

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.045

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于地区温度实测数据的大跨度钢箱梁悬索桥的温致效应研究

黄旭, 朱金, 钱逸哲, 李永乐

(西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 基于地区的温度实测数据, 采用4种常用的概率分布模型对桥址区不同季节日温度极值分布进行拟合, 通过5项拟合指标评价各概率分布模型的拟合优劣, 并选取最优概率分布模型。基于最优概率分布模型, 进一步推算出桥址区重现期分别为20、50、100 a的温度极大值和极小值。采用ANSYS有限元软件建立某大跨度钢箱梁悬索桥有限元模型, 并研究考虑极端温度下不同构件升降温对桥梁自振频率和位移的影响。进一步研究中央扣、竖向支座和伸缩缝等约束体系对桥梁温致效应的影响。结果表明: 全桥自振频率除加劲梁一阶对称横弯频率外, 其余的频率与全桥的温度呈负相关; 悬索桥的桥塔和加劲梁分别升、降温25℃时, 桥梁各阶自振频率变化量都在5%以内; 悬索桥主缆降温12℃时, 导致加劲梁反对称竖向振动频率的显著增加, 约为12%。此外, 加劲梁纵向竖向位移响应及桥塔竖向和纵桥向位移响应与桥梁温度变化的呈线性相关性, 且加劲梁的纵向位移受加劲梁的温度变化影响最大, 建水测和元阳侧纵向位移变化率分别为4.7、3.3 mm/℃。加劲梁梁端竖向位移和转角主要受到主缆温度变化的影响。竖向支座和伸缩缝纵向限位装置对桥梁的温致位移响应影响可忽略不计, 但中央扣会使桥梁跨中处短吊杆的内力发生突变。

关键词: 悬索桥; 钢箱梁; 温致效应; 自振频率; 有限元分析

中图分类号: U448.25 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)04-0067-10

Temperature effects on long-span steel box girder suspension bridge based on regional measured data

HUANG Xu, ZHU Jin, QIAN Yizhe, LI Yongle

(College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Based on the regional measured temperature, four common probability distribution models were proposed to fit the probability distribution of the daily temperature extremes in different seasons at the bridge location. The fitting of each model was evaluated through 5 performance indexes and the optimal probability distribution model was selected. Based on the optimal probability distribution model, the

收稿日期: 2020-02-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2019M663554、2019TQ0271); 四川省科学技术厅科技计划(2020YJ0080)

作者简介: 黄旭(1995-), 男, 博士生, 主要从事桥梁结构温度效应研究, E-mail: 2506500919@qq.com。

朱金(通信作者), 男, 博士(后), E-mail: zhujin@home.swjtu.edu.cn。

Received: 2020-02-20

Foundation items: China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M663554, 2019TQ0271); Project of Science and Technology Department of Sichuan Province (No. 2020YJ0080).

Author brief: HUANG Xu (1995-), PhD candidate, main research interest: temperature effects on bridge structure, E-mail: xuxu@my.swjtu.edu.cn.

ZHU Jin (corresponding author), PhD (postdoc.), E-mail: zhujin@home.swjtu.edu.cn.

maximum and minimum temperature values with the return periods of 20 a, 50 a, and 100 a at the bridge location were calculated subsequently. The finite element model of a long-span steel box girder suspension bridge was established using ANSYS. Based on the established model, the effects of temperature variation of different structural components on the bridge's natural frequency and displacement was studied considering the extreme temperature. The influence of restraint systems such as central buckle, vertical supports and expansion joints on the temperature-induced effect of the bridge was further studied. The investigated results show that, except for the first-order symmetrical transverse bending frequency of the stiffening girder, the natural frequencies of the others are negatively correlated with the temperature of the full bridge; When the temperature of the pylons and stiffening girder of the suspension bridge rises or falls by 25 °C respectively, the changes in the natural frequency are all within 5%; When the temperature of the main cable of the suspension bridge is reduced by 12 °C, the anti-symmetric vertical vibration frequency of the stiffening girder will increase significantly by about 12%; In addition, the vertical displacement response of the stiffening girder and the vertical and longitudinal displacement response of the bridge tower are linearly related to the temperature variation. And the longitudinal displacement of the stiffening girder is mainly affected by the temperature variation of the stiffening girder. The longitudinal displacement rate of Jianshui side and Yuanyang side are 4.7 mm/°C and 3.3 mm/°C, respectively; The vertical displacement and rotation angle of the stiffening girder ends are mainly affected by the temperature variation of the main cable; The influence of the vertical support and the longitudinal limit device of the expansion joint on the temperature-induced displacement response of the bridge is negligible, but the central buckle will cause a sudden change in the internal force of the short suspender at the middle of the bridge.

Keywords: long-span suspension bridge; steel box girder; natural variation frequency; thermal-induced effects; finite element analysis

桥梁结构作为大型基础设施,长期暴露在复杂的自然环境中,受到周期性变化的气温、不均匀的日照和强升降温等因素的影响。当存在边界条件约束时,桥梁结构内部就会产生相当大的温差应力,不仅影响桥梁结构的动力特性,而且影响结构健康监测的结果,甚至可能导致桥梁结构的损伤和垮塌破坏^[1-5]。因此,温度是影响大跨桥梁安全运营和使用寿命的重要因素之一。

在过去的几十年里,大批学者研究了混凝土箱梁的温致效应。彭友松^[6]基于有限元软件 ANSYS,针对不同类型混凝土桥梁结构,研究了多尺度因素影响下的温致效应。也有不少学者基于健康监测的数据,研究温度对桥梁梁端位移的影响。周毅等^[7]利用上海长江大桥的现场实测数据,通过简单的几何分析和数值模拟,研究了温度对斜拉桥跨中竖向位移的作用机理。邓扬等^[8]利用润扬大桥梁端位移响应和钢箱梁温度实测数据进行了季节相关性研究,并有效地识别出温度对梁端位移的影响。Yang 等^[9]基于温度和位移实测数据,研究了塔架位移随时间的变化规律,然后分析了温度与索力增量之间的关系。此外,还有学者基于有限元软件分析了温度对桥梁自振频率和振型的影响,比如,陈策等^[10]

利用 ANSYS 分析了悬索桥整体温度变化对其内力和动力特性的影响。Meng 等^[11]建立了三维精细化模型,对其温度效应和热特征值理论进行研究,定量分析了温度变化对结构自振频率的影响,并比较了不同季节结构自振频率的变化规律。但是,目前大跨度钢箱梁悬索桥温致效应及约束体系对温致效应影响的研究尚不多见。

笔者以红河特大跨度悬索桥为工程背景,系统研究了温致效应及约束体系对温致效应的影响规律。基于桥址区气象数据,采用不同的概率分布模型拟合了桥址区温度极值的概率分布,并通过 5 种评价指标选取了最优的概率分布模型。通过得出的最优概率分布模型,预测了桥址区重现期分别为 20、50、100 a 的温度极大值和极小值。接着,基于 ANSYS 有限元软件,研究了考虑极端温度下不同构件升降温对桥梁自振频率和位移的影响。还进一步研究了中央扣、竖向支座和伸缩缝等约束体系对桥梁温致效应的影响。

1 工程背景

1.1 工程概况

红河特大桥是主跨 700 m 的流线型钢箱梁悬索

桥,加劲梁宽 27.9 m,高 3.0 m,两侧设有风嘴,内部有 U 形肋和横隔板。竖向支承体系包括在加劲梁两端设置的竖向支承支座;横向约束体系包括在加劲梁两端设置横向抗风支座;为了减小梁端纵向位移,纵向约束体系在设置粘滞阻尼器的基础上增设纵向限位装置。红河特大桥主桥的立面图和加劲梁截面如图 1 所示。由于该桥桥址区位于云南省元阳县(东经 102.835°,北纬 23.255°),地处亚热带季风区,昼夜温差大,桥梁温致效应显著,故首先基于当地气象资料,对桥址区温度极值分布情况进行研究。

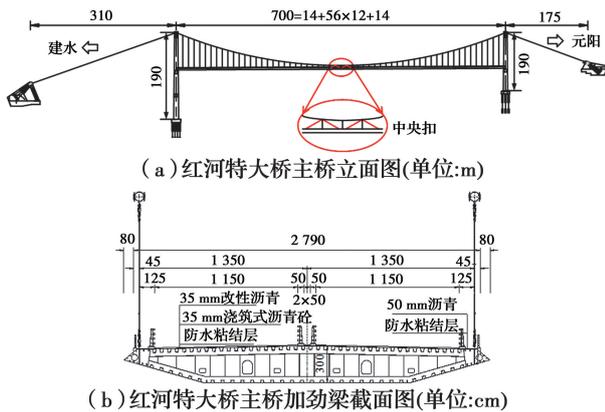


Fig. 1 Design parameters of Honghe suspension bridge

1.2 极值温度概率分布

为了研究桥址区极值温度的概率分布,从天气后报网(<http://www.tianqihoubao.com/>)中的历史天气页面获取了元阳县当地从 2011 年 2 月 4 日至 2019 年 2 月 3 日的日最高温和最低温,共包含 2 922 d 的有效温度数据。按春、夏、秋、冬 4 个季节

将上述温度极值分成 4 部分。由于年温度最大值和最小值分别出现在夏季的最高温和冬季的最低温,分别绘制夏季最高温和冬季最低温的温度概率密度分布直方图,如图 2 所示。采用 4 种常见的概率分布模型^[12-13]对温度极值的概率分布进行拟合,分别为韦伯分布(Weibull distribution)、伽马分布(Gamma distribution)、对数正态分布(Log-normal distribution)和广义极值分布(GEV: Generalized extreme value distribution),其拟合的参数如表 1 所示。

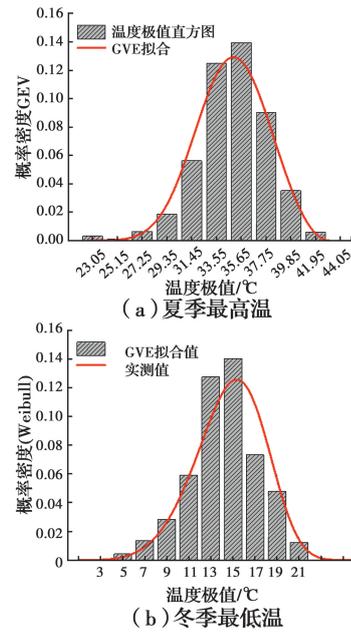


图 2 桥址区温度极值概率分布拟合

Fig. 2 Probability distribution fit of extreme temperatures at bridge site

表 1 4 种概率分布模型及拟合参数

Table 1 Fitting parameters of four proposed probability distribution models

类型	概率密度函数	拟合参数	
		夏季最高温	冬季最低温
Weibull	$f(x k,\lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right]$	$k=36.11$ $\lambda=13.85$	$k=15.96$ $\lambda=5.34$
Gamma	$f(x a,b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} \exp\left(-\frac{x}{b}\right)$	$a=143.02$ $b=0.24$	$a=18.86$ $b=0.78$
Log-normal	$f(x \mu,\sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$\mu=-3.55$ $\sigma=0.09$	$\mu=2.66$ $\sigma=0.25$
GEV	$f(x u,\alpha,k) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - k\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k-1}} e^{-\left[1 - k\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k-1}}}$	$u=-0.32$ $\alpha=3.02$ $k=33.88$	$u=-0.36$ $\alpha=3.29$ $k=13.72$

为了对比分析上述 4 种概率分布模型的拟合效果,分别采用似然值(Log-likelihood)、均方根误差

(RMSE: root mean squared error)、平均绝对误差(MAE: mean absolute error)、平均绝对百分误差

(MAPE; mean absolute percent error) 和拟合优度 (R-squared) 5 项指标对各概率曲线的拟合优劣程度进行评价, 结果如表 2 所示。上述 5 项指标中: 似然值和拟合优度 (介于 0~1 之间) 用于评价拟合的概率曲线与实测数据之间的相似程度, 因此, 其值越大, 表明概率曲线拟合程度越好; RMSE、MAE 和 MAPE 用于评价拟合的概率曲线与实测数据之间的偏离程度, 因此, 其值越小, 表明概率曲线拟合程度越好。表 2 中每列对应一个指标, 加粗的数值对应于该指标下最优的概率模型。综合 5 项指标的结

果, 夏季最高温度对应的最优概率分布模型是 GEV 分布, 冬季最低温度对应的最优概率分布模型是 Weibull 分布。图 2 为夏季最高温度极值和冬季最低温度极值的直方图和最优概率分布拟合曲线。夏季最高温度极值和冬季最低温度极值的累积概率密度的实测值和拟合值如图 3 所示。由图 2 和图 3 可以发现, GEV 分布和 Weibull 分布能很好地反映桥址区夏季最高温度极值和冬季最低温度极值的概率分布。

表 2 概率分布模型拟合结果评价指标

Table 2 Performance indexes of proposed probability distribution models

概率分布模型	夏季最高温					冬季最低温				
	RMSE	MAE	MAPE	Log-likelihood	R-squared	RMSE	MAE	MAPE	Log-likelihood	R-squared
Weibull	0.041	0.032	0.131	-185.2	0.9910	0.036	0.028	0.086	-182.2	0.9925
Gamma	0.040	0.031	0.115	-186.9	0.9919	0.048	0.038	0.149	-186.7	0.9893
Log-normal	0.042	0.033	0.123	-187.9	0.9913	0.058	0.047	0.180	-190.5	0.9856
GEV	0.039	0.031	0.122	-185.8	0.9923	0.037	0.029	0.094	-182.2	0.9922

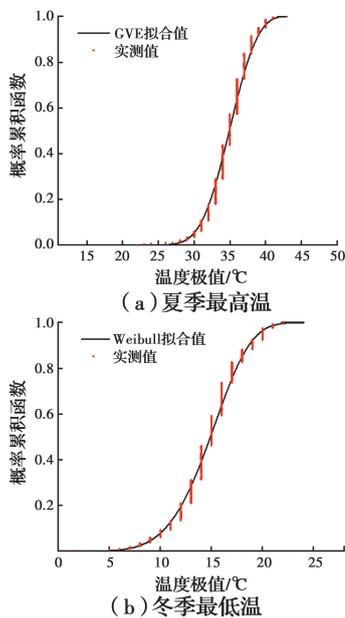


图 3 桥址区温度极值累积概率分布拟合

Fig. 3 Cumulative distribution fit of extreme temperatures at bridge site

通过得到的最优概率分布, 可进一步推算出 20、50、100 a 重现期的温度极值, 如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$\text{最高温: } T(x) = \frac{1}{1-F(x)} \quad (1)$$

$$\text{最低温: } T(x) = \frac{1}{F(x)} \quad (2)$$

式中: $T(x)$ 为重现期, d, 例如计算 20 a 重现期的温度极值时, $T(x) = 20 \times 365 = 7\,300$ d; $F(x)$ 为累积概率密度; x 为温度极值, °C。

由此分别推算出夏季和冬季 20、50、100 a 重现期的温度极值, 如表 3 所示。从表 3 可以看出, 夏季和冬季 20、50、100 a 重现期的温度极值均随重现期的增加变化不大。其中, 夏季最高温 100 a 重现期比 20 a 重现期的温度值增大 0.2 °C, 冬季最低温 100 a 重现期比 20 a 重现期的温度值减小 0.7 °C。因此, 可以选取 100 a 重现期的温度极值变化范围 (2.3~42.9 °C) 作为有限元计算的温度取值范围。

由于算例缺少桥梁的设计基准温度, 考虑到实测温度的平均值为 24.8 °C, 将 25 °C 作为基准温度 (成桥温度) 进行后续温致效应的分析。

表 3 不同重现期的温度极值

Table 3 Temperature extremes with respect to different return periods

重现期/a	夏季最高温/℃	冬季最低温/℃
20	42.7	3.0
50	42.8	2.5
100	42.9	2.3

2 数值模拟

2.1 计算模型

采用 ANSYS 建立了大跨度钢箱梁悬索桥全桥模型,并将其离散为由空间杆单元组成的“鱼骨”式有限元模型。全桥模型共计 22 062 个节点,9 561 个单元,加劲梁为钢箱梁,主塔为变截面 H 字形钢筋混凝土桥塔,均采用 Beam188 单元进行模拟。主缆和吊索采用只能承受单轴拉压的 Link10 单元。结构二期恒载的自重和抗扭惯性矩均采用 Mass21 质量单元模拟。加劲梁的边界条件由竖向、横向和纵向约束体系构成,通过耦合加劲梁梁端和桥塔横梁竖向和横向自由度的方式来模拟加劲梁两端的竖向支承和横向抗风支座;纵向约束体系则通过采用 Combin37 弹簧单元模拟液体粘滞阻尼器、采用 Combin39 弹簧单元模拟纵向限位装置、采用 Beam4 梁单元和 Combin14 弹簧单元模拟加劲梁两端的伸缩缝。桥塔塔顶和主缆约束平动,塔底和锚碇约束各个方向的平动和转动。结构整体的有限元模型和坐标系定义如图 4 所示。

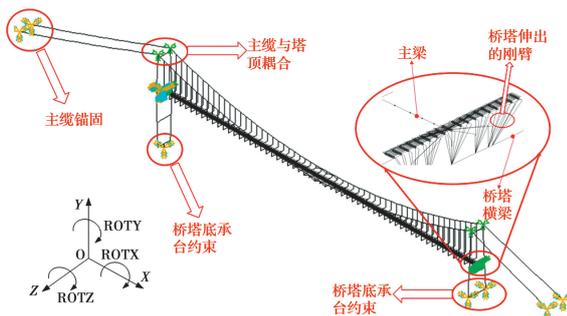


图 4 全桥有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the prototype suspension bridge

2.2 工况设置

基于有限元模型研究吊杆、桥塔、主缆、加劲梁和全桥升、降温对桥梁整体自振特性的影响,其工况设置如表 4 所示。通过历史气象数据分析可知,桥址区百年一遇的夏季最高温度为 42.9℃,冬季最低

温度为 2.3℃,可以认为桥址区的百年一遇的温度区间位于 2.3~42.9℃之间。计算中将最高温度和最低温度分别设为 50.0℃,基准温度设为 25℃。此外,模型中钢的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{℃}$ 、混凝土的线膨胀系数为 $1 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{℃}$ 。

表 4 温度变化的桥梁构件

Table 4 The bridge components subject to temperature variation

工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
吊杆	桥塔	主缆	加劲梁	全桥

3 计算结果及分析

3.1 桥梁构件升、降温对结构自振特性的影响

以 25℃作为基准温度,分别计算不同桥梁构件升、降温(工况设置如表 4 所示)导致的桥梁自振频率的变化,并由此来研究不同构件变温对桥梁自振特性的影响。桥梁基准频率如图 5 所示。由于篇幅限制,只列出了桥塔、主缆和全桥温度变化引起的桥梁自振频率的变化量,如图 6 所示。图中 L 表示横向,V 表示竖向;T 表示扭转;F 表示纵飘;S 表示对称;A 表示反对称;例如:L-S-1 表示加劲梁一阶横向对称振动。其频率变化量的计算公式为 $(f_{\text{构件温度}} - f_{\text{基准}})/f_{\text{基准}} \times 100\%$ 。

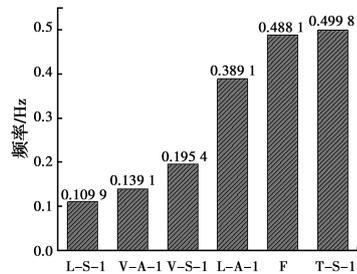


图 5 不考虑温度效应的桥梁基准频率

Fig. 5 Fundamental natural frequencies of the bridge without temperature variation

1)图 6(a)为由桥塔温度变化导致的桥梁自振频率的变化。由图 6(a)可以看出,桥塔变温主要影响加劲梁的横弯、反对称竖弯和纵飘频率,对扭转频率的影响小于 0.1%,可忽略不计。当桥塔温度升高 25℃时,加劲梁一阶反对称横弯频率提高 0.7%。此外,桥塔温度变化与桥梁各阶频率的变化量基本呈线性关系。

2)图 6(b)为桥梁自振频率的变化量随主缆变温的影响规律。如图 6(b)所示,主缆升温使桥梁各阶自振频率减小,对加劲梁反对称竖弯影响最大。

当主缆温度升高 25 ℃ 时,加劲梁竖弯频率减小达 1.0%;当主缆温度降低 12 ℃ 时,加劲梁一阶反对称竖弯、纵飘和一阶正对称扭转频率得到了很大的提高,其中加劲梁一阶反对称竖弯频率提高 12%,纵飘频率提高 3%,一阶正对称扭转频率提高 4%。

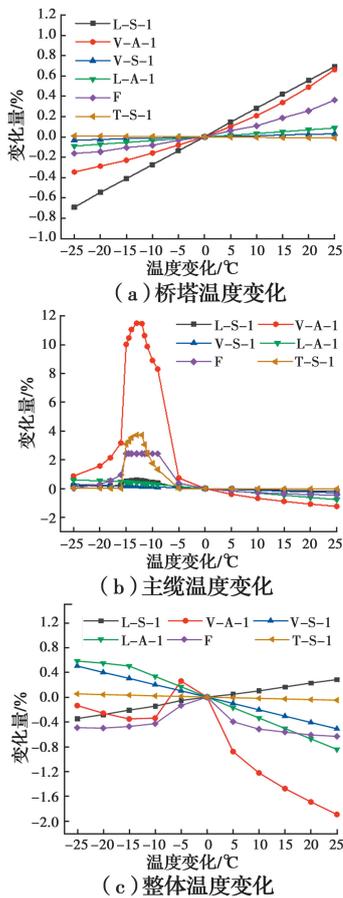


图 6 桥梁不同构件温度变化引起的自振频率的变化
Fig. 6 Variation of bridge natural frequencies due to temperature variation of different structural components

3)如图 6(c)所示,考虑全桥温度变化下,除加劲梁一阶对称横弯随全桥温度的升高线性上升以外,加劲梁一阶竖弯、一阶反对称横弯和扭转频率均随温度升高而呈减小趋势。由于受到主缆温度变化的影响,当全桥温度变化处于-10~5 ℃ 区间时,加劲梁一阶反对称竖弯和纵飘频率先增大后减小,其变化量在全桥降温 5 ℃ 时达到最大值 0.3%。当温度升高 25 ℃ 时,加劲梁反对称竖弯频率减小 2.0%,加劲梁一阶横弯、一阶对称竖弯、纵飘和扭转频率变化量均小于 1.0%,可忽略不计。

3.2 桥梁构件升、降温对结构位移的影响

为了进一步研究温度对悬索桥加劲梁梁端纵向位移、跨中竖向位移、梁端转角、桥塔塔顶位移的影

响规律^[14-15],分别提取各工况下的加劲梁位移值和全桥升降温下的桥塔位移值进行分析。

3.2.1 加劲梁位移 红河桥加劲梁的长度为 700 m,钢材的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ m/}^\circ\text{C}$,在纵向无约束情况下,每 10 ℃ 加劲梁纵向长度变化的理论值为 84 mm。通过有限元计算得出的各个工况下加劲梁纵向位移如图 7 所示。

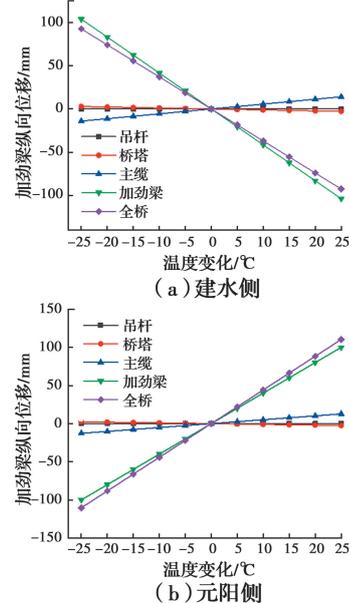


图 7 桥梁不同构件温度变化下加劲梁梁端纵向位移变化规律
Fig. 7 Longitudinal displacement of stiffening girders under temperature variations of various structural components

1)如图 7 所示,加劲梁的温度变化对其纵向位移影响显著。加劲梁温度每升高 10 ℃,建水侧加劲梁纵向位移约为 -47 mm、元阳侧位移约为 33 mm,因此,加劲梁的伸长量为 80 mm,与加劲梁在纵向无约束情况下的伸长量几乎一致。由此可知,加劲梁的纵向约束对其由温度引起的纵向位移几乎没有影响。此外,由于结构不是完全对称,由加劲梁温度变化引起的加劲梁两端纵向位移的变化率也不同,建水侧梁端纵向位移变化速率为 4.2 mm/℃,元阳侧梁端纵向位移变化速率为 4.0 mm/℃。

2)主缆温度变化也会导致加劲梁纵向位移,约为 0.8 mm/℃。吊杆和桥塔的温度变化均在一定程度上引起了加劲梁的纵向位移,但均在 0.1 mm/℃ 以内,可忽略不计。全桥温度变化引起的加劲梁纵向位移变化近似于桥梁各构件温度变化引起的加劲梁纵向位移的组合。

提取在各个工况下加劲梁跨中位置处消除自重影响后的竖向位移,如图 8 所示。

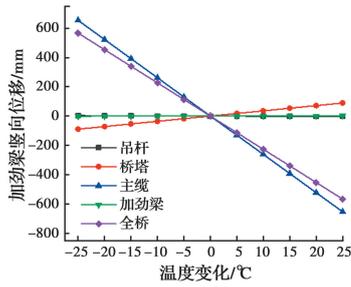


图 8 桥梁不同构件温度变化下加劲梁跨中竖向位移变化规律

Fig. 8 Vertical displacement at the mid-span of stiffening girder under temperature variations of various structural components

由图 8 可以看出,加劲梁跨中竖向位移与温度呈线性关系,加劲梁跨中竖向位移受主缆和全桥温度的影响最大。例如,主缆升温 25 °C 时,加劲梁跨中竖向位移达到 567 mm,远大于自重下加劲梁跨中位移 291 mm。

3.2.2 加劲梁转角 为了研究加劲梁梁端转角随温度变化的规律,提取各工况下加劲梁梁端转角,如图 9 所示。

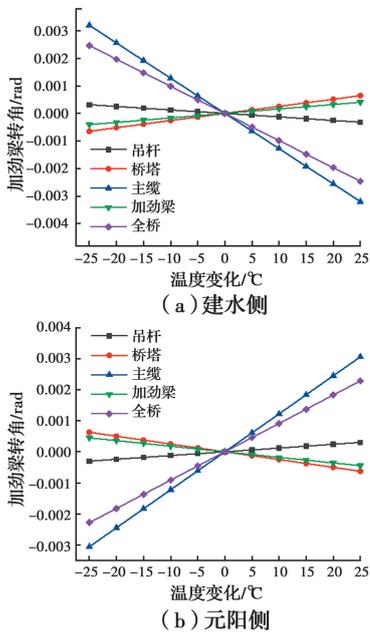


图 9 桥梁不同构件温度变化下加劲梁梁端转角变化规律

Fig. 9 Rotational displacement at stiffening girder ends under temperature variations of various structural components

从图 9 可以看出,梁端转角与桥梁整体温度呈线性相关。其中吊杆、桥塔和加劲梁温度变化产生的加劲梁端转角较小,例如当吊杆、桥塔和加劲梁温

度升高 25 °C 时,加劲梁两端的转角值均小于 0.001 rad。而引起加劲梁梁端转角变化的主要因素是由于主缆的温度变化,例如,当主缆升温 25 °C 时,建水侧和元阳侧加劲梁两端的转角变化值分别为 -0.003、0.003 rad。主缆温度变化能导致梁端转角显著变化的原因是由于温度升高(降低)使主缆松弛(张紧)导致加劲梁的跨中下挠(上挠),从而增大了加劲梁两端的转角。

3.2.3 桥塔塔顶位移 建水侧的桥塔高度为 190 m,元阳侧桥塔的高度为 130 m,两个桥塔由相同温度变化导致的竖向位移并不一致。假设混凝土的线膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/}^\circ\text{C}$,则建水侧桥塔和元阳侧桥塔高度变化的理论值分别为 1.9 mm/°C、1.3 mm/°C,相差约为 31.6%。由全桥升降温引起的桥塔顶部竖向和纵桥向位移变化如图 10 所示。图 10 所示的桥塔顶部竖向位移与温度成正比,当温度升高 25 °C 时,元阳侧桥塔竖向位移比建水侧小约 15 mm。对于桥塔顶部纵桥向位移,当温度升高 25 °C 时,建水侧桥塔塔顶纵桥位移为 80 mm,元阳侧塔顶纵桥位移为 -40 mm。

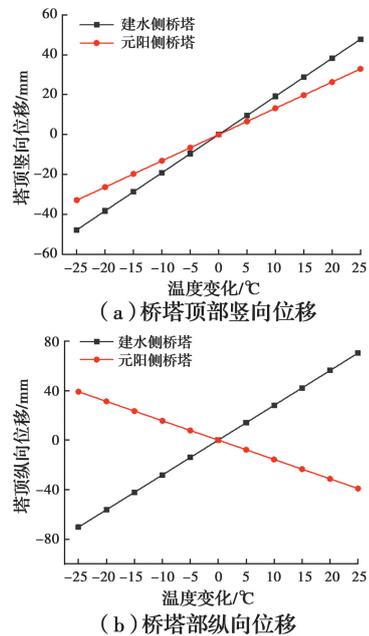


图 10 全桥整体温度变化下桥塔顶部位移变化规律

Fig. 10 Displacement at the top of the bridge pylon under temperature variations of entire bridge structure

3.3 桥梁纵向约束体系对结构温度效应的影响

3.3.1 中央扣对结构位移和内力的影响 中央扣对大跨度悬索桥的静动力性能有较大的影响。设置

中央扣的主要目的是用于提高加劲梁的纵向刚度,限制加劲梁的纵向位移,并影响跨中短吊索的受力性能。为了研究中央扣对桥梁温致效应的影响,对比计算了设置和没有设置中央扣 2 种模型在不同温度变化下加劲梁位移以及主缆和吊杆的内力,如图 11 和图 12 所示。图中温度变化的取值为 -20 、 0 、 20 $^{\circ}\text{C}$,加劲梁、主缆和吊杆间距为 3 个加劲梁节段(即 36 m)。

1)如图 11 所示,全桥升温 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,设置中央扣使加劲梁纵向位移增大大约 5 mm。是否设置中央扣对加劲梁的竖向位移的影响可以忽略不计。

2)如图 12 所示,设置中央扣后其附近的主缆内力有较小变化。由于桥塔对主缆纵桥向的约束作用,主跨和边跨交界处主缆的内力发生突变。此外,在中央扣附近的短吊杆内力发生了较大突变,主要是由于中央扣提高了全桥的纵桥向刚度,而温度的升降改变了主缆和吊杆的长度,使中央扣附近的主缆和短吊杆发生内力重分布。

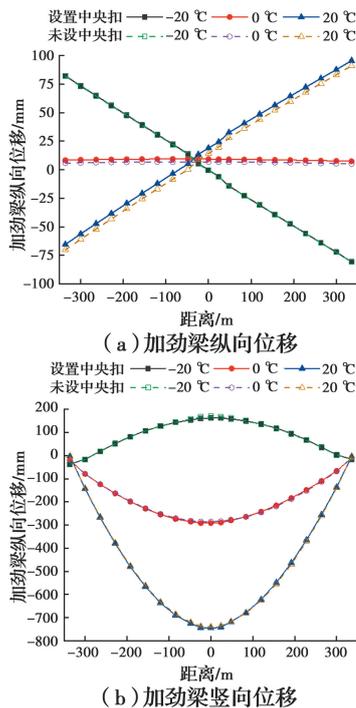


图 11 是否设置中央扣对不同温度下加劲梁位移的影响

Fig. 11 Displacement of stiffening girder due to temperature variations with and without central buckle

3.3.2 竖向支座 全桥模型中加劲梁两端共设置了 4 个竖向球型支座,该支座通过摩阻力来提供加劲梁的纵向约束。通过计算,在重力作用下单个支座摩阻力为 $F_y = 1.3908 \times 10^6 \times 0.03/2 \text{ N} = 2.08 \times 10^4 \text{ N}$,其

中 1.3908×10^6 为有限元模型中提取的支座反力,支座的摩擦系数为 0.03,由于加劲梁两端各设两个球形支座,故摩阻力需除以 2。为了研究支座摩阻力对桥梁的温致效应的影响,设置了 6 种不同的摩阻力,同时设置了 3 种不同的温度工况,计算结果如表 5 所示。由表 5 可知,对于同一个温度,不同的摩阻力对加劲梁两端纵向位移的影响很小(2.4%以内)。因此,支座摩阻力对体系温差作用下加劲梁端位移的影响很小。加劲梁端位移只与体系温度有关,支座对大跨度钢箱梁悬索桥温致效应的影响可忽略不计。

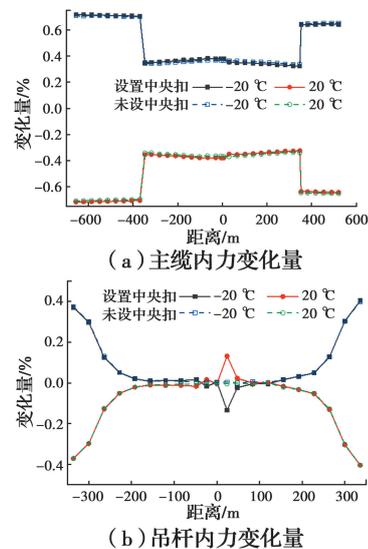


图 12 是否设置中央扣对不同温度下主缆和吊杆内力的影响

Fig. 12 Internal force variation of main cable and suspender due to temperature variations with and without central buckle

3.3.3 伸缩缝对结构位移的影响 全桥模型的加劲梁两端分别设置了伸缩缝。伸缩缝的工作原理主要靠伸缩缝的上、下弹簧和纵桥向的控制弹簧来对加劲梁提供纵向约束。通过调节 3 个弹簧的刚度来研究伸缩缝对加劲梁梁端位移的影响,结果如表 6 所示。由表 6 可知,伸缩缝中弹簧刚度的变化对加劲梁两端纵向位移几乎没有影响。因此,伸缩缝对体系温差作用下加劲梁端位移的影响也很小。

通过计算结果可知,在体系温差作用下,梁体沿纵向产生伸缩变形,如果变形被约束且约束抗力很大,将在梁体内产生很大的内力;若约束的抗力较小,如支座摩阻力或伸缩缝弹簧引起的阻力,无法约束梁体在体系温差作用下的变形。故支座摩阻力和伸缩缝对大跨度钢箱梁悬索桥温致效应的影响可忽略不计^[16]。

表5 考虑不同支座摩擦阻力和温度组合下加劲梁两端纵向位移

Table 5 Longitudinal displacement at stiffening girder ends under different friction force and temperature mm

梁端位置	温度/°C	摩擦阻力 0	摩擦阻力	摩擦阻力	摩擦阻力	摩擦阻力	摩擦阻力
			0.50×21 kN	0.67×21 kN	1.00×21 kN	1.33×21 kN	1.67×21 kN
建水侧	-20	83.780	82.814	82.599	82.261	82.010	81.818
	0	10.053	8.984	8.740	8.351	8.056	7.823
	20	-63.673	-64.846	-65.118	-65.558	-65.899	-63.529
元阳侧	-20	-84.018	-82.556	-82.008	-80.881	-79.745	-78.622
	0	9.785	8.357	8.000	7.394	6.893	6.465
	20	103.590	99.271	98.008	95.670	93.530	103.530

表6 伸缩缝纵向刚度对加劲梁两端纵向位移的影响

Table 6 The longitudinal stiffness of expansion joint on the longitudinal displacement of stiffening girder ends mm

梁端位置	弹簧位置	弹簧刚度	弹簧刚度	弹簧刚度	弹簧刚度	弹簧刚度
		比率 0.05	比率 0.1	比率 1	比率 10	比率 20
建水侧	上支撑弹簧	8.352	8.352	8.351	8.352	8.353
	下支撑弹簧	8.351	8.351	8.351	8.351	8.352
	控制弹簧	8.351	8.352	8.351	8.352	8.351
元阳侧	上支撑弹簧	7.395	7.395	7.394	7.395	7.395
	下支撑弹簧	7.394	7.394	7.394	7.394	7.395
	控制弹簧	7.394	7.395	7.394	7.395	7.394

4 结论

基于地区的实测温度数据,得到了夏季最高温和冬季最低温的最优概率分布模型。基于最优概率分布模型,进一步推算出了重现期为 20、50、100 a 的温度极大值和极小值。建立了 ANSYS 有限元模型,分析了桥梁不同构件升降温对桥梁自振频率和位移的影响。分析了中央扣、竖向支座和伸缩缝等纵向约束体系对桥梁温致效应的影响。主要研究结论如下:

1) 全桥自振频率,除加劲梁一阶对称横弯频率外,其余振型的频率与全桥的温度呈负相关。此外,主缆降温对桥梁自振频率的影响非常显著。当主缆降温 12 °C 时,加劲梁反对称竖弯频率提高了 12%。桥塔和全桥升降温 25 °C 引起的桥梁自振频率变化量都在 5% 以内。

2) 桥梁不同构件升、降温引起的桥梁位移与温度均呈线性相关。加劲梁的纵向位移受加劲梁温度变化的影响最显著,建水测梁端和元阳侧梁端的纵向位移变化率分别为 4.7、3.3 mm/°C。此外,加劲梁的竖向位移和转角主要受主缆温度变化的影响,在主缆升温 25 °C 时,加劲梁的竖向位移达到 567 mm,转角

为 0.004 rad。由于两岸桥塔高度不同,桥塔的纵向和竖向位移不一致。

3) 当桥梁发生整体温度变化时,中央扣的设置会导致中央扣附近短吊杆的内力发生突变,但不会影响加劲梁的纵向和竖向位移。此外,竖向支座摩擦阻力和伸缩缝对加劲梁纵向位移的影响均很小,可忽略不计。

4) 基于实测的温度数据,建立了三维杆系模型。研究了桥梁不同构件升降温对钢箱梁悬索桥温致效应的影响,但考虑精细化模型的桥梁温致效应还未开展,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] XIA Y, XU Y L, WEI Z L, et al. Variation of structural vibration characteristics versus non-uniform temperature distribution [J]. Engineering Structures, 2011, 33(1): 146-153.
- [2] XU Z D, WU Z S. Simulation of the effect of temperature variation on damage detection in a long-span cable-stayed bridge [J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(3): 177-189.
- [3] ZHOU G D, YI T H. A summary review of

- correlations between temperatures and vibration properties of long-span bridges [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014: 1-19.
- [4] XU X, HUANG Q, REN Y, et al. Modeling and separation of thermal effects from cable-stayed bridge response [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(5): 04019028.
- [5] 邓小伟, 石雪飞, 阮欣. 超大跨径钢斜拉桥的温度荷载调研与温度效应分析[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2010, 23(3): 57-62.
DENG X W, SHI X F, RUAN X. Investigation and analysis of temperature acts on long-span steel cable-stayed bridges [J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute*, 2010, 23(3): 57-62. (in Chinese)
- [6] 彭友松. 混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
PENG Y S. Studies on theory of solar radiation thermal effects on concrete bridges with application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [7] 周毅, 孙利民, 谢谟文. 温度对斜拉桥跨中竖向位移的作用机理研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(8): 46-54.
ZHOU Y, SUN L M, XIE M W. Temperature effects on the mid-span vertical displacement of a cable-stayed bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(8): 46-54. (in Chinese)
- [8] 邓扬, 李爱群, 丁幼亮. 大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(5): 54-58.
DENG Y, LI A Q, DING Y L. Research and application of correlation between beam end displacement and temperature of long-span suspension bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(5): 54-58. (in Chinese)
- [9] YANG D H, YI T H, LI H N, et al. Monitoring and analysis of thermal effect on tower displacement in cable-stayed bridge [J]. *Measurement*, 2018, 115: 249-257.
- [10] 陈策, 史长华, 缪长青. 环境温度对三塔两跨悬索桥结构静动力特性的影响[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2014, 38(4): 744-748.
CHEN C, SHI C H, MIAO C Q. Effect of environmental temperature on static & dynamic behavior of three-tower & two-span suspension bridge [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2014, 38(4): 744-748. (in Chinese)
- [11] MENG Q L, ZHU J S. Fine temperature effect analysis-based time-varying dynamic properties evaluation of long-span suspension bridges in natural environments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(10): 04018075.
- [12] 刘扬, 张海萍, 邓扬, 等. 基于实测数据的悬索桥钢箱梁温度场特性研究[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(3): 56-64.
LIU Y, ZHANG H P, DENG Y, et al. Temperature field characteristic research of steel box girder for suspension bridge based on measured data [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(3): 56-64. (in Chinese)
- [13] 丁幼亮, 王晓晶, 王高新, 等. 珠江黄埔大桥钢箱梁温度长期监测与分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(5): 945-949.
DING Y L, WANG X J, WANG G X, et al. Long-term temperature monitoring and analysis of steel box girders of Pearl River Huangpu Bridge [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(5): 945-949. (in Chinese)
- [14] 王统宁. 大跨径缆索承重桥梁梁端位移及组合方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
WANG T N. Research on displacement and combination method of displacement action effects for long-span cable supported bridges [D]. Xi'an: Changan University, 2010. (in Chinese)
- [15] 刘森林. 基于监测数据的长大跨桥梁温度应力分析与安全评价[D]. 南京: 东南大学, 2017.
LIU S L. Temperature stress analysis and safety evaluation of long span bridge based on monitoring data [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [16] GUO T, LIU J, ZHANG Y F, et al. Displacement monitoring and analysis of expansion joints of long-span steel bridges with viscous dampers [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(9): 04014099.

(编辑 胡玲)