DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20220104008

文章编号:1674-599X(2025)01-0088-10

引用格式:刘扬,罗怡成,鲁乃唯,等.钢桥面横隔板多疲劳裂纹耦合扩展数值模拟[J].交通科学与工程,2025,41(1):88-97.

Citation: LIU Yang, LUO Yicheng, LU Naiwei, et al. Numerical simulation of coupling propagation of multiple fatigue cracks in diaphragm of steel bridge deck[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 88-97.

钢桥面横隔板多疲劳裂纹耦合扩展数值模拟

刘扬1,2,罗怡成1,鲁乃唯1,王梓桐1,王鸿浩1

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.湖南工业大学 土木工程学院,湖南 株洲 412000)

摘 要:【目的】在长期运营下,正交异性钢桥面的横隔板弧形开孔处易萌生多条疲劳裂纹,这对桥梁的安全构成了 较大威胁,研究这些裂纹的耦合扩展特性能更好地保障桥梁安全。【方法】联合线弹性断裂力学理论和ABAQUS-FRANC3D交互建模技术,建立横隔板弧形开孔部位双疲劳裂纹扩展的数值分析模型,通过对比分析单裂纹和双裂 纹的扩展特性,揭示了初始裂纹形态比对耦合扩展效应的影响。【结果】横隔板弧形开孔部位的疲劳裂纹是以I型为 主导的复合型裂纹。相较于单疲劳裂纹扩展,双疲劳裂纹在耦合扩展时,其应力强度因子会降低,且扩展区域周边 的应力存在相互卸载作用。当初始形态相同的双疲劳裂纹经过一定的荷载循环后,其中一条裂纹的应力强度因子 会先增大,然后降低到裂纹扩展阈值以下,此后裂纹扩展形式由多裂纹扩展转变为单裂纹扩展。同时,当改变两条 裂纹的初始形态时,其扩展规律及结果保持一致。受双裂纹耦合扩展时应力相互卸载作用的影响,主裂纹的扩展 速度大幅减缓。在相同的循环次数下,单裂纹的扩展长度可达双裂纹的2.19倍。【结论】采用 ABAQUS-FRANC3D 交 互建模技术揭示了横隔板弧形开孔部位多疲劳裂纹的耦合扩展规律,其计算效率与精度高,研究成果可为该类疲 劳问题的分析提供参考。

关键词:钢桥面板;横隔板弧形开孔;多裂纹;应力强度因子;裂纹扩展 中图分类号:U446 **文献标志码**:A

Numerical simulation of coupling propagation of multiple fatigue cracks in diaphragm of steel bridge deck

LIU Yang^{1,2}, LUO Yicheng¹, LU Naiwei¹, WANG Zitong¹, WANG Honghao¹

(1.School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Scinece & Technology, Changsha 410114, China; 2.School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: [Purposes] Multiple fatigue cracks are prone to initiation at the arc-shaped opening of the diaphragm of an orthotropic steel bridge deck under long-term operation, which poses a great threat to the safety of the bridge. Studying the coupling propagation characteristics of these cracks can better ensure the safety of the bridge. [Methods] The numerical model for the propagation of double fatigue cracks at the arc-shaped opening of a diaphragm was established by combining the theory of linear elastic fracture mechanics and ABAQUS-FRANC3D interactive modeling technology. The crack propagation characteristics of single cracks and double cracks were analyzed to reveal the influence of initial crack shape ratio on the coupling propagation effect. [Findings] The fatigue cracks at the arc-shaped opening of the diaphragm are composite cracks dominated by type I. Compared to the propagation of single fatigue cracks, the coupling propagation of double fatigue cracks has a decreased

收稿日期:2022-01-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51908068、52178108)

通信作者:罗怡成(1997—),男,博士研究生,主要从事桥梁可靠性方面的研究工作。E-mail:18374964971@163.com

stress intensity factor, and there is a mutual unloading effect of stress around the propagation area. After a certain number of loading cycles of double fatigue cracks with the same initial shape, the stress intensity factor of one of the cracks first increases and then gradually decreases below the crack propagation threshold. Afterward, the crack propagation form transforms from multi-crack propagation to single-crack propagation. The propagation pattern and results remain the same when the initial shape of the two cracks is changed. The propagation of the main crack is greatly slowed down by the mutual unloading effect of stress during the coupling propagation of the double cracks. The propagation length of the single cracks can be up to 2.19 times that of the double cracks for the same number of cycles. **[Conclusions]** In this study, the coupling propagation law of multiple fatigue cracks at the arc-shaped opening of the diaphragm is revealed by using ABAQUS-FRANC3D interactive modeling technology with high computational efficiency and accuracy. The research results can provide a reference for the analysis of this kind of fatigue problems.

Key words: steel bridge deck; arc-shaped opening of diaphragm; multiple crack; stress intensity factor; crack propagation

正交异性钢桥面板因其出色的承载能力,不仅 能够适应多样化的地形条件,还能保障行车的舒适 性,因此在大跨度桥梁建设中得到了广泛应用^[1-2]。 然而,钢桥面板容易发生疲劳开裂,横隔板与U肋连 接处的弧形开孔部位的疲劳开裂是其中较为常见 的疲劳病害之一,该部位裂纹数量较多,对桥梁的 运营安全构成了较大威胁^[3-4]。

横隔板与U肋连接处的弧形开孔部位存在三种 不同的疲劳开裂类型,这些裂纹的产生位置和发展 方向各不相同,具体情况如图1所示。开裂形式C₁: 裂纹始于横隔板与U肋连接处焊缝下端的焊趾部 位,沿横隔板母材或者焊缝扩展;开裂形式C₂:裂纹 始于横隔板与U肋连接处焊缝下端的焊趾部位,沿 U肋母材扩展;开裂形式C₃:裂纹始于横隔板弧形开 孔部位应力集中区域,沿横隔板发展。张允士等^[5] 对国内某运行时间达15年的桥梁进行疲劳裂纹统 计,其中横隔板与U肋连接处的裂纹及横隔板弧形 开孔部位的裂纹分别占全桥裂纹的88%和9%。张



图1 横隔板疲劳开裂形式 Fig.1 Types of fatigue cracking in diaphragm

清华等^[6]统计了东京2处重要高速公路中的全部正 交异性钢桥面板的疲劳裂纹(约7000个闭口U肋), 发现U肋与横隔板连接处焊缝和弧形开孔部位的疲 劳裂纹数量在全桥裂纹中的占比高达38%。

曾志斌^[7]指出弧形开孔部位的细节设计、切割方 式和焊接工艺对于横隔板的受力性能具有较大影 响。CONNOR^[8]研究了弧形开孔的形状、高度以及横 隔板母材的厚度对结构受力性能的影响,并得出了 以下结论:当弧形开孔的高度取为U肋高度的1/3~ 1/2,并且确保开孔端部的过渡平滑时,结构的受力性 能能够得到保障。李传习等^[9]结合实际工程中车流 荷载等实测数据,得出横隔板弧形开孔部位的轮载 应力基本为膜压应力。刘益铭等^[10]结合模型试验与 有限元软件,研究了横隔板与U肋连接处焊缝焊趾 部位的疲劳裂纹扩展特性及结构寿命。唐亮等^[11]研 究了横隔板与U肋连接处弧形开孔部位的受力特 征,揭示了横隔板高度、种类对裂纹的影响。

目前,钢桥面板的研究大多聚焦于单裂纹的扩展 行为,而多裂纹的研究则更多集中于机械工程和航空 航天工程领域,特别是针对老化材料及多疲劳裂纹 (multi-fatigue crack, MFC)结构的分析。与单裂纹相 比,多裂纹的扩展特性显得更为复杂:它们萌生后会在 各自所在区域内独立发展并相互影响。在实际桥梁结 构中,横隔板弧形开孔区域往往存在多条疲劳裂纹,然 而,针对这一具体情形的研究仍然较少。SHEN等^[12] 研究了多裂纹相互作用机理,得到了应力强度因子 的强化区和弱化区。金通^[13]研究了横隔板弧形开孔 处双疲劳裂纹的扩展特性,但并未考虑其他因素的 影响。针对横隔板弧形开孔处出现的多疲劳裂纹问题,现有研究需综合考虑裂纹的尺寸、角度、间距等 多种因素,以更全面地探究其耦合扩展的复杂行为。

为了研究钢桥面横隔板弧形开孔部位多个疲 劳裂纹的扩展特性,结合线弹性断裂力学理论和 ABAQUS-FRANC3D交互建模技术,建立了横隔板 弧形开孔部位双疲劳裂纹扩展的数值模型,对比分 析了单疲劳裂纹和双疲劳裂纹的扩展特性,揭示了 初始裂纹形态比对耦合扩展效应的影响规律。

1 裂纹尖端应力强度因子表达式

线弹性断裂力学法广泛应用于正交异性钢桥 面板的疲劳评估中,该方法用裂纹尺寸以及扩展速 率的大小来判断结构是否损伤。其中,疲劳裂纹按 类型主要可分为Ⅰ型(张开型)、Ⅱ型(滑开型)和Ⅲ 型(撕开型)裂纹三类。鉴于结构受力情况的复杂 性,横隔板弧形开孔部位的疲劳开裂往往是这三种 类型裂纹共同作用的结果,因此需要综合考虑各类 裂纹的影响^[14]。作为判定裂纹扩展速率的核心参 数之一,疲劳裂纹尖端应力强度因子的准确计算对 于研究裂纹的扩展特性至关重要。

本文拟采用文献[15-16]提出的M-积分法,借助有限元软件计算得出三种不同类型疲劳裂纹应力强度因子幅值。其表达式如下:

$$M^{(1,2)} = \int_{\Gamma} (\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} - W^{(1,2)} \delta_{1j}) \frac{\partial q}{\partial x_j} \, \mathrm{d}s/A_q$$
(1)

式中: Γ 为围绕裂纹尖端的积分路径; $i=1,2;j=1,2;u_i$ 为位移矢量的分量; x_1,x_j 为裂纹的局部坐标; δ_{ij} 为控制计算分量的参数,当j不为1时取0,当j为1时取1; q为在裂纹尖端为1,在积分域边界为0的函数; $A_q = \int_L q_i \, ds, q_i$ 为裂纹前缘函数值,L为积分路径,其取值与q的分布有关; $W^{(1,2)}$ 为相互作用应变能密度,定义为:

 $W^{(1,2)} = \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)}$ (2) 式中: σ_{ij} 是应力张量; ε_{ij} 是应变张量;上标(1)(2)分 别代表实际场和辅助场。

2 ABAQUS-FRANC3D联合建模分析

2.1 ABAQUS-FRANC3D 交互建模技术

与有限元法相比,边界元法具备计算高效且结

果相对精确可靠的优势。FRANC3D软件能对引入的任意形状裂纹进行网格自适应重划分,而后可调用ABAQUS软件进行求解,以降低单一有限元软件进行裂纹分析时的工作量,有效提高计算的精度,适合对复杂情况下的裂纹进行扩展分析。ABAQUS与FRANC3D联合建模分析流程如图2所示。



图2 ABAQUS与FRANC3D联合建模分析流程



关键分析流程为:

1)使用ABAQUS分别建立完整的有限元模型 与裂纹扩展分析的局部子模型;

2)将含有初始裂纹的子模型导入FRANC3D 中,而后在网格自适应重划分后调用ABAQUS进行 裂纹尖端参量计算,最后设置参数进行裂纹扩展;

3)将模型剩余部分与裂纹扩展终止后获得的 更新裂纹的前端节段子模型进行合并,通过有限元 软件得到更新裂纹的应力强度因子并预测其疲劳 寿命。

2.2 有限元模型

本文选取国内应用较为广泛的正交异性钢桥 面板作为研究对象,通过ABAQUS建立节段模型进 行应力分析,其中包括5个U肋和4个横隔板。顶板 厚16 mm,U肋厚8 mm,U肋上口和下口宽分别为 300、170 mm,横隔板厚12 mm,横隔板纵向间距为3 m。采用Q345钢材,其弹性模量为210 GPa,泊松比 为0.3。钢桥面板和U肋全都采用熔透焊接,焊缝熔 透率是75%,顶板与U肋装配间隙参数g为2 mm,正 交异性钢桥面板节段模型如图3所示。

文献[17]对节段试件简化模型进行了应力 分析,选取横向长度900 mm、纵向长度400 mm的 单个U肋,通过改变其横向参数(M+300+N) mm的 组成,探究小模型的可行性。在误差允许的范围



图3 正交异性钢桥面板节段模型

Fig.3 Segmental model of orthotropic steel bridge deck 内,最终确定参数组合(250+300+350) mm 与参数组 合(300+300+300) mm 均能反应横隔板与U肋连接 处的实际受力特征。考虑到研究的便捷性,选取对 称的参数组合(300+300+300) mm 作为简化模型参 数,纵向长度为400 mm。

文献[18]指出,轮载作用下横隔板与U肋连接 处的应力影响区域较小,此时可以采用单个车轮加 载来模拟车辆荷载,选取的加载区域的长、宽均为 200 mm。文献[19]对最不利加载工况进行了分析, 研究表明:横隔板弧形开孔区域的横向最不利加载 位置恰好位于横隔板与U肋连接处的正上方,即所 谓的骑U肋加载工况。为了简化计算过程,本文在 有限元简化模型中采用模拟单个车轮荷载的方式 进行骑U肋加载,有限元简化模型如图4所示。



图4 有限元简化模型 Fig. 4 Simplified finite element model

由图4可知,本文对横隔板开孔部位进行了网格加密处理,选用了二阶六面体单元进行划分,外侧粗略区域的网格尺寸为8 mm×8 mm,而由内向外则采用了从2 mm逐渐过渡至8 mm的扫掠划分方式。顶板部位的网格大小为8 mm×8 mm,U肋部位网格大小为5 mm×5 mm,均为二阶六面体单元。

边界条件的施加方式如下:为模拟钢箱梁对简 化模型的竖向约束效果,对横隔板的下表面节点施 加了竖向位移约束;为模拟钢箱梁在纵桥向对模型 的约束作用,对顶板与U肋两端在纵桥向的表面节 点施加了纵向位移约束;为反映钢箱梁在横向对模型的约束,还对顶板两侧的表面节点施加了横向位移约束。

为验证采用简化模型分析的合理性和准确性, 本文提取有限元节段模型和简化模型横隔板弧形开 孔部位的空间位移U进行对比分析。提取路径如图 5所示,空间位移U的变化曲线如图6所示。由图6 可知,两个模型的位移量极为接近,相差不超过4%, 证明了(300+300+300) mm的简化模型中横隔板弧 形开孔的实际受力特征与节段模型中的基本一致。



Fig. 5 Extraction path 0.22 节段模型 简化模型 0.18 umu/0.14 空间位移 0.10 0.06 0.02 L 50 100 150 200 250 300 350 路径长度/mm 图6 空间位移U变化曲线



2.3 初始裂纹形态的拟定

裂纹深度 a 和裂纹形态比 a/c(c 为裂纹长度的 1/2)是两个直接影响疲劳裂纹扩展程度的关键参 数,诸多学者对其进行研究后给出了相应的取值范 围。国际焊接协会(IIW)推荐 a=0.15 mm, a/c=0.1, 英国 BS 7910:2013标准推荐 a 为 0.10 ~ 0.15, a/c 则 由焊缝及裂纹的种类共同决定。文献[20]提出 a 不 应小于 0.1 mm。本文采用王春生等^[21]提出的方法, 将在横隔板弧形开孔部位插入的 1/4 椭圆形裂纹作 为初始裂纹,其中 a=2.5 mm, 2c=10 mm, a/c=0.5。两 条裂纹初始形态一致,分别命名为L₁、L₂。弧形开孔 形式如图7所示,裂纹插入位置为横隔板弧形开孔 的曲率变化处,由于曲率变化不连续,该处应力较 其他地方更为集中。初始裂纹形态及其插入位置 如图8所示。



图7 弧形开孔尺寸参数(单位:mm)





图8 裂纹插入位置及初始尺寸(单位:mm)

Fig. 8 Crack insertion position and initial size (unit:mm)

为了更好地分析双裂纹的扩展特性,研究单裂 纹扩展与双裂纹扩展的异同,本文采取如下步骤进 行分析:

1) 计算弧形开孔部位单条裂纹*L*₁扩展时裂纹 尖端应力强度因子;

2) 计算弧形开孔部位单条裂纹 L₂扩展时裂纹 尖端应力强度因子;

3) 计算弧形开孔部位双裂纹*L*₁、*L*₂同时扩展时裂 纹尖端应力强度因子,考虑初始裂纹形态的影响;

4) 对比分析双裂纹耦合扩展是否影响扩展 速率。

3 单裂纹尖端应力强度因子分析

本文使用ABAQUS建立无裂纹实体模型,并将 其导入断裂力学分析软件FRANC3D中,在钢桥面 板横隔板弧形开孔部位插入一条初始裂纹,并进行 网格重划分(网格尺寸统一为0.25 mm),建立含裂 纹实体的子模型,得出荷载影响下裂纹L₁、L₂尖端应 力强度因子幅值,如图9~10所示。

由图9~10可知,裂纹 L_1 与 L_2 的应力强度因子的分布特征相似且数值相差不大。其中 K_1 数值较大, K_1 和 K_m 数值较小(K_1 、 K_1 、 K_m 分别为I、II、III型应力强度因子),表明横隔板弧形开孔部位的疲劳裂纹为复合型裂纹,且以I型裂纹为主。由于 K_1 、 K_m 与 K_1 相差较大,故本文暂不考虑 K_1 、 K_m 的影响,仅针对 K_1 进行研究。



Fig. 9 Amplitude distribution of stress intensity factor for

 $\operatorname{crack} L_1$





从理论上讲,疲劳裂纹前缘可以被视为由无数 个节点构成。在FRANC3D中,裂纹前缘可被离散 为有限数量的节点以便分析,但节点数量过大,若 对每个节点的应力强度因子都进行统计分析,不仅 会极大地增加运算量,而且海量数据的处理也会变 得异常困难。因此,本文只取裂纹前缘两端节点作 为关键节点进行统计分析,节点A₁和B₁位于裂纹L₁ 上,节点A₂和B₂位于裂纹L₂上,如图11所示。





在研究疲劳裂纹扩展特性时,确定裂纹扩展速 率是核心任务,它直接关系到研究能否顺利推进。 在线弹性断裂力学理论中,疲劳裂纹的扩展速率通 常用Paris公式来描述。

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N} = C(\Delta K)^m \tag{3}$$

式中:a代表疲劳裂纹尺寸;N代表应力循环次数; da/dN代表一个循环应力引起的裂纹增长;C、m为 材料相关参数; ΔK 代表循环应力强度因子。

根据 Paris 公式,裂纹前缘应力强度因子是计算 裂纹扩展速率的关键因素。在正交异性钢桥面板的 疲劳性能评估及剩余寿命预测等相关研究中, Paris 公式得到了广泛应用,并在此过程中不断得到发展 与完善。本文将式(3)中的材料参数取为C=1.58× e⁻¹¹, m=3, 断裂韧性 K_c=1 000 MPa·mm^{1/2}, 应力比为 0.1^[22-23],分别对裂纹L,L,进行扩展。当裂纹达到30 个扩展步长、循环次数约16万次时停止扩展,终止时 裂纹扩展路径如图12所示,扩展过程中裂纹L、L。两 端关键节点应力强度因子变化曲线如图13所示。扩 展结果表明:横隔板弧形开孔部位单一角裂纹L,L, 两端点的应力强度因子在循环荷载的作用下逐渐 增大,在一定的荷载循环次数后贯穿横隔板形成贯 穿型疲劳裂纹,且贯穿时贯穿端应力强度因子增大 得较为明显,之后A1、B1两点的应力强度因子以较为 平稳的速率持续增长。

4 双裂纹扩展特性研究

4.1 双裂纹耦合应力强度因子

本文保持疲劳裂纹扩展参数不变,同时添加裂 纹L₁、L₂并进行扩展模拟。当裂纹达到22个扩展步





度因子的变化曲线如图14所示。





裂纹扩展结果表明:双疲劳裂纹耦合扩展时,两处扩展区域周边应力存在相互卸载作用。在初始阶段,裂纹L₁和L₂两端关键节点应力强度因子数 值较为接近,但随着裂纹扩展的持续进行,两者呈现出明显的不同。裂纹L₁两端关键节点应力强度 因子不断增大。其中,A₁端初期应力强度因子增幅 明显,随后保持相对稳定,B₁端的应力强度因子增幅 明显,随后保持相对稳定,B₁端的应力强度因子则一 直以较大的速率增长。裂纹L₂两端关键节点的应 力强度因子先缓慢增大,在一定的循环次数后,其 应力强度因子逐渐减小。最终裂纹L₂停止发展,裂 纹L₁持续发展成为主裂纹。

4.2 初始裂纹形态对双裂纹扩展的影响

为研究初始裂纹形态对双裂纹耦合扩展的影响,本节保持裂纹长度不变(5 mm)、裂纹扩展参数 不变以及裂纹L₁、L₂的初始形态一致,只对裂纹深度 *a*进行调整,使裂纹形态比*alc*分别为0.2、0.4、0.6和 0.8,然后进行扩展模拟。当循环次数达到约25万 次时,终止扩展,此时4种不同形态比下双裂纹两端 关键节点应力强度因子见图15。

由图 15 可知,在改变裂纹初始形态比时,虽然 初始应力强度因子因裂纹形态的差异而有所不同, 但各种形态比下裂纹却展现出了相似的扩展规律。 具体而言,在四种不同形态比下,*L*₁裂纹两端关键节 点的应力强度因子均持续增大,并最终发展成为主 裂纹,初始形态比越大,裂纹扩展至*A*₁端并贯穿横 隔板所需的荷载循环次数就越少;裂纹*L*₂两端关键 节点强度因子在扩展初期略有上升,且这种上升趋



势在初始形态比较小时更为显著,但是达到一定循 环次数后其值逐渐降低,且A2端开始减小的时间总 是比B2端的早,最终L2裂纹停止扩展。这一扩展特 性与前文中裂纹初始形态比为0.5时的情况基本一 致。由此可知,在两条裂纹保持相同初始形态的情 况下,两处裂纹扩展对周围区域应力产生的相互卸 载作用基本一致,最终的双裂纹耦合扩展结果并未 因初始形态比的改变而产生较大差异。

4.3 双裂纹耦合扩展速率分析

为研究多疲劳裂纹中主裂纹在耦合作用下的 扩展速率,设定裂纹初始形态比为0.5,扩展次数为 16万次,研究此时单疲劳裂纹、双疲劳裂纹L₁的扩 展长度,扩展中裂纹L₁的形态变化如图16所示,扩 展长度如图17所示。









裂纹L₁的扩展长度显著减小。当单裂纹扩展已贯 穿横隔板,内表面裂纹长度快速增大时,双裂纹扩 展情况下的裂纹L₁还未贯穿横隔板。最终,单裂纹 的扩展长度达到了双裂纹扩展长度的2.19倍。两 种模拟情形下各扩展分析步的裂纹扩展速率如图 18所示。



在扩展过程中,裂纹L₁的扩展速率持续增大, 呈现出近似线性的增长趋势。通过对比扩展开始 与扩展结束的速率(见表1)可以发现:单裂纹模拟 时裂纹L₁的扩展速率增长较明显,扩展结束时速率 为初始速率的2.82倍,而双裂纹模拟时裂纹L₁扩展 较为缓慢,结束时扩展速率为初始速率的1.68倍; 扩展开始时,单裂纹的扩展速率为双裂纹扩展速率 的1.31倍,至扩展结束时已增大至2.19倍,与扩展 长度的增幅一致。随着扩展的持续进行,裂纹扩展 速率的变化规律与应力强度因子的变化规律相似, 符合Paris公式的理论预期。这一现象有力地证明 了在双裂纹耦合作用下,两裂纹间应力的相互卸载 效应显著,从而导致该区域疲劳裂纹扩展速率明显 减缓。

表1 目标分析步扩展速率

 Table 1
 Propagation rates of goal analysis steps

阶段	基于单裂纹模拟	基于双裂纹模拟
开始	2.005	1.533
结束	5.656	2.582

5 结论

本文基于线弹性断裂力学,结合 ABAQUS-FRANC3D 交互建模技术,开展了钢桥面横隔板弧 形开孔部位双疲劳裂纹耦合扩展行为的研究,模拟 了初始角裂纹到贯穿型裂纹的发展全过程,研究了 初始裂纹形态比对耦合扩展的影响,主要结论 如下:

1) 横隔板弧形开孔部位初始形态相同的双疲 劳裂纹,在相同的循环次数后,呈现出不同的发展 形态。裂纹L₂在经过一定的循环次数后便停止扩 展,最终裂纹L₁发展成为主裂纹,并贯穿横隔板持 续发展。

2) 在保持两条初始裂纹形态一致的情况下,同时改变裂纹形态比,两处裂纹的应力相互卸载作用 基本不变,因此细节部位的双裂纹扩展结果未改 变,最终裂纹L₁发展成主裂纹。

3) 双裂纹耦合作用会对横隔板弧形开孔部位的疲劳裂纹扩展速率产生一定影响。在相同的循环次数下,扩展结束时,基于单裂纹模拟时裂纹L₁的扩展长度和扩展速率均为基于双裂纹模拟时的2.19倍,双裂纹模拟时主裂纹的扩展速率明显降低。

横隔板实际情况受力复杂,之后可采用不同的 加载工况进行分析。文中的分析计算均基于一致 的初始裂纹形态,之后可考虑两条初始裂纹形态不 同的情况,也可研究角度、距离等因素对耦合扩展 效应的影响。

参考文献(References):

[1] 孔祥明,吉伯海,傅中秋,等.正交异性钢桥面板焊缝 疲劳应力影响因素分析[J].交通科学与工程,2017,33
(3):10-17.DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017. 03.003.

KONG Xiangming, JI Bohai, FU Zhongqiu, et al. Analysis of influencing factors of fatigue stress of weld seam in orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33 (3) : 10-17. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.03.003. [2] 李行,潘军,唐雪松.考虑车轮横向分布的钢桥面板顶板-U肋连接处疲劳损伤分析[J].公路与汽运,2020 (1):106-109,138.

LI Xing, PAN Jun, TANG Xuesong. Fatigue damage analysis of top plate-U rib joint of steel bridge deck considering lateral distribution of wheels [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(1): 106-109, 138.

- [3] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].2版.北京:人民交通 出版社,2013.
 XIANG Haifan. Advanced theory of bridge structures
 [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [4] 王春生, 冯亚成. 正交异性钢桥面板的疲劳研究综述
 [J]. 钢结构, 2009, 24(9): 10-13, 32.
 WANG Chunsheng, FENG Yacheng. Review of fatigue research for orthotropic steel bridge decks [J]. Steel Construction, 2009, 24(9): 10-13, 32.
- [5] 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(8): 75-80.
 ZHANG Yunshi, LI Faxiong, XIONG Feng, 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

(8): 75-80.

- [6] 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(3): 14-30, 39.
 DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002.
 ZHANG Qinghua, BU Yizhi, LI Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J].
 China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30, 39. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002.
- [7] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9963.2011.02.003.
 ZENG Zhibin. Classification and cause analysis of typical fatigue cracks in orthotropic steel bridge deck[J]. Steel Structure, 2011, 26(2): 9-15, 26. DOI: 10.3969/j. issn.1007-9963.2011.02.003.
- [8] CONNOR R J. Influence of cutout geometry on stresses at welded rib-to-diaphragm connections in steel orthotropic bridge decks [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1892(1): 78-87. DOI: 10.3141/1892-09.
- [9] 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.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.013.
 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.DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.013.

[10] 刘益铭,张清华,崔闯,等.正交异性钢桥面板三维疲劳裂纹扩展数值模拟方法[J].中国公路学报,2016,29
(7):89-95. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.07.011.

LIU Yiming, ZHANG Qinghua, CUI Chuang, et al. Numerical simulation method for 3D fatigue crack propagation of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 89-95. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.07.011.

- [11] 唐亮,黄李骥,刘高.正交异性钢桥面板横梁弧形切口 周边应力分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(6): 83-90.
 TANG Liang, HUANG Liji, LIU Gao. FEA of stress along cope hole edge of crossbeam in orthotropic steel deck [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(6): 83-90.
- [12] SHEN Q Q, RAO Q H, LI Z, et al. Interacting mechanism and initiation prediction of multiple cracks
 [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (3) : 779-791. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65538-3.
- [13] 金通.钢桥面板横隔板多裂纹扩展三维数值模拟及其特性研究[J].城市道桥与防洪,2019(6):96-98,13.
 DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2019.06.026.
 JIN Tong. Study on 3D numerical simulation and its characteristic of multi-crack propagation of steel bridge deck slab diaphragm[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(6):96-98, 13. DOI: 10.16799/j.cnki. csdqyfh.2019.06.026.
- [14] 卜一之,金通,李俊,等. 纵肋与横隔板交叉构造细节 穿透型疲劳裂纹扩展特性及其加固方法研究[J]. 工程 力学, 2019, 36(6): 211-218.
 BU Yizhi, JIN Tong, LI Jun, et al. Research on propagation characteristics and reinforcement method of penetrating crack at rib-to-diaphragm welded joints in steel bridge deck[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (6): 211-218.
- [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(3): 62-70.
 ZHANG Yahai, GUO Baosheng, ZHANG Weiguo, 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(3): 62-70.
- [16] YAU J F, WANG S S, CORTEN H T. A mixed-mode crack analysis of isotropic solids using conservation laws of elasticity[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47 (2): 335. DOI: 10.1115/1.3153665.
- [17] 杨威. 钢桥面板横隔板面内变形疲劳试验模型优化与 裂纹扩展特性分析[J]. 广东公路交通, 2021, 47(2):

36-39. DOI: 10.19776/j.gdgljt.2021-02-0036-04.

YANG Wei. Optimization of in-plane deformation fatigue test model and analysis of crack propagation characteristics of diaphragm of steel bridge deck [J]. Guangdong Highway Communications, 2021, 47 (2) : 36-39. DOI: 10.19776/j.gdgljt.2021-02-0036-04.

- [18] 孟凡超,张清华,谢红兵,等.抗疲劳钢桥面板关键技术
 [M].北京:人民交通出版社,2015.
 MENG Chaofan, ZHANG Qinghua, XIE Hongbin, et al. Key technology for anti-fatigue of orthotropic steel bridge deck[M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [19] 何翠颖,傅中秋,吉伯海,等.钢桥面板横隔板弧形缺口位置疲劳受力分析[J].工业建筑,2018,48(10):22-27,114.DOI:10.13204/j.gyjz201810004.
 HE Cuiying, FU Zhongqiu, JI Bohai, et al. Research on the fatigue stress of arc-shaped Notch of diaphragm in steel bridge deck[J]. Industrial Construction, 2018,48 (10):22-27,114.DOI:10.13204/j.gyjz201810004.
- [20] RADAJ D, SONSINO C M, FRICKE W. Fatigue assessment of welded joints by local approaches [M]. 2nd ed. Cambridge: Woodhead, 2006.
- [21] 王春生, 翟慕赛, 唐友明, 等. 钢桥面板疲劳裂纹耦合 扩展机理的数值断裂力学模拟[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 82-95. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.
 2017.03.009.
 WANG Chunsheng, ZHAI Musai, TANG Youming, et

WANG Chunsheng, ZHAI Musai, TANG Youming, et al. Numerical fracture mechanical simulation of fatigue crack coupled propagation mechanism for steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (3) : 82-95. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372. 2017.03.009.

- [22] 宗亮,施刚,王元清,等.Q345qD桥梁钢疲劳裂纹扩展 速率试验研究[J].中国铁道科学,2015,36(3):37-44.
 ZONG Liang, SHI Gang, WANG Yuanqing, et al. Experimental study on fatigue crack growth rate of Q345qD bridge steel[J]. China Railway Science, 2015, 36(3):37-44.
- [23] 刘扬, 王梓桐, 鲁乃唯, 等. 正交异性钢桥面板的贯穿型疲劳裂纹扩展特性分析[J]. 公路工程, 2023, 48(1): 29-38. DOI:10.19782/j.cnki.1674-0610. 2023. 01.005.
 LIU Yang, WANG Zitong, LU Naiwei, et al. Analysis of propagation behavior of penetrating cracks in orthotropic steel bridge deck [J]. Highway Engineering, 2023, 48 (1): 29-38. DOI: 10.19782/j. cnki. 1674-0610.2023.01.005.

(责任编辑:薛仪)