

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.08.067

# 车辆轮迹线位置对钢桥面板疲劳部位应力的影响分析

朱庚申

(云南省设计院集团有限公司, 云南 昆明 650228)

**摘 要:** 正交异性钢桥面板是大跨度桥梁结构主要桥面板形式。为深入研究车辆轮迹线位置对钢桥面板疲劳部位应力的影响,以纵肋与顶板双面焊焊接接头为研究对象,基于 ANSYS 有限元软件,选取三种典型疲劳车辆轮迹线加载形式,得到了该部位热点应力历程。车辆骑纵肋加载和纵肋间加载均具有较大的疲劳应力,设计时应将轮迹线尽量布置在纵肋正上方位置。

**关键词:** 正交异性钢桥面板;纵肋与顶板双面焊焊接接头;有限元软件;车辆轮迹线;热点应力历程

**中图分类号:** U441+.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2021)08-0258-03

## 0 引言

钢结构具有自重轻,承载能力高等突出优点,在传统钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土桥难以达到较大跨度的情况下,钢桥得到越来越广泛地应用。21 世纪以来,作为纵横向受力良好,可智能化制造的正交异性钢桥面板受到了桥梁设计者的关注,并应用于大跨度桥梁建设当中。正交异性钢桥面板在静力方面表现出突出优势,但随着服役期车辆荷载的反复作用,板件各连接部位疲劳累计损伤严重,出现了一系列疲劳问题。自 1971 年,英国 Severn 桥疲劳裂纹被报告以来,国内外学者对正交异性钢桥面板疲劳性能进行了相关的试验研究和数值理论研究<sup>[1-2]</sup>。

正交异性钢桥面板由多个构造细节组成,其中纵肋与顶板焊接接头疲劳问题最为显著。该部位一旦发生疲劳开裂,裂纹将直接降低局部轮载下面板的承载能力,威胁行车安全。在目前设计中,出现了纵肋与顶板双面焊焊接接头,相关研究中也证实了该接头能够提高钢桥面板的疲劳抗力<sup>[3-4]</sup>,且能够将传统单面焊焊接接头由焊根开裂向顶板厚度方向扩展的疲劳裂纹迁移至由外侧焊缝焊趾开裂沿顶板厚度方向扩展的疲劳裂纹,更便于钢桥健康监测和后期加固等。现以正交异性钢桥面板双面焊焊接接头为研究对象,以国际焊接协会(IIW)所推荐的热点应力评估方法为手段<sup>[5]</sup>,利用 ANSYS 有限元软件对该细节进行了不同轮迹线位置的疲劳应力分析,得

到了各工况下的热点应力历程,以期提高相关钢桥设计人员对纵肋与顶板双面焊焊接接头疲劳性能的认识。

## 1 疲劳节段模型几何尺寸

以国内某大跨径斜拉桥钢桥面板为项目背景,有关文献研究表明<sup>[1]</sup>,疲劳问题属于轮载下的钢桥局部损伤劣化问题,横向选取 5 个 U 肋长度,纵向取 4 个横隔板间距能够反映纵肋与顶板焊接接头受力特征。因此,此处选取三跨横隔板间距为 3 m 的节段模型进行研究,所关注的纵肋与顶板双面焊焊接接头位于第二跨中间纵肋处,疲劳节段模型几何尺寸和关注位置如图 1 所示。

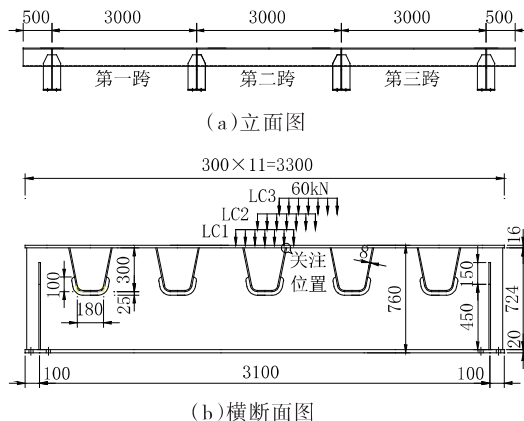


图 1 节段模型几何参数和关注位置图(单位:mm)

所选取的疲劳节段模型主要参数为:顶板厚度为 16 mm,纵肋上口宽 300 mm,高 300 mm,厚度为 8 mm,横隔板厚度为 14 mm,纵肋外悬臂长度为 500 mm。加载形式采用欧规(Eurocode 3)疲劳车模型<sup>[6]</sup>,单轮荷载大小为 60 kN,作用面积为 400 mm × 400 mm,模型分析时,偏安全不考虑铺装层的扩散作用。选取

收稿日期: 2021-01-13

作者简介: 朱庚申(1979—),男,学士,高级工程师,从事道桥工程设计工作。

三条主要轮迹线进行分析,所在位置如图1所示,LC1为纵肋正上方加载位置;LC2为骑纵肋加载形式;LC3为纵肋间加载位置。双面焊焊接接头是在传统单面焊焊接接头的基础上,在纵肋内部增加一条角焊缝而形成,是一种新型的构造细节形式<sup>[3]</sup>,外侧焊缝采用75%熔透率的埋弧焊形式,焊脚尺寸为12.1 mm,高度为9.2 mm,内侧角焊缝焊脚尺寸为6 mm,高度为6 mm。双面焊焊接接头几何参数如图2所示。

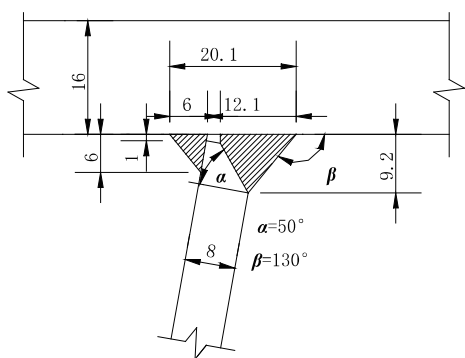


图2 双面焊焊缝参数图(单位:mm)

## 2 热点应力分析方法

疲劳抗力决定了钢桥面板服役期的疲劳寿命。目前针对疲劳抗力评估方法的研究层出不穷。早期学者提出了名义应力方法,能够对钢桥面板构造细节进行评估,但由于应力取值点位置难以统一,因此评估结果准确性较差。随着研究者对钢桥疲劳破坏损伤机理的认识,切口应力方法和结构应力方法相继被提出。两者对于建模较为复杂,且结果处理繁琐不易于工程应用。近年来,不依赖于构造细节S-N曲线的断裂力学评估方法应运而生。该方法能很好地从本质上阐述疲劳失效机理,但是疲劳寿命受初始裂纹尺寸影响较大。

对于钢桥面板纵肋与顶板双面焊焊接接头而言,裂纹萌生于内侧焊缝焊趾部位(失效模式1)和外侧焊缝焊趾部位(失效模式2)沿顶板扩展的疲劳失效模式是其重要疲劳失效模式。而IIW所推荐的具有明确含义的热点应力评估方法不仅给出了取值点位置,同时也给出了具体计算公式。其内在含义代表关注细节的焊趾处裂纹萌生点。IIW给出了三种热点取值点位置,现采用应用较为广泛的第一种计算方法对纵肋与顶板双面焊焊接接头进行应力分析,以内侧焊缝为例,即通过距焊缝焊趾0.4倍的板厚位置点 $\sigma_{0.4t}$ 和1.0倍的板厚位置点 $\sigma_{1.0t}$ 的应力数值线性外推得到该焊趾处热点应力 $\sigma_{hs}$ ,钢桥面板纵肋与

顶板双面焊焊接接头沿顶板开裂的疲劳失效模式和分析对象热点应力外推图示如图3所示,其中 $t$ 为顶板厚度。

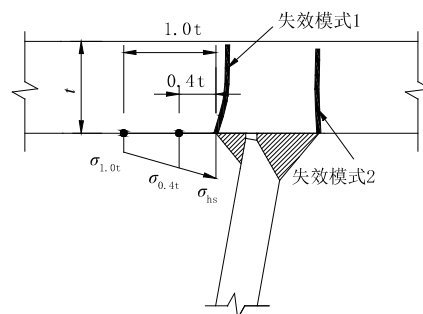


图3 疲劳失效模式和分析对象热点应力外推图示

IIW所推荐的热点应力第一种外推公式见下式(1),其中 $\sigma_{0.4t}$ 和 $\sigma_{1.0t}$ 的数值通过ANSYS有限元软件计算得到。

$$\sigma_{hs}=1.67\sigma_{0.4t}-0.67\sigma_{1.0t} \quad (1)$$

## 3 有限元模型

### 3.1 约束情况和欧规疲劳车模型

根据所选取的疲劳节段模型在钢箱梁中所处位置,对其边界条件进行约束。具体约束情况为,顶板横向两侧约束横桥向位移以模拟周围梁体对其横限位作用;隔板底部约束竖向位移以模拟横隔板对桥面板的支承作用;纵桥向对一端纵肋和顶板进行纵桥向约束,另一端不约束,以模拟纵桥向桥面板变形能够自由。

采用欧规疲劳车单车模型进行钢桥面板疲劳应力分析,相关研究文献表明<sup>[1]</sup>,疲劳主要受单个轮载影响,欧规疲劳车模型中横桥向轮距为2.0 m,纵桥向最小轮距为1.2 m,横向轮距较远超出纵肋与顶板双面焊焊接接头影响面范围,因此该项目加载主要考虑单侧前后轮影响,如图4所示,其中 $w$ 为疲劳车车身宽度。

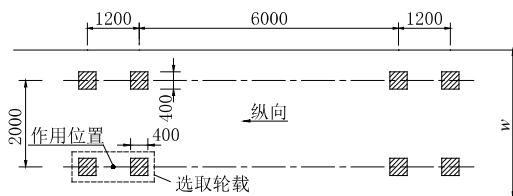


图4 选取轮载位置图(单位:mm)

### 3.2 有限元模型

采用ANSYS有限元软件,对顶板、纵肋和横隔板等各板件进行离散化,建立该项目所选取的节段模型的数值有限元模型,对图1中的关注位置网格进行加密,网格尺寸控制在3 mm内,关注区域外网格尺寸较大。为保证模型分析结果具有较高精度,模

型均采用六面体单元,其中关注位置单元类型为 solid95 二次实体单元,关注位置外为 solid45 实体单元,有限元模型如图 5 所示。

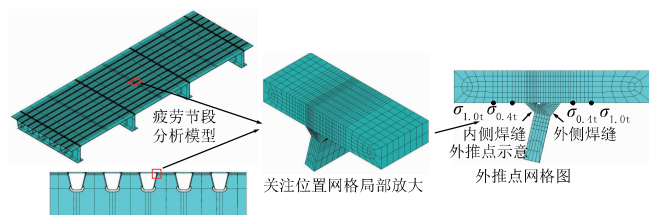


图 5 有限元模型图示

#### 4 计算结果分析

按照图 1 所示加载工况,每个加载工况,纵桥向移动步长为 100 mm。由于模型对称,因此纵向加载范围为:从最外侧横隔板正上方开始加载逐步移动至第二跨跨中位置,每个加载工况下共 46 个荷载步,有限元模型共计 138 个荷载步。为便于表述,将轮迹线位置与三种加载工况相对应(见表 1)。

表 1 轮迹线位置一览表

| 轮迹线类别 | 对应工况 | 所处位置  |
|-------|------|-------|
| 轮迹线 1 | LC1  | 纵肋正上方 |
| 轮迹线 2 | LC2  | 骑纵肋   |
| 轮迹线 3 | LC3  | 纵肋间   |

为加载方便,ANSYS 有限元软件中采用单轮加载,前后轮应力结果通过影响线叠加得到。纵肋与顶板双面焊焊接接头疲劳应力主要受主压应力作用,因此,在分别获取  $\sigma_{0.4t}$  和  $\sigma_{1.0t}$  的数值的基础上,通过式(1)进行线性外推,得到了三种轮迹线下内侧焊缝顶板焊趾和外侧焊缝顶板焊趾的热点应力历程,分别如图 6 和图 7 所示。

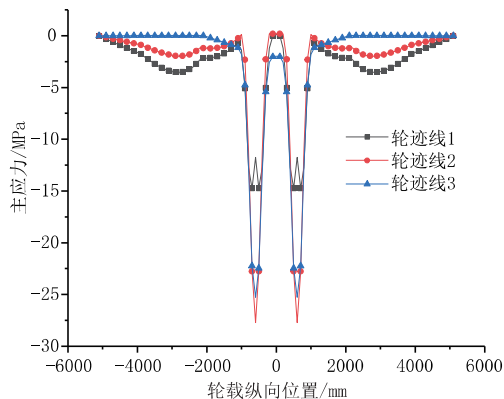


图 6 内侧焊缝顶板焊趾热点应力历程图

计算表明:(1)内侧焊缝和外侧焊缝顶板焊趾处的热点应力均具有显著的局部特征,当轮载通过该焊接接头时,应力水平最大,就三种典型轮迹线位置而言,轮迹线 2(骑纵肋加载形式)最为不利,其次为

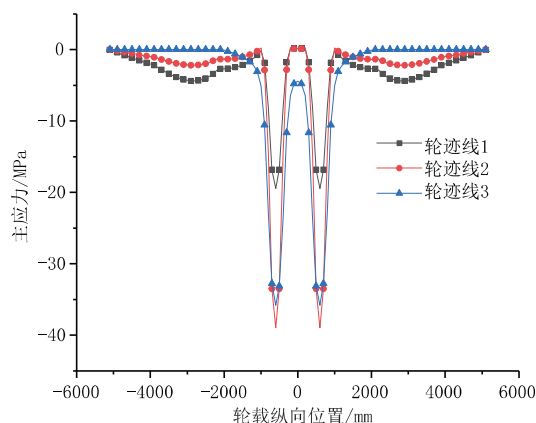


图 7 外侧焊缝顶板焊趾热点应力历程图

轮迹线 3(纵肋间加载形式),两轮迹线位置应力相差较小,轮迹线 1(纵肋正上方加载形式)应力数值较小,进行结构设计时,应尽量将轮迹线位置布置在纵肋正上方,以避免发生疲劳破坏。(2)外侧焊缝顶板焊趾热点应力幅值接近 40 MPa,大于内侧焊缝顶板焊趾热点应力历程,表明沿外侧焊缝顶板焊趾处开裂向顶板厚度方向扩展是钢桥面板纵肋与顶板双面焊焊接接头主导疲劳失效模式,通过热点应力历程对比分析,也证实了新型双面焊焊接接头能够实现疲劳失效模式由传统单面焊焊根迁移至双面焊外侧焊缝顶板焊趾,便于监测和加固,因此新型双面焊焊接接头具有广阔的发展前景。

为认识钢桥面板纵肋与顶板双面焊焊接接头应力特征,以轮迹线 1 和轮迹线 3 为例,给出了单轮荷载通过该部位时的主压应力分布,如图 8 所示,内外侧顶板焊趾处均具有较大的主压应力。

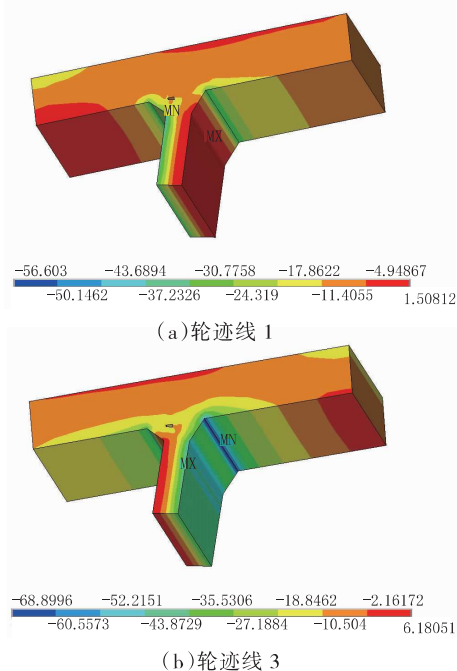


图 8 主压应力分布图(单位:MPa)

(下转第 265 页)

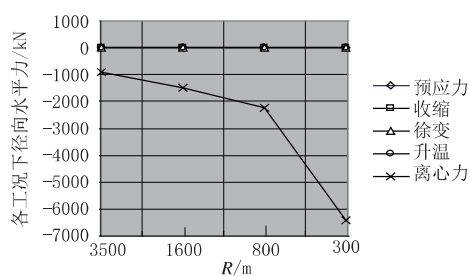


图 19 径向水平力

## 6 结 语

(1)对于主跨 80 m 的多跨连续梁桥而言,随着半径的逐渐减小,连续梁内外腹板剪力差、支座竖向反力差和径向水平力均呈现出不同程度的增大趋势,但不同影响因素对其敏感性则有较大差别。当曲率半径  $R \leq 800$  m 时,自重和二期恒载引起的腹板剪力差才较为明显,而当曲率半径  $R \leq 1\,600$  m 时,活载引起的腹板剪力差已不容忽视,设计中必须考虑;

当曲率半径  $R \leq 800$  m 时,自重、预应力和活载对支座竖向反力的影响均已明显,设计时需考虑,必要时需进行抗倾覆验算。

(2)随着曲率半径的减小,曲线连续梁的支座径向水平力呈增大趋势,但预应力、混凝土的收缩徐变、升降温引起的径向水平力变化趋势不大,基本可忽略,但由于离心力作用在梁体上产生转动,各支座径向对梁体有约束,因此活载离心力是影响支座径向力的主要因素。

### 参考文献:

- [1] 邵容光、夏淦.混凝土弯梁桥[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [2] 姚玲森.曲线梁[M].北京:人民交通出版社,1989.
- [3] 李惠生、张罗溪.曲线桥结构分析[M].北京:中国铁道出版社,1992.
- [4] 姚玲森.曲线梁桥的实用计算方法[J].土木工程学报,1982,15(3):36-51.
- [5] 孙广华.曲线梁桥计算[M].北京:人民交通出版社,1995.

(上接第 260 页)

## 5 结 论

(1)通过有限元数值模拟,得到了钢桥面板纵肋与顶板双面焊焊接接头内侧焊缝顶板焊趾和外侧焊缝顶板焊趾的热点应力历程曲线。

(2)对于钢桥面板纵肋与顶板双面焊焊接接头而言,车辆骑纵肋加载的轮迹线 2 和纵肋间加载的轮迹线 3 均具有较大疲劳应力,设计时应将轮迹线尽量布置在纵肋正上方位置。

(3)裂纹沿外侧顶板焊趾开裂,沿顶板厚度方向扩展的疲劳失效模式是钢桥面板纵肋与顶板双面焊焊接接头主导疲劳失效模式。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wolchuk R. Lessons from Weld Cracks in Orthotropic Decks on Three European Bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(1): 75-84.
- [3] 张清华,郭亚文,李俊,等.钢桥面板纵肋双面焊构造疲劳裂纹扩展特性研究[J].中国公路学报,2019,32(7):49-56+110.
- [4] 罗鹏军,张清华,龚代勋,等.钢桥面板 U 肋与顶板双面焊连接疲劳性能研究[J].桥梁建设,2018,48(2):19-24.
- [5] IIW Document XIII-21514r4-07, XV-1254r4-07, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components[S].
- [6] European Committee for Standardisation. Eurocode 3, Design of Steel Structures[S]. EN1993-2, Brussels, Belgium, 2005.