

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.04.022

# 横隔板部位 U 肋底部开孔对其局部构造受力影响分析

张子航, 袁周致远, 吉伯海

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**针对钢箱梁 U 肋横隔板连接处裂纹在日常养护和维修加固工作中因受技术条件、现场工作空间限制而导致维护工作难以实施的问题,基于现有开设手孔的加固方法,文章提出一种于横隔板部位 U 肋底部预留开孔的方法,通过建立钢箱梁节段有限元模型,对比分析有无开孔和开孔几何参数对于钢桥面板不利细节处和开孔位置周围的受力特性的影响,讨论该方法的理论可行性。结果表明:预留开孔会使结构顶板-U 肋焊缝、横隔板-U 肋焊缝与横隔板弧形缺口的应力集中现象得到缓解,同时结构开孔部位周围的应力增大,孔壁外缘直线段区域成为新的不利细节。选用曲线较为缓和的手孔形状与较小的手孔尺寸,可以获得更好的预留开孔结构的受力特性,缓解开孔位置周围的应力集中现象。横隔板部位 U 肋底部预留开孔方法具有理论上的可行性。

**关键词:**钢桥面板;开孔;横隔板-U 肋;受力特性;应力水平;有限元模拟

**中图分类号:**U441.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)04-0570-07

## Analysis of the influence of aperture opening at the bottom of U-ribs in diaphragm area on local structural stress

ZHANG Zihang, YUAN Zhouzhiyuan, JI Bohai

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

**Abstract:** Addressing the challenges encountered in routine maintenance and reinforcement work due to technical constraints and limited workspace at the connection of U-ribs and diaphragms in steel box girder bridges, this study proposes a method involving the pre-reservation of apertures at the bottom of U-ribs in the diaphragm area. Building upon existing methods involving aperture opening, a finite element model of the steel box girder segment was established to comparatively analyze the impact of aperture presence and geometric parameters on the unfavorable stress characteristics around the steel bridge deck details and the vicinity of the apertures. The theoretical feasibility of this method is discussed. Results indicate that the pre-reservation of apertures alleviates stress concentration phenomena at the weld seams between the top plate and U-ribs, the weld seams between the diaphragm and U-ribs, and the arc-shaped gap of the diaphragm of the structure. However, stress increases in the vicinity of the structural apertures, with the linear segment area on the outer edge of the aperture becoming a new unfavorable detail. Opting for a smoothly curved aperture shape and smaller aperture dimensions can yield improved stress characteristics for the pre-reserved aperture structure, mitigating stress concentration around the aperture location. The method of pre-reserving apertures at the bottom of U-ribs in the diaphragm area demonstrates theoretical feasibility.

**Key words:** steel bridge deck; aperture opening; diaphragm-U ribs; stress characteristics; stress level; finite element simulation

**收稿日期:**2024-04-16; **修回日期:**2024-06-25

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52308166;52378153)

**作者简介:**张子航(1999—),男,安徽天长人,河海大学硕士生;

袁周致远(1990—),男,浙江舟山人,博士,河海大学副教授,硕士生导师;

吉伯海(1966—),男,江苏扬州人,博士,河海大学教授,博士生导师。

正交异性钢桥面板凭借着自身结构轻、强度高、对复杂地形适应能力强等特点,在我国桥梁体系中得到了广泛运用<sup>[1]</sup>。在日常的运营过程中,钢桥面板很容易在循环车辆荷载下产生疲劳裂纹,横隔板-U肋连接处是疲劳裂纹的高发区域之一<sup>[2-7]</sup>,如何修复该区域疲劳裂纹,保证钢桥日常安全运营,已经成为钢桥研究中亟待解决的问题。

目前,针对钢桥疲劳裂纹修复技术方法,国内外学者已经展开了一系列研究,形成了以裂纹焊合、局部补强、气动冲击等为主的裂纹维护修复技术体系。其中,钢板局部补强技术应用广泛,该技术通过高强度结构胶或高强螺栓连接的方式在开裂区域安装一块补强钢板,通过补强钢板参与分担原结构开裂部位受力,从而阻缓疲劳裂纹的扩展<sup>[8-11]</sup>。文献<sup>[12]</sup>探究顶板-U肋裂纹粘贴钢板的加固效果,得出胶层对粘贴钢板加固效果的影响;文献<sup>[13]</sup>研究角钢加固对不同长度裂纹的修复效果,发现随着裂纹长度的增加,角钢加固对裂纹扩展的抑制效果不断降低;文献<sup>[14-15]</sup>研究发现钢板补强后的构件产生新的疲劳敏感点位置。综上所述,现阶段针对疲劳裂纹钢板补强法的研究主要集中在其加固效果与影响参数方面,取得了丰富成果。

然而,在实际工程中,由于钢箱梁桥内部空间狭小,钢板补强法常常采用现场开设手孔<sup>[16]</sup>的方法来进行施工。由于现有的技术标准对具体开孔参数和工艺尚未有相关规定,手孔的开设往往存在一定的盲目性,现场开孔时,形状、大小随意决定的情况时有发生,严重制约了钢板补强法的可行性和修复效果。

基于此现象,本文提出在横隔板部位U肋底部提前预留开孔的方法,即在钢桥设计建造阶段,预先在每条U肋的规定位置开设具有确定参数的手孔,以便日后进行钢箱梁桥的检测与维护,同时为可能的疲劳裂纹修复工作提供便利。结合有限元分析软件分析预留开孔对其周边构造的受力影响,从而证实该方法的理论可行性。

## 1 有限元模拟

为研究开孔对钢箱梁局部部位的受力性能产生的影响,本文利用ABAQUS软件建立有限元钢箱梁节段模型,开展预留开孔的可行性分析。

本文中结构开孔由2部分组成,开孔孔壁直线部分命名为直线段,孔壁两端曲线部分命名为弧线段。对于预留开孔的技术标准,主要考虑以

下3个参数:开孔距横隔板距离 $L_1=40\text{ mm}$ ;开孔直线段长度 $L_2=120\text{ mm}$ ;圆弧半径 $L_3=40\text{ mm}$ 。模型中开孔尺寸如图1所示。

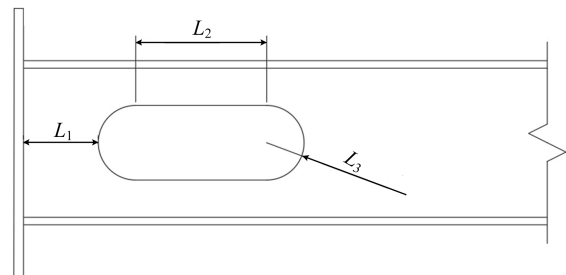


图1 预留开孔尺寸

### 1.1 有限元模型

钢箱梁节段模型纵向长度约为 $12\ 800\text{ mm}$ ,横向宽度为 $4\ 200\text{ mm}$ ,钢箱梁横向设7道U肋,纵向设置5道横隔板,桥面板厚 $48\text{ mm}$ ,顶板厚 $12\text{ mm}$ ,U肋厚 $6\text{ mm}$ ,U肋间隔为 $300\text{ mm}$ ,横隔板厚 $8\text{ mm}$ ,横隔板间隔为 $3\ 200\text{ mm}$ 。

在荷载施加过程中认为各部件均处于线弹性工作状态,钢材所采用的材料取实际工程中常用的Q345qD钢,其密度为 $7\ 800\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $206\text{ GPa}$ ,泊松比为 $0.3$ 。桥面板为混凝土材料,其密度为 $2\ 400\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $25.5\text{ GPa}$ ,泊松比为 $0.2$ 。

模型采用C3D8R单元进行网格划分,全局单元尺寸采用 $30\text{ mm}$ ,对于关注点附近采用细网格加密,加密区网格尺寸为 $1\text{ mm}$ 。

### 1.2 加载工况

荷载选用JTG-D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》中规定的疲劳荷载模型Ⅲ,车轮加载面积每轮为 $600\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。横向荷载沿模型中线对称布置,纵向加载工况以钢箱梁模型坐标轴原点为起点,间隔 $250\text{ mm}$ 均匀划分为50个荷载工况,依照加载位置到原点的距离由近到远依次编号为G1~G50。纵向荷载工况如图2所示。

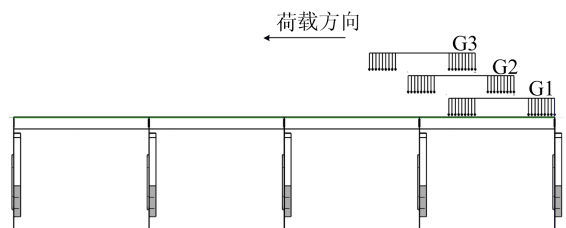


图2 纵向加载工况示意图

### 1.3 关注点位置的确定

在钢箱梁节段模型横隔板正上方加载,得到横隔板-U肋局部应力云图,如图 3 所示。

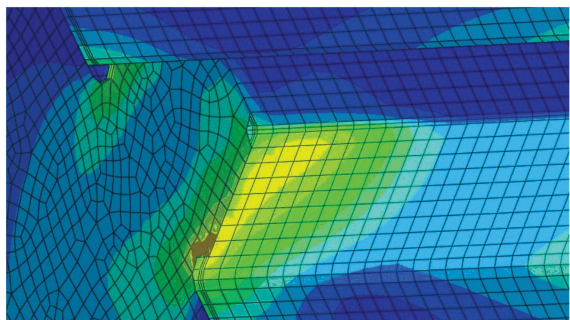


图 3 U 肋横隔板交叉处应力云图

由图 3 可知,横隔板-U肋弧形缺口部位和顶板-U肋过焊孔部位出现明显应力集中现象,为易疲劳细节,这与实际工程中钢桥裂纹主要出现在顶板-U肋焊缝与横隔板-U肋焊缝处的经验统计结果相符<sup>[5]</sup>。

除原有的疲劳不利细节外,由于结构开孔位置周围的局部刚度和截面强度也受到削弱,可能产生新的疲劳不利细节,需要对开孔位置周围的受力特性进行研究。因此,在模型中选取关注点,并提取关注点的 Mises 应力进行分析,关注点位置如图 4 所示。

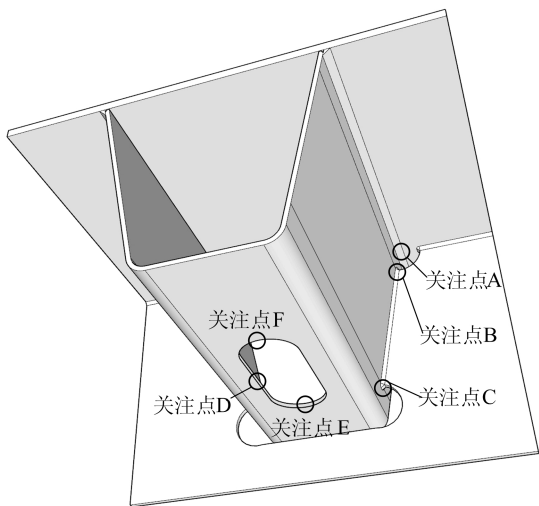
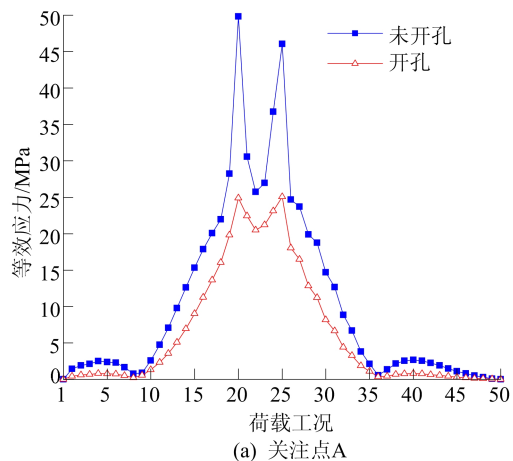


图 4 关注点示意图

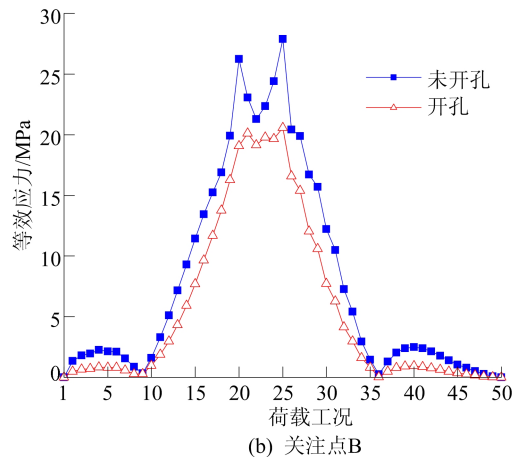
## 2 钢箱梁局部构造受力分析

### 2.1 开孔对横隔板弧形缺口与过焊孔的影响

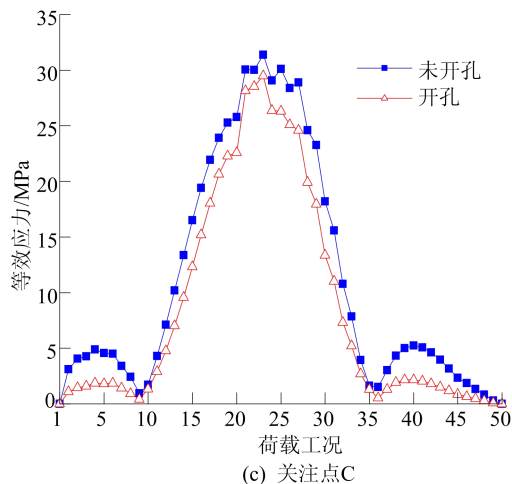
对结构横隔板弧形缺口及过焊孔处关注点 A、B、C 的等效应力计算结果如图 5 所示。



(a) 关注点A



(b) 关注点B



(c) 关注点C

图 5 U 肋横隔板关注点等效应力

由图 5a 知,预留开孔模型关注点 A 的整体应力水平与无开孔模型相比有显著下降。当荷载工况为 G10~G19 时,关注点 A 应力处于上升阶段,此时预留开孔模型应力曲线上上升段拟合直线斜率  $k$  为 1.59,无开孔模型对应拟合直线斜率  $k$  为 2.12,预留开孔情况下结构顶板-U肋连接焊缝部位的应力水平增长更慢。当荷载工况为 G21 时,荷载前轮到达关注点 A 正上方,预留开孔模

型关注点 A 的等效应力达到峰值 24.95 MPa,而无开孔模型该工况下应力为 49.81 MPa,可知预留开孔后结构顶板-U肋连接焊缝部位的应力集中现象显著缓解,整体应力水平降幅达到 35%,峰值工况下降幅可达 50%,受力情况得到明显改善。这是由于 U 肋底部开孔使得开孔位置周围局部刚度损失及截面削弱,结构发生应力重分布,原本顶板-U肋连接焊缝的应力得到释放,显著改善了该部位的受力情况。

由图 5b、图 5c 可知,预留开孔模型关注点 B 的应力水平与无开孔模型相比仅在峰值点有明显下降。在应力上升阶段,预留开孔模型关注点 B 应力曲线上上升段拟合直线斜率  $k$  为 1.56,无开孔模型对应拟合直线斜率  $k$  为 1.84。当荷载工况为 G21 时,预留开孔模型关注点 B 的等效应力达到峰值 19.08 MPa,无开孔模型在该工况下为 27.51 MPa,降幅为 30%。预留开孔模型关注点 C 的整体应力水平与无开孔模型相比,降幅仅为 10%,可认为无明显变化。这说明预留开孔对结构横隔板-U肋连接焊缝部位的受力情况影响幅度较小,但仍有所改善。

对比可知,在无开孔模型中,结构顶板-U肋连接焊缝的整体应力水平要明显高于横隔板-U肋连接焊缝。而在预留开孔模型中,结构顶板-U肋连接焊缝的应力集中现象得到缓解,结构应力最大的位置变为横隔板弧形缺口焊缝,结构最不利细节位置发生转变。

以上结果表明,结构横隔板部位 U 肋底部开孔对结构顶板-U肋焊缝与横隔板-U肋焊缝易疲劳细节的受力有利,同时会使裂缝易发区域发生转移。

## 2.2 开孔对开孔位置周围的受力特性影响

对结构横开孔外缘关注点 D、E、F 处的计算结果如图 6 所示。

由图 6a 可知,预留开孔模型关注点 D 的应力水平与无开孔模型相比在峰值点有显著上升。当荷载工况为 G1~G13 时,预留开孔模型应力曲线与无开孔模型应力曲线基本重合,当荷载工况为 G14~G25 时,预留开孔模型应力水平突然提高,当荷载工况为 G16 时,预留开孔模型关注点 D 的等效应力达到峰值 25.94 MPa,而无开孔模型对应工况应力为 19.83 MPa,增幅达到 25%,2 种情况下应力曲线上上升段拟合直线斜率  $k$  分别为 3.05、2.51。可知预留开孔后,结构开孔部位直线段受力情况更加不利。

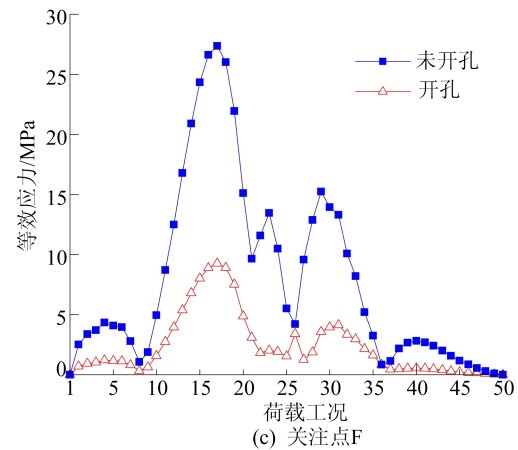
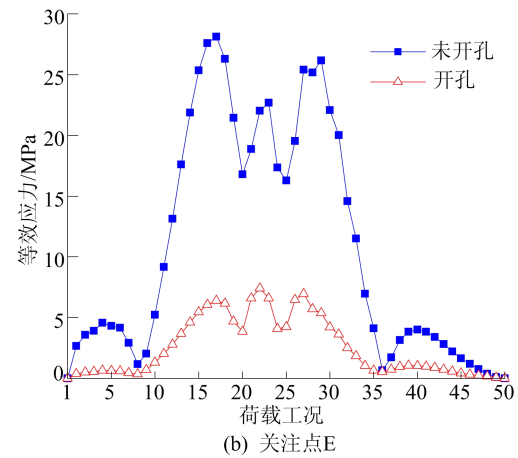
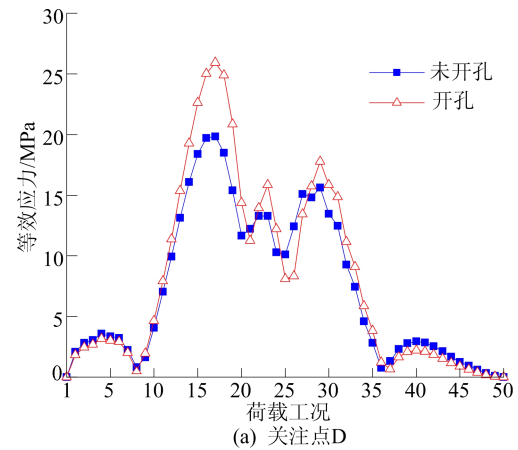


图 6 开孔位置周围等效应力

由图 6b、图 6c 可知,预留开孔模型关注点 E、F 的应力水平与无开孔模型相比有显著降低。在应力上升阶段,预留开孔模型关注点 E 应力曲线拟合直线斜率  $k$  为 0.71,无开孔模型对应拟合直线斜率  $k$  为 3.45。关注点 F 对应应力曲线拟合斜率  $k$  分别为 1.07、3.32。在应力峰值点,关注点 E 在 2 种情况下应力分别为 28.11、6.41 MPa,降幅达到 77%,而关注点 F 应力分别为 27.35、9.26 MPa,降幅达到 66%。这是由于无开孔模型在承受荷载时,结构作为一个完整的传力和承

载结构进行工作,而 U 肋底部开孔会导致开孔部位弧线段的局部刚度损失与截面削弱,开孔部位弧线段纵向传力能力大幅削弱,应力水平大幅降低,基于 U 肋底部开孔后仍是一个共同受力的整体,因此,开孔部位直线段会承受更多荷载,应力水平提高。

以上结果表明,结构横隔板部位 U 肋底部开孔可能会导致开孔部位周围出现新的易疲劳细节。开孔部位周围路径图如图 7 所示。

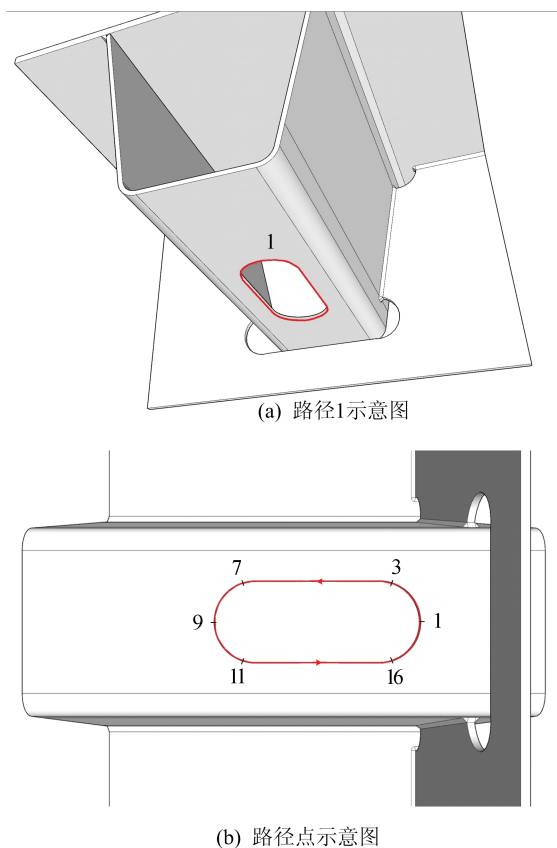


图 7 开孔部位周围路径图

为探明开孔前后开孔部位周围的受力情况,提取孔壁外缘最不利工况 G16 下路径 1(图 7a)的 Mises 应力,并与未开孔模型进行对比,其中,路径 1 依据角度均匀划分为 16 个路径点,根据路径上各点依逆时针顺序按照 1,2,3,⋯,16 依次编号(图 7b),应力提取结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,预留开孔模型孔周应力与无开孔模型相比,路径 1 应力峰值大小基本相同。在路径点 3—7、11—15 处即开孔直线段应力水平有所上升,整体增幅为 20%。在路径点 16—2、8—10 处即开孔弧线段,预留开孔模型的孔周应力与无开孔模型相比大幅降低,符合关注点 E、F 计算结果。因此,认为开孔模型中参数预留开孔

对于结构整体受力性能无明显不利影响。但是,开孔后结构的受力情况还有可能受到开孔尺寸与形状的影响,同时考虑到实际工程的需要及合理性,需对预留开孔的尺寸和形状进行进一步的研究。

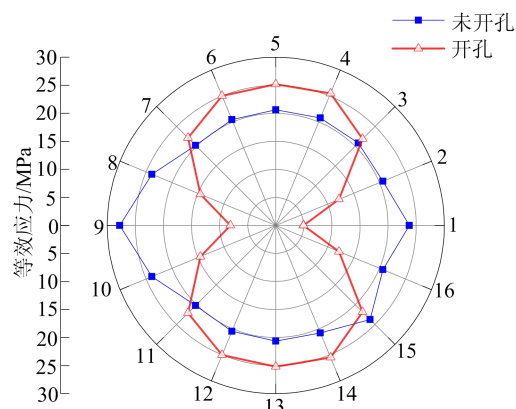


图 8 应力提取结果

### 3 开孔参数对钢箱梁受力特性影响

#### 3.1 开孔形状对受力特性影响

为研究开孔形状对于钢箱梁受力特性的影响。本文选取长 200 mm、宽 80 mm 的矩形开孔与  $L_1=40$  mm、 $L_2=120$  mm 的椭圆形开孔作为研究对象,在相同工况下进行模拟计算,二者可视作为具有相似的尺寸参数。2 种形状的开孔对各关注点等效应力的计算结果如图 9 所示。

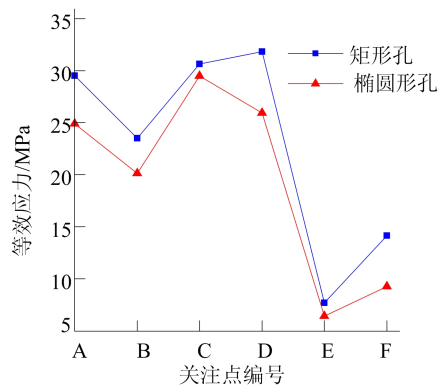


图 9 各关注点等效应力

由图 9 可知,矩形开孔模型与椭圆形开孔模型相比,在各个关注点的应力大小均有所上升。其中,关注点 C、E 应力变化幅度较小,仅为 10%,其余关注点应力变化幅度较大,整体应力水平增大大约 20%。这是由于与椭圆形开孔相比,相同尺寸参数的矩形开孔对结构切削的面积更大,开孔

位置周围的局部刚度损失和截面削弱更加严重,结构其余构造细节需要承受更多荷载,导致应力水平上升。

考虑到矩形开孔孔边存在直角转角,应力集中情况与椭圆形开孔有所差别,为进一步研究两者受力情况之间的差别,分别提取 2 种形状开孔模型的孔壁外缘应力进行对比分析,结果如图 10 所示,图 10 中路径点与切向坐标依照图 7 规则进行编号。

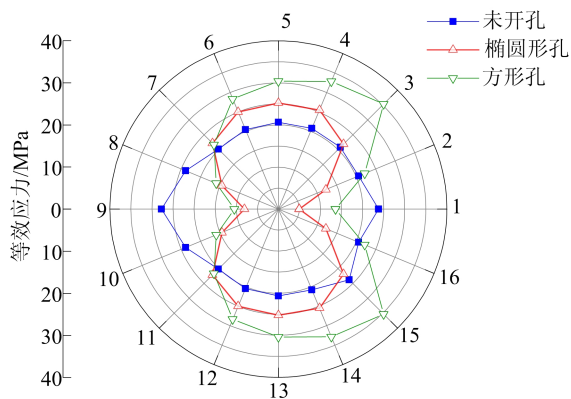


图 10 不同形状开孔的应力

由图 10 可知,在路径点 3、15 即矩形开孔孔边转角处,矩形开孔应力水平与椭圆形开孔相比有显著提升,增幅达到 70%。这是由于椭圆形开孔直线段与弧线段过渡较为缓和,而矩形开孔孔边转角为  $90^\circ$  尖角,存在更加严重的应力集中现象。在路径点 16、2 即开孔弧线段前端与路径点 3、7 即开孔直线段处,矩形开孔的应力水平相较于椭圆形开孔均有显著提升。这是由于与椭圆形开孔相比矩形开孔的前端为横向直线段,不利于纵向传力,同时由于矩形开孔孔周整体应力水平大于椭圆形开孔,且转角处存在严重应力集中现象,开孔部位直线段即关注点 D 处会承受更多荷载,应力水平提高。

以上结果表明,矩形开孔与椭圆形开孔相比,结构的受力性能较差,整体应力水平更高,尤其是矩形开孔直角转角处,存在严重的应力集中现象,更容易产生疲劳裂纹。

### 3.2 开孔尺寸对受力特性的影响

为了研究开孔尺寸对结构受力性能的影响,考虑到在实际工程中,开孔弧线段半径  $L_3$  受工程需求的影响变化较小,因此选取开孔的直线段长度  $L_2$  作为研究变量,计算各关注点在不同长度条件下的应力变化情况,相关结果分别如图 11~

图 13 所示。

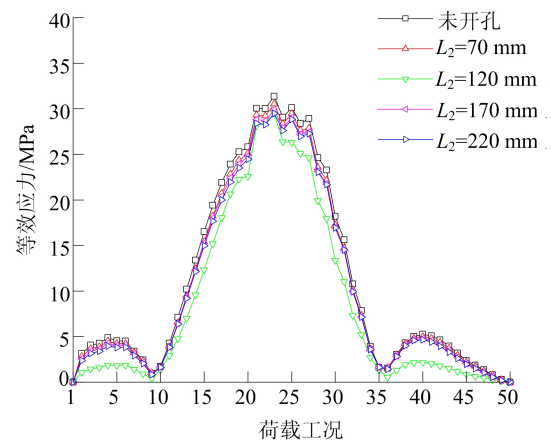


图 11 不同尺寸下关注点 C 等效应力

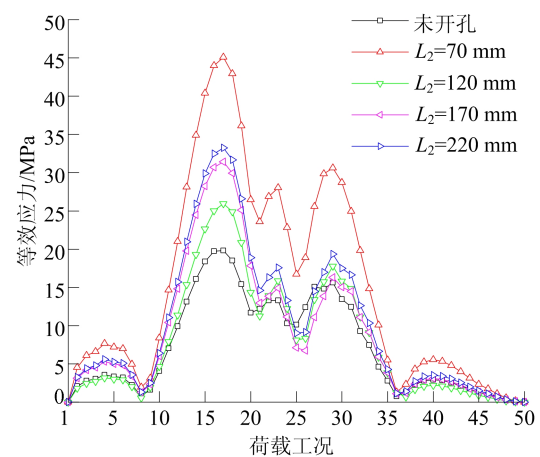


图 12 不同开孔尺寸下关注点 D 等效应力

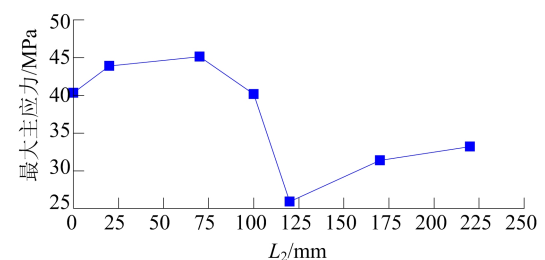


图 13 不同尺寸下开孔自由边最大主应力

由图 11 可知,仅改变开孔直线段长度,对于结构横隔板附近细节的受力特征不会造成明显影响,随着开孔直线段长度  $L_2$  的增加,关注点 C 的应力水平无明显变化,应力曲线基本重合。

由图 12 可知,开孔部位直线段长度对于结构开孔位置附近的受力特征有明显影响。当  $L_2$  较小时,关注点 D 的等效应力水平较高,这是由于开孔直线段长度  $L_2$  对于结构横隔板附近细节的受力特征没有明显影响,当  $L_2$  变化时,结构的应

力重分布改变主要发生在开孔位置周围,当 $L_2$ 较小时,结构开孔孔壁会发生应力集中现象,开孔直线段应力水平提升,不利于结构抗疲劳工作。

由图 13 可知,当 $L_2 \leq 100$  mm 时,开孔孔壁周围应力集中现象较为明显,因此,开孔直线段长度不宜小于 100 mm。当 $L_2$ 较大时,随着开孔直线段长度增加,开孔位置周围的局部刚度损失和截面削弱不断加重,结构整体应力水平上升,此时开孔直线段长度 $L_2$ 与关注点 D 的应力水平表现出正相关特征,随着开孔直线段长度 $L_2$ 的增大,开孔部位孔壁最大主应力也不断增大。以上结果表明,预留开孔时,开孔形状参数会同时影响开孔位置周围与 U 肋横隔板交叉处细节的受力特性,开孔尺寸参数则主要影响开孔位置周围的受力特性,对于 U 肋横隔板交叉处的受力特性无明显影响。

#### 4 结 论

本文以钢桥疲劳裂纹钢板局部补强技术的施工需求为背景,提出了钢桥面板横隔板部位 U 肋底部预留开孔的方法。同时,通过有限元模拟的方法,针对预留开孔对钢桥面板疲劳细节受力情况的影响进行研究,得出结论如下:

1) 有限元结果表明,横隔板部位 U 肋底部开孔会影响结构的受力特征,预留开孔会导致结构开孔位置直线段的应力水平增大,同时可以缓解结构横隔板顶部板-U 肋焊缝与横隔板-U 肋焊缝易疲劳细节的应力集中现象,对结构整体的疲劳受力性能无明显不利影响。

2) 开设孔洞的形状对于结构整体的应力分布规律无明显影响,会显著影响开孔孔周应力大小。矩形开孔的各个细节处的应力大小与椭圆形开孔相比都有所增大,矩形开孔孔边转角处会出现明显的应力集中现象。

3) 开设孔洞的尺寸会影响开孔位置周围的应力大小,对结构横隔板附近的应力特征无明显影响。当开孔直线段长度较大时,直线段长度越大,开孔位置周围应力越大。当开孔直线段长度较小时,孔周围会产生明显的应力集中。

#### [参 考 文 献]

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·

- 2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
- [2] 吉伯海, 傅中秋, 王秋东, 等. 我国大跨径桥梁钢箱梁的养护技术发展及展望[J]. 工业建筑, 2018, 48(10): 1-9.
- [3] 吉伯海, 袁周致远. 钢箱梁疲劳开裂维护研究现状[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 1-5.
- [4] 刘治国, 李军平, 张梁, 等. 正交异性钢桥面板细节构造及关键制造技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(8): 179-182.
- [5] 邓扬, 刘涛磊, 曹宝雅, 等. 基于表贴板材的正交异性钢桥面顶板-U 肋焊缝疲劳加固方法研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(2): 67-74.
- [6] 邓扬, 刘涛磊, 曹宝雅, 等. 钢桥面顶板-U 肋焊缝表贴增强板材疲劳加固方法研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(2): 201-211.
- [7] MALJAARS J, BONET E, PIIPERS R. Fatigue resistance of the deck plate in steel orthotropic deck structures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 201: 214-228.
- [8] 沈翔, 吉伯海, 肖龙, 等. 钢箱梁横隔板-U 肋疲劳裂纹钢板加固参数分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15245-15251.
- [9] 何邦, 吉伯海, 袁周致远, 等. 横隔板弧形缺口疲劳开裂受力特征及加固研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(3): 528-533.
- [10] SHIN C S, WANG C M, SONG P S. Fatigue damage repair; a comparison of some possible methods[J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18(8): 535-546.
- [11] YAMADA K, ISHIKAWA T, KAKIICHI T. Rehabilitation and improvement of fatigue life of welded joints by ICR treatment[J]. Advanced Steel Construction, 2015, 11(3): 305-321.
- [12] 周家刚, 徐志民. 粘贴钢板技术修复钢箱梁疲劳裂纹[J]. 公路, 2020, 65(11): 224-230.
- [13] 张清华, 金通, 李俊, 等. 钢桥面板纵肋与横隔板焊接细节疲劳开裂的加固研究[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(1): 92-99.
- [14] 傅中秋, 房亮, 王益逊, 等. 钢桥面板横隔板-U 肋焊缝裂纹修复后的应力特征[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 340-346.
- [15] 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.
- [16] 龚代勋. U 肋与横隔板连接疲劳开裂加固手孔开设方法初探[J]. 四川建筑, 2017, 37(5): 128-131.

(责任编辑 吴 亮)