

## 考虑环境变温作用的大跨桥梁疲劳损伤分析\*

王莹<sup>1,2</sup>, 李兆霞<sup>1,2†</sup>, 缪海萍<sup>1,2</sup>

(1.东南大学 土木工程学院,江苏 南京 210096;2.江苏省工程力学分析重点实验室,江苏 南京 210096)

**摘要:**基于桥梁健康监测记录的温度时程数据,研究钢箱梁顶板、底板的温度变化特征和规律,利用间接耦合法将热分析的温度数据作为体荷载施加于结构多尺度有限元模型,获得了环境变温引起的结构应力,实现了从热分析到结构应力的分析.然后,利用健康监测记录应变时程数据,考察车辆荷载和环境变温所引起的应变特征的差异,提取和分离出由环境变温和车辆荷载引起的应变时程,并与模拟得到的应力时程加以对比和相互验证,在此基础上利用连续介质损伤力学理论分析车辆荷载单独作用以及车辆和环境变温交互作用所引起的桥梁累积损伤.结果表明:提出的损伤分析流程可实现桥梁关键部位在考虑环境变温和车辆荷载两种因素作用下的损伤分析.环境变温单独作用所引起的疲劳损伤很小,基本可以忽略,但两者交互作用所引起的结构疲劳损伤相对于车辆单独作用下的损伤有显著差异.在服役初期环境变温的作用并不显著,随着疲劳损伤的不断积累,这种交互作用对结构疲劳损伤累积的影响会愈发明显,即环境温度变化引起的荷载会加速结构服役中后期疲劳损伤的累积速率,进而对结构疲劳寿命产生显著影响.

**关键词:**大跨桥梁;环境变温;疲劳损伤;应力时程效应;有限元分析

**中图分类号:**U441.4

**文献标志码:**A

## Analysis on Fatigue Damage of Long-span Bridges Considering Effect of Environment Varying-temperature

WANG Ying<sup>1,2</sup>, LI Zhaoxia<sup>1,2†</sup>, MIAO Haiping<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Based on temperature-history data recorded by structural health monitoring system (SHMS) installed on long-span bridge, the characteristics of the temperature in the top deck and bottom deck of the steel box girder was studied. According to the indirect coupling method, temperature was regarded as body load and applied to three-dimensional multi-scale finite element (FE) model. Structural stress induced by temperature can be obtained and the analysis from thermal to the structure was realized. And then, based on the strain data from SHMS, the difference of strain characteristics induced individually by vehicle loads and environment temperature were investigated. Strain histories caused by the above factors were separated and extracted, and they were compared with the results by the FE simulation. Finally, based on the contin-

\* 收稿日期:2017-01-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008069, 11072060, 51678135), National Natural Science Foundation of China(51008069, 11072060, 51678135); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3205007205), Fundamental Research Funds for the Central Universities(3205007205)

作者简介:王莹(1980—),女,江苏滨海人,东南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: zhxli@seu.edu.cn

uum damage mechanics, the cumulative fatigue damage of the bridge was induced by vehicle load separately as well as the interaction of vehicle load and environment temperature. The results show that the analysis flow of fatigue damage proposed in this paper can realize fatigue damage analysis at key locations of bridge under the action of environmental temperature and vehicle load. Fatigue damage caused by the temperature alone is small and can be ignored. But the fatigue damage caused by the interaction of these two loads has significant difference with that caused by the vehicle alone. At the beginning of the service periods, the influence of temperature on damage is not significant, but with the increase of fatigue damage, the influence of the interaction of these two loads becomes more prominent. That indicates that loads induced by temperature change accelerate the rate of fatigue damage accumulation at the mid-late service periods, and have a significant impact on the structure fatigue life.

**Key words:** long-span bridge; varying-temperature; fatigue damage; stress history effects; finite element analysis

在役大跨桥梁直接承受正常运营荷载(包括车辆荷载、环境变温荷载)以及突发荷载(包括强风、地震等)的作用,对其进行疲劳损伤分析的关键即是对服役荷载作用下结构疲劳损伤关键部位的识别及其动力响应的认知。目前,国内外很多学者开展了桥梁结构在交通荷载工况下的结构动力响应的研究<sup>[1-5]</sup>,但是对多荷载交互作用下结构动力响应以及各种荷载对结构疲劳损伤的贡献的研究尚不成熟。

在正常运营环境下,桥梁局部细节处的疲劳损伤是由通行车辆和环境变温共同引起的。目前,对这两类荷载共同作用所引起的疲劳损伤累积的规律和特性的研究较少。作者<sup>[6]</sup>前期在基于结构健康监测系统(structural health monitoring system, SHMS)的应变数据进行桥梁疲劳损伤分析时,认为温度变化引起的应变趋势项变化缓慢,在损伤评估中将其剔除。Wu 等<sup>[7]</sup>对健康监测数据中不同荷载的响应信息进行了分离,认为加入变温荷载引起的结构应力时程仅相当于增加了应力幅的大小,对应于变温荷载的应力时程的循环次数远小于交通荷载引起的应力循环,对桥梁的疲劳损伤影响不大。但实际上,通过对长期监测数据的研究<sup>[8-9]</sup>表明:月平均温度不同的月份,正常运营环境下桥面板焊接细节处的疲劳损伤增量不同,两者呈现出近似线性的关系,且较高的温度会对车辆荷载引起的疲劳损伤存在放大作用。因此,环境温度变化引起的应力时程亦是影响结构疲劳损伤的重要荷载因素,定量的影响程度和规律需要进一步探索。

除了借助于结构健康监测系统实测的应变和温度数据来分析结构的疲劳损伤之外,目前大型有限元软件的日趋完善为桥梁结构动力响应和损伤

累积的分析提供了有利工具。利用面向损伤评估的结构多尺度模拟方法<sup>[10-11]</sup>,可获得易损构件在各种荷载作用下的结构动力响应。对于交通荷载,一般是通过对交通状态的调查统计<sup>[12]</sup>,或借助动态称重系统(Weight-in-motion, WIM)<sup>[13]</sup>来得到荷载谱的数据,随后将该荷载谱施加于多尺度有限元模型,考虑车辆荷载所引起的疲劳损伤。对于环境温度对结构的影响也开展了一系列的数值模拟研究<sup>[14-15]</sup>。但是,将健康监测系统的实测数据与结构多尺度有限元模拟相结合来研究车辆和环境变温的交互作用以及单个荷载工况对结构疲劳损伤影响的论文尚不多见。

本文首先基于桥梁健康监测系统温度传感器记录的温度时程数据,研究钢箱梁顶板、底板的温度变化特征和规律,利用间接耦合方法将用于热分析的温度数据作为体力荷载施加于桥梁的多尺度有限元模型,获得了温度变化所引起的结构应力,实现了从热分析到结构分析的计算。然后,利用安装在大跨桥梁上的健康监测系统记录的应变时程数据,考察车辆荷载和环境变温所引起的应变特征的差异,提取和分离出由环境变温和车辆荷载引起的应变时程,并与有限元模拟得到的应力时程进行对比,在此基础上利用连续介质力学理论分析车辆荷载单独作用和两者共同作用下桥梁的累积损伤值。最后,考虑交通流量增长和气候变暖所造成的环境温度的变化,对桥梁未来运营状态下的疲劳损伤累积进行分析。

## 1 环境变温荷载的模拟方法

大跨钢桥在热辐射、气候变化等因素共同影响

下,结构各部件的温度可能发生变化.刚度差异较大的构件(主缆、吊索、加劲梁等)组成的高次超静定结构,使得结构变形表现为显著的几何非线性.由于钢材导热性能好,对环境温度变化相当敏感,在某些情况下,温度变化引起的结构内力可与恒载和活载引起的内力相比较,亦可能导致结构破坏.

为了研究环境温度变化对桥梁结构的影响,确定合理的温度场是进行结构响应分析的前提和关键.钢箱梁由于温度变化引起的变形主要受结构有效温度变化和截面温度梯度两个因素影响.研究主梁温度场分布时忽略纵向的热流,认为各截面具有相同的温度场分布形式,因此选取由腹板、翼缘板组成的单位长度的典型主梁段作为研究对象即可,这样钢箱梁的温度场成为二维热传导问题.忽略钢板厚度方向的热流动,截面的热流动主要取决于热传导,钢板表面与外界环境通过对流与辐射进行热交换.截面的热传导可用式(1)表示.

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1)$$

式中:  $T$  为  $t$  时刻坐标  $(x, y)$  处的温度;  $Q$  为单位体积内产生的热量;  $k$  为热传导系数;  $c$  为比热容;  $\rho$  为密度.

考虑来自与周围环境之间的对流和辐射热交换及太阳辐射的热流,设置式(2)的边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q + h(T_s - T_a). \quad (2)$$

式中:  $n$  为表面的法线方向;  $q$  为热通量,取  $q = \alpha I$ ,  $\alpha$  为太阳辐射吸收率,  $I$  为太阳直接辐射、散射和地面反射强度的总和;  $h$  为热对流交换系数;  $T_a$  为周围空气温度;  $T_s$  为结构表面温度.

在已知初始温度值时,结合式(2)给出的边界条件,可用有限元法求解偏微分方程式(1),进而可获得结构的温度分布形式.基于商用有限元软件的钢箱梁温度场求解一般是根据上述原理获得的.但是上述求解的前提是其中的热力学参数  $\alpha$ 、 $I$ 、 $h$ 、 $T_a$ 、 $T_s$  等已知,但实际上  $I$ 、 $h$  的具体值受服役环境的气象条件影响较大,在一天中是个变值,这给结构响应的长期分析带来了困难.

结构健康监测系统实测的温度时程数据能够再现桥梁温度场的特征,反映钢箱梁的温度分布规律.通过对监测数据的统计、分析,并参照相关研究成果和经验公式,可得到钢箱梁温度场分布特征和时变特性,从而更加贴近桥梁的真实状态,因此,将

实测和统计的温度数据施加于结构模型来获得结构在变温荷载下的响应将是一种更为合理的环境变温的模拟方法.

## 2 考虑变温荷载效应的桥梁关键部位疲劳损伤流程

图1给出了一类具备健康监测系统的实测数据的大型桥梁在考虑环境变温影响时的任意关键部位疲劳损伤评估的流程.

首先,基于健康监测系统的实测应变数据,根据车辆荷载和温度荷载所引起的应变时程数据在时、频域内特征的差异,分离和提取出车辆荷载和温度荷载单独引起的应变时程.接着,基于健康监测系统的钢箱梁上布置的顶板、底板的温度时程,忽略主梁温度场沿着纵向的热流分布,仅仅考虑竖向的热流动,通过某种形式的分布函数来考虑竖向温度梯度分布,得到钢箱梁关键截面上各点的温度时程.然后将该温度荷载作为“体力”荷载施加到包含了整体结构、关键构件和关键焊接细部的多尺度有限元模型,研究环境变温引起的桥梁应力时程,将其与健康监测系统实测值进行比较,来验证数据的准确性.在此基础上,基于桥梁多尺度有限元模型,分别采用 Miner 定律和连续介质力学理论来考虑环境变温荷载、车辆荷载以及两者共同作用下的结构关键部位的疲劳损伤.最后,基于数据统计,考察未来车辆荷载和环境变温的变化规律,分析结构的疲劳损伤并诊断结构的失效周期,为结构的维修和养护提供参考.

## 3 算例

### 3.1 基于健康监测系统的温度传感器的实测信息分析温度所致应力时程

以润扬长江公路大桥北汊斜拉桥作为工程背景,首先基于结构健康监测系统来研究环境变温对结构关键构件疲劳损伤的影响.安装的健康监测系统(Structural Health Monitoring System, SHMS),包括加速度计(Acc)、应变计(Str)、温度传感器(T-V、T-Of)、位移计(Displ)和GPS等,另外还有车速车载感应系统和数据采集( $K_i$ ,  $i=1\sim 11$ )及处理系统.桥梁上布置的传感器类型及其位置大致如图2所示.

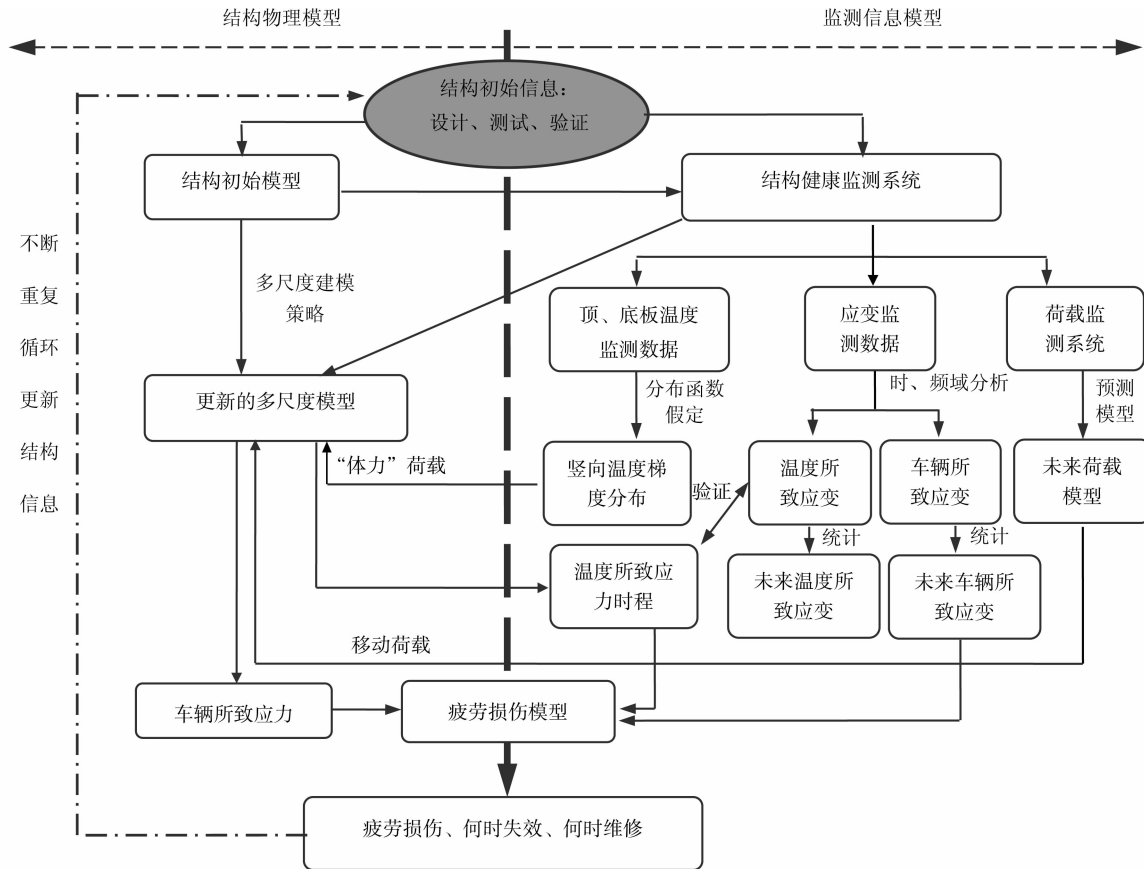


图 1 考虑变温荷载效应的桥梁任意关键部位的疲劳损伤流程图

Fig.1 Flow chart of fatigue damage analysis for key locations of bridge considering the effect of temperature changes

为了尽可能准确和全面地描述环境变温引起的全桥响应,需要选择合理的温度场来反映钢箱梁从顶板到底板的温度场的竖向梯度.健康监测系统的温度传感器为结构温度分布的确定提供了参考.润扬斜拉桥的健康监测系统在主梁 1/2 跨、7/8 跨 2 个截面布置了温度传感器,每个截面安装了如图 3 所示的 10 个温度传感器,编号为 C1~C10.

为了考虑桥梁竖向温度分布特征,分别取顶板 C1~C5 监测值的均值和底板 C6~C10 监测值的均值作为钢箱梁顶、底板的温度代表值.钢箱梁竖向温度梯度分布采用式(3)指数函数<sup>[16]</sup>的分布形式.

$$T_y = (T_2 - T_1)e^{-\alpha y} + T_1 \quad (3)$$

式中:  $T_1$ 、 $T_2$  分别为顶、底板温度值;  $\alpha$  为钢箱梁日照温度梯度计算参数,不同季节的取值不同;  $y$  为钢箱梁内任意一点到达相应截面顶板的竖向距离.

国内外大量实测资料<sup>[15]</sup>证实,大气温度可用正弦函数来模拟,各个时刻的大气温度可用式(4)表示.桥梁结构温度变化与大气温度之间具有“迟滞”效应,具体的“迟滞”时间因不同的结构而异.

$$T(t) = \frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min}) + \frac{1}{2}(T_{\max} - T_{\min}) \cdot$$



图 2 润扬斜拉桥健康监测系统的传感器类型及其位置

Fig.2 Types and locations of sensors installed on Runyang Cable-stayed Bridge

$$\sin \left[ (t - 9) \frac{\pi}{12} \right] \quad (4)$$

式中:  $t$  为时刻, h;  $T_{\max}$  为日最高气温, °C;  $T_{\min}$  为日最低气温, °C.

作者通过大量的统计分析发现,润扬斜拉桥钢箱梁温度与大气温度之间的“迟滞”时间取为 4 h,

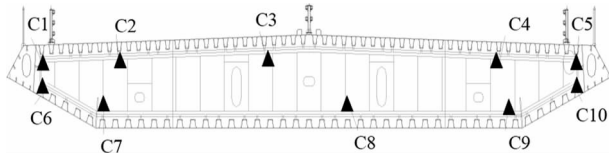


图3 润扬长江公路大桥北汊斜拉桥温度传感器布置图  
Fig.3 Layout of temperature sensors installed on Runyang Cable-stayed Bridge

两者最接近,相应的实测值与平移 4 h 后的正弦值如图 4 所示.

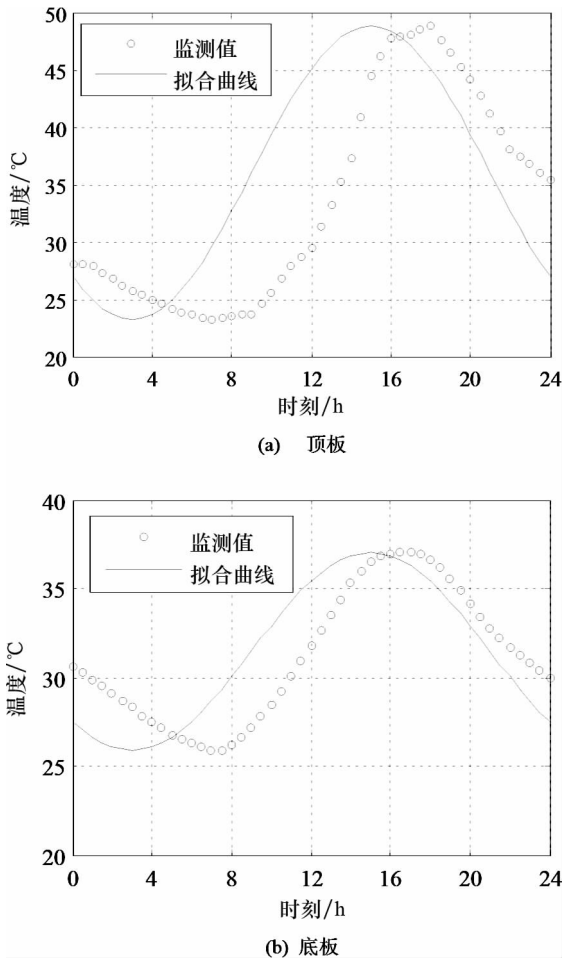


图4 润扬斜拉桥5月20日顶、底板温度时程的实测值和拟合曲线

Fig.4 Measured and fitted curves of temperature histories on top and bottom decks on May 20

采用子模型法建立结构多尺度有限元模型,这是一种将整体分析与局部精细分析相结合的方法,在不改变原有整体模型的前提下,灵活地对需要重点关注部位做进一步分析,进而实现整体结构与局部构件两者之间的衔接,极大地提高了计算效率.其基本步骤包括:1)不考虑局部细节,用较粗糙的网格进行整体结构分析,获得局部精细模型边界上的

响应;2)根据实际尺寸构造和研究目标,选择合理的单元和网格密度建立局部精细模型;3)利用线性插值法将步骤 1)中计算所得的响应值施加到局部精细子模型上相应的位置;4)在子模型上施加与整体模型上相同的荷载进行有限元分析.此方法基于圣维南原理,因此局部模型的边界必须远离需要关注的关键部位才能保证其响应的准确性.

根据前期研究成果<sup>[17]</sup>,桥梁跨中部分为应力影响线最大处,且特大型重车多行驶于慢车道,因此慢车道上应力较其他车道更高,所以建立了包含加劲肋的钢箱梁局部精细模型,以及更为精细的慢车道附近的焊缝模型.所建立的模型如图 5 所示.

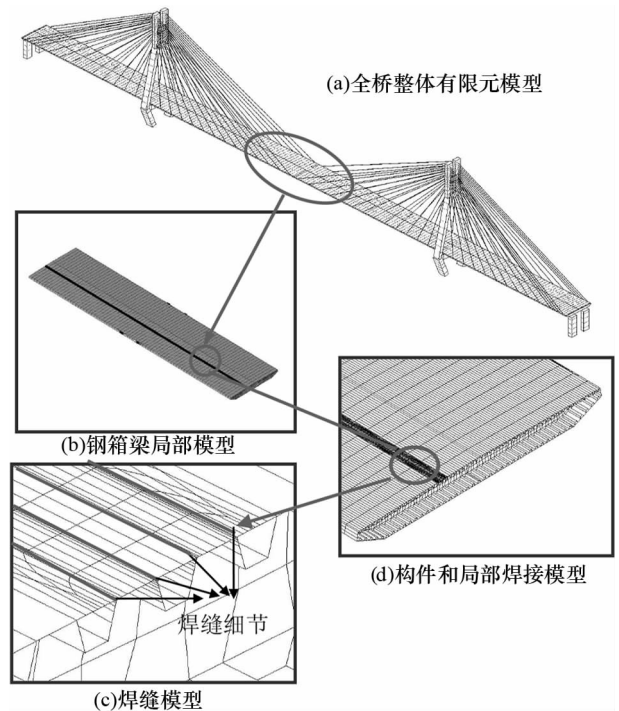


图5 包含整体结构、局部构件和焊接细节的多尺度模型

Fig.5 Multi-scale FE model include whole structure, local components and weld details

图 5(a)为建立的润扬桥整体模型,是经过简化、参数修正、动力特性验证等一系列工作后形成的;图 5(b)(c)是嵌入 U 型加劲肋的跨中结构细节模型,图 5(d)为钢箱梁慢车道附近的焊缝精细模型,可更真实地反映结构局部的损伤状态.为了实现桥梁结构局部疲劳损伤分析的研究目标,基于结构整体与局部的衔接方法对结构局部进行“二次分析”,计算在服役荷载作用下结构局部的应力时程.需注意的是,在计算过程中,结构承受的服役荷载的作用位置(如行车荷载)、大小(如变温荷载)随着时间的推移而变化,而每一次的变化都需要整体模

型和子模型上的荷载条件和边界条件均一致。

需要进一步说明的是,结构损伤累积一般发生在具有先天缺陷(包括微裂纹、微孔洞、夹杂等)的焊接构件的焊趾处,若要进行更为精确的应力分析,还需要在焊趾处进一步建立包含了微裂纹或微孔洞的模型,此处仅为了说明多尺度模型的建模过程,故仅对焊材和母材的弹性模量设置了不同值来反映其力学性能的差异.有关更为精细的裂纹模型的建立可参考文献[17].

对于桥梁所承受的交通荷载,英国规范 BS5400 最早给出了桥梁疲劳设计标准疲劳车模型及计算方法,其忽略总荷载小于 30 kN 的车辆对桥梁构件疲劳损伤的影响,采用总荷载为 320 kN 的 4 轴虚拟“标准疲劳车”来表征典型车辆标准荷载频值谱效应.对于影响线很短的构件,将典型车辆的各个轴重增大 1.1 倍作为其疲劳损伤计算的轴重荷载谱.考虑冲击力和离心力对标准荷载进行修正后,假设任意时刻每个分车道仅有一辆疲劳荷载车,车辆行驶的中心平均线位于慢车道和主车道中心线临近不超过 300 mm 的范围内.每天通过桥梁的荷载次数在 BS5400 中给出详细说明.将 4 轴的虚拟“标准疲劳车”作为移动荷载,通过设置荷载步来模拟车辆从上桥到下桥的整个过程,从而可获得桥梁多尺度模型上任意一个关键部位的应力时程.由于一共 8 个车轮,相应的应力时程可能为变应力幅,通过雨流计数法即可获得与该变应力幅等效的等应力幅值.需要说明的是,通过不同桥梁的荷载是不同的,更为精确的情况需要借助于桥梁健康监测系统实测的真实荷载谱作为移动荷载施加于结构多尺度有限元模型,才能获得结构更为准确的应力时程.

基于有限元软件 ANSYS,利用间接耦合方法实现由热分析到结构分析(温度引起的热膨胀),忽略结构到热的耦合,将热分析得到的节点温度作为“体力”荷载施加到后续的应力分析中来计算温度变化引起的结构应力.在两种不同的物理场计算时,采用不同的热分析和结构分析单元,其单元类型见表 1,其中涉及的材料参数数值见表 2.

表 1 桥梁有限元模型单元类型

Tab.1 Element type of FE model

桥梁部位	热单元	结构单元
钢箱梁(顶板、底板、腹板、横隔板)	Shell57	Shell63
纵向桁架、索塔、支墩	Link33	Beam4
拉索	Link33	Link10
质量块	Mass21	Mass71

表 2 材料物理参数

Tab.2 Mechanical parameters of different materials

材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模 量/GPa	泊松比	导热系数/ (W·(m· °C) <sup>-1</sup> )	热膨胀系 数/(10 <sup>-5</sup> ×°C <sup>-1</sup> )	比热/ (J·(kg· °C) <sup>-1</sup> )
混凝土	2 600	48.3	0.166 7	3.5	1.1	950
钢材	7 800	195~213	0.3	60.5	1.2	434

鉴于环境温度变化引起的应力具有显著的季节性,本文选取 2 月 20 日、5 月 20 日、8 月 20 日、11 月 20 日分别作为代表春、夏、秋、冬 4 个不同季节的典型日,计算不同环境变温下结构的应力时程,表 3 中列出了相应的应力幅和平均应力.可以看出:2 月、5 月、8 月的应力幅相差不大,11 月的应力幅最小,为 2.77 MPa;8 月 20 日的平均应力最高,其值为 18.29 MPa.

表 3 不同季节由环境温度变化引起的结构应力时程指标

Tab.3 Index of stress induced by temperature in different seasons

日期	平均应力/MPa	应力幅/MPa
2 月 20 日	10.50	7.40
5 月 20 日	16.15	7.50
8 月 20 日	18.29	6.24
11 月 20 日	14.70	2.77

图 6 中给出了桥梁 5 月 20 日在昼夜环境变温作用下的跨中区域结构总的应力云图及其关键节点的应力时程图.从图 6(a)所示的主梁跨中截面钢箱梁应力云图可看出,顶板由于受到阳光的直接照射,其应力幅值较大,达 22.5 MPa.图 6(b)为顶板慢车道上某个节点随着昼夜环境温度变化的温度时程,可看出应力幅和平均应力分别约为 6 MPa、17 MPa.此数据可与健康监测系统实测的应变时程数据比较来验证模型的准确性和数据的可信性.

### 3.2 环境变温对应力时程的影响

为了考察环境变温对结构疲劳损伤累积的影响,利用前期研究方法<sup>[6]</sup>将健康监测系统记录的原始应变时程进行分离,提取出由环境温度和车辆荷载分别引起的桥梁响应信息.图 7 所示为润扬斜拉桥三向应变花“YBH2-21”于 2013 年 5 月 20 日由健康监测系统实测的应变数据,“YBH2-21”位于桥梁跨中段的图 6 所示关键节点附近,因此其输出的时程数据见图 6(b)所示.图 7(a)为由原始数据中提取的环境温度时程数据,图 7(b)为由单独的环境变温所引起的应变时程,图 7(c)为剔除了环境温度时程后,主要由车辆荷载引起的应变时程数据.与图 6 比较后发现,图 7(b)所示的由环境变温引起的应力极

值出现的时间与图 6 中所示的温度到达极值的时间一致.应力幅和平均应力分别约为 6 MPa、17 MPa,应力幅值计算值略小于监测值,平均应力略大于监测值,但均在合理的误差范围内.

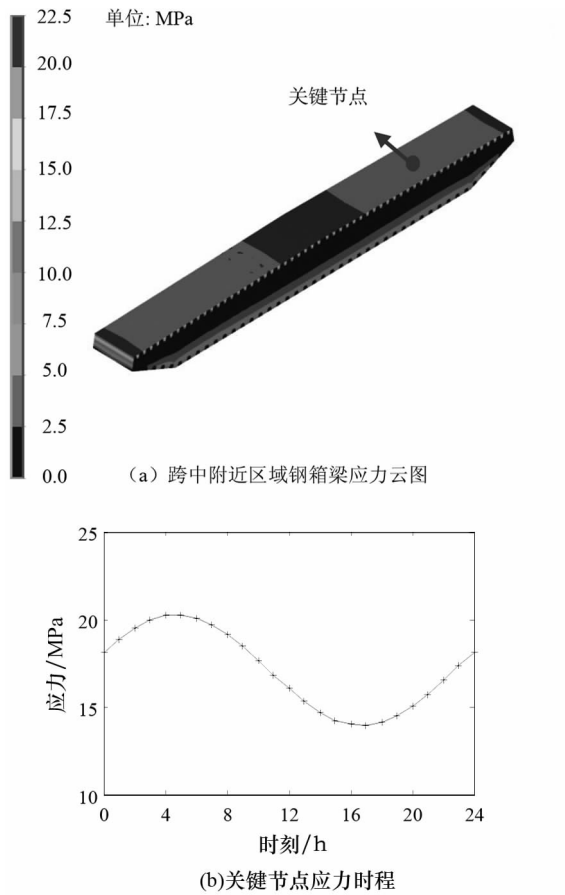


图 6 5月20日的钢箱梁应力分布及关键节点应力时程图

Fig.6 Stress distribution in box-girder and stress history at critical node on May 20

对图 7(a)所示的原始应变时程和图 7(c)所示的车辆荷载的应变时程分别进行雨流计数后,获得的应力幅-平均应力-循环次数的三维关系图如图 8 所示.从图中可看出,剔除温度趋势项前后平均应力有比较明显的变化,前者的值集中分布于 6~17 MPa,而后者则在 0 MPa 上下有小幅波动,可见平均应力主要取决于环境温度的变化;应力幅主要由车辆荷载引起,集中分布于 1~6 MPa.因此,桥梁正常运营环境下结构应力响应时程可认为是昼夜环境温度变化引起的平均应力时程和高频率的车辆荷载引起的应力时程的叠加.

### 3.3 正常运营环境下桥梁疲劳损伤累积

正常运营环境下桥梁构件局部细节处的疲劳损伤主要由交通荷载和环境温度变化共同引起.基

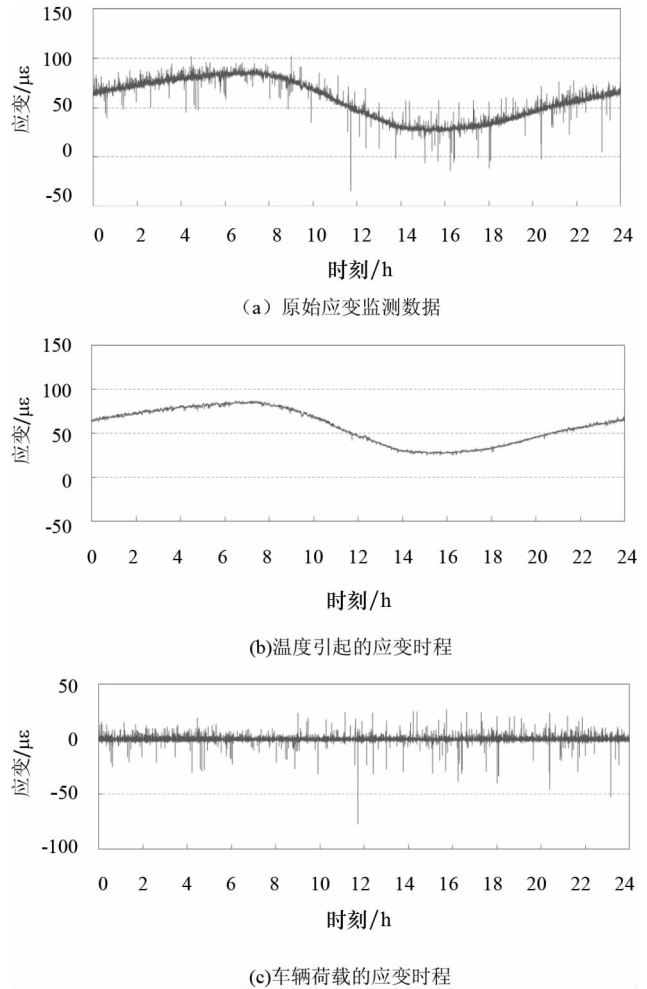


图 7 应变计“YBH2-21”记录的原始应变、分离的温度引起的应变以及车辆引起的应变

Fig.7 Original strain history recorded by strain gauge “YBH2-21”, separated strain histories caused by temperature and vehicles respectively

于 3.2 节中对监测信息的分析,大跨桥梁正常运营环境下任意时刻结构的应力可认为是弹性范围内两种荷载作用分别引起的应力的简单叠加.可利用有限元软件分别计算交通车辆荷载和环境温度变化引起的应力时程,再将两者分别作为应力幅和平均应力进行叠加,如式(5)所示.

$$\sigma = \sigma_V + \sigma_T. \tag{5}$$

式中:  $\sigma$  为结构的应力;  $\sigma_V$  为车辆荷载引起的应力;  $\sigma_T$  为环境温度变化引起的应力.

此两种服役荷载引起的结构响应具有不同的时间尺度,此处认为每一小时内环境温度变化引起的应力保持不变,叠加上此时间段内所有通行车辆荷载引起的应力,即可模拟出正常运营环境下此两种荷载共同作用引起的应力时程.这里以钢箱梁顶板焊接细节处为研究对象,利用上述方法计算得到

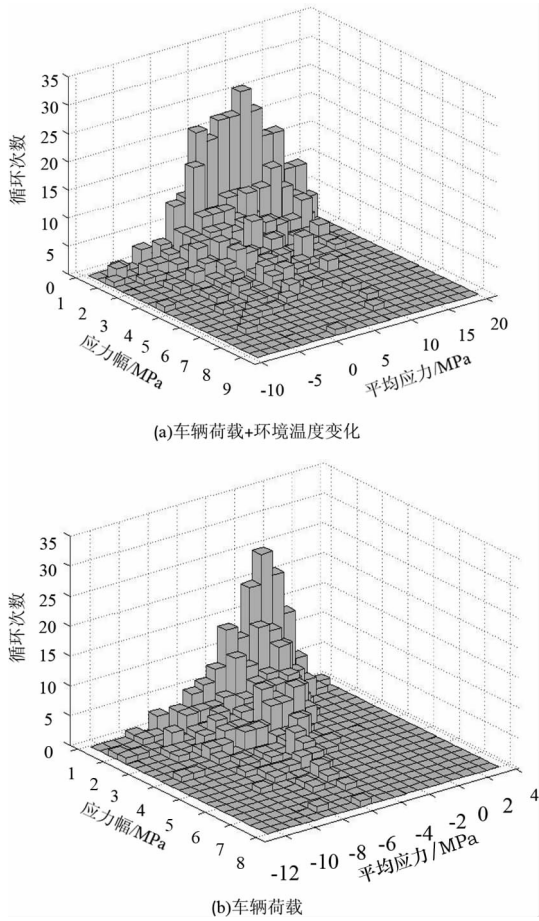
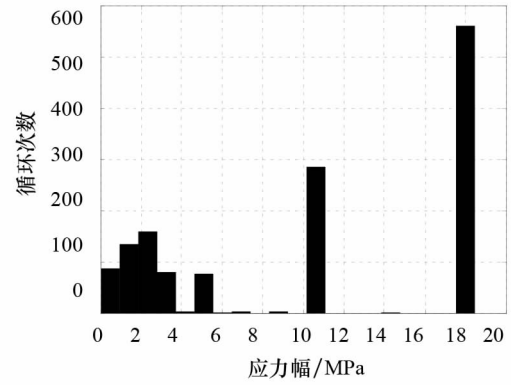


图 8 应变计“YBH2-21”获得的三维应力谱  
Fig.8 Three-dimensional stress spectrum recorded by strain gauge “YBH2-21”

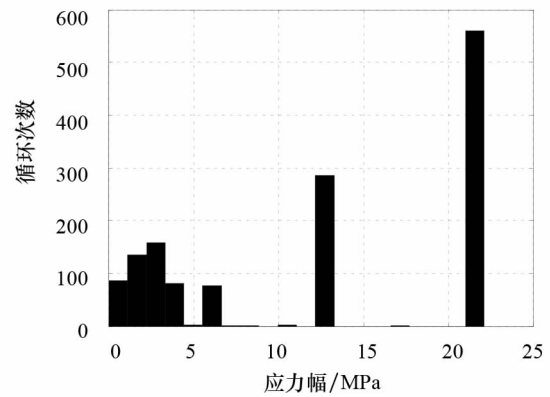
一天中车辆荷载单独作用和车辆荷载与环境温度变化共同作用下其处的应力时程,图 9(a)(b)分别给出了利用雨流计数得到的此两种工况下的应力幅的二维统计图,以更明显地表现出不同荷载作用工况下结构应力幅的分布规律.从图中可看出:与监测数据的雨流计数结果不同,由于计算时采用标准疲劳车模型,应力幅值的大小呈现出较离散分布形式.

Li 等<sup>[18]</sup>提出了基于连续介质损伤力学(Continuum Damage Mechanics—CDM)的高周疲劳损伤模型,认为在役桥梁结构局部的疲劳损伤是一个非线性的累积过程,考虑材料中的损伤累积仅当损伤有效应力大于材料的疲劳应力门槛值时才会发生,桥梁结构在复杂的随机荷载作用下高周疲劳损伤方程可表示为:

$$D = 1 - \left\{ 1 - \frac{(\alpha + 1)N_{bl}}{B(\beta + 3)} \times \sum_{i=1}^{mrb} [(\Delta\sigma_i + 2\sigma_{mi}) \Delta\sigma_i]^{(\beta+3)/2} \right\}^{1/(\alpha+1)}. \quad (6)$$



(a) 车辆荷载引起的应力时程的二维应力幅谱



(b) 车辆荷载与温度引起的应力时程的二维应力幅谱

图 9 不同荷载工况下结构局部应力时程的二维应力谱

Fig.9 Two-dimensional stress spectrum induced by different loads

式中:  $B$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为材料常数;  $\Delta\sigma_i$  和  $\sigma_{mi}$  分别为经过雨流计数获得的第  $i$  级应力幅值和平均应力;  $N_{bl}$  为应力循环的总次数.

基于传统的 Miner 定律和 CDM 模型计算获得了车辆荷载和环境温度变化引起的疲劳损伤累积,如图 10 所示.利用 Miner 准则和 CDM 疲劳损伤模型计算的车辆荷载引起的疲劳损伤累积过程不同,如果认为损伤为 0.8 时结构破坏,那么相应的结构疲劳寿命分别为 150 年和 183 年.显然,对于在役桥梁结构疲劳损伤累积来说,线性 Miner 准则在结构服役初期夸大了疲劳损伤的作用,不能体现出疲劳损伤早期累积速率小、后期逐渐变大的过程,而基于 CDM 模型计算的疲劳损伤能很好地描述结构实际运营过程中非线性的累积过程.另外,仅考虑环境温度变化时桥梁结构局部的疲劳损伤值很小,与交通荷载相比几乎可以忽略.

但是,正常运营过程中环境温度变化与交通荷载共同作用引起的疲劳损伤却表明环境变温荷载



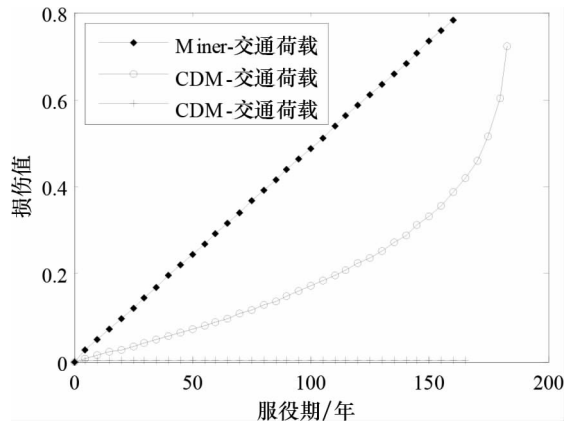


图 10 不同损伤准则下的损伤值

Fig.10 Damage under different damage rules

是结构疲劳损伤分析中的重要荷载因素,图 11 给出了基于 CDM 模型的正常运营环境下交通荷载单独作用和考虑环境温度变化与交通荷载共同作用的两种工况下疲劳损伤累积过程曲线.可以看出:此两种工况下结构的疲劳寿命分别为 153 年和 183 年,即环境温度变化导致结构的疲劳寿命缩短了 30 年.在结构服役初期,环境变温荷载对结构疲劳损伤的影响并不明显,随着后期结构疲劳损伤的不断累积,环境变温荷载会使得结构疲劳损伤以更快的速率累积并很快达到损伤临界值,即在正常运营环境下,环境温度的变化会使得结构的疲劳损伤累积更快地进入损伤累积快速区.可见,环境温度变化引起的荷载与交通荷载引起的疲劳损伤之间的交互作用是桥梁疲劳损伤分析中不可忽视的重要因素.

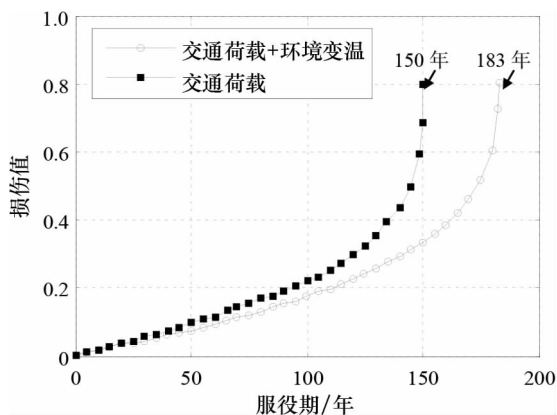


图 11 不同荷载工况引起的损伤

Fig.11 Damage value induced by different loads

产生上述疲劳损伤规律的原因如下:环境温度变化主要决定着结构疲劳应力谱中的平均应力,根据式(6)中 CDM 疲劳损伤模型可知,平均应力和应力幅均是引起结构疲劳损伤的重要因素,且两者存在着交互项.显然,应力幅的影响程度远高于平均应

力.但是,在某一特定温度条件下,车辆通过桥梁引起结构的应力循环中的平均应力会得到显著提高,导致其引起的结构疲劳损伤会有略微的增加.对于具有较长服役寿命的桥梁结构来说,在运营过程中这种微小的损伤放大作用会逐渐累积.因此在服役初期环境变温对结构疲劳损伤累积的影响并不明显,随着服役时间增长,此影响会愈发显著,以至于导致结构疲劳损伤会较快达到临界值发生疲劳破坏.

### 3.4 交通与环境温度变化对钢箱梁疲劳损伤的影响

对未来服役期内荷载的更新是结构疲劳损伤分析中不可忽视的重要环节.交通荷载和环境变温荷载是影响在役桥梁结构疲劳损伤累积的重要荷载因素,所以此处考虑了未来运营环境下交通流量增长和气候变暖两方面因素来实现结构疲劳损伤分析.

#### 3.4.1 交通流量增长

随着经济的不断发展,交通流量以较快的速率增长,对在役桥梁结构的承载能力带来了极大的挑战.例如南京长江大桥公路桥多年来超负荷运转,实际车流量是设计流量的 8 倍多,铁路桥平均 5 min 就有一趟列车.根据润扬长江大桥的交通量预测报告,该桥在服役期内的交通流量预测模型<sup>[8]</sup>如下:

$$y(x) = \begin{cases} -74.69x^2 + 4403.63x + 15931.71, & x < 30; \\ 80000, & x \geq 30. \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $y$  表示通车  $x$  年后的日交通流量.

在此交通流量预测模型中,桥梁服役前 30 年交通流量会有显著增长,如图 12 所示,而后会趋于平缓.利用式(7)中的交通流量预测模型可获得随着交通流增长的结构局部疲劳损伤累积.润扬斜拉桥于 2005 年 4 月 30 日正式通车,图 13 给出了交通流量有较大幅度增长的前 30 年的结构局部疲劳损伤累积曲线.可看出,与不考虑交通流量增长的情况相比,前者会显著提高结构疲劳损伤累积速率.在交通流量快速发展的前 30 年,结构内部疲劳损伤累积以明显高于初始交通流量工况下相应值的速率增加,至 2035 年交通流量将达到初始交通流量的 5 倍,相应的结构疲劳损伤累积为初始交通状态下的 4 倍多.

#### 3.4.2 气候变暖

环境温度变化引起的荷载是引起在役桥梁正常运营过程中结构疲劳损伤累积的重要因素之一.

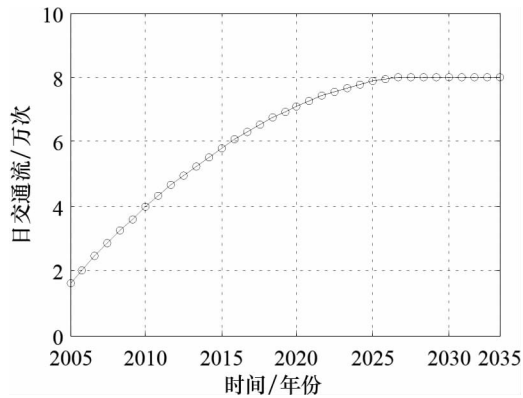


图 12 日交通流量增长曲线

Fig.12 Curve of daily vehicle flow

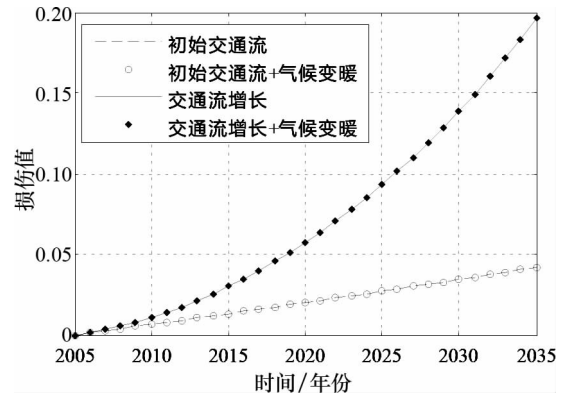


图 14 考虑气候变暖的疲劳损伤值

Fig.14 Damage value considering climate warming

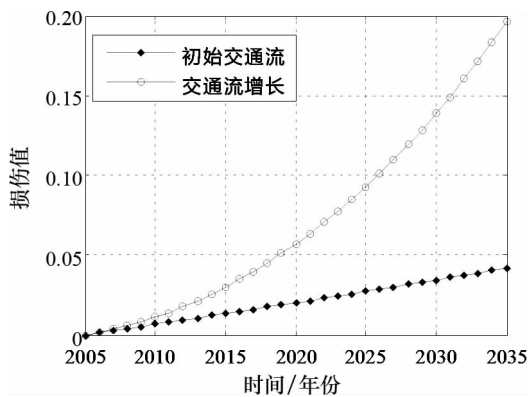


图 13 考虑交通流量增长的损伤累积

Fig.13 Damage accumulation considering increment of vehicle flow

由于人类活动造成的大气中温室气体的持续增加,中国未来气候呈现出变暖的趋势.研究表明<sup>[15]</sup>:在全球变暖的背景下,中国气候变暖呈现出较大的增长幅度,区域平均的年均地表气温上升  $2.7 \sim 2.9$   $^{\circ}\text{C}/100$  a(a 代表年).这里假设桥梁结构温度升高  $3$   $^{\circ}\text{C}$ ,可获得考虑气候变暖的关注位置处的疲劳损伤累积,如图 14 所示.可看出:结构疲劳损伤累积受气候变暖的影响程度很小,几乎可忽略.因此,在结构疲劳损伤分析中可不考虑环境变温荷载模型的更新.

## 4 结 论

以润扬长江北汊斜拉桥为工程背景,基于多尺度有限元模型和实测温度时程数据,实现了从热分析到结构应力的分析.对实测的应变时程数据进行分离和提取,获得环境变温和车辆荷载引起的应变的规律,在此基础上利用连续介质力学理论分析两者交互作用所引起的累积疲劳损伤.主要结论如下:

1)通过设置合理的结构温度与大气环境温度的“迟滞”时间,可利用正弦函数描述温度变化,结果显示:a)昼夜温度变化引起的平均应力的计算值和监测值的误差在合理范围内;b)钢箱梁顶板的平均应力值明显高于底板;c)不同季节温度变化引起的应力幅的差异较小,而平均应力则受日平均温度的影响会显著不同.

2)与交通荷载作用引起的疲劳损伤相比较,环境变温荷载单独作用引起的疲劳损伤值可忽略不计,但两种荷载交互作用对损伤累积的影响不可忽略.随着疲劳损伤的不断累积,环境变温会加速结构服役中后期疲劳损伤的累积速率,进而对疲劳寿命产生显著影响.

3)未来交通流量的增长会显著加速结构的疲劳损伤累积.尽管环境变温和车辆的交互作用对结构损伤累积过程有显著影响,但在桥梁长期服役过程中,气候变暖引起的结构疲劳损伤累积过程的变化很小,故对损伤的时变性进行分析时,环境变温荷载的更新可不予考虑.

4)由于润扬大桥钢箱梁同一部位布置了应变传感器和温度传感器,故可利用车辆和温度对应的不同频域特征来分离出两种因素分别引起的应变,但实际上总应变的一部分是由横风引起的.由于润扬大桥的风速风向仪只设置在桥塔顶部,未能和箱梁不同部位的应变传感器和温度传感器建立起相应的“配对”关系,故总应变中由风场引起的应变未予考虑,这方面的工作将在后续研究中加以完善.

## 参考文献

- [1] DOMENECH A, MUSEROS P, MARTINEZ-RODRIGO M D. Influence of the vehicle model on the prediction of the max-

- imum bending response of simply-supported bridges under high-speed railway traffic[J]. *Engineering Structures*, 2014, 72: 123–139.
- [2] WESTGATE R, KOO K Y, BROWNJOHN J, *et al.* Suspension bridge response due to extreme vehicle loads [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(6): 821–833.
- [3] OSHIMA Y, YAMAMOTO K, SUGIURA K. Damage assessment of a bridge based on mode shapes estimated by responses of passing vehicles[J]. *Smart Structure and Systems*, 2014, 13(5): 731–753.
- [4] 朱志辉, 王力东, 龚威, 等. 基于改进迭代模型的车桥耦合系统竖向随机振动研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(11): 120–130.  
ZHU Z H, WANG L D, GONG W, *et al.* Study on vertical random vibration of train-bridge coupled system based on improved iteration model [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2016, 43(11): 120–130. (In Chinese)
- [5] 邓露, 王芳. 汽车制动作用下预应力混凝土简支梁桥的动力响应及冲击系数研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(9): 52–58.  
DENG L, WANG F. Study on the dynamic responses and impact factors of simply-supported prestressed concrete girder bridges due to vehicle braking [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(9): 52–58. (In Chinese)
- [6] 王莹. 大跨缆索桥钢箱梁疲劳状态评估方法研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2009: 27–28.  
WANG Y. Research on assessment method of fatigue state of steel-box girders in long-span cable bridge [D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2009: 27–28. (In Chinese)
- [7] WU B J, LI Z X, CHAN H T, *et al.* Multiscale features and information extraction of online strain for long-span bridge[J]. *Smart Structures and Systems*, 2014, 14(4): 679–697.
- [8] 郭彤, 李爱群. 基于长期监测数据的桥面板焊接细节疲劳寿命评估[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(6): 66–72.  
GUO T, LI A Q. Fatigue life assessment of welds in bridge decks using long term monitored data[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(6): 66–72. (In Chinese)
- [9] 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.
- [10] NACEUR H, RAHMOUN J, HALGRIN J, *et al.* Multiscale finite element modelling of ductile damage behaviour of the human femur under dynamic loading[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2015, 24(3): 418–445.
- [11] NEZHAD M M, ZHU H H, JU J W, *et al.* A simplified multiscale damage model for the transversely isotropic shale rocks under tensile loading[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2016, 25(5): 705–726.
- [12] 郝龙. 既有钢桥疲劳寿命与使用安全可靠度评估[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2011: 11–24.  
HAO L. Fatigue life and service safety for existing steel bridges [D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2011: 11–24. (In Chinese)
- [13] 李文杰. 公路桥梁车辆荷载研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2009: 51–57, 90–94.  
LI W J. Research on vehicle loads of highway bridge [D]. Dalian: School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 2009: 51–57, 90–94. (In Chinese)
- [14] TAYSI N, ABID S. Temperature distributions and variations in concrete box-girder bridges: experimental and finite element parametric studies [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2015, 18(4): 469–486.
- [15] RODRIGUEZ L E, BARR P J, HALLING M W. Temperature effects on a box-girder integral-abutment bridge [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2014, 28(3): 583–591.
- [16] 杨宁. 无铺装层钢箱梁日照温度场及其效应研究[D]. 长沙: 长沙理工大学土木与建筑工程学院, 2009: 54–56.  
YANG N. Research of temperature field & temperature effect of steel box girder without pavement caused by the solar radiations[D]. Changsha: School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, 2009: 54–56. (In Chinese)
- [17] 王莹, 李兆霞, 赵丽华. 大跨钢桥钢箱梁损伤时变模型及疲劳可靠性评估[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(5): 1017–1023.  
WANG Y, LI Z X, ZHAO L H. Time-varying damage model and fatigue reliability assessment for box-girder of long-span steel bridge[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2013, 43(5): 1017–1023. (In Chinese)
- [18] LI Z X, CHAN T H T, KO J M. Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data—part I: methodology and strategy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(1): 45–53.