桥面板的作用范围是局部的, 而加载车辆的前后轴距较大为  $6.0\text{ m}$ , 所以加载时, 只需要取后轴组或前轴组车轮进行加载即可<sup>[12]</sup>。当某一个细节处于不同的横桥向位置时, 由于该细节离纵隔板或腹板的位置不同, 即使受到相同的车轮荷载作用, 也会出现不同的应力状况。因此, 同一个细节类型在不同位置需要进行分析, 以得到最不利细节的位置。

### 3.2 疲劳荷载加载方式

虽然可以通过影响面分析得到疲劳细节的最不利加载方式, 但由于影响面分析比较费时, 一般会应用简化加载方法来分析。相关规范并没有给出疲劳荷载的简化加载方式, 因此在进行有限元分析时, 采用不同的加载方式。通过对这些加载方式进行分类, 认为疲劳荷载加载方法主要区别是横向加载方法的不同, 而纵向加载均为在最不利横向位置进行加载以得到细节的纵向应力历程曲线。

按照不同的横向加载方式, 分为 3 种加载方式: 方式 1 为按照相对于 U 肋的位置进行横桥向加载方式, 即车轮荷载中心在各 U 肋正上方、U 肋间和 U 肋腹板正上方<sup>[11-21]</sup>; 方式 2 为将疲劳车辆荷载相对于车道中心线左右各  $0.25\text{ m}$  范围内移动加载方式<sup>[20-22]</sup>; 该种横向加载方式考虑了车辆行驶轨迹在车道横向位置的分布概率, 虽然更接近于实际车辆行驶情况, 但是由于加载范围有限, 可能得不到实际最不利细节横向位置及对应加载位置。相对精确的加载方法是, 以疲劳车辆在车道宽度的最左侧为起点, 以一定步长为一个荷载步, 逐步向另一侧移动, 以车道宽度的最右侧为终点, 以获得横向最不利位置。这里将此种加载方式定义为加载方式 3。为了验证最不利细节的纵向应力历程是否合理, 对各细节进行影响面分析, 并且从最不利细节的影响面中提取应力峰值点处所对应的纵向应力历程曲线进行对比, 定义为加载方式 4。具体为: 横向加载每  $50\text{ mm}$  为一个荷载步,

纵向为 100 mm 一个荷载步,建立影响面坐标系. 纵坐标为车轮荷载沿着顺桥向移动位置,横坐标为车轮荷载沿着横桥向移动位置,竖坐标为最不利细节应力值.

### 3.3 加载位置与加载方式分析

各细节的应力幅通过最大应力和最小应力计算,在疲劳荷载纵向移动时需要能够涵盖最大应力和最小应力是关键性问题. 在参考文献[21]中将单轴荷载放置在横隔板间跨中和横隔板上简化可以得到细节最大应力和最小应力. 这种简化对于各个细节是否均有效,下面以纵肋 - 顶板连接焊缝 U 肋外侧顶板焊趾细节为例进行对比分析. 取车道横向车辆经过概率最大的位置即车辆中心线与车道中心线重合位置进行单轴纵向加载,获得细节应力最大值和最小值的加载点位置,然后与简化加载位置进行比较.

处于同一横向位置但纵向位置不同的纵肋 - 顶板连接焊缝细节在相同荷载作用下产生的应力响应并不相同,因此需要对该细节的不同纵向位置进行分析. 在中跨沿着纵向分别选取 0、1/8、1/4、3/8、1/2 跨径处截面进行分析,应力提取点纵向位置如图 10 所示.

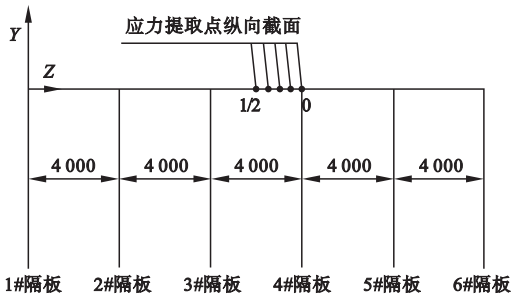


图 10 应力提取点纵向位置示意图

Fig. 10 Sketch for longitudinal position of stress extraction point

采用 0.5 t、1.5 t 的外推方法<sup>[23]</sup>进行纵肋 - 顶板连接焊缝细节 U 肋外侧顶板焊趾处热点应力的计算(见图 5),以位于轮载正下方的 3#细节为例. 细节编号及车辆荷载的横桥向位置如图 11 所示.

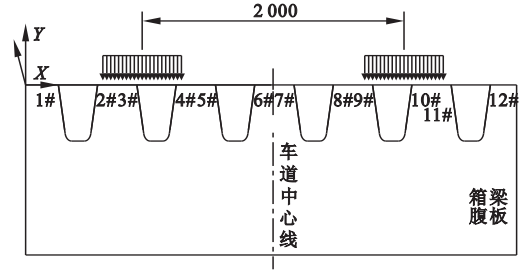


图 11 横桥向车辆荷载位置及细节编号图

Fig. 11 Position of the vehicle load and the detail code

细节随荷载纵向移动应力变化历程如图 12 所示. 单轴纵向移动荷载作用下,获得不同截面处 3#U 肋外侧顶板纵向应力历程如图 12(a) 所示. 图中拉应力为正,压应力为负. 由图 12(a) 可知,在单轴纵向移动荷载作用下,纵向各断面 3#细节主要处于受压状态,所有细节的应力历程曲线均出现一个压应力峰值点,对应的荷载恰好都位于所求细节的正上方. 也就是该细节的几个代表性顺桥向位置的最大应力对应的荷载纵向位置分别位于横隔板处,横隔板间 1/8、1/4、3/8 和 1/2 跨处,由此可以判断,荷载放置在横隔板间跨中和横隔板上简化方式并不准确.

由于钢桥面板各细节的应力值对车轮局部作用比较敏感,采用单轴或双轴加载对所计算的疲劳应力影响必然有所差异. 为了使得应力最值点更符合实际,接下来在车道横向车辆经过概率最大的位置即车辆中心线与车道中心线重合位置进行双轴纵向加载,获得各个细节应力最大值和最小值的加载点位置,结果如图 12(b) 所示. 荷载纵向位置由车辆荷载后轴组中心线确定. 由图 12(b) 可知,在双轴纵向移动荷载作用下,细节主要处于受压状态,应力历程曲线经历了两个压应力峰值点,第一个峰值点对应的轮载位置为前轴轮载在细节正上方时,第二个峰值点对应的轮载位置为后轴轮载位于细节正上方时,两个荷载位置之间的距离为 1 200 mm,相当于前后轴之间的距离. 此结果进一步说明简化加载方式的不准确性.

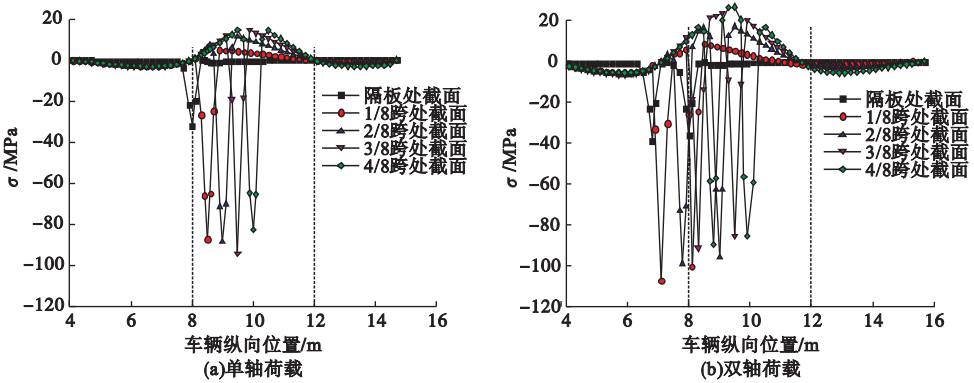


图 12 细节随荷载纵向移动应力变化历程

Fig. 12 Variation of the stress along with the longitudinal moving load

对比图 12(a), 12(b) 可知, 由于多了一组轴载, 双轴作用下的细节应力历程曲线峰值点个数要比单轴多出一个, 并且其应力幅要大于单轴作用下的应力幅, 但是增加的幅度不是很大, 这说明双轴组对于顶板细节的叠加效应并不是很大. 单轴作用下纵向最不利细节在 3/8 跨处, 而双轴作用下纵向最不利细节在 1/8 跨处. 因此在进行最不利位置分析时, 应以更为接近实际情况的双轴荷载为准, 其纵向最不利位置为 1/8 跨截面处细节. 因此下文以该细节为例进行分析.

以车轮主轮迹线下焊趾顶板细节 3#、4# 点为例, 在应力最高点断面用三种加载方式进行横向加载分析. 细节在不同加载方式下的应力变化如图 13 所示.

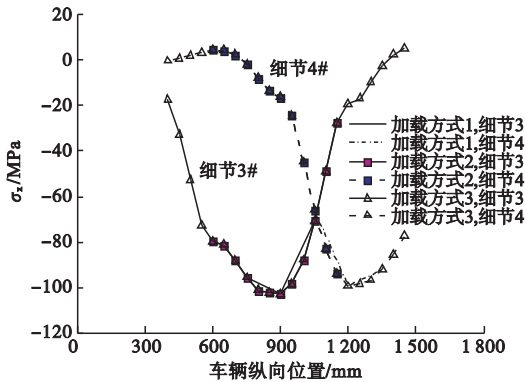


图 13 不同加载方式下应力最高点断面细节 3# 和 4# 的应力变化

Fig. 13 Stress variation of the highest stress point detail under different loading modes

由图 13 可以看出, 在加载方式 1 和加载

方式 3 下, 3# 和 4# 细节都得到了最大压应力值, 且其对应的最不利荷载均位于所求细节正上方. 加载方式 2 由于加载范围有限, 导致不能准确获取细节 4# 的实际最大压应力值, 其获得的最大压应力与实际最大压应力大小相差为 5.7%. 由比较可知, 加载方式 1 即简化了加载步骤, 又能得到细节的实际最不利荷载位置. 该方式用于最不利细节及最不利荷载位置的确定较为合理.

### 3.4 最不利细节的纵向应力历程分析

加载方式 1 在确定纵肋 - 顶板焊接细节最不利位置时结果较为准确, 且过程较为简单, 因此笔者采取加载方式 1 来确定横向最不利细节位置, 然后进行纵向加载得到该细节的应力历程, 并与加载方式 4 下该细节的应力历程曲线进行对比. 针对 1# ~ 11# U 肋细节进行分析, U 肋细节 3# 是这些细节的最不利细节, 其影响面应力如图 14 所示.

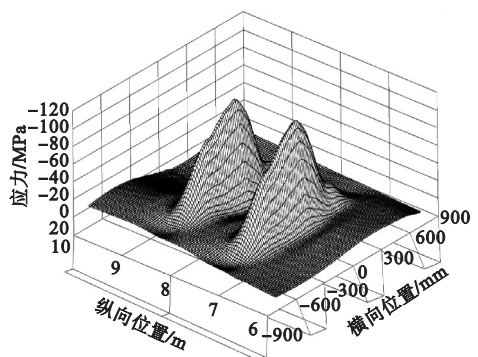


图 14 最不利细节影响面图

Fig. 14 Influence surface of the most unfavorable detail



从图14中的影响面可知,纵肋-顶板焊接细节U肋外侧顶板应力的影响面横桥向大小为1500 mm,顺桥向大小为1500 mm.超出这个范围的车辆荷载对U肋对接焊缝的影响可忽略不计.若车轮在纵向移动时,以直线行进,则使应力幅达到最大的情况为车轮中心横向位置为0时,应力幅大小为123.3 MPa.考虑到若车辆在纵向以直线行进,则不能使细节的应力历程曲线同时取到细节的实际最大应力值和最小应力值.通过影响面分析可知,当车轮荷载纵向位置为7300 mm,横向位置为0时,细节取得最大压应力值,应力值大小为-115.2 MPa;当车轮荷载纵向位置为8900 mm,横向位置为150时,细节取得最大拉应力值,应力值大小为12.3 MPa;由此可得,若车辆在纵向以非直线行进,则可得到细节的实际最不利应力幅,应力幅大小为127.5 MPa.

在加载方式4下,车辆在纵向以直线和非直线行进得到的最不利细节应力历程曲线与加载方式1下得到的最不利细节应力历程曲线如图15所示.

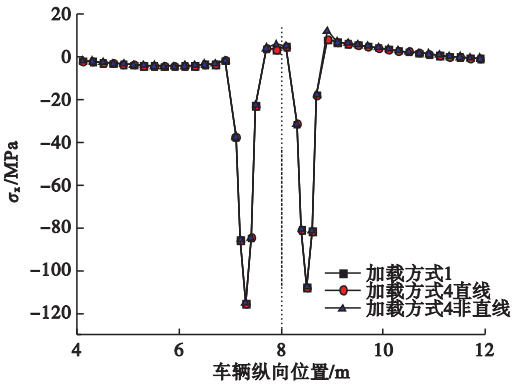


图15 最不利细节纵向应力历程

Fig. 15 Longitudinal stress history of the most unfavorable details

由图15可得,3条应力历程曲线得到的应力幅大小分别为123.3 MPa,123.3 MPa,127.4 MPa.说明加载方式1在确定纵肋-顶板焊接细节最不利位置时结果较为准确.

### 3.5 加载区域网格大小与加载步长影响

#### 3.5.1 加载区域网格大小影响

为了分析加载区域内顶板网格大小对纵肋-顶板连接焊缝细节应力结果的影响,以最不利纵向位置1/8跨截面3#细节U肋外侧顶板焊趾处热点应力为例.将轮载置于最不利加载位置即U肋腹板正上方,进行纵向加载.计算该细节的纵向应力历程来分析面板网格大小变化对该细节应力结果的影响.网格大小分别取为12.5 mm,25 mm,50 mm和100 mm.应力结果如图16所示.

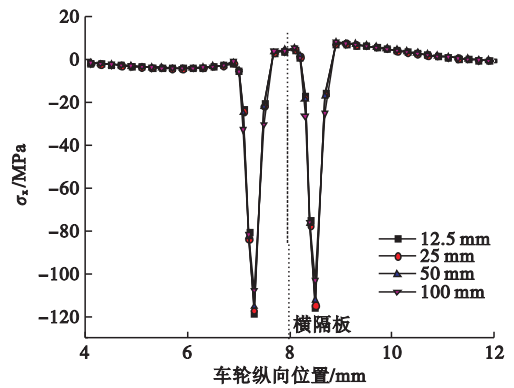


图16 不同顶板网格大小时细节应力历程

Fig. 16 Stress history of details under different mesh size of deck

从图16可知,当加载步长不变时,网格大小为100 mm以及100 mm以内时,其变化对应力历程并无明显影响.各曲线应力峰值相对于网格大小为12.5 mm时的变化分别为1.3%,2.7%,9.2%.所以可以确定顶板网格大小取到50 mm也可得到满意的结果.

#### 3.5.2 加载步长影响

取顶板网格大小为50 mm,纵向加载步长分别为50 mm,100 mm和150 mm.其不同加载步长时细节应力历程如图17所示.从图17可以看出,纵向加载步长为50和100时,细节应力历程曲线几乎完全重合,并且都取到了细节的实际应力峰值点.荷载步为150时,应力历程曲线未取到实际应力峰值点.各应力峰值相对于加载步长为50 mm时变化分别为0%和6.9%.由此可判断纵向加

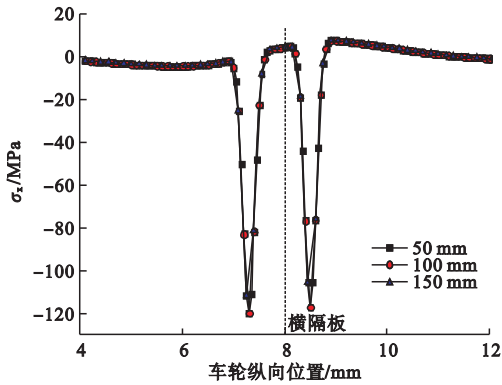


图 17 不同加载步长时细节应力历程

Fig. 17 Stress history of details under different loading step

载步长对应力大小并无影响,而对所提取的应力点的个数有所影响.当加载步长较小时,实际应力峰值点附近所取的应力点个数就会相对较多,所取得的结果可能就更靠近实际的应力峰值点.对于该细节,荷载步大小取到 100 mm 也可得到满意的结果.

### 3.5.3 加载区域网格大小,纵向加载步长同时变化

取网格大小和加载步长相同并且分别为 50 mm, 100 mm 和 200 mm. 最不利细节的应力历程图如图 18 所示.从图 18 可以看出,在 200 mm 以内顶板网格大小和加载步长同时变化时,对该细节的应力结果的影响较前两种情况大得多.尤其在应力峰值点附近出现较大的波动,当顶板网格和加载步长同时取 200 mm 时,细节甚至不能取到实际的应力峰值点.各应力峰值相对于 50 mm 时变化分别为 10.2% 和 76.4%.可以确定在网格大小和纵向加载步长相同的情况下,大小取到 50 mm,也可得到满意的结果.

综合对加载区域的网格大小及纵向加载步长的分析可得,对纵肋-顶板连接焊缝细节进行分析时,加载区域网格大小取为 50 mm,纵向加载步长取为 100 mm 时,也可得到满意的结果.

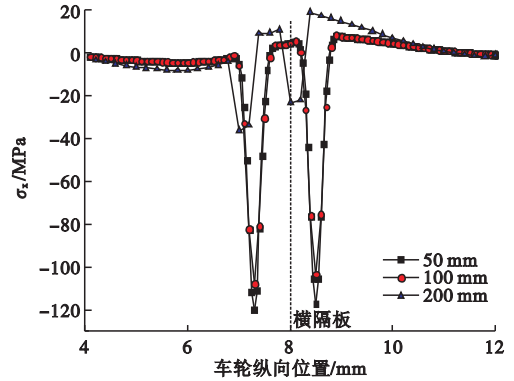


图 18 加载步长与网格大小同时变化时细节应力历程

Fig. 18 Stress history of details under change of loading step and mesh size at the same time

## 4 不同开裂部位对比

通过对纵肋-顶板连接焊缝细节 U 肋外侧顶板焊趾处热点应力的计算分析可知,加载方式 1 在对于确定该细节的最不利位置具有一定的准确性.利用相同的加载方式和分析方法对纵肋-顶板连接焊缝细节 U 肋内侧顶板焊跟处热点应力及 U 肋处热点应力进行最不利细节位置分析,对于 U 肋内侧顶板焊跟处热点应力,最不利细节为 3/8 跨截面处 12#细节;对于 U 肋处热点应力,最不利细节为 1/8 截面处 2#细节.各最不利细节应力历程曲线对比如图 19 所示.

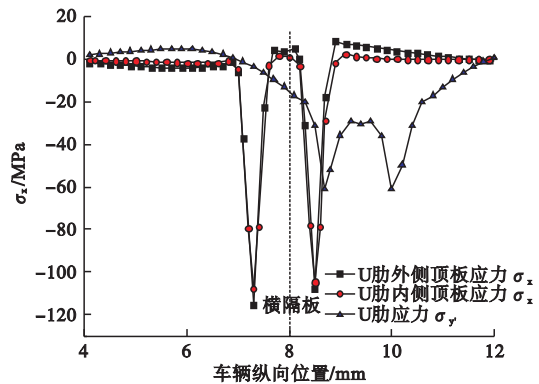


图 19 纵肋-顶板焊接细节应力历程曲线

Fig. 19 Stress history curves of longitudinal rib to deck welded details

对图 19 进行应力幅计算得到 U 肋外侧顶板应力历程曲线最大应力幅大小为 123.3 MPa, U 肋内侧顶板应力历程曲线最大应力幅大小为 109.8 MPa, U 肋应力历程曲线最大应力幅大小为 65.6 MPa. 在最不利纵向移动荷载作用下, 纵肋 - 顶板连接处 U 肋内外两侧顶板热点应力历程曲线的应力幅相差不大, 但是远大于纵肋 - 顶板连接处 U 肋应力历程曲线的应力幅, 分别为其大小的 188.1% 和 167.5%.

美国规范规定: 如果纵肋 - 顶板连接处焊缝满足一定要求, 保证焊缝根部不会出现疲劳裂纹, 那么该焊缝的疲劳强度将由顶板焊趾处的裂缝或者纵肋腹板焊趾处的裂缝控制. 因此, 确定对于纵肋 - 顶板连接焊缝细节, 应该关注的纵肋 - 顶板连接焊缝处最易疲劳开裂的位置位于 U 肋外侧顶板焊趾处.

## 5 实体结构对比

通过对纵肋 - 顶板连接焊缝细节顶板处热点应力的计算分析可知, 其最不利细节纵向位置位于横隔板间 1/8 跨处. 建立正交异性钢桥面板的实体与板壳单元混合单元模型. 取纵向为横隔板间 1/10 跨到 2/5 跨, 横向为 3# 细节所在 U 肋连同左右两个 U 肋共三个 U 肋范围内的连接部位设为重点关注区域 (见图 20). 采用实体单元 C3D8R 并精确模拟板件及焊缝的几何尺寸, 其他区域则采用板壳单元 S4R, 同时忽略焊缝几何影响. 实体单元模型与板壳单元模型混合形成整体结构模型并共同承受车轮荷载.

将车辆荷载分别置于纵肋 - 顶板连接焊缝细节顶板处热点应力历程曲线压应力峰值点和拉应力峰值点对应的荷载位置 (横隔板间 1/4 跨和横隔板间 1/2 跨) 进行加载, 以压应力峰值点为例. 提取横隔板间 1/4 跨处 3# 纵肋 - 顶板连接焊缝细节各位置的热点应力并与壳单元模型下获得的热点应力进行对比. 结果汇总如表 3 所示. 由表 3 可以看出,

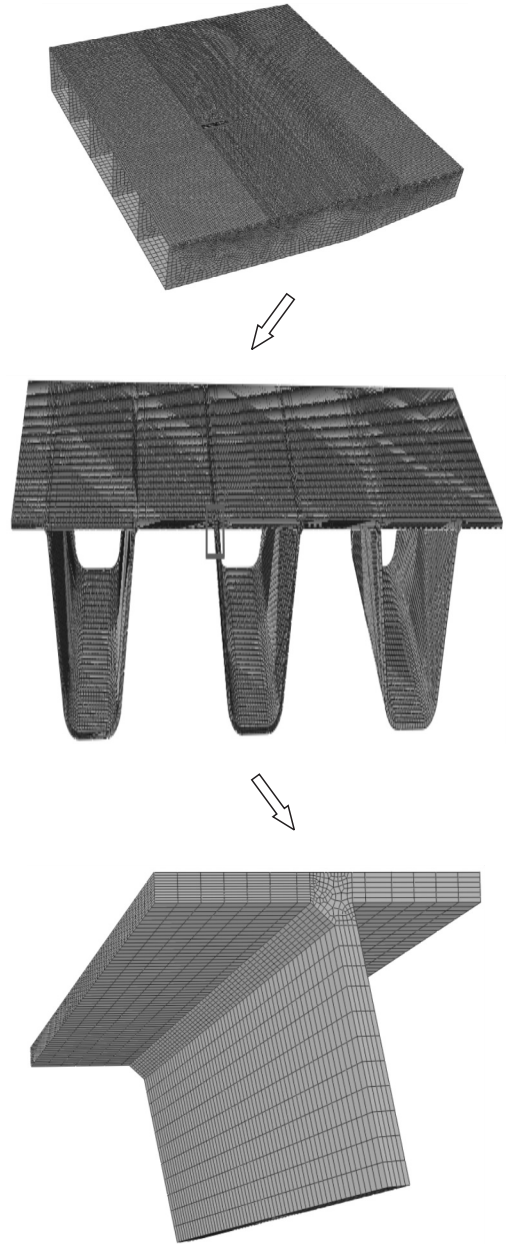


图 20 有限元模型

Fig. 20 Finite element model

在受到相同的荷载作用下, 壳单元较实体单元, 得到的纵肋 - 顶板连接焊缝顶板处的热点应力幅更大, 结果更为保守; 得到的焊趾处 U 肋热点应力幅则较小. 焊趾处顶板热点应力幅相差为 10.6%, 焊根处顶板热点应力幅相差为 9.1%. 而 U 肋应力, 由于 U 肋处应力本身较小, 所以比较小的差值得到了较大的比例, 大小为 18.6%.

表3 纵肋-顶板连接焊缝处各细节应力幅

Table 3 Stress amplitude of longitudinal rib to deck welded joint

MPa

压应力峰值						拉应力峰值						应力幅					
焊趾处顶板		焊根处顶板		焊趾处U肋		焊趾处顶板		焊根处顶板		焊趾处U肋		焊趾处顶板		焊根处顶板		焊趾处U肋	
壳单元	实体单元	壳单元	实体单元	壳单元	实体单元	壳单元	实体单元	壳单元	实体单元	壳单元	实体单元	壳单元	实体单元	壳单元	实体单元	壳单元	实体单元
-107.5	-97.5	-104.5	-98.8	-12.4	-15.8	7.5	5.3	7.2	2.8	3.2	3.3	115.0	102.8	111.7	101.6	15.5	19.1

## 6 结论

(1)由网格划分大小和加载步长分析可知,在确保计算精度95%的情况下,U肋与横隔板连接处附近横隔板网格大小最大可为横隔板厚度 $t_2$ ,U肋网格大小最大可为U肋腹板厚度 $t_1$ ,顶板网格大小最大可为 $4t$ 。加载步长取到100 mm所提取的应力已足够接近实际值。

(2)车轮位置与纵肋-顶板连接焊缝横桥向距离大于1 500 mm,或纵桥向距离大于1 500 mm时,对焊缝的影响可以忽略。

(3)由于纵肋-顶板连接焊缝细节的影响面积相对比较小时,双轴作用下的细节应力幅较单轴作用下的应力幅增加幅度不是很大,但是单,双轴作用下得到的纵肋-顶板连接焊缝细节的最不利细节位置并不一致。另外,将荷载简化放置在横隔板间和横隔板上得到纵肋-顶板连接焊缝细节的最大应力和最小应力也是不合理的,需要将荷载纵向移动获得细节的最值应力。

(4)在确定细节最不利横向位置时,荷载横向移动分别位于U肋正上方、U肋间和U肋腹板上方的加载方式既简化了加载步骤,又能得到纵肋-顶板连接焊缝细节的实际最不利荷载位置。纵向加载分析时,加载区网格大小不大于50 mm,荷载步大小不大于100 mm时可以得到比较精确的结果。

(5)纵肋-顶板连接焊缝处最易疲劳开裂的位置位于U肋外侧顶板焊趾处。

(6)在受到相同的荷载作用下,壳单元较实体单元,得到的纵肋-顶板连接焊缝位于顶板的焊趾和焊根处的热点应力幅更大,结果更为保守;而位于U肋的焊趾处热点应力幅则较小。

## 参考文献

- [1] 唐亮,黄李骥,刘高,等.正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J].土木工程学报,2014,47(9):110-119.  
(TANG Liang, HUANG Liji, LIU Gao, et al. Fatigue experimental study of a full-scale steel orthotropic deck model[J]. China civil engineering journal, 2014, 47(3): 112-12.)
- [2] 张清华,崔闯,卜一之,等.正交异性钢桥面板足尺节段疲劳模型试验研究[J].土木工程学报,2015,48(4):72-83.  
(ZHANG Qinghua, CUI Chuang, BU Yizhi, et al. Experimental study on fatigue features of orthotropic bridge deck through full-scale segment models[J]. China civil engineering journal, 2015, 48(4): 72-83.)
- [3] 袁周致远,吉伯海,杨沐野,等.正交异性钢桥面板顶板竖向加劲肋焊接接头疲劳性能试验研究[J].土木工程学报,2016,49(2):69-76.  
(YUAN Zhouzhiyuan, JI Bohai, YANG Muye, et al. Study on fatigue performance of welded joints for out-of-plane gusset in orthotropic steel bridge decks[J]. China civil engineering journal, 2016, 49(2): 69-76.)
- [4] TSAKOPOULOS P A, FISHER J W. Full-scale fatigue tests of steel orthotropic decks for the Williamsburg Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(5): 323-333
- [5] 曾志斌.正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J].钢结构,2011,26(2):9-15.  
(ZENG Zhibin. Classification and reasons of typical fatigue cracks in orthotropic steel deck [J]. Steel construction, 2011, 26(2): 9-15.)



- [6] SIM H B, UANG C M. Stress analyses and parametric study on full-scale fatigue tests of rib-to-deck welded joints in steel orthotropic decks[J]. Journal of bridge engineering, 2012(17):765-773.
- [7] AYGUL M, ALEMRANI M, URUSHADZE S. Modelling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM[J]. International journal of fatigue, 2012, 40: 129-142.
- [8] CHOI J H, KIM D H. 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.
- [9] 赵欣欣, 刘晓光, 潘永杰, 等. 正交异性钢桥面板肋板与面板连接构造的疲劳试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(2):41-45.  
(ZHAO Xinxin, LIU Xiaoguang, PAN Yongjie, et al. Fatigue test study in the joint structure between the deck and longitudinal rib web of orthotropic steel bridge deck[J]. China railway science, 2013, 34(2):41-45.)
- [10] CAO V D, SASAKI E, TAJIMA K, et al. Investigations on the effect of weld penetration on fatigue strength of rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks[J]. International journal of steel structures, 2015, 15(2):299-310.
- [11] XIAO Z G, YAMADA K, YA S, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. International journal of fatigue, 2008, 30(8):1387-1397.
- [12] 冯亚成, 王春生. 正交异性钢桥面板纵肋与桥面板连接细节的疲劳评估及修复措施[J]. 钢结构, 2013, 26(143):27-30.  
(FENG Yacheng, WANG Chunsheng. Fatigue assessment and repairing measures of the rib to deck connections in orthotropic steel bridge decks[J]. Steel structure, 2013, 26(143):27-30.)
- [13] 王秀伟, 唐亮. 钢桥面板-纵肋连接接头的疲劳性能[J]. 公路交通科技, 2013, 30(6):67-74.  
(WANG Xiuwei, TANG Liang. Fatigue performance of deck plate-to-rib joint in orthotropic steel deck[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2013, 30(6):67-74.)
- [14] JI B, LIU R, CHEN C, et al. Evaluation on root-deck fatigue of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of constructional steel research, 2013, 90(5):174-183.
- [15] 张先. 正交异性钢桥面板疲劳设计研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.  
(ZHANG Xian. Research on anti-fatigue design of orthotropic steel bridge deck[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.)
- [16] 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(10):1-5.  
(MENG Fanchao, SU Quanke, BU Yizhi, et al. Optimized design of anti-fatigue for orthotropic steel bridge deck[J]. Highway, 2014, 10:1-5.)
- [17] 卜一之, 王一莹, 崔闯. 新型正交异性钢桥面板关键部位疲劳性能研究[J]. 世界桥梁, 2015, 43(5):20-24.  
(BU Yizhi, WANG Yiyong, CUI Chuang. Study of fatigue performance of key parts of new-type orthotropic steel deck[J]. World bridges, 2015, 43(5):20-24.)
- [18] 李丽娟, 崔闯, 卜一之, 等. 铺装层对正交异性钢桥面板疲劳性能影响效应研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5):48-52.  
(LI Lijuan, CUI Chuang, BU YiZhi, et al. Study of influential effects of pavement on fatigue performance of orthotropic steel deck plate[J]. World bridges, 2016, 44(5):48-52.)
- [19] 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.)
- [20] 高科. 基于断裂力学的正交异性钢桥面板疲劳性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.  
(GAO Ke. Fatigue performance study of the orthotropic steel deck based on fracture mechanics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.)
- [21] 丁楠, 邵旭东. 轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1):74-81.  
(DING Nan, SHAO Xudong. Study on fatigue of light-weighted composite bridge deck[J]. China civil engineering journal, 2015, 48(1):74-81.)
- [22] 吴月峰. 正交异性钢桥面板热点应力的疲劳寿命评估[D]. 成都:西南交通大学, 2012.  
(WU Yuefeng. Fatigue life evaluation based on hot spot stress method of orthotropic steel deck[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.)
- [23] IIW. Fatigue analysis of welded components-designer's guide to the structural hot-spot stress approach[S]. Cambridge: International Institute of Welding, 2006.