

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.05.006

车-温度荷载耦合作用下悬索桥钢桥 面板疲劳寿命评估

张海萍, 刘扬, 罗媛, 陈斌

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对传统悬索桥钢桥面板疲劳寿命评估方法忽略了温度荷载影响的问题, 提出考虑车辆和温度荷载耦合作用下悬索桥钢桥面板疲劳耐久性评估方法。以南溪长江大桥为工程背景, 基于悬索桥主梁的车辆动态称重(WIM)、U肋细节应变、铺装层温度和环境温度监测数据, 建立标准疲劳车辆模型、铺装层温度概率模型和主梁温差模型。在ANSYS有限元平台, 采用瞬态分析计算车辆和铺装层温度荷载耦合作用对结构两类典型焊接细节的疲劳应力效应的影响, 并统计结构温度梯度的疲劳应力谱。在此基础上, 预测车-温度荷载耦合作用下南溪长江大桥两类典型细节的疲劳寿命。研究表明: 在车载不变的情况下, 沥青铺装层温度与等效应力幅呈现线性关系。温度对细节疲劳寿命的影响随着细节距铺装层距离的增大而衰减。温度梯度疲劳荷载谱的循环次数明显较车载小, 在两者耦合作用中, 车载对疲劳损伤的贡献值占据主要地位。对比考虑与不考虑车-温度荷载的耦合作用, 南溪长江大桥梁服役100 a主梁细节1和细节2的疲劳损伤计算值分别相差5.06和1.50倍。

关键词: 桥梁工程; 正交异性板; 车辆荷载; 温度荷载; 疲劳寿命预测

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)05-0041-12

引文格式: 张海萍, 刘扬, 罗媛, 等. 车-温度荷载耦合作用下悬索桥钢桥面板疲劳寿命评估[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(5): 41-52.

Fatigue Life Assessment of the Steel Deck of Suspension Bridge Under Vehicle-Temperature Load Coupling

ZHANG Haiping, LIU Yang, LUO Yuan, CHEN Bin

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the flaw that the traditional fatigue life assessment method of steel deck of suspension bridge fails to take into consideration the influence of temperature load, a fatigue durability assessment method has thus been proposed of the steel deck of suspension bridge with the coupling effect of vehicle-temperature loading under consideration. Taking Nanxi Yangtze River Bridge as the target of the engineering background, and based on the vehicle weight in motion (WIM), U-rib detail strain, pavement temperature and ambient temperature monitoring data of

收稿日期: 2020-12-09

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5143, 2020JJ5140, 2019JJ60051); 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(20B182); 长沙理工大学桥梁工程安全控制教育部重点实验室基金资助项目(19KB02)

作者简介: 张海萍(1988-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事桥梁结构可靠度理论与安全控制方面的教学与研究, E-mail: zhanghaipingbridge@163.com

suspension bridge girder, an establishment can be achieved of the standard fatigue vehicle model, pavement temperature probability model and girder temperature difference model. By adopting ANSYS finite element platform, a transient analysis has been made of the calculation of the influence of vehicle and pavement temperature load coupling on the fatigue stress effect of two typical welding details, with the fatigue stress spectrum of structure temperature recorded. On this basis, a prediction can be achieved of the fatigue life of two typical details of Nanxi Yangtze River Bridge under vehicle-temperature load coupling. The results show that there is a linear relationship between the temperature of asphalt pavement and the equivalent stress amplitude under the condition of the same vehicle load, with the effect of temperature on the fatigue life of details decreasing with the increase of the distance between details and pavement. The number of cycles of the temperature gradient fatigue load spectrum is significantly smaller than that of the vehicle load spectrum, while the contribution of the vehicle load to the fatigue damage plays a dominant role in the coupling effect. Based on a comparison between the coupling effect with or without the vehicle temperature load taken into consideration, the calculated fatigue damage values of detail 1 and detail 2 of Nanxi Yangtze River Bridge are 5.06 and 1.50 times respectively after 100 years of service.

Keywords: bridge engineering; orthotropic steel deck; vehicle load; temperature load; fatigue life prediction

0 引言

正交异性板钢箱梁作为大跨度悬索桥和斜拉桥最普遍的一种结构形式^[1],其结构疲劳开裂的问题较为凸显。结构所受疲劳荷载的形式非常复杂,包括车辆荷载、温度荷载、环境介质侵蚀和地震作用等^[2]。钢箱梁的喷漆工艺较为成熟,受外界腐蚀介质影响较小,一般内陆地区桥梁可以忽略环境腐蚀介质的影响^[3]。地震荷载属于偶然荷载一般也可以不考虑其对结构的疲劳损伤累积。车辆和温度荷载作为结构所受到最具代表性的疲劳荷载形式,两者对结构造成的疲劳损伤不只是简单的“1+1”叠加,而是具有耦合放大的效果^[4-5]。

温度对结构疲劳损伤累积作用的影响可细分为对细节疲劳应力幅值的放大和应力循环次数的增多。我国既大跨度悬索桥的桥面铺装层主要采用沥青混凝土材料。沥青混凝土材料具有温度敏感性特征,其刚度同样具有典型的季节性特征,沥青混凝土铺装层传递扩散车辆轮轴荷载的能力随刚度的改变而发生变化。文献[6]对比了夏季与冬季某悬索桥主梁U肋-顶板细节损伤值,在车流荷载相当的情形下,钢桥面板细节在夏季的疲劳损伤累计明显大于冬季。环境温度使得数值小的疲劳应力进入疲劳应力“门槛”值内,从而增加了可计入应力幅次数。同时主梁结构温度梯度作用会增加总疲劳应力循环的次数^[7]。我国公路桥涵规范没有针对扁平钢箱梁结构形式的温度梯度模型。日照辐射下扁平钢箱梁横桥向和竖

向温度梯度同样显著。同时,钢箱梁温度荷载效应与车辆荷载效应水平相当,甚至高于车辆荷载效应。在疲劳寿命分析中须考虑温度效应的叠加^[8]。

本文基于南溪长江大桥 WIM (weight-in-motion) 系统和温度监测系统监测数据,分别建立标准疲劳车辆荷载模型和铺装层温度概率模型。计算钢箱梁温度梯度作用下焊接细节节点应力水平。在 ANSYS 平台计算车辆-温度荷载耦合作用下正交异性板焊接节点的疲劳应力效应,讨论车辆-温度荷载耦合作用对焊接点的疲劳寿命的影响。

1 工程背景

南溪长江大桥悬索桥作为中国西南地区最大主跨的悬索桥,是宜宾到泸州高速路上跨越长江的控制性工程大桥,其主跨跨径为 820 m (见图 1)。



图 1 南溪长江大桥立面图

Fig. 1 Nanxi Yangtze River suspension bridge

在桥梁结构泸州岸安置 WIM 系统,悬索桥的跨中位置安装了主梁结构、环境和铺装层温度传感器,

传感器采样频率为 5 Hz。行车道两车轮加载位置所对应的 U 肋-顶板焊接点和 U 肋-U 肋焊接点分别

埋设振弦式应变传感器, 采样的频率为 50 Hz(见图 2, 图中单位为 cm)。

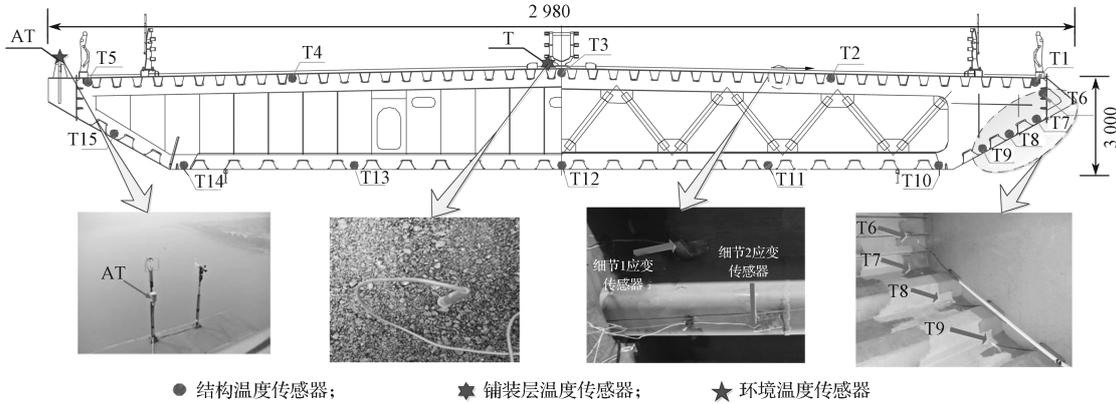


图 2 温度与应变传感器布置截面图

Fig. 2 Layout map of the temperature and strain sensors

2 基于 WIM 的标准疲劳车辆模型

2.1 车重概率模型

车辆荷载母样本监测数据包含不同车型和车辆货载率, 监测的车辆荷载母样本监测数据中包含有多类子样本点。车辆荷载概率模型可以用高斯混合分布描述^[9], 车重荷载的概率表达式为

$$G_{Ci}(x|\theta) = \sum_{i=1}^M w_i N(x|\mu_i, \sigma_i^2) =$$

$$\sum_{i=1}^M w_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (1)$$

式中: μ_i 为车质量的均值; σ_i^2 为方差; w_i 为权重; 矩阵参数 θ 包含 w_i 、 μ_i 和 σ_i^2 3 类变量; x 为车质量统计样本值。

课题组在文献 [1] 中将车辆按照轮轴数进行车型分类, 将采集样本车辆分为 C2、C3 (1)、C3 (2)、C4、C5 和 C6 共 6 类典型车辆模型, 表 1 给出了南溪长江大桥典型车辆的多峰概率分布模型参数^[2]。

表 1 6 类典型车辆的高斯混合模型参数估计值

Table 1 GMM parameter evaluation of 6 types of vehicle weight

车辆类型	M	w _i	μ _i /kN	σ _i ²	车辆类型	M _i	w _i	μ _i /kN	σ _i ²
C2	1	0.26	225	67.40	C4	1	0.29	253.8	20.34
	2	0.27	55.0	38.00		2	0.20	333.2	93.64
	3	0.47	137.0	13.70		3	0.52	610.1	196.43
C3 (1)	1	0.58	317.7	78.71	C5	1	0.34	277.4	25.68
	2	0.24	172.2	68.00		2	0.42	620.6	383.07
	3	0.18	706.7	181.89		3	0.24	660.7	54.99
C3 (2)	1	0.13	380.2	182.83	C6	1	0.31	710.3	501.59
	2	0.42	226.5	12.29		2	0.20	750.4	78.92
	3	0.25	481.6	112.45		3	0.19	740.9	97.70
	4	0.20	216.8	30.00		4	0.29	333.4	41.15

2.2 标准疲劳车辆模型

根据 Miner 等效线性损伤定理^[10], 疲劳车辆的等效车重可依据以下表达式得到:

$$G_{C_{req}} = \left[\int_0^\infty x^3 \cdot G_{Ci}(x) dx \right]^{1/3} \quad (2)$$

采用式 (2) 计算得到标准疲劳车辆车重, 需依据车重与轴重之间的关系式计算标准疲劳车辆的轴重模型。因同类车型的轴距和重心具有不确定性, 难

以采用单一力学模型去构建车重与轴重之间的关系式。Wang T. 等^[11]认为同一类型车重和轴重具有很强的线性相关性。课题组基于 WIM 的海量车重与轴重的监测数据, 对 6 类车型的车重与轴重实测数据进行线性回归, 线性回归表达式为

$$W_{Cij} = a_{Cij} G_{Ci} + b_{Cij} \quad (3)$$

式中: W_{Cij} 为典型车辆 C_i 的第 j 轴轴重; a_{Cij} 为斜率参数; b_{Cij} 为位置参数。

对于 C3 (1) 车型, 轮轴 1 和轮轴 2 具有相同的刚度, 且轮轴 1 和轮轴 2 属于连轴, 挂车的支点加载位置在连轴的中心, 可知轴 1 和轴 2 的荷载值相等。同理, C3 (2) 的轴 2 和轴 3 为连轴; C4 的轴 3 和轴 4 为连轴; C5 的轴 3、轴 4 和轴 5 为连轴; C6 的轴 2 和 3 轴为连轴, 轴 4、轴 5 和轴 6 为连轴。

基于车辆荷载统计数据, 采用线性回归的方法得到 6 典型车型车重与轴重的线性表达式 (见图 3)。由于 WIM 系统很难完成对车辆轴距的监测。本文参照文献 [12] 中的轴距数据。基于车重、轴重和轴距的统计数据, 计算得到 6 类标准车辆疲劳荷载模型 (见附表 1)。

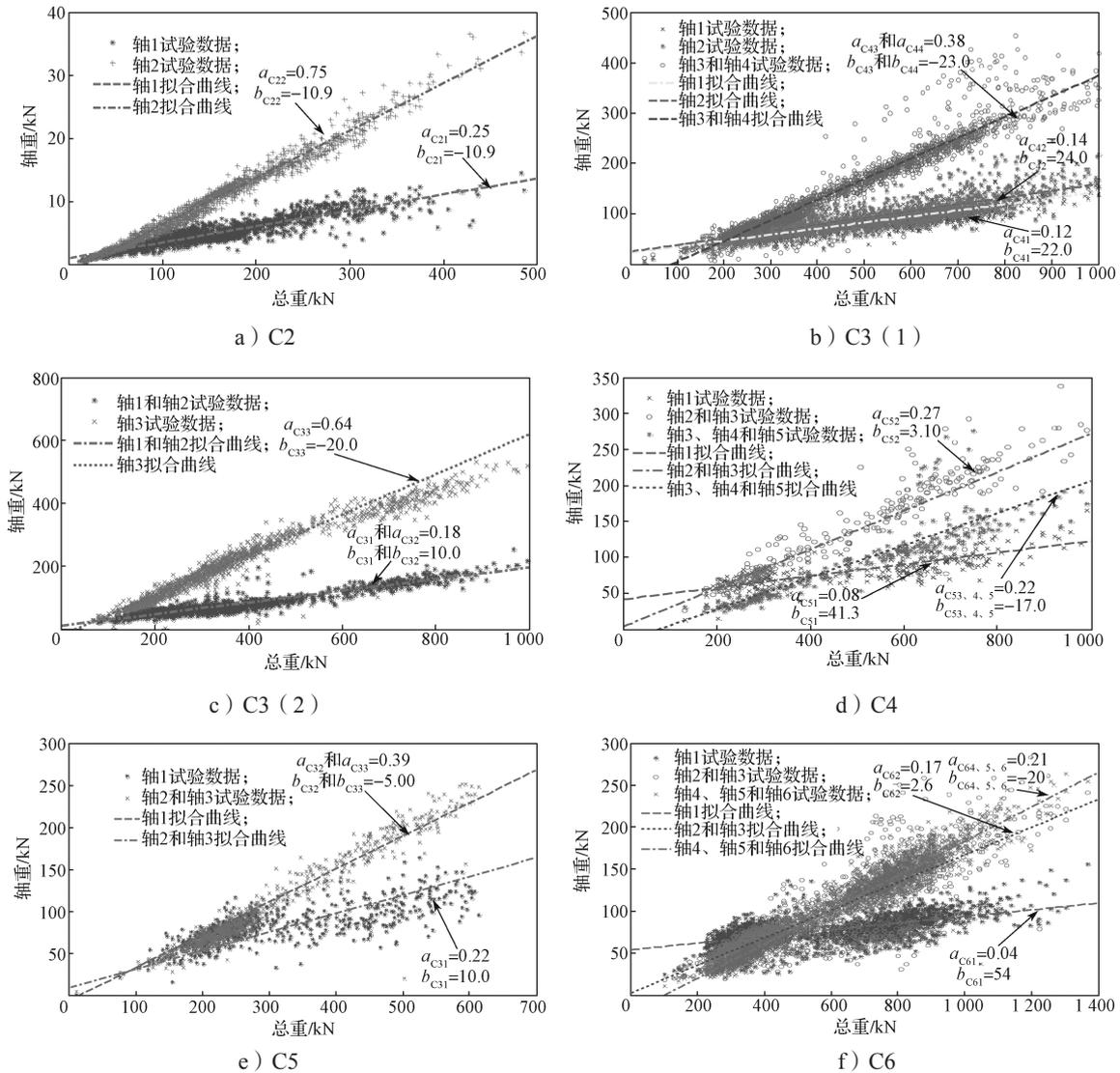


图 3 6 类典型车型车重与轴重的线性回归结果

Fig. 3 6 types of vehicle axle weight linear regression model

3 车-温度荷载耦合作用下钢桥面板细节疲劳应力分析

3.1 有限元模型的建立

为实现车辆荷载与疲劳应力效应之间的转化, 在 ANSYS 平台建立正交异性钢箱梁结构的局部模型。主要研究对象为 U 肋-顶板焊接和 U 肋-U 肋对接两类细节。车辆轮轴局部荷载对横向的其他车道细节点产生的应力很小, 对其他车道疲劳损伤的累计可忽

略不计。为提高计算效率, 建立半幅钢箱梁有限元模型, 该局部模型采用 solid45 单元和 shell63 单元, 分别模拟正交异性钢箱梁结构的沥青铺装层和正交异性板材料。对沥青铺装层、顶板、底板和 U 肋采用矩形进行网格划分, 用三角形对横隔板进行单元网格划分。

本文假设主梁结构在承受车辆荷载时不发生滑动位移和扭转, 对局部有限元模型的边界节点的 6 个自由度进行限制。沥青混凝土铺装层的厚度为 70 mm, 当铺装层温度为 20 °C 时, 沥青混凝土的弹性

模量和泊松比分别为 6 147 MPa 和 0.2。U 肋的顶板、腹板和底板厚度分别取 14, 8, 10 mm。U 肋的弹性模量和泊松比分别为 210 GPa 和 0.3, 主梁的局部有限元模型见图 4, 图中单位为 mm。

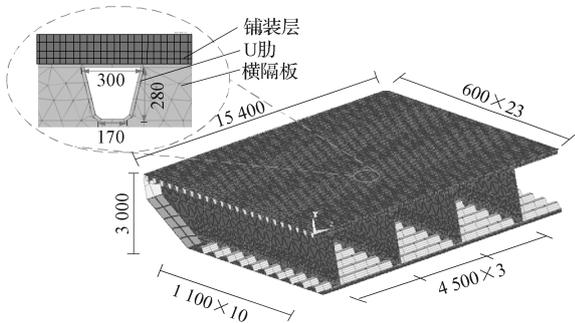


图 4 正交异性钢箱梁局部有限元模型
Fig. 4 Local finite element of OSD

沥青混凝土铺装层对温度敏感性较强, 温度与沥青混凝土材料的弹性模量呈负相关性。温度越高, 材料的弹性模量越小。当环境温度升高时, 沥青混凝土铺装层传递荷载的能力减弱。图 5 为不同温度环境铺装层的扩散传递荷载示意图。由图 5 可知, 在低温环境下, 沥青混凝土铺装层变形小、刚度大, 扩展传递荷载能力强。当轮轴荷载传递到钢桥面板的顶板时, 荷载的局部效应变小。在高温环境下, 沥青混凝土受轮轴荷载作用下的变形较大, 扩散传递荷载的能力相对较弱。细节点在受相同大小荷载的情况下, 细节点应力效应相对较大。不可忽略瞬态分析过程中沥青混凝土温度对疲劳应力效应的影响。

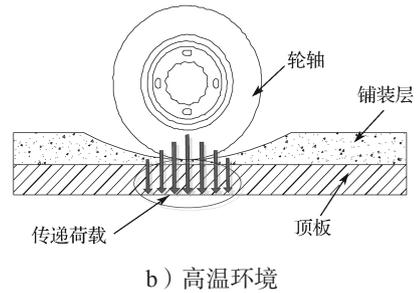


图 5 不同温度环境铺装层的扩散传递荷载示意图
Fig.5 Schematic diagram of diffusion transfer load of pavement at different temperatures

文献 [13] 给出了如下沥青混凝土的温度与弹性模量的对应关系式:

$$E=11\ 031 \times 10^{-0.016\ 93T} \quad (4)$$

式中: E 为沥青混凝土的弹性模量; T 为沥青混凝土的温度, 沥青混凝土的温度通过埋在铺装层的传感器进行实时监测。

3.2 瞬态分析

采用瞬态分析来模拟车辆过桥。加载荷载采用车轮截面大小的均匀力模拟轮轴荷载。瞬态分析的计算步骤为: 首先确定车辆的到达时间。以第一辆疲劳车辆模型前轮轴作用在结构的第一个节点作为开始时间点。后续车队按照车速与车距的关系式, 计算到达作用节点的时间。然后基于行车车速、轴距和有限元网格的划分长度计算节点加载时间。最后删除前一个荷载加载步骤。依次循环 3 个计算步骤, 来模拟多车上桥的瞬态分析过程。

3.3 模型验证

对比有限元计算结果与应变实测数据来验证瞬态分析的应力时程曲线精准性是否满足要求。监测 2014 年 4 月 3 日 16 时 6 分一辆 C3 型货车的荷载信息和应变时程数据。该车的轴距分别为 4.50, 1.35 m, 轴重分别为 58, 83, 83 kN, 行车时速为 72 km/h。沥青混凝土铺装层的实时温度为 22 °C (见图 6)。

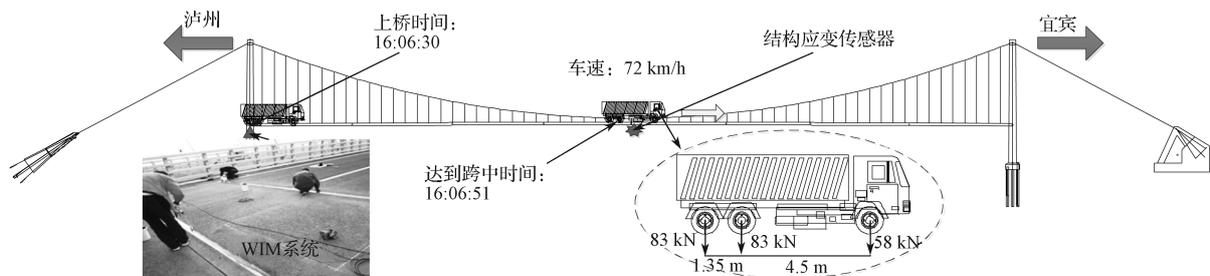
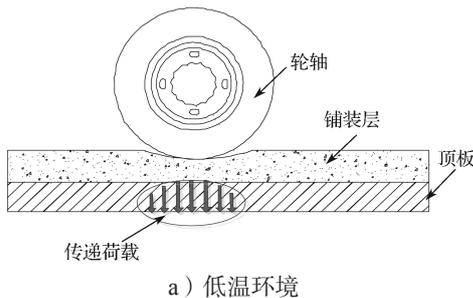


图 6 实测车辆荷载过桥图
Fig. 6 Diagram of vehicle load crossing bridge under measurement

图7为细节应力有限元计算和实测数据对比图。

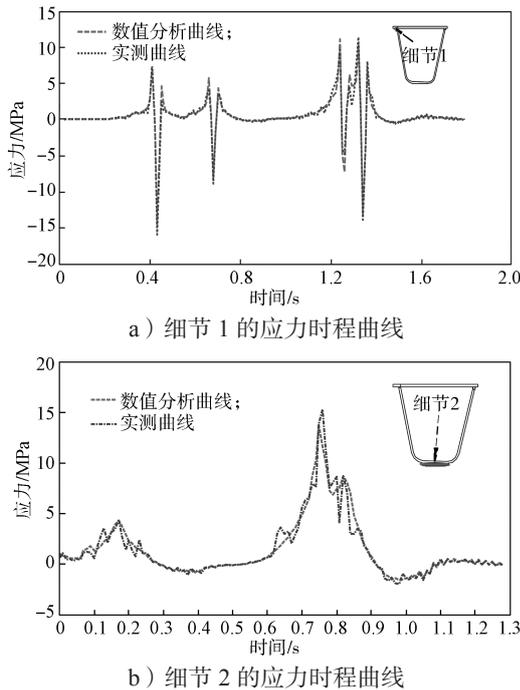


图7 细节应力有限元计算和实测数据对比图

Fig. 7 Comparison diagram of detail stress finite element calculation and measured stress data

由图7可知，有限元计算和实测结果基本吻合，实测应力时程曲线相对“毛刺”较多。外界干扰信号和车-桥耦合振动作用是造成“毛刺”的主要原因。

以C4车型为代表，分析典型车辆作用下在不同的沥青材料温度的应力时程曲线，如图8所示。

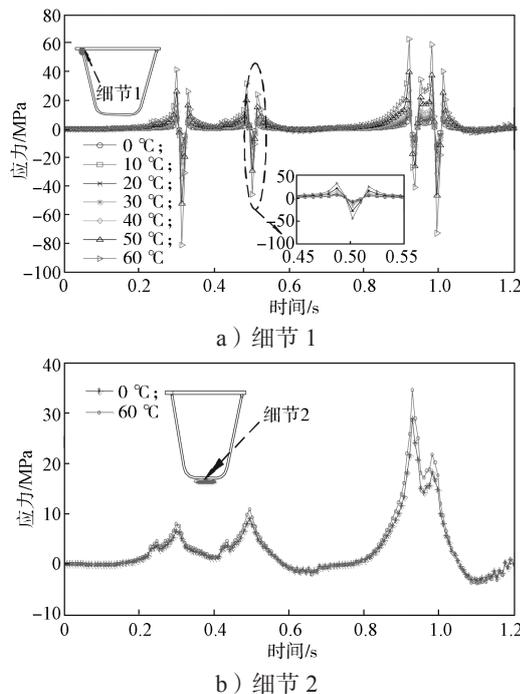


图8 不同温度下C4作用两类细节的应力时程曲线

Fig. 8 Stress time-history curves for welded details under C4 loading at different temperatures

由图8a可知，铺装层温度在0℃时，细节1的最大拉应力为15.3 MPa，而当铺装层温度为60℃时，细节1的最大拉应力值为60 MPa，两者最大拉应力比值达3.92倍。由图8b可知，铺装层温度在0℃时，细节2的最大拉应力为17.5 MPa，当铺装层温度为60℃时，细节2的最大拉应力值为25.9 MPa，两者最大拉应力比值仅为1.48倍。造成两类细节点应力对温度敏感性具有较大差异的原因，是细节点距离沥青铺装层的距离大小不同。细节点距离铺装层近，受铺装层扩展荷载能力的影响较大。

4 正交异性板温度梯度疲劳应力谱

4.1 横桥向温差时变曲线

正交异性板在正温度梯度和负温度梯度作用下的应力场有本质的区别^[14]。需要将正温差与负温差分开进行讨论。图9给出了 T_{2-1} 和 T_{2-3} 两组变量的1a内时变模拟曲线。用分割线对模拟数据进行分割。

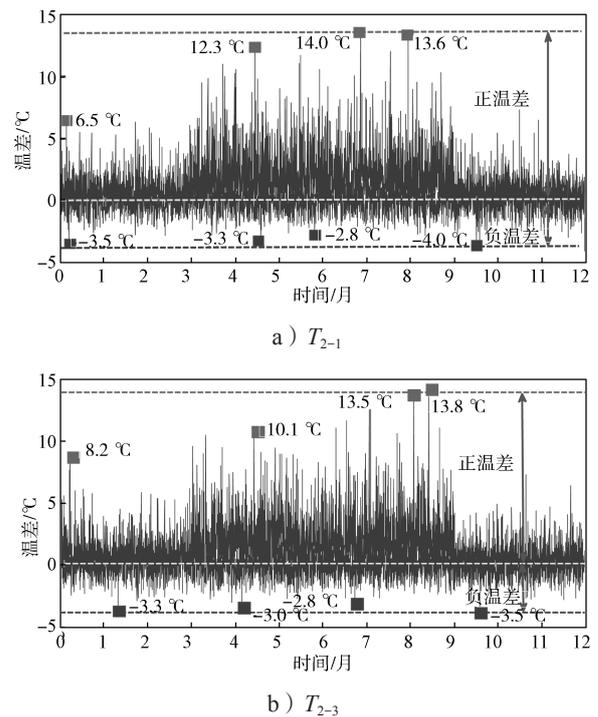


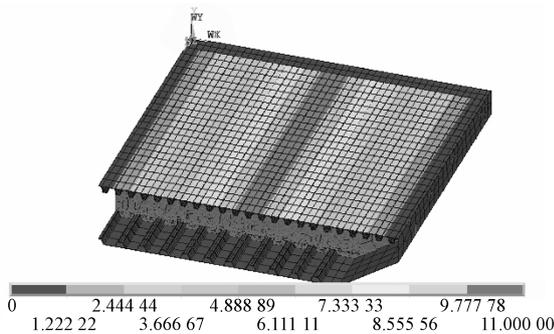
图9 正交异性板横向温度梯度变化曲线

Fig. 9 Measured transverse temperature gradient curves of OSD

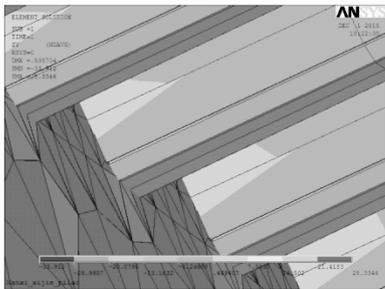
由图9a可知，夏季的钢箱梁的整体横向温差明显要高于其他季节。对于 T_{2-1} ，4个季节的横向正温差极值分别为12.3, 14.0, 13.6, 6.5℃；负温差在4个季节变化较小，负温差极值分别为-3.5, -3.3, -2.8, 4.0℃。由图9b可知， T_{2-3} 在4个季节的横向正温差极值分别为10.1, 13.5, 13.8, 8.2℃。最小负温差值为-3.5℃。

4.2 温度梯度应力计算

在 ANSYS 有限元平台计算温度梯度的效应有两种方法: 第一种方法是在不知结构温度场分布的情况下, 基于热传导的基本原理, 在有限元中输入日辐射强度参数、辐射角度参数以及其他的边界参数先求解结构的温度场, 然后计算结构的应力效应。第二种计算方法是已测得结构的温度场数据的情况下, 可以将温度荷载模拟成体荷载分别对 shell63 壳单元的 8 个节点进行温度输入。为校验计算模型的精准性, 输入与文献 [15] 相同的温度梯度进行对比计算。温度梯度有限元加载模型如图 10 所示。在横向温差作用下, 结构最大的拉应力为 28 MPa (文献 [15] 为 24 MPa), 应力分布形式相似 (见图 10b)。表明计算模型的准确性。



a) 桥面横向温度梯度加载模型



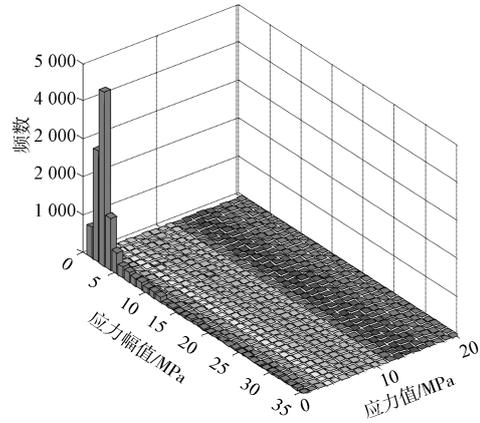
b) 关注点温度梯度细节应力

图 10 顶板横向温度梯度荷载模型和应力效应

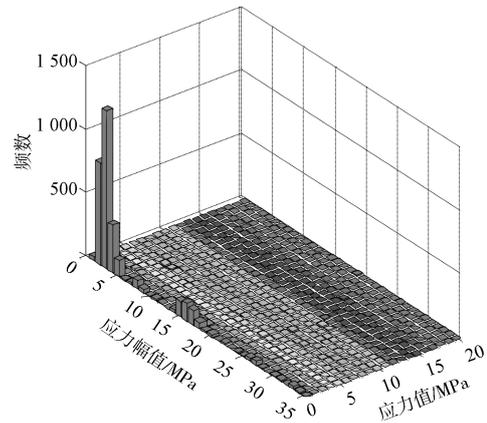
Fig. 10 Lateral temperature gradient load model with its stress effect

根据温差统计数据与有限元计算分析, 采用雨流计数法得到的温度梯度疲劳应力谱, 如图 11 所示。由图中可知, 钢箱梁横向温差作用下关注点年温差应力谱的平均疲劳应力幅值为 7.8 MPa, 最大应力幅值为 19.5 MPa。横隔板竖向温差作用下, 关注点平均疲劳应力幅值为 12.1 MPa, 最大应力幅值为 28.3 MPa。横隔板竖向温差效应明显大于顶板的横向温差效应。值得说明的是, 本文将关注点温差应力分析分割为横向顶板温差效应和横隔板竖向温差效应两类

计算。事实上, 关注点温差疲劳应力谱为两种温差的耦合作用下的应力时程曲线, 实际疲劳应力幅值应明显高于本文计算结果。



a) 顶板横向温差作用下细节点 1



b) 横隔板竖向温差作用下细节点 22

图 11 温度梯度作用下两类细节疲劳应力谱

Fig. 11 Fatigue stress spectrum of two kinds of details under temperature difference loading

5 疲劳损伤分析

欧洲 Eurocode 规范给出了大多数正交异性板的焊接细节的疲劳强度参考曲线, 能够满足工程应用要求^[16]。查规范可知, 将 U 肋-顶板焊接细节类型为 50, U 肋对接焊接细节类型为 71。欧洲 Eurocode 规范的疲劳强度曲线表达式进一步简化成以下形式:

$$\begin{cases} N \cdot S^3 = K_C & (0 < N \leq 5 \times 10^6), \\ N \cdot S^5 = K_D & (5 \times 10^6 < N \leq 10^8). \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 中: S 为疲劳应力幅; N 为与 S 对应的疲劳寿命; K_C 和 K_D 分别为低周期和高周期疲劳强度系数, K_C 和 K_D 的表达式如下:

$$\begin{cases} K_C = S_C^3 \cdot 2 \times 10^6 \quad (0 < N \leq 5 \times 10^6), \\ K_D = S_D^3 \cdot 5 \times 10^6 \quad (5 \times 10^6 < N \leq 10^8). \end{cases} \quad (6)$$

本文研究对细节类型按照 Eurocode 规范为类型 H 和 M, 依据 Eurocode 规范, U 肋-顶板细节疲劳强度系数 K_C 和 K_D 分别取 7.16×10^{11} 和 1.90×10^{15} 。U 肋-U 肋对接细节 K_C 和 K_D 分别取 2.50×10^{11} 和 3.17×10^{15} 。

假设结构细节点经历了总次数为 n 的循环应力 S , 其中 $S > S_D$ 的应力循环数为 n_i 个, 对应的应力变量为 S_i , $S \leq S_D$ 的应力循环数为 n_j 个, 对应的应力变量为 S_j 。 S_D 为高周期疲劳和低周期疲劳应力的界限值。依据 Miner 线性损伤准则可推断结构细节疲劳损伤计算表达式为

$$D = \sum_{S > S_D} \frac{n_i S_i^3}{K_C} + \sum_{S \leq S_D} \frac{n_j S_j^5}{K_D} \quad (7)$$

式 (7) 计算变应力幅值作用下细节的疲劳损伤, 在实际工程中, 往往应力幅有较多的等级, 计算疲劳损伤的计算量大, 需要进行一步简化计算步骤, 假设有 n 个常幅应力 S_{eq} 对结构造成的疲劳损伤与式 (7) 相等, 当常幅应力 $S_{eq} < S_D$ 时, 则有:

$$\frac{n S_{eq}^5}{K_D} = \sum_{S > S_D} \frac{n_i S_i^3}{K_C} + \sum_{S \leq S_D} \frac{n_j S_j^5}{K_C} \quad (8)$$

可得到 S_{eq} 的表达式为

$$S_{eq} = \left(\frac{\sum_{\Delta\sigma > \Delta\sigma_D} \frac{n_i S_i^3}{K_C} + \sum_{\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_D} \frac{n_j S_j^5}{K_C}}{n / K_D} \right)^{1/5} \quad (9)$$

当常幅应力 $S_{eq} \geq S_D$ 时, 则 S_{eq} 的表达式为

$$S_{eq} = \left(\frac{\sum_{\Delta\sigma > \Delta\sigma_D} \frac{n_i S_i^3}{K_C} + \sum_{\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_D} \frac{n_j S_j^5}{K_C}}{n / K_C} \right)^{1/3} \quad (10)$$

$$n = n_i + n_j \quad (11)$$

车辆与温度耦合作用以及温度梯度作用对细节点的应力峰值影响较大。在对正交异性板结构细节疲劳损伤计算时, 需要把温度参数考虑在内。在 ANSYS 有限元平台分别计算 6 种标准车辆作用下, 铺装层温度与细节等效应力幅可以采用如下线性回归方程表示^[17]:

$$S_{eq} = c_j T + d_j \quad (12)$$

式中 c_j 和 d_j 为线性方程式的系数。

6 类典型车型作用下细节的疲劳应力幅具体参数见表 2。

表 2 典型疲劳标准车辆作用下细节点应力与温度线性回归关系式参数

Table 2 Parameters of linear equation between temperature with vehicle loads

车型	细节 1		细节 2	
	c_j	d_j	c_j	d_j
C2	0.72	6.10	0.09	15.00
C3 (1)	0.79	9.30	0.12	16.60
C3 (2)	0.82	7.451	0.09	15.70
C4	0.85	9.14	0.14	17.50
C5	0.80	8.67	0.15	20.12
C6	0.88	12.50	0.20	21.48

基于 WIM 系统和温度传感器监测系统的车辆荷载、沥青铺装层温度和主梁温度监测数据, 在有限元平台将疲劳荷载数据转换为细节点应力数据, 并通过雨流计数法对应力输出数据进行处理, 得到正交异性钢箱梁结构两类细节点的日应力循环数 N_d 和日等效应力幅 S_{eq} , 如图 12 所示。

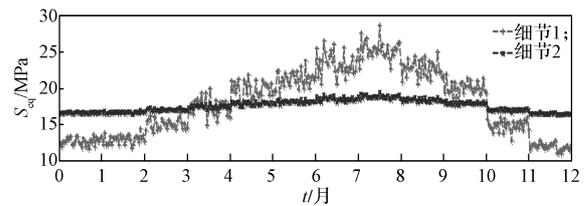


图 12 两类细节点日等效应力幅时变曲线

Fig. 12 Daily equivalent stress range curves for two details

由图 12 可知, 细节 1 的等效应力值变化较大, 等效应力幅在 8 月份最大, 8 月份的平均应力幅值是 12 月份的 1.92 倍。造成夏季钢箱梁焊接细节等效应力幅值明显大于其他季节的原因是夏季平均温度高于其他季节, 沥青混凝土的弹性模量变小, 传递和分散局部荷载的能力下降, 使得与沥青混凝土面层距离较近的细节点 1 的应力变大。细节 2 处于 U 肋底部, 距离铺装层相对较远, 局部荷载通过顶板传递到 U 肋底部的过程中, U 肋通过弯曲变形承受荷载, 细节 2 的受局部荷载影响较小, 故其应力幅值变化范围较小。

图 13 所示为两类细节点日等效应力幅循环数时变曲线图。

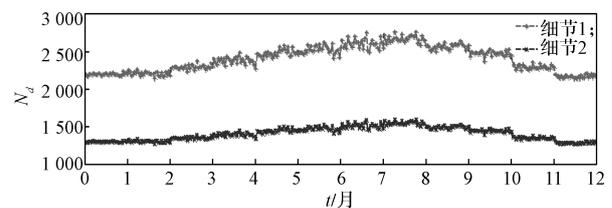


图 13 两类细节点日等效应力幅循环数时变曲线

Fig. 13 Daily stress range number curves for two details

由图 13 可知, 等效应力幅循环次数受季节影响相对较小, 夏季 N_d 的平均值仍大于其他季节。根据 WIM 系统对交通统计数据可知, 日交通量相对稳定, 夏季的车流量与其他季节相当, 故交通量的变化不是影响 N_d 值的关键因素。沥青面层的温度仍是决定 N_d 的关键变量。铺装层温度的升高使得细节 1 的疲劳荷载效应变大, 大量的低于 Eurocode 规范的疲劳极限应力门槛的应力幅“越界”到“门槛”内, 从而增加了疲劳应力幅值循环数。

表 3 列出了 12 个月份正交异性板两类细节节点的日应力幅、日应力循环次数和疲劳损伤均值。

表 3 两类细节月 S_{eq} 、 N_d 和 D 均值统计表

Table 3 Monthly mean value data of S_{eq} , N_d and D for two details

月份	S_{eq}/MPa		$N_d/10^3$		$D/10^{-7}$	
	细节 1	细节 2	细节 1	细节 2	细节 1	细节 2
1	12.7	16.6	2.19	1.31	3.86	5.26
2	13.0	16.7	2.21	1.30	4.31	5.35
3	15.0	17.1	2.29	1.35	9.52	6.19
4	17.4	17.5	2.38	1.40	21.2	7.23
5	19.8	17.9	2.48	1.45	40.1	8.44
6	21.2	18.1	2.53	1.48	58.9	9.18
7	23.4	18.5	2.61	1.52	100	10.5
8	25.2	18.9	2.67	1.55	147	11.7
9	22.6	18.4	2.56	1.50	82.4	9.98
10	20.0	17.9	2.47	1.45	42.7	8.51
11	14.8	17.0	2.29	1.36	8.91	6.13
12	11.9	16.5	2.17	1.29	2.82	5.00

图 14 为两类细节的日疲劳损伤对比图。

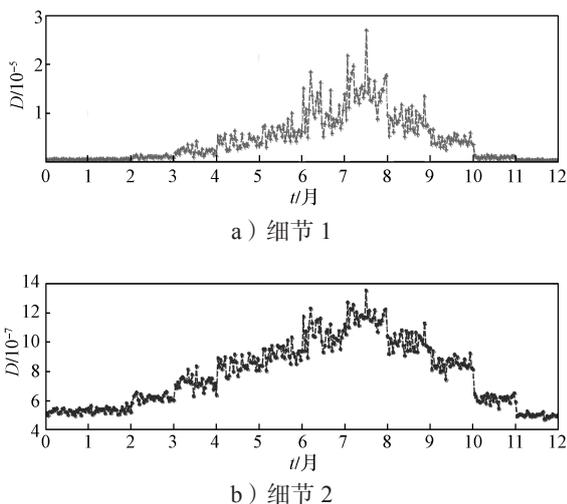


图 14 两类细节节点日疲劳损伤时变曲线

Fig.14 Daily fatigue damage curves for two details

对于细节 1 的日最大疲劳损伤值与最小损伤值相差了近两个数量级。应力幅值的增大会使得材料的疲劳损伤呈现指数倍数增长^[18], 等效应力幅值的不同是造成日疲劳损伤相差甚大的主要原因。

6 疲劳寿命预测

6.1 温度对疲劳寿命的影响

假设该桥的车流量每年保持不变, 第 d 日的日应力循环数为 N_d , 则该桥梁服役 m a 后, 两类细节的疲劳损伤值为

$$D = \sum_{d=1}^{365} N_d \cdot m \frac{S_{eq}^5}{K_D} \quad (13)$$

当 $D=1$ 时, 细节点疲劳失效。

假设年交通荷载量和环境温度总值不变, 依据表 4 和式 (13), 对两类细节进行疲劳损伤预测。图 15 给出了两类细节的疲劳损伤发展曲线。

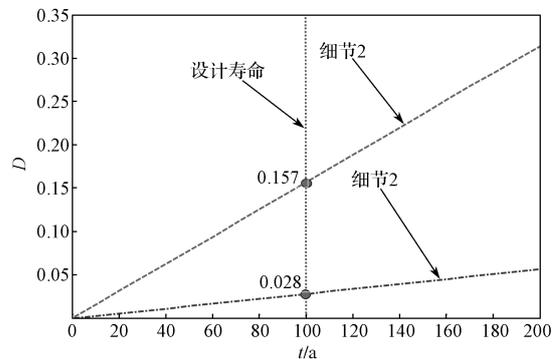


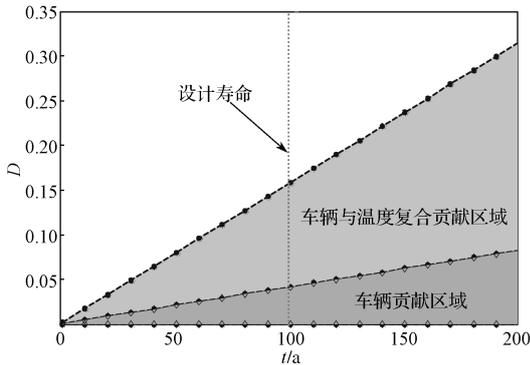
图 15 两类细节疲劳损伤发展曲线

Fig.15 Fatigue damage curve line of two details

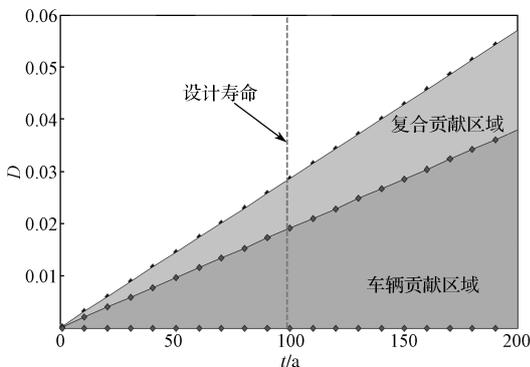
从图 15 可以看出, 细节 1 的损伤发展速率明显高于细节 2。两类细节在设计期内均没有发生疲劳失效, 当桥梁服役 100 a 时, 两类细节的疲劳损伤值分别为 0.157 和 0.028。细节 1 和细节 2 的疲劳预测寿命分别为 636 a 和 3 521 a。

图 15 中细节点疲劳损伤的线性累计是由车辆荷载、沥青温度以及钢箱梁温度梯度 3 类荷载共同作用而成。各类型荷载对结构的疲劳损伤的贡献率需要进行讨论分析。现假设钢箱梁沥青混凝土铺装层的温度保持在 20 °C 不变, 即有限元模型中沥青混凝土铺装层的弹性模量为恒值。同时不考虑钢箱梁温度梯度疲劳荷载的作用, 计算仅车辆荷载作用下钢桥面板节点的疲劳损伤发展曲线。图 16 为车辆荷载与温度对两类细节疲劳损伤贡献区域对比图。由图 16a 可知, 考虑与不考虑车-温度荷载耦合作用, 桥梁服役 100 a 后主梁细节 1 疲劳损伤计算值相差 5.06 倍, 车辆和温度耦合作用下细节疲劳损伤的区域面积远大于车辆荷载的贡献区域, 细节 1 的疲劳损伤对温度敏感性较高。由图 16b 可知, 桥梁达到设计寿命值时, 考虑与不考虑车-温度荷载耦合作用细节 2 的疲劳损伤值相差 1.50 倍。车辆荷载贡献区域要大于两类荷载耦合作用贡献区域, 表明细节 2 疲劳损伤对温度敏感

性较弱。



a) 细节 1 疲劳损伤车辆与温度荷载贡献区域图



b) 细节 2 疲劳损伤车辆与温度荷载贡献区域图

图 16 两类细节疲劳损伤贡献率对比图

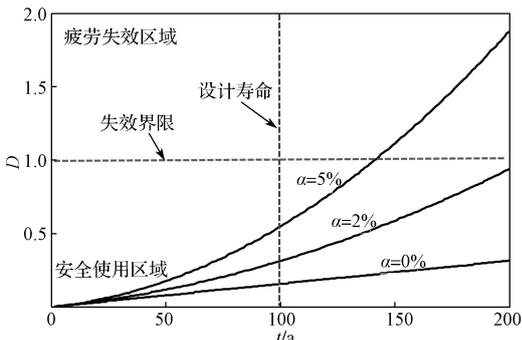
Fig.16 Fatigue damage contribution rate of two details

6.2 交通增长率对疲劳寿命的影响

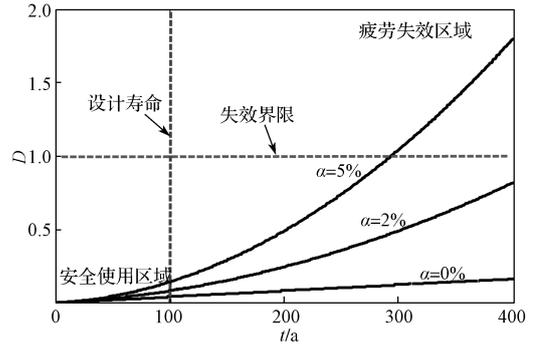
随着我国交通运输业的不断发展，车流量也会随之增长。但因桥梁宽度一定，交通量增长速度不会无限制的呈现非线性增长，本文假设每年交通量的增长是线性的，增长率系数为 α ，则桥梁运营 m a 后，正交异性板细节疲劳损伤表达式为

$$D = \sum_{d=1}^{365} N_d \cdot \frac{S_{eq}^5}{K_D} \cdot m \left(1 + \frac{(m-1)\alpha}{2} \right) \quad (14)$$

图 17 给出了两类细节在不同交通增长率下疲劳损伤发展曲线。



a) 细节 1



b) 细节 2

图 17 不同交通增长率两类细节的疲劳损伤演化曲线

Fig.17 Fatigue damage evolution curves of two kinds of details with different traffic growth rates

由图 17 可知，当交通增长率为 0%、2%、5% 时，两类细节在设计使用寿命范围内均不出现疲劳失效。其中细节 1 的疲劳寿命分别为 636、452、143 a。

7 结论

本文基于南溪长江大桥健康监测系统中 WIM 系统和温度传感器监测数据，建立一套考虑车辆-温度荷载耦合作用下钢桥面板焊接细节疲劳寿命评估方法，得到以下结论：

1) 在车辆荷载不变的情况下，沥青铺装层温度与等效应力幅呈现线性关系式。对距离铺装层近的细节点（细节点 1），车辆-温度荷载耦合放大应力效应影响明显。对于距离铺装层较远的细节点（细节点 2），影响较小。

2) 结构本身的温度梯度的变化产生的温度次应力大小与车辆荷载效应大小相当。对细节的疲劳损伤具有叠加累积的效果。但受限于温度梯度应力幅次数相对较小，在疲劳累计损伤中贡献小。

3) 南溪长江大桥主梁钢桥面板的焊接细节疲劳损伤的主要贡献时间为夏季。在钢桥疲劳设计时，要将环境温度效应考虑在内。温度梯度疲劳荷载谱的循环次数明显较车辆荷载小，在两者耦合作用中，车辆荷载对疲劳损伤的贡献值占据主要地位。

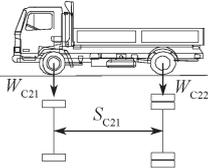
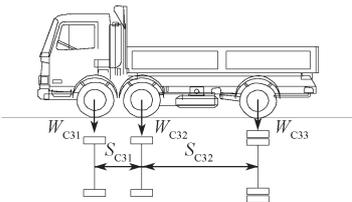
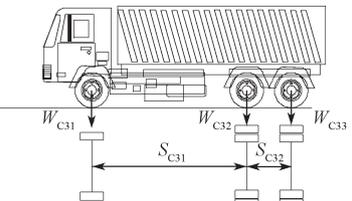
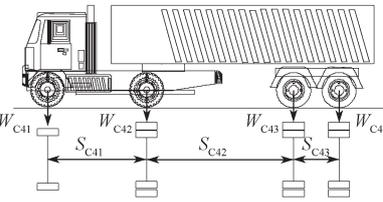
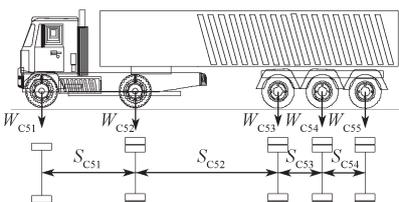
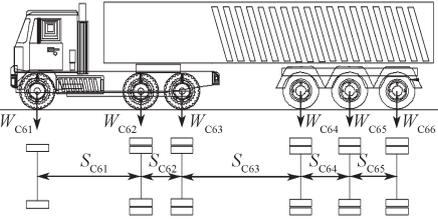
参考文献：

[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.
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.

- [2] 刘 扬, 张海萍, 鲁乃唯, 等. 基于 WIM 的随机车流建模和简支梁桥荷载效应研究 [J]. 桥梁建设, 2015, 45(5): 13-18.
LIU Yang, ZHANG Haiping, LU Naiwei, et al. Study of Random Vehicle Flow Modeling and Load Effect of Simply-Supported Beam Bridge Based on WIM Data[J]. Bridge Construction, 2015, 45(5): 13-18.
- [3] 邓 扬, 刘 扬, 李爱群. 局部构造对钢箱梁关键焊缝疲劳性能的影响分析 [J]. 桥梁建设, 2014, 44(2): 43-49.
DENG Yang, LIU Yang, LI Aiqun. Analysis of Effect of Local Structure on Fatigue Performance of Critical Welding Seams of Steel Box Girder[J]. Bridge Construction, 2014, 44(2): 43-49.
- [4] GUO T, LI A Q, WANG H. Influence of Ambient Temperature on the Fatigue Damage of Welded Bridge Decks[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(6): 1092-1102.
- [5] GUO T, LI A Q, LI J H. Fatigue Life Prediction of Welded Joints in Orthotropic Steel Decks Considering Temperature Effect and Increasing Traffic Flow[J]. Structural Health Monitoring, 2008, 7(3): 189-202.
- [6] LIU Y, ZHANG H P, LIU Y M, et al. Fatigue Reliability Assessment for Orthotropic Steel Deck Details Under Traffic Flow and Temperature Loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 71: 179-194.
- [7] LIU Y, ZHANG H P, LI D R, et al. Fatigue Reliability Assessment for Orthotropic Steel Deck Details Using Copulas: Application to Nan-Xi Yangtze River Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(1): 04017123.
- [8] 缪长青, 史长华. 大跨悬索桥扁平钢箱梁温度梯度与温度影响研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(10): 1155-1164.
MIAO Changqing, SHI Changhua. Temperature Gradient and Its Effect on Flat Steel Box Girder of Long-Span Suspension Bridge[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2013, 43(10): 1155-1164.
- [9] 刘 扬, 张海萍, 邓 扬, 等. 公路桥梁车辆荷载建模方法及疲劳寿命评估 [J]. 应用力学学报, 2016, 33(4): 652-658, 740.
LIU Yang, ZHANG Haiping, DENG Yang, et al. Research on Probabilistic Model of Highway Vehicle Loads and Fatigue Life Assessment of Highway Bridges[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(4): 652-658, 740.
- [10] HASHIN Z. A Reinterpretation of the Palmgren-Miner Rule for Fatigue Life Prediction[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2): 324-328.
- [11] WANG T, HAN W S, YANG F, et al. Wind-Vehicle-Bridge Coupled Vibration Analysis Based on Random Traffic Flow Simulation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2014, 1(4): 293-308.
- [12] GUO T, FRANGOPOL D M, CHEN Y W. Fatigue Reliability Assessment of Steel Bridge Details Integrating Weigh-in-Motion Data and Probabilistic Finite Element Analysis[J]. Computers & Structures, 2012, 112/113: 245-257.
- [13] PCS L. LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements Operational Field Guide-Lines: Version 3.1, Measurement[R]. [S.l.]: Department of Transportation Ederal Highway Administration, 2000: 1-56.
- [14] MIRAMBELL E, AGUADO A. Temperature and Stress Distributions in Concrete Box Girder Bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(9): 2388-2409.
- [15] MIAO C Q, SHI C H. Temperature Gradient and Its Effect on Flat Steel Box Girder of Long-Span Suspension Bridge[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1929-1939.
- [16] TAYLOR J C. EN1993 Eurocode 3: Design of Steel Structures[J]. Civil Engineering, 2001, 144(6): 29-32.
- [17] 张海萍, 刘 扬, 邓 扬, 等. 基于实测数据的扁平钢箱温度梯度疲劳应力谱分析方法 [J]. 计算力学学报, 2017, 34(4): 466-473.
ZHANG Haiping, LIU Yang, DENG Yang, et al. A Calculation Method of Thermal Fatigue Stress Spectrum for Flat Steel Girder Box Based on Measurement Data[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 34(4): 466-473.
- [18] 刘 扬, 张海萍, 邓 扬, 等. 考虑车辆超载的公路简支梁桥疲劳性能 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2015, 49(11): 2172-2178.
LIU Yang, ZHANG Haiping, DENG Yang, et al. Fatigue Damage Analysis on Simple Supported Bridge Under Overloading[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(11): 2172-2178.

(责任编辑: 申 剑)

附表1 6类标准车辆的疲劳荷载模型
Table 1 Fatigue-loaded vehicle models

车辆类型	车型示意图	车辆占有率	变量	统计值
C2		0.53	W_{C21} W_{C22} S_{C21}	44.9 92.0 5.0
C3 (1)		0.05	W_{C31} W_{C32} W_{C33} S_{C31} S_{C32}	76.6 76.6 199.3 1.9 5.3
C3 (2)		0.03	W_{C31} W_{C32} W_{C33} S_{C31} S_{C32}	84.1 113.8 113.8 4.8 1.4
C4		0.2	W_{C41} W_{C42} W_{C43} W_{C44} S_{C41} S_{C42} S_{C43}	75.7 83.3 151.6 151.6 3.8 8.6 1.3
C5		0.01	W_{C51} W_{C52} W_{C53} W_{C54} W_{C55} S_{C51} S_{C52} S_{C53} S_{C54}	82.8 140.5 97.8 97.8 97.8 3.6 6.8 1.3 1.3
C6		0.18	W_{C61} W_{C62} W_{C63} W_{C64} W_{C65} W_{C66} S_{C61} S_{C62} S_{C63} S_{C64} S_{C65}	76.4 102.8 102.8 113.1 113.1 113.1 1.7 2.7 7.3 1.3 1.3

注：轴重单位为 kN，轴距单位为 m。