

DOI:10.11784/tdxbz202505035

# 基于断裂力学的横隔板弧形切口疲劳裂纹 扩展行为预测方法

张文强, 邓彩艳, 龚宝明  
(天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 正交异性钢桥面板(OSBD)因其承载力高、跨越能力强在桥梁工程中得到广泛应用,但在服役过程中OSBD横隔板弧形切口处因应力集中效应易发生疲劳开裂。基于线弹性断裂力学理论(LEFM),采用围线积分方法计算了弧形切口处复合型(I型和II型)裂纹尖端的应力强度因子,在此基础上根据最大切应力准则确定复合型裂纹扩展时的偏转角度,通过网格的重划分实现疲劳裂纹的动态扩展,从而预测在移动轴载作用下弧形切口处的疲劳裂纹扩展行为。研究表明,在移动轴载作用下弧形切口处于复杂应力状态下,采用动态裂纹扩展技术能够实现疲劳裂纹扩展路径的捕捉,结合Q420qD钢的疲劳裂纹扩展速率试验实现弧形切口处疲劳裂纹扩展路径及疲劳寿命的预测。

**关键词:** 正交异性钢桥面板; 线弹性断裂力学; 疲劳裂纹扩展速率; 疲劳裂纹扩展行为

**中图分类号:** O346 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2026)06-0606-09

## Prediction Method for Fatigue Crack Propagation Behavior of Arc-Shaped Cutouts in Transverse Diaphragms Based on Fracture Mechanics

Zhang Wenqiang, Deng Caiyan, Gong Baoming  
(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Orthotropic steel bridge decks (OSBDs), owing to their high load-carrying capacity and outstanding spanning ability, have been widely used in bridge engineering applications. However, during service, fatigue cracking is prone to occur at the arc-shaped cutouts of transverse diaphragms due to stress concentration. Based on linear elastic fracture mechanics (LEFM), the stress intensity factors at the crack tip of the arc-shaped cutout under mixed-mode loading (mode I and mode II) are calculated using the contour integral method. The deflection angle is then determined according to the maximum tangential stress criterion. Fatigue crack growth is simulated dynamically through mesh redefinition, enabling the prediction of fatigue crack propagation behavior at arc-shaped cutouts under moving axle loads. The results indicate that the arc-shaped cutouts are subjected to a complex stress state under moving axle loads. The adoption of dynamic crack propagation techniques enables accurate tracking of crack paths. By incorporating experimentally determined crack growth rates for Q420qD steel, the propagation paths and fatigue life of cracks at the arc-shaped cutout in the transverse diaphragm can be predicted.

**Keywords:** orthotropic steel bridge deck (OSBD); linear elastic fracture mechanics; fatigue crack growth rate; fatigue crack propagation behavior

近年来,正交异性钢桥面板(orthotropic steel bridge deck, OSBD)承载力高、跨越能力强等特点在桥梁工程中得到了有效验证,并且应用广泛<sup>[1]</sup>。但OSBD具有复杂的焊接结构,主要为弧形切口处横隔

收稿日期: 2025-05-27; 修回日期: 2025-09-12.

作者简介: 张文强(1995—),男,博士研究生, wqzhang2022@tju.edu.cn.

通信作者: 邓彩艳, dengcy@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52375376).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52375376).

板与 U 肋间焊缝、顶板与 U 肋焊缝, 在车辆引起的疲劳载荷与二次应力的共同作用下, 焊接接头几何形状过渡部位会产生应力集中的现象, 如图 1 所示. 这些应力集中区通常为疲劳敏感区, 在长期处于亚临界荷载状态的基础上, 若存在初始制造缺陷, 极易诱发疲劳破坏, 进而威胁 OSBD 的安全服役性能<sup>[2-3]</sup>. 其中, 横隔板弧形切口近焊缝位置处因几何不连续等因素往往成为疲劳裂纹的萌生和扩展薄弱区, 是 OSBD 结构整体疲劳失效的关键薄弱点, 其开裂行为直接影响结构的服役寿命与安全性. 目前 OSBD 服役过程中弧形切口处的复合型裂纹 (I 型和 II 型) 疲劳开裂问题日益突出, 准确预测弧形切口的复合型疲劳裂纹扩展路径及疲劳寿命, 需要依赖大量基于断裂力学的数值计算, 研究分析门槛较高. 因此, 亟需一种准确高效的计算方法, 降低 OSBD 弧形切口疲劳裂纹扩展路径及其寿命预测的复杂性和技术难度.



图 1 横隔板弧形切口

Fig.1 Arc-shaped cutout in the transverse diaphragm

大量研究学者将研究重点聚焦于 OSBD 的不同焊接接头疲劳失效模式的分析中. Wang 等<sup>[4]</sup>通过基于牵引的结构应力法研究了 U 肋焊趾的疲劳失效模式. Li 等<sup>[5]</sup>通过等效结构应力法, 研究了 U 肋焊根的疲劳寿命. Gao 等<sup>[6]</sup>通过扩展有限元技术研究了纵肋焊趾的裂纹扩展路径. 但针对横隔板弧形切口的疲劳开裂问题, 目前尚未有系统的研究结论. 由于弧形切口处是由横隔板整体切割而成, 不具备焊接接头的几何特征, 采用上述针对焊接接头的疲劳失效分析方法具有局限性.

在实际服役过程中, 横隔板弧形切口处的受力情况复杂. 目前对横隔板弧形切口的研究思路主要分为两类: 一类是采用定量分析的方法, 通过足尺寸 OSBD 的疲劳试验, 得到弧形切口处横隔板的载荷变化情况, 评价弧形切口的疲劳开裂问题<sup>[7]</sup>; 另一类则是采用定性的力学分析方法, 结合疲劳敏感区的变形关系, 提出横隔板弧形切口产生疲劳开裂的原因是面外变形<sup>[8]</sup>. 以上两类观点各有优势, 但疲劳失效的根本机理是含缺陷结构长时间处于亚临界荷载下, 缺陷尖端的材料不能抵抗外荷载的循环作用, 进而发生疲劳开裂.

本文采用准静态围线积分的方法, 基于  $J$  积分的路径无关性, 在  $K$  主导区之中避免了线弹性断裂力学 (linear elastic fracture mechanics, LEFM) 中裂纹尖端的应力奇异性问题, 准确计算应力强度因子 (stress intensity factor, SIF) 作为断裂参量来表征裂纹尖端应力场. 根据最大切应力 (maximum tangential stress, MTS) 准则, 确定复杂应力状态下复合型裂纹的裂纹扩展偏转角度. 对 Q420qD 材料进行疲劳裂纹扩展速率试验, 确定疲劳裂纹扩展门槛值和 Paris 区的扩展速率参数, 通过 Python 对有限元准静态围线积分二次开发, 基于试验确定的裂纹扩展模型和准静态断裂力学分析实现动态疲劳裂纹扩展行为的预测.

## 1 理论方法与试验

### 1.1 疲劳裂纹失效理论

本文提出一种基于 Python 二次开发实现疲劳裂纹扩展路径的数值模拟方法. 在疲劳载荷作用下, 裂纹尖端应力强度因子范围  $\Delta K$  超过裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  时, 裂纹发生扩展. 基于合理的疲劳失效准则, 计算疲劳裂纹偏转角度, 利用网格重划分技术实现裂纹向前扩展, 继续迭代计算从而高效地计算出裂纹扩展路径上固定裂纹扩展增量  $\Delta a$  对应的裂纹尖端 SIFs 和  $J$  积分等断裂力学参数, 如图 2 所示.

在 OSBD 承受的复杂载荷作用下, 弧形切口处裂纹尖端通常处于 I 型和 II 型的复合状态, 其中 I 型和 II 型裂纹尖端的应力场<sup>[9-10]</sup>分别为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases} \quad (1)$$

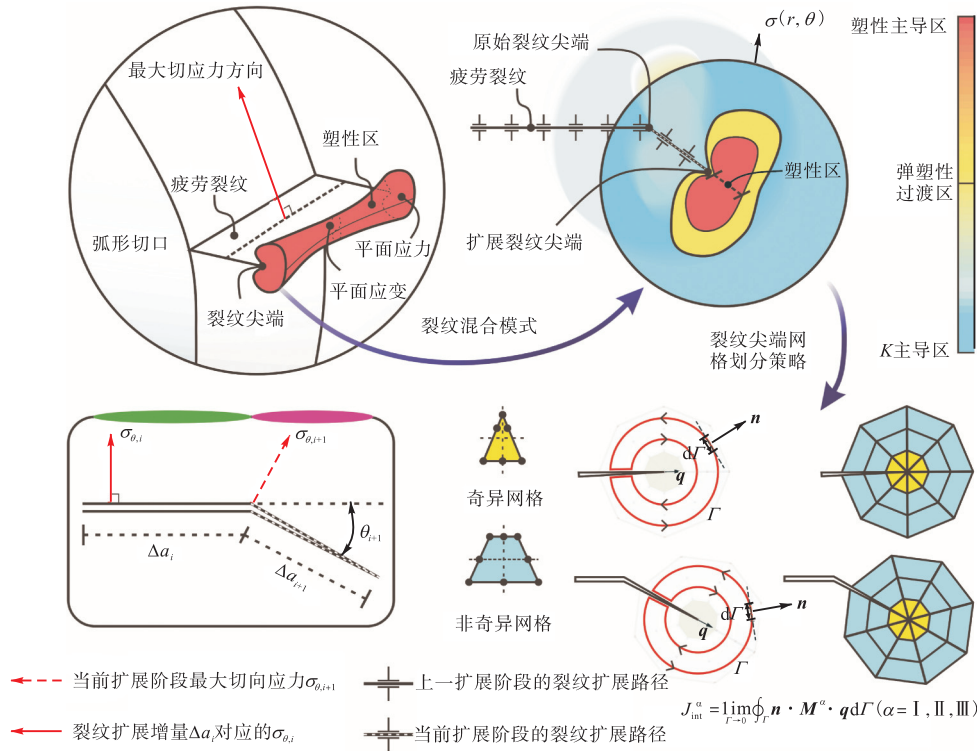


图 2 基于线弹性断裂力学理论框架的疲劳裂纹扩展  
Fig.2 LEFM-based theoretical framework for fatigue crack growth

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

在裂纹尖端应力分析的背景下,建立笛卡尔坐标系与极坐标系之间的转换关系:

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + 2\tau_{xy} \cos \alpha \sin \alpha \\ \sigma_\theta = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - 2\tau_{xy} \cos \alpha \sin \alpha \\ \tau_{r\theta} = (\sigma_y - \sigma_x) \cos \alpha \sin \alpha + \tau_{xy} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

将笛卡尔坐标系中的式(1)和式(2)向极坐标系转换,确定复合型(I型和II型)裂纹的切向应力值<sup>[11]</sup>为

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (4)$$

裂纹扩展过程中,裂纹从尖端开始沿垂直于最大切向应力对应的方向向前扩展,因此基于静态分析下的平稳性条件确定裂纹扩展扭转角度为

$$\theta = \arccos \left( \frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (5)$$

式中  $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ .

在相互作用积分方法的框架内,计算不同模式下

的裂纹尖端应力强度因子<sup>[12-13]</sup>为

$$K = 4\pi B J_{int} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{K} = [K_I \ K_{II} \ K_{III}]^T$ ;  $\mathbf{J}_{int} = [J_{int}^I \ J_{int}^{II} \ J_{int}^{III}]^T$ . 根据线弹性断裂力学中材料各项同性的假设,矩阵  $\mathbf{B}$  可简化为对角形式,即

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (1-\nu^2)/E & 0 & 0 \\ 0 & (1-\nu^2)/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/2\mu \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\nu$  为泊松比;  $E$  为弹性模量;  $\mu = E/[2(1+\nu)]$  为剪切模量.

基于  $J$  积分的定义,进一步确定模式  $\alpha$  下的相互作用积分  $J_{int}^\alpha$  为

$$J_{int}^\alpha = \lim_{r \rightarrow 0} \oint_{\Gamma} \mathbf{n} \cdot \mathbf{M}^\alpha \cdot \mathbf{q} d\Gamma \quad \alpha = I, II, III \quad (8)$$

式中:  $\Gamma$  为围绕裂纹尖端的封闭积分路径;  $\mathbf{n}$  为积分路径上的外法向量;  $\mathbf{q}$  为局部虚拟裂纹扩展方向,如图 2 所示;  $\mathbf{M}^\alpha$  为相互作用张量<sup>[13]</sup>. 结合式(6)提取复合型裂纹的应力强度因子  $K_I$  和  $K_{II}$ .

最后结合 Paris 公式<sup>[14]</sup>,预测疲劳裂纹扩展寿命( $N$ )与裂纹长度( $a$ )之间的关系为

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (9)$$

式中  $\Delta K$  为裂纹尖端的应力强度因子范围,疲劳裂纹

扩展的条件为  $\Delta K_{th} < \Delta K$ ，对于复合型裂纹， $K = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$ 。

### 1.2 具体实施流程及其适用性

本研究所提出的疲劳裂纹扩展行为预测方法，是基于 LEFM 理论和 MTS 准则以及网格重划分技术进行的，具体的实施流程如图 3 所示。首先根据疲劳载荷判断结构的疲劳危险位置，从而确定裂纹的萌生位置，在该位置插入长度为  $a_0$  的初始裂纹。随后通过相互作用积分计算复杂应力状态下裂纹尖端的应力强度因子  $K_I$ 、 $K_{II}$  和  $K_{III}$ ，并判断复合裂纹是否满足 Paris 裂纹扩展条件 ( $\Delta K_{th} < \Delta K$ )。若满足裂纹扩展条件，根据 MTS 准则确定裂纹偏转角度  $\theta$ ，按照预设裂纹扩展增量  $\Delta a$  向前推进裂纹前缘，同时执行网格重划分以更新裂纹尺寸。循环迭代裂纹扩展过程，直至达到设定的裂纹终止长度或失效准则，从而实现疲劳裂纹扩展行为的预测。

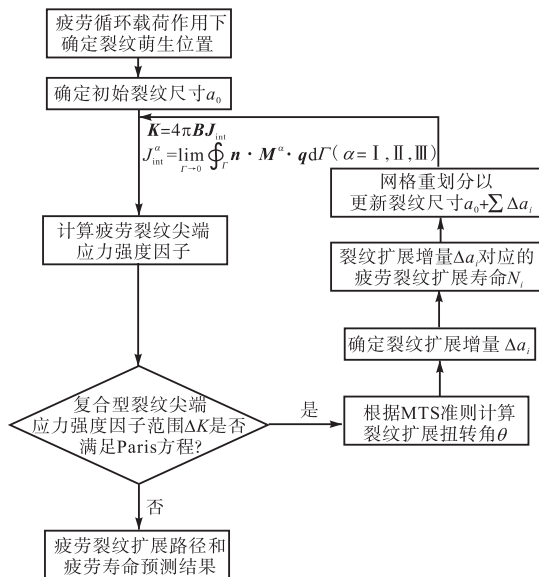


图 3 疲劳裂纹扩展行为预测方法流程

Fig.3 Flow chart of fatigue crack propagation behavior prediction method

本方法在裂纹扩展方向判定中引入了 MTS 准则，能够实现裂纹扩展路径的自适应判断，突破了人为预设方向的限制，适用于非对称载荷及结构复杂区域中的裂纹扩展行为模拟，如本研究中裂纹尖端处于 I/II 型复合应力状态下的 OSBD 弧形切口结构。在断裂力学参数提取方面，采用相互作用积分法精确计算复合型裂纹尖端的应力强度因子，能够适应复杂应力状态下的裂纹演化过程；在寿命预测过程中，以实际的疲劳裂纹扩展速率数据为基础构建 Paris 模型，保证了预测结果的工程意义和物理基础。同时，该方法基于 Python 语言二次开发，能够灵活对接

FRANC3D 与 ABAQUS 有限元平台，在实现裂纹扩展与网格重划分的自动化过程中具备较高的数值效率和工程适用性。

### 1.3 Q420qD 疲劳裂纹扩展试验

预测疲劳裂纹扩展寿命的基础是建立疲劳裂纹扩展速率模型，根据标准 ISO 12108<sup>[15]</sup> 和 GB/T 6398<sup>[16]</sup> 进行 Q420qD 材料的疲劳裂纹扩展速率 (fatigue crack growth rate, FCGR) 试验，建立裂纹扩展速率与应力强度因子范围之间的幂律关系。试验参数见表 1。

表 1 Q420qD 疲劳裂纹扩展速率试验参数

Tab.1 Parameters of FCGR tests for Q420qD

应力比 R	最大载荷 $P_{max}/kN$	机加工缺口长度 $a_m/mm$	试验频率 $f/Hz$
0.1	7.90	7.2	120 ~ 130

试验采用标准单边缺口弯曲试样，加载形式为三点弯曲加载如图 4 所示。试样标称几何尺寸为：宽度  $W = 48\text{ mm}$ ，厚度  $B = 16\text{ mm}$ ，跨距  $S = 192\text{ mm}$ 。试验在实验室室温环境下进行，疲劳预制裂纹阶段采用应力比为 0.1 的加载条件在 GPS200 高频试验机上开展，预制疲劳裂纹长度控制在 1 mm 左右。随后以恒载增  $K$  ( $P_{max} = 7.90\text{ kN}$ ) 的方式进行裂纹扩展试验，裂纹扩展阶段的结束条件设置为疲劳裂纹扩展长度达到  $(0.6 \sim 0.7)W$ 。其中，裂纹长度采用目视法进行测量。最后基于递增多项式的方法对疲劳裂纹扩展试验数据进行处理，获得 Q420qD 材料的疲劳裂纹扩展速率曲线，如图 4 所示。

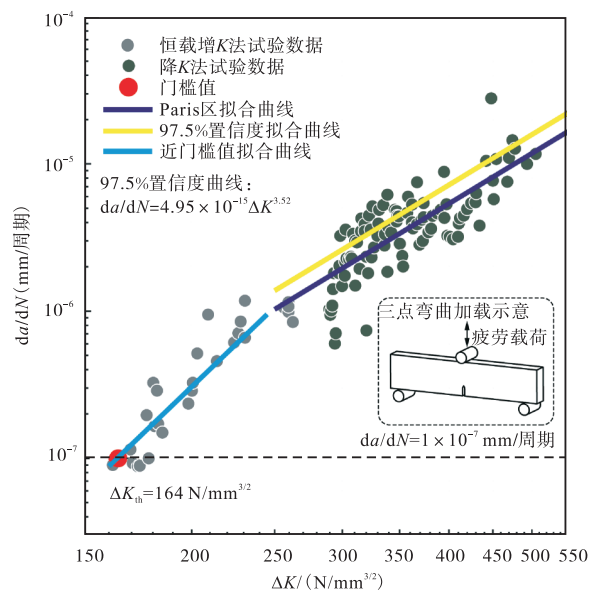


图 4 Q420qD 材料的疲劳裂纹扩展速率曲线

Fig.4 Fatigue crack growth rate curve of Q420qD

针对 Paris 区的数据,采用最小二乘法对式(9)进行线性回归分析.采用置信度为 97.5% (假设残差服从正态分布)的疲劳裂纹扩展模型,从而得到保守的裂纹扩展模型参数:  $C = 4.95 \times 10^{-15}$  和  $m = 3.52$ .

## 2 OSBD 应力状态分析

### 2.1 弧形切口的应力集中现象

图 5 为 2 跨 4 幅的节段尺寸正交异性钢桥面板的数值分析模型,模型全长 6 000 mm,高 720 mm,宽 1 350 mm,顶板厚 16 mm,横隔板厚 12 mm,U 肋厚 8 mm.同时,参考标准 BS 5400-2<sup>[17]</sup>中关于忽略

30 kN 以下的载荷对 OSBD 疲劳损伤影响的建议,采用标准 JTG D60<sup>[18]</sup>中推荐的 III 型疲劳载荷,即作用面积为长 600 mm、宽 200 mm 的 60 kN 轴载,该轴载可等效为均匀分布的压应力,其大小为  $\sigma = 0.5$  MPa.利用 ABAQUS 进行仿真建模,网格单元类型为 8 节点线性缩减积分单元 (C3D8R),弧形切口处最小网格尺寸为 1 mm.假设钢桥面板在轮载作用期间处于线性弹性,弹性模量取 206 GPa,泊松比为 0.3.

图 6 为疲劳载荷作用下的 OSBD 最大主应力分布云图.结果表明,在动态轴载作用下弧形切口处出现明显的应力集中现象,该区域作为疲劳裂纹易萌生位置是典型的疲劳敏感区.

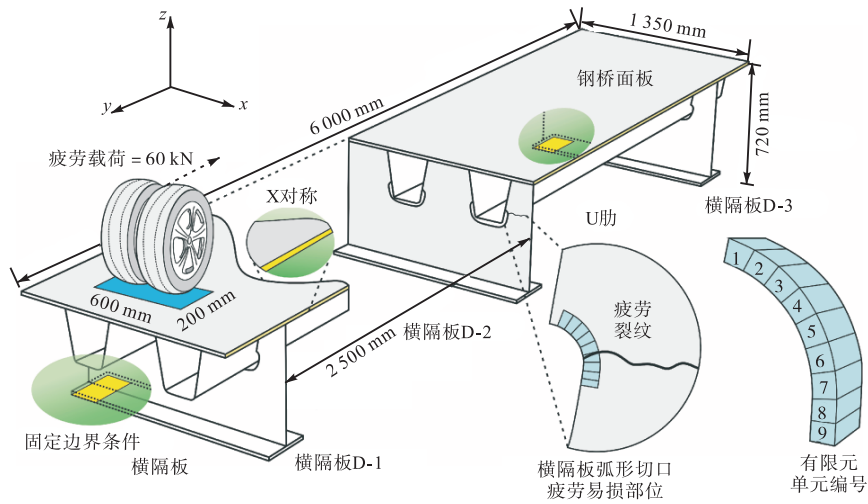


图 5 OSBD有限元模型配置  
Fig.5 Finite element model configuration of the OSBD

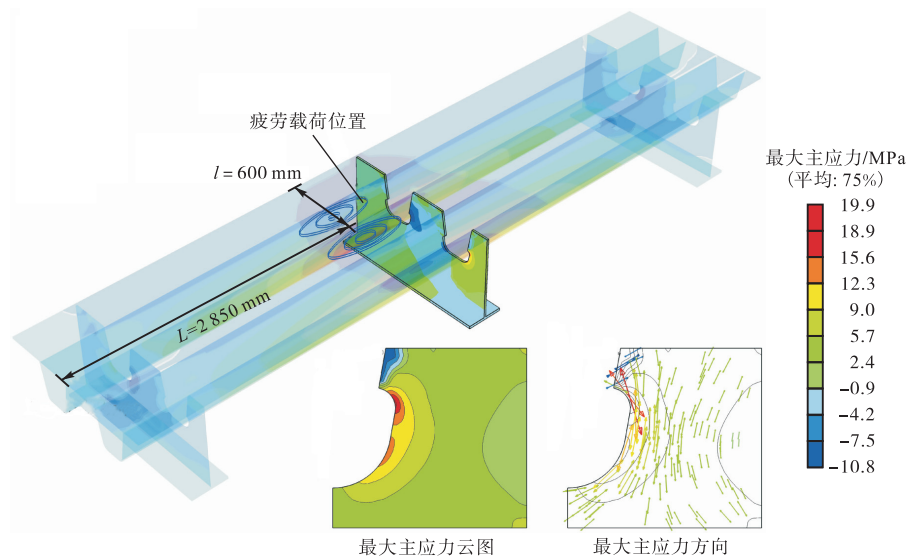


图 6 疲劳载荷作用下的 OSBD 最大主应力分布云图  
Fig.6 Maximum principal stress distribution in the OSBD under fatigue loading

### 2.2 疲劳载荷危险点

OSBD 结构承受非对称轮载作用时, 弧形切口处的应力响应具有显著差异. 因此, 为了确定在移动轴载作用下最易出现应力集中的位置, 研究不同横向分布的顺桥移动轴载对弧形切口处应力状态的影响至关重要. 采用 ABAQUS 中 DLOAD 子程序, 取相邻横向间距 150 mm 设置 6 种移动轴载方案, 从左到右编号依次为 LC-1、LC-2、LC-3、LC-4、LC-5 和 LC-6 (忽略桥面铺装层对动态轴载的分散作用), 如图 7 所示. 同时, 在横隔板 D1 和 D3 底部施加固定约束,

模拟实际桥梁结构中横隔板对桥面板的竖向支撑. 横桥向采用  $x$  方向对称边界条件模拟相邻桥面板对其面内外弯曲变形的约束作用.

随着轮载作用位置的不同, 弧形切口对移动轴载的应力响应也不同. 弧形切口的最大主应力分布如图 8 所示, 当纵向轮载由左至右移动时, 弧形切口处最大主应力由拉应力逐渐变化为压应力. 当轮载位于横隔板 D2 正上方时, 弧形切口处出现最大拉应力, 此时移动载荷方案为 LC-3.

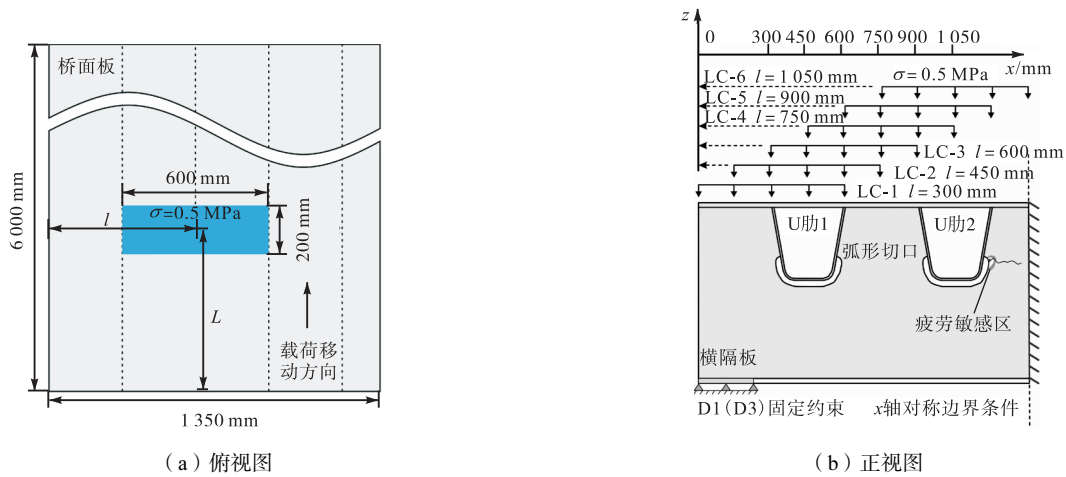


图 7 不同移动轴载分布方案及边界条件设置  
Fig.7 Schemes of the different moving axle-load arrangements and boundary conditions

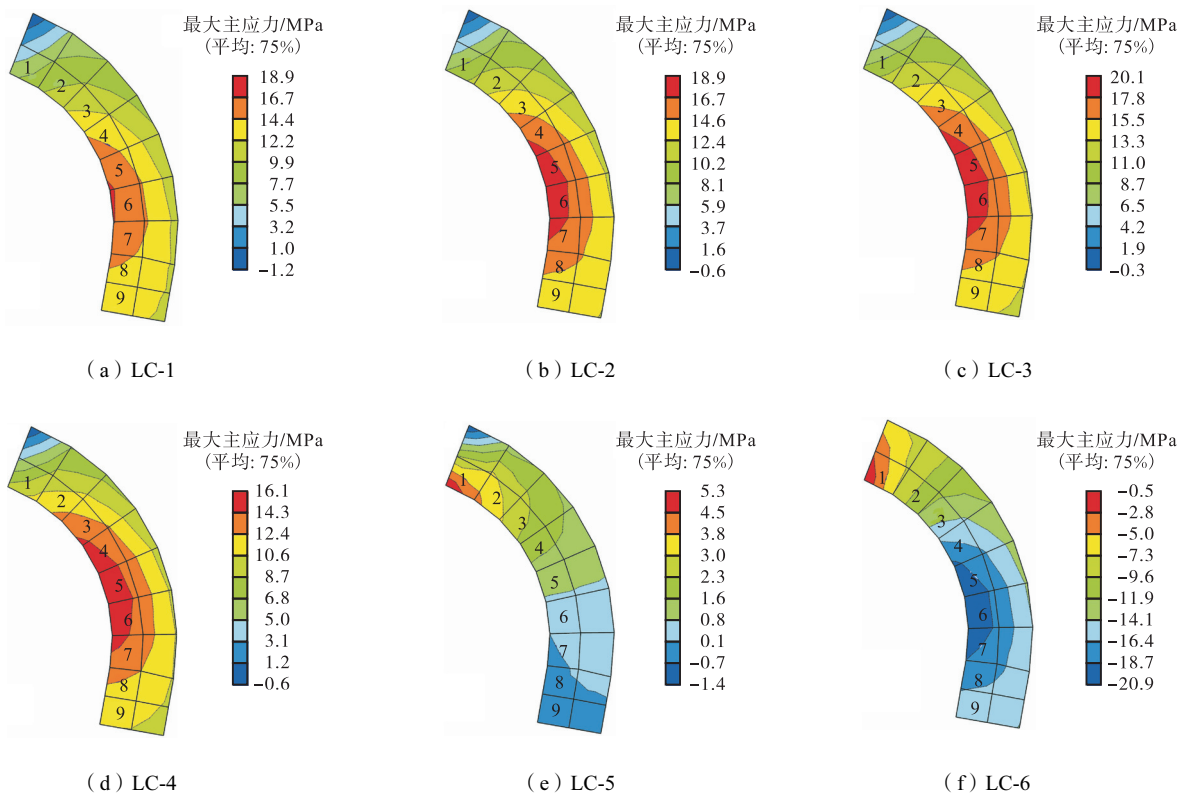


图 8 不同移动轴载作用下弧形切口最大主应力分布云图  
Fig.8 Maximum principal stress contours at arc-shaped cutout under different moving axle-loads

为了直观地对比不同载荷方案下弧形缺口随轴载移动时的危险点位置,提取了弧形缺口处在不同移动轴载方案 and 不同轴载作用位置下的最大主应力,分布云图如图 9 所示. 结果发现,单元 3、单元 4、单元 5、单元 6 最大主应力的最大值均出现在方案 LC-3

中轴载作用在纵向 2 794.5 mm 位置处,最大值分别为 20.53 MPa、21.49 MPa、21.76 MPa 和 20.64 MPa. 通过弧形切口处危险单元的最大主应力分析可知,单元 5 在 LC-3 移动载荷作用下为疲劳载荷危险点.

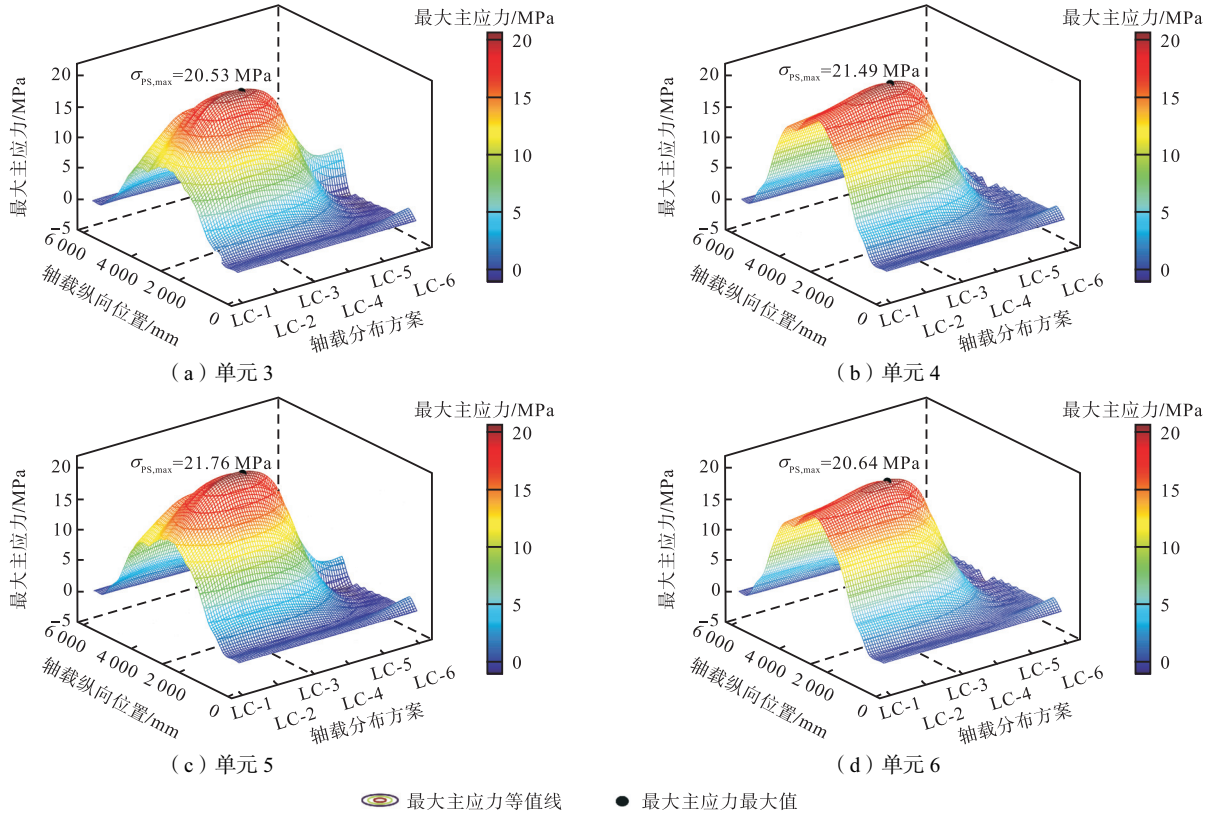


图 9 随轴载移动不同载荷方案下弧形切口最大主应力分布云图

Fig.9 Maximum principal stress contours at the arc-shaped cutout under different moving axle-load arrangements

### 3 疲劳裂纹扩展行为预测

基于断裂力学有限元分析软件 FRANC3D,在疲劳易损位置(弧形切口处单元 5),引入贯穿横隔板厚度的初始裂纹(初始裂纹长度 2 mm). 在裂纹前缘区域采用 3 层环状网格,利用相互作用积分计算裂纹尖端应力强度因子  $K_I$  和  $K_{II}$ ,同时根据式(5)确定疲劳裂纹扩展的扭转角度,采用固定裂纹扩展增量( $\Delta a = 0.1$  mm)迭代更新疲劳裂纹. 疲劳裂纹扩展过程的数值模拟结果如图 10 和图 11 所示.

裂纹尖端等效应力强度因子随疲劳裂纹扩展的变化趋势如图 12 所示,可以发现在复杂载荷作用下弧形切口处疲劳裂纹尖端等效应力强度因子具有先增大后减小的趋势,最后逐渐接近裂纹止裂区停止扩展. 在获得裂纹长度与对应的裂纹尖端等效应力强度因子数值模拟结果后,采用第 1.3 节中置信度为 97.5%的疲劳裂纹扩展模型,获得寿命预测曲线为

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{4.95 \times 10^{-15} \Delta K^{3.52}} da \tag{10}$$

式中:  $a_0$  为初始裂纹长度;  $a_f$  为终止裂纹长度.

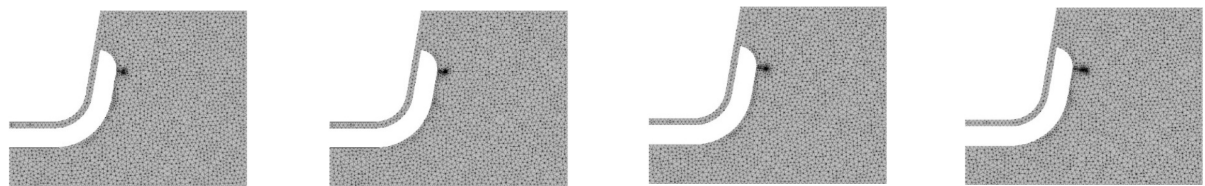
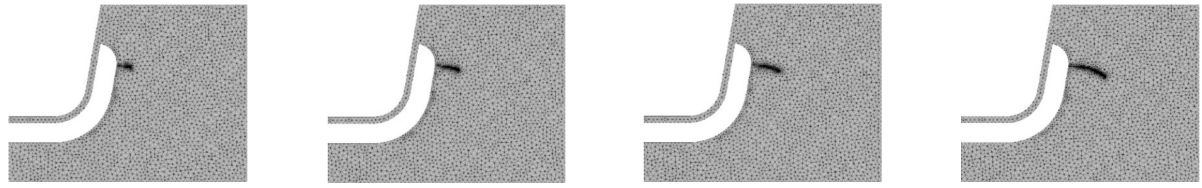
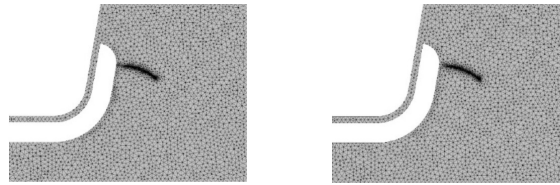


图 10 疲劳裂纹扩展路径的数值模拟结果(I)

Fig.10 Numerical simulation results of fatigue crack propagation paths (I)



(a)  $\Delta a = 17.3 \text{ mm}, N = 15\,479\,473$  (b)  $\Delta a = 27.7 \text{ mm}, N = 24\,760\,906$  (c)  $\Delta a = 33.8 \text{ mm}, N = 31\,091\,271$  (d)  $\Delta a = 45.6 \text{ mm}, N = 47\,641\,345$



(e)  $\Delta a = 48.9 \text{ mm}, N = 53\,866\,717$  (f)  $\Delta a = 54.8 \text{ mm}, N = 67\,603\,455$

图 11 疲劳裂纹扩展路径的数值模拟结果 (II)

Fig.11 Numerical simulation results of fatigue crack propagation paths (II)

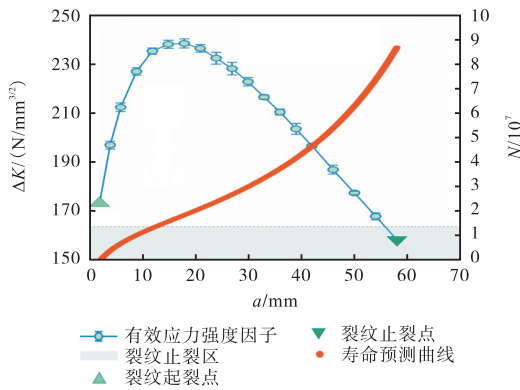


图 12 基于裂纹尖端 $\Delta K$ 的疲劳裂纹扩展寿命预测曲线

Fig.12 Predicted fatigue crack growth life curve based on  $\Delta K$  at the crack tip

#### 4 结 语

本研究针对正交异性钢桥面板 (OSBD) 横隔板弧形切口处的疲劳裂纹扩展行为, 在疲劳裂纹扩展速率试验的支撑下, 提出了一种基于线弹性断裂力学理论与最大切应力准则的数值预测方法, 实现复杂应力状态下的裂纹扩展. 主要结论如下.

根据疲劳裂纹扩展速率试验, 确定了材料 Q420qD 的裂纹扩展速率模型, 即  $C = 4.95 \times 10^{-15}$  和  $m = 3.52$ . 同时弧形切口处的应力场分析结果显示, 移动轴载作用下该区域存在显著的应力集中现象, 并确定了横隔板弧形切口区域近焊缝位置 (如单元 5) 为疲劳裂纹易萌生位置. 最后, 结合 Q420qD 钢的疲劳裂纹扩展速率试验结果, 所提出的方法实现了横隔板弧形切口处复合型裂纹的扩展路径及疲劳寿命的预测.

#### 参考文献:

- [1] Yan F, Chen W Z, Lin Z B. Prediction of fatigue life of welded details in cable-stayed orthotropic steel deck bridges[J]. Engineering Structures, 2016, 127: 344-358.
- [2] Tai M, Arima Y, Shimozato T. Fatigue strength enhancement by structural modification of transverse to longitudinal rib connections in orthotropic steel decks with open ribs[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 117: 104954.
- [3] Di J, Ruan X Z, Zhou X H, et al. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks based on strain monitoring data[J]. Engineering Structures, 2021, 228: 111437.
- [4] Wang P, Pei X J, Dong P S, et al. Traction structural stress analysis of fatigue behaviors of rib-to-deck joints in orthotropic bridge deck[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125: 11-22.
- [5] 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.
- [6] Gao T, Yuanzhou Z Y, Ji B H, et al. Determination of the critical fatigue crack length for orthotropic steel decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 205: 107904.
- [7] Huang Y, Zhang Q H, Bao Y, et al. Fatigue assessment of longitudinal rib-to-crossbeam welded joints in orthotropic steel bridge decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 159: 53-66.

- [8] Fu Z Q, Wang Y X, Ji B H, et al. Effects of multiaxial fatigue on typical details of orthotropic steel bridge deck[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 135: 137-146.
- [9] Westergaard H M. Bearing pressures and cracks : Bearing pressures through a slightly waved surface or through a nearly flat part of a cylinder, and related problems of cracks[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1939, 6(2): A49-A53.
- [10] Williams M L. On the stress distribution at the base of a stationary crack[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1957, 24(1): 109-114.
- [11] Carpinteri A. *Advanced Structural Mechanics*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [12] Shih C F, Asaro R J. Elastic-plastic analysis of cracks on bimaterial interfaces: Part I—Small scale yielding[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1998, 55(2): 299-316.
- [13] Dassault Systèmes Simulia Corp. *ABAQUS 6.14 Analysis User's Guide*[M]. Providence: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2014.
- [14] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85(4): 528-533.
- [15] ISO 12108 *Metallic Materials—Fatigue Testing—Fatigue Crack Growth Method*[S]. London: British Standards Institution, 2018.
- [16] GB/T 6398 *金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法*[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- GB/T 6398 *Metallic Materials—Fatigue Testing—Fatigue Crack Growth Method*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(in Chinese).
- [17] BS 5400-2 *Steel, Concrete and Composite Bridges. Specification for Loads*[S]. London: British Standards Institution, 2006.
- [18] JTG D60 *公路桥涵设计通用规范*[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- JTG D60 *General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts*[S]. Beijing: China Communications Press, 2015(in Chinese).

(责任编辑: 田 军)