

文章编号: 1005-0523(XXXX)XX-0001-11

## 钢桥面板顶板-U肋焊缝裂纹萌生特征及扩展规律

白文畅<sup>1</sup>, 袁周致远<sup>1</sup>, 吉伯海<sup>1</sup>, 傅慧<sup>2</sup>

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098; 2. Architects & Engineers Co., Ltd. of Southeast University, Nanjing 210096, China)

**摘要:**为研究轮载作用下钢桥面板顶板-U肋焊缝裂纹的萌生特征及扩展规律,通过有限元方法建立钢桥面板节段模型,分析了不同轮载位置下构造的变形特征,明确了轮载位置与典型变形特征的对应关系,相应建立了3种局部简化模型。在局部模型的基础上根据应力分布确定了裂纹萌生特征,基于断裂力学进行裂纹扩展三维数值模拟,得到了不同轮载位置下顶板-U肋焊缝裂纹的扩展规律。研究表明,当轮载偏离焊缝时,疲劳裂纹易从顶板焊根和顶板焊趾处萌生且沿顶板厚度方向扩展,以I型裂纹为主;当轮载位于焊缝正上方时,疲劳裂纹易从顶板焊根和U裂焊趾处萌生并大致垂直U肋腹板斜向扩展,属于以I型裂纹主导的I-II-III复合型裂纹,且扩展速率较快。

**关键词:**钢桥面板;顶板-U肋焊缝;疲劳裂纹;轮载作用;萌生特征;扩展规律

中图分类号:U448.36

文献标志码:A

本文引用格式:白文畅,袁周致远,吉伯海,等.钢桥面板顶板-U肋焊缝裂纹萌生特征及扩展规律[J].华东交通大学学报,XXXX,XX(X):1-11.

## Crack initiation characteristics and propagation laws of U rib-to-deck weld joint of orthotropic steel bridge decks

Bai Wenchang<sup>1</sup>, Yuan Zhouzhiyuan<sup>1</sup>, Ji Bohai<sup>1</sup>, Fu Hui<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Transporting Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Architects & Engineers Co., Ltd. of Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to investigate the initiation characteristics and propagation laws of fatigue cracks in the U rib-to-deck weld joints of a steel bridge deck under wheel loads, a segment model of steel bridge deck was established using the finite element method. Deformation characteristics of the structure were analyzed under different wheel load positions, and the correspondence between the wheel load position and typical deformation characteristics was clarified. Local simplified models were then established based on this analysis. Using the local models, the crack initiation characteristics were determined based on stress distribution. Three-dimensional numerical simulation of crack propagation was carried out based on fracture mechanics to obtain the crack propagation law of the U rib-to-deck weld joint under different wheel load positions. The research shows that when the wheel load deviates from the weld, the fatigue crack tends to initiate at the weld root and weld toe of the deck and propagates along the thickness direction of the deck, with the crack extension type being mode I. When the wheel load is located directly above the weld, the fatigue crack prefers to initiate at the weld root of the deck and the weld toe of the U-rib, propagating obliquely perpendicular to the U-rib web. These cracks belong to the I-II-III composite type dominated by Mode I

收稿日期:2023-03-23

基金项目:江苏省交通运输科技项目(2022Y19)

cracks, and their propagation rate is faster.

**Key words:** Steel bridge deck; U Rib-to-deck weld joint; Fatigue crack; Wheel load; Initiation characteristics; Propagation laws

**Citation format:** Bai Wenchang, Yuan Zhouzhiyuan, Ji Bohai, et al. Crack initiation characteristics and propagation laws of U rib-to-deck weld joint of orthotropic steel bridge decks[J]. Journal of East China Jiaotong University, XXXX, XX(X):1-11.

因钢桥具有强度高、自重轻、预制加工方便等优点<sup>[1]</sup>,近年来在我国桥梁建设中得到普及。正交异性钢桥面板作为钢桥的重要组成部分之一,在大跨径斜拉桥和悬索桥结构中得到广泛应用<sup>[2-3]</sup>,但在运营过程中发现其疲劳问题突出,严重威胁桥梁结构的安全性和耐久性<sup>[4-5]</sup>。

国内外多座钢桥服役情况表明,在已有的钢桥面板疲劳开裂部位中,顶板-U肋构造细节焊缝疲劳开裂占比较高,疲劳问题较为突出,且顶板-U肋构造细节是钢桥面板典型的多损伤点构造细节,包括顶板焊趾裂纹、顶板焊根裂纹以及U肋焊趾裂纹<sup>[6-8]</sup>等,裂纹的萌生特征和扩展规律较为复杂,这引起了国内外许多学者的关注。

在裂纹萌生方面,曾志斌<sup>[9]</sup>研究发现由不同横向位置轮载引起的U肋内外侧顶板弯矩相对大小是导致裂纹从不同位置萌生的主要原因;张允士等<sup>[10]</sup>分析发现车辆荷载会导致顶板与U肋间产生相对转角,焊缝根部产生拉应力从而引起疲劳开裂;祝志文等<sup>[11]</sup>通过实桥试验和有限元分析验证了跨肋式、正肋式和肋间式轮载对顶板焊趾侧和U肋焊趾侧应力幅有显著影响,从而影响焊缝处疲劳开裂位置;卫星等<sup>[12]</sup>通过有限元计算,得到在钢桥面板不同横向位置施加荷载条件下,可能出现不同类型顶板-U肋焊缝裂纹的结论。相关研究表明轮载作用位置对顶板-U肋细节的疲劳裂纹萌生位置有较大影响,但目前不同轮载位置与萌生裂纹类型的具体关系尚不明确。

另外,相关学者也进一步对顶板-U肋焊缝裂纹萌生后的扩展规律开展了研究。一方面,裂纹扩展受多因素影响,Berg等<sup>[13]</sup>基于扩展有限元和试验对裂纹扩展影响因素进行了研究,发现焊接残余应力会显著影响裂纹扩展速率;袁周致远等<sup>[14]</sup>研究了变幅荷载对裂纹扩展的影响,通过疲劳试验验证了

过载迟滞效应。此外焊缝熔透率和铺装层等<sup>[15-16]</sup>也会对其产生影响。另一方面,不同开裂模式下裂纹的扩展规律存在较大区别。Wang<sup>[17]</sup>等基于扩展有限元对不同开裂模式下裂纹扩展行为进行分析,结果表明从顶板焊趾处萌生沿顶板厚度扩展的裂纹以及U肋焊趾处萌生的裂纹裂尖应力强度因子较高;卜一之等<sup>[18]</sup>基于断裂力学对顶板焊根处萌生的裂纹进行三维数值模拟,发现其扩展后期深度方向扩展速率大幅减小,易发展成为扁平状裂纹;Ju<sup>[19]</sup>等对焊趾裂纹扩展行为展开有限元模拟,结果表明扩展后期裂纹尖端II、III型应力强度因子变化显著,导致其向U肋腹板发生较大偏转。现有研究主要针对单一开裂模式下裂纹萌生及扩展行为进行分析,并未考虑实桥中不同轮载位置下顶板-U肋细节裂纹萌生特征以及扩展规律的差异性。

本文首先通过建立钢桥面板节段模型,施加不同位置轮载,分析了顶板-U肋构造的典型变形特征。基于变形特征,分别建立了3种简化局部模型,确立了轮载位置与局部模型的对应关系。在此基础上,展开裂纹萌生和扩展数值模拟,明确了不同轮载位置下顶板-U肋焊缝裂纹的萌生特征和扩展规律。

## 1 模型及工况

参考某大跨悬索桥在ABAQUS中建立正交异性钢桥面板模型,如图1所示。以钢桥面板中心为原点,横桥向为X方向,竖直方向为Y方向,纵桥向为Z方向,建立空间直角坐标系。节段模型纵桥向选取5道横隔板(编号为A~E),间距为3 200 mm;横桥向选取7道U肋(编号为1#~7#),U肋中心间隔为600 mm。U肋正截面尺寸为300 mm×180.97 mm×280 mm×6 mm(上缘宽度×下缘宽度×高度×厚度),与顶板夹角为78°,如图2所示。材料为

Q345qD 型钢材,弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.3。桥面板顶部设铺装层,厚度为 50 mm,与桥面板之间设置为绑定约束,其弹性模量为 1000 MPa。

节段模型采用 C3D8R 单元划分网格,网格尺寸为 20 mm。选取横隔板 C、D 跨中处 3#~5# U 肋作为子模型,子模型全局网格尺寸为 10 mm,顶板-U肋焊缝附近重点部位采用 1 mm 网格加密,过渡区域采用 C3D10 四面体单元划分网格。

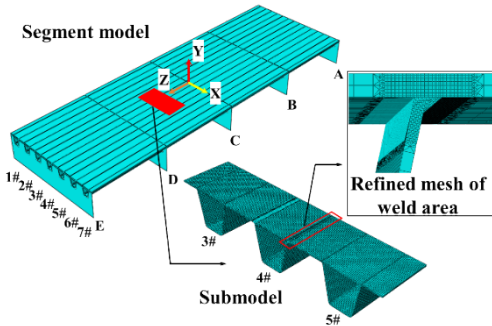


图 1 模型示意图

Fig. 1 Diagram of model

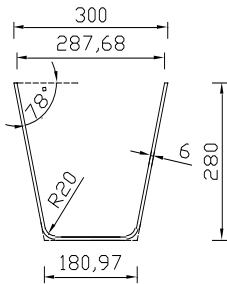


图 2 U 肋尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Size of the U rib (unit: mm)

约束横隔板底部全部平动和转动自由度,约束顶板四周、U 肋两端以及横隔板两侧的平动自由度。由于正交异性钢桥面板各疲劳细节对车载不敏感,而仅对轮载敏感,且影响面范围狭小,依据规范采用疲劳计算模型 III 对正交异性钢桥面板进行验算<sup>[20]</sup>,选用单侧双轮加载模式,单个车轮加载面积为  $600 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  (横向 $\times$ 纵向),有限元中用荷载集度 0.5 MPa 来表征。纵桥向加载工况如图 3 a) 所示,每次轮载移动间距为 0.1 m,以前轮中心线与横隔板 C 重合为第一个加载步,至后轮中心线与横隔板 D 重合结束,共设置 45 个加载步;横桥向轮载中心从  $x = -450 \text{ mm}$  开始至  $x = 750 \text{ mm}$  结束,间隔

150 mm,分别对应 T1~T9 这 9 个工况,如图 3 b) 所示。

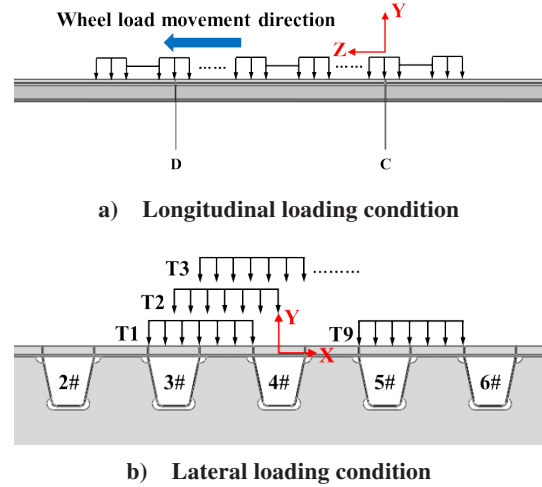


图 3 加载工况

Fig. 3 Loading condition

## 2 轮载作用下顶板-U肋变形特征

### 2.1 顶板面外变形分析

图 4 为 9 个工况纵向最不利位置下的顶板竖向位移曲线,其中  $x = -100 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$  为所关注顶板-U肋焊缝内侧顶板, $x = 150 \text{ mm} \sim 400 \text{ mm}$  为焊缝外侧顶板。比较图 4 a) 和图 4 b) 可以发现,轮载中心恰好位于焊缝正上方时(T5 工况),U 肋内外两侧顶板竖向位移基本沿焊缝位置对称分布,整体变形相对较大。T4 工况下 U 肋内侧顶板竖向变形程度最大而 T6 工况下 U 肋内侧顶板竖向变形程度最大。

为进一步比较 U 肋内外侧顶板竖向相对位移情况,明确顶板-U肋焊缝局部的变形趋势,设顶板下表面提取路径  $x = -100 \text{ mm}$  位置为点 A, $x = 150 \text{ mm}$  (焊缝处)位置为点 B, $x = 400 \text{ mm}$  位置为点 C。点 A 竖向位移为  $\Delta_A$ ,点 B 为  $\Delta_B$ ,点 C 为  $\Delta_C$ ,以  $|\Delta_A - \Delta_B|$  作为 U 肋内侧顶板竖向位移,以  $|\Delta_B - \Delta_C|$  作为 U 肋外侧顶板竖向位移,以  $||\Delta_A - \Delta_B| - |\Delta_B - \Delta_C||$  作为 U 肋内外侧顶板竖向位移差,分别提取 9 个工况下相应值进行比较,如表 1 所示。当轮载中心在  $x = -300 \text{ mm}$  处(T2 工况)时,U 肋内侧顶板相对下挠,U 肋内外侧顶板竖向位移差达到最大值 0.45 mm;当轮载中心在 U 肋外侧  $x = 600 \text{ mm}$  处(T8 工况)时,U 肋外侧顶板相对下挠,竖向位移差达到最大值 0.38

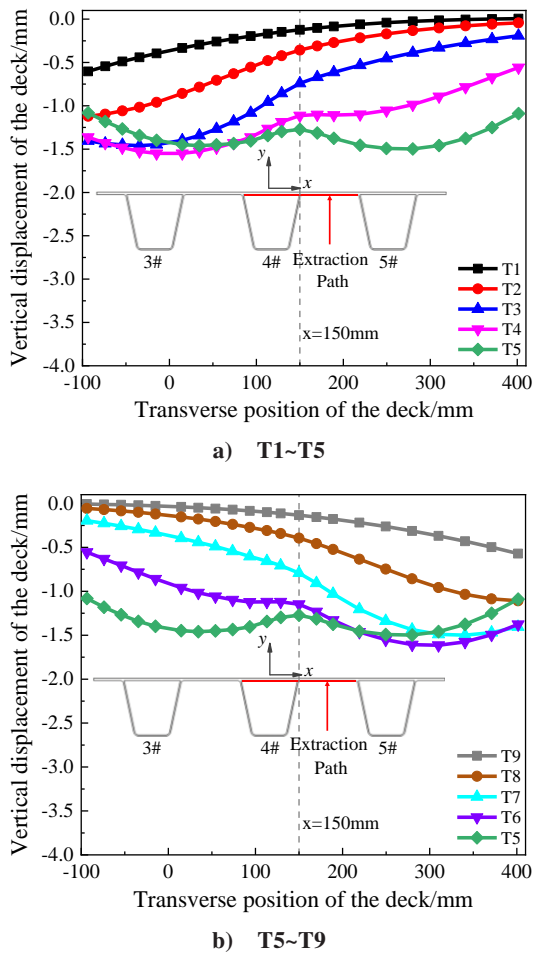


图4 顶板竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement of deck

mm。

综上,轮载横向移动时,U肋内外侧顶板变形主要存在3种情况:a)两侧顶板均匀下沉;b)内侧顶板相对下挠;c)外侧顶板相对下挠,如图5所示。

## 2.2 U肋面外变形分析

图6为纵向最不利位置下的U肋腹板水平位移曲线,为准确反映焊缝附近U肋受力变形情况,仅提取U肋腹板0~100 mm高度内位移分析。整体上,当荷载作用于U肋内侧时,U肋壁向外屈曲;当荷载作用于U肋外侧时,U肋壁向内屈曲,可得U肋腹板在轮载横向移动下主要存在2种变形情况,即外扩变形和内缩变形。

## 2.3 简化模型建立

通过上述分析可知在不同轮载位置作用下,焊缝的内、外侧顶板以及U肋腹板呈现不同变形特

征。进一步提取所关注焊缝内外侧顶板竖向相对位移以及U肋最大水平位移进行比较,如图7所示。对于T1、T2和T9工况,内外侧顶板竖向相对位移明显大于U肋腹板最大水平位移,可不考虑这3个工况下U肋腹板变形,简化为顶板受弯变形的模型,其中焊缝外侧顶板变形模拟T9,如图8 a)所示,焊缝内侧顶板变形模拟工况1、2,如图8 b)所示。T5工况U肋内外侧顶板变形基本对称,相对位移很小,U肋腹板横向变形较大,可简化为U肋腹板弯曲变形,如图8 c)所示。T3和T4工况以及T6~T8工况顶板相对位移以及U肋水平位移差异不大,简化为顶板或U肋单一对象的变形可能并不合理,可以考虑从顶板和U肋耦合变形的角度设置简化模型。

## 3 疲劳裂纹萌生特征

### 3.1 顶板-U肋局部模型建立

为进一步分析不同轮载位置下疲劳裂纹萌生位置,建立顶板-U肋构造局部模型,模型纵向长度为300 mm,具体尺寸如图9所示。

参照2.3节中简化模型荷载施加位置,建立相应3种加载工况;3种工况均设置两个载荷步,荷载大小相等,均为0.289 MPa,方向相反,加载位置以及边界条件如图10所示。工况1模拟U肋外侧顶板主变形,在U肋外侧顶板施加荷载,约束内侧顶板端、U肋腹板端平动和转动自由度;工况2模拟U肋内侧顶板主变形,在U肋内侧顶板施加荷载,约束外侧顶板端、U肋腹板端平动和转动自由度;工况3模拟U肋腹板主变形,在U肋腹板施加荷载,约束内、外侧顶板端平动和转动自由度。

### 3.2 疲劳裂纹萌生位置分析

顶板-U肋焊缝疲劳开裂模式主要有4种,分别为顶板焊趾处开裂沿顶板厚度方向扩展,顶板焊根处开裂沿顶板竖向扩展,顶板焊根处开裂沿焊喉斜向扩展,U肋焊趾处开裂沿腹板厚度方向扩展,依次对应顶板焊趾竖向裂纹(①)、顶板焊根竖向裂纹(②)、顶板焊根斜裂纹(③)以及U肋焊趾斜裂纹(④)<sup>[6-8]</sup>,如图11所示。

根据4种疲劳开裂模式设置4条路径,分别是顶板焊趾侧顶板下表面路径1,顶板焊根侧顶板下表面路径2,顶板焊根侧U肋内壁路径3,U肋焊趾侧U肋外壁路径4,如图10所示。由于疲劳裂纹易

表1 内外侧顶板竖向位移差值  
Tab.1 Vertical displacement difference of inner and outer decks

Condition	$\Delta_A(\text{mm})$	$\Delta_B(\text{mm})$	$\Delta_C(\text{mm})$	Displacement of inner deck (mm)	Displacement of outer deck (mm)	Vertical displacement difference (mm)
T1	-0.60	-0.12	0.01	0.48	0.13	0.35
T2	-1.12	-0.36	-0.04	0.76	0.31	0.45
T3	-1.40	-0.74	-0.19	0.66	0.55	0.11
T4	-1.36	-1.11	-0.56	0.25	0.55	0.31
T5	-1.08	-1.27	-1.09	0.19	0.18	0.01
T6	-0.55	-1.15	-1.49	0.59	0.35	0.25
T7	-0.20	-0.79	-1.49	0.60	0.70	0.10
T8	-0.06	-0.39	-1.11	0.34	0.71	0.38
T9	-0.01	-0.13	-0.57	0.13	0.44	0.31

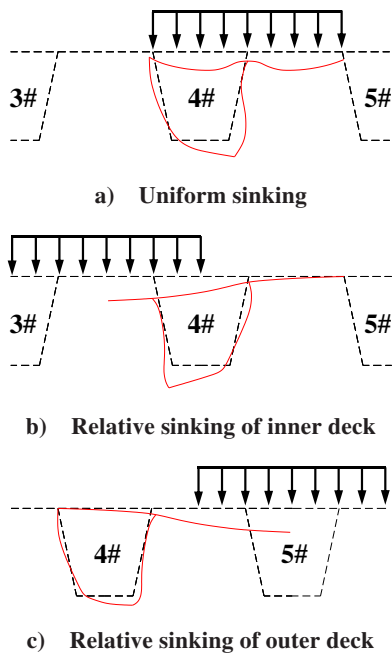


图5 顶板变形图示

Fig. 5 Diagram of deck deformation

沿与最大主拉应力的垂直方向萌生和扩展,故在静力模型中分别提取4条路径上的最大主拉应力分析裂纹萌生位置。

如图12所示,3种工况下4条路径上的最大主拉应力均在纵向中间部位达到最大值,表明相对于焊缝的端部,焊缝中部更容易萌生疲劳裂纹,可认为焊缝中部为疲劳源区。

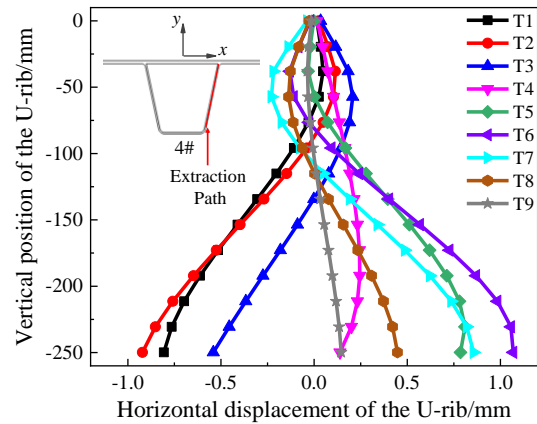


图6 U肋水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of U-rib

对于工况1,路径1和2疲劳源区的拉应力均达到120 MPa以上,路径4的拉应力也达到75 MPa,易萌生裂纹①、②和④。对于工况2,路径3和路径4的拉应力明显小于路径1和2,裂纹①和②萌生可能性较大。工况3情况相反,路径3和路径4的拉应力明显大于路径1和路径2,因此更易萌生裂纹③和④。不同工况下插入裂纹类型如表2所示。

#### 4 疲劳裂纹扩展规律

将局部模型导入FRANC3D,按3.2节分析插入初始裂纹并进行三维裂纹扩展模拟,采用两分析步循环荷载,应力比为-1。初始裂纹采用半椭圆形裂纹,裂纹深度为 $a$ ,表面长度为 $2c$ ,裂纹的扩展将在

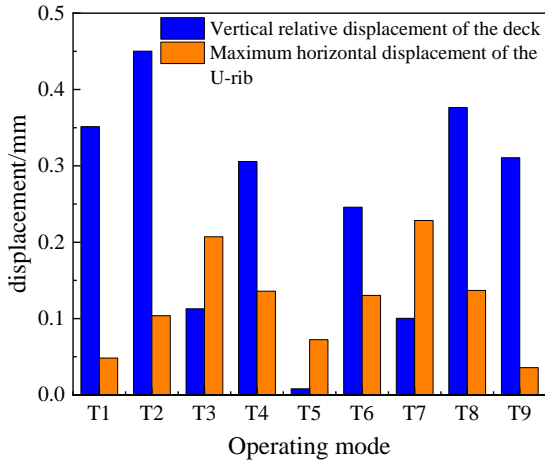


图7 顶板竖向相对位移和U肋最大水平位移比较  
Fig. 7 Comparison of vertical relative displacement of deck and maximum horizontal displacement of U-rib

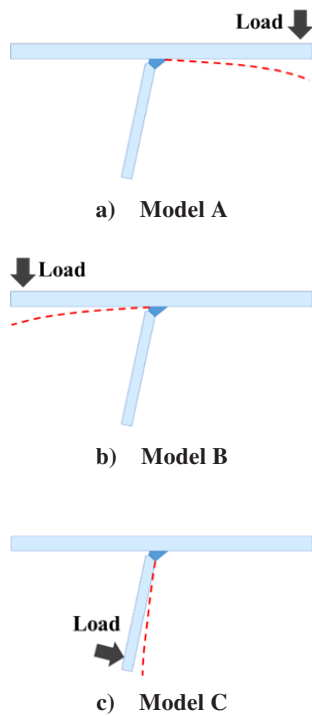


图8 简化模型  
Fig. 8 Simplified model

这两个方向同时进行,如图13所示。其中内圈的壳网格是当前的裂纹形态,而外圈显示的是扩展后拟合出的新的裂纹前缘。FRANC3D中以量纲1表示整个裂纹前缘弧长,以裂纹前缘各节点到起始点的弧长与整个弧长的比值表示各节点的位置。裂纹深度方向的扩展可由前缘中点(0.5)处的应力强度因子 $K$ 来反映;表面方向由于裂纹在沿前缘(0)

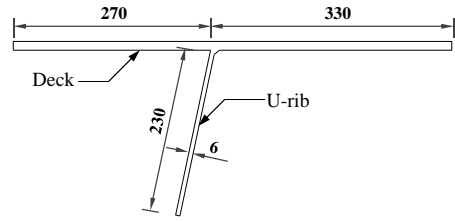


图9 顶板-U肋构造局部模型  
Fig. 9 Local model of U rib-to-deck structure

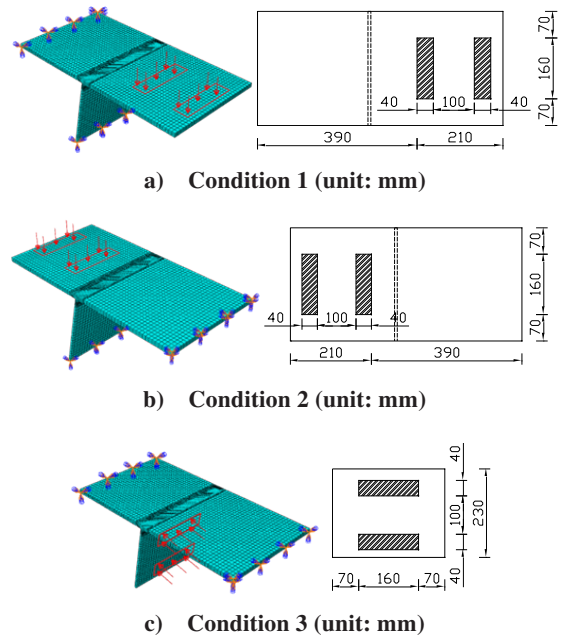


图10 局部模型工况  
Fig. 10 Conditions of local model

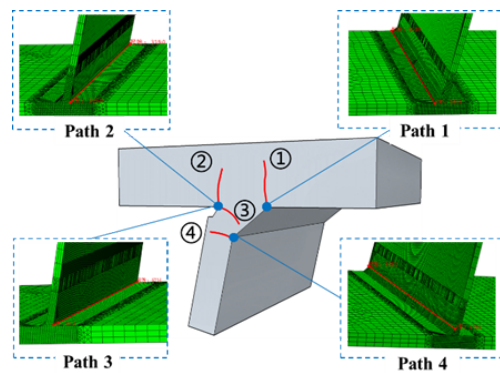


图11 疲劳开裂模式及路径设置  
Fig. 11 Fatigue cracking mode of U rib-to-deck weld and path settings

处和前缘(1)处的扩展基本对称,选取裂纹前缘端点(0)处的 $K$ 来研究裂纹在该方向的扩展规律。应力强度因子有3种类型, I 型应力强度因子( $K_I$ ),

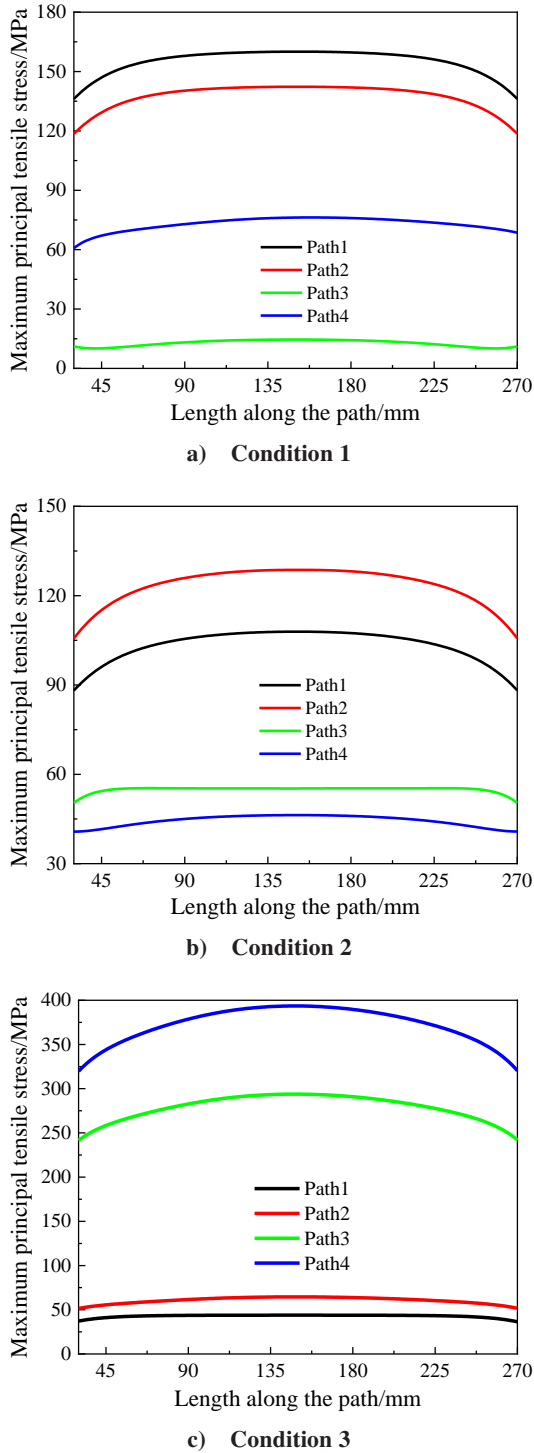


图 12 沿路径最大主拉应力分布

Fig. 12 Maximum principal tensile stress along the path

主要受张拉力控制;II型应力强度因子( $K_{II}$ )和III型应力强度因子( $K_{III}$ ),主要受剪切力控制。

4.1 裂纹深度方向

深度方向不同工况下裂尖 $K_{II}$ , $K_{III}$ 基本在0附近

表 2 插入裂纹类型  
Tab.2 Types of crack insertion

Conditions	Type of the crack
1	① ② ④
2	① ②
3	③ ④

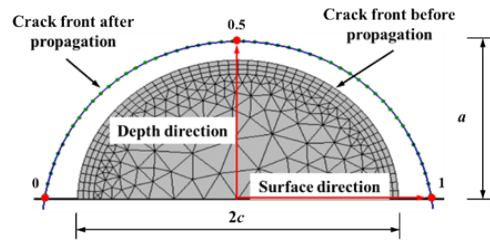


图 13 三维裂纹图示

Fig. 13 Diagram of three-dimensional crack

波动且幅度很小,可认为裂纹在深度方向扩展受张拉力控制。提取 $K_I$ 与裂纹深度 $a$ ,不同工况下 $a-K_I$ 曲线变化趋势基本一致,均前期增长迅速,后期较为稳定,如图 14 a) 所示。

利用 Paris 公式  $da/dN = c(\Delta K)^n$  ( $N$  为荷载循环次数) 计算出裂纹扩展速率与裂纹深度  $a$  的关系,进一步对  $da/dN$  和  $a$  取对数,得到如图 14 b) 所示的  $a - da/dN$  曲线,曲线互相基本平行。可以发现工况 3 下裂纹扩展速率明显高于其他工况,表明在以 U 肋腹板为主的变形下裂纹更易扩展。

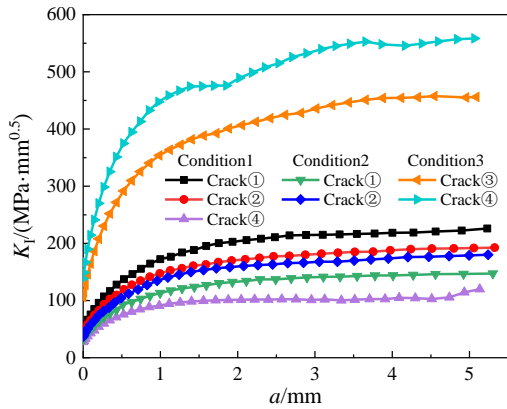
在 U 肋腹板为主的变形下,U 肋焊趾裂纹基本保持垂直 U 肋腹板厚度方向扩展;而顶板焊根横向裂纹在扩展中逐渐斜向下扩展,最终可能贯穿角焊缝,如图 15 所示。实桥中这类裂纹属于隐蔽裂纹,一旦发现表明已经成为贯穿裂纹,对结构危害较大,图 16 为实桥养护中发现的这类裂纹的部分照片。

4.2 裂纹表面方向

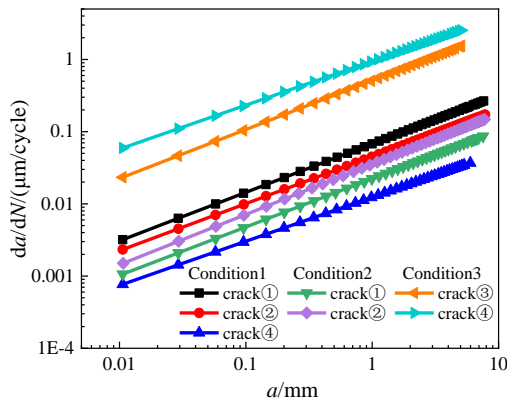
1) U 肋外侧顶板主变形

在表面方向上,顶板焊趾裂纹裂纹、顶板焊根竖向裂纹以及 U 肋焊趾裂纹的  $K_{II}$  和  $K_{III}$  也远小于  $K_I$ ,可以认为在 U 肋外侧顶板为主的变形下,表面裂纹属于 I 型裂纹。

绘制 3 种裂纹的  $c-N$  曲线 ( $N$  为荷载循环次数),如图 17 所示。由于  $c-N$  曲线斜率的物理意义即瞬时裂纹扩展速率,可以发现裂纹扩展全过程中



a)  $a-K_I$  curve



b)  $a-da/dN$  curve

图14 深度方向裂尖应力强度因子 $K_I$ 及扩展速率

Fig. 14  $K_I$  of crack tip and crack growth rate in depth direction

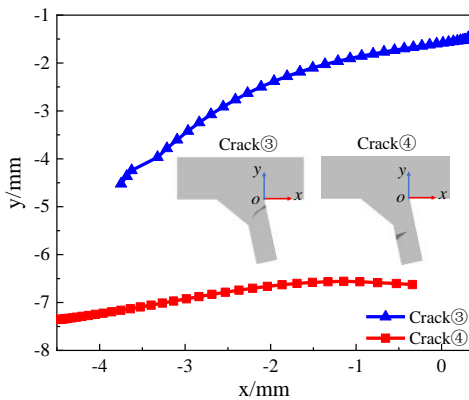


图15 工况3深度方向扩展路径

Fig. 15 Crack propagation path in depth direction of condition 3

$dc/dN$  始终保持增长,但前期和后期扩展速率增长较慢,中期增速最快。顶板焊趾裂纹和顶板焊跟竖向裂纹在荷载循环至10万次前即扩展到30 mm,而



图16 实桥顶板焊根贯穿裂纹

Fig. 16 root-weld penetration cracks

U肋焊趾裂纹扩展至相同长度时荷载循环超过40万次,表明顶板焊趾裂纹和顶板焊根竖向裂纹扩展速率明显大于U肋焊趾裂纹。

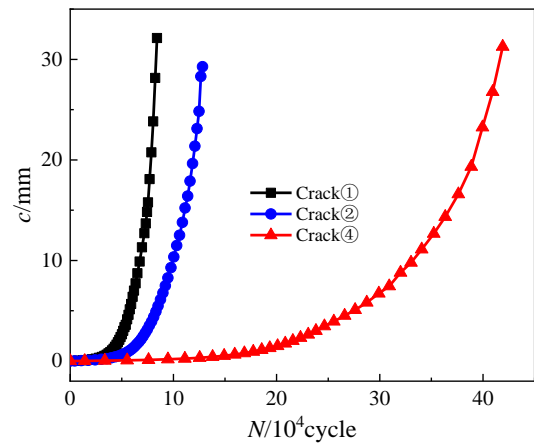


图17 工况1裂纹 $c-N$ 曲线

Fig. 17  $c-N$  curve of condition 1

2) U肋内侧顶板主变形

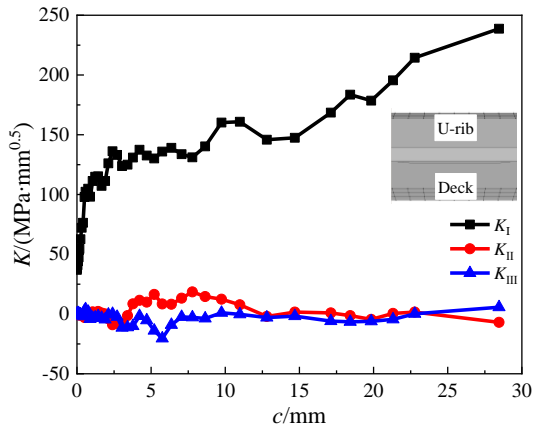
由图18中 $c-K$ 曲线可知,在表面方向上,顶板焊趾裂纹 $K_I$ 占据主导地位, $K_{II}$ 和 $K_{III}$ 相对较小,可认为在U肋内侧顶板为主的变形下顶板焊趾裂纹仍属于I型裂纹。而顶板焊根竖向裂纹的 $K_{II}$ 和 $K_{III}$ 明显增大,表明在U肋内侧顶板主变形下,顶板焊根竖向裂纹在表面扩展受到较大剪切力作用。

在表面方向的扩展路径上,2种裂纹均是从中心开始沿 $z$ 方向对称扩展,顶板焊趾裂纹基本平行缝扩展,而顶板焊根竖向裂纹在扩展过程中沿背离焊缝方向发生较大偏转。

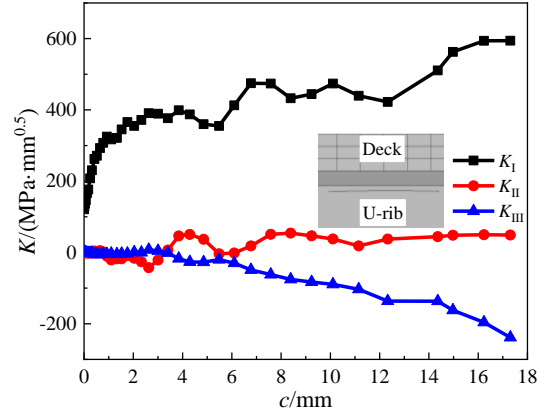
3) U肋腹板主变形

图19为工况3下顶板焊根横向裂纹和U肋焊趾裂纹的 $c-K$ 曲线及扩展路径。 $K_I$ 均占主导地位, $K_{II}/K_I$ 和 $K_{III}/K_I$ 在20%~30%,表明U肋腹板为主的变形下,表面裂纹属于以I型裂纹为主导的I-II-III复合型裂纹。对比图18可以发现,工况3下 $K_I$ 显著增大,表明相比于顶板变形,U肋腹板为主的变形

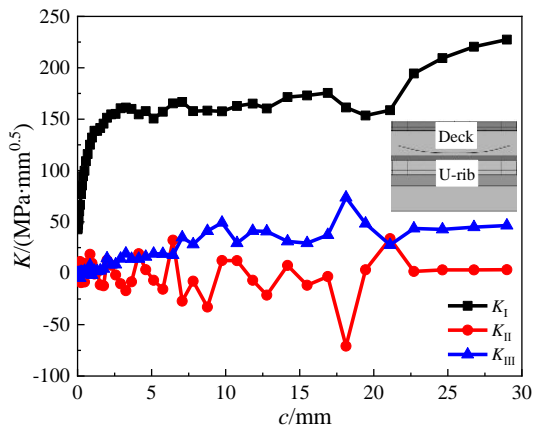




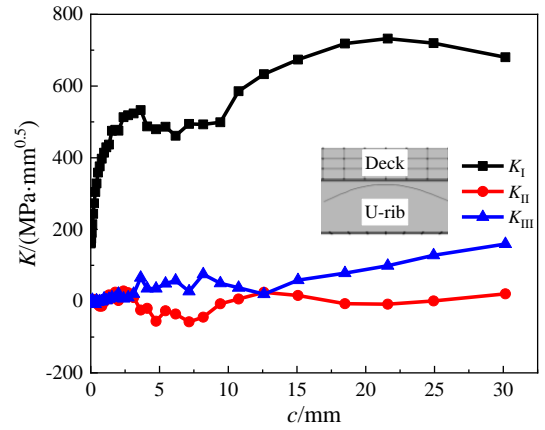
a) Crack①



a) Crack③



b) Crack②



b) Crack④

图 18 工况 2 裂纹  $c$ - $K$  曲线及扩展路径

Fig. 18  $c$ - $K$  curve and crack propagation path of condition 2

下裂纹扩展速率较大。在扩展路径方面,U肋焊趾裂纹偏转角度较大,沿焊缝水平扩展很短距离后偏向U肋母材斜向下与水平方向呈 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 延伸,顶板焊根横向裂纹则基本平行于焊缝。

### 5 结论

1) 当轮载作用于顶板-U肋焊缝正上方时,易萌生顶板焊根斜裂纹和U肋焊趾斜裂纹,其中顶板焊根斜裂纹易向U肋焊趾方向发生较大偏转;U肋焊趾裂纹在表面方向易转向U肋母材扩展;裂纹扩展速率较快,属于以 I 型裂纹主导的I-II-III复合型裂纹。

2) 当轮载向U肋外侧偏离时,各裂纹均有可能萌生,但顶板裂纹扩展速率明显快于U肋腹板裂纹;表面裂纹属于 I 型裂纹。

图 19 工况 3 裂纹  $c$ - $K$  曲线及扩展路径

Fig. 19  $c$ - $K$  curve and crack propagation path of condition 3

3) 当轮载向U肋内侧偏离时,更易萌生顶板焊趾竖向裂纹和顶板焊根竖向裂纹,表面裂纹以 I 型裂纹为主。

### 参考文献

[1] 姚悦, 吉伯海, 高玉强, 等. 钢板梁桥腹板间隙变形及力学特征 [J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(02): 35-44.  
YAO Y, JI B H, GAO Y Q, et al. Deformation and stress characteristics of web gap in steel plate girder bridge [J].

- Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(02): 35-44.
- [2] 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(03): 14-30+39.  
ZHANG Q H, BU Y Z, LI Q. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(03): 14-30+39.
- [3] CONNOR R J, FISHER J W, GATTI W, et al. Manual for design, construction, and maintenance of orthotropic steel deck bridges [M]. Washington: FHWA, 2012.
- [4] MALJAARS J, BONET E, PIIPERS RJM. Fatigue resistance of the deck plate in steel orthotropic deck structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 201: 214-228.
- [5] 陈艺旋, 刘朋, 赵健, 等. 钢桥正交异形板结构疲劳性能研究进展 [C]. 天津大学, 天津市钢结构协会. 第二十一届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2021: 178-183.  
CHEN Y X, LIU P, ZHAO J, et al. Research progress on fatigue performance of steel orthogonal bridge shaped plate [C]. Tianjin University, Tianjin Steel Structure Association. Proceedings of the 21st National Symposium on Modern Structural Engineering, 2021: 178-183.
- [6] 周绪红, 朋茜, 秦凤江, 等. 钢桥面板顶板与纵肋连接焊根位置疲劳损伤特征 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 1-12.  
ZHOU X H, PENG X, QIN F J, et al. Fatigue damage characteristics of rib-to-deck weld root on orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 1-12.
- [7] KOLSTEIN M H. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks [J]. Publication of Transport & Road Research Laboratory, 1990.
- [8] 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.
- [9] 曾志斌. 正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析 [J]. 钢结构, 2011, 26(2): 9-15+26.  
ZENG Z B. Classification and reasons of typical fatigue cracks in orthotropic steel deck [J]. Steel Construction, 2011, 26(2): 9-15+26.
- [10] 张允士, 李法雄, 熊锋, 等. 正交异性钢桥面板疲劳裂纹成因分析及控制 [J]. 公路交通科技, 2013, 30(08): 75-80.  
ZHANG Y S, LI F X, XIONG F, et al. Cause analysis and control measures of fatigue cracks in orthotropic steel deck [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(08): 75-80.
- [11] 祝志文, 李健朋, 汤琴. 轮载作用下正交异性钢桥面板构造细节受力特征及机理研究 [J]. 工程力学, 2023, 40(03): 163-174.  
ZHU Z W, LI J P, TANG Q. Stress Behaviors and mechanism of details of orthotropic steel deck under wheel loads [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(03): 163-174.
- [12] 卫星, 姜苏. 基于断裂力学的钢桥面肋-板接头疲劳寿命预测 [J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(01): 16-22.  
WEI X, JIANG S. Fatigue life prediction on rib-to-deck welded joints of steel bridge deck based on LFM [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(01): 16-22.
- [13] VAN DEN BERG N, XIN H H, VELJKOVIC M. Effects of residual stresses on fatigue crack propagation of an orthotropic steel bridge deck [J]. Materials & Design, 2021, 198: 109294.
- [14] 袁周致远, 吉伯海, 杜彦良, 等. 变幅荷载下钢桥疲劳裂纹扩展规律及长度预测方法研究 [J]. 土木工程学报, 2023.  
YUAN Z Z Y, JI B H, DU Y L, et al. Investigation on fatigue crack propagation law in steel bridge under variable amplitude load and its length prediction method [J]. China Civil Engineering Journal, 2023.
- [15] 张亚海, 郭宝圣, 张卫国, 等. 钢桥面板-纵肋双面焊缝疲劳裂纹应力强度因子 [J]. 土木与环境工程学报, 2022, 44(03): 62-70.  
ZHANG Y H, GUO B S, ZHANG W G, et al. Fatigue crack stress intensity factor of double-sided welded rib-to-deck joints in steel bridge deck [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(03): 62-70.
- [16] HENG J L, ZHENG K F, GOU C, et al. Fatigue performance of rib-to-deck joints in orthotropic steel decks with thickened edge U-ribs [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(09): 04017059.
- [17] WANG Y, WANG Z, ZHENG Y Q. Analysis of Fatigue Crack Propagation of an Orthotropic Bridge Deck Based on the Extended Finite Element Method [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 6319821.
- [18] 卜一之, 金正凯, 黄云, 等. 钢桥面板纵肋顶板焊缝疲劳裂纹扩展的关键影响因素 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(09): 61-70.  
BU Y Z, JIN Z K, HUANG Y, et al. Key influencing factors of fatigue crack propagation in rib-to-deck welded

- joints of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(09): 61-70.
- [19] JU X C, TATEISHI K. Fatigue Crack Behavior at Rib-To-Deck Weld Bead in Orthotropic Steel Deck [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(10): 1459 - 1468.
- [20] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D64-2015 公路钢结构桥梁设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- CCCC HIGHWAY CONSULTANTS Co., Ltd. JTG D64-2015 Specifications for design of highway steel bridge [S]. Beijing: China Communications Publishing & Media Management Co. Ltd., 2015.