

张鹏飞,殷志欢,常 军. 复杂应力耦合作用下斜拉桥正交异性桥面板疲劳断裂[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(4): 78-89.
ZHANG Peng-fei, YIN Zhi-huan, CHANG Jun. Fatigue fracture of orthotropic steel deck of cable-stayed bridge under complex coupling stress [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2021, 41(4): 78-89.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.04.008

复杂应力耦合作用下斜拉桥正交异性 桥面板疲劳断裂

张鹏飞,殷志欢,常 军

(苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011)

摘 要:为研究随机车辆荷载与焊接残余应力等复杂应力耦合作用下,斜拉桥主梁正交异性桥面板焊接细节的疲劳断裂性能,以苏通长江大桥为工程背景,在调研统计交通量的基础上,基于 Monte-Carlo 法建立随机车辆荷载模型,分析随机车辆荷载作用下正交异性桥面板焊接细节的力学行为;基于 ANSYS 有限元软件,建立焊接细节热分析模型,模拟焊接加热过程与冷却过程,获得焊趾附近残余应力分布。将焊接残余应力作为初始应力,采用数值模拟获得随机车辆荷载与焊接残余应力耦合作用下正交异性桥面板焊接细节的疲劳应力谱。基于双参数疲劳裂纹扩展模型,考虑疲劳裂纹扩展裂纹闭合效应,分析随机车辆荷载与焊接残余应力耦合作用下,正交异性桥面板焊接细节疲劳裂纹扩展行为。结果表明:焊接残余应力与随机车辆荷载耦合作用下,焊接细节疲劳应力幅值远大于车辆荷载作用的应力幅值;在随机车辆荷载与焊接残余应力耦合作用下,正交异性桥面板顶板与 U 肋焊接节点的剩余疲劳寿命随裂纹长度的增大而下降;焊接残余应力的存在极大地降低了焊接节点的疲劳寿命,与仅考虑随机车辆荷载作用下焊接节点的疲劳寿命相比,焊接残余应力与车辆荷载应力耦合作用下的疲劳寿命下降 30%~40%,且疲劳寿命降低幅度随残余应力的增大而增大。

关键词:桥梁工程;随机车辆荷载;残余应力;耦合作用;疲劳裂纹扩展;焊接

中图分类号:U443.31

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2021)04-0078-12

Fatigue fracture of orthotropic steel deck of cable-stayed bridge under complex coupling stress

ZHANG Peng-fei, YIN Zhi-huan, CHANG Jun

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the fatigue fracture performance of the welding details of the orthotropic steel deck of the main girder of cable-stayed bridge, under the coupling of complex stresses such as random vehicle load and welding residual stress, the Sutong Yangtze River Bridge was used as the engineering background, the Monte-Carlo method was used to establish random vehicle load model based on the investigation and statistics of traffic volume, the

收稿日期:2021-02-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51508368);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20_1112)

作者简介:张鹏飞(1982-),男,江苏南通人,讲师,工学博士,E-mail:702161938@qq.com。

通讯作者:常 军(1973-),男,江苏丰县人,教授,工学博士,E-mail:changjun21@126.com。

mechanical behavior of the welding details of the orthotropic bridge deck under random vehicle load was analyzed. In the ANSYS finite element software, the thermal analysis model of welding details was established, the welding heating process and cooling process to obtain the residual stress distribution near the weld toe was simulated. The welding residual stress was regard as the initial stress, the fatigue stress spectrum of the welding details of the orthotropic bridge deck under the coupling effect of random vehicle load and welding residual stress was obtained through numerical simulation. Based on the two-parameters fatigue crack growth model, considering the fatigue crack growth and crack closure effect, the fatigue crack growth behavior of the welding details of the orthotropic steel deck under the coupling effect of random vehicle load and welding residual stress were studied and analyzed. The results show that under the coupling effect of welding residual stress and random vehicle load, the fatigue stress amplitude of welding details is much larger than that of vehicle load. Under the coupling effect of random vehicle load and welding residual stress, the remaining fatigue life of the welded joint between the top plate of the orthotropic steel deck and the U-rib decreases with the increase of the crack length. The existence of welding residual stress greatly reduces the fatigue life of welded joints. Compared with the fatigue life of welded joints under random vehicle load, the fatigue life of welding residual stress and vehicle load stress is reduced by 30% to 40%, and the fatigue life is increased with the increase of residual stress. 19 figs, 34 refs.

Key words: bridge engineering; random vehicle load; residual stress; coupling effect; fatigue crack growth; welding

0 引言

与混凝土桥梁相比,钢结构桥梁具有自重轻、承载能力高、抗震性能优越等优点,特大跨径斜拉桥或悬索桥主梁结构形式一般均首选钢箱梁。钢箱梁由正交异性桥面板、底板、外腹板、纵隔板等板件焊接而成,由于几何不连续及焊接残余应力的存在,焊趾附近局部应力状态复杂,车辆荷载重复作用下,极易发生疲劳破坏^[1-4]。虽然大跨径钢结构桥梁在设计时均进行了抗疲劳设计,但通车后的定期检测结果表明,几乎所有桥梁的钢箱梁正交异性桥面板顶板与U肋焊接细节都过早的发生了疲劳破坏,实际疲劳寿命远小于设计疲劳寿命。如苏通长江大桥在通车运营6年后的结构定期检测中就发现,钢箱梁正交异性桥面板顶板与U肋焊接细节存在较多的疲劳裂纹。

引起钢桥焊接细节过早疲劳破坏的主要原因有:①焊接细节由于车辆荷载作用和焊接残余应力的耦合作用影响,应力状态复杂,疲劳设计低估了焊趾附近的应力状态;②疲劳设计方法未充分考虑疲劳裂纹扩展行为;③桥梁运营实际承受的疲劳应力幅值和循环次数远超预估值。因此,分析焊接细节在复杂应力场耦合作用下的应力状态,建立真实反

映实际车辆荷载的疲劳应力谱,研究焊接细节疲劳裂纹扩展行为是准确进行疲劳寿命评估的关键。

对于钢桥疲劳问题的研究,近年来国内外学者的主要研究方向集中在考虑焊趾附近应力集中的热点应力-疲劳(S-N)曲线法和分析疲劳裂纹扩展速率的断裂力学法。由于热点S-N曲线法直接考虑了焊接细节焊缝周围应力的不均匀分布,疲劳评估时无需进行疲劳细节分类,在准确获得焊趾热点应力的基础上,不同焊接细节可采用统一的S-N曲线进行疲劳评估^[5-6]。因此,热点S-N曲线法成为钢桥疲劳研究的热点。陈一馨等基于实测车辆荷载谱,通过疲劳试验建立S-N曲线,评估了九江长江公路大桥钢箱梁正交异性桥面板焊接细节疲劳寿命^[7-8]。揭志羽等采用线性外推法计算热点应力,基于等效热点S-N曲线法预测焊接接头的疲劳寿命^[9]。祝志文等采用FAT90 S-N曲线和外推法评估正交异性钢桥面板横隔板弧形切口焊缝的疲劳寿命^[10]。但吕彭民等对于九江长江大桥正交异性桥面板焊接细节的疲劳寿命评估结果^[11]和张清华对于港珠澳大桥正交异性钢桥面板的疲劳寿命评估结果^[12]均表明热点S-N曲线过高估计了钢桥面板焊接细节的疲劳寿命。热点S-N曲线法高估钢桥疲劳寿命是因为该方法未考虑焊接初始缺陷和焊接残

余应力,低估了焊趾附近的应力状态。除了热点 S-N 曲线法之外,分析疲劳裂纹扩展速率的断裂力学法也得到了钢桥疲劳研究者的重视。李传习等基于动态称重系统监测数据,通过疲劳试验研究了佛山平胜大桥钢箱梁正交异性桥面板弧形切口焊缝的疲劳裂纹扩展规律^[13]。刘益铭等基于线弹性断裂力学理论,通过数值模拟获得了正交异性钢桥面板 U 肋与横隔板焊接细节处疲劳裂纹的扩展路径,并预测了疲劳寿命^[14]。姜苏等基于 Paris 疲劳裂纹扩展模型,分析了车辆荷载作用下正交异性桥面板的疲劳裂纹扩展规律,评估了正交异性桥面板疲劳扩展寿命^[15-17]。虽然文献[13]~文献[16]基于断裂力学理论的疲劳寿命评估方法考虑了焊接初始缺陷和疲劳裂纹宽度、深度对疲劳寿命的影响,较热点 S-N 曲线法更精确,但其未考虑疲劳裂纹扩展闭合效应和焊接残余应力对疲劳裂纹扩展的影响。残余应力的存在使交变荷载的应力循环发生偏移,这种偏移改变了应力循环中的平均应力和应力最大值,从而影响焊接细节疲劳寿命。赵秋等通过数值模拟获得了正交异性桥面板焊接细节的残余应力分布^[17-18]。顾颖通过疲劳试验获得了正交异性桥面板焊接细节的残余应力分布^[19],但其均未分析残余应力对疲劳寿命的影响。崔闯采用应变能密度法定性地分析了残余应力对疲劳寿命的影响^[20]。邵珂夫分析了钢桥焊接细节的残余应力,将焊接残余应力视为平均应力,采用 Good 模型修正法对 S-N 曲线进行修正,分析残余应力对疲劳寿命的影响^[21]。疲劳裂纹尖端残余拉应力的存在极大地提高了疲劳裂纹的扩展速率,进而降低了焊接细节的疲劳寿命,但现有关于残余应力对疲劳寿命影响的文献鲜有从疲劳裂纹扩展机理角度进行诠释。

为了分析焊接残余应力对从疲劳裂纹萌生到扩展直至疲劳断裂的疲劳全过程的影响,本文以苏通长江大桥为工程背景,在调研统计交通量的基础上,基于 Monte-Carlo 法建立随机车辆荷载模型,分析随机车辆荷载作用下正交异性桥面板焊接细节的力学行为;基于 ANSYS 有限元分析软件,建立焊接细节热分析模型,模拟焊接加热过程与冷却过程,获得焊趾附近残余应力分布。将焊接残余应力作为初始应力,通过数值模拟获得随机车辆荷载与焊接残余应力耦合作用下,正交异性桥面板焊接细节的疲劳应力谱。基于双参数疲劳裂纹扩展模型^[22],考虑疲劳裂纹扩展与裂纹闭合效应,研究分析随机车辆荷载与焊接残余应力耦合作用下,正交异性桥面板焊

接细节疲劳裂纹扩展行为。

1 基于断裂力学的疲劳裂纹扩展理论

1.1 疲劳裂纹扩展模型

疲劳裂纹扩展速率 da/dN 和裂纹尖端的应力强度因子变化范围 ΔK 的曲线在双对数坐标系中呈现出 3 个不同的阶段,如图 1 所示, a 为裂纹长度。

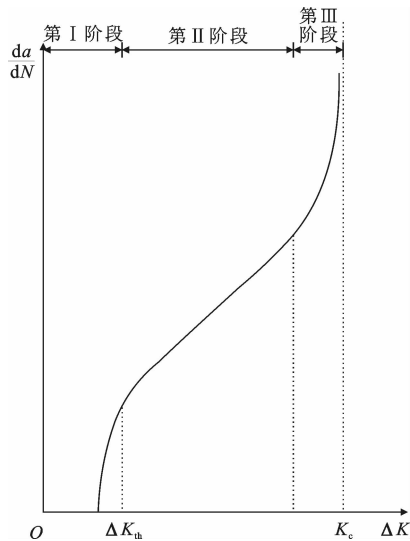


图 1 da/dN 与 ΔK 的关系曲线

Fig. 1 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factors at crack tip

图 1 中,在低速裂纹稳定扩展阶段存在疲劳裂纹扩展阈值 ΔK_{th} ,当小于此值时,疲劳裂纹停止扩展;而疲劳裂纹扩展寿命的最重要的部分为中速裂纹稳定扩展阶段。第 III 阶段接近于一条竖直线,这时最大应力强度因子 K_{max} 已接近断裂韧度 K_c ,裂纹扩展处于快速扩展阶段,当裂纹尖端的应力强度因子达到材料的断裂韧度 K_c 时,即出现失稳断裂。可根据图 1 所示对数线性关系来对疲劳裂纹扩展寿命进行预测。

目前断裂力学中常用来计算 da/dN 的有:Paris 公式^[23]、Forman 公式^[24]和 Walker 公式^[25]等。其中 Paris 公式对第 II 阶段实用性较好,但是未能描述应力比对裂纹扩展速率的影响;Walker 公式虽然考虑了应力比的影响,但是仅对第 II 阶段适用性好;Forman 公式在 Walker 公式的基础上,对第 III 阶段的适用增加了。而文献[26]提出了基于双参数模型用以描述疲劳裂纹扩展速率曲线的 3 个阶段的表达式如下

$$\frac{da}{dN} = \frac{A(\Delta K - \Delta K_{th}^*)^m (K_{max} - K_{max,th}^*)^n}{1 - (K_{max}/K_c)^\gamma} \quad (1)$$

$$R_c = 1 - \frac{\Delta K_{th}^*(R_c)}{K_{max,th}^*(R_c)} \quad (2)$$

式中: ΔK 为最大应力强度因子幅值; $K_{\max,th}^*$ 为最大应力强度因子阈值, ΔK_{th}^* 为最大应力强度因子幅值阈值; $\Delta K_{th}^*(\cdot)$ 、 $\Delta K_{\max,th}^*(\cdot)$ 均为与应力比 R 的临界值 R_c 有关的函数; A, m, n, γ 为材料常数。

该公式不仅考虑了应力比对裂纹扩展速率的影响,而且考虑了裂纹扩展的 3 个阶段和裂纹的闭合效应。

文献[27]完善了文献[26]提出的疲劳裂纹扩展双参数模型,给出了 $\Delta K_{th}^*(R)$ 和 $K_{\max,th}^*(R)$ 与应力比 R 的关系式和式(1)中相关参数的取值。

$$\begin{cases} K_{\max,th}^*(R) = K_{\max,th}^*(R_c) \\ \Delta K_{th}^*(R) = (1-R)K_{\max,th}^*(R_c) & R \leq R_c \\ K_{\max,th}^*(R) = \Delta K_{th}^*(R_c)/(1-R) \\ \Delta K_{th}^*(R) = \Delta K_{th}^*(R_c) & R > R_c \end{cases} \quad (3)$$

$$A = 5.679 \times 10^{-8}, m = 1.04, n = 1.28,$$

$$K_c = 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}, \gamma = 6.0 \quad (4)$$

1.2 应力强度因子的计算

钢箱梁顶板与 U 肋的焊接属于 T 形焊接接头。对于 T 形焊接接头焊趾表面裂纹而言,应力强度因子可以表示成 $K_T = M_K K_{\text{plate}}$ 。式中: M_K 为应力强度因子修正系数,表示焊趾处应力集中引起的应力强度因子的增加; K_{plate} 为平板上表面裂纹应力强度因子。平板表面裂纹应力强度因子已有成熟的计算方法,一般表示为

$$K_{\text{plate}} = F\sigma \sqrt{\pi c} \quad (5)$$

式中: F 为平板表面裂纹几何形状因子; c 为表面裂纹深度; σ 为外应力。

根据文献[28],平板表面裂纹几何形状因子 F 通常可取 1.12,因此,T形接头表面裂纹应力强度因子可表示成

$$K_T = 1.12 M_K \sigma \sqrt{\pi c} \quad (6)$$

文献[29]在 Bowness 研究成果的基础上给出了 M_K 表达式如下

$$M_K = f_1\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}\right) - f_2\left(\frac{a}{T}, \frac{L}{T}, \frac{a}{c}\right) \quad (7)$$

$$f_1\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}\right) = 0.43 \left(\frac{a}{T}\right)^{[A_1 + (A_2 a/T)^{A_3}]} + 0.93 \left(\frac{a}{T}\right)^{-0.05} - A_4$$

$$f_2\left(\frac{c}{T}, \frac{L}{T}, \frac{a}{c}\right) = 0.1 \left(\frac{L}{T}\right) \left(\frac{a}{T} - 0.235\right) - 0.14 \left(\frac{c}{T}\right)^2 - 0.04 \left(\frac{c}{T}\right) + 0.23 \left(\frac{c}{a}\right)$$

式中: a/c 为裂纹形状比,取为 1/2; T 为板厚; L 为焊接构件中心到焊趾端部距离; $A_1 \sim A_4$ 为材料

常数。

2 随机车辆荷载作用的模拟

2.1 随机车辆荷载模拟

在任意时刻出现在桥梁上的车辆类型、车重、车辆间距都是随机变量,且服从一定分布的随机变量分布^[30],其中,采用对数正态分布来描述二轴车(货车、大客车、轻型货车)的总质量,其概率密度函数 $f_{G_i}(g)$ 为

$$f_{G_i}(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}g\sigma_{\ln G_{1i}}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln g - \mu_{\ln G_{1i}}}{\sigma_{\ln G_{1i}}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中: $i=1,2,3$ 分别表示二轴轻型客车、二轴大客车和二轴货车; g 为车辆总质量随机变量; $\sigma_{\ln G_{1i}}$ 、 $\mu_{\ln G_{1i}}$ 分别为车质量对数的标准差和平均值。

采用 2 个正态分布的叠加来描述三轴、四轴、五轴、六轴车的总质量,其概率密度函数 $f_{G_i}(g)$ 为

$$f_{G_i}(g) = \frac{p_{1i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{G_{2i}}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{g - \mu_{G_{2i}}}{\sigma_{G_{2i}}} \right)^2 \right] + \frac{p_{2i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{G_{3i}}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{g - \mu_{G_{3i}}}{\sigma_{G_{3i}}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

式中: $i=4,5,6,7$ 分别表示三轴货车、四轴货车、五轴货车和六轴货车; $\sigma_{G_{2i}}$ 、 $\sigma_{G_{3i}}$ 、 $\mu_{G_{2i}}$ 、 $\mu_{G_{3i}}$ 分别为车质量的标准差和平均值; p_{1i} 、 p_{2i} 均为系数。

车辆间距 $f(S)$ 服从对数正态分布,其概率密度函数为

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S\sigma_{\ln S}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln S - \mu_{\ln S}}{\sigma_{\ln S}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中: S 为车间距随机变量; $\sigma_{\ln S}$ 、 $\mu_{\ln S}$ 分别为车间距对数的标准差和平均值。

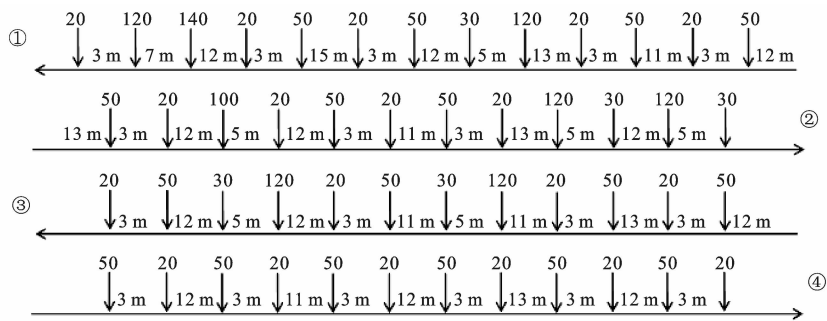
基于实际交通量的观测,获得桥梁的日平均交通量和交通量年增长率,将过桥车辆分为 7 类从而确定车辆的特征参数(车型、车重、车辆间距),最后基于 Monte-Carlo 法建立随机车辆荷载模型。

为提高计算效率,减少计算时间,仅提取随机车辆荷载模型中的前 24 辆车所组成的随机车队,按从 ①~④ 的顺序依次施加至钢箱梁节段模型上,车队总长度为 370 m,施加至桥面的 3 个车道上,车道距离道路中心线的距离分别为 0、9.6 m,随机车辆的布置如图 2 所示。

2.2 有限元数值模型的建立

2.2.1 全桥整体有限元模型

苏通长江大桥是主跨 1 088 m 的双塔双索面斜



单位: kN

图2 随机车队的布置

Fig. 2 Arrangement of stochastic fleet

拉桥,主梁采用扁平钢箱梁。钢箱梁底板宽 41 m,顶板宽 35.4 m,高 4 m;顶板在顺桥向不同区段厚度为 14~24 mm,顶板 U 肋厚度为 8~10 mm;底板在顺桥向不同区段厚度为 12~24 mm,底板 U 肋厚度为 6~8 mm,横隔板间距为 4 m,钢箱梁内设置 2 道纵隔板。

对于整体有限元模型的建立:采用正交异性壳单元模拟钢箱梁的顶板、底板以及外腹板,空间梁单元模拟主梁,空间杆单元模拟斜拉索,通过降温法在拉索上施加索力,桥面铺装、栏杆以及压重采用质量单元模拟。其中,模拟桥面板和底板时简化 U 形加劲肋,将其厚度分别等效到相应的板中,等效的原则:①局部板 2 个正交方向的单位宽度抗弯刚度与实际结构等效;②壳平面内的横向抗弯刚度与实际结构等效;③壳平面内的剪切刚度与实际结构等效。由于纵隔板对结构整体刚度影响较小,故在整体有限元模型建立时未考虑纵隔板。

2.2.2 局部节段子模型

钢箱梁局部节段子模型的纵向长度取为 48 m,采用壳单元 Shell181 来模拟箱梁顶底板、U 形加劲肋、纵横隔板、外腹板。整个钢箱梁的制造采用焊接工艺。焊接材料采用与母材相匹配的焊丝,U 肋与顶板、底板的连接焊缝采用带坡口的贴角焊缝。与整体有限元模型相比,钢箱梁局部节段子模型网格划分较密,特别是应力集中区域划分更细。对于整体模型与子模型边界条件的衔接,利用子模型技术^[31-32]切割整体模型中的边界条件,加载至局部模型的边界节点上。图 3 为全桥整体有限元模型及钢箱梁局部构件尺度模型。

2.3 随机车载作用焊缝节点应力状态

基于图 2 所示的随机车辆荷载模型,通过数值

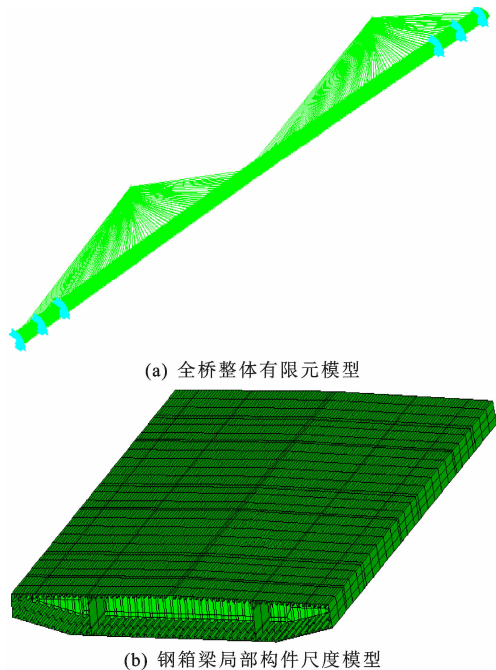


图3 全桥整体有限元模型及钢箱梁局部构件尺度模型

Fig. 3 Full finite element model of bridge and

FEM of segment steel box girder

模拟获得随机车辆荷载作用下某一时刻钢箱梁的应力分布,如图 4、图 5 所示。

3 焊接残余应力的模拟

3.1 焊接温度场模拟

基于 ANSYS 有限元软件中的热分析模块模拟焊接过程,采用分区域网格划分法,建立顶板 U 肋局部精细模型和顶板 U 肋精细模型^[33-34],如图 6、图 7 所示。

3.2 焊接残余应力计算

焊接过程中,大量的集中温度在极短时间内被施加到结构上,导致结构在冷却后会产生残余应力。顶板 U 肋焊接过程和冷却过程应力场的变化分别

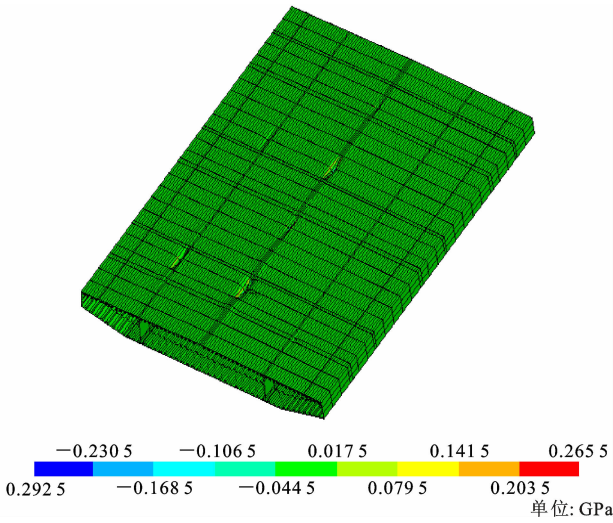


图 4 随机车辆荷载作用下某一时刻钢箱梁正交异性桥面板垂直焊缝方向的应力
Fig. 4 Stress in direction of vertical weld of steel box girder orthotropic steel deck at a certain moment under stochastic vehicle load

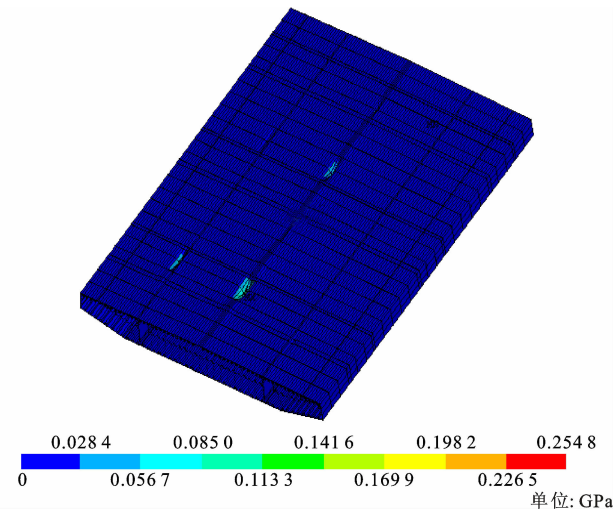


图 5 随机车辆荷载作用下某一时刻钢箱梁正交异性桥面板的等效节点应力
Fig. 5 Equivalent nodal stress of steel box girder orthotropic steel deck at a certain moment under stochastic vehicle load
如图 8、图 9 所示。

可见:焊接过程中,0~5 s 为焊接过程,时间步长为 0.2 s;冷却时间设置为 2 个时间段,5~105 s 和 105~905 s,时间步长分别为 20、30 s;905 s 以后通过嵌入顶板 U 肋模型和钢箱梁节段模型再施加车辆荷载进行求解;大约在 750 s 以后温度场将不再变化,此时的等效应力即为残余应力。

由于苏通大桥钢箱梁的焊后处理采用了局部高温锤击法,为了获得焊接细节经过局部高温锤击处

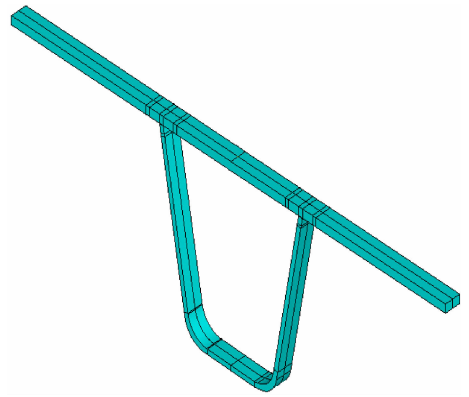


图 6 顶板 U 肋精细模型
Fig. 6 Meticulous model of a rib-to-deck

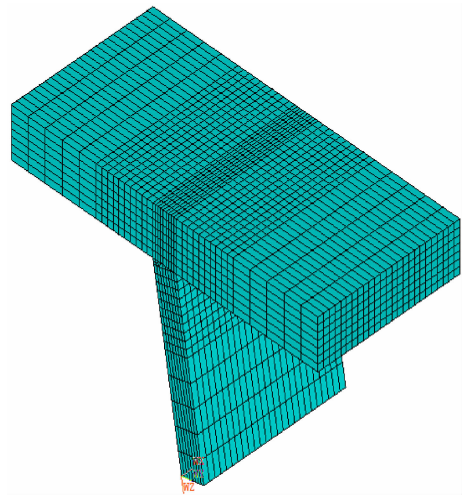


图 7 顶板-U 肋焊接细节的局部精细模型
Fig. 7 Local meticulous model of a rib-to-deck welded joint
理后的焊趾残余应力,采用数值法模拟了局部锤击对残余应力状态的影响,见图 10。

在垂直焊缝方向,残余应力在焊趾达到峰值,约为材料屈服强度的 35%,且均为拉应力,随着与焊趾距离的增大,残余拉应力不断减小。由图 10 可知,高温锤击处理可有效地降低焊趾残余拉应力,锤击后的焊趾附近残余应力分布较锤击前更均匀。

4 随机车载与残余应力耦合作用应力状态分析

将焊接残余应力作为初始应力,模拟分析随机车辆荷载与残余应力耦合作用下钢箱梁应力状态。图 11、图 12 分别为车辆荷载和残余应力耦合作用下某一时刻钢箱梁应力分布。

提取某一时刻钢箱梁顶板与 U 肋焊接节点的

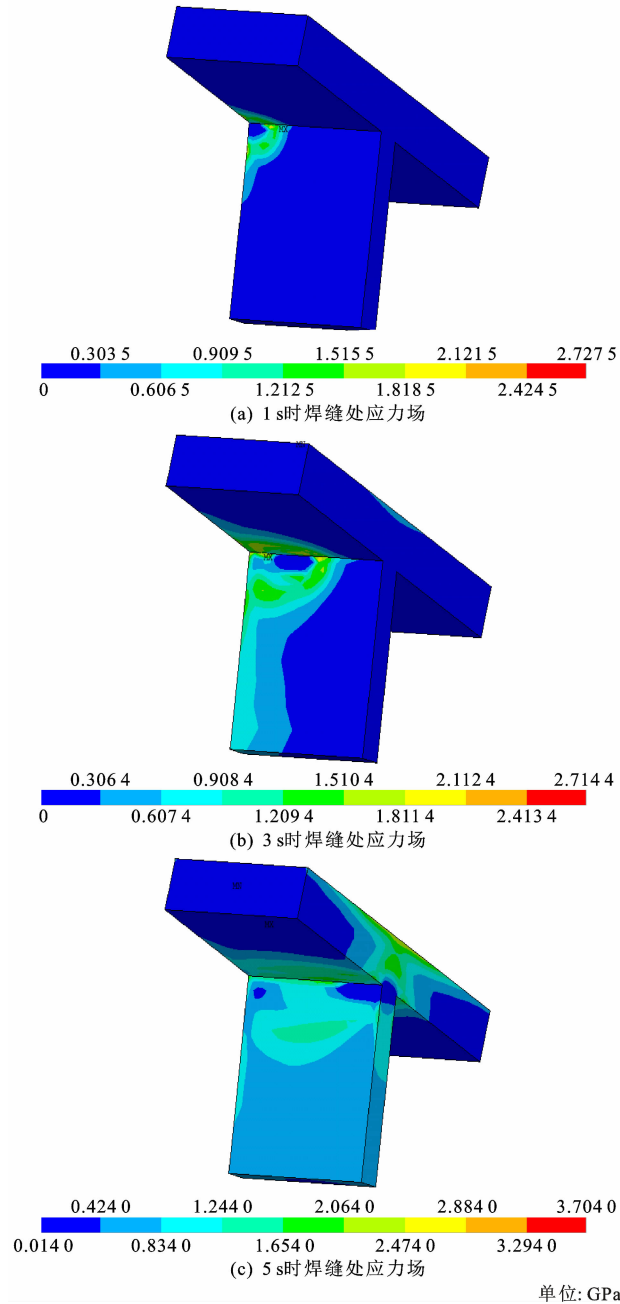


图8 焊接过程应力场动态变化

Fig. 8 Dynamic change of stress fields during welding

应力-时程曲线,如图 13、图 14 所示。

基于雨流计数法编制程序对应力-时程进行统计计数,分别获得随机车辆荷载作用下钢箱梁顶板与 U 肋焊接节点的应力谱和随机车辆荷载与焊接残余应力耦合作用下钢箱梁顶板与 U 肋焊接节点的应力谱,如图 15、图 16 所示。

由图 13~图 16 可知,焊接残余应力与随机车辆荷载耦合作用下,钢箱梁顶板与 U 肋焊接节点的应力峰值远大于随机车辆荷载作用的应力峰值。在随机车辆荷载作用下,若考虑焊接残余应

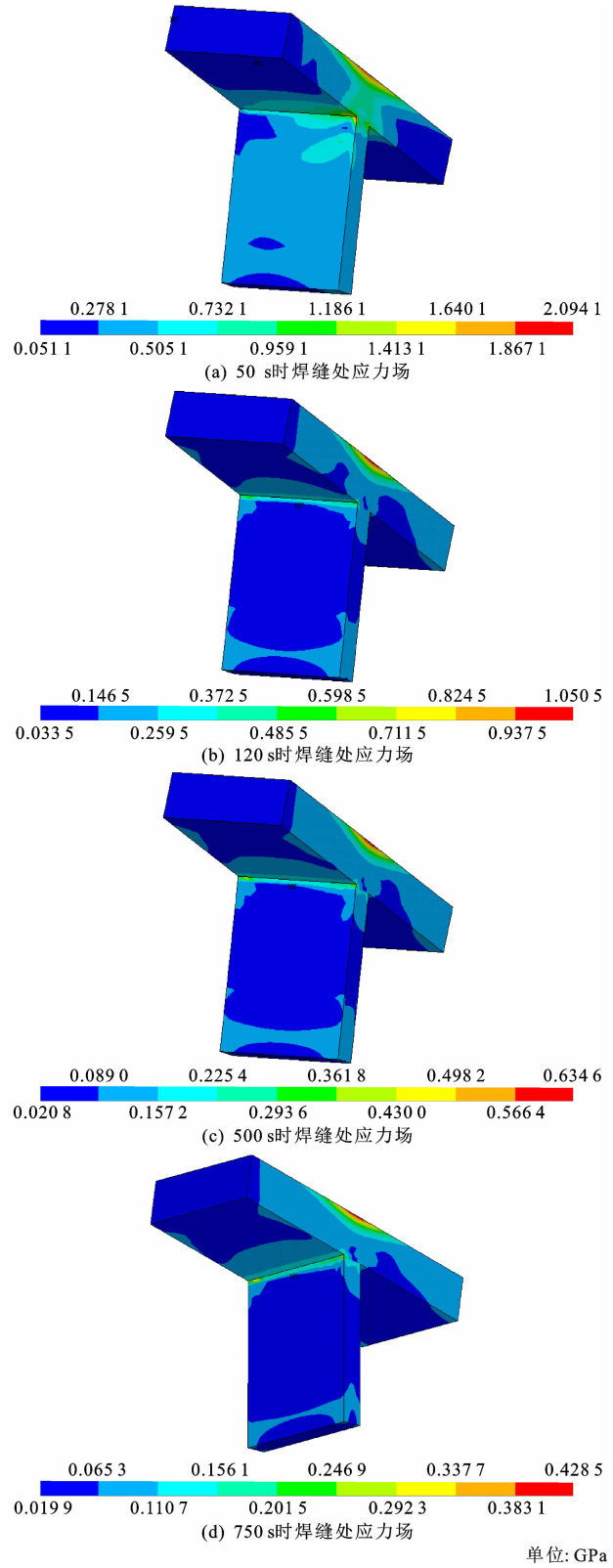


图9 冷却过程应力场动态变化

Fig. 9 Dynamic change of stress fields during cooling

力的耦合作用,钢箱梁顶板与 U 肋焊接节点将一直处于高幅值应力循环状态,节点极易发生疲劳破坏。

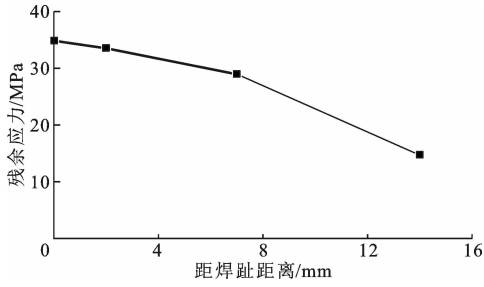


图 10 锤击后钢箱梁顶板焊趾附近的残余应力分布
Fig. 10 Distributions of residual stress near weld toe of top plate of steel box girder after hammering

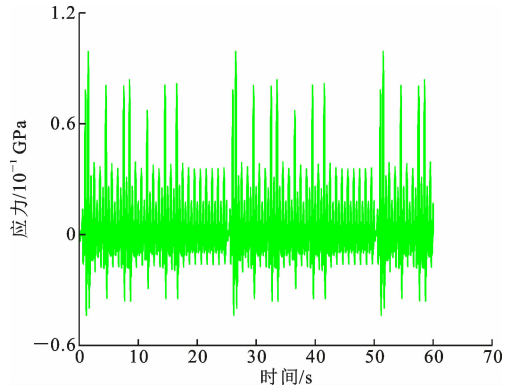


图 13 随机车辆荷载作用下某一时刻焊接节点应力-时程曲线
Fig. 13 Stress time-history curve of welded joint at a certain moment under stochastic vehicle load

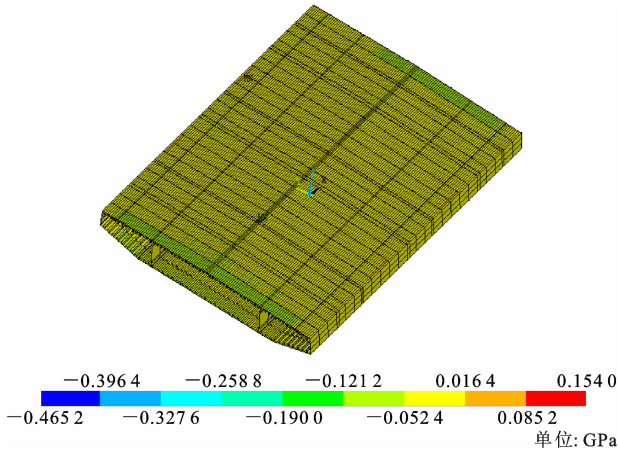


图 11 车辆荷载与残余应力耦合作用下某一时刻钢箱梁垂直焊缝方向的应力分布
Fig. 11 Stress distributions in vertical weld direction of steel box girder at a certain moment under coupling operation of vehicle load and residual stress

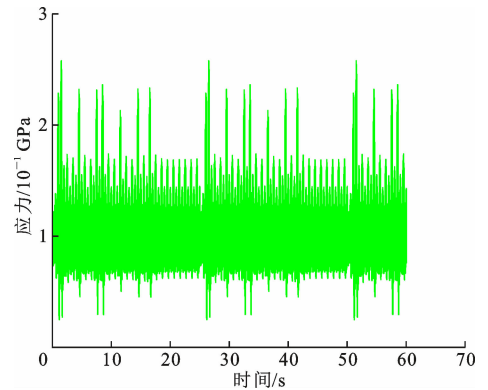


图 14 随机车辆荷载与残余应力耦合作用下某一时刻焊接节点应力-时程曲线
Fig. 14 Stress time-history curve of welded joints at a certain moment under coupling operation of stochastic vehicle load and residual stress

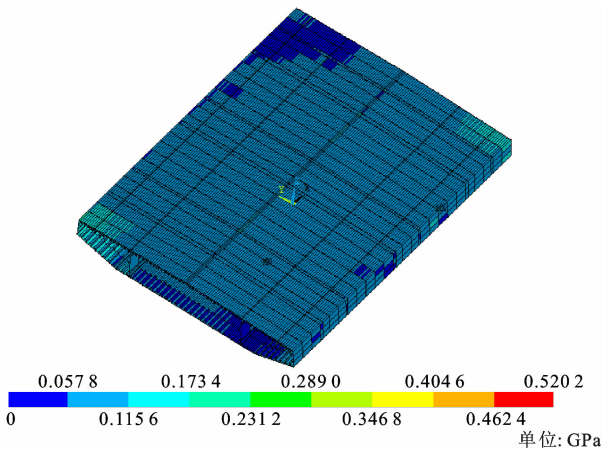


图 12 车辆荷载与残余应力耦合作用下某一时刻钢箱梁等效节点应力分布
Fig. 12 Equivalent nodal stress distributions of steel box girder at a certain moment under coupling action of vehicle load and residual stress

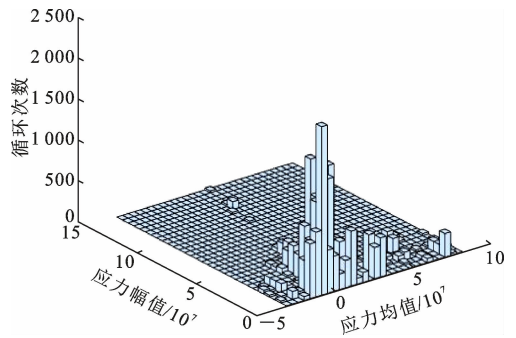


图 15 未考虑残余应力的雨流计数结果
Fig. 15 Rain flow counting results without considering residual stress

5 随机车载与残余应力耦合作用的疲劳评估

将第 1.1 和第 1.2 节中式(3)、式(4)、式(7)

分别代入式(1),编写 MATLAB 程序进行计算,得到仅考虑随机车辆荷载的疲劳裂纹扩展寿命,以及随机车辆荷载与焊接残余应力耦合作用下的疲劳裂纹扩展寿命,分析初始裂纹尺寸与剩余疲劳寿命的关系曲线,如图 17、图 18 所示。由图 17、图 18 可知:

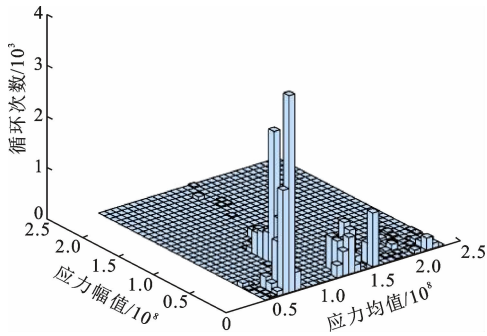


图 16 考虑残余应力的雨流计数结果

Fig. 16 Rain flow counting results considering residual stress

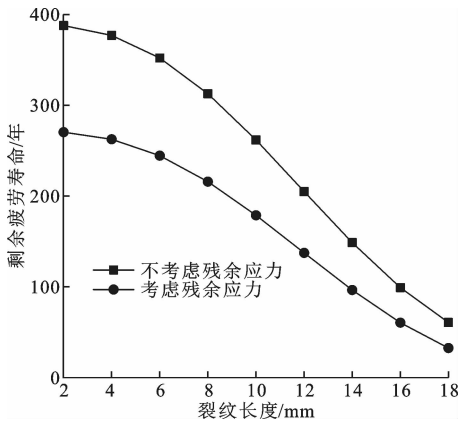


图 17 初始裂纹长度和剩余疲劳寿命关系

Fig. 17 Relationships between initial crack length and remaining fatigue life

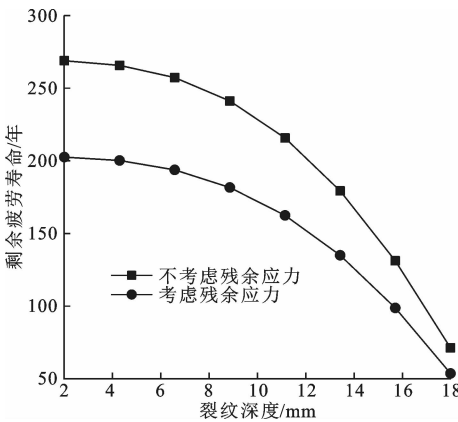


图 18 初始裂纹深度和剩余疲劳寿命关系

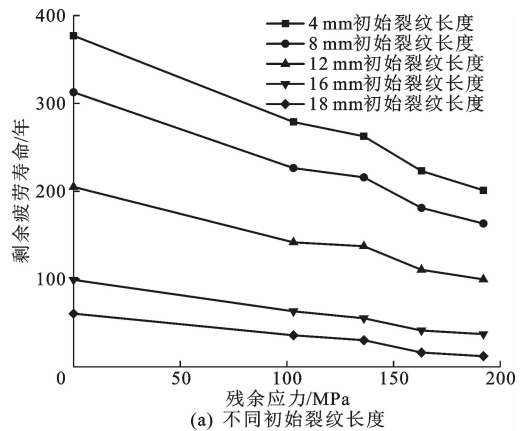
Fig. 18 Relationships between initial crack depth and remaining fatigue life

(1)在随机车辆荷载循环作用下,初始裂纹长度小于 8 mm 时,正交异性桥面板顶板与 U 肋焊接节点的剩余疲劳寿命随裂纹长度的增大缓慢下降,而初始裂纹长度大于 8 mm 后,焊接节点的剩余疲劳寿命随裂纹长度的增大急速下降。

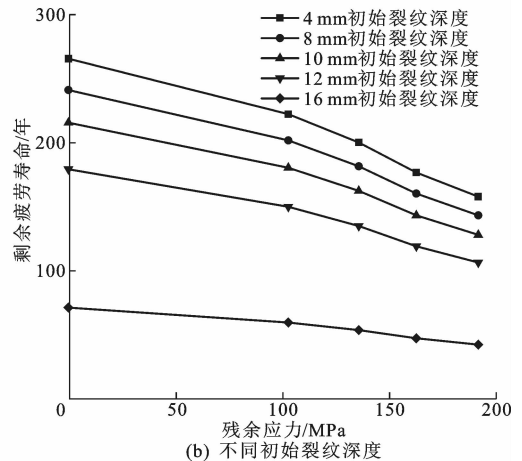
(2)焊接残余应力对焊接节点剩余疲劳寿命影

响很大。当初始裂纹长度分别为 4、8、12、16、18 mm 时,随机车辆荷载与焊接残余应力耦合作用下焊接节点的剩余疲劳寿命和仅考虑随机车辆荷载作用下焊接节点的剩余疲劳寿命相比,分别下降了 30%、31%、33%、44%、46%;而在裂纹深度方向,当初始裂纹深度分别为 4、8、10、12、16 mm 时则均下降了 25%左右。

为进一步分析焊接残余应力对焊接节点剩余疲劳寿命的影响,分别计算了初始裂纹长度为 4、8、12、16、18 mm 和初始裂纹深度为 4、8、10、12、16 mm 时,不同残余应力与随机车辆荷载耦合作用下焊接节点的剩余疲劳寿命,如图 19 所示。



(a) 不同初始裂纹长度



(b) 不同初始裂纹深度

图 19 残余应力和剩余疲劳寿命关系

Fig. 19 Relationships between residual stress and remaining fatigue life

从图 19 可知:若初始裂纹长度为 16 mm,相比于未考虑焊接残余应力作用下钢箱梁顶板与 U 肋焊接节点的剩余疲劳寿命,当焊接残余应力分别为 103、136、163、192 MPa 时,焊接节点的剩余疲劳寿命分别下降了 36%、44%、59%、62%;若初始裂纹深度为 16 mm 时则分别下降了 15%、25%、34%、41%。

6 结 语

(1)在垂直焊缝方向,残余应力在焊趾达到峰值,约为材料屈服强度的35%,且均为拉应力;随着与焊趾距离的增大,残余拉应力不断减小。高温锤击处理可有效地降低焊趾残余拉应力,锤击后的焊趾附近残余应力分布较锤击前更均匀。

(2)焊接残余应力与随机车辆荷载耦合作用下,钢箱梁顶板与U肋焊接节点的应力峰值远大于随机车辆荷载作用时。在随机车辆荷载作用下,若考虑焊接残余应力的耦合作用,钢箱梁顶板与U肋焊接节点将一直处于高幅值应力循环状态,节点极易发生疲劳破坏。

(3)初始裂纹长度对焊接节点疲劳寿命影响很大,当初始裂纹长度大于8 mm后,焊接节点的剩余疲劳寿命随裂纹长度的增大急速下降。

(4)焊接残余应力的存在极大地降低了焊接节点疲劳寿命,与仅考虑随机车辆荷载作用下焊接节点的疲劳寿命相比,焊接残余应力与车辆荷载应力耦合作用下的疲劳寿命下降30%~40%,且残余应力越大,疲劳寿命降幅就越大。

(5)本文仅分析了在残余应力与随机车辆荷载耦合作用下对钢箱梁正交异性桥面板疲劳寿命的影响程度。其他荷载(如风荷载)与随机车辆荷载耦合作用下的复杂应力场对正交异性桥面板的疲劳寿命评估是下一阶段的重点。

参考文献:

References:

- [1] BYERS W G, MARLEY M J, MOHAMMADI J, et al. Fatigue reliability reassessment procedures: State-of-the-art paper[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(3): 271-276.
- [2] MIAO Y, NIU D T. Effect of vehicle load on the fatigue performance of corroded highway bridge[J]. Science of Advanced Materials, 2018, 10(6): 845-852.
- [3] WOLCHUK R. Lessons from weld cracks in orthotropic decks on three European bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(1): 75-84.
- [4] 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 Zhi-bin. Classification and reasons of typical fatigue cracks in orthotropic steel deck[J]. Steel Con-

struction, 2011, 26(2): 9-15, 26.

- [5] 王春生,张静雯,段 兰,等. 长寿命高性能耐候钢桥研究进展与工程应用[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 1-26.
- WANG Chun-sheng, ZHANG Jing-wen, DUAN Lan, et al. Research progress and engineering application of long lasting high performance weathering steel bridges[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(1): 1-26.
- [6] JTG D64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范[S]. JTG D64—2015, Specifications for design of highway steel bridge[S].
- [7] 陈一馨. 车辆荷载作用下钢桥面板细部焊接结构疲劳性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- CHEN Yi-xin. Study of fatigue performance for detail welding structure of steel bridge decks under vehicle loading[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [8] 姜 磊,刘永健,龙 辛,等. 基于热点应力法的矩形钢管混凝土组合桁梁桥节点疲劳评估[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 104-116.
- JIANG Lei, LIU Yong-jian, LONG Xin, et al. Fatigue assessment of joints in concrete-filled rectangular hollow section composite truss bridges based on hot spot stress method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 104-116.
- [9] 揭志羽,李亚东,卫 星,等. 复杂应力场下焊接接头疲劳寿命评估的热点应力法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 97-103.
- JIE Zhi-yu, LI Ya-dong, WEI Xing, et al. Hot spot stress method for fatigue life assessment of welded joints under complex stress fields[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5): 97-103.
- [10] 祝志文,黄 炎,李健朋,等. 正交异性钢桥面板隔板弧形切口疲劳评价的热点应力法[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(5): 25-34.
- ZHU Zhi-wen, HUANG Yan, LI Jian-peng, et al. Fatigue assessment of floor beam cutout in orthotropic steel bridge deck based on hot-spot stress method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(5): 25-34.
- [11] 吕彭民,李大涛. 正交异性钢桥面板顶板疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 84-89, 97.
- LU Peng-min, LI Da-tao. Fatigue research on bridge deck-plate of orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 84-

- 89,97.
- [12] 张清华,崔 闯,卜一之,等. 正交异性钢桥面板足尺节段疲劳模型试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(4):72-83.
ZHANG Qing-hua, CUI Chuang, BU Yi-zhi, et al. Experimental study on fatigue features of orthotropic bridge deck through full-scale segment models[J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(4):72-83.
- [13] 李传习,李 游,陈卓异,等. 基于实测车流的钢箱梁横隔板疲劳特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2019,39(5):48-58.
LI Chuan-xi, LI You, CHEN Zhuo-yi, et al. Fatigue characteristics of steel box girder based on measured vehicle flow[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2019,39(5):48-58.
- [14] 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.
LIU Yi-ming, ZHANG Qing-hua, 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.
- [15] 姜 苏. 基于断裂力学的正交异性钢桥面板与纵肋焊接细节疲劳寿命评估[D]. 成都:西南交通大学,2014.
JIANG Su. The fatigue life analysis of the welded detail of orthotropic steel bridge deck and longitudinal rib based on LEFM[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2014.
- [16] 杨雅斌. 正交异性钢桥面板肋-面板焊缝疲劳裂纹扩展分析及寿命评估[D]. 天津:天津大学,2018.
YANG Ya-bin. Crack propagation analysis and fatigue life evaluation of rib-to-deck welding joints of orthotropic steel deck[D]. Tianjin: Tianjin University,2018.
- [17] 赵 秋,吴 冲. U肋加劲板焊接残余应力数值模拟分析[J]. 工程力学,2012,29(8):262-268.
ZHAO Qiu, WU Chong. Numerical analysis of welding residual stress of U-rib stiffened plate[J]. Engineering Mechanics,2012,29(8):262-268.
- [18] 崔 闯,卜一之,李 俊,等. 钢箱梁面板与U肋焊接残余应力的分布特性[J]. 西南交通大学学报,2018,53(2):260-265.
CUI Chuang, BU Yi-zhi, LI Jun, et al. Distribution characteristics of welding residual stress at U deck-to-rib connection detail of steel box girder[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2018,53(2):260-265.
- [19] 顾 颖. U肋加劲钢桥面板焊接残余应力与变形研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
GU Ying. Research on welding residual stresses and distortions in steel bridge decks stiffened with U-shaped ribs[J]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2016.
- [20] 崔 闯. 基于应变能的钢桥面板与纵肋连接细节疲劳寿命评估方法及其可靠度研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
CUI Chuang. Research on fatigue life evaluation and reliability based on strain energy in deck-to-rib joint of orthotropic steel deck [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2018.
- [21] 邵珂夫. 钢桥焊接细节残余应力分析及疲劳性能评估[D]. 成都:西南交通大学,2014.
SHAO Ke-fu. Residual stress analysis and fatigue properties estimation on welding joints steel bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2014.
- [22] 卞如冈,崔维成,万正权. 基于双参数统一方法研究压-压疲劳下的裂纹扩展[J]. 船舶力学,2009,13(5):734-738.
BIAN Ru-gang, CUI Wei-cheng, WAN Zheng-quan. Fatigue crack propagation of the notched specimen under cyclic compression-compression loading based on the two-parameter unified approach[J]. Journal of Ship Mechanics,2009,13(5):734-738.
- [23] PARIS P C. Secondary elastic crack tip stresses which may influence very slow fatigue crack growth[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures,2002,25(8/9):791-794.
- [24] FORMAN R G, KEARNE V E, ENGLE R M. Numerical analysis of crack propagation in cyclic loaded structures[J]. Journal of Basic Engineering,1967,89(3):459-463.
- [25] WALKER E K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-t3 and 7075-t6 aluminum[M]//Rosenfeld. Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life. West Conshohocken: ASTM International,1970:1-14.
- [26] 罗广恩,崔维成. 基于改进 McEvily 模型的深海结构表面裂纹疲劳扩展模拟[J]. 船舶力学,2013,17(6):

- 645-655.
- LUO Guang-en, CUI Wei-cheng. Fatigue crack propagation of the surface cracked deep-water structures based on extended McEvily model[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(6): 645-655.
- [27] 卞如冈, 崔维成, 万正权, 等. 疲劳裂纹扩展双参数统一方法中门槛值的确定[J]. 船舶力学, 2010, 14(增1): 94-100.
- BIAN Ru-gang, CUI Wei-cheng, WAN Zheng-quan, et al. A method for the evaluation of the two fatigue thresholds based on the two-parameter unified approach[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(S1): 94-100.
- [28] 赵少杰. 钢桥整体节点静载和疲劳性能研究[D]: 成都: 西南交通大学, 2007.
- ZHAO Shao-jie. Research on static load and fatigue performance of integral joints of steel bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [29] 韩芸, 黄小平, 张毅, 等. 焊趾表面裂纹应力强度因子简化计算的比较研究[J]. 船舶力学, 2005, 9(3): 87-96.
- HAN Yun, HUANG Xiao-ping, ZHANG Yi, et al. A comparative study of simplified sif calculations of surface cracks at weld toe[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(3): 87-96.
- [30] 杨晓艳, 贡金鑫, 张启伟. 随机车辆荷载作用下斜拉索索力的概率模型及可靠度分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 90-98.
- YANG Xiao-yan, GONG Jin-xin, ZHANG Qi-wei. Analysis of probabilistic model of stay cable stress and reliability under random vehicle loads[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 90-98.
- [31] 李爱群, 王浩. 子模型法在超大跨悬索桥钢箱梁应力分析中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 80-84.
- LI Ai-qun, WANG Hao. Stress analysis on steel box girders of super-long-span suspension bridges with submodel method[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 80-84.
- [32] 张鹏飞, 张启伟. 千米级斜拉桥扁平钢箱梁的局部力学行为[J]. 天津大学学报, 2010, 43(7): 593-600.
- ZHANG Peng-fei, ZHANG Qi-wei. Local mechanical behavior of flat steel box girder for kilometer-level cable-stayed bridge[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(7): 593-600.
- [33] 胡敏英, 吴志生. 基于单元生死焊接温度场应力场模拟研究[J]. 机械工程与自动化, 2007(6): 58-60.
- HU Min-ying, WU Zhi-sheng. Study on welding temperature and residual stress based on element death and birth[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2007(6): 58-60.
- [34] 石广玉, 李广耀. 基于断裂力学的钢-UHPC组合结构中栓钉的疲劳寿命评估[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(2): 102-114.
- SHI Guang yu, LI Guang yao. Evaluation of fatigue life of stud in steel-UHPC composite structure based on fracture mechanics[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(2): 102-114.