

基于结构应力法的钢桥顶板-U肋双面焊连接 疲劳性能评估

聂斌¹, 王定全¹, 孙丽明², 罗程巍^{3*}

(1. 成都交通投资集团有限公司, 成都 610041; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092; 3. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 正交异性钢桥面板虽具有轻质高强等优点,但也面临着显著的疲劳问题,其中顶板-U肋纵向连接焊缝是疲劳裂纹的主要发生部位之一。在提高顶板-U肋连接疲劳性能方面,优化新型双面焊构造细节的几何设计能够显著改变主导疲劳失效模式。为进一步明确主导疲劳模式的迁移问题,采用ABAQUS软件建立实体板壳耦合模型并通过DLOAD子程序实现疲劳加载,基于结构应力法对单、双面焊连接进行了对比并针对双面焊连接进行了参数分析。实桥的参数分析结果表明,顶板厚度对所关注位置处的结构应力影响最大,但不会改变疲劳破坏模式,内外焊缝的焊根和焊趾处的结构应力均随着顶板厚度的增加而明显降低。双面焊的疲劳失效模式与内外焊缝的尺寸均相关,外焊缝尺寸应控制在一定范围内,对于所研究的基本连接构造,其疲劳模式迁移的临界尺寸约为10 mm。内焊缝能够降低原单面焊焊根处的结构应力,其临界尺寸约为3 mm。

关键词: 正交异性钢桥面板; 结构应力法; 双面焊; 参数分析; 疲劳破坏模式迁移

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0074-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230921001

Structural Stress-Based Fatigue Assessment of Rib-to-Deck Double-Side Welded Connections in Orthotropic Steel Decks

NIE Bin¹, WANG Dingquan¹, SUN Liming², LUO Chengwei^{3*}

(1. Chengdu Communications Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. School of Mechanics and Engineering Science,

Shanghai University, Shanghai 200444, China)

*Corresponding author: mercurylll@shu.edu.cn

Abstract: Orthotropic steel decks (OSDs) are prone to fatigue problems despite of their advantages such as lightweight and high load-bearing capacity, especially for rib-to-deck welded connections. Among the fatigue optimization structures, the new type of double-side welded connections can change the dominant fatigue failure mode by improving the geometric structure. To reveal transformation mechanism of fatigue mode, a shell-solid coupling model was established by ABAQUS, and the fatigue loading was realized by DLOAD subroutine. Further, single-side and double-side welded connections were compared based on structural stress method, and the parametric analysis of double-welded

收稿日期: 2023-09-21

基金项目: 上海市自然科学基金(21ZR1466100), 广东省重点领域研发计划“现代工程技术”重点专项(2019B111106002)

作者简介:

聂斌(1970—),男,硕士,高级工程师,主要从事道路工程及桥梁工程方面的研究。E-mail: 69598397@qq.com。

王定全(1974—),男,学士,高级工程师,主要从事道路工程及桥梁工程方面的研究。

通信作者:

罗程巍(1993—),男,硕士,实验师,主要从事钢桥疲劳、钢与组合桥梁方面的研究。E-mail: mercurylll@shu.edu.cn。

connections was conducted. The results of parametric analysis show that, compared with other parameters, the thickness of deck brings the greatest impact on the structural stress at the concerned position, but does not change the fatigue failure mode. The structural stress at the root and toe of internal and external welds decreases significantly with the increase of deck thickness. The fatigue mode of double-side welded connection is related to both internal and external weld size, and the external weld size should be controlled within a certain range. For the basic structure analyzed, fatigue mode changes when external weld size is about 10 mm. The inner weld can reduce the structural stress at the root of the original single-side weld, and the critical size is about 3 mm.

Keywords: orthotropic steel deck; structural stress method; double-side welding; parametric study; transformation of fatigue failure mode

正交异性钢桥面板主要包括顶板、纵肋和横肋(横隔板)3个部分,在桥面盖板下表面焊接纵横向相互垂直的加劲肋,共同承受车轮荷载。相比于传统桥面板,正交异性桥面板充分发挥了材料的力学性能,具有轻质高强、适用范围广、便于施工等优点,被广泛应用于大跨桥梁中^[1-3]。结构体系和制造方式使得正交异性钢桥面板在具备突出优点的同时,也呈现出构造复杂、焊缝众多等特征,导致其疲劳开裂问题尤为突出^[4-8]。根据国内外多座钢箱梁疲劳裂纹分布的调查,顶板与纵肋的纵向连接焊缝是疲劳裂纹的主要发生部位之一^[9-11]。研究表明,提高钢桥疲劳性能的关键在于改善焊缝几何构造,防止发生刚度突变以及控制焊接初始缺陷。对于顶板与纵肋之间的连接构造,新型双面焊构造细节能将主导疲劳失效模式由疲劳裂纹萌生于顶板内侧焊根转变为萌生于顶板外侧焊趾,且适应工业化处理^[12],极具工程应用前景。

新型双面焊构造细节在传统单面焊的基础上,于U肋内侧增加一道焊缝。自SAKANO等^[13]首次将双面焊工艺引入正交异性钢桥面板顶板与纵肋连接构造以来,国内外学者对顶板与纵肋双面焊构造的研究取得了一系列进展^[14-19]:基于有限元模型,采用热点应力法、等效结构应力法、缺口应力法等方法验证了双面焊构造在提高疲劳抗力方面的有效性;基于线弹性断裂力学等,研究了疲劳裂纹起裂位置和拓展特性;通过热力耦合法等,研究得到了焊接残余应力分布。而在实际应用方面,我国已成功完成了包含U肋内焊在内的全自动生产线,并成功应用于实桥建设^[20]。热点应力法是常用的疲劳应力分析方法,由于双面焊的构造特点,无法采用热点应力法获得焊根位置疲劳应力。与其他评估方法相比,结构应力法已被广泛用于压力容器和轨道交通装备等行业,针对焊接接头,该方法的有效性已被广泛验证^[21-23]。近年来,结构应力法开始被用于钢桥领域,LI等^[24]采用等效结构应力法对传统单面焊构造细节的疲劳特性进行了分析。进一步地,张清华等^[25]基于结构应力法分析了双面焊构造细节的主导疲劳失效模式,并比较了熔透率和内外焊缝相同的情况下焊缝尺寸对关注位置结构应力的影响。

虽然针对双面焊构造的研究已经取得了一系列进

展,但就目前的研究现状和应用情况来看,采用双面焊构造的设计理论还不成熟。目前的研究多集中于参数的定性分析,针对双面焊连接如何改变主导疲劳失效模式,以及发生改变时参数的临界条件和触发机理的研究较少。此外,已有的研究主要集中关注焊缝构造参数,对横隔板间距等参数的探讨较少,且基于结构应力法的研究未对双面焊构造的内外焊缝构造参数进行区分。因此,本文通过ABAQUS软件建立七U肋实体-板壳耦合模型,对采用结构应力及热点应力、名义应力的疲劳应力分析进行了比较,基于结构应力法对比了双面焊与单面焊的疲劳性能,并在基础模型的基础上对关键参数,如顶板厚度、外焊缝尺寸、内焊缝尺寸、熔透率以及横隔板间距进行单参数分析,补充了双面焊参数分析的内容,并研究了主导疲劳失效模式的迁移问题。

1 有限元模型

综合考虑模型的精度及复杂程度,通过ABAQUS软件建立与参数分析基础模型等尺寸的实体-板壳耦合模型进行有限元模拟,如图1所示。板壳模型顺桥向包含4段横隔板,相邻横隔板间隔3 m,总长为10 m;横向包括7根U肋,总长为4.2 m。依据圣维南原理,实体模型的区域尺寸选择应考虑合理的边界划分,而不影响所关注细节部位的受力。实体模型的区域尺寸应远大于所关注细节部位的区域尺寸,以消除边界条件的影响,故选取中间纵向长为1 m,横向覆盖3根U肋的部分。参考国内外规范及工程应用现状,基础模型选取顶板厚度为18 mm,U肋厚度为8 mm,外焊缝尺寸 H_1 、 D_1 为8 mm,内焊缝尺寸 H_2 、 D_2 为6 mm,熔透率 P 为80%。

如图2所示,根据正交异性钢桥面板的受力特点,初步选取边界条件如下:(1)约束横隔板和顶板横向两端节点 x 方向的位移以模拟钢箱梁横隔板和顶板对模型横向(x 向)的约束作用;(2)约束横隔板底端节点 z 向的位移以模拟钢箱梁对模型竖向(y 向)的约束作用;(3)限制纵肋与顶板纵向两端节点方向的平动自由度以模拟钢箱梁对模型纵向(z 向)的约束作用。实体模型与板壳模型之间采用壳-实体耦合连接方式。

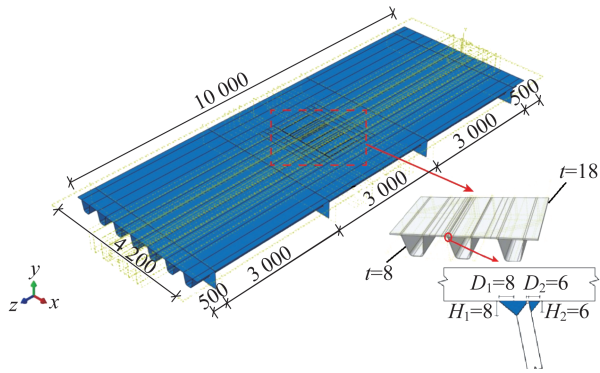


图1 有限元模型(单位:mm)

Fig. 1 FE model (unit: mm)

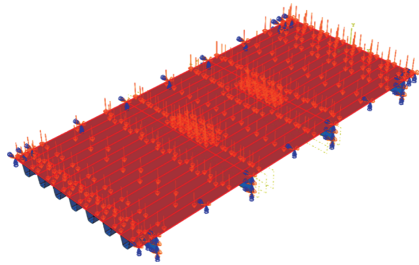


图2 荷载及边界条件

Fig. 2 Loads and boundary conditions

标准疲劳车选取《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD64—2015)中的疲劳荷载模型III,车重为480 kN,轴重为120 kN,单个轮载重为60 kN。正交异性桥面板在顺桥向和横桥向的影响线都较短,影响范围有限,而疲劳荷载模型车的轴间距普遍在1 m以上,因此忽略关注细节的叠加效应。综合考虑受力特点及模型尺寸,计算模型只考虑疲劳荷载模型III的前半部分荷载,如图3所示。在纵向中心附近对模型进行横向加载,以确定横向最不利荷载位置,并在最不利荷载位置附近对模型进行纵向加载,以完成参数分析。

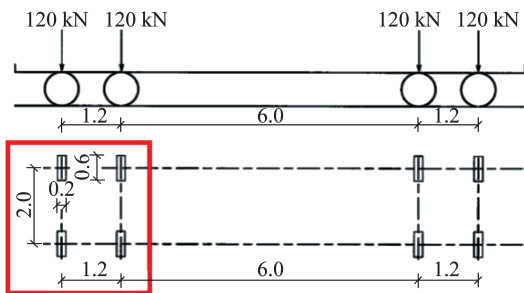


图3 疲劳荷载模型III(单位:m)

Fig. 3 Fatigue load model III (unit: m)

为得到疲劳关注细节的应力历程,需要在最不利荷载位置及其相邻位置沿纵向移动荷载,并记录每次移动后所关注疲劳细节的应力。关注点设在模型中心的焊缝位置,

并计算该位置的结构应力,得到相应的应力影响线。如图4所示,综合考虑精度和复杂程度,在模型横桥向受力最不利位置(车道3)附近选择5条车道,车道之间间隔0.1 m,即5个插值点,荷载依次沿每条车道移动;纵向车道从模型中段的一端延伸至另一端,取112个插值点,插值点之间相距0.5 m,即通过560个点数据的插值获得疲劳关注细节的应力历程,从而得到相应的疲劳应力幅。车辆荷载的加载通过二次开发DLOAD子程序实现,即利用DLOAD子程序模拟疲劳荷载模型III中轮载在模型上的移动。具体实现流程包括:(1)定义加载范围;(2)随分析步改变荷载位置;(3)实现移动轮载的模拟。

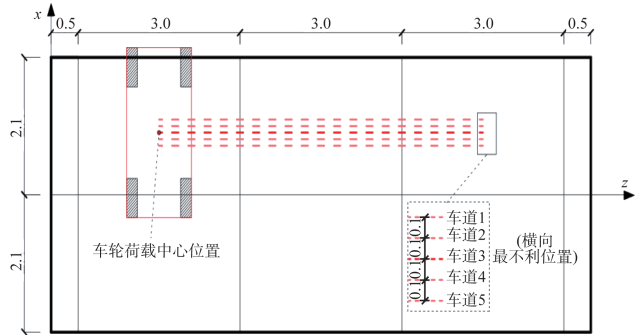


图4 加载示意(单位:m)

Fig. 4 Schematic diagram of loading (unit: m)

如图5a)所示,疲劳关注细节附近板壳模型采用纵向4 mm网格,同时为合理利用计算机资源,将远离关注细节位置的网格尺寸适当增大为50 mm,二者之间留有一定的过渡区间。实体模型采用尺寸为1~10 mm的网格过渡,如图5b)所示。由于焊缝位置已进行了局部加密,选取局部模型纵向网格尺寸和顶板竖向网格数量作为研究对象,进行网格敏感性分析。如图6所示,顶板网格数量的变化范围为D3~D6,即顶板竖向网格划分数量为3~6个单元;局部模型纵向网格变化范围为L3~L6,即局部模型的纵向网格间距为3~6 mm。综合敏感性分析结果与模型计算效率,选取顶板竖向划分4个网格,局部模型纵向网格尺寸为4 mm。

2 疲劳应力分析方法

2.1 结构应力法

在外力作用下,焊缝截面上存在缺口应力,导致其厚度方向上的应力分布呈现出高度非线性。虽然很难从理论或数值上直接求解截面上的非线性应力分布,但可将其分解为满足平衡条件的结构应力和自平衡的缺口应力^[26],如图7所示。假设焊接接头在截面上的远场外力包括拉伸贡献的膜应力以及弯曲贡献的拉应力,则膜应

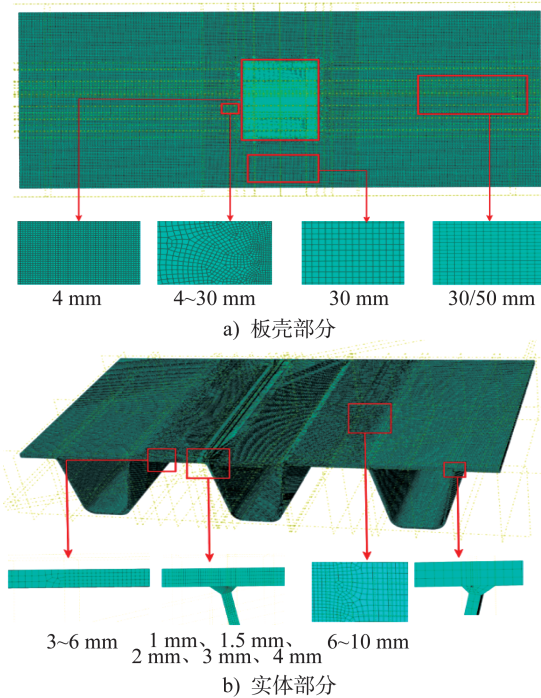


图5 网格划分

Fig. 5 Mesh generation

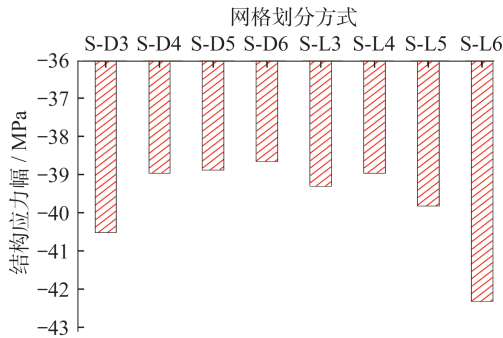


图6 网格敏感性分析

Fig. 6 Mesh sensitivity analysis

力与弯曲应力之和与外力平衡。在板厚确定的条件下，膜应力在截面内均匀分布，可以通过式(1)计算：

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x(y) dy = \frac{f_y}{t} \quad (1)$$

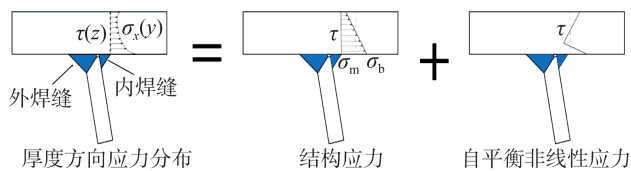


图7 应力分解

Fig. 7 Stress decomposition

同时，截面内弯曲应力可以通过式(2)计算：

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} y \sigma_x(y) dy = \frac{6m_x}{t^2} \quad (2)$$

由于结构应力和外力平衡，如式(3)所示，结构应力可认为是膜应力和弯曲应力之和。

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (3)$$

式中： σ_m 为膜应力； t 为板厚； f_y 为线力； σ_b 为弯曲应力； m_x 为线矩； σ_s 为结构应力。

由式(3)可知，结构应力可通过线力 f_y 和线矩 m_x 进行计算，其中 f_y 为焊线单位长度上的力， m_x 为焊线单位长度上的力矩。如图8所示，在有限元后处理中，通常提取截面节点结果，而结构应力基于线力和线矩计算得到，因此首先需将有限元求得的结点力和力矩转化为线力和线矩。

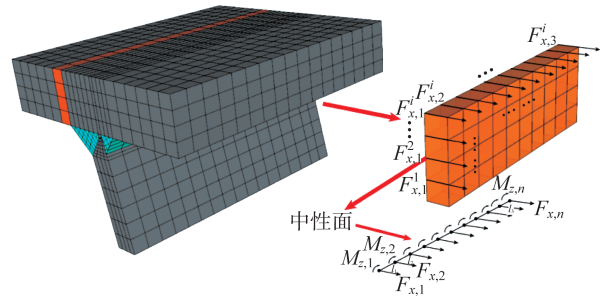


图8 线力和线矩

Fig. 8 Line force and line moment

以图8所示焊缝为例，将其划分为 n 个单元，结点编号为 $1 \sim n$ ，焊线上各结点距离为 $l_1 \sim l_{n-1}$ 。根据平衡方程，各结点力 F_{yn} 与线力 f_{yn} 之间存在如式(4)所示的对应关系。

$$\{F_{y1}, F_{y2}, \dots, F_{yn}\}^T = L \{f_{y1}, f_{y2}, \dots, f_{yn}\}^T \quad (4)$$

式(4)中矩阵 L 只与结点距离有关，定义为单元长度等效矩阵：

$$L = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{l_1}{6} & \frac{l_1+l_2}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{l_2+l_3}{3} & \frac{l_3}{6} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \frac{l_{n-2}+l_{n-1}}{3} & \frac{l_{n-1}}{6} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \frac{l_{n-1}}{6} & \frac{l_{n-1}}{3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $l_1 \sim l_{n-1}$ 为焊线上各结点的距离。

当 n 个结点在相同单元厚度 t 的情况下，各结点的结构应力 σ_n ，以及各结点力 F_{yn} 和力矩 M_{xn} 可通过矩阵形式表示为：

$$\sigma_n = \frac{1}{t} L^{-1} \left(F_{ym} + \frac{6}{t} M_{xn} \right) \quad (6)$$

2.2 分析方法对比

为验证结构应力法的可行性,以基础模型为例,在模型中心附近施加横桥向车轮荷载,分别计算关注细节Z1的结构应力、名义应力和热点应力,并进行对比分析。其中名义应力选取距离外焊趾0.5t位置的横向应力,其中t为顶板厚度;热点应力采用国际焊接学会推荐的两点线性外推法;选取0.5t和1.5t位置的横向应力,通过式(7)进行线性外推;结构应力依据2.1节所述,通过截面节点横向应力进行计算。计算结果如图9所示,随着车轮荷载在横桥向移动,结构应力和热点应力的变化趋势相同,相同位置结构应力值略高于热点应力值,而名义应力在应力峰值附近的差异较大。因此,现行钢桥设计规范中,基于名义应力的焊接接头疲劳强度计算方法仍有待改进。

$$\sigma_{Aot} = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t} \quad (7)$$

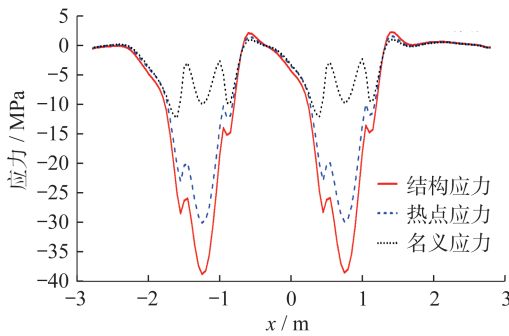


图9 结构应力与热点应力、名义应力的对比

Fig. 9 Comparison between structural stress, hot spot stress and nominal stress

3 有限元分析结果与讨论

关键参数及其选取范围如图10所示,顶板厚度选取14~28 mm,20 mm前每级变化2 mm,20 mm后每级变化4 mm。目前国内桥面板U肋厚度通常采用8 mm,因此不将其作为参数变量。焊脚尺寸D₁、H₁选取范围为4~10 mm,H₂、D₂选取范围为2~7 mm,每级变化1 mm。横隔板间距选取2.75~3.25 m,每级变化0.25 m。焊趾角度θ选取45°。

3.1 横桥向最不利加载位置

选取局部模型中部纵肋与顶板连接细节作为关注部位,如图11所示。疲劳车辆荷载中心在z(距纵桥向边缘的距离)为5.00 m、4.85 m、4.70 m、4.55 m和4.40 m处沿横桥向移动,得到局部车轮荷载影响面。基于局部车轮荷载影响面,得到各关注部位的横桥向最不利加载位置。

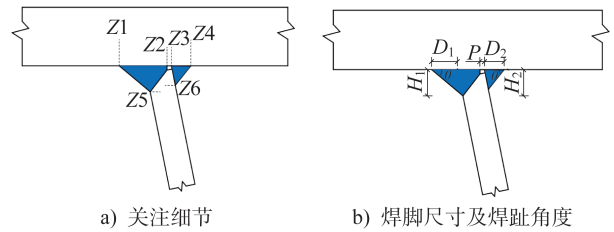


图10 关键参数

Fig. 10 Key parameters

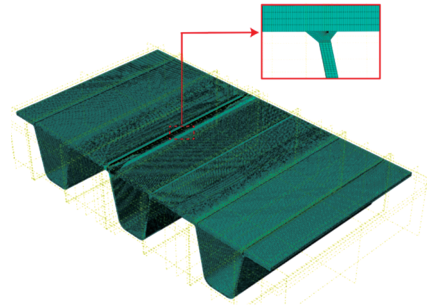


图11 关注部位

Fig. 11 Area of concern

标准疲劳车荷载作用下,疲劳关注细节Z1~Z4的横桥向加载应力历程如图12所示。将有限元模型的整体横桥向中心定义为横坐标原点,如图13中z轴位置所示。通过标准疲劳车横桥向加载,确定关注细节Z1~Z4的横桥向应力历程曲线。由历程曲线可知,关注细节Z1~Z4的最不利横桥向加载位置不同。在进行疲劳应力分析时,分别在关注细节Z1~Z4的最不利横桥向加载位置以及间隔0.1 m、0.2 m位置进行纵桥向加载,计算得到最不利条件下的结构应力幅。

对于关注细节Z1和Z2,其横桥向最不利加载位置在x=0.95 m附近;对于关注细节Z3和Z4,其横桥向最不利加载位置在x=0.90 m附近。

3.2 单面焊与双面焊疲劳应力分析

以基础模型为例,对单面焊和双面焊构造细节的疲劳性能进行研究。双面焊模型采用基础模型,而单面焊模型在双面焊模型的基础上,取消内焊缝部分,其他参数保持一致,基于结构应力法对单面焊焊根、焊趾以及双面焊内外焊缝的焊根、焊趾位置进行分析。对两种焊接构造疲劳关注位置的结构应力进行计算分析,结果如图14所示。

与单面焊相比,双面焊的疲劳破坏模式发生改变,最不利位置由原来单面焊的焊根位置转移至外焊缝焊趾位置,疲劳强度也有所提高。在引入内焊缝后,外焊缝焊趾处结构应力的应力幅有所上升,但幅度较小,而原单面焊焊根处结构应力的应力幅明显下降。对于双面焊构造,无论是内焊缝还是外焊缝,最不利位置均在焊趾处,焊根

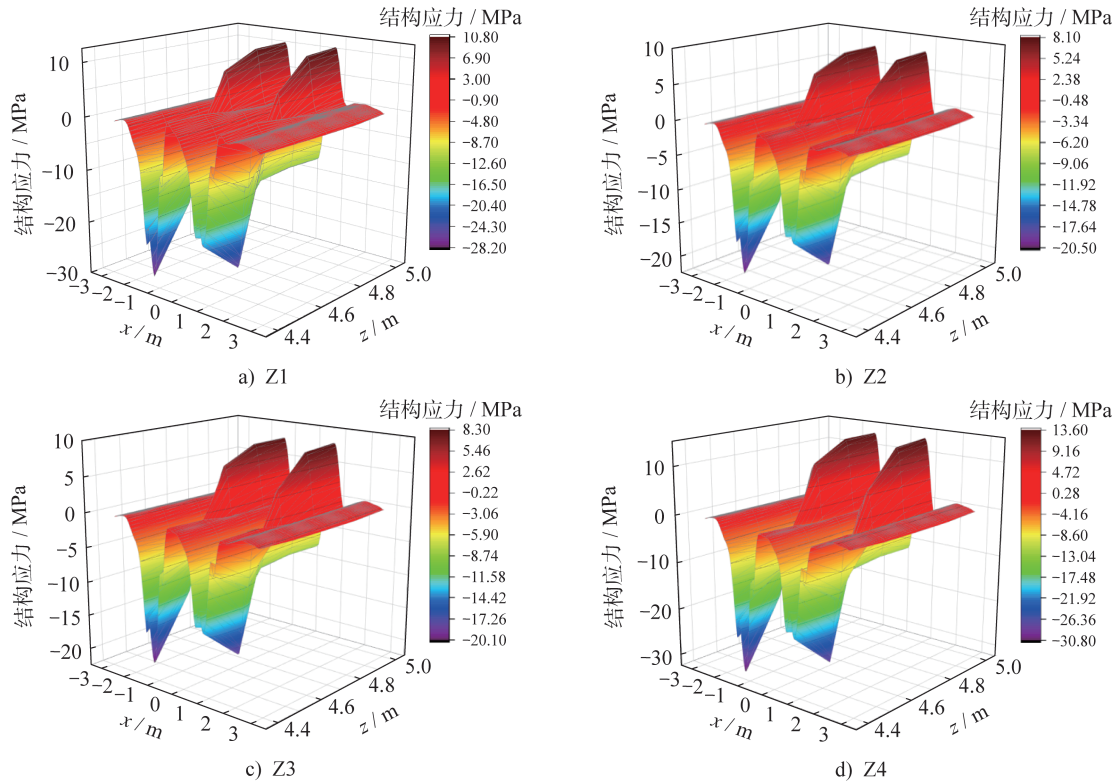


图 12 横桥向加载应力历程

Fig. 12 Stress history of the transverse loading on the bridge

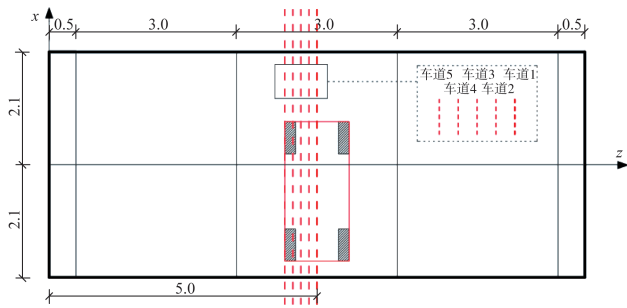


图 13 荷载工况 (单位: m)

Fig. 13 Loading cases (unit: m)

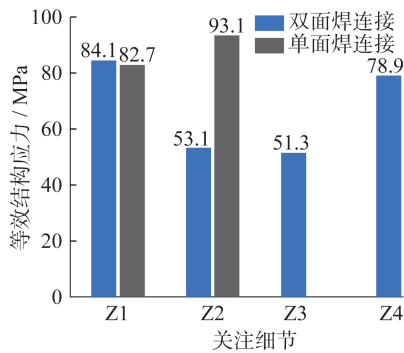


图 14 单面焊与双面焊疲劳应力分析

Fig. 14 Fatigue stress analysis of single-sided welds and double-sided welds

处结构应力的应力幅明显低于焊趾处的相应值。

可见,采用双面焊构造细节能够改变正交异性钢桥面板顶板与U肋焊接处的疲劳破坏模式,也能在一定程度上提高其抗疲劳性能。

3.3 顶板厚度参数分析

基于前述基础结构分析模型,将顶板厚度在 14~28 mm 之间进行递增变化,20 mm 前每级增加 2 mm,20 mm 后每级增加 4 mm。对不同顶板厚度下疲劳关注细节的结构应力进行计算并汇总,结果如图 15 所示。

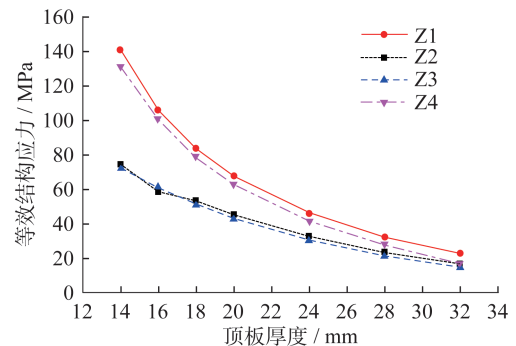


图 15 顶板厚度参数分析

Fig. 15 Parameter analysis of top plate thicknesses

随着桥面板顶板厚度的增加,顶板焊缝关注细节 Z1~Z4 的结构应力均呈显著降低的趋势,但降幅逐渐放

缓。与焊根相比,焊趾处的结构应力较高,但随着顶板厚度的增加,二者差值逐渐缩小。对于采用双面焊的正交异性钢桥面板,顶板焊缝的焊根处结构应力大幅减小,最不利位置位于焊趾处。同时,外焊趾结构应力略高于内焊趾结构应力,使其成为顶板焊接接头的最不利位置。采用双面焊构造细节后,顶板疲劳失效模式改变,外焊趾成为最不利位置,顶板焊根位置可不作为疲劳开裂控制细节。

计算结果表明,与其他构造参数相比,顶板厚度对关注细节结构应力的影响最为显著。随着顶板厚度的增加,桥面板的刚度随之提升,面外变形的影响减小,从而使顶板焊接部位结构应力值显著降低。但当顶板厚度过大时,用钢量大大增加,且相应的U肋厚度也随之增大,经济性较差。参考目前常用的正交异性钢桥面板构造细节,选取18~20 mm的顶板厚度较为合理。

3.4 内焊趾尺寸参数分析

基于前述基本结构分析模型,焊缝尺寸 D_2 、 H_2 在2~7 mm之间递进变化,每级增加1 mm,以进行单参数分析。不同焊缝尺寸下疲劳关注细节的结构应力分析结果如图16、17所示。

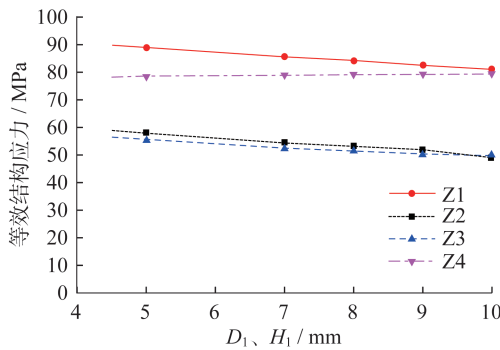


图16 外焊缝尺寸参数分析

Fig. 16 Parameter analysis of external weld dimensions

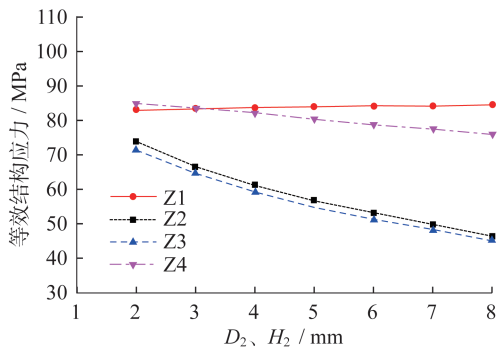


图17 内焊缝尺寸参数分析

Fig. 17 Parameter analysis of internal weld dimensions

随着内焊缝尺寸 D_2 、 H_2 的增加,顶板焊缝关注细节Z1处的结构应力幅呈上升趋势,而关注细节Z2~Z4处的结构应力幅不断降低。相比于外焊缝关注细节Z1、Z2,内焊缝关注细节Z3、Z4对内焊缝尺寸的变化更为敏感,且变化速率明显高于外焊缝关注细节的变化速率。当 D_2 、 H_2 尺寸约为3 mm时,Z4和Z1处结构应力幅相近,发生破坏模式的转换。无论是内焊缝还是外焊缝,焊趾处结构应力幅明显高于焊根处结构应力幅。当其他条件不变时,增加内焊缝尺寸会使内外焊缝焊根和内焊缝焊趾的应力降低,当内焊缝尺寸增加至一定水平时,顶板焊缝最不利位置由外焊缝焊趾转变为内焊缝焊趾。

计算结果表明,内焊缝能够降低原单面焊焊趾处的结构应力,且降低幅度与内焊缝尺寸成正比,临界尺寸约为3 mm。

3.5 横隔板间距和熔透率参数分析

针对不同横隔板间距对双面焊构造细节疲劳性能的影响开展研究。横隔板间距 L 由2.75~3.50 m递进变化,每级增加0.25 m,熔透率选取60%、80%和100%,分别进行单参数分析。不同横隔板间距和熔透率下疲劳关注位置处的结构应力计算结果如图18、19所示。

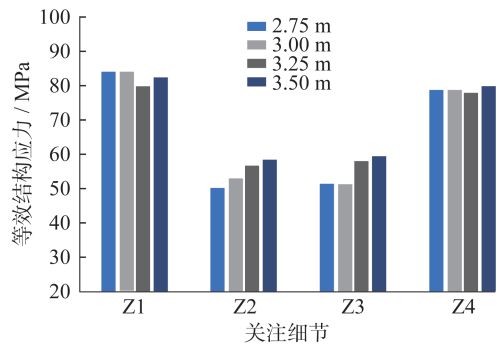


图18 横隔板间距尺寸参数分析

Fig. 18 Parameter analysis of diaphragm spacing

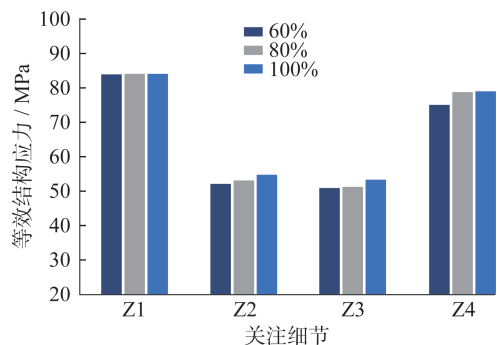


图19 熔透率参数分析

Fig. 19 Parameter analysis of penetration rates

结果表明,横隔板间距和熔透率能在一定程度上影响双面焊构造细节的疲劳性能,但并不是主要因素。随着横隔板间距的增加,各关注位置结构应力的变化趋势不同。Z1位置结构应力的应力幅随横隔板间距的增加波动变化,而Z2位置结构应力的应力幅随横隔板间距的增加不断增大。当横隔板间距为2.75 m和3.00 m时各关注细节的应力幅相近,当横隔板间距3.25 m和3.00 m时各关注细节的应力幅差异较小,而当横隔板间距为3.00~3.25 m时各关注细节的应力幅明显增大。Z2、Z3和Z4位置的等效结构应力随熔透率有一定变化,但变化幅度相对较小,影响有限。

4 结论

依据某实桥尺寸,通过ABAQUS软件建立七U肋实体-板壳耦合模型,采用软件中shell-to-solid板壳-实体耦合的方式对重要的焊缝疲劳细节进行精细化模拟,编写DLOAD加载子程序实现疲劳车辆移动加载,基于结构应力法对双面焊和单面焊疲劳特性进行对比,并对关键参数进行参数分析。主要研究结论如下:

(1) 在引入内焊缝后,原单面焊焊根处结构应力的应力幅明显下降。采用双面焊构造细节能够改变正交异性钢桥面板的疲劳破坏模式,同时在一定程度上提高其抗疲劳性能。

(2) 与其他参数相比,顶板厚度对关注位置结构应力的影响最为显著,但不会改变疲劳破坏模式。随着桥面板顶板厚度的增加,顶板焊缝关注细节Z1~Z4的结构应力均逐渐降低,且降幅逐渐放缓。

(3) 双面焊的疲劳失效模式与内外焊缝尺寸均相关,且外焊缝尺寸应控制在一定范围内,过大的外焊缝尺寸会阻止破坏模式的转换。对于所研究的基础模型,外焊缝临界尺寸约为10 mm。

(4) 内焊缝能够降低原单面焊焊趾处的结构应力,且降低幅度与内焊缝尺寸成正比,内焊缝临界尺寸约为3 mm。

参考文献:

- [1] 吴冲. 现代钢桥-上册[M]. 北京:人民交通出版社,2006:98-99.
WU Chong. Modern steel bridge (Volume I) [M]. Beijing: China Communications Press, 2006:98-99. (in Chinese)
- [2] 吉伯海,傅中秋. 钢桥疲劳与维护[M]. 北京:人民交通出版社,2016:1-12.
JI Bohai, FU Zhongqiu. Fatigue and maintenance of steel bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2016: 1-12. (in Chinese)
- [3] XIAO Z G, YAMADA K, INOUE J, et al. Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28 (4) : 409-416. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.07.017.
- [4] CHOI J H, KIM D H. Stress characteristics and fatigue crack behaviour of the longitudinal rib-to-cross beam joints in an orthotropic steel deck [J]. Advances in Structural Engineering, 2008, 11(2):189-198. DOI:10.1260/136943308784466224.
- [5] ZHANG Q H, CUI C, BU Y Z, et al. Fatigue tests and fatigue assessment approaches for rib-to-diaphragm in steel orthotropic decks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114:110-118. DOI:10.1016/j.jcsr.2015.07.014.
- [6] 李莹. 公路钢桥疲劳性能及可靠性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
LI Ying. Research on fatigue performance and reliability of highway steel bridges [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] 肖鹏. 大跨径桥正交异性钢桥面板裂缝成因及处治对策研究[D]. 南京:东南大学,2015.
XIAO Peng. Causes and prevention measures research of orthotropic steel deck crack on long span bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [8] 张丽芳,艾军,张鹏飞,等. 大跨度钢箱梁病害及成因分析[J]. 公路与汽运, 2013(3):203-206. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2013.03.059.
ZHANG Lifang, AI Jun, ZHANG Pengfei, et al. Disease and cause analysis of long-span steel box girder [J]. Highways & Automotive Applications, 2013(3): 203-206. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2013.03.059. (in Chinese)
- [9] 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, 39. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002.
ZHANG Qinghua, BU Yizhi, LI Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30, 39. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002. (in Chinese)
- [10] YANG H B, WANG P, QIAN H L, et al. An experimental investigation into fatigue behaviors of single- and double-sided U rib welds in orthotropic bridge decks [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 159: 106827. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106827.
- [11] 吴丽丽,安丽佩,孙天明. 正交异性钢桥面板受力性能的研究进展综述[J]. 工业建筑, 2016, 46(增刊1):390-395.
WU Lili, AN Lipei, SUN Tianming. The research progress on performance of orthotropic steel bridge decks [J]. Industrial Construction, 2016, 46 (Suppl. 1) : 390-395. (in Chinese)
- [12] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2018.02.004.
LUO Pengjun, ZHANG Qinghua, GONG Daixun, et al. Study of fatigue performance of U rib-to-deck double-side welded joint in orthotropic steel bridge deck [J]. Bridge

- Construction, 2018, 48(2): 19-24. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2018.02.004. (in Chinese)
- [13] SAKANO M, NISHIDA N, TABATA A, et al. Effect of inside fillet weld on fatigue durability of orthotropic steel deck with trough ribs [J]. Steel Construction Engineering, 2014, 21(81): 65-77. DOI: 10.11273/jssc.21.81_65.
- [14] ZHANG Q H, LI J, YUAN D Y, et al. Fatigue performance of rib-to-deck joint in orthotropic steel bridge deck with new type of both-side fillet welded joints [C] // Proceedings of the 40th IABSE Symposium. Nantes: IABSE Symposium, 2018.
- [15] LIU Y, CHEN F H, LU N W, et al. Fatigue performance of rib-to-deck double-side welded joints in orthotropic steel decks [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 127-142. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.015.
- [16] FANG Z, DING Y L, WEI X C, et al. Fatigue failure and optimization of double-sided weld in orthotropic steel bridge decks [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 116: 104750. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104750.
- [17] 钱骥, 许振波. 正交异性钢桥面板新型双面焊肋-板接头残余应力研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2020, 39(11): 51-58. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.11.08.
QIAN Ji, XU Zhenbo. Residual stress of new double-welded rib-plate joint for orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(11): 51-58. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.11.08. (in Chinese)
- [18] 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.07.006.
ZHANG Qinghua, GUO Yawen, LI Jun, et al. Fatigue crack propagation characteristics of double-sided welded joints between steel bridge decks and longitudinal ribs [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(7): 49-56, 110. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.07.006. (in Chinese)
- [19] 徐捷, 吉伯海, 孙谷雨, 等. 钢桥面板顶板-U肋双面焊连接焊缝焊接残余应力分析 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 2020, 50(4): 487-496. DOI: 10.15991/j.cnki.411100.2020.04.012.
XU Jie, JI Bohai, SUN Guyu, et al. Analysis of residual stress of U rib-to-deck double-side welded joint in orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2020, 50(4): 487-496. DOI: 10.15991/j.cnki.411100.2020.04.012. (in Chinese)
- [20] 冯鹏程, 丁仁军, 陈毅明, 等. 沌口长江公路大桥主桥设计 [J]. 桥梁建设, 2017, 47(4): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.04.001.
FENG Pengcheng, DING Renjun, CHEN Yiming, et al. Design of main bridge of Zhuankou Changjiang River highway bridge [J]. Bridge Construction, 2017, 47(4): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.04.001. (in Chinese)
- [21] The American Society of Mechanical Engineers. ASME BPVC VIII-2-2015 ASME Boiler and Pressure Vessel Code [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [22] 杨广雪, 刘志明, 李广全, 等. 基于等效结构应力法的焊接构架疲劳损伤评估 [J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 73-79. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2020.07.009.
YANG Guangxue, LIU Zhiming, LI Guangquan, et al. Fatigue damage assessment of welded frame on equivalent structural stress method [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 73-79. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2020.07.009. (in Chinese)
- [23] 任宏雷, 任小中. 具有大开孔压力容器结构应力分析及优化 [J]. 煤矿机械, 2013, 34(8): 51-53. DOI: 10.13436/j.mkjx.2013.08.027.
REN Honglei, REN Xiaozhong. Structure stress analysis and optimization of pressure vessel with large opening [J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(8): 51-53. DOI: 10.13436/j.mkjx.2013.08.027. (in Chinese)
- [24] LI J, ZHANG Q H, BAO Y, et al. An equivalent structural stress-based fatigue evaluation framework for rib-to-deck welded joints in orthotropic steel deck [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109304. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109304.
- [25] 张清华, 袁道云, 王宝州, 等. 纵肋与顶板新型双面焊构造细节疲劳性能研究 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 79-91. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.05.007.
ZHANG Qinghua, YUAN Daoyun, WANG Baozhou, et al. Fatigue performance of innovative both-side welded rib-to-deck joints [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 79-91. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.05.007. (in Chinese)
- [26] 兆文忠, 李向伟, 董平沙. 焊接结构抗疲劳设计理论与方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 65-69.
ZHAO Wenzhong, LI Xiangwei, DONG Pingsha. Theory and method of anti-fatigue design for welded structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 65-69. (in Chinese)