

# 正交异性钢桥面板纵隔板构造参数对 疲劳受力特征影响

高玉强,吉伯海,曹雪坤,傅中秋

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

**摘 要** 目的 研究斜拉桥纵隔板构造参数对正交异性钢桥面板受力性能的影响,为钢箱梁实桥养护提供参考。方法 参照苏通大桥尺寸利用 ABAQUS 建立钢桥面板节段模型,分析了横隔板围焊端和顶板-U肋焊缝两处的最不利荷载工况,基于最不利荷载工况提取各节点处正应力幅来研究斜拉桥纵隔板形式和厚度对钢桥面板疲劳细节的影响。结果 与纵隔板紧邻U肋中,U肋两侧横隔板焊趾处应力幅相差较小,而靠近纵隔板侧顶板-U肋焊缝、围焊端U肋焊趾处应力幅小于远离侧;采用实腹式纵隔板会使得顶板-U肋焊缝处应力幅下降,但会导致横隔板围焊端细节处应力幅上升;纵隔板厚度增加能降低顶板-U肋焊缝处应力幅,对横隔板围焊端细节影响较小。结论 实腹式纵隔板能够降低紧邻U肋中顶板-U肋焊缝处应力幅,实桥建议可适当降低该部位的检测频率。

**关键词** 斜拉桥;正交异性钢桥面板;纵隔板;疲劳应力

中图分类号 TU391;U441.4

文献标志码 A

## Influence of Structural Parameters of Orthotropic Steel Bridge Deck Longitudinal Clapboard on Fatigue Stress Characteristics

GAO Yuqiang,JI Bohai,CAO Xuekun,FU Zhongqiu

(College of Civil and Transportation Engineering,Hohai University,Nanjing,China,210098)

**Abstract:** In order to study the influence of longitudinal clapboard parameters on the mechanical performance of orthotropic steel deck of cable-stayed bridge, and the maintenance reference of steel box girder real bridge was provided. According to the size of Su-Tong Yangtze River Highway Bridge, the segment model of steel deck was established by ABAQUS. The most critical loading conditions of the deck-to-rib welds and the diaphragm-to-rib welds were defined. Based the most critical condition, the effects of the form and thickness of longitudinal clapboard on fatigue details

收稿日期:2021-12-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFE0128700)

作者简介:高玉强(1998—),男,博士研究生,主要从事钢桥疲劳与维护等方面研究。

were studied by extracting the normal stress amplitude at each node. The results showed that among the u-ribs adjacent to the longitudinal clashboard, the difference of stress amplitude at diaphragm weld toe on different sides of u-ribs is small, the stress amplitude of the deck-to-rib welds and the u-rib weld toe of the diaphragm-to-rib welds near the longitudinal clashboard is less than that far away. Using solid abdominal longitudinal clashboard will reduce the stress amplitude of deck-to-rib welds and improve the stress amplitude of diaphragm-to-rib welds. The increase of longitudinal clashboard thickness can reduce the stress amplitude at the deck-to-rib welds, and has less effect on the diaphragm-to-rib welds. Based on the above results, reducing the detection times of cracks at the deck-to-rib welds is recommended.

**Key words:** cable-stayed bridge; orthotropic steel deck; longitudinal clashboard; fatigue stress

钢箱梁由于重量轻、受力性能好等优势,在大跨径斜拉桥中被广泛采用<sup>[1-4]</sup>。正交异性钢桥面板作为钢箱梁的主要承重结构,由面板、纵肋和横肋焊接而成,但由于其结构复杂,焊缝数量众多,在车辆循环荷载、焊接缺陷、焊接残余应力等不利因素影响下,部分部位易产生疲劳损伤,如顶板-U肋焊缝和横隔板围焊端等<sup>[5-6]</sup>。大跨度斜拉桥通常设置纵隔板来分担斜拉索引起的轴向力,而纵隔板的引入会影响钢桥面板局部刚度,可能导致疲劳裂纹分布规律的变化。

实桥检测发现,纵隔板两侧裂纹主要分布在与纵隔板附近U肋位置上,然而与纵隔板紧邻的U肋上裂纹数目远小于这些位置,因此推断纵隔板可能对钢桥面板的疲劳受力特征产生一定影响,且影响机制相对复杂。针对纵隔板对钢箱梁疲劳性能的影响,部分学者开展了相关研究。宋永生等<sup>[7]</sup>基于有限元分析,发现纵隔板对U肋对接焊缝的影响范围为1个U肋。张一林<sup>[8]</sup>通过有限元分析,发现车辆荷载作用引起的纵隔板处应力集中、交变应力以及较大的应力幅是导致纵隔板节点疲劳开裂的主要原因。欧阳洋等<sup>[9]</sup>基于有限元分析,明确了纵隔板厚度对纵隔板-面板部位的影响,认为纵隔板-面板具有无限寿命。李治<sup>[10]</sup>进一步对不同结构形式的纵隔板进行了研究,比较了钢管式、槽钢式和角钢式纵隔板的疲劳性能,认为槽钢式纵隔板疲劳性能最优,角钢式次之,钢管

式最差。

由于纵隔板自身开裂现象较为突出,国内外研究主要集中在纵隔板自身或纵隔板与面板焊缝的疲劳开裂性能的分析。而实桥检测结果显示,纵隔板也可能导致钢桥面板疲劳受力特征的变化。为进一步验证纵隔板对钢桥面板构造细节疲劳特征的影响,笔者建立了钢桥面板节段模型,考虑不同纵隔板结构形式以及厚度,从受力特征角度开展纵隔板对钢桥面板细节疲劳的影响研究,从而明确带纵隔板构造的钢桥面板重点损伤部位,为实桥养护提供参考。

## 1 有限元模型

依据文献[11-12],参照苏通大桥实际尺寸建立钢箱梁节段模型(见图1)。节段模型采用壳单元,横桥向宽为35 400 mm,共包含58道U肋,每道U肋中心线的间距为600 mm,U肋上开口宽度为300 mm,底部宽度为180 mm,厚度为8 mm。纵桥向长17 000 mm,纵桥向包含5道横隔板,每道横隔板间距为4 000 mm,其中1号和5号横隔板的厚度为12 mm,剩余横隔板厚度为10 mm。顶板厚度为14 mm,底板厚度为12 mm,约束模型前后两侧顶板、腹板、底板、U肋和纵隔板的全部平动和转动自由度,采用Q345钢材料属性,弹性模量为 $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比为0.3,仅考虑材料的弹性性能。

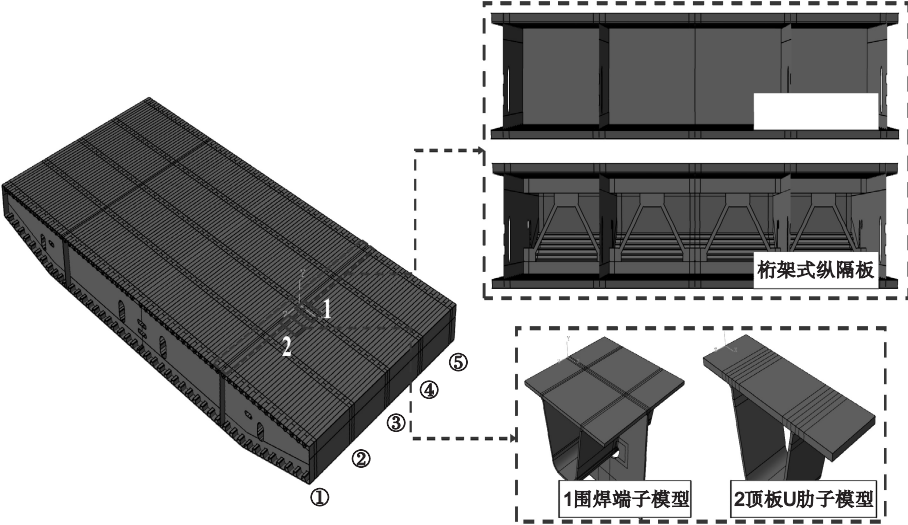


图1 节段模型

Fig. 1 Segmental model

由于笔者主要研究纵隔板形式和参数变化对构造细节的影响,因此不与无纵隔板时进行比较。模型在重车道与快车道间布置实腹式纵隔板和桁架式纵隔板,桁架式纵隔板厚度为14 mm,由于实桥中仅实腹式纵隔板存在厚度变化,因此采用实腹式纵隔板进行纵隔板厚度变化的影响分析,设置实腹式纵隔板厚度为14~24 mm,间隔为2 mm。

文中采用节段模型-子模型的计算方式,子模型选取位置如图1所示,图2为典型疲劳细节子模型。子模型采用实体单元模拟,采用C3D8R六面体单元进行划分。顶

板-U肋焊缝子模型长度为200 mm,宽度为600 mm,全局网格尺寸为10 mm,网格细化区网格尺寸为1 mm。横隔板围焊端子模型长度为600 mm,宽为600 mm,横隔板高度为515 mm,全局网格尺寸为10 mm,网格细化区网格尺寸为1 mm。全局网格与关注区域间设置过渡区。研究过程中子模型采用统一的网格尺寸,仅改变纵隔板参数和子模型位置来确保数据分析的准确性。根据文献[11-13],选取横隔板围焊端中U肋焊趾和横隔板焊趾,顶板-U肋焊缝中顶板焊趾与焊根等易开裂部位开展研究。

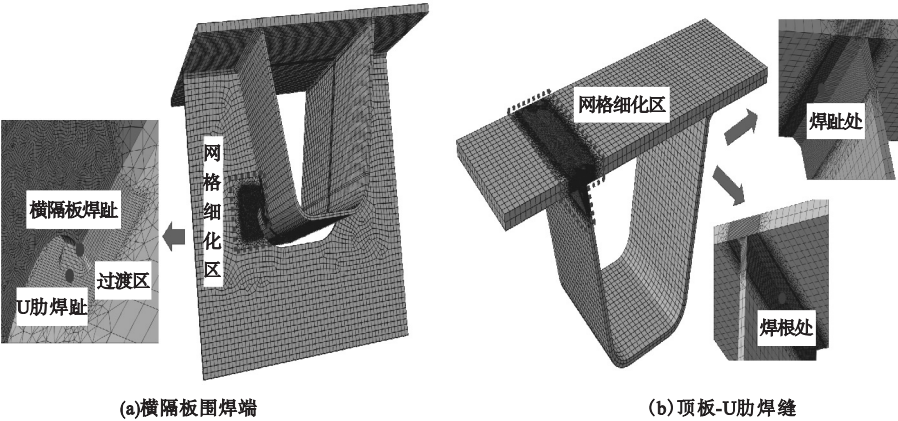


图2 子模型

Fig. 2 Submodel

为便于下文描述,将纵隔板相邻 U 肋中两侧顶板-U 肋焊缝的焊趾和焊根分别命名为节点 A、节点 A'、节点 B、节点 B',横隔板

围焊端中横隔板焊趾命名为节点 C、节点 C',围焊端 U 肋焊趾即 U 肋表面与焊缝连接处命名为节点 D、节点 D'(见图 3)。

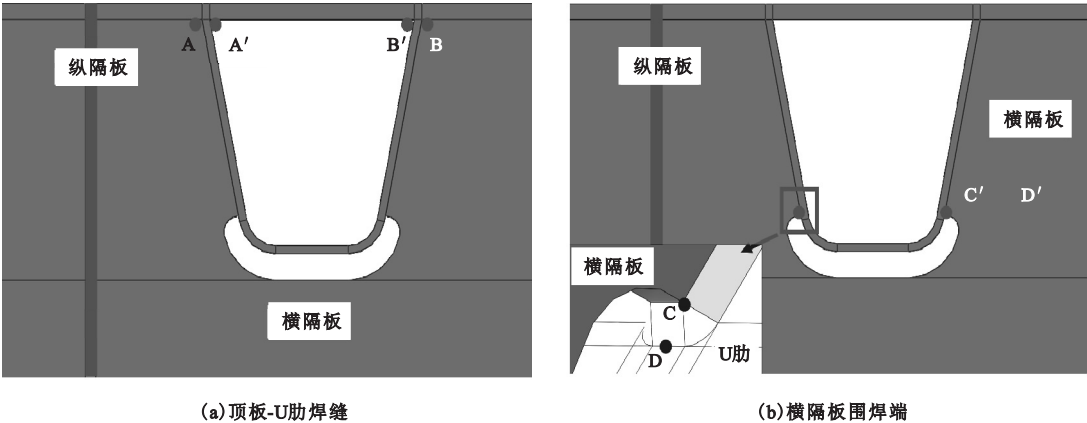


图 3 节点编号  
Fig. 3 Number of joints

车辆荷载采用疲劳荷载模型Ⅲ中的单侧双车轮进行加载<sup>[14]</sup>。不考虑铺装对车轮荷载的分散作用,车轮重量为 60 kN,加载面积为 700 mm(横桥向)×300 mm(纵桥向),在有限元模型中简化为 0.29 MPa 的面荷载。

利用 Fortran 编制的 DLOAD 子程序进行加载。横桥向,设车辆荷载作用中心距坐标原点的距离为  $G$ ,布置 -150 mm、0 mm、150 mm、300 mm、450 mm、600 mm、750 mm、900 mm 等 8 种荷载工况(见图 4)。纵桥向,荷载从①号横隔板加载至④号横隔板,加载步间距为 200 mm,共计 62 步(见图 5)。

## 2 纵隔板对相邻 U 肋两侧疲劳细节影响

由实桥检测结果可知,纵隔板相邻 U 肋不同侧裂纹分布情况存在差异,考虑到可能是由于纵隔板的设置改变了其受力特征,因此以 14 mm 实腹式纵隔板为例,提取不同横向荷载工况下各节点处正应力来研究纵隔板对相邻 U 肋不同侧上横隔板围焊端和顶板-U 肋焊缝的影响。

U 肋两侧横隔板围焊端横隔板焊趾处(节点 C、节点 C')正应力  $\sigma_z$  时程曲线如图 6 所示。由图可知,在不同横向荷载工况作用下,U 肋两侧横隔板焊趾处的主导应力不同。当  $G > 0$  时,节点 C'以拉应力为主,节点 C 以压应力为主,当荷载纵桥向作用在第 20 步时,正应力有所减小。当荷载作用在  $G = 600$  mm处时,两节点处应力幅均达到最大值,其中节点 C'为 59.2 MPa,节点 C 为 61.8 MPa,相差为 4.4%,基本可忽略不计。当  $G \leq 0$  时,两节点处正应力值均较小,可知当荷载作用在纵隔板一侧时,对另外一侧围焊端的影响较小。同时考虑到疲劳细节受拉应力循环作用时更易开裂,认为远离纵隔板

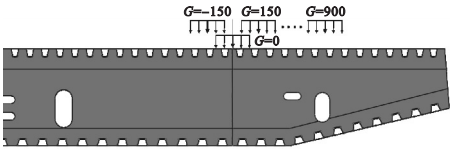


图 4 横桥向加载工况  
Fig. 4 Transverse loading condition

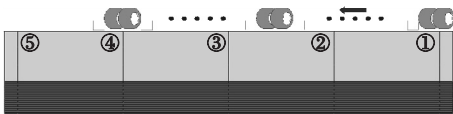


图 5 纵桥向加载工况  
Fig. 5 Longitudinal loading condition



侧横隔板焊趾(节点 C')更易开裂。

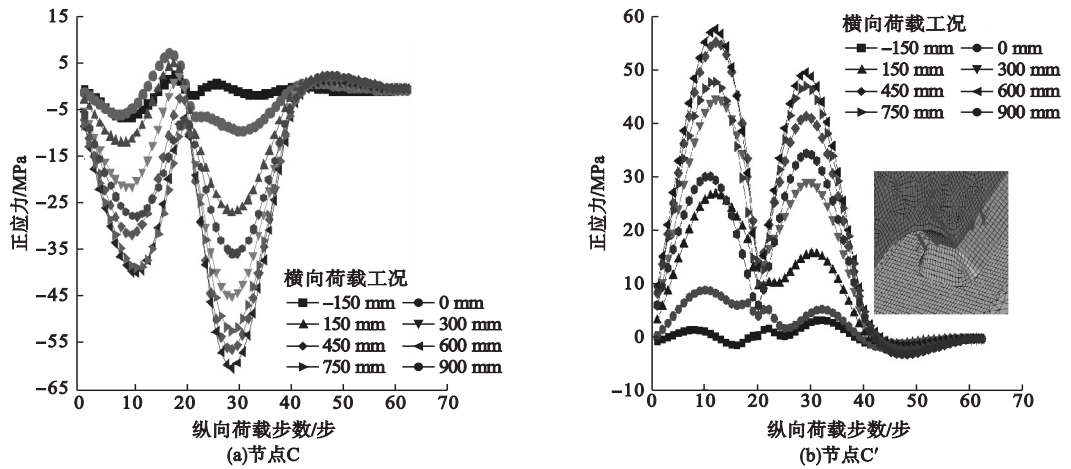


图 6 围焊端横隔板焊趾正应力时程曲线

Fig. 6 Time history curves of normal stress at weld toe of diaphragm at girth weld end

U 肋两侧横隔板围焊端 U 肋焊趾处(节点 D、节点 D')正应力  $\sigma_y$  时程曲线如图 7 所示。由图可知,横隔板围焊端两侧 U 肋焊趾处(节点 D、节点 D')应力变化趋势与对应侧横隔板焊趾处(节点 C、节点 C')相似,当  $G > 0$  时,节点 D'以拉应力为主,节点 D 以压应力为主,当荷载纵桥向作用在第 20 步时,正

应力有所减小。当  $G \leq 0$  时,应力变化幅度相对较小。当荷载作用在  $G = 600$  mm 时应力幅达到最大值,节点 D'的应力为 78.2 MPa,节点 D 的应力为 55.3 MPa,相差为 29.3%。纵隔板能够降低靠近纵隔板侧围焊端 U 肋焊趾处的应力幅,降低其开裂的风险,与实桥检测结果一致。

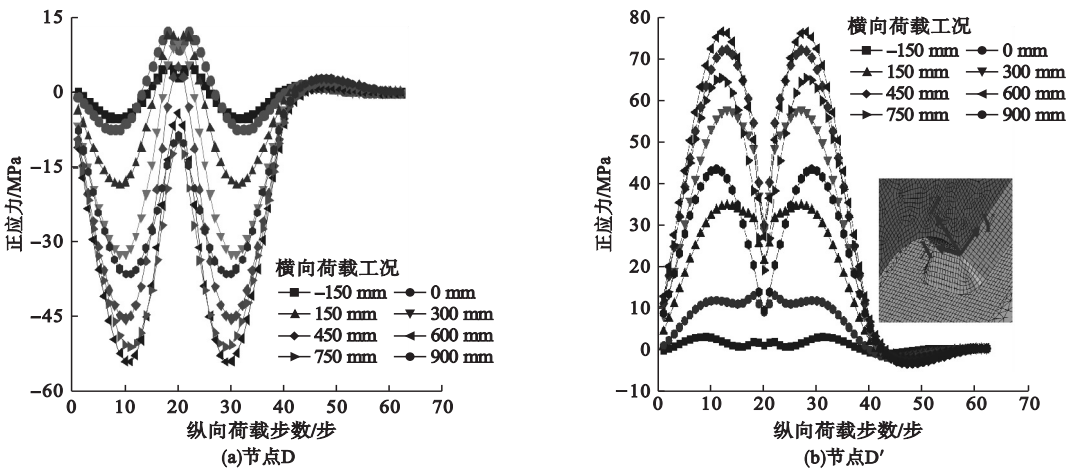


图 7 围焊端 U 肋焊趾正应力时程曲线

Fig. 7 Normal stress time history curves of U-rib weld toe at girth weld end

顶板-U 肋焊缝两侧焊趾和焊根处正应力  $\sigma_x$  时程曲线如图 8、图 9 所示。由图 8、图 9 可知,纵隔板相邻 U 肋两侧焊根和焊趾处正应力在车辆荷载作用均存在拉压循环。其中靠近纵隔板侧顶板-U 肋焊缝焊趾和焊根

(节点 A、节点 A')处正应力幅均在  $G = 300$  mm 时达到最大值,节点 A 处为 47.9 MPa,节点 A'处为 22.3 MPa。

远离纵隔板侧顶板-U 肋焊缝焊趾和焊根侧(节点 B、节点 B'),在  $G = 900$  mm 处达

到最大应力幅,节点 B 处为 68.2 MPa,相较于靠近纵隔板侧增加了 42.4%,节点 B'处为 37.2 MPa,相较于靠近纵隔板侧增加了 66.8%。由此可见,纵隔板能够降低相邻 U 肋靠近纵隔板侧顶板 - U 肋焊缝处的应力

幅,降低其开裂的风险,这与实桥中靠近纵隔板一侧顶板 - U 肋焊缝处裂纹少于远离纵隔板侧的检测结果一致。后文研究中选取节点 A、节点 B 作为主要研究对象,明确纵隔板形式和厚度变化对其影响。

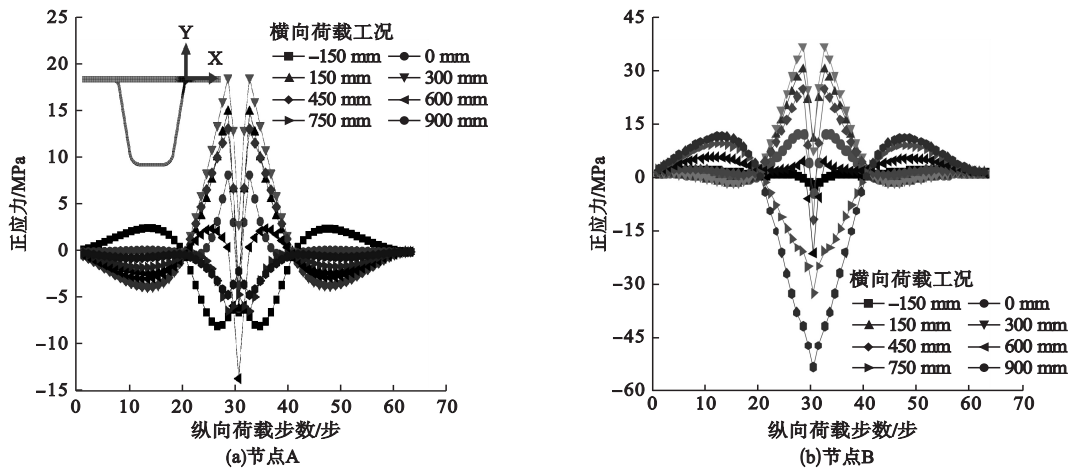


图 8 顶板 - U 肋焊缝焊趾处正应力时程曲线

Fig. 8 Time history curves of normal stress at weld toe of top plate u-rib welds

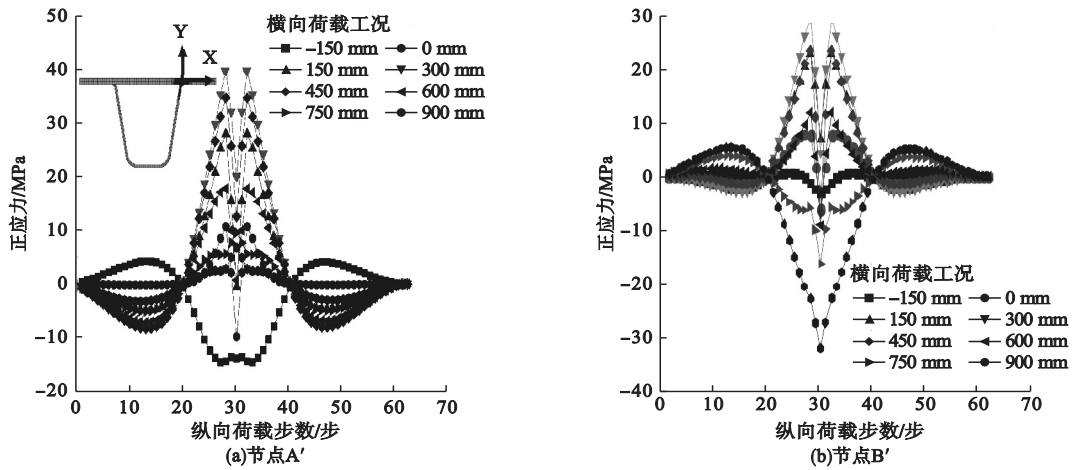


图 9 顶板 - U 肋焊缝焊根处正应力时程曲线

Fig. 9 Time history curves of normal stress at weld root of top plate u-rib welds

3 纵隔板形式影响分析

3.1 横隔板围焊端

不同形式的纵隔板刚度和抵抗变形的能力有所不同,对相邻 U 肋上各疲劳细节可能存在影响,因此为分析纵隔板形式对于横隔板围焊端的影响,在最不利荷载工况下提取节点 C'、节点 D'的应力时程曲线(见图 10)。

由图可知,纵隔板形式的变化并不改变各节点处的应力变化趋势,各节点应力均呈现双峰值分布,当荷载纵桥向作用在第 20 步时应力有所下降。而相较于桁架式纵隔板,实腹式纵隔板处各节点的正应力幅均有所增大。对于节点 C',正应力幅由 51.6 MPa 增加为 59.2 MPa,增加了 14.7%,对于节点 D',正应力最大值由 69.7 MPa 增加为 78.2 MPa,

增加了12.2%。实腹式纵隔板的设置会导致横隔板围焊端处应力幅增大,增加了开裂的可能性,考虑到文中研究部位与纵隔板相

邻且在实桥中处在重车道轨迹线下,因此建议实桥检测时加强对实腹式纵隔板处该部位裂纹萌生和扩展情况的跟踪检测。

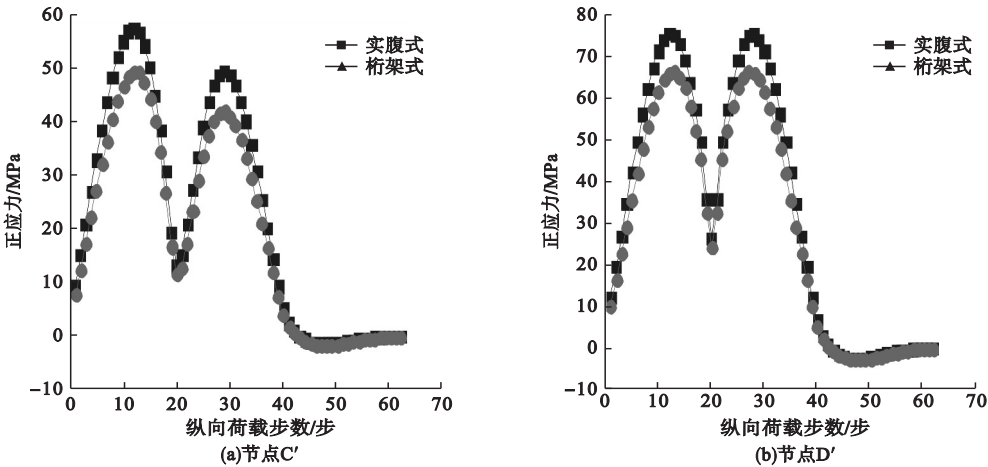


图 10 围焊端正应力时程曲线

Fig. 10 Normal stress time history curves of girder welding end

3.2 顶板-U肋焊缝

不同纵隔板形式下,靠近纵隔板侧顶板-U肋焊缝焊趾(节点A)和焊根(节点A')处应力时程曲线如图11所示。由图可知,节点A、节点A'处的应力变化趋势不随纵隔板形式而改变。均呈现双峰值分布,存在拉压循环,当荷载纵桥向作用在第28步处时应力达到最大值,当作用在第30步处时应力有所减小。与围焊端细节不同,实腹式纵隔板处焊趾和焊根处正应力幅相较于桁架式

有所减小:节点A处由50.1 MPa减少到40.0 MPa,减小了20.2%,节点A'处由27.4 MPa减少到18.5 MPa,减小了32.5%。实腹式纵隔板的设置能够有效地减小相邻顶板-U肋焊缝顶板焊趾和焊根处的正应力幅,降低开裂的风险,其中焊根处受纵隔板板形式的影响相对较大。因此实桥中可以降低实腹式纵隔板相邻U肋顶板-U肋焊缝处裂纹跟踪频率。

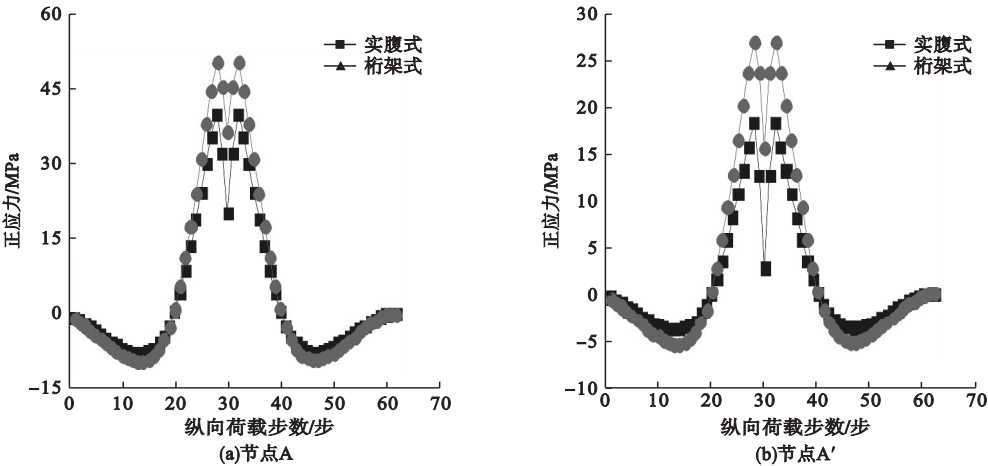


图 11 顶板-U焊缝正应力时程曲线

Fig. 11 Normal stress time history curves of top plate u-rib welds

4 纵隔板厚度影响分析

4.1 横隔板围焊端

为分析纵隔板厚度变化对横隔板围焊端部位疲劳性能的影响,提取各节点的应力幅(见图12)。由图可知,随着纵隔板厚度的增加,节点C'、节点D'处的正应力幅均有所增加,但增加的幅度较小。对于节点D',纵隔板厚度从14 mm增加到24 mm,正应力幅由78.2 MPa增加到79.1 MPa,应力幅增加了1.2%;对于节点C',正应力幅由59.2 MPa增加到60.1 MPa,应力幅增加了1.5%。由此可见,纵隔板厚度的增加对于相邻U肋远离纵隔板一侧横隔板围焊端的影响基本可以忽略,考虑横隔板围焊端处受力是由于横隔板面外变形和U肋鼓曲共同作用导致,而实腹式纵隔板能够限制靠近纵隔板侧横隔板的变形,对于远离纵隔板侧横隔板变形的限制能力较小,并且对U肋的扭转变形限制较小,因此导致远离纵隔板侧横隔板围焊端受纵隔板厚度变化的影响较小。

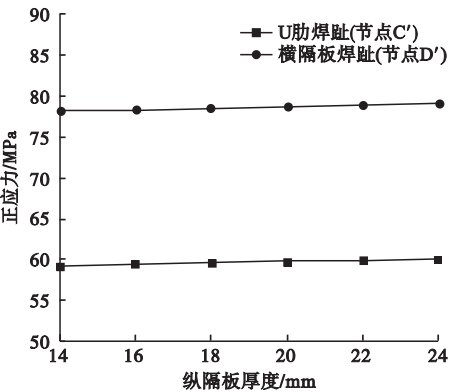


图 12 围焊端正应力幅

Fig. 12 Normal stress amplitude of girth welding end

4.2 顶板-U肋焊缝

为分析纵隔板厚度变化对顶板-U肋焊缝部位疲劳性能的影响,提取各节点处的正应力幅(见图13)。由图可知,随着纵隔板厚度的增加,节点A、节点A'处的正应力幅均有所下降。对于节点A,纵隔板厚度从14 mm增加到24 mm,正应力幅由47.9 MPa

减小到35.5 MPa,应力幅减小了25.9%;对于节点A',正应力幅从22.3 MPa减小到16.0 MPa,应力幅减小了28.3%。由此可见,纵隔板厚度的增加能够有效地降低顶板-U肋焊缝处的正应力幅,降低细节处开裂的可能性。考虑是由于纵隔板厚度的增加导致纵隔板附近局部刚度增大,在分担车辆荷载的同时,降低了顶板的相对变形,进而降低了细节处的应力幅。在后续的裂纹跟踪中可适当降低实腹式纵隔板处顶板-U肋焊缝的跟踪频率。

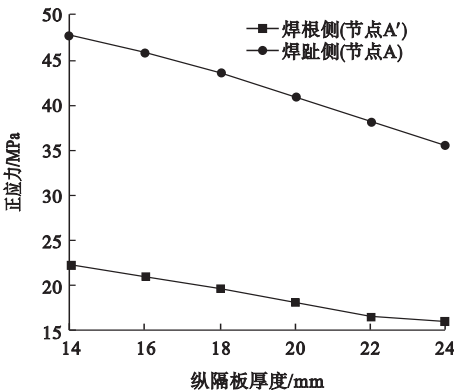


图 13 顶板-U肋焊缝应力幅

Fig. 13 Normal stress amplitude of u-rib welds

5 结 论

- (1) 设置纵隔板会引起相邻U肋中靠近纵隔板侧顶板-U肋焊缝、横隔板围焊端U肋焊趾处应力幅下降;而对U肋两侧横隔板围焊端横隔板焊趾影响较小。
- (2) 与桁架式纵隔板相比,采用实腹式纵隔板会使得顶板-U肋焊缝处应力幅降低,但会导致横隔板围焊端处应力幅上升。
- (3) 实腹式纵隔板厚度增加对横隔板围焊端影响较小,但可降低紧邻顶板-U肋焊缝应力幅。因此,实桥建议适当减少纵隔板相邻U肋上顶板-U肋焊缝的检测频率。

参考文献

[1] 吉伯海. 我国缆索支承桥梁钢箱梁疲劳损伤研究现状[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 410-415.



- (JI Bohai. Current status of research on fatigue damage in steel box girder of cable-supported bridge in China [J]. Journal of Hohai university ( natural sciences ), 2014, 42 ( 5 ) : 410 - 415. )
- [ 2 ] GUO Tong, LI Aiqun, WANG Hao. Influence of ambient temperature on the fatigue damage of welded bridge decks [J]. International journal of fatigue, 2008, 30(6) : 1092 - 1102.
- [ 3 ] 王占飞, 程浩波, 程志彬, 等. 桥面铺装对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 173(2) : 257 - 266.  
(WANG Zhanfei, CHENG Haobo, CHENG Zhibin, et al. Influence of pavement on fatigue performance of orthotropic steel deck [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2018, 173(2) : 257 - 266. )
- [ 4 ] YANG Muye, JI Bohai, YUANZHOU Zhiyuan, et al. Fatigue behavior and strength evaluation of vertical stiffener welded joint in orthotropic steel decks [J]. Engineering failure analysis, 2016, 70 : 222 - 236.
- [ 5 ] 陶晓燕. 正交异性钢桥面板节段模型疲劳性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4) : 22 - 26.  
(TAO Xiaoyan. Experimental study on the fatigue performance of the section model of orthotropic steel bridge deck [J]. China railway science, 2013, 34(4) : 22 - 26. )
- [ 6 ] 唐亮, 黄李骥, 刘高, 等. 正交异性钢桥面板顶板贯穿型疲劳裂纹研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(2) : 59 - 66.  
(TANG Liang, HUANG Liji, LIU Gao, et al. Research on fatigue cracks through deck-plate in orthotropic steel deck [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2012, 29(2) : 59 - 66. )
- [ 7 ] 宋永生, 丁幼亮, 王高新, 等. 正交异性钢桥面板疲劳性能的局部构造效应[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(2) : 403 - 408.  
(SONG Yongsheng, DING Youliang, WANG Gaoxin, et al. Local structural effects for fatigue performance of steel orthotropic deck [J]. Journal of Southeast university ( natural science edition ), 2013, 43(2) : 403 - 408. )
- [ 8 ] 张一林. 扁平钢箱梁斜拉桥纵隔板的作用及受力分析[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2019.  
(ZHANG Yilin. Effect and analysis of longitudinal diaphragm of cable-stayed bridge with flat steel box girder [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2019. )
- [ 9 ] 欧阳洋, 祝志文, 蔡晶垚. 斜拉桥钢箱梁考虑疲劳性能的纵隔板设计参数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(12) : 3165 - 3172.  
(QUYANG Yang, ZHU Zhiwen, CAI Jingyao. Parametric analysis of inner longitudinal diaphragm in steel box girder of long-span cable-stayed bridge based on fatigue performance [J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(12) : 3165 - 3172. )
- [ 10 ] 李治. 钢箱梁斜拉桥桁架式纵隔板力学性能分析[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2020.  
(LI Zhi. Mechanical performance analysis of trussed longitudinal diaphragm in steel box girder of cable-stayed bridge [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2020. )
- [ 11 ] FU Zhongqiu, JI Bohai, YE Zhi, et al. Fatigue evaluation of cable-stayed bridge steel deck based on predicted traffic flow growth [J]. KSCE journal of civil engineering, 2017(4) : 1 - 10.
- [ 12 ] 李传习, 李游, 陈卓异, 等. 钢箱梁横隔板疲劳开裂原因及补强细节研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3) : 121 - 131.  
(LI Chuanxi, LI You, CHEN Zhuoyi, et al. Fatigue cracking reason and detail dimension of reinforcement about transverse diaphragm of steel box girder [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(3) : 121 - 131. )
- [ 13 ] ABDELBASET H, CHENG B, TIAN L, et al. Reduce hot spot stresses in welded connections of orthotropic steel bridge decks by using UHPC layer: experimental and numerical investigation [J]. Engineering structures, 2020, 220(105708) : 110988.
- [ 14 ] 王昊, 吉伯海, 王秋东, 等. 南京长江大桥钢桥面板弧形缺口位置疲劳性能研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(10) : 28 - 33.  
(WANG Hao, JI Bohai, WANG Qudong, et al. Research on fatigue performance of arc-shaped notch in steel bridge deck of Nanjing Yangtze river bridge [J]. Industrial construction, 2018, 48(10) : 28 - 33. )
- [ 15 ] YUAN Yuan, WU Chong, JIANG Xu. Experimental study on the fatigue behavior of the orthotropic steel deck rehabilitated by UHPC overlay [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 157 : 1 - 9.
- [ 16 ] 柯璐, 林继乔, 李传习, 等. 钢箱梁横隔板弧形切口疲劳性能及构造优化研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(5) : 18 - 23.  
(KE Lu, LIN Jiqiao, LI Chuanxi, et al. Fatigue performance and structural detail optimization of arc-shape cutouts in diaphragm of steel box girder [J]. Bridge construction, 2017, 47(5) : 18 - 23. )

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)