

陈欣,傅中秋,姚悦,等.钢桥面板U肋对接焊缝位置对疲劳受力性能的影响分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(3):43-49. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.007

CHEN X, FU Z Q, YAO Y, et al. Analysis of the Influence of U-rib Butt Weld Position on Fatigue Stress Characteristics of Steel Bridge Deck [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3):43-49. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.007

# 钢桥面板 U 肋对接焊缝位置对 疲劳受力性能的影响分析

陈欣<sup>1,2</sup>,傅中秋<sup>1\*</sup>,姚悦<sup>1</sup>,吉伯海<sup>1</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098;2.江苏高速公路工程养护技术有限公司,江苏 南京 210000)

**摘要:**从疲劳受力特征角度分析钢桥面板U肋对接焊缝设置位置的合理性.建立正交异性钢桥面板局部有限元模型,施加移动车轮荷载,确定U肋对接焊缝位置对该细节作用范围的影响,计算U肋对接焊缝上典型部位的纵向应力分布、横向应力幅变化,对比不同U肋对接焊缝位置下的疲劳应力特征.结果表明:不同U肋对接焊缝位置的影响范围一致,但疲劳应力特征显著不同;当U肋对接焊缝与横隔板之间距离的增加时,应力幅增加,且拉应力作用范围明显扩大,同时应力比发生了显著的改变.U肋对接焊缝布置在靠近横隔板一定范围内时,其抗疲劳性能相对于布置在两横隔板中间位置时更好.

**关键词:**钢桥面板;U肋对接焊缝;U肋对接焊缝位置;疲劳受力特征;应力比

**中图分类号:**U448.36 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)03-0043-07

## Analysis of the Influence of U-rib Butt Weld Position on Fatigue Stress Characteristics of Steel Bridge Deck

CHEN Xin<sup>1,2</sup>, FU Zhongqiu<sup>1</sup>, YAO Yue<sup>1</sup>, JI Bohai<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Expressway Engineering Maintenance Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** The reasonability of U-rib butt weld position of steel bridge deck was analyzed from the perspective of fatigue stress characteristics. The local finite element model of orthotropic steel bridge deck was established considering the different positions of U-rib butt weld. The impact of U-rib butt weld position on the influence scope was determined by applying the moving wheel load. The longitudinal stress distribution and transverse stress amplitude changes of typical positions on the U-rib butt weld were calculated, and the fatigue stress characteristics under different positions of U-rib butt weld were compared. The results show that the influence scope of the U-rib butt weld are the same, but the fatigue stress characteristics are significantly different with different U-rib butt weld positions. With the distance between the U-rib butt weld and the diaphragm increasing, the stress amplitude increases, the range of tensile stress significantly extends, and the stress ratio changes significantly. It is beneficial to the fatigue resistance that the U-rib butt weld is arranged in a certain range close to the diaphragm more than in the middle of two diaphragms.

收稿日期:2019-04-02

基金项目:国家重点研发计划政府间重点专项资助项目(2017YFE0128700);国家自然科学基金资助项目(51678216)

\*通信作者,E-mail:fumidaut@163.com

**Keywords:** steel bridge deck; U-rib butt weld; U-rib butt weld position; fatigue stress characteristic; stress ratio

正交异性钢桥面板因其自重轻、受力性能好,成为钢桥结构的主要桥面板形式.但钢桥面板构造复杂,构造之间连接主要采用焊接形式,焊接质量、焊接参与应力问题突出<sup>[1-2]</sup>.为了保证钢桥面板的焊接质量,多数焊接操作均在工厂进行,如顶板与U肋、横隔板与U肋的连接.但钢桥面板结构的长度与体积较大,工厂预制钢桥面板后,仍需在现场将钢桥面板梁段进行现场拼接,通过焊接顶板母材及U肋将各梁段连接成一个完整的钢桥面板<sup>[3-4]</sup>.U肋对接是现场焊接的主要工作之一,由于钢桥面板构造的限制,U肋对接焊缝多采用仰焊操作,其焊接缺陷通常难以避免,成为钢桥面板易产生疲劳损伤的细节之一<sup>[5-6]</sup>.

正交异性钢桥面板横隔板间距在3~4 m不等<sup>[7]</sup>,U肋对接焊缝通常设置在距离横隔板较近的范围. Eurocode3建议纵肋连接处应设置在纵肋反弯点附近,距离横隔板间距1/5处<sup>[8]</sup>,吴冲等从受力特征的角度考虑,为了降低闭口加劲肋对接焊缝的内力,建议对接焊缝位于横隔板间距的1/4处<sup>[9]</sup>.U肋对接焊缝位置的设置不仅影响其受力性能,其疲劳特征的影响也会存在差异,包括U肋对接焊缝位置对其车轮荷载作用下的纵向影响范围,应力幅及应力比的影响.

针对U肋对接焊缝细节的疲劳性能,学者通过实桥测试、有限元计算等手段开展了许多研究.从局部裂纹扩展规律到实桥疲劳寿命评估,研究U肋对接焊缝的疲劳受力特征.建立U肋对接焊缝的焊缝与母材的局部模型,研究该细节裂纹扩展的角度、路径及规律<sup>[10]</sup>;通过建立钢桥面板节段有限元模型,施加移动荷载模型,得到了车轮位置对U肋对接焊缝的影响范围<sup>[11]</sup>;结合实桥动态应变监测结果,计算U肋对接焊缝的损伤累计,得到该细节的疲劳寿命<sup>[12]</sup>.上述研究均基于相同的钢桥面板对接焊缝构造参数研究对接焊缝的疲劳问题.因此,本文从疲劳受力性能角度进行分析,对正交异性钢桥面板U肋对接焊缝的合理设置位置进行验证.

本文建立钢桥面板节段有限元模型,U肋对接焊缝位置分别设置在距离横隔板1/8,1/4及1/2间距的位置,1/8间距参考国内某大桥实桥对接焊缝构造(横隔板间距3 200 mm,U肋对接焊缝距离横隔板400 mm),1/4间距参考文献[9]的对接焊缝建议位置;为了补充说明不同U肋对接焊缝位置对其疲劳性能的影响,增加了1/2间距参数.考虑U肋对接焊缝位于不同纵桥向位置时的应力特征,通过施加车轮移动荷载,计算不同车轮荷载位置下U肋对接焊缝的正应力,得到U肋对接焊缝的影响面,确定U肋对接焊缝布置位置对其作用范围的影响.分别提取U肋对接焊缝各测点的纵向应力分布、横向应力幅变化,确定不同U肋对接焊缝布置位置对该细节所受拉应力值、拉应力范围及应力幅的影响.统计同U肋对接焊缝布置位置下的应力幅、拉应力、压应力并计算其应力比,明确该细节布置位置对其疲劳受力性能的影响.

## 1 有限元模型

采用ANSYS有限元计算软件,建立钢桥面板节段有限元模型<sup>[13]</sup>,示意图如图1所示.模型材料为钢材,弹性模量取为 $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比取为0.3.模型顺桥向取4个横隔板间距,横桥向取7个U肋的宽度,横隔板间距3.2 m,桥面板厚度16 mm,U肋厚度8 mm,U肋间距为300 mm,U肋高度为280 mm.选取U肋对接焊缝分别距离横隔板1/2,1/4及1/8个横隔板间距的位置,代表不同的U肋对接焊缝位置,每个待测U肋对接焊缝上选取3个测点,B1(U肋腹板中间位置)、B2(U肋底板与腹板交接位置)、B3(U肋底部中间位置)作为测点研究U肋对接焊缝位置对其疲劳受力特征的影响.

采用车轮移动荷载,单轮荷载面积与作用值参考《公路钢结构桥梁设计规范(JTGD64—2015)》,荷载面积 $200 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ,荷载大小为60 kN,纵桥向每移动200 mm作为一个加载工况,横桥向每移动150 mm作为一个加载工况,横向距离 $e$ 为荷载面中心线与桥面板中心线之间的距离.对节段模型施加边界约束:横隔板约束 $X, Y, Z$ 这3个方向的平动自由度和转动自由度;U肋两端和顶板四周则约束 $X, Y, Z$ 这3个方向的平动自由度.考虑到U肋对接焊缝主要受到弯曲拉应力,因此提取垂直于U肋对接焊缝方向的正应力,计算不同U肋对接焊缝下的应力及应力幅特征<sup>[14-15]</sup>.全局采用shell63单元模拟,并对带测U肋对接焊缝进行网格加密,有限元模型网格划分如图2所示.

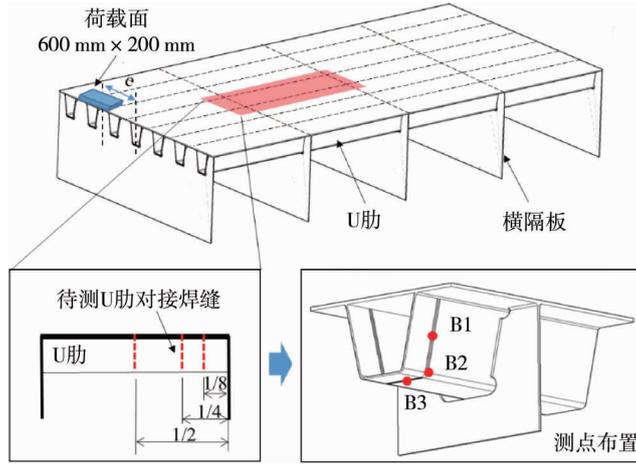


图 1 有限元模型

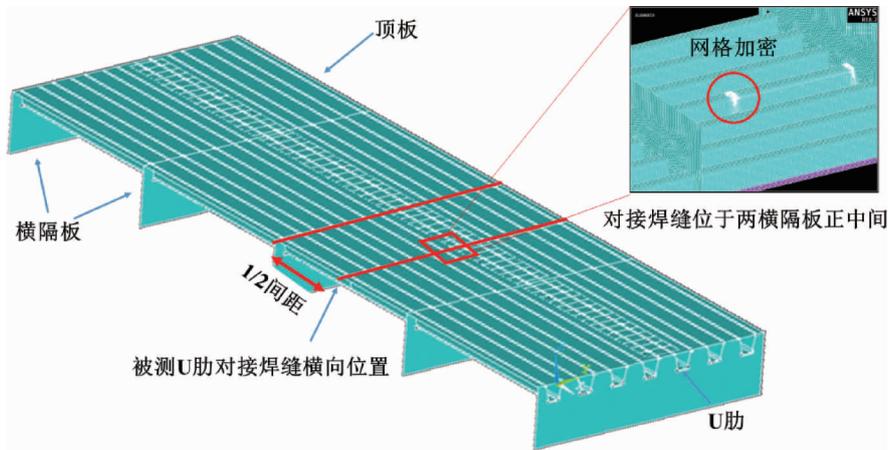


图 2 有限元网格

## 2 影响范围分析

以 B3 测点为例,计算对接焊缝位置分别位于两横隔板间 1/2, 1/4 及 1/8 间距位置时,车轮在不同作用位置下的影响面,如图 3 所示.由图 3 可知,对于不同位置的 U 肋对接焊缝,其影响面的形状近似,且变化趋势及范围基本一致,纵向影响范围较横向影响范围更大,但是应力为 0 MPa 的平面随着 U 肋对接焊缝与横隔板之间的距离增加,出现了整体下移的情况,表明该细节虽然承受拉-压循环作用,但随着对接焊缝纵向位置距离越来越大,车轮荷载作用下的最大压应力减小,最大拉应力增大,拉压应力比发生了变化.

U 肋对接焊缝细节的布置位置仅影响该细节的疲劳应力的定量特征,但并未影响车轮荷载对该细节的作用范围,不同设置位置下,车轮荷载位置对 U 肋对接焊缝的作用范围是一致的,纵向影响范围均为两个横隔板间距,这与文献[11]的研究结果一致.

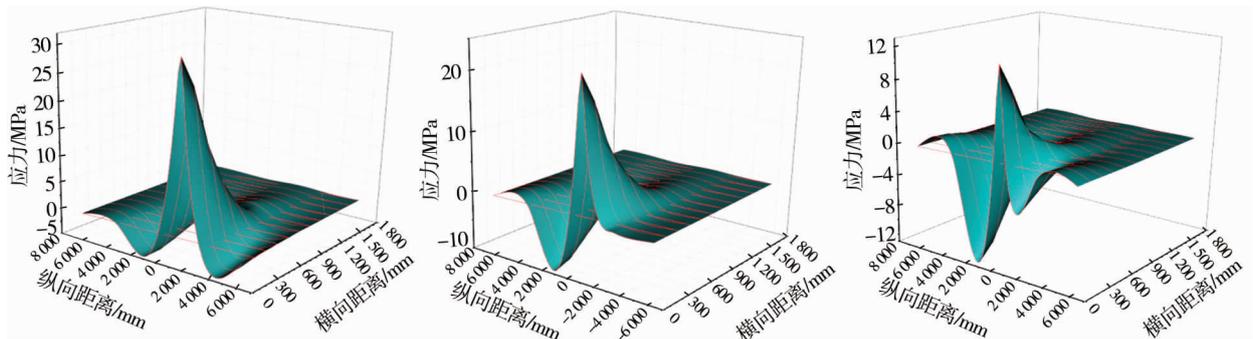


图 3 U 肋对接焊缝(B3)影响面

### 3 受力特征分析

#### 3.1 纵向应力分析

提取测点 B1, B2 与 B3 在横向最不利位置下,随着车轮纵向位置变化的应力分布,如图 4 所示.在不同的 U 肋对接焊缝位置下,各测点的应力变化趋势基本保持一致,但应力曲线呈现随着 U 肋对接焊缝位置变化的横向移动,当荷载位于测点正上方时各测点的拉应力均达到最大值,应力峰值存在明显差异.

3 个测点中, B3 测点对车辆荷载作用的响应最为明显, B2 测点次之, B1 测点对应力的敏感程度最低.各测点在 H2, H3 范围内作用较明显,会出现明显的拉压应力变换,当车辆荷载位于各测点的正上方时拉应力最大,拉应力主要集中在被测点前后一定范围内,且不超过一个横隔板间距,而车辆荷载位于非 U 肋对接焊缝所处横隔板内时,各测点主要承受压应力或者较小的拉应力.各测点的最大应力值均位于 H3 横隔板间距内,最大压应力作用的位置基本一致,距离 H2 与 H3 横隔板 1 000 mm 左右. U 肋对接焊缝位置从距离横隔板 1/8 到 1/2 间距变化时,最大压应力值呈减小趋势.

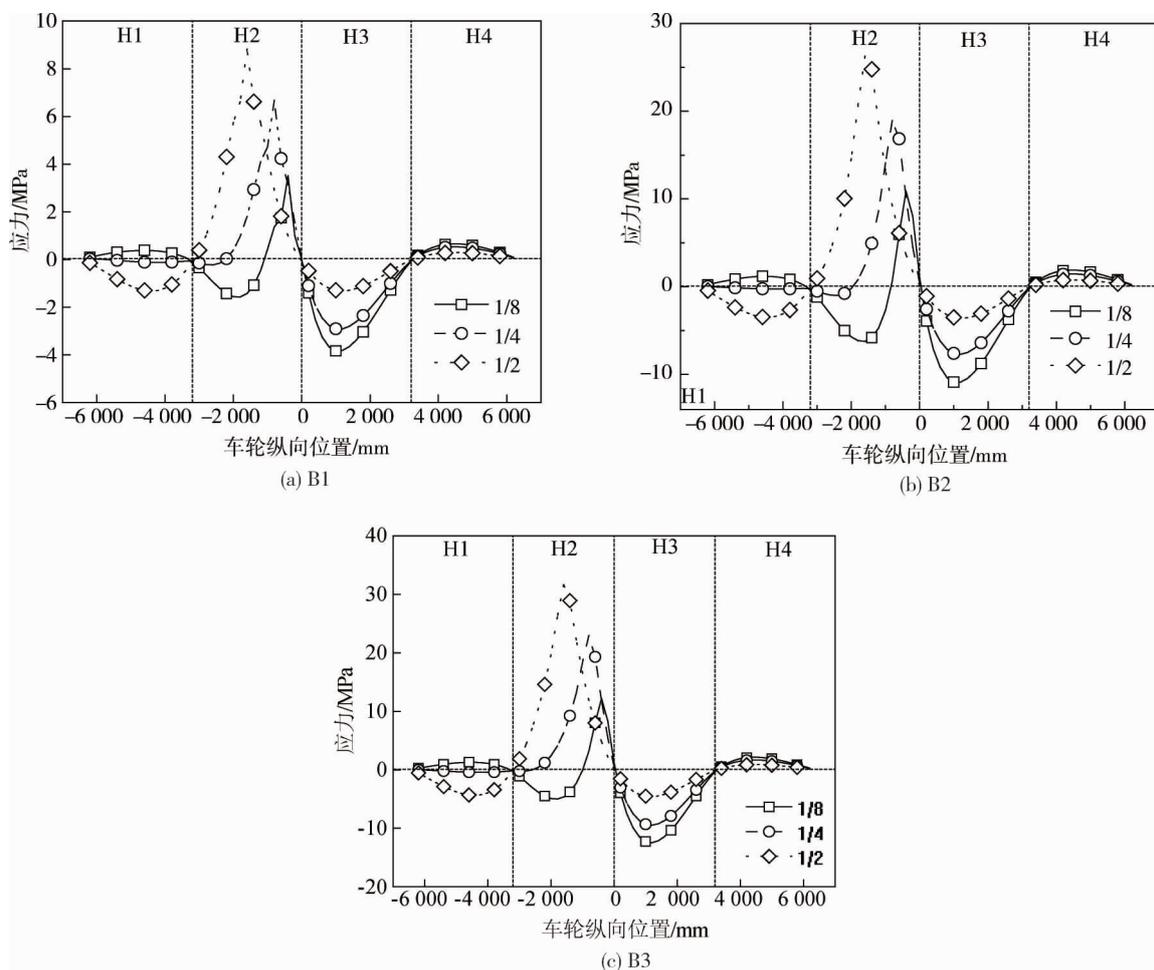


图 4 纵向应力变化

各测点主要在 U 肋对接焊缝所在横隔板间距内承受拉应力,对比 3 个测点的拉应力作用范围发现,如图 5 中阴影部分.随着 U 肋对接焊缝位置与横隔板距离的增加, U 肋对接焊缝承受的持续拉应力作用的范围逐渐增加,各测点拉应力作用范围存在较小差异,取最小拉应力区间,分别为测点纵向前后 1 000, 1 800 与 3 200 mm. U 肋对接焊缝位置从距离横隔板 1/8 到 1/2 间距变化时,该细节承受的拉应力逐渐增大,且拉应力作用范围增加.

#### 3.2 横向应力幅分析

提取测点 B1, B2 与 B3 在纵向最不利位置下,随着车轮横向位置变化的应力幅变化,如图 6 所示.各测点的所受应力幅随着荷载横向距离的增加呈现减小趋势,并在横向距离大于 600 mm 范围后应力幅趋于

平缓,应力幅下降幅度超过 15%,U 肋对接焊缝的布置位置不影响其横向影响范围.

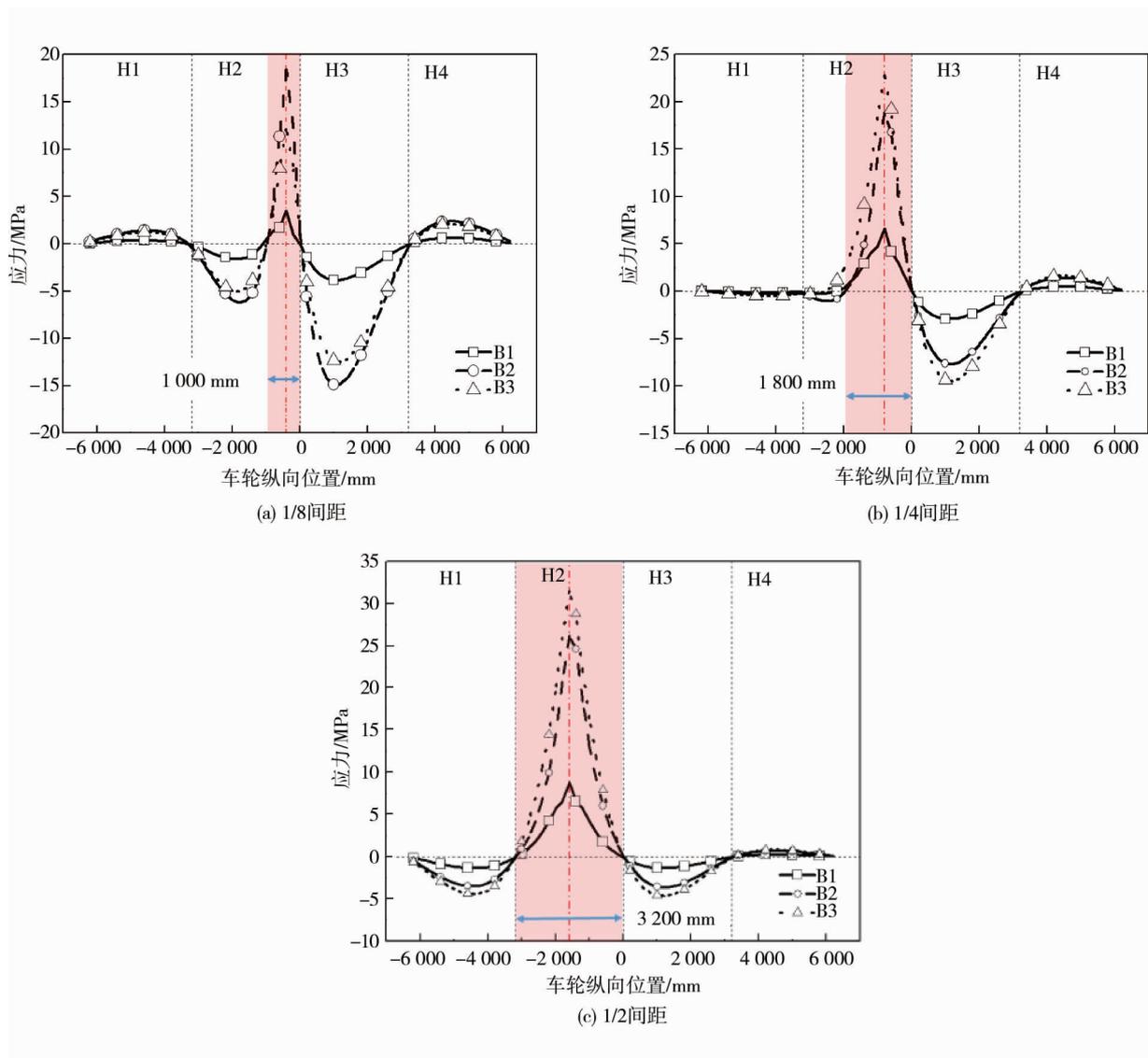


图 5 拉应力作用范围

应力幅是影响钢桥面板构造细节疲劳性能重要的因素之一<sup>[16]</sup>,其中 B3 测点的应力幅最大,受到车轮荷载作用最明显.对于不同 U 肋对接焊缝位置,各测点的应力幅变化趋势一致,应力幅大小存在差异,U 肋对接焊缝位置从距离横隔板 1/8 到 1/2 间距变化时,应力幅呈现增大趋势,增值可达 40% 以上.U 肋对接焊缝位置的布置对该细节的车辆荷载作用下的应力幅影响显著,对于同一构造细节,根据 S-N 曲线的定义,其应力幅越大,所能承受的应力循环次数就越少,疲劳寿命越短,因此从应力幅角度分析,当 U 肋对接焊缝布置在靠近横隔板部位一定距离时,相对其布置在两横隔板中间时的疲劳受力性能更好.

### 3.3 应力比对比

《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中对钢桥构件疲劳强度与寿命的验算主要采用应力幅

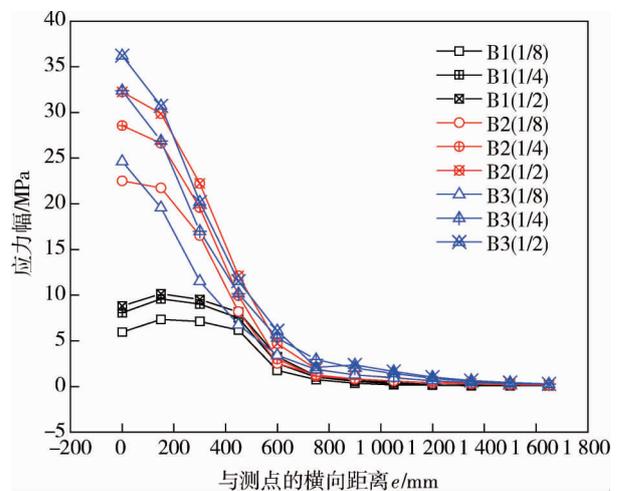


图 6 横向应力幅变化

值,通常未考虑拉-压应力比对疲劳性能的影响.然而相关研究表明,应力比会影响疲劳裂纹扩展门槛值、疲劳强度与裂纹扩展速率.因此,分别计算了U肋对接焊缝在不同布置位置时,车轮荷载作用下的拉-压应力比<sup>[17-20]</sup>.提取U肋对接焊缝各测点在不同位置下的疲劳应力特征值应力幅、拉应力与压应力,如图7所示,并根据式(1)计算应力比,其中 $\sigma_{\max}$ 表示最大应力, $\sigma_{\min}$ 表示最小应力,因U肋对接焊缝承受拉压循环荷载,最大应力即拉应力峰值,最小应力即压应力峰值.应力比绝对值越小,表示拉应力占比越大,应力比变化如图7中右侧纵坐标所示.U肋对接焊缝位置从1/8变化到1/2间距时,各测点的应力幅增大,拉应力增大,压应力减小,应力比从 $R \approx -1.0$ 增大到 $R \approx -0.1$ ,应力比绝对值呈减小趋势.随着U肋对接焊缝与横隔板距离的增加,该细节从以对称循环应力疲劳转变为以拉应力疲劳为主.相关试验证明,应力比 $R$ 增大,疲劳裂纹扩展的门槛值会降低<sup>[21]</sup>,即更容易发生疲劳开裂.因此,从应力比角度分析,U肋对接焊缝位置会影响该细节裂纹扩展过程,U肋对接焊缝布置在靠近横隔板时,其抗疲劳性能相对于1/2间距位置时较好.

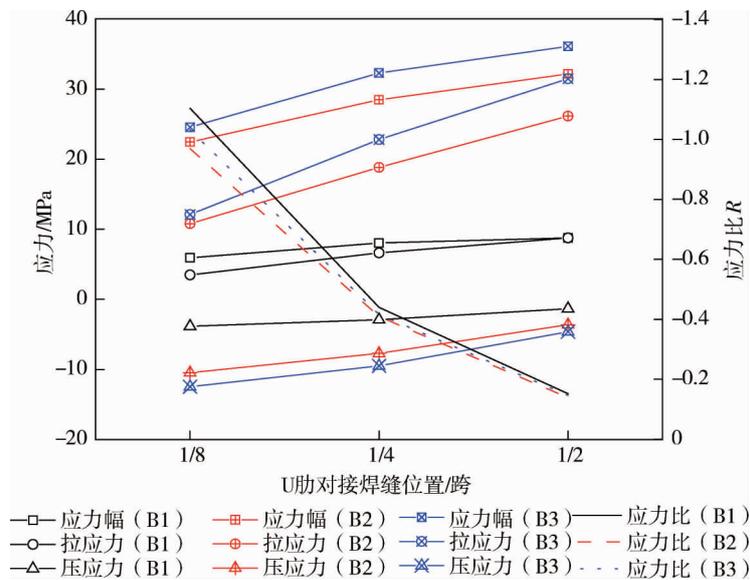


图7 应力特征值对比

上述计算分析结果表明,U肋对接焊缝位置会影响该细节的疲劳受力性能,当U肋对接焊缝靠近横隔板时,移动车轮荷载作用下,其最大压应力值增大,最大拉应力减小,应力幅减小,应力比减小,且拉应力作用范围明显降低.因此,从疲劳受力特征的角度分析,U肋对接焊缝布置在靠近横隔板部位时,其抗疲劳性能相对于布置在横隔板中间位置更好.此外,考虑到横隔板位置焊接连接构件较多,存在较大的残余应力,将U肋对接焊缝设置在靠近横隔板一定距离范围内,从受力特征与疲劳受力性能方面分析均是合理的.

## 4 结论

1) U肋对接焊缝的布置位置对其疲劳受力特征影响明显,但不影响车轮荷载对该细节的影响范围,U肋对接焊缝设置在不同位置时,纵向影响范围均为两个横隔板间距.

2) 车轮荷载作用下,U肋对接焊缝与横隔板之间距离的增加时,该细节承受的应力幅与拉应力增大,U肋对接焊缝所处横隔板范围内的拉应力作用范围明显扩大.

3) U肋对接焊缝位置对应力比的影响显著,随着U肋对接焊缝与横隔板距离的增加,该细节的拉-压应力比增大,从以对称循环应力疲劳转变为以拉应力疲劳为主.从疲劳受力性能角度分析,U肋对接焊缝布置靠近横隔板距离一定范围内时,其抗疲劳性能相对于布置在两横隔板中间位置时更好.

## 参考文献:

[1] Yokozeki K, Miki C. Fatigue evaluation for longitudinal-to-transverse rib connection of orthotropic steel deck by using

- structural hot spot stress[J]. *Welding in the World*, 2016, 60(1):83-92.
- [2] Kainuma S, Ahn J H, Jeong Y S, et al. Evaluation of structural responses on artificial fatigue crack for bulb rib orthotropic deck[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2015, 18(9):1355-1370.
- [3] 杨永强,刘春风,魏云祥.小拼装场地下大型钢箱梁拼装与架设技术[J].*钢结构*, 2013, 28(6):73-76.
- [4] 代希华,姚志安.悬索桥钢箱加劲梁设计与制造技术的分析研究[J].*公路*, 2012(4):99-107.
- [5] 梁肇伟.厦门海沧大桥钢箱梁的装配焊接[J].*钢结构*, 2001, 16(3):3-6.
- [6] Yang M, Kainuma S, Jeong Y S. Structural behavior of orthotropic steel decks with artificial cracks in longitudinal ribs[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 141:132-144.
- [7] 中交公路规范设计院有限公司.公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S].北京:人民交通出版社, 2015.
- [8] British Constructional Steelwork Association. EN1993—2:2006 Design of steel structures part2: Steel bridges[S]. British: BSI, 2006.
- [9] 吴冲,袁远,姜旭.正交异性钢桥面板闭口加劲肋对接焊缝疲劳性能评价[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4):18-25.
- [10] 朱伟,吉伯海,傅中秋.轮迹位置对钢桥面板 U 肋对接焊缝疲劳性能的影响[J].*广西大学学报(自然科学版)*, 2015(4):998-1005.
- [11] 姚悦,吉伯海,傅中秋,等.车轮位置对钢桥面板 U 肋对接焊缝的影响范围分析[J].*江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2019,33(2):108-113.
- [12] 王益逊,吉伯海,姚悦,等.正交异性钢桥面板 U 肋对接焊缝疲劳损伤度分析[J].*工业建筑*, 2016, 46(6):161-165.
- [13] Fu Z, Ji B, Zhang C, et al. Experimental study on the fatigue performance of roof and U-rib welds of orthotropic steel bridge decks[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017(3):1-9.
- [14] Farreras-Alcover I, Chryssanthopoulos M K, Andersen J E. Data-based models for fatigue reliability of orthotropic steel bridge decks based on temperature, traffic and strain monitoring[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 95:104-119.
- [15] 向泽.正交异性钢桥面板横隔板弧形切口的疲劳性能研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [16] 何东升,肖海珠,张晓勇.公路正交异性钢桥面板细节疲劳研究[J].*公路交通科技*, 2016, 33(1):76-81.
- [17] Sun C, Hong Y. Correlation of crack growth rate and stress ratio for fatigue damage containing very high cycle fatigue regime [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2012, 2(3):11-14.
- [18] 徐威华,苗张木.应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响[J].*大连交通大学学报*, 2017, 38(1):117-120.
- [19] 王坤茜,徐人平,林捷晖.考虑应力比的疲劳裂纹扩展概率模型[J].*航空动力学报*, 2009, 24(9):2012-2018.
- [20] 张卫国,田洪,宓为建,等.应力比  $r$  对构件疲劳裂纹扩展的影响分析[J].*中国工程机械学报*, 2008, 6(4):403-408.
- [21] 吴健栋,蔡志鹏,潘际奎,等.疲劳裂纹扩展门槛值的影响因素综述[J].*热力透平*, 2013, 42(2):84-89.