

基于实测数据的扁平钢箱温度梯度 疲劳应力谱分析方法

张海萍*, 刘 扬, 邓 扬, 江 楠

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410114)

摘 要:为研究扁平钢箱梁温度疲劳应力谱,以南溪长江大桥悬索桥主梁为研究对象,基于温度传感器长期实测数据,筛选实测数据的日温度极值,运用广义极值模型描述季节极值概率分布并采用极值外推方法得到设计基准期极值模型。引入拉丁超立方抽样(LHS)法对极值模型进行抽样,得到日温度极值样本。结合日温度极值样本和正弦函数模型,构建服役期内关注点的温度时程曲线。基于有限元 ANSYS 软件平台,分析不同温度梯度下关注点的应力效应,回归温度梯度与疲劳应力的线性关系式,依据温度梯度时程曲线与线性关系式模型,采用雨流计数法得到钢箱梁温度梯度疲劳应力谱。研究表明,模拟抽样生成的温度样本数据符合温度场的季节变化特征,样本概率模型与实测数据概率模型相对吻合。关注点温度梯度疲劳应力谱能够为扁平钢箱梁疲劳寿命设计提供参考。

关键词:桥梁工程;扁平钢箱梁;极值模型;拉丁超立方抽样;温度梯度疲劳应力谱

中图分类号:U448.25;O346.2

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2017)04-0466-08

1 引 言

大跨度斜拉桥和悬索桥主梁多选用薄壁式扁平钢箱梁结构。在车辆荷载和环境因素复合作用下,结构疲劳损伤问题显著。我国钢箱梁结构涂漆工艺相对成熟,钢箱梁受外界侵蚀介质腐蚀作用很小。然而,环境温度与钢箱梁焊缝的疲劳损伤具有很强的相关性^[1,2],温度梯度对结构疲劳损伤的贡献不可忽视。

温度对于结构疲劳损伤的影响主要在两方面。(1)影响结构疲劳抗力。在高温环境下,材料的疲劳抗力表现出明显的衰退特征,低温环境下表现出相反的规律^[3]。温度对材料疲劳抗力的影响主要为温度幅度变化很大的应用领域,如航天航空领域。而桥梁结构温度变化幅度较小,对结构疲劳抗力的影响并不显著。(2)影响疲劳荷载效应。温度对于结构荷载效应的影响可细分为疲劳应力幅值大小和循环作用次数。前者主要针对带沥青铺装层的扁平钢箱梁结构。由于沥青具有温度敏感

性特征,沥青的刚度随季节温度变化而变化。夏季沥青刚度小,分散传递荷载能力随之变小,在车辆轮轴作用下结构关注点疲劳应力幅值增大。冬季反之^[4]。后者为温度梯度周期作用下应力次数的累积。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。日照下扁平钢箱梁横桥向和竖向温度梯度同样显著^[5],钢箱梁温度荷载效应与车辆荷载效应值水平相当,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^[6]。国内外,温度梯度作用下钢箱梁应力效应研究较多,而钢箱梁温度梯度疲劳应力谱研究甚少。设计基准期内温度随时间变化数据难以全部获取,同时结构温度应力瞬态分析计算量太大,使得温度梯度疲劳应力谱难以获取。

本文基于南溪长江大桥长期实测数据,获取日温度极值并拟合年温度极值模型,采用极值外推得到设计基准期极值模型。采用拉丁超立方抽样方法分层抽样,得到年极值时程曲线。用正弦函数描述日温度变化曲线,从而得到基准期内温度时程曲线。采用 ANSYS 有限元软件分析不同温度梯度关注点的应力效应,拟合得到温度梯度与关注点应力值的线性关系式,最终得到钢箱梁温度疲劳应力谱。

收稿日期:2016-05-03;修改稿收到日期:2016-09-07.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057701);国家自然科学基金(51378081, 51308073)资助项目.

作者简介:张海萍*(1988-),男,博士生

(E-mail:zhanghaipingbridge@163.com)

2 温度梯度疲劳应力谱分析步骤

钢箱梁在温度梯度作用下的疲劳应力谱计算步骤如下。(1) 构建服役期的钢箱梁季节性日温度极值模型。基于实测温度数据,筛选出日温度极值样本并将样本按季节类型分为四组(春季、夏季、秋季和冬季)。采用广义极值分布函数对样本数据进行描述,得到实测温度季节性日温度极值模型。对日温度极值模型进行外推,得到设计基准期内日温度极值模型。(2) 模拟温度梯度时程曲线。采用 LHS 方法对外推模型进行分层抽样,得到设计基准期任意时段结构日温度极值点。结合正弦函数构建任意时间段内温度时程曲线并对相邻两温度点取差值,得到温度梯度时程曲线。(3) 获取温度梯度疲劳应力谱。建立扁平钢箱梁有限元模型,分析不同温度梯度大小工况下关注点的温度梯度应力效应,建立温度梯度与应力的线性关系。结合温度梯度时程曲线和温度梯度与应力的线性方程得到应力时程曲线,采用雨流计数法获取温度梯度应力谱。分析流程如图 1 所示。

3 工程概况

南溪长江大桥是宜泸高速公路上的主跨 $L=820$ m 的钢箱梁悬索桥,双向 4 车道,主缆横桥向中心间距为 29.1 m,钢箱梁共 65 个,标准长度为 12.8 m。主梁高为 2.7 m,顶板厚为 16 mm,底板厚为 10 mm。在悬索桥跨中钢箱梁横截面布置 15

个温度测点,对应的温度变量用 T_i 表示。测点布置如图 2 所示。需要说明的是,由于传感器采集频率为 5 Hz,采集数据样本量过大。本文以 10 min 内温度的平均值作为该时间段的代表值^[7]。以钢箱梁右幅温度数据作为研究对象,左幅数据进行对比效验。

4 设计基准期日温度极值模型

统计数据往往不足以覆盖整个设计基准期,如需构建基准期内的温度极值模型,应依据实测周期内极值模型外推基准期极值模型。温度具有明显季节特征,日温度极值为非平稳时间序列。为了得到平稳的极值时间序列,采用广义极值分布模型分别描述季节实测极值分布,表达式为^[8]

$$F_1(T) = \exp \left\{ - \left[1 + k_1 \left(\frac{T - \alpha_1}{\beta_1} \right) \right]^{-1/k_1} \right\} I(T) \quad (1)$$

式中

$$I(T) = \begin{cases} 1 & [1 + k_1(T - \alpha_1)/\beta_1] > 0 \\ 0 & [1 + k_1(T - \alpha_1)/\beta_1] \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 k_1 , α_1 和 β_1 分别为实测一季度极值模型形状参数、位置参数和比例参数。当 $k_1 < 0$ 时为极值 I 型分布;当 $k_1 > 0$ 时为极值 II 型分布;当 k_1 接近 0 时为极值 III 型分布。

$$F_N(T) = F_1^N(T) \quad (3)$$

式中 N 为设计基准期年数,求导式(3)得到基准期极值概率密度分布表达式为

$$f_N(T) = N F_1^{N-1}(T) f_1(T) \quad (4)$$

均值和方差表达式为

$$\mu_N = \int_{-\infty}^{\infty} x f_N(T) dT = \mu_1 + \frac{\ln N}{\pi} \sqrt{6} \sigma_1 \quad (5)$$

$$\sigma_N = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_N)^2 f_N(T) dT = \sigma_1 \quad (6)$$

限于篇幅,以温度变量 T_1 为例,提取 T_1 四个季节(春—SP,夏—SM,秋—AU 和冬—WI)的日温度极大值和极小值,用统计方法得到概率密度分布,采用极大似然估计法评估极值模型参数如图 3 所示。

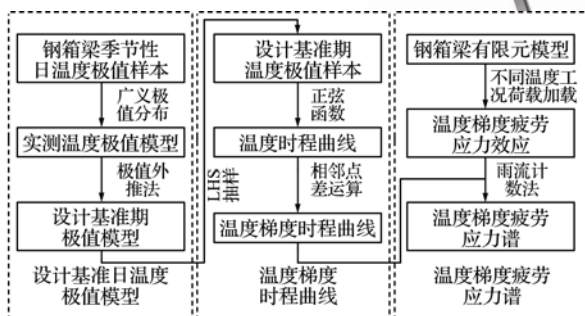


图 1 钢箱梁温度梯度应力谱分析流程

Fig. 1 Analysis flowchart for steel box girder's temperature gradient stresses spectrum

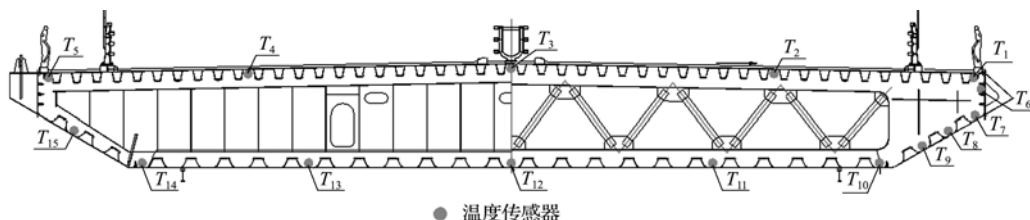


图 2 南溪长江大桥钢箱梁温度传感器布置

Fig. 2 Temperature sensors on Nan-Xi Yangtze River bridge steel box girder section

表1 T_1 极值分布模型参数

Tab.1 Parameters of temperature extreme model

	极大值分布模型			极小值分布模型		
	k_1	α_1	β_1	k_1	α_1	β_1
SP	-0.03	4.8	22.75	-0.02	1.68	6.8
SM	-0.15	7.4	33.56	-0.52	6.5	16.8
AU	-0.12	6.5	27	-0.22	5.7	15.82
WI	-0.04	3.12	9.45	-0.40	2.58	4.7

5 温度梯度时程曲线模拟

5.1 LHS 抽样法

蒙特卡洛抽样属于完全随机抽样,在抽取数据量不大的情况下,不能很好地反映温度的分布特征。LHS 抽样对模型进行分层抽样充分反映随机变量的整体分布,保证样本点将所有概率区间全部覆盖^[9]。LHS 抽样的简要步骤为,(1) 将累计概率密度模型拆分成 n 个等长概率区 $[0, 1/n]$, $[1/n, 2/n]$, $\dots$, $[(n-1)/n, 1]$, 减弱样本点之间的相关性。(2) 确定抽样样本点的随机排列顺序,用一个整数随机矩阵 R_{nm} 反映样本的排序信息。矩阵中 $R_{ij} = k$ 表示样本点 j 在第 i 次抽样的排序为 k 。

(3) 依据每个区间样本点,得到累计概率分布函数值表达式为^[10]

$$F_{X_j}(X_{ij}) \approx [R_{ij} - \text{rand}(0, 1)]/n \quad (7)$$

式中 $\text{rand}(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数, $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ 区间 LHS 样本点 η_{ij} 的表达式为

$$\eta_{ij} = \Phi^{-1}[F_{X_j}(X_{ij})] \quad (8)$$

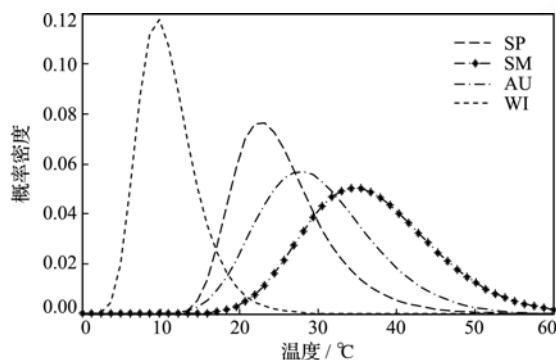
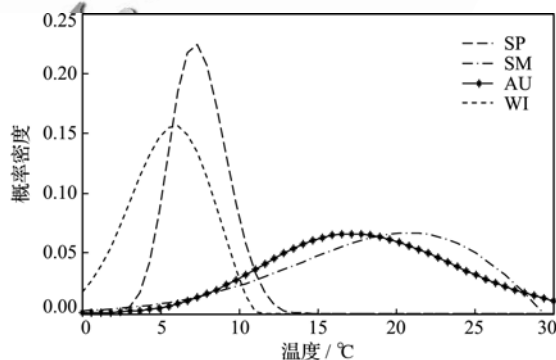
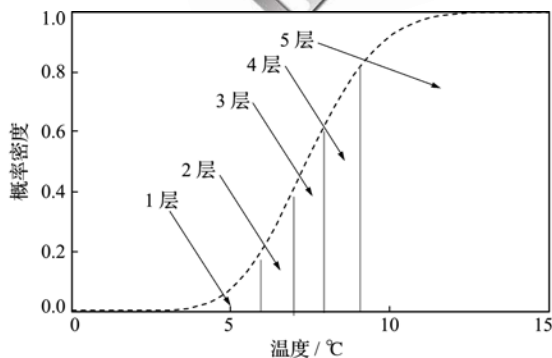
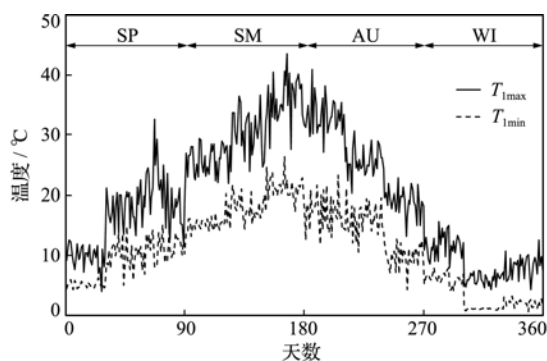
式中 $\Phi^{-1}()$ 为标准正态累计分布的逆函数。

本文将季节温度极值累积概率模型划分为 5 层,每层进行 18 次抽样,如图 4 所示,对 SP, SM, AU 和 WI 的极值模型进行 360 次 LHS 抽样。抽样温度极值数据曲线如图 5 所示,样本数据曲线符合季节性变化特征,表明 LHS 抽样方法适应于温度极值抽样。

5.2 温度时程曲线

5.1 节通过 LHS 法抽取了 T_1 一年的日温度极大值和极小值。为得到结构温度场年时程曲线,需要通过日温度极值构建时程函数。现有研究表明桥梁结构日温度变化曲线能够采用正弦函数来描述^[11]:

$$T_i = A_i \sin(\omega_i t) + B_i \quad (9)$$

(a) T_1 四季温度极大值概率分布(b) T_1 四季温度极小值概率分布图3 T_1 四季温度极大值概率分布
Fig.3 Seasons of extreme value model for T_1 图4 T_1 测点 SP 极小值累积概率分布分层抽样Fig.4 Step sampling of minimum cumulative probability curve for T_1 in season of SP图5 T_1 年温度极值分布曲线Fig.5 Annual extreme distribution curve of T_1

式中 t 为时间, w_i, A_i 和 B_i 为测点形状参数。各形状参数的计算式为

$$w_i = (2\pi \times t_c) / (24 \times 60) \tag{10}$$

$$A_i = -\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}, B_i = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \tag{11}$$

式中 t_c 为测量温度时段值,取 10 min, $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为日温度极大值和日温度极小值。根据 T_1 日温度极值抽样数据样本与式(9)构建该测点年温度时程变化曲线如图 6 所示。日温度变化曲线连续、平稳,表明该模拟方法的适用性。该方法的精确性是否满足要求,需要进一步验证。

5.3 方法验证

为了验证模拟方法的精准性,需对实测数据概率模型与抽样数据概率模型进行数据对比。对变量 T_1 以 10 min 为单位采集一个样本点进行为期一年的数据统计,依据统计数据建立钢箱梁的概率统计模型。扁平钢箱梁年温度概率密度分布可由高斯混合模型描述^[12],表达式为

$$f(T) = \sum_{i=1}^M w_i \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_T} \exp \left[-\frac{(T - \mu_T)^2}{2\sigma_T^2} \right] \tag{12}$$

式中 μ_T 和 σ_T^2 为相应的均值和方差, w_i 和 M 为高斯分量的权重和数量。 M 的取值决定了模型的精度和简洁性。引入信息统计学中 AIC 准则^[13] 和 BIC 准则^[14] 确定参数 M ,其表达式分别为

$$V_{AIC} = 2M - \ln L(x|M, w_i, \mu, \sigma^2) \tag{13}$$

$$V_{BIC} = M \ln n - \ln L(x|M, w_i, \mu, \sigma^2) \tag{14}$$

式中 M 为混合模型参数的个数, n 为观测样本向量的长度, $\ln L(x|M, w_i, \mu, \sigma^2)$ 为最大似然值。

取 V_{AIC} 和 V_{BIC} 中的极小值作为最优模型的判别标准。选用模型分量数为 1~10 的加权混合模型,依据式(13,14)采用 EM 算法对 10 种混合模型进行参数估计,选取判别准则值的最小值所对应的高斯混合模型作为最优拟合模型。

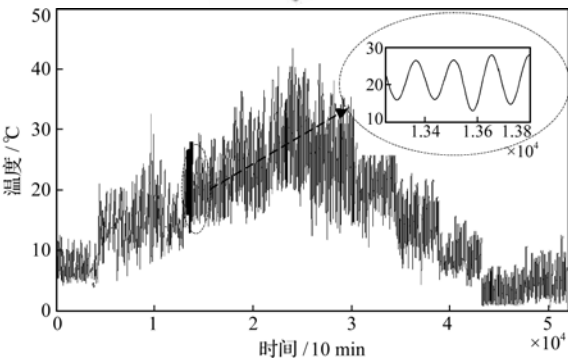


图 6 T_1 年温度时程曲线

Fig. 6 Temperature time-history curve for T_1

如图 7 所示,当高斯分量数为 3 时,拟合模型达到最优。采用加权数为 3 的高斯混合模型描述 T_1 的年温度概率分布。本文采用的年温度模拟方法进行拉丁立方抽样时,抽取的样本具有一定的随机性。为了充分反映样本数据的精准度,抽取三组样本的概率密度分布曲线与实测值拟合曲线进行对比。如图 8 所示,抽样温度概率分布曲线与实测温差有较好的拟合度,表明该方法的精准性。

表 2 T_1 实测温度与模拟样本温度模型参数

Tab. 2 Parameters of measured data model and simulation model for T_1

测点变量	M_i	w_i	μ_i	σ_i^2
实测值	1	0.49	19.60	27.72
	2	0.32	31.27	75.25
	3	0.19	7.71	0.89
模拟样本 1	1	0.45	17.87	20.55
	2	0.35	28.70	80.15
	3	0.20	6.11	1.34
模拟样本 2	1	0.38	16.55	21.13
	2	0.36	30.55	70.25
	3	0.26	5.11	0.91
模拟样本 3	1	0.46	22.1	27.33
	2	0.33	32.00	88.90
	3	0.21	7.10	3.81

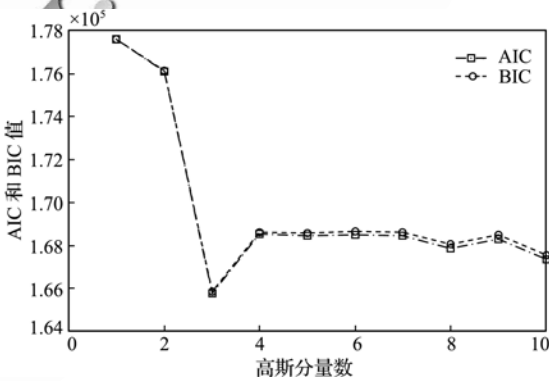


图 7 不同高斯混合模型 AIC 和 BIC 判别计算值

Fig. 7 Values of AIC and BIC for different gaussian mixture models

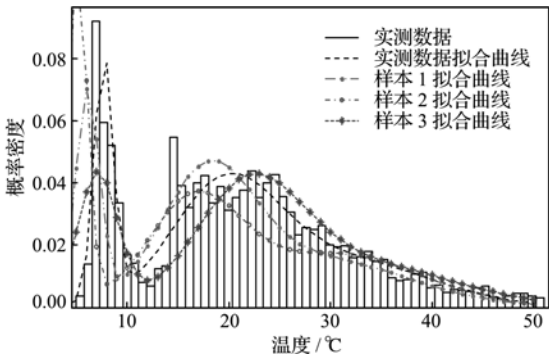


图 8 T_1 年温度概率密度分布和拟合曲线

Fig. 8 Probability density distribution and fitting curves of sample T_1

5.4 温度梯度时程曲线

悬索桥钢箱梁整体升温或降温的能量通过钢箱梁自身伸缩变形消耗,忽略对结构本身产生的次内力。本文仅讨论温度梯度下关注点的疲劳应力效应。扁平钢箱梁底板横向温差可以忽略不计^[15],仅对顶板横向温度梯度和横隔板竖向温度梯度进行分析。相邻两点间的温度梯度表达式为

$$T_{i-j} = \sum_{i=1, j=1}^n (T_i - T_j) \quad (15)$$

对于顶板, T_2 变量对应测点顶部沥青混凝土

面层无遮挡物,受太阳直接辐射, T_1 和 T_3 变量测点受防撞护栏部分遮挡,太阳直接辐射作用减弱。顶板的温度梯度组可以分为 T_{2-1} 和 T_{2-3} 两组。基于实测统计数据与模拟方法得到各测点的年温度时程曲线,由式(15)得到年温差时程曲线如图9所示。 T_{2-1} 和 T_{2-3} 两组的最大温差为 13.2°C 和 14.3°C 。

将钢箱梁横隔板竖向温度梯度分为 T_{1-8} 和 T_{8-10} 两组。如图10所示, T_{1-8} 和 T_{8-10} 温差组温差最大幅度分别为 15.2°C 和 5.1°C 。

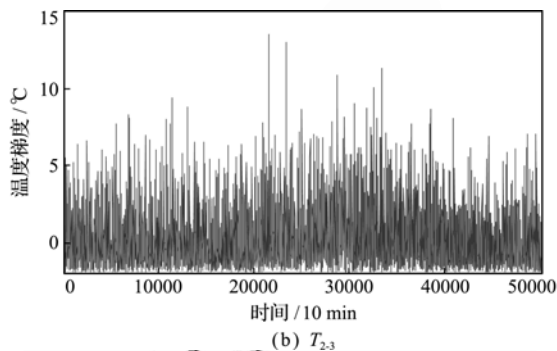
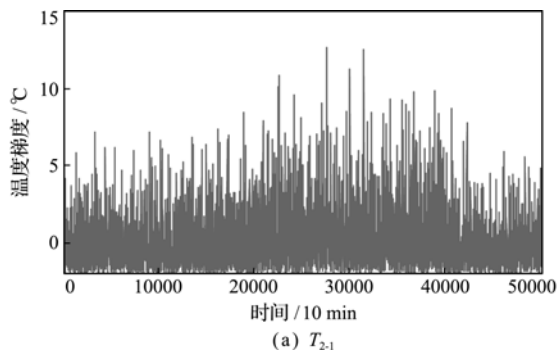


图9 钢箱梁顶板温差分布图

Fig. 9 Temperature gradient distribution of steel box roof

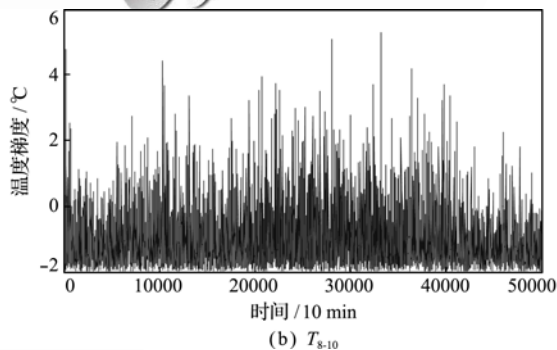
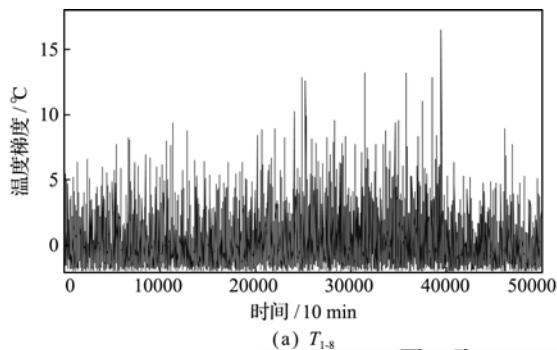


图10 腹板温差时程曲线

Fig. 10 Temperature gradient distribution of steel box web

6 扁平钢箱梁温度疲劳应力谱

6.1 钢箱梁有限元模型建立

采用 ANSYS 有限元软件建立钢箱梁节段有限元模型,钢箱梁结构为薄壁结构,选用 shell63 壳单元来模拟。箱梁材料的热膨胀系数为 1.2×10^{-5} ,弹性模量为 2.1×10^5 ,泊松比取 0.3。单元和节点总数分别为 16963 和 12117。采用体荷载加载方式模拟温度荷载,分别对 shell63 壳单元的 8 个节点进行温度荷载输入。为校验计算模型的精准性,输入与文献[6]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11所示。在横向温差作用下,结构在 x 方向最大的拉应力为 28MPa (文献

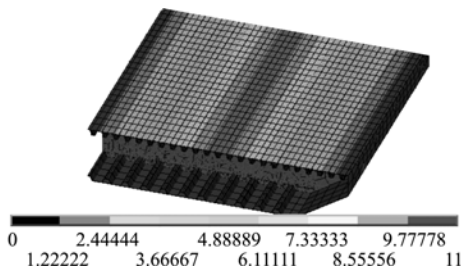


图11 顶板横向温度梯度荷载模型

Fig. 11 Temperature gradient loading model

[9]为 24MPa),应力分布形式相似,表明计算模型的准确性。

6.2 温度梯度疲劳应力关注点位置和应力方向

在结构设计中,往往选择结构中荷载效应最大

点作为设计应力关注点。钢箱梁温度梯度作用下疲劳应力幅值不小于车辆荷载的荷载效应,然而在设计基准期内温度作用频率远小于车辆作用频率。温度梯度疲劳贡献率小于车辆荷载的疲劳贡献率。以车辆荷载作用下钢箱梁疲劳损伤最大位置处作为温差疲劳效应的关注点。文献[16]表明重载车流量主要占据行车道(行驶方向右车道)。车轮在车道上服从正态分布^[17],故温度梯度疲劳应力关注点的选取位置为行车道车辆轮轴概率分布峰值附近的U肋焊缝处。

温度梯度在结构 x 、 y 和 z 三个方向均产生应力。由文献[18]可知,车载作用下钢箱梁正交异性板焊接细节裂纹主要由横桥向(x 方向)应力产生。温度梯度疲劳应力应与车辆荷载疲劳应力方向保持一致才能对关注点疲劳损伤做出叠加贡献。本文主要分析温度梯度在 x 方向的疲劳应力 S_x 。

6.3 关注点温差疲劳应力谱

本文采用体荷载模拟静态温度梯度荷载作用下关注点的应力值。文献[9]中钢箱梁在中国公路桥涵设计通用规范(JTGD60-2004)^[19]设计温度梯度荷载作用下结构最大应力为 55.45 MPa,远小于 Q345 钢桥的屈服强度 345 MPa。可以认为温度梯度作用下钢箱梁材料处于弹性范围内,可以建立温度梯度与关注点应力值线性表达式为

$$S_x = aT_{i-j} + b \quad (16)$$

式中 S_x 为关注点 x 方向的应力, a 和 b 为待定参数。本文主要讨论疲劳应力幅值,不考虑关注点位置的残余应力。当温度梯度 $T_{i-j} = 0$ 时,关注点不存在温度梯度应力,则 $b = 0$ 。选取顶板和横隔板 4 组温度梯度值分别为 5 °C、10 °C、15 °C 和 20 °C 作为加载工况,进行有限元应力效应分析。得到对应关注点的应力值。对散点进行线性拟合,得到顶板横向温度梯度作用下温差-应力参数 a_1 和横隔板竖向温差-应力参数 a_2 ,如图 12 所示。

根据温差时程图与式(16)得到结构关注点温度疲劳应力时程曲线,采用雨流计数法得到温度梯度疲劳应力谱如图 13 所示。可以看出,钢箱梁横向温度梯度作用下,关注点年应力谱 x 方向平均疲劳应力幅值为 6.8 MPa,最大应力幅值为 19.5 MPa。横隔板竖向温度梯度作用下,关注点平均疲劳应力幅值为 10.1 MPa,最大应力幅值为 28.3 MPa。横隔板竖向温度梯度应力效应稍大于顶板的横向温度梯度效应。但顶板横向温度梯度疲劳应力循环次数远大于横隔板

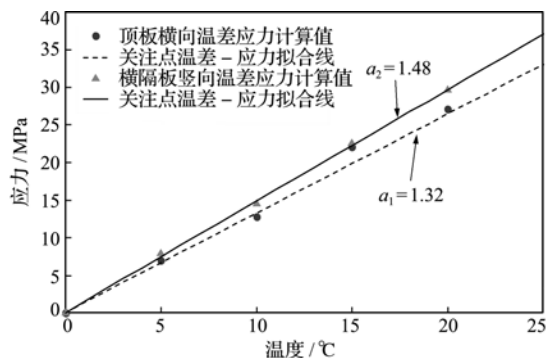


图 12 温度梯度-应力线性拟合曲线

Fig. 12 Temperature gradient-stress effect linear fitting curve

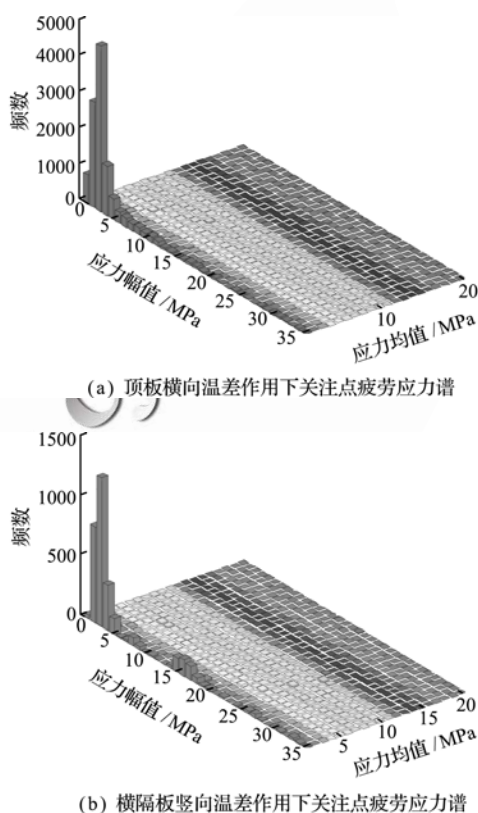


图 13 温度梯度作用下疲劳应力谱

Fig. 13 Concern point fatigue stress spectrum under the temperature gradient loading

竖向温度梯度疲劳应力循环次数。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复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。

7 结 论

(1) 本文将长期温度监测数据与有限元分析结合起来,提出一种运营状态下钢箱梁温度梯度疲劳应力谱的简便计算方法。克服了钢箱梁中瞬态

热分析求解温度疲劳应力谱超大计算量的难题。

(2) 以南溪长江大桥悬索桥钢箱梁细节温度梯度疲劳应力谱分析为例,计算表明,顶板横向温度梯度作用下,关注点细节疲劳应力循环次数明显高于横隔板竖向温度梯度应力循环次数。

(3) 温度梯度疲劳应力谱的获取提高了桥梁疲劳寿命评估精度,对大跨度扁平钢箱梁桥疲劳设计具有参考价值。

参考文献(References):

- [1] Guo T, Li A, Wang H. Influence of ambient temperature on the fatigue damage of welded bridge decks [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, **30**(6): 1092-1102.
- [2] 平学成, 徐小翔, 陈梦成. 热-机载荷下不规则夹杂的奇异性应力场分析[J]. 计算力学学报, 2014, **31**(6): 749-754. (PING Xue-cheng, XU Xiao-xiang, CHEN Meng-cheng. Singular stress analysis of an irregular shaped inclusion under thermo-mechanical loads[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2014, **31**(6): 749-754. (in Chinese))
- [3] Tanaka M, Matsudaira T, Igimi D, et al. Effects of high-temperature ambient on cyclic fatigue of La 0.8 Sr0.2MnO₃+ δ [J]. *Journal of Materials Research*, 2011, **26**(18): 2450-2457.
- [4] 吴 冲, 刘海燕, 张志宏, 等. 桥面铺装温度对正交异性钢桥面板疲劳的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, **41**(8): 1213-1218. (WU Chong, LIU Hai-yang, ZHANG Zhi-hong, et al. Influence of pavement temperature on fatigue life of orthotropic deck of steel bridge[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2013, **41**(8): 1213-1218. (in Chinese))
- [5] 周广东, 丁幼亮, 李爱群, 等. 基于长期实测数据的大跨悬索桥扁平钢箱梁温差特性研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(5): 114-125. (ZHOU Guang-dong, DING You-liang, LI Ai-qun, et al. Thermal difference characteristics analysis of a flat steel box girder in long-span suspension bridge based on long-term field measurement data[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, **45**(5): 114-125. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] 丁幼亮, 王高新, 周广东, 等. 基于现场监测数据的润扬大桥斜拉桥钢箱梁温度场全寿命模拟方法[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(5): 129-136. (DING You-liang, WANG Gao-xin, ZHOU Guang-dong, et al. Life-cycle simulation method of temperature field of steel box girder for Runyang cable-stayed bridge based on field monitoring data[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, **46**(5): 129-136. (in Chinese))
- [8] Li D, Maes M A, Dilger W H. Thermal design criteria for deep prestressed concrete girders based on data from Confederation Bridge[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004, **31**(5): 813-825.
- [9] Park J, Lee K S, Kim M S, et al. Numerical analysis of a dual-fueled CI (compression ignition) engine using Latin hypercube sampling and multi-objective Pareto optimization [J]. *Energy*, 2014, **70**(3): 278-287.
- [10] 蒋水华, 李典庆, 周创兵. 基于拉丁超立方抽样的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(s2): 70-76. (JIANG Shui-hua, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bin. Non-intrusive stochastic finite element method for slope reliability analysis based on Latin hypercube sampling [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(s2): 70-76. (in Chinese))
- [11] Barsotti R, Froh M. Statistical analysis of thermal actions on a concrete segmental box-girder bridge[J]. *Structural Engineering International*, 2000, **10**(2): 111-116.
- [12] 孙 君, 李爱群, 丁幼亮. 润扬长江大桥钢箱梁的温度分布监测与分析[J]. 公路交通科技, 2009, **26**(8): 94-98. (SUN Jun, LI Ai-qun, DING You-liang. Observation and research on temperature distribution in steel box girders of Runyang Yangtse River Bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, **26**(8): 94-98. (in Chinese))
- [13] Akaike H. A new look at the statistical model identification[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, **19**(6): 716-723.
- [14] Schwarz G. Estimating the dimension of a model[J]. *The Annals of Statistics*, 1978, **6**(2): 461-464.
- [15] Ding Y L, Wang G X. Estimating extreme temperature differences in steel box girder using long-term measurement data[J]. *Journal of Central South University*, 2013, **20**(9): 2537-2545.
- [16] 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 Hai-ping, LU Nai-wei, 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. (in Chinese))
- [17] Oh B H, Lew Y, Choi Y C. Realistic assessment for safety and service life of reinforced concrete decks in

- girder bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2007, **12**(4):410-418.
- [18] Xiao Z G, Yamada K, Ya S, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, **30**(8):1387-1397.
- [19] JTG D60-2004. 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004. (JTG D60-2004, General Code for Design of Highway Bridges and Culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))

A calculation method of thermal fatigue stress spectrum for flat steel girder box based on measurement data

ZHANG Hai-ping*, LIU Yang, DENG Yang, JIANG Nan

(School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to analyze the thermal fatigue stress spectrum of a flat steel box girder, Nan-Xi Yangtze River bridge was taken as the research object. The temperature data of a steel box girder were collected from a structural health monitoring system (SHMS). Then, the daily temperature maximum values and minimum values were obtained. The seasonal temperature extreme value probability distribution was described by generalized extreme value (GEV) model and the GEV model for a design reference period was established. The method of Latin hypercube sampling (LHS) was introduced in this paper to sample temperature data. Hence, temperature time-history curve in the design reference period by combining temperature extreme sampling and sine function model was obtained. The equation of linear regression between temperature gradient and stress effect was obtained by a finite element analysis. The temperature fatigue stress spectrum of an observation point on the steel box girder can also be obtained based on temperature time-history curve and linear regression model. Research shows that the temperature samples produced by simulation agree with the feature of seasonal temperature change and the correlation between simulation sampling probability model and measured data probability model is good. The thermal fatigue stress spectrum can be used in fatigue life design of steel box girders.

Key words: bridge engineering; steel box girder; GEV model; LHS; temperature gradient fatigue stress spectrum

引用本文/Cite this paper:

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 Hai-ping, 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.