

钢桥面板纵肋-顶板焊缝细节疲劳裂纹的 应力强度因子分析

李 丹¹, 张启伟², 姜 旭³

(同济大学, 上海市 200092)

摘 要: 为研究正交异性钢桥面板纵肋-顶板焊缝位置的疲劳裂纹扩展特性,以某钢箱梁斜拉桥为工程背景,基于线弹性断裂力学与扩展有限元方法,通过 ABAQUS 软件建立纵肋-顶板三维裂纹扩展模型,引入半椭圆初始裂纹,对焊根与焊趾裂纹尖端的应力强度因子进行分析。分析结果表明,在车辆荷载的作用下,纵肋-顶板连接细节的疲劳裂纹是以 I 型为主导的 I-II-III 复合型裂纹;裂纹在横向位于车轮正下方,纵向位于两车轴中间时,疲劳裂纹扩展趋势最大;在车辆经过裂纹附近 2 m 范围内时,应力强度因子在最大值间波动,对裂纹扩展产生较大影响。

关键词: 桥梁工程;正交异性钢桥面板;疲劳裂纹;扩展有限元法;应力强度因子

中图分类号: U443.31

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)07-0249-04

0 引 言

在焊接缺陷、应力集中、残余应力、车辆荷载反复作用等因素的影响下,疲劳问题成为制约正交异性钢桥面板发展的重要工程难题。U 肋-顶板焊缝一般从焊根或焊趾起裂,在疲劳裂纹穿透顶板、致使桥面防水层与铺装层损坏时才能发现,且检修困难,是正交异性钢桥面板中最为严重的疲劳病害^[1]。近年来对于三维裂纹扩展模拟的研究不断发展,张高楠^[2]以 ANSYS 应力分析结果为基础,运用 PATRAN 及 AGILE 模块首次对纵肋-顶板焊接模型进行 3D 断裂力学分析,对比认为简化为 2D 模型会使分析结果过于保守。刘中祥^[3]模拟了润扬大桥正交异性钢桥面板 3 种典型细节的裂纹扩展过程,发现裂纹扩展相同长度时 U 肋-顶板焊缝所需时间最短。黄云^[4]等基于疲劳模型试验和理论研究,得出起始于顶板-纵肋焊根位置的裂纹属于 I 型主导的复合型裂纹,裂纹面呈现出典型的曲面特征。既有研究对移动荷载下 U 肋-顶板焊缝焊根与焊趾处开裂模式的对比分析还不够深入系统。因此,本文以某钢箱梁斜拉桥为背景,建立正交异性钢桥面板节段模

型与 U 肋-顶板连接细节子模型,通过有限元方法计算移动车辆荷载下裂纹尖端的应力强度因子,对萌生于焊趾与焊根处的裂纹以及三种开裂模式进行对比研究。

1 扩展有限元方法

本文对于应力强度因子的研究基于 ABAQUS 中的扩展有限元模块。扩展有限元法(XFEM)通过引入富集函数来描述不连续的位移场^[5]。位移函数表示为:

$$u(x) = \sum_{I \in K} N_I(x) \left[u_I + \frac{H(x)a_I}{I \in K_r} + \sum_{I \in K_\Lambda} F_\alpha(x)b_I^\alpha \right] \quad (1)$$

式中: $N_I(x)$ 为常用的节点位移函数; u_I 是连续节点位移向量; a_I 是被分割单元的附加自由度; b_I^α 是裂纹尖端单元的附加自由度; K_r 为被裂纹贯穿单元节点的集合; K_Λ 为裂尖单元节点的集合; $H(x)$ 是表示裂纹不连续位移场的跳跃函数,其表达式为:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (x-x^*)n \geq 0 \\ -1 & (x-x^*)n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为积分点; x^* 为裂纹面上最靠近的点; n 为外法线单位向量。

式(1)中最后一项 $F_\alpha(x)$ 为裂纹尖端渐进函数,描述裂尖位移,其表达式为:

$$F_\alpha(x) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \theta \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad \alpha = 1 \sim 4 \quad (3)$$

收稿日期: 2021-02-23

基金项目: 江苏省交通运输科技与成果转化项目(820011316);

同济大学建筑设计研究院技术研究课题(QY19-C01)

作者简介: 李丹(1997—), 女, 硕士, 从事桥梁钢结构退化与预测研究工作。

式中: (r, θ) 表示裂纹尖端的极坐标。

扩展有限元法中裂纹面独立于网格存在, 不需要与单元边界重合; 在裂纹扩展过程中无需对裂纹尖端进行网格重划分; 对网格密度要求较低, 计算效率高, 可以有效处理不连续问题。

2 钢箱梁节段有限元模型的建立

2.1 模型参数

以某千米级钢箱梁斜拉桥为项目背景, 桥梁横截面车道示意图 1, 由于 17 号 U 肋处于重车轮迹线下方, 经实桥检测其疲劳病害也更为严重, 故选择 17 号 U 肋的 U 肋-顶板连接处作为关注部位, 车辆横向加载以重车轮迹线为基准。

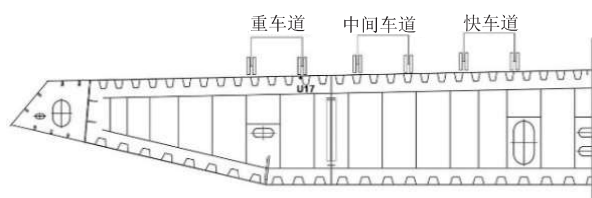


图 1 横截面示意图

利用 ABAQUS 有限元软件建立 16 m 标准梁段的钢箱梁模型。依据实桥材料与尺寸, 钢箱梁梁高 4 m, 顶板厚 14 mm, U 肋厚 8 mm, 横隔板厚 10 mm; 钢材种类为 Q345qD, 弹性模量 2.1×10^5 MPa, 泊松比 0.3; 钢桥面板 U 肋与顶板间采用全熔透焊缝连接, 焊脚尺寸为 8 mm。

采用壳-实体耦合的建模方式, 壳单元类型选用 S4R, 实体单元类型选用 C3D8R。整体模型纵桥向端部采用固结约束, 横向端部采用对称约束, 由于本文关注点处于节段跨中位置, 依据圣维南原理, 上述边界条件对有限元计算结果影响较小。钢箱梁有限元模型见图 2。

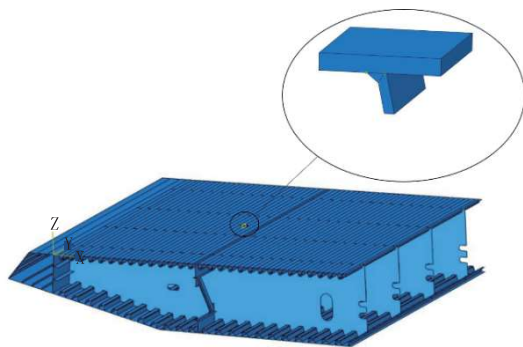


图 2 钢箱梁有限元模型

钢箱梁整体网格尺寸为 200 mm; U 肋-顶板连接细节的精细实体模型大小为 100 mm × 100 mm × 40 mm (长 × 宽 × 高), 网格尺寸为 2 mm; 在 U 肋-顶板连接细节实体模型的焊根与焊趾处分别嵌入长

轴为 10 mm, 深度方向 2.5 mm 的半椭圆形裂纹。

2.2 加载方式

加载车辆选用《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015) 中的疲劳荷载模型 III^[6], 见图 3、图 4。疲劳荷载模型 III 由 4 个标准轴组成, 纵向前后两轴组间距较大 (6 m), 故而可以忽略叠加效应, 同时为简化计算, 本文仅考虑纵向轴距为 1.2 m 的双轴轮载作为疲劳荷载。单车轮着地面积为 200 mm × 600 mm, 偏于安全地不考虑桥面铺装的扩散效应。

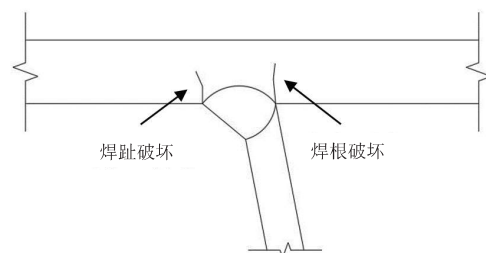


图 3 U 肋-顶板焊缝疲劳破坏类型

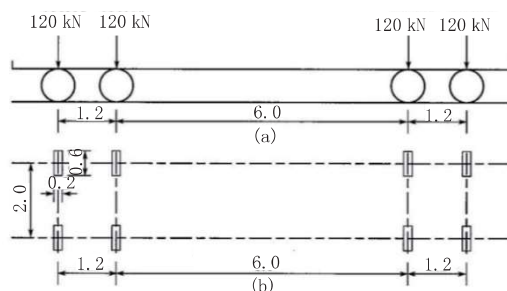


图 4 疲劳破坏模型 III (单位: m)

使用 FORTRAN 语言编写 DLOAD 子程序在 ABAQUS 中实现移动加载, 设定横纵向移动步距均为 200 mm (纵向中心处增加一个工况)。根据车轮位置横向分布概率模型, 车轴偏离中心大于 0.8 m 的概率几乎为零^[6], 故横向偏移中心轮迹线不超过 0.8 m, 共设 9 个工况; 纵向考虑横隔板的阻断作用, 共设 55 个工况。加载工况布置见图 5。

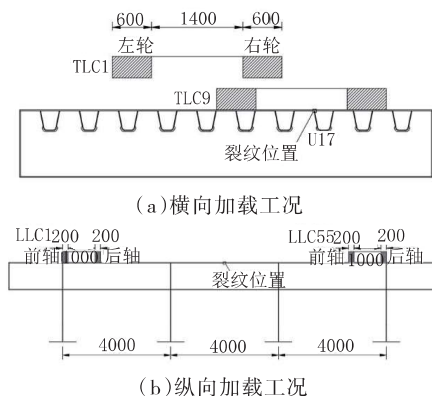


图 5 车辆荷载工况 (单位: mm)

3 应力强度因子分析

断裂力学将裂纹分为 I 型裂纹 (张开型裂纹)、

Ⅱ型裂纹(滑开型裂纹)Ⅲ型裂纹(撕开型裂纹), K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分别对应三种开裂模式的裂纹应力强度因子。采用2.2所述的加载方式,提取裂纹尖端沿厚度方向中点的应力强度因子,设置15道围线积分,取积分稳定后值。

(1)三种开裂模式的应力强度因子影响线

U肋-顶板连接细节焊趾与焊根处裂纹尖端应力强度因子影响线见图6~图8。结果表明:

a. 焊趾处裂纹的应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 的最大值均略大于焊根处裂纹的应力强度因子最大值,且在横向工况的中心位置(车轮位于裂纹正上方)时达到最大值;

b. 在应力强度因子关于纵向加载工况的折线图中,应力强度因子 K_I 在关于 y 方向呈轴对称形态,应力强度因子 K_{II} 则关于 y 方向呈反对称形态;

c. 车轴纵向位于中心位置及附近,车轮横向位

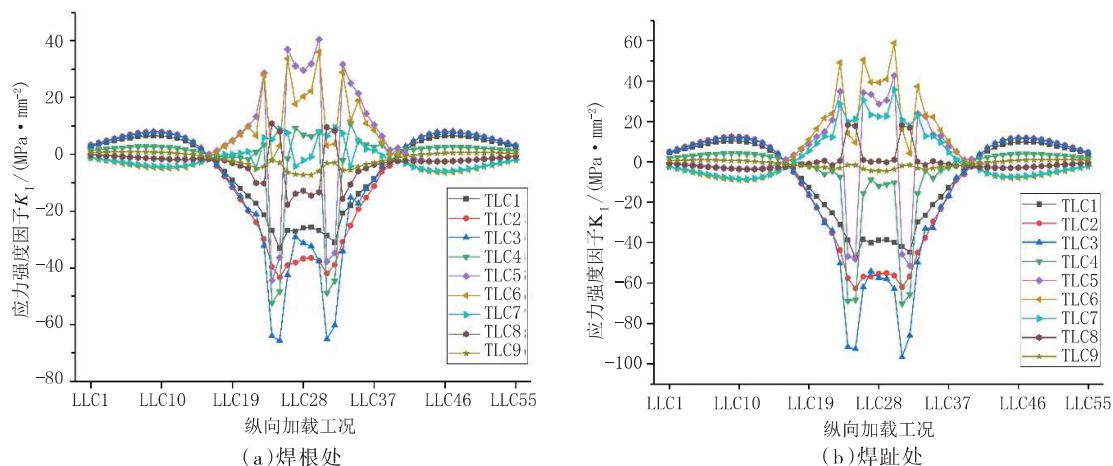


图6 应力强度因子影响线(单位: $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$)

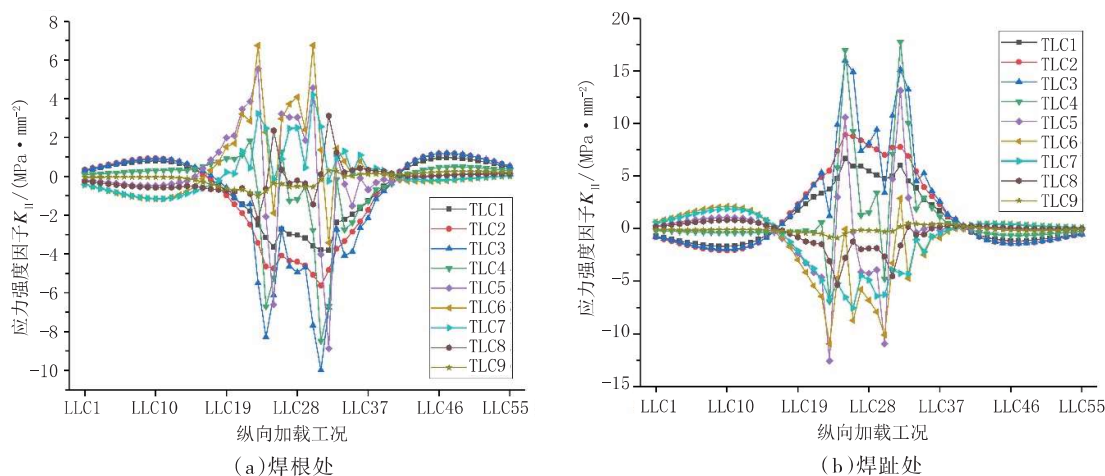


图7 应力强度因子影响线(单位: $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$)

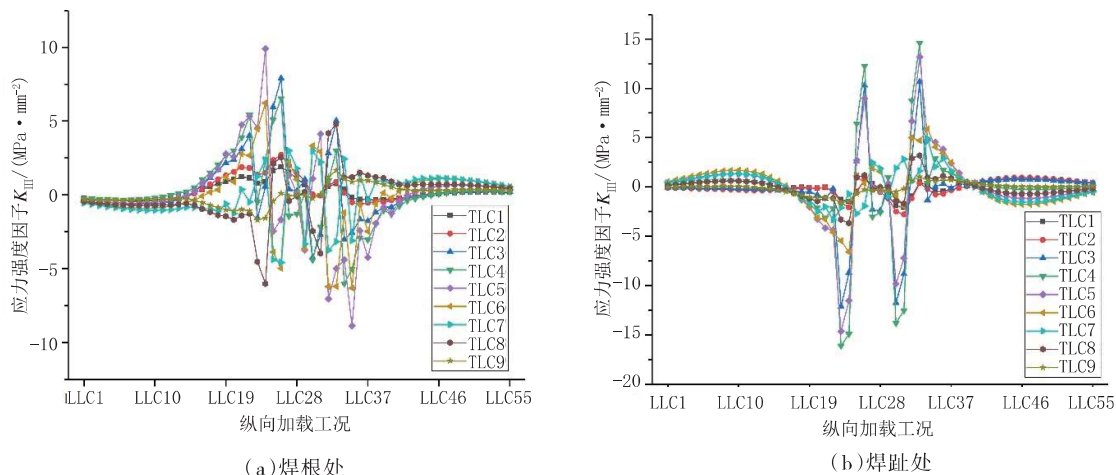


图8 应力强度因子影响线(单位: $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$)

于裂纹右侧时,焊根处 K_I 、 K_{II} 为正;焊趾处 K_I 为正,车轮横向位于裂纹左侧时,焊根 K_I 、 K_{II} 为负;焊趾处 K_I 为负, K_{II} 为正。

(2) 三种开裂模式的应力强度因子对比

U 肋-顶板连接细节中,焊趾与焊根处纵向中心位置的加载工况下,裂纹尖端应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 的横向影响线见图 9; 横向中心位置的加载工况下,裂纹尖端应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 的纵向影响线见图 10。结果表明:

a. 焊根与焊趾处裂纹的应力强度因子 K_I 在三种应力强度因子中所占比重最大, I 型(张开型)裂纹在 U 肋-顶板焊接部位的复合型疲劳裂纹中占主导地位;

b. 纵向位于中心位置, 横向在车轮位于裂纹正上方(TLC5 及附近的工况)时, K_I 为正, 达到最大值;

c. 横向位于中心位置, 纵向在裂纹位于两车轴中间(LLC28 及附近的工况)时, K_I 为正, 达到最大值;而在纵向车轮位于裂纹正上方时, K_I 为负, 裂纹受压闭合。

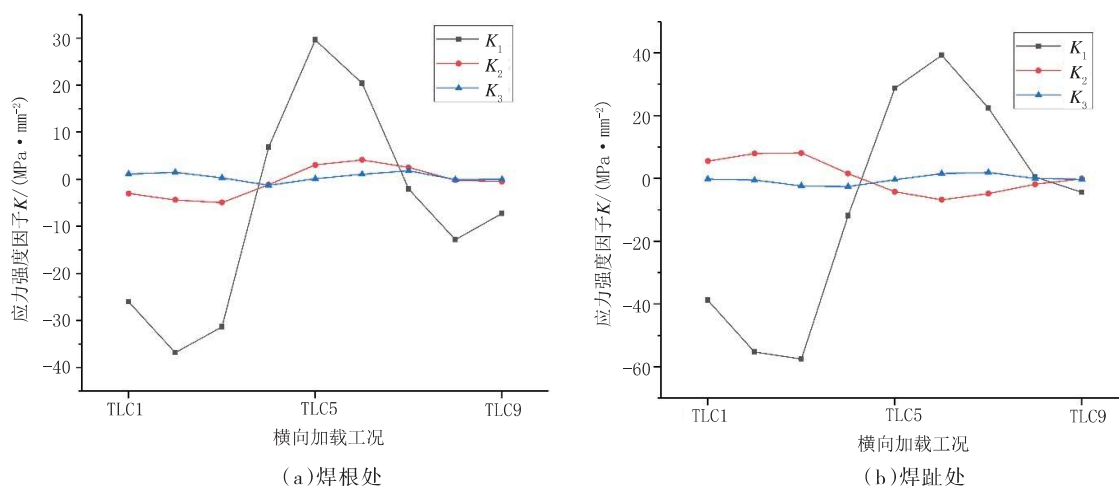


图 9 纵向中心位置的应力强度因子(单位: $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)

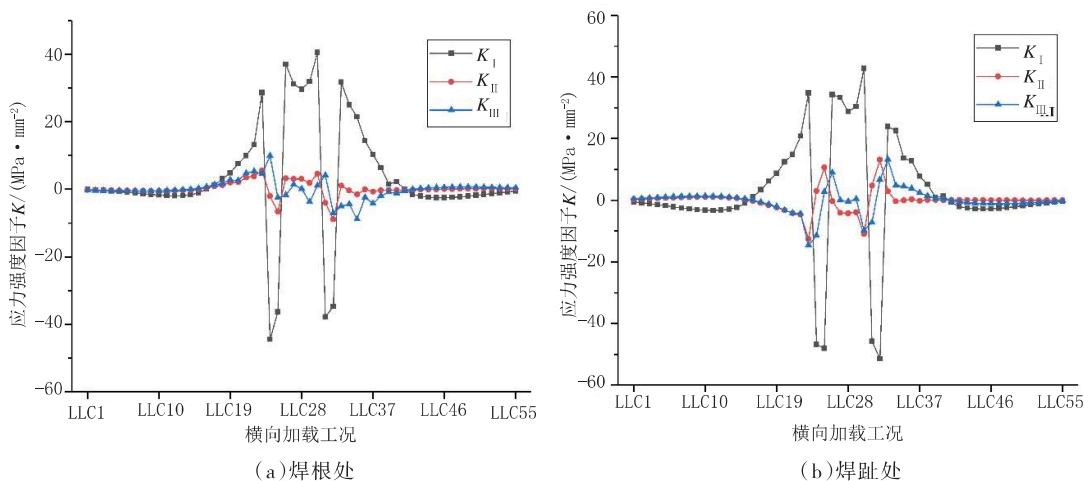


图 10 横向中心位置的应力强度因子(单位: $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)

4 结 语

本文基于 ABAQUS 扩展有限元法, 以某千米级斜拉桥为工程背景, 建立钢箱梁标准节段模型, 对正交异性钢桥面板纵肋-顶板连接细节疲劳裂纹的应力强度因子进行了分析。根据文中的计算结果, 得出如下结论:

(1) 焊趾处三种裂纹应力强度因子的最大值均略大于焊根; 车辆荷载下, 焊趾与焊根处的裂纹尖端应力强度因子具有相似规律, 与的值则呈现相反的

规律。

(2) 钢箱梁中萌生于纵肋-顶板连接细节的疲劳裂纹是以 I 型裂纹为主导的 I-II-III 复合型裂纹; 在横向车轮位于裂纹正上方, 纵向裂纹位于两车轴中间时, 裂纹扩展驱动力最大。

(3) 在疲劳车辆纵向驶过裂纹所在位置的约 2 m 范围内时, 应力强度因子(以 I 型为主)发生较大波动, 出现最大值与最小值, 对疲劳裂纹的发展产生较大影响。

(下转第 257 页)

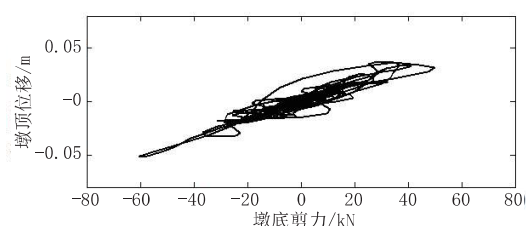


图12 不考虑SSI效应的基底剪力-侧移滞回曲线图

3 结论

该项研究首先对多尺度建模方法进行修正验证,在此基础上,对考虑SSI效应的桥梁抗震性能进行了模拟分析,总结结论如下:

(1)通过通用有限元软件,利用参照点来约束耦合面上的耦合点,能够实现宏观、精细单元间的变形协调,采用修改单元刚度的方式以达到弥补界面连接引起的刚度损失,并通过算例验证了该方法的正确性。

(2)基于多尺度建模方法,对考虑SSI效应的桥梁抗震性能进行分析,结果表明:考虑SSI效应后,土体起到了对地震能量的耗散作用,可以降低桥梁结构抗震的需求,在桥梁设计中应重点关注。

参考文献:

- [1] 范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] Ben Dhia H., Rateau G. The Arlequin method as a flexible engineering design tool [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 62: 1442—1462.
- [3] 李兆霞,孙正华,郭力等.结构损伤一致多尺度模拟和分析方法[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(2): 251—260.
- [4] 孙正华,李兆霞,陈鸿天.考虑局部细节特性的结构多尺度模拟方法研究[J].特种结构,2007,24(1): 71—75.
- [5] 乔华,陈伟球.基于Arlequin方法的结构多尺度数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(12): 2314—2319.
- [6] 陆新征,林旭川,叶列平.多尺度有限元建模方法及其应用[J].华中科技大学学报(城市科学版),2008,25(4): 76—80.
- [7] 李培振,万非.考虑群体效应的高层建筑土-结构相互作用参数研究[J].结构工程师,2019,33(2): 40—51.
- [8] 李培振,吕西林.考虑土-结构相互作用的高层建筑抗震分析[J].地震工程与工程振动,2004,24(3): 130—138.
- [9] 李宇,朱晞,杨庆山.多振型效应对铁路高柔桥墩弹塑性地震响应的影响[J].铁道学报,2011,33(11): 99—105.
- [10] 周大兴.考虑土-结构相互作用大跨径连续梁桥抗震性能研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- [11] 陈明琦.钢筋混凝土空心桥墩抗震性能试验研究[D].北京:北京工业大学,2011.

(上接第252页)

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张高楠.基于3D断裂力学的正交异性钢桥肋-桥面焊缝的疲劳寿命评估[D].天津:天津大学,2014.
- [3] 刘中祥.大跨钢桥疲劳裂纹扩展的数值模拟研究[D].江苏南京:东南

大学,2015.

- [4] 黄云,张清华,余佳,等.钢桥面板与纵肋焊缝疲劳评估及裂纹扩展研究[J].西南交通大学学报,2019,54(2):260—268.
- [5] BELYTSEHKO T., BLAEK T. Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5): 601—620.
- [6] JTG D64-2015,公路桥梁钢结构设计规范[S].