

DOI:10.15951/j.tmgcxb.2019.05.006

桥梁结构日照温度作用研究综述

刘永健¹ 刘 江¹ 张 宁^{1,2}

(1. 长安大学, 陕西西安 710064; 2. 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为深化对桥梁结构日照温度问题的认识, 从桥梁结构日照温度场分布特性、研究方法、温度作用模式与取值方式等方面, 综述桥梁结构日照温度作用国内外研究现状, 探讨后续的研究重点和发展方向。研究表明: 桥梁温度场有着典型的周期性时程特征和不均匀空间特征, 主要受结构形式、气候和地理环境 3 类因素的影响, 存在明显的桥型间和地域性差异; 桥梁日照温度场以数值模拟与实桥测试为主要研究方法, 数值模拟中太阳辐射和对流换热的选取尚不统一, 基于气象数据开展长期实桥测试十分必要, 且应重视测点布置以充分反应桥梁温度非线性分布规律; 现有研究多采用多次抛物线、指数曲线和多折线来描述桥梁的温度梯度形式, 普遍基于气象参数相关性和统计分析来获得温度作用取值; 桥梁日照温度作用的主要发展方向应关注于组合桥梁温度场的实桥测试与温度作用模式的研究、不同地域和复杂地形条件下桥梁温度作用实测分析, 以及大跨复杂结构桥梁日照温度场精细化模拟。

关键词: 桥梁工程; 日照温度作用; 综述; 数值模拟; 实桥测试; 气象参数; 统计分析

中图分类号: U441⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)05-0059-20

Review on solar thermal actions of bridge structures

Liu Yongjian¹ Liu Jiang¹ Zhang Ning^{1,2}

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To improve the understanding of the solar thermal actions of bridge structure, the domestic and overseas research status about the distribution characteristics, the research methods, the thermal action patterns and the values, etc. of solar temperature field of bridge structure were summarized and analyzed. The future research emphasis and directions were discussed. The results show: typical time-history periodic and spatially non-uniform characteristics of temperature field of bridge structure can be observed, and the characteristics, which are mainly affected by three types of factors including structural type, climate condition and geographical environment, have obvious difference due to the differences of bridge type and region. Numerical simulations and field tests are employed as the main research methods of analyzing the temperature field of bridge structure. Because the boundary conditions of solar radiation and heat convection haven't been unified in numerical simulations, the long-term field testing of bridge based on meteorological data is still very necessary, and enough emphasis should be put on the arrangement of measurement points to completely reflect the nonlinear distribution of temperature field of bridge structure. In the existing researches, multiple parabola, exponential curve and broken lines have been commonly used to describe the temperature gradient of bridge structure, and the temperature values were generally attained based on meteorological data correlation and statistical analysis. The research directions of solar action on bridge structure may mainly include field test on temperature distribution and thermal action patterns of composite bridge structure, measurement on temperature distribution of bridge structure in different regions and complex terrains, as well as the fine numerical simulations on the solar temperature field of complex large-span bridges.

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2014318363230, 2014318802220)、
内蒙古自治区交通运输厅建设科技项目(NJ-2018-27)和青海省
重点研发计划(2017-SF-137)

作者简介: 刘永健, 博士, 教授

收稿日期: 2018-03-02

Keywords: bridge engineering; solar thermal actions; review; numerical simulation; field test of bridge; meteorological parameters; statistical analysis

E-mail: lyj.chd@gmail.com

引 言

桥梁结构长期暴露于露天环境中,在太阳辐射、日温变化、年温变化、寒流等多因素的影响下,结构内部逐渐形成不均匀温度分布,对桥梁结构的内力影响显著,由此产生的温度应力与变形在桥梁设计荷载中占有很大比重。在太阳辐射条件极端的地区,日照温度作用的影响甚至超过恒载和活载成为第一控制作用,对桥梁的耐久性与安全运营造成较大的危害^[1-3]。

自从 20 世纪 50 年代前联邦德国学者在混凝土桥墩裂缝调查分析中认识到温度应力的重要性以来,在美国、德国、新西兰及中国等世界范围内相继出现了因温度作用引起的混凝土桥梁的裂损和支座的破坏,从而严重影响结构正常使用,且维修加固困难、更新改造费用昂贵、拆除污染环境,给世界各国的工程建设造成了巨大的损失。温度效应对桥梁结构的影响远不止如此,70 年代,在奥地利和意大利均存在悬臂施工的连续梁桥因施工不当导致温度应力过大发生垮塌的现象^[4-5]。随着不同桥梁结构形式和斜拉桥、悬索桥等大跨复杂结构桥梁的逐渐增多,温度作用在钢-混凝土组合梁桥面板开裂和界面损伤、正交异性钢桥面板疲劳、钢管混凝土结构脱粘以及大跨桥梁动力特性等方面的影响亦开始显现^[6-11]。

因此,桥梁结构日照温度作用的研究越来越多地引起国内外学者的关注和重视,欧洲各国及美国各州交通厅(D.O.T)的各类桥梁的裂缝调查报告中均涉及对日照温度作用的分析^[12-14]。要充分认识温度作用对桥梁结构的破坏机理,首先应充分研究日照作用下桥梁结构的温度分布特性。早期的研究主要基于简单边界条件的理论分析和简单结构的二维数值模拟,研究方法过于简化,研究范围过于狭窄,难以反应桥梁结构的真实温度场和地域差异性。当前的研究主要以桥梁温度作用取值和复杂桥梁温度分布特性为重点,主要以长期试验测试、基于气象参数的有限元数值模拟和数学统计模型的建立为主要研究方法,研究内容涵盖了桥梁温度作用的影响因素、日照辐射理论的修正、不同地域不同

主梁形式的温度梯度模式和大跨复杂结构桥梁温度分布的精确模拟技术等多个方面。相关的研究成果积累了大量桥梁结构温度分布数据,深化了对桥梁结构温度分布特性的认识,逐步补充了规范关于温度作用相关条款的不足。但随着钢与组合结构桥梁在我国的迅速发展,大跨复杂桥梁结构向极寒极热、峡谷山区等气候地理环境特殊地区的推进,相关研究仍相对滞后,难以满足如今全寿命周期设计理论及耐久性的实际需求。

因此,总结现有桥梁结构日照温度作用的研究现状和当前研究面临的主要问题,展望未来研究的发展趋势和主要方向,具有重要的现实意义。

1 温度场分布特性

1.1 时程分布特性

日照作用下,桥梁结构内部温度场随着外界环境(如日照、气温和风等)而变化,受太阳辐射和气温周期性规律的影响,桥梁结构温度场在年和日 2 个时间尺度上表现出明显的周期性分布特性,如图 1 所示。现有研究表明^[15-18]:以年为周期的测点温度时程变化接近正弦曲线,受日气温及太阳辐射周期变化的影响,测点温度真实值在曲线上下波动;以日为周期的温度时程曲线亦可采用正弦曲线进行拟合^[17],但拟合效果并不理想,傅里叶函数则更能准确反映桥梁结构温度的日变化规律^[19],受风速、遮挡等因素的影响,测点温度的真实值同样在拟合曲线的上下波动。

太阳辐射、气温等均作用于桥梁结构表面,进一步由外向内进行热量传递,越靠近结构表面的部位温度变化得越快,内部温度的变化则滞后于外部

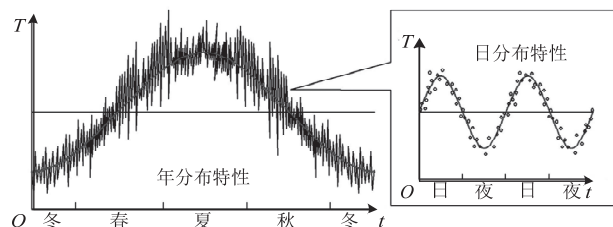


图 1 桥梁结构温度场时程分布特性

Fig.1 Time-history characteristic of temperature distribution of bridge structures

一定时间,即不同深度测点的温度时程曲线存在一定的相位差,如图 2 所示。决定内部热量传递的方式主要依靠桥梁结构材料的导热系数,混凝土材料的导热系数约为钢材的 1/50,因此,混凝土桥梁内部温度变化较钢桥更为滞后。

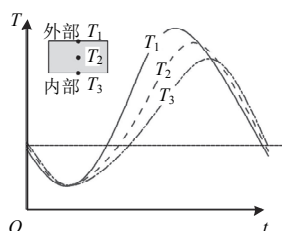


图 2 不同深度测点典型温度时程曲线

Fig.2 Typical time-history curves of temperature at measurement points in different depths

1.2 空间分布特性

由于测点温度变化存在滞后性,在同一时刻,桥梁结构空间温度呈现不均匀分布。桥梁结构沿纵向多为细长构件,现有学者^[20-21]已通过实测表明沿桥梁纵向温度分布可假定均匀,故不均匀的温度分布主要反映在桥梁截面横、竖 2 个方向,以及局部板厚方向。

桥梁结构温度分布受日照和气温的影响显著。以混凝土箱梁为例,当顶板或腹板受到日照作用时,由于热量传递的滞后性,在沿主梁竖向及横向的温度不均匀分布将十分明显。对于钢-混凝土组合梁,两种材料导热性能差异巨大,在钢-混交界的局部位置,其温度分布的不均匀程度更为显著。同时,地面将太阳辐射反射到主梁底面,在主梁底部一段范围内也会存在温差。对于混凝土主梁,各部位的内表面长期不接受太阳照射,板厚方向会形成外高内低的温度分布,一般可近似采用线性或指数函数拟合,而钢梁由于板件较薄,且导热性能良好,一般不考虑板厚方向的温差。大量实测数据表明^[21-24]:桥梁截面温度分布不均匀程度最高一般发生在太阳辐射最强的下午 13:00~15:00,其中钢桥较混凝土桥更接近日照最强的时刻,而日出之前的 1h 之内桥梁截面温度分布最为均匀。图 3 和图 4 分别给出了白天日照和夜晚降温时混凝土箱梁和钢-混组合梁的典型温度分布。

1.3 日照温度场的影响因素

深刻认识桥梁温度分布的主要影响因素及其效应,是进行桥梁日照温度问题研究的重要基础。早期, Zuk^[25]对多座公路桥梁的温度场进行了分析,认为桥梁温度直接受到气温、风速、湿度、太阳辐射

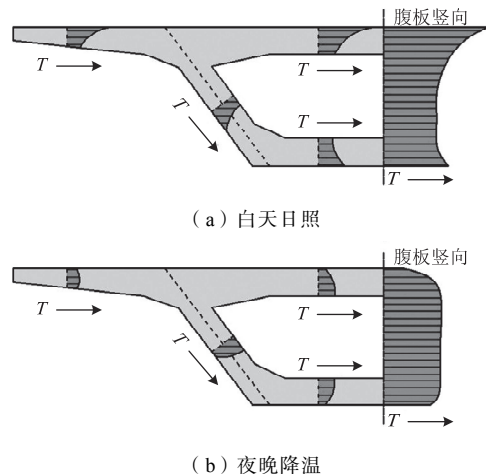


图 3 混凝土箱梁典型温度分布

Fig.3 Typical temperature distribution of concrete box girder

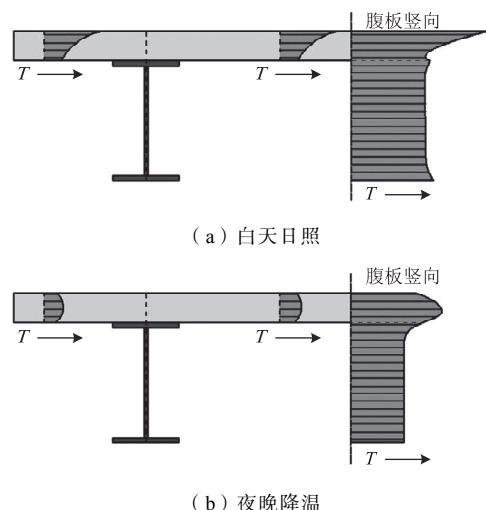


图 4 钢-混凝土组合梁典型温度分布

Fig.4 Typical temperature distribution of steel-concrete composite girder

强度和材料类型等因素的影响。随着对温度作用影响因素的认识逐渐加深,总结现有的研究成果^[26-29],可以将影响桥梁温度场的因素归结为桥梁结构因素、气候环境因素和地理环境因素三类,如图 5 所示。其中,桥梁结构因素包括:桥梁走向、桥梁部件材料(钢、混凝土)、表面涂装、截面形式(如开口截面、闭口截面)及各部件尺寸(腹板高度、板件厚度、悬臂板长度及铺装层厚度等);气候环境因素包括:太阳辐射、大气温度、风速等;地理环境因素则包括:桥位的经度、纬度、海拔、地表状况(地面反射率)和地形条件等。现有学者的研究表明^[30-33]:

(1) 南北走向的桥梁横向温差显著大于东西走向的桥梁;混凝土材料导热性能差,一般截面温

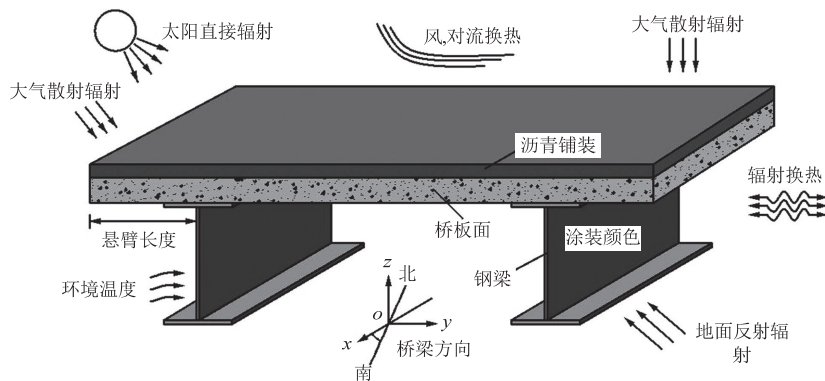


图 5 影响桥梁结构温度场的主要因素

Fig.5 Main factors affecting the temperature field of bridge structure

度场较钢梁更不均匀；白色涂装吸收太阳辐射的能力显著低于深色涂装，可以降低温度分布的不均匀程度；开口截面因风速作用明显，故温度分布较闭口截面更为均匀；桥梁部件尺寸越大则温度分布越不均匀，由于钢结构导热性能好，采用的板厚较小，局部的温度分布一般不考虑，悬臂板在腹板面积上对太阳辐射形成遮挡，会增加桥梁整体竖向温差，但对腹板局部温度的不均匀程度有所缓解。

(2) 太阳辐射的增强和大气温差的增大使桥梁温度分布趋于不均匀，会增大截面温差和温度效应，不利于桥梁结构受力，其中，太阳辐射的影响最为显著；气温的整体升高和风速的增大会使截面温度趋于均匀，但过高的气温会引起较大的温度变形。

(3) 地理环境与气候条件会相互影响，桥位纬度越低、海拔越高，太阳辐射则越强，则桥梁温度分布越不均匀；地面反射率较高，如水面或积雪的反射率可以达到 0.6~0.8，会增加主梁底面的太阳辐射量，增大底部温度分布的不均匀程度，而普通地面的反射率为 0.2，影响相对较小；桥位处复杂的地形条件（如高山、峡谷）会对桥梁的局部产生遮挡，对桥梁温度分布的影响比较复杂，需要针对特定情况进行分析。

2 日照温度场分析方法

关于桥梁结构日照温度场的研究方法，总体上可以分为三类：理论分析、数值模拟和试验测试^[34-35]。

桥梁日照温度场的研究综合了传热学、气象学、天文学及基础数学等一系列复杂学科，理论分析难以就基本的热传导方程和复杂的边界条件给出理论解析解。随着计算机技术的快速发展，有限元

数值模拟技术逐渐代替理论分析，只要选取的边界条件足够准确，计算结果就可以逼近真实的桥梁温度分布状态。试验测试通过在实桥或是缩尺模型布置温度传感器，连续观测即可得到桥梁最为真实的温度分布状态。

2.1 数值模拟

日照作用下，桥梁结构温度分布取决于与外界的热交换和内部的热传导两方面，数值模拟的精确与否取决于此。内部的热传导遵循 Fourier 在 1822 年提出的热传导偏微分方程：

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

式中： t 、 x 、 y 、 z 分别为确定温度场所对应的时间与空间坐标； T 为桥梁结构在 t 时刻 (x, y, z) 点的温度； ρ 、 c 、 k 分别为材料的密度、比热容和导热系数； Q 为结构单位体积自身产生的热量，一般为混凝土的水化热效应。

通过大量实测可知，沿桥梁构件长度方向的热传递可以忽略。日照桥梁温度场分析多为施工完成之后的长期效应，无施工期的混凝土水化热的影响，内部生热 Q 为 0。基于以上假设，式 (1) 即可简化为二维形式，大量的有限元数值模拟多采用如此简化^[15,19,27,30,36-38]，即：

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

为求得桥梁单一方向温度分布，可进一步将微分方程简化为一维形式，即：

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} & \text{竖向温度分布} \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} & \text{横向温度分布} \end{cases} \quad (3)$$

早期学者进行桥梁结构温度场计算时多采用有限差分法或有限单元法自编程序进行计算,随着通用有限元商业软件的逐渐成熟,有限元通用软件如 ABAQUS、ANSYS 等成为桥梁结构温度场数值模拟的首选。桥梁结构内部热传导理论相对成熟,决定数值模拟精确程度的关键问题则在于日照边界条件的选取,日照作用下,桥梁结构与外界换热方式主要包括太阳辐射、对流换热和辐射换热三种,其中以太阳辐射强度的计算和对流换热系数的选取最为复杂,以下对该两点进行详细的讨论。

2.1.1 太阳辐射计算模型

到达结构表面的太阳辐射主要分为太阳直接辐射、散射辐射以及反射辐射。太阳直接辐射是指太阳以平行光线的形式直接透射到结构表面的辐射,太阳散射辐射是指太阳辐射通过大气时,受到大气中气体、尘埃、气溶胶等的散射作用,从天空的各个角度到达结构表面的辐射,其两者主要与大气透明度、太阳高度角和海拔等因素有关。反射辐射主要指地表物体对直接辐射和散射辐射反射后到达结构表面的辐射,其强弱取还决于地表反射率。其中直接辐射和散射辐射最为复杂,常用的计算模型主要包括 ASHRAE 模型、Hottel 模型和幂指数模型三种。

(1) ASHRAE 模型

美国采暖、制冷和空调协会推荐采用的 ASHRAE 模型是较为广泛采用的晴天辐射模型,其通过 3 个经验系数来建立直接辐射和散射辐射的计算方法^[39],即

$$I_{bN} = A e^{-B/\sin h} \quad (4)$$

$$I_{dH} = C I_{bN} \quad (5)$$

式中: I_{bN} 和 I_{dH} 分别为法向直接辐射和水平散射辐射; h 为太阳高度角; A 、 B 、 C 分别为表观太阳辐射、大气消光系数和散射辐射系数,均为随日期变化的函数,三者均根据美国太阳辐射的实测数据得到。宋爱国等^[40-42]基于不同地区太阳辐射实测数据对 ASHARE 模型中经验系数进行了修正,建立了若干地区的晴天太阳辐射模型。

(2) Hottel 模型

太阳辐射也可以通过计算太阳直射透射比 τ_b 和散射透射比 τ_d 的方式进行计算,即:

$$I_{bH} = \tau_b I_0, \quad I_{dH} = \tau_d I_0 \quad (6)$$

式中: I_{bH} 为水平面太阳直接辐射强度; I_0 为大气层外切平面上的太阳辐射强度。

Hottel 于 1976 年提出了一种以太阳高度角和海拔

高度计算太阳直接透过比的计算公式 $\tau_b = a_0 + a_1 e^{-k/\sin h}$,建立了计算太阳辐射的 Hottel 模型^[43],式中的 a_0 、 a_1 和 k 均为考虑海拔和气候类型的经验系数。太阳散射辐射透过比 τ_d 一般采用 Liu 和 Jordan 等^[44]提出的公式 $\tau_d = 0.271 - 0.294 \tau_b$ 进行计算。Hottel 模型是晴空模型,一般适用于大气能见度高于 23km,海拔低于 2500m 的情况,在我国合肥等地区,该模型的准确性得到了验证^[45]。

(3) 幂指数模型

阳光经过大气层时,太阳直接辐射强度按指数规律衰减,Kehlbeck^[32]在对混凝土桥梁温度应力的研究中,基于 Bouguer-Lambert 定律提出采用幂指数模型计算到达地表的太阳直接辐射强度,即:

$$I_{bN} = I_0 P^m \quad (7)$$

式中: P 为复合大气透明系数,受空气中水蒸气、烟气、尘埃、气溶胶和海拔高度等的影响; m 为大气质量, $m=1/\sin h$ 。

王毅^[15]、Dilger^[30]、Chen^[31]、Elbadry^[46]等均采用 $P = 0.9^{t_u k_a}$ 计算复合大气透明度系数,采用林克浑浊度系数 t_u 来考虑季节、大气污染等对大气透明度的影响,但 t_u 同样是采用经验公式进行计算。大气透明度系数也可直接通过观测按经验计算,方先金^[47]利用全国 68 个甲种太阳辐射观测站的数据,通过统计给出了各站点晴天大气复合透明度系数的累年平均值,吴继臣^[48]和徐刚^[49]等在 1961~1977 年太阳辐射月平均值数据的基础上,通过迭代计算给出了冬季我国北方主要城市的大气透明度系数,为我国桥梁结构日照边界条件的计算提供了参考。

可以看到,ASHRAE 和 Hottel 模型公式中的主要系数均通过实测数据根据经验得到,其经验系数的取值并不具备普适性。与之相比,幂指数模型计算太阳直接辐射时有较好的理论基础,但林克浑浊度系数 t_u 仍然采用经验公式计算。故要建立适用于某一地区的太阳辐射计算模型,需要基于大量的实测数据,在无实测数据的情况下,可以采用 Hottel 模型和幂指数模型进行计算。

2.1.2 对流换热系数

对流换热是指流体流经固体时流体与固体表面之间的热量传递现象,对流换热热流密度 q_c 可以通过牛顿换热公式进行计算,即:

$$q_c = h_c (T_a - T) \quad (8)$$

式中: T_a 和 T 分别为大气和桥梁结构表面温度; h_c 为对流换热系数,其取值与结构表面的粗糙程度、风速

及大气温度等因素有关,尚无一统计的计算公式。

表 1 总结了现有文献常用的对流换热系数表达式。可以看到,风速较小时,对流换热系数表达式一般由自由对流和强制对流两部分组成。自由对流由结构表面和大气温度差造成的空气运动产生,但多数公式对此进行了假设,采用一定值进行表示;强制对流由风速引起,当风速较大时,自由对流则可以忽略。表中的所有表达式均考虑了风速的影响,仅表达式 4 和 5 同时考虑了大气与结构表面温差的

影响。文献[28]采用表 1 中各对流换热系数表达式对一混凝土箱梁桥的温度场计算效果进行了对比,认为表达式 4 综合考虑了结构与大气温差和风速的影响,较其他公式更能准确地计算混凝土箱梁结构的温度,同时建议计算混凝土箱梁的温度梯度时,对流换热系数可以按以下范围进行取值:箱内,3.5~6.0W/(m²·K);顶板上侧,10.41~11.6W/(m²·K),底板下侧,4.09~7.85W/(m²·K),腹板外侧,7.50~9.70W/(m²·K)。

表 1 对流换热系数的计算公式

Table 1 Calculation formula of convective heat transfer coefficient

编号	公式来源	计算公式	考虑因素	符号说明
1	文献[50]	$h_c = 6 + 3.7v$	风速	h_c 为对流换热系数;
2	文献[51]、 [52]、[53]	$h_c = \begin{cases} A + Bv & v < 5\text{m/s} \\ C v^{0.78} & v \geq 5\text{m/s} \end{cases}$	风速	v 为风速; A 、 B 、 C 均为参数, 在不同文献中取值不同;
3	文献[54]	$h_c = 4.35 + 3.0v \quad v \leq 5\text{m/s}$ $h_c = 6.31v^{0.656} + 3.25e^{-1.91v}$	风速	C_h 为热流常数; T_a 为大气温度;
4	文献[32]	$h_c = 2.6\sqrt{ T_s - T } + 4.0v$	大气与结构温差、风速	T 为桥梁结构表面温度;
5	文献[39]、 [55]	$h_c = 0.2782C_h \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{avg}} + 17.8} \right)^{0.181} \cdot T_s - T ^{0.266} \cdot \sqrt{1 + 2.8566v}$	大气与结构温差和 平均温度、风速	T_{avg} 为结构与大气平均温度,可近似 按 $(T + T_a)/2$ 计算; $h_{c,t}$ 、 $h_{c,b}$ 、 $h_{c,w}$ 和 $h_{c,i}$ 分别为箱梁顶板、底板、腹板和 箱室内壁的对流换热系数
6	文献[56]	$h_{c,t} = 4.67 + 3.83v, \quad h_{c,b} = 2.17 + 3.83v,$ $h_{c,w} = 3.67 + 3.83v, \quad h_{c,i} = 3.5$	箱梁不同部位、风速	

文献[22]根据文献[32]确定对流换热系数的方法研究了风速取值对钢箱梁温度场的影响,其计算结果表明:采用 8h 平均风速得到的温度场计算结果与实测最大偏差仅为 3%,故实测风速在早、午、晚各进行一次测量即可满足计算精度的要求。

此外在进行温度分布数值模拟的过程中,还应注意温度场初值的选取。一般采用日出前的环境温度作为桥梁温度场计算的初值,通过循环多天的计算消除初值选取的误差^[22,38,57-58],即在受到等幅变化的日照边界条件的作用下,需要经历一定的过渡时间,使结构温度场进行等幅周期变化,因初值选取差异带来的影响将在这段时间内逐渐消失。文献[59]对混凝土箱梁日照温度场的研究表明:初始温度选为大气温度日平均值时,过渡时间可减为 3 天。这种过渡时间与结构板件厚度和导热系数有关,钢桥的过渡时间会显著短于混凝土桥梁。

2.2 试验测试

相比于有限元数值模拟,通过对实桥或模型测试可以反映桥梁结构真实的温度分布状态,试验研究应根据结构形式确定合适的测点布置,以便充分反应温度场非线性分布的特性。桥梁结构日照温度场变化缓慢,需要长期测试来反映温度变化规律,

温度场的变化与气象因素息息相关,建议同时对相应气象参数进行长期采集,或通过当地气象部门获取。表 2 汇总了现有桥梁温度长期测试(超过 1 年)的主要文献,测试多集中在混凝土箱梁结构,对扁平钢箱梁的测试主要依托健康监测系统进行,断面测点一般布置较少,测试结果难以充分反应箱梁温度空间分布特征。

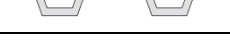
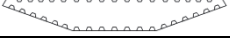
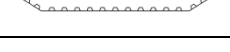
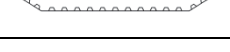
2.2.1 测点布置方法

由于测点布置数量有限,如何合理确定温度测点的位置以尽可能准确捕捉到桥梁结构日照作用下的温度分布是温度试验研究的关键。截面温度分布非线性强烈的地方应多布置测点,而温度分布较为均匀的地方可适当布置。

文献[80]中提到,研究混凝土箱梁温度场时,有近 50%的学者未沿板厚度方向布置温度测点,有 2/3 的学者未按变间距的方式布置竖向温度梯度测点。其建议采用太阳辐射影响深度的概念来指导测点布置,在太阳辐射影响深度范围内温度变化剧烈,分布非线性程度高,测点应非等间距密集布置,影响范围外的测点可以较少布置。受桥型与地理环境影响,混凝土桥梁的太阳辐射深度多为 0.3~0.5m,桥墩壁厚的影响深度一般在 0.3m 左右。

表 2 桥梁温度场长期测试汇总

Table 2 Summary on long-term test of bridge temperature field

文献来源	主梁形式	截面简图	测试类型	测点数量	测试时间	测试地区
Maes ^[60]	混凝土箱梁		实桥测试	50 个测点	1988.10~1990.04	加拿大, 阿尔伯塔省
Froli ^[61]	混凝土箱梁		实桥测试	—	1987.04~1990.07	意大利中部
Roberts-Wollman ^[62]	混凝土箱梁		实桥测试	17 个测点	1992.07~1994.11	美国, 德克萨斯州
Shushkewich ^[63]	混凝土箱梁		实桥测试	共 58 个测点,2 断面分别 26 个和 32 个	1995.01~1996.12	美国, 夏威夷州
Li Dongning ^[64]	混凝土箱梁		实桥测试	共 142 个测点,分 3 断面布置	1998~2001	加拿大, 亚特兰大地区
王毅 ^[15]	混凝土箱梁		实桥测试	48 个测点	2004.10~2005.11	中国, 江苏
雷笑 ^[16,65-66]	混凝土箱梁		实桥测试	48 个测点	2005.10~2007.09	中国, 江苏
Peiretti ^[67]	混凝土板梁		实桥测试	12 个测点	2008.08~2012.01	西班牙, 阿维拉
Hedegaard ^[68]	混凝土箱梁		实桥测试	48 个测点	2008.09~2011.10	美国, 明尼苏达州
Lee ^[69]	混凝土预制 Bulb-T 梁		足尺模型测试	18 个测点	2009.04~2010.03	美国, 佐治亚州
陶翀 ^[70]	混凝土箱梁		实桥测试	共 58 个测点,2 断面分别 16 个和 42 个	2009.05~2011.05	中国, 浙江
Abid ^[71]	混凝土箱梁		足尺模型测试	62 个测点	2013.05~2014.07	土耳其, 加齐安泰普省
Chang ^[72]	钢箱-混凝土组合梁		实桥测试	30 个测点	1996.09~1998.04	韩国, 首尔
Lucas ^[73-74]	扁平钢箱梁		实桥测试	18 个测点	1996.02~1998.12	法国, 诺曼底
丁幼亮 ^[17,75-76]	扁平钢箱梁		实测测试 (健康监测)	共 32 个测点,4 断面,每断面 8 个	2005~2010	中国, 江苏
王高新 ^[77]	扁平钢箱梁		实桥测试 (健康监测)	8 个测点	2011.01~2011.12	中国, 江苏
刘扬 ^[78]	扁平钢箱梁		实桥测试 (健康监测)	15 个测点	2014.01~2014.12	中国, 四川宜宾
王达 ^[79]	钢-混组合桥面钢桁梁		实桥测试 (健康监测)	8 个测点	2013.01~2013.12	中国

2.2.2 数据分析方法

随着传感器技术与数据处理技术的成熟,越来越多的学者基于健康监测系统对桥梁结构温度场进行多测点长周期的观测,对采集到的大量数据进行

趋势分析和统计分析,以期得到桥梁温度场时程变化和空间分布特性,及均匀温度、梯度温度等温度作用的概率统计数学模型。具体分析方法在温度作用部分详细说明。

3 桥梁结构的温度作用

3.1 温度作用分类

由于桥梁结构温度场呈现出强烈的非线性特征,采用实际的温度场进行设计计算十分不便。就自然环境条件变化而产生的温度作用,一般可分为日照温度作用、骤然降温作用和年温变化作用 3 种类型^[81],这 3 种温度作用的特点见表 3。

表 3 温度作用的特点

Table 3 Characteristics of temperature action

温度作用	主要影响因素	时间性	作用范围	分布状态	对结构的影响	复杂性
日照温度	太阳辐射	短时急变	局部	不均匀	局部应力大	最复杂
骤然降温	强冷空气	短时变化	整体	较均匀	应力较大	较复杂
年温变化	缓慢变温	长期缓慢	整体	均匀	整体位移	简单

为了将桥梁的温度场简化为便于设计计算的温度作用,各国学者开展了大量的研究工作,形成了各国不同规范形式。欧洲规范关于桥梁结构温度作用的规定继承了英国规范 BS5400 的思想,是目前关于温度作用规定最为详尽的规范。欧洲规范^[82]规定:对于一任意温度分布的结构,温度作用可分解为均匀温度 ΔT_u 、横向线性温差 ΔT_y 、竖向线性温差 ΔT_z 和残余温度 $\Delta T_e(y,z)$ 4 个部分,如图 6 所示,相应的计算公式如下^[31]:

$$\Delta T_u = \frac{\int_A ET(y,z)dA}{\int_A EdA} \quad (9)$$

$$\Delta T_y = B \frac{\int_A ET(y,z)y dA}{\int_A Ey^2 dA} \quad (10)$$

$$\Delta T_z = H \frac{\int_A ET(y,z)z dA}{\int_A Ez^2 dA} \quad (11)$$

$$\Delta T_e(y,z) = T(y,z) - \Delta T_u - \frac{\Delta T_y}{B}y - \frac{\Delta T_z}{H}z \quad (12)$$

式中: $T(y,z)$ 为组合梁截面温度场; E 为弹性模量; B 、 H 分别为截面的宽度和高度。

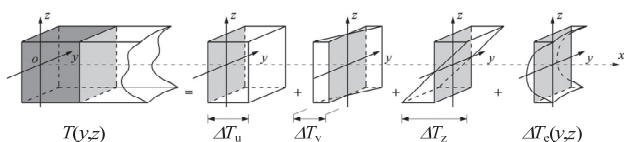


图 6 欧洲规范温度作用组成

Fig.6 Composition of thermal actions in Eurocode 1

对于静定体系的桥梁结构,均匀温度 ΔT_u 、横向线性温差 ΔT_y 和竖向线性温差 ΔT_z 分别会引起主梁轴向伸缩变形、横向弯曲变形和竖向弯曲变形,但并不产生约束内力;对于超静定体系的桥梁结构,则分别产生轴向内力、横向弯矩和竖向弯矩等约束内力,进一步产生温度次应力。对于残余温差 $\Delta T_e(y,z)$,因其非线性的分布形式,而结构变形满足平截面假定,结构纤维的伸缩变形受到相邻纤维的约束,从而产生温度自应力,其本质上也是一种截面的约束应力,与结构体系是否静定无关。

由于悬臂翼缘、梁宽较大和刚度较大等原因,多数规范一般不考虑桥梁的横向温度梯度,同时将竖向线性温差 ΔT_z 和竖向残余温度 $\Delta T_e(z)$ 合并形成竖向非线性温度分布 $\Delta T_{en}(z)$,如图 7 所示,各国规范一般对此进行简化,得到各自适用的竖向温度梯度模式来指导桥梁设计。

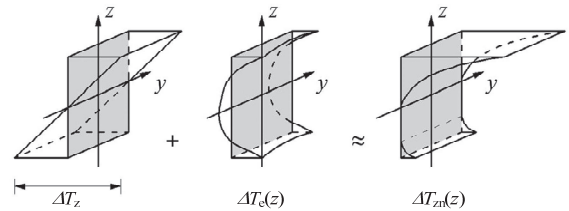


图 7 竖向非线性温度分布的组成

Fig.7 Composition of vertical nonlinear temperature distribution

桥梁结构的正温度梯度由日照温度引起,负温度梯度主要由骤然降温引起,均匀温度则由年温变化引起,与表 3 相对应。图 8 给出了桥梁结构温度作用研究的典型流程,即采用数值模拟或试验测试得到桥梁日照作用下的典型温度分布和分布特征的数据样本,通过规律分析、数据拟合得到竖向温度梯度的曲线形式,结合气象数据样本采用统计分析方法得到桥梁结构一定回归周期的温度作用拟合公式或标准值。因此,以下主要针对桥梁结构的竖向温度梯度形式和温度作用取值,总结讨论现有学者的研究工作。

3.2 竖向梯度温度曲线形式

桥梁顶面受太阳辐射影响较大,温度梯度变化较快,底面太阳辐射影响小,温度梯度变化则缓慢。早期学者在研究温度作用时,假定温度沿主梁竖向是线性分布^[83-84],随着后期研究的进展,逐步认识到桥梁结构内部温度的分布存在明显的非线性特性,现有研究主要通过多次抛物线、指数曲线和多

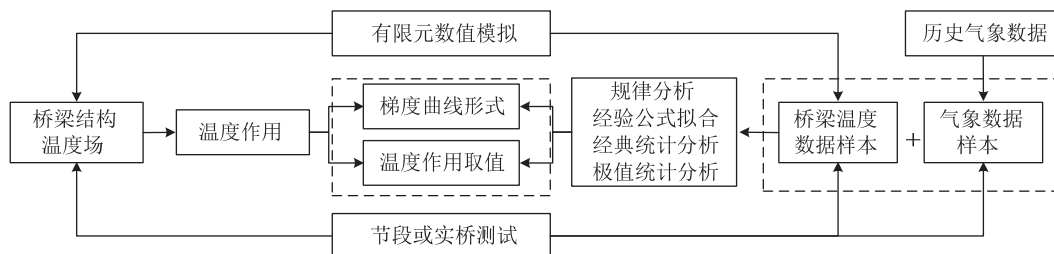


图 8 桥梁结构温度作用研究的典型流程

Fig.8 Typical research flowchart of the thermal actions of bridge structures

表 4 桥梁顶部梯度温度曲线形式

Table 4 Temperature gradient curves at the top of the bridge

曲线形式	表达式	参数取值范围	适用主梁形式	代表文献	符号说明
多次抛物线	$T(y)=T_0[ay^n+by^{n-1}+cy^{n-2}\dots]$	$n=2\sim 5$	混凝土梁、钢梁、 钢-混组合梁	文献[31]、[62]、[64]、[68]、 [85]~[91]、新西兰规范[67]	$T(y)$ 为竖向梯度温度分布
指数曲线	$T(y)=T_0e^{-ay}$	$a=4\sim 6$	混凝土梁	文献[1]、[15]、[24]、[57]、[70]、 铁路规范[92]、[93-95]	曲线； y 为计算点距表面的 距离； T_0 、 T_1 ...为顶部温差
多折线	$T(y)=\begin{cases} k_0y+T_0 & y\leq h_1 \\ k_1y+T_1 & h_1<y\leq h_2 \\ \dots & \dots \end{cases}$	—	混凝土梁、钢梁、 钢-混组合梁	AASHTO[96]、欧洲规范[82]、 BS400[97]、澳大利亚道路局规范 [98]、中国《公路桥涵设计通用规 范》[99]、文献[53]、[100-101]	值； h_1 、 h_2 ...为梯度温度曲 线拐点位置； a 、 b 、 c 、 k_1 、 k_2 ...均为系数

折线三种曲线形式来描述桥梁顶部温度的竖向分布，其表达式、参数取值范围、适用主梁形式和主要代表文献见表 4。

20 世纪 70 年代，Priestley 等^[85-86]基于实测数据和一维有限元分析，提出了适用于混凝土箱梁的顶部 5 次抛物线温度梯度曲线，即：箱梁在腹板处上部 1200mm 的范围内可采用 5 次抛物线拟合，梁底部 200mm 范围内呈线性分布，封闭箱室顶板温度亦为线性分布，如图 9 所示。Priestley 提出的顶部 5 次抛物线的温度分布模式随后被新西兰规范所采用^[87]，也得到了后续一些学者试验验证^[62,64,68,88]。Li 等^[64]通过对加拿大 Confederation 桥实测数据的分析提出，对于常规高度的混凝土箱梁，5 次抛物线模式具有较好的拟合效果，对于截面较高的混凝土箱梁，顶部 1.2m 范围内的温度分布采用 3 次抛物线表达更为合理。除混凝土桥梁外，文献[89-90]采用 5 次抛物线的形式来描述开口和闭口截面钢梁的竖向温度梯度模式，文献[31]、[91]分别采用 4 次和 5 次抛物线来表示钢-混凝土组合梁顶部的梯度温度分布模式。

将桥梁结构假设为一块一维半无限厚板，在周期性气温变化作用下，厚度方向的温度分布表达式为：

$$T(y) = Ae^{-y\sqrt{\omega/2a}} \sin\left(\omega t - y\sqrt{\omega/2a}\right) \quad (13)$$

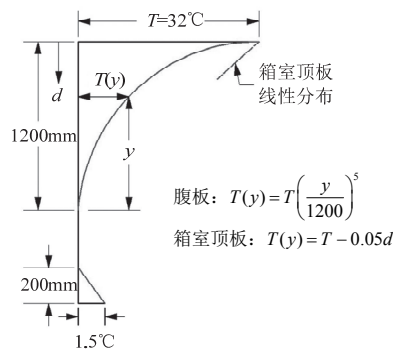


图 9 Priestley 提出的混凝土箱梁温度梯度曲线

Fig.9 Temperature gradient curve of concrete box girder proposed by Priestley

式中： A 为表面温度波动的半波幅； ω 为 $2\pi/24$ ； y 为计算点距表面的距离； t 为时间。

由于式 (13) 形式复杂，且计算不便，各学者则逐渐采用其外包络曲线 $T(y)=T_0e^{-ay}$ 来表述桥梁顶部温度分布，虽然实际不存在这种温度分布的状态，但温度分布线型相似，且偏于安全，其中， T_0 为梁高方向温差，参数 a 随结构形式、部件方向和计算时刻等因素而异。指数曲线形式的提出有一定的理论基础，我国学者多采用指数曲线形式来描述混凝土桥梁顶部温度分布，我国铁路规范在混凝土箱梁高度和宽度的温度梯度模式均采用这种指数曲线

[92], 如图 10 所示。刘兴法^[1]根据大量实测资料统计分析得到高度方向参数 a 取值为 5.0, 大量学者研究, 参数 a 取值一般为 4~6^[15,24,70,93-95]。其中, 文献[15]分析得到混凝土箱梁梗腋高度 y_g 和参数 a 取值存在线性关系, 桥面铺装为 0、50mm 和 100mm 厚时, a 可通过 $-3.20y_g+5.66$ 、 $-2.39y_g+4.88$ 和 $-2.15y_g+4.30$ 进行计算, 如图 11 所示, 文献[95]对虎门大桥辅航道桥变截面混凝土箱梁 5 个断面进行了温度实测, 指出参数 a 随梁高按二次函数变化, 参数 a 最大值可取 6.43, 最小值取 4.23。仅文献[57]在分析广州东沙大桥无铺装钢箱梁的顶部温度梯度时采用了指数曲线, 但公式形式有所变异。

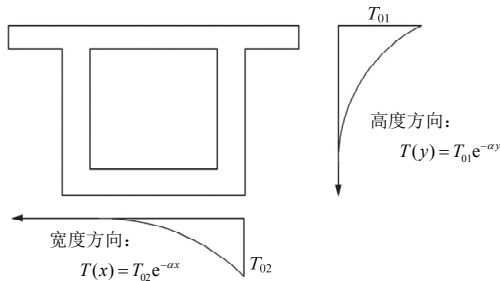


图 10 中国铁路桥梁规范混凝土箱梁的温度梯度曲线

Fig.10 Temperature gradient curve of concrete box girder in Chinese railway bridge code

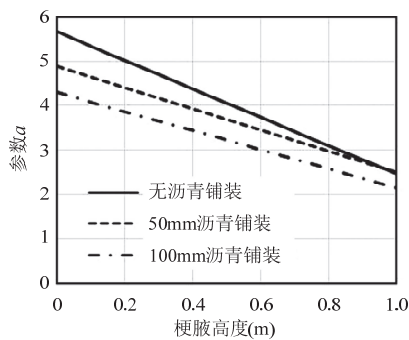


图 11 梗腋高度 y_g 和参数 a 的关系^[78]

Fig.11 Relation between the height of bottom corner y_g and parameter a

多折线因形式简单, 便于设计计算, 在规范中广泛采用, 如美国 AASHTO 规范^[96]、欧洲规范^[82]、英国 BS5400^[97]、澳大利亚道路局桥梁规范^[98]和我国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[99]等。其中, 欧洲标准采用了 BS5400 的规定, 对混凝土梁、钢梁和组合梁采用三种不同的多折线温度梯度模式。AASHTO 规范的温度梯度模式则来源于澳大利亚规范, 而我国公路规范规定的温度梯度模式则根据美国 AASHTO 太阳辐射 2 区的规定进行了适当修改, 均为顶部双折线的形式, AASHTO 规范

还考虑了底部 200mm 范围内不大于 3℃ 的线性温差, 如图 12 所示。聂玉东^[100]通过对黑龙江三座混凝土箱梁温度场的实测分析和有限元模拟, 给出了近似于 AASHTO 规范的三折线模型, 认为该温度模式适用于寒冷地区的混凝土箱梁。Lee^[53]采用相似的方法给出了混凝土预制 I 形梁的三折线梯度温度分布模式, 对宽度方向的温度分布亦采用折线形式表述。Miao 等^[101]对青马大桥钢箱梁温度实测发现, 可采用 2 折线形式进行梯度温度的描述。

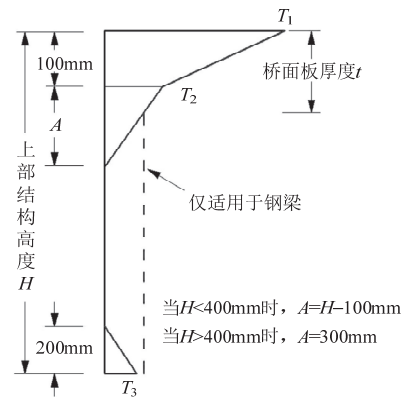


图 12 美国 AASHTO 规范中的温度梯度曲线

Fig.12 Temperature gradient curve in AASHTO

从上述的分析可以看到, 各学者在研究桥梁结构竖向温度梯度曲线形式时, 多采用实测或有限元数值模拟的方法, 由于分析桥梁的气候环境、结构形式等不同, 得到的温度梯度曲线形式也千差万别, 总体归为表 4 中的三类。其中, 抛物线形和折线形在混凝土梁、钢梁和组合梁中均有采用, 而指数曲线则主要用于混凝土梁中。同时, 可以注意到, 在考虑日照作用形成的正温度梯度时, 各学者普遍认为桥梁底部段存在一定温差^[27,62-63,69,102], 一般采用线性表示, 但我国的设计规范中并无此规定; 对于宽度较窄的预制 I 形梁或无悬臂宽幅箱梁, 应该考虑横向温度梯度分布^[53,69], 我国规范对于无悬臂的宽幅箱梁的横向梯度温度曲线给出了规定^[99]。

现有设计规范中给出的桥梁温度分布曲线模式均为偏于安全的一维简化模式, 而实际不同桥梁的温度场不会完全一致, 因此, 将常见桥梁按结构形式和材料进行分类并给出相应的温度分布曲线会进一步提高温度作用选取的准确性。欧洲规范在描述温度分布曲线时, 按材料将主梁分为钢梁、钢-混组合梁和混凝土梁, 又按结构形式将钢梁、组合梁分为开口截面梁和闭口截面梁, 将混凝土梁分为板梁、开口截面梁和闭口截面梁, 但并未完全给出

每种材料和截面形式独立对应的温度分布模式。实际进行桥梁设计计算时,若对实体空间结构的重要部位进行分析时,可以采用三维实体模型进行温度场分析,进一步通过“热-力耦合”来分析温度效应;若对于常规桥梁采用杆系结构分析计算时,空间分布的温度场则简化为横向、竖向一维温度分布进行计算,随后将温度效应结果进行叠加即可。随着桥梁设计计算的逐渐精细化,可以提出二维平面的温度分布模式,能够进一步反映板厚方向的温差,但相关的研究并不充分。同时,对于桥梁中的异形结构,温度效应有必要“一桥一分析”。

3.3 温度作用取值

3.3.1 基于气象相关性取值

基于气象参数进行温度作用取值为经验方法,要形成理想的经验公式需综合太阳辐射强度、气温变化、风速、桥位经纬度、方位角、太阳相关角度等参数,而实际工程在设计计算时一般都以特定时刻最大温差作用作为设计控制作用。因此,在桥型确定的情况下,一般仅考虑太阳辐射、气温和风速等基本气象因素。

(1) 均匀温度作用

表 5 汇总了现有文献关于桥梁均匀温度取值的经验公式,并给出了相应的主梁形式、测试时间和测试地区。Chang 等^[72]在韩国首尔对一组合钢箱梁进行了连续 31 个月的温度测试,研究发现:均匀温度 ΔT_u 的最大峰值总是出现在夏季 15:00~17:00 气温最大峰值几小时后, ΔT_u 的最小峰值总是出现在冬季黎明前后,由于钢箱组合梁桥的热质量较小,故均匀温度 ΔT_u 与实时气温 T_a 存在很强的线性关系;Lucas 等^[73-74]对法国诺曼底大桥的钢箱梁进行了为期 34 个月的温度场测试,发现钢箱梁均匀温度最大值与日最高气温线性相关性较好但有一定的温差,该温差主要来自于太阳辐射的影响,从而提出了考虑日最高气温和日太阳辐射总量的经验计算公式,同时发现均匀温度最小值可以与日最低气温近似相等;Abid 等^[71]在混凝土箱梁足尺模型连续测试 14 个月的基础上,提出了箱梁日均匀温度最值与日气温最值的线性相关公式。欧洲规范^[82]亦采用了类似的经验公式给出了混凝土桥、组合梁桥和钢桥均匀温度最值的预测公式。

表 5 均匀温度作用取值经验公式

Table 5 Empirical formula for the value of uniform temperature actions

文献	温度作用	经验公式	主梁类型	测试时间	测试地区	符号说明
Chang ^[72]	均匀温度	$\Delta T_u=1.03T_a+0.681$	钢-混凝土组合箱梁	1996.09~1998.04	韩国,首尔	
Lucas ^[73,74]	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max}=T_{a,max}+0.0017I$	扁平钢箱梁	1996.02~1998.12	法国,诺曼底	ΔT_u 为均匀温度; T_a 为环境温度;
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min}=T_{a,min}$				
Abid ^[71]	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max}=1.1T_{a,max}+0.17$	混凝土箱梁	2013.05~2014.07	土耳其,加齐安泰普省	$\Delta T_{u,max}$ 、 $\Delta T_{u,min}$ 分别为均
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min}=1.06T_{a,min}+6.54$				
欧洲规范 ^[82]	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max}=T_{a,max}+16$	钢梁	—		匀温度最大值、最小值;
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min}=T_{a,min}-3$				
	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max}=T_{a,max}+4$	钢-混凝土组合梁	—	欧洲	$T_{a,max}$ 、 $T_{a,min}$ 分别为日最
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min}=T_{a,min}+4$				
	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max}=T_{a,max}+2$	混凝土梁	—		高、最低气温;
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min}=T_{a,min}+8$				

可以看到,桥梁结构的均匀温度一般与气温参数线性相关,斜率取值接近于 1。均匀温度作用为由年温变化引起的长期温度作用,混凝土桥梁的导热性能差,一般认为截面均匀温度升高主要由气温变化引起,经验公式一般仅选择气温参数;纯钢结构桥梁,导热性能好,太阳辐射作用下均匀温度会有较明显的上升,经验公式中还需加入太阳辐射参数;对于组合结构桥梁,则介于以上两者之间,太阳辐射是否考虑可根据实际情况进行选择。

(2) 截面温差作用

表 6 列出了现有文献桥梁截面温差取值的经验公式,以及主梁形式、测试时间和测试地区。Potgieter 等^[103-104]采用一维有限差分法,给出了圣安东尼奥地区基于日太阳辐射总量 I 、日大气温差 TV 、风速 v 和桥面顶面吸收率 α 等自变量的混凝土箱梁顶部温差的经验公式。Roberts-Wollman 等^[62]通过 28 个月混凝土箱梁温度实测发现,腹板温度最低值与三日平均气温 T_{3-avg} 的取值近乎相等,基于此

对 Potgieter 的公式进行了修正, 取日最高气温 $T_{a,max}$ 减去 3 天日平均气温 T_{3-avg} 的值来代替 TV , 将计算值平均偏差降低了 2.3°C , 作者认为风速对箱梁竖向温差的影响较小, 最后提出了不考虑风速 v 的无铺装温差简化公式, 由于并未搜集到太阳辐射的实测数据而采用理论计算公式, 故其得到的经验公式在气候条件稳定的时段可以达到了较好拟合效果。Lee 等^[69]对美国亚特兰大市一混凝土预制 I 形梁进行了连续 1 年的温度测试, 结合二维有限元数值模拟, 提出了考虑日太阳辐射总量 I 、气温 (日最高气温 $T_{a,max}$ 、日最低气温 $T_{a,min}$) 和风速 v 的顶部竖向温差经验预测公式, 较以上学者的经验公式能更准确地预测预制混凝土 I 形梁的截面温差。作者同样提出了顶板、腹板、底板横向温差相同形式的经验预测公式 (表 5 中只列出了顶板横向温差的预测公式), 认为横向温差与太阳辐射总量 I 和日温差 TV 均为线性关系, 同时公式中考虑了日序数 N 引起的太阳入射角的影响, 计算公式达到了良好的预测效果。Abid 等^[71]对土耳其一混凝土箱梁足尺模型进行了为期 14 个月的温度测试, 同时采集了模型处太阳辐射、气温和风速足时数据, 通过逐步回归法给出了箱梁顶部温差、顶底板横向温差的经验预测公式。

Lucas 等^[73-74]通过实测给出了法国诺曼底大桥钢箱梁竖向线性温差的经验公式, 该公式仅考虑了太阳辐射的影响。

以上学者均将太阳辐射和大气温差作为主要参数, 提出了适用于特定地区和桥型的桥梁截面温差经验预测公式, 各公式的普适性有待进一步检验。同时, 以上研究主要针对混凝土桥梁, 对于钢桥和组合结构桥梁尚未有学者提出明确的气象相关性预测公式。

3.3.2 基于统计分析方法取值

从统计的角度上讲, 桥梁在设计基准期内温度作用可能达到最大值会超过桥梁温度作用的实测最大值, 因而需要采用统计的方法得到结构在设计基准期内可能出现的最不利温度作用值。

早期 Branco 等^[50]分别选取太阳辐射年最大值和夏季日最大平均值超越概率 5% 的值来分析混凝土板梁、肋板梁和箱梁极限状态和正常使用状态的等效线性温差参考值 ΔT_{ref} 。Branco 的分析并非为真正意义上的统计方法, 而基于统计分析的温度作用取值方法一般需要基于大量的样本数据, 根据样本数据来源的不同, 主要分为 3 类: ①搜集历史实测气象数据; ②数值模拟方法得到桥梁温度样本数据; ③实测桥梁温度样本数据。

表 6 截面温差取值经验公式

Table 6 Empirical formula for the value of cross-sectional temperature difference

文献来源	温差类型	经验公式	主梁形式	测试时间	地区	符号说明
Potgieter 等 ^[103-104]	顶部竖向 无沥青 铺装 温差	$\Delta T_z = 28.2 \left(\frac{I\alpha}{29089} - 0.7 \right) + 0.342(TV - 11.1) + (23.3 - 4.84v + 0.771v^2 - 0.088v^3 + 0.00463v^4)$	混凝土 箱梁	—	美国, 伊利诺伊州	ΔT_z 为顶部温差; $\Delta T_{y,top}$ 为顶板横向温差; I 为日太阳辐射总量; TV 为日大气温差; v 为风速;
	有 50mm 沥青铺装	$\Delta T_z = 18.5 \left(\frac{I\alpha}{29089} - 0.9 \right) + 0.163(TV - 11.1) + (27.5 - 4.9v + 0.844v^2 - 0.098v^3 + 0.00515v^4)$				
Roberts-Wollman 等 ^[62]	顶部竖向 温差	$\Delta T_z = 0.9(T_{a,max} - T_{3-avg}) + 0.56(I - 12)$	混凝土 箱梁	1992.07 —1994.11	美国, 德克萨斯州	
Lee 等 ^[69]	顶部竖向 温差	$\Delta T_z = \frac{3}{4}I + \frac{1}{15}(T_{a,max} - 2T_{a,min}) - (0.37 + 2.93v - 0.25v^2 + 0.008v^3)$	混凝土	2009.04	美国, 乔治亚州	α 为桥面顶面吸收率; $T_{a,max}$ 、 $T_{a,min}$ 分别为 日最高、最低气温; T_{3-avg} 为 3 天日平均气温; n 为日序数;
	顶板横向 温差	$\Delta T_{y,top} = I \left[0.35 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) + 0.55 \right] + 0.2TV - 0.93 + 0.63v - 0.04v^2 + 0.001v^3$	I 形梁	—2010.03		
Abid 等 ^[71]	顶部竖向 温差	$\Delta T_z = 2.57 + 0.181TV + (0.534I - 0.002691I^2) - (1.32v - 0.208v^2)$	混凝土	2013.05	土耳其, 加齐安泰普	I_s 、 V 、 N 分别为 太阳辐射、风速和 日序数的函数
	顶板横向 温差	$\Delta T_{y,top} = 10.21 + 0.591TV + I_s + V + N$	箱梁	—2014.07	省	
Lucas 等 ^[73-74]	竖向线性 温差	$\Delta T_z = 0.003I$	扁平钢 箱梁	1996.02 —1998.12	法国, 诺曼底	

长期的实桥温度测试对试验成本、测试设备的稳定性等均有较高要求,故多数学者主要通过方法①进行温度作用取值的研究。该方法的主要思路是:采用通过验证的数值模拟方法确定太阳辐射强度、气温和风速等气象参数对桥梁温度作用的影响规律,通过统计方法得到使温度作用取值最不利时的气象参数,最后通过气象参数求得相应最不利桥梁温度作用。该方法的温度作用代表值是以气象参数数据统计为基础间接得到的,由于不同气象参数在一年内不可能同时达到极值,且多数学者并未考虑各气象参数之间的相关性,故所得的温度作用代表值一般偏大^[70,91,93,105]。

Ho 等^[106]在 1989 年提出采用气象参数的极值统计结合高斯积分法间接求得一定回归周期的温度作用代表值,随后 Tong^[89]等采用该方法建立了香港地区钢梁 50 年一遇梯度温度作用取值。该方法将桥梁温度作用视为以各气象参数为自变量的函数,可采用 3 项高斯积分的形式简化表示,同时假定桥梁温度作用与气象参数均满足 Gumbel 分布,通过 26 年实测气象数据分析得到统计模型参数来计算桥梁温度作用的各统计模型参数,从而建立了桥梁温度作用的统计模型,求得一定回归周期的温度作用代表值。此方法亦是基于气象参数统计分析的间接方法,并未考虑气温和太阳辐射的相关性,且桥梁温度作用满足 Gumbel 分布的假设亦有待商榷。

方法②通过气象部门获取足日的气象数据,建立可靠的有限元数值模型,通过大量模型运算建立桥梁温度作用的数据样本。Chen^[31]采用了 45 年的足日气象数据对美国德克萨斯州钢箱组合梁温度场进行 16436 次计算,得到了桥梁温度作用数据样本,采用广义极值理论得到桥梁均匀温度和梯度温度一定回归周期的温度作用代表值。该方法避免了方法①中出现的问題,但作者数值模型的准确性并未得到各种不同气候条件的检验,且该方法需要进行大量的模型计算,需要参数化建模来保证计算效率。

方法③直接对桥梁进行长期的实桥测试,在具有了一定温度作用样本数据量的基础上直接进行温度作用的统计分析。Maes 等^[60]采用极值统计法对一铁路混凝土箱梁桥的温度作用取值进行了分析,结果表明:任意两测点温差服从 Weibull 分布,任意两面平均温差、最大和最小线性温差均服从 Gumbel 分布。Barsotti 等^[61]认为桥梁温度作用应该分解为由季节变化引起的确定性部分和由桥位气候、环境等因素引起的随机性部分,确定性部分可

以通过傅里叶函数表示,随机部分则可采用高斯分布来进行统计描述,基于此给出了意大利中部混凝土箱梁桥的温度作用(均匀温度和竖向等效线性温差)标准值、频遇值和准永久值。Lucas 等^[73-74]在 Barsotti 的基础上,进一步采用 Weibull 分布来描述诺曼底大桥钢箱梁温度作用的随机部分,给出了与高斯分布较为一致的结果,并与欧洲规范进行了对比。王毅和雷笑^[65-66]等认为文献[61]、[73-74]等将截面最大温差全年数据作为随机变量会低估夏季最大温差的取值,故采用聚类分析的方法将混凝土箱梁截面温差数据分为冬季和夏季两类,通过分析认为两者均服从 Weibull 分布,最终给出了 100mm 铺装和无铺装混凝土箱梁的截面最大正、负温差的标淮值、频遇值和准永久值,其得到的结果均未突破现有中国规范的规定取值。Li^[64]对加拿大亚特兰大省一混凝土箱梁桥 3 个断面进行了为期 3 年的温度场测试,采用广义极值理论得到了该桥梁较高处截面 100 年一遇的有效温度和顶部竖向温差取值,并提出了 Calgary 温度梯度模型。丁幼亮^[75-76]通过分析润扬长江大桥温度场实测数据,发现扁平钢箱梁竖向和顶板横向测点温差分布可以采用 2 个 Weibull 分布加权和一个 Weibull 分布和一个高斯分布的加权来描述,在采用极值理论分析 100 年一遇的温差代表值时,作者认为 Weibull 分布较 Gumbel 分布可以取得更准确的计算效果。王高新等^[77]则采用 2 个高斯分布的加权来描述苏通大桥钢箱梁的温度测点的分布模式,截面温差则可以采用 2 个 Weibull 分布函数的加权来描述,建立了扁平钢箱梁横向温度分布模型。

综述可知,针对实桥测试温度测点采用的统计模型主要包括高斯分布、极值统计分布、或是两者的组合分布等。根据分析的桥梁或气候特点的不同,桥梁温差的分布特性亦不相同,主要可以采用极值统计分布中 Gumbel 分布(极值 I 型分布)和 Weibull 分布(极值 III 型分布)来描述。长期的试验测试能反映出特定环境下桥梁结构温度作用的真实统计特征,得到的温度作用取值也更为真实可信。但在测试当中,测点布置需要有一定的密度,文献[75-77]等基于健康监测系統测试数据进行分析时,由于断面测点数据较少,其得到的截面温差数据难以直接有效地指导桥梁的设计计算。

桥梁设计基准期内“全球暖化”效应对气候的影响很难忽视,现有学者进行温差代表值的研究时均未考虑“全球暖化”效应。不可否认的是,“全球

暖化”对桥梁温度作用将会产生影响,但具体的影响程度尚不明了,可作为未来桥梁温度作用的研究方向。

4 桥梁温度作用研究的发展方向

4.1 组合结构桥梁的温度作用

日照作用下,不同桥梁结构形式温度场存在显著差别,带来的温度效应也不尽相同。现有研究更多集中在传统的混凝土桥梁,包括多数规范温度梯度模式的提出亦基于此,而对组合结构桥梁温度作用的研究相对较少,以下主要对钢-混凝土组合梁和钢管混凝土结构桥梁温度作用的研究进行说明。

关于钢-混凝土组合梁温度作用的研究主要集中在早期学者^[25,26,30,36,83],主要是基于短期实测并结合数值模拟展开温度分布规律的研究,Kennedy等^[107]提出了夏季和冬季共4种组合梁温度梯度模式,但均基于一定假设,与温度实际分布存在差距。现有对组合梁展开全面而长期的实测研究较少,更未见有关基于实测进行温度作用取值分析的相关报道。

钢管混凝土结构桥梁在我国广泛应用,规范虽有关于钢管混凝土拱桥温度作用模式的规定^[108-109],但现有研究相对较少,且多集中在单钢管混凝土短期测试、简单的温度分布规律,虽得出了简单的温度作用模式^[110-114],但相应的实桥长期测试尚未见报道,基于气象相关性和统计分析的温度作用取值亦未有研究,对于更为常用的哑铃型^[115-116]、桁式拱肋^[117-118]的温度作用研究亦相对较少。

由于不同于单一材料桥梁,组合梁和钢管混凝土结构桥梁不同材料的导热性能差异较大,在材料间会形成巨大的温差,在交界面局部位置存在明显的温度梯度,对于钢-混凝土组合梁,可能造成界面连接件损伤或混凝土桥面板开裂^[119],对于钢管混凝土结构桥梁,可能造成核心混凝土与周围钢管脱粘^[120],进而产生纵向的滑移。正因为组合结构桥梁较单一材料桥梁具有更强的局部温差,并由此带来界面损伤和组合作用的破坏,对组合结构桥梁温度作用的研究显得特别重要。随着组合结构桥梁在我国逐步的快速推广,波形钢腹板组合梁桥、矩形钢管混凝土组合桁梁桥等一批新型桥梁的逐渐采用,对组合结构桥梁展开大量长期实桥测试、积累重要实测数据成为桥梁温度作用研究的重要方面。

4.2 桥梁温度作用的地域性差异

温度作用的地域性差异主要分为两点,一是整体范围内的地域性差异,指不同地区桥梁温度作用

模式和取值有所不同;二是指局部范围内的地域性差异,指同地区不同地形特点对桥梁温度作用取值的影响。

桥梁结构温度作用有着明显的整体地域性差异。均匀温度取值时,各国规范均根据当地气温特点,采用等温线地图或气候分区进行选取。Potgieter等^[103-104]搜集了美国26个气象站的历史气象数据,得到了美国不同地区桥梁的温度梯度作用,发现美国西南部沙漠地区的温度作用对桥梁的影响较沿海地区更为不利。Mirambell等^[121]考虑了夏季不同的气象参数,给出了混凝土梁在伊比利亚半岛不同地区截面温差取值的等温线地图。美国AASHTO规范基于Imbsen等^[122]的研究,根据太阳辐射强度等级将美国分为4个地区进行梯度温度取值。我国地域辽阔,《公路桥涵设计通用规范》的温度梯度作用仍采用统一的数值,导致我国西北青海、新疆等高海拔、强辐射地区的桥梁温度作用可能被严重低估^[123-125]。我国现有的桥梁温度实测主要集中于混凝土箱梁和钢箱梁,且测试地区主要集中在江浙一带,桥梁温度相关的研究鲜有涉及我国西部高寒地区。

局部地形对桥梁结构温度作用的影响不可忽视,同样一座桥梁,修建在同一地区的峡谷和平原环境下,产生的温度作用可能差别巨大。峡谷地区桥梁受到周围地形遮挡,接受到的太阳辐射十分有限,采用平原地区桥梁温度作用可以偏安全地进行桥梁设计,但是难以对施工及运营过程中桥梁的温度效应进行准确把握。

实桥测试最能直接地反映使用状态下桥梁温度场的分布和变化规律,因此,加强不同地区(尤其是西部高寒地区)和地形、不同桥梁结构形式的温度长期测试,以得到考虑地域性的桥梁温度作用模型,是温度作用下一阶段研究的重要方向。

4.3 大跨复杂结构桥梁温度场精确模拟

现有学者的研究,主要通过试验和数值模拟来分析简单的一维和二维问题,采用三维整桥模型进行温度场的分析时仍采用过多的简化与假定,难以准确反映大跨复杂桥梁局部温度梯度、阳光的遮挡效应及构件间的相互约束等,采用加密测点的实测方法得到的桥梁各部件的简化温度场亦难以从机理上深刻认识大跨复杂结构桥梁真实的温度效应。因此,如何建立大跨复杂结构桥梁的温度场精确数值模型至关重要。

大跨复杂结构桥梁温度场精确模拟的难点在于如何动态识别因桥梁部件、地形遮挡而形成的阴

影区域。徐丰^[59]借助 ANSYS 内嵌的辐射矩阵生成器,基于半立方体法的单元“遮挡与可见性”判断功能,实现了混凝土箱梁外表面在任意时刻日影单元与非日影单元的区分与选择,进而实现了箱梁外表面动态热边界的模拟,如图 13(a)所示。另外一种方法是借助计算机图像学中常用的“光线追踪算法”,通过判断结构面射线是否与已有平面相交来自动识别桥梁结构因封闭空间形成的永久阴影、因几何形状形成的自阴影和由部件遮挡形成的他阴影。尹冠生等^[126]利用光线追踪法编制了 ANSYS 子程序,准确模拟了混凝土拱桥拱上主梁对拱箱的遮盖作用,如图 13(b)所示,Zhu 等^[127]则采用同样的方法建立了混凝土斜拉桥的三维温度场精确模型。

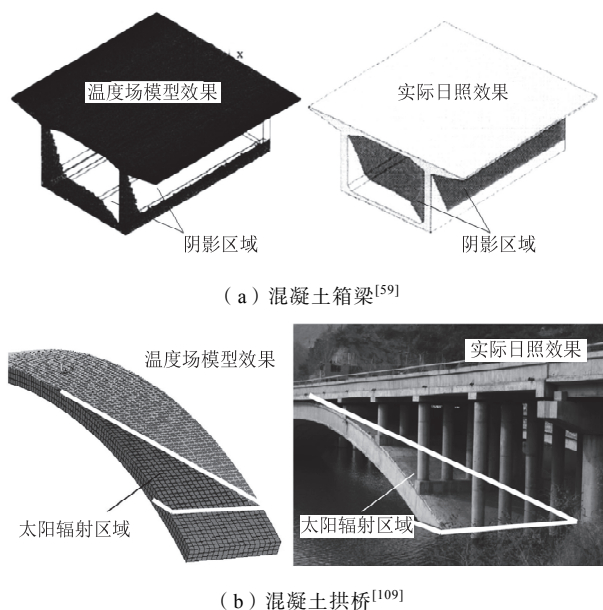


图 13 桥梁结构的阴影识别

Fig.13 Shadow recognition in bridge structures

以上学者的研究为大跨复杂结构桥梁温度场的精确模拟提供了重要的研究思路,对于在峡谷等复杂地形环境下的桥梁,可借鉴水利工程水坝温度场的研究方法^[128],导入桥梁周围环境的 DEM 模型(数字高程模型),结合“光线追踪算法”得到复杂地区大跨桥梁的温度场精确模型,为后续温度效应的精确模拟奠定基础,有效指导大跨复杂地形下桥梁的施工线性控制和运营安全评估等。

5 结论

(1) 桥梁结构日照温度场有着典型的周期性时程分布特征和不均匀空间分布特征,主要受桥梁

结构、气候环境和地理环境等三类因素的影响,造成了桥梁结构温度场存在非常明显的桥型间差异和地域性差异。

(2) 现有学者主要采用数值模拟和试验测试研究桥梁结构的温度分布。数值模拟的重点是把握太阳辐射和对流换热等边界条件的准确选取,常用的太阳辐射计算模型主要为 ASHRAE 模型、Hottel 模型和幂指数模型 3 种,对流换热系数主要根据风速、结构表面粗糙程度及与环境间温差来确定,但计算公式较多,并不统一。实桥测试需重视测点布置以充分反应桥梁温度的空间非线性分布规律,现有研究对桥梁温度场进行长期测试的不多,且多集中在混凝土箱梁结构。

(3) 受日照升温、骤然降温和年温变化的影响,桥梁的温度作用可以分为正、负温度梯度和均匀温度。现有研究主要采用多次抛物线、指数曲线和多折线曲线形式来描述正温度梯度,温度作用取值普遍基于气象参数相关性和统计分析 2 种方法。基于气象参数相关性的方法主要为经验公式法,桥梁结构的均匀温度一般与气温呈现强烈的线性相关,而温度梯度的取值要综合太阳辐射、气温和风速等参数,相关性公式相对复杂,一般均要求长期的气象和温度场实测数据。桥梁结构温度作用的统计模型主要可以采用高斯分布、极值统计分布、或是两者的组合等分布模型来描述,需要大量的实测数据作为样本进行分析。

(4) 组合结构桥梁温度作用有着其特有的特点,带来的效应对界面有着不利的影响,加强组合结构桥梁温度场长期实桥测试、积累重要实测数据是桥梁温度作用研究的重要方面。桥梁结构温度场有显著的地域性差异,加强不同地区(尤其是西部高寒地区)和地形桥梁结构温度的长期测试,以得到考虑地域性的桥梁温度作用模型,是温度作用下一阶段研究的重要方向。随着大跨复杂结构桥梁数量的不断增多,基于考虑地形条件的“光线追踪算法”得到复杂桥梁的精确温度场,可以进一步准确评估复杂桥梁的温度效应,有效指导大跨复杂地形下桥梁的施工线性控制和运营安全评估。

参考文献

- [1] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991
- [2] Saetta A, Scotta R, Vitaliani R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal actions [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 446-457

- [3] Thurston S J. Thermal stresses in concrete structures [R]. Canterbury: University of Canterbury, 1978
- [4] Wittfoht H, 刘全德. 意大利坎纳维诺桥在施工中发生破坏的原因[J]. 世界桥梁, 1986(4): 63-72
- [5] Heckel R. The fourth danube bridge in vienna-damage and repair [J]. Devel Bridge Design and Constr Proc, 1971
- [6] Viktor A, Hesham E. Concrete cracks in composite bridges [R]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2012
- [7] Song Y S, Ding Y L. Fatigue monitoring and analysis of orthotropic steel deck considering traffic volume and ambient temperature [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(7): 1758-1766
- [8] 王高新, 丁幼亮, 宋永生, 等. 温度作用对带铺装层钢桥面板-疲劳效应的影响研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 115-123 (Wang Gaoxin, Ding Youliang, Song Yongsheng, et al. Influence of temperature action on the fatigue effect of steel deck with pavement [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 115-123 (in Chinese))
- [9] 吴德明, 王福敏, 殷祥林. 基于温度影响的钢管混凝土脱空机理分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(2): 190-194 (Wu Deming, Wang Fumin, Yin Xianglin. Analysis on CFST disengaging mechanism based on temperature impact [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2009, 28(2): 190-194 (in Chinese))
- [10] Xia Y, Chen B, Weng S, et al. Temperature effect on vibration properties of civil structures: a literature review and case studies [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2012, 2(1): 29-46
- [11] Cornwell P, Farrar C R, Doebling S W, et al. Environmental variability of modal properties [J]. Experimental Techniques, 2008, 23(6): 45-48
- [12] French C E, Eppers L J, Le Q, et al. Transverse cracking in concrete bridge decks: summary report [R]. Minneapolis: Minnesota Department of Transportation Office of Research Services, 1999
- [13] Schindler A K, Hughes M L, Barnes R W, et al. Evaluation of cracking of the us 331 bridge deck [R]. Auburn, Alabama: Highway Research Center and Department of Civil Engineering at Auburn University, 2010
- [14] Myers J J, Nanni A, Stone D, et al. Precast I-girder cracking: causes and design details [R]. Missouri: Center for Infrastructure Engineering Studies, University of Missouri-Rolla, 2001
- [15] 王毅. 预应力混凝土连续箱梁温度作用的观测与分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2006 (Wang Yi. Observation and analysis of prestressed concrete continuous box-girder temperature action [D]. Nanjing: Southeast University, 2006 (in Chinese))
- [16] 雷笑. 基于长期观测的混凝土箱梁温度作用与效应研究[D]. 南京: 东南大学, 2010 (Lei Xiao. Research in temperature action and effect on concrete box girder based on long-term observation [D]. Nanjing: Southeast University, 2010 (in Chinese))
- [17] 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 Youliang, Wang Gaoxin, Zhou Guangdong, 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))
- [18] 李全林. 日照下混凝土箱梁温度场和温度应力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2004 (Li Quanlin. Research of temperature field and temperature stress of concrete box girder caused by the solar radiation [D]. Changsha: Hunan University, 2004 (in Chinese))
- [19] 孙维刚, 陈永瑞, 刘来君, 等. 寒冷地区混凝土箱梁温度场研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2015 (7): 962-967 (Sun Weigang, Chen Yongrui, Liu Laijun, et al. Study of temperature field of concrete box girder in cold area [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2015(7): 962-967 (in Chinese))
- [20] McClure R M, West H H, Hoffman P C. Observations from tests on a segmental bridge [C]// Second Bridge Engineering Conference. Washington: Transportation Research Board, 1984: 60-67
- [21] 刘华波. 异形截面预应力混凝土箱梁温度场及温度效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2002 (Liu Huabo. Study on temperature field and temperature effect of prestressed concrete box girder with special-shaped section [D]. Shanghai: Tongji University, 2002 (in Chinese))
- [22] Kim S H, Park S J, Wu J, et al. Temperature variation in steel box girders of cable-stayed bridges during construction [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 80-92
- [23] Barr P J, Stanton J F, Eberhard M O. Effects of temperature variations on precast, prestressed concrete bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2): 186-194
- [24] 方志, 汪剑. 大跨预应力混凝土连续箱梁桥日照温差效应[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 62-67 (Fang Zhi, Wang Jian. Sun light thermal difference effect on long-span pc continuous box girder bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 62-67 (in Chinese))
- [25] Zuk W. Thermal behavior of composite bridges-insulated and uninsulated [J]. Highway Research Record, 1965(76): 231-253
- [26] Berwanger C. Transient thermal behavior of composite bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(10): 2325-2339
- [27] 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
- [28] 赵人达, 王永宝. 日照作用下混凝土箱梁温度场边界条件研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 52-61 (Zhao Renda, Wang Yongbao. Studies on temperature field boundary conditions for concrete box-girder bridges under solar radiation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 52-61 (in Chinese))

- [29] Riding K A, Poole J L, Schindler A K, et al. Temperature boundary condition models for concrete bridge members [J]. *ACI Materials Journal*, 2007, 104(4): 379-387
- [30] Dilger W H, Ghali A, Chan M, et al. Temperature stresses in composite box girder bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 109(6): 1460-1478
- [31] Chen Q. Effects of thermal actions on texas steel bridges [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2008
- [32] Kehlbeck F. Einfluss der sonnenstrahlung bei bruckenbauwerken [D]. Dusseldorf: Technische Universitat Hannover, 1975
- [33] 张建荣, 刘照球, 华毅杰. 混凝土结构设计中考虑温度作用组合的研究[J]. *工业建筑*, 2007, 37(1): 42-46 (Zhang Jianrong, Liu Zhaoqiu, Hua Yijie. Research on temperature effect combination in the design of concrete structure [J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(1): 42-46 (in Chinese))
- [34] Zhou G D, Yi T H. Thermal load in large-scale bridges: a state-of-the-art review [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013(7/8): 1-17
- [35] 陈波, 郑瑾, 王建平. 桥梁结构温度效应研究进展[J]. *武汉理工大学学报*, 2010(24): 79-83 (Chen Bo, Zheng Jin, Wang Jianping. State-of-the-art of the temperature effects of bridges [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010(24): 79-83 (in Chinese))
- [36] Fu H C, Ng S F, Cheung M S. Thermal behavior of composite bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(12): 3302-3323
- [37] 刘瑜, 邵旭东. 轻型组合梁桥面板在日照作用下温度梯度效应研究[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(6): 54-61 (Liu Yu, Shao Xudong. Research on temperature gradient effect of light-weighted composite bridge deck under solar radiation [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(6): 54-61 (in Chinese))
- [38] 汪剑, 方志. 混凝土箱梁桥的温度场分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(4): 23-28 (Wang Jian, Fang Zhi. Temperature variation of concrete box girder bridge [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition*, 2008, 35(4): 23-28 (in Chinese))
- [39] American Society of Heating, Refrigerating, Air Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook of Fundamentals [S]. Atlanta: Ashrae Handbook of Fundamentals, 1972
- [40] 宋爱国, 王福然. 北京地区晴天太阳辐射模型初探[J]. *太阳能学报*, 1993(3): 251-255 (Song Aiguo, Wang Furan. Preliminary study on clear-day solar radiation model of beijing region [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1993(3): 251-255 (in Chinese))
- [41] 李锦萍, 宋爱国. 北京晴天太阳辐射模型与 ASHRAE 模型的比较[J]. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 1998(1): 37-40 (Li Jinping, Song Aiguo. Compare of clear-day solar radiation model of Beijing and ASHRAE [J]. *Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition*, 1998(1): 37-40 (in Chinese))
- [42] Al-Sanea S A, Zedan M F, Al-Ajlan S A. Adjustment factors for the ASHRAE clear-sky model based on solar-radiation measurements in riyadh [J]. *Applied Energy*, 2004, 79(2): 215-237
- [43] Hottel H C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres [J]. *Solar Energy*, 1976, 18(2): 129-134
- [44] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. *Solar Energy*, 1960, 4(3): 1-19
- [45] 邱国全, 夏艳君, 杨鸿毅. 晴天太阳辐射模型的优化计算[J]. *太阳能学报*, 2001, 22(4): 456-460 (Qiu Guoquan, Xia Yanjun, Yang Hongyi. An optimized clear-day solar radiation model [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2001, 22(4): 456-460 (in Chinese))
- [46] Elbadry M M, Ghali A. Temperature variations in concrete bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(10): 2355-2374
- [47] 方先金. 中国大气透明度系数的研究[J]. *大气科学学报*, 1985(3): 293-305 (Fang Xianjin. A survey of the atmospheric transparency coefficients over China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 1985(3): 293-305 (in Chinese))
- [48] 吴继臣, 徐刚. 全国主要城市冬季太阳辐射强度的研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(10): 1236-1239 (Wu Jichen, Xu Gang. Major Chinese cities' solar radiant intensities in winter [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(10): 1236-1239 (in Chinese))
- [49] 徐刚. 太阳辐射基础数据的研究及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002 (Xu Gang. Study and application of solar radiation fundamental data [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002 (in Chinese))
- [50] Branco F A, Mendes P A. Thermal actions for concrete bridge design [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119(8): 2313-2331
- [51] Larsson O, Thelandersson S. Estimating extreme values of thermal gradients in concrete structures [J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(8): 1491-1500
- [52] Borghesi A, Sassella A. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal actions [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(3): 446-457
- [53] Lee J H. Investigation of extreme environmental conditions and design thermal gradients during construction for prestressed concrete bridge girders [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(3): 547-556
- [54] 魏光坪. 单室预应力混凝土箱梁温度场及温度应力研究[J]. *西南交通大学学报*, 1989, 24(4): 90-97 (Wei Guangping. Research for temperature fields and temperature stresses of prestressed concrete single-box girder bridge [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1989, 24(4): 90-97 (in Chinese))
- [55] Riding K A, Poole J L, Schindler A K, et al. Temperature boundary condition models for concrete bridge members [J]. *ACI Materials Journal*, 2007, 104(4): 379-387
- [56] Mirambell E, Aguado A. Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(9): 2388-2409
- [57] 张玉平, 杨宁, 李传习. 无铺装层钢箱梁日照温度场分析[J]. *工程力学*, 2011, 28(6): 156-162 (Zhang Yuning, Yang Ning, Li Chuanxi. Research on

- temperature field of steel box girder without pavement caused by the solar radiations [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 156-162 (in Chinese))
- [58] Moorty S, Roeder C W. Temperature-dependent bridge movements [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(4): 1090-1105
- [59] 徐丰. 混凝土箱梁桥温度效应关键因素研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009 (Xu Feng. Study on the key factors of temperature effect of concrete box-girder bridges [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009 (in Chinese))
- [60] Maes M A, Dilger W H, Ballyk P D. Extreme values of thermal loading parameters in concrete bridges [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1992, 19(6): 935-946
- [61] Froli M, Barsotti R. Statistical analysis of thermal actions on a concrete segmental box-girder bridge [J]. *Structural Engineering International*, 2000, 10(2): 111-116
- [62] Roberts-Wollman C L, Breen J E, Cawse J. Measurements of thermal gradients and their effects on segmental concrete bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2002, 7(3): 166-174
- [63] Shushkewich K W. Design of segmental bridges for thermal gradient [J]. *PCI Journal*, 1998, 43(4): 120-137
- [64] 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
- [65] 雷笑, 叶见曙, 王毅. 日照作用下混凝土箱梁的温差代表值[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(6): 1105-1109 (Lei Xiao, Ye Jianshu, Wang Yi. Representative value of solar thermal difference effect on PC box-girder [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2008, 38(6): 1105-1109 (in Chinese))
- [66] 叶见曙, 雷笑, 王毅. 基于统计分析的混凝土箱梁温差标准值研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(11): 50-54 (Ye Jianshu, Lei Xiao, Wang Yi. Study of characteristic value of thermal difference of concrete box girder based on statistical analysis [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(11): 50-54 (in Chinese))
- [67] Peiretti H C, Parrotta J I E, Oregui A B, et al. Experimental study of thermal actions on a solid slab concrete deck bridge and comparison with eurocode 1 [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19(10): 1-13
- [68] Hedegaard B D, French C E W, Shield C K. Investigation of thermal gradient effects in the I-35W St. anthony falls bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(9): 890-900
- [69] Lee J H, Kalkan I. Analysis of thermal environmental effects on precast, prestressed concrete bridge girders: temperature differentials and thermal deformations [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(3): 447-460
- [70] 陶翀, 谢旭, 申永刚, 等. 基于概率分析的混凝土箱梁温度梯度模式[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2014, 48(8): 1353-1361 (Tao Chong, Xie Xu, Shen Yonggang. Study on temperature gradient of concrete box girder based on probability analysis [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition*, 2014, 48(8): 1353-1361 (in Chinese))
- [71] Abid S, Taysi N, Ozakca M. Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106(C): 523-532
- [72] Im C K, Chang S P. Thermal behavior of composite box-girder bridges [J]. *Structures and Buildings*, 2000, 140 (2): 117-126
- [73] Lucas J M, Berred A, Louis C. Thermal actions on a steel box girder bridge [J]. *Structures and Buildings*, 2003, 156(2): 175-182
- [74] Lucas J M, Virlogeux M, Louis C. Temperature in the box girder of the normandy bridge [J]. *Structural Engineering International*, 2005, 15(3): 156-165
- [75] Ding Y, Zhou G, Li A, et al. Thermal field characteristic analysis of steel box girder based on long-term measurement data [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2012, 12(2): 219-232
- [76] 丁幼亮, 王高新, 周广东, 等. 基于长期监测数据的润扬大桥扁平钢箱梁温度分布特性[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 94-101 (Ding Youliang, Wang Gaoxin, Zhou Guangdong, et al. Temperature distribution on flat steel box girders of runyang bridges based on long-term measurement data [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(2): 94-101 (in Chinese))
- [77] 王高新, 丁幼亮, 王晓晶, 等. 苏通大桥扁平钢箱梁温度场长期监测与统计分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2): 69-120 (Wang Gaoxin, Ding Youliang, Wang Xiaojing, et al. Long-term monitoring and statistical analysis of temperature field of flat steel-box girder of Sutong bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(2): 69-120 (in Chinese))
- [78] 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 Yang, Zhang Haiping, Deng Yang, 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))
- [79] 王达, 张永健, 刘扬, 等. 基于健康监测的钢桁加劲梁钢-混组合桥面系竖向温度梯度效应分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(11): 29-36 (Wang Da, Zhang Yongjian, Liu Yang, et al. Vertical temperature gradient effect analysis of steel-concrete composite deck system on steel truss stiffening girder with health monitoring [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(11): 29-36 (in Chinese))
- [80] 王永宝, 赵人达, 张双洋. 桥梁结构温度场测点布置方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2016(2): 271-278 (Wang Yongbao, Zhao Renda, Zhang Shuangyang. Research on measuring points distribution in the temperature field of bridge structure [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition*, 2016(2): 271-278 (in Chinese))
- [81] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 第 2 版. 北京: 人民

- 交通出版社, 2013 (Xiang Haifan. Advanced theory of bridge structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013 (in Chinese))
- [82] Eurocode1, Actions on Structures, Part1-5: General Actions-Thermal Actions [S]. Belgium, Brussels: European Committee for Standardization.
- [83] Zuk W. Thermal and shrinkage stresses in composite beams [J]. ACI Structural Journal, 1961, 58(9): 327-340
- [84] Maher D. The effects of differential temperature on continuous prestressed concrete bridges [J]. Institute Engineers, Civil Engineering Transactions, 1970, GE12(1): 29-32
- [85] Priestley M J N. Design thermal gradients for concrete bridges [J]. New Zealand Engineering, 1976, 31: 213-219
- [86] Priestley M J N. Design of concrete bridges for temperature gradients [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1978, 75(5): 209-217
- [87] Bridge Manual(2nd Ed). Section 3: design loading [S]. Wellington, New Zealand: Transit New Zealand, 2003
- [88] Hoffman P C, McClure R M, West H H. Temperature study of an experimental segmental concrete bridge [J]. PCI Journal, 1983, 28(2): 78-97
- [89] Tong M, Tham L G, Au F T K. Extreme thermal loading on steel bridges in tropical region [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(6): 357-366
- [90] Mistructe F T K A, Masce L G T B, MPHIL M T B. Design thermal loading for steel bridges in Hong Kong [J]. Hkie Transactions, 2001, 8(2): 1-9
- [91] 刘江, 刘永健, 房建宏, 等. 高原高寒地区“上”形钢-混凝土组合梁的竖向温度梯度模式[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 32-44 (Liu Jiang, Liu Yongjian, Fang Jianhong, et al. Vertical temperature gradient pattern of “上”-shape steel-concrete composite girder in arctic-alpine region [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 32-44 (in Chinese))
- [92] TB 10092—2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017 (TB 10092—2017 Code for design on concrete structures of railway bridge and culvert [S]. Beijing: China Railway Press, 2017 (in Chinese))
- [93] 顾斌, 陈志坚, 陈欣迪. 基于气象参数的混凝土箱梁日照温度场仿真分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(5): 950-955 (Gu Bin, Chen Zhijian, Chen Xindi. Simulation analysis for solar temperature field of concrete box girder based on meteorological parameters [J]. Journal of Dongnan University: Natural Science Edition, 2012, 42(5): 950-955 (in Chinese))
- [94] 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 Yousong. Studies on theory of solar radiation thermal effects on concrete bridges with application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007 (in Chinese))
- [95] 李宏江, 李湛, 王迎军, 等. 广东虎门辅航道连续刚构桥混凝土箱梁的温度梯度研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(5): 67-70 (Li Hongjiang, Li Zhan, Wang Yingjun, et al. Study on temperature gradient of concrete box girder of continuous rigid frame bridge over humen auxiliary navigation pass of guangdong province [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(5): 67-70 (in Chinese))
- [96] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specification [S]. Washington: AASHTO, 2012
- [97] BS5400 Steel, concrete and composite bridges part 2. specification for loads [S]. London: British Standards Institution, 1978
- [98] AS 5100. 2—2004 Australian standard, bridge design, Part 2: design loads[S]. Sydney: Australia Standards, 2004
- [99] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015 (JTG D60—2015 General specifications for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2015 (in Chinese))
- [100] 聂玉东. 寒区大跨径混凝土箱梁桥温度场及温度效应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013 (Nie Yudong. Analysis of temperature field and temperature effect for long span concrete box girder bridges in cold regions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese))
- [101] 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
- [102] Song X M, Melhem H, Li J, et al. Effects of solar temperature gradient on long-span concrete box girder during cantilever construction [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3): 4015061
- [103] Potgieter I C, Gamble W L. Response of highway bridges to nonlinear temperature distributions [R]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign
- [104] Potgieter I C, Gamble W L. Nonlinear temperature distributions in bridges at different locations in the united states [J]. PCI Journal, 1989, 34(4): 80-103
- [105] 肖建庄, 宋志文, 赵勇, 等. 基于气象参数的混凝土结构日照温度作用分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(4): 30-36 (Xiao Jianzhuang, Song Zhiwen, Zhao Yong, et al. Analysis of solar temperature action for concrete structure based on meteorological parameters [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4): 30-36 (in Chinese))
- [106] Ho D, Liu C H. Extreme thermal loadings in highway bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(7): 1681-1696
- [107] Kennedy J B, Soliman M H. Temperature distribution in composite bridges [J]. Journal of Structure Engineering, 1987, 113(3): 475-482
- [108] GB 50923—2013 钢管混凝土拱桥技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014 (GB 50923—2013 Technical code for concrete-filled steel tube arch bridges[S]. Beijing: China Planning Press, 2014 (in Chinese))
- [109] JTG/T D65-06—2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015 (JTG/T D65-06—2015 Specifications for design of highway concrete-filled steel tubular arch bridges [S]. Beijing:

- China Communications Press, 2015 (in Chinese))
- [110] 闫雯. 钢管混凝土拱肋截面温度场及温度效应分析[D]. 西安: 长安大学, 2008 (Yan Wen. Analysis on temperature field and its effect of concrete filled steel tubular rib section [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008 (in Chinese))
- [111] 彭友松, 强士中, 刘悦臣. 钢管混凝土圆管拱肋日照温度分布研究[J]. 桥梁建设, 2006(6): 18-20, 24 (Peng Yousong, Qiang Shizhong, Liu Yuechen. Study of sunshine temperature distribution in circular concrete-filled steel tube arch rib [J]. Bridge Construction, 2006(6): 18-20, 24 (in Chinese))
- [112] 刘振宇, 陈宝春. 日照作用下钢管混凝土构件截面温度场有限元分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(7): 49-53 (Liu Zhenyu, Chen Baochun. Finite element analysis on temperature field of cfst members under solar radiation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(7): 49-53 (in Chinese))
- [113] 陈宝春, 刘振宇. 日照作用下钢管混凝土构件温度场实测分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(12): 117-122 (Chen Baochun, Liu Zhenyu. Analysis on temperature field tests of cfst members under solar radiation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(12): 117-122 (in Chinese))
- [114] 陈宝春, 刘振宇. 钢管混凝土拱桥温度问题研究综述[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 412-418 (Chen Baochun, Liu Zhenyu. A state-of-art of research on temperature problem of concrete filled steel tubular arch bridge [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2009, 37(3): 412-418 (in Chinese))
- [115] 彭友松, 强士中, 李松. 哑铃形钢管混凝土拱日照温度分布研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 71-75 (Peng Yousong, Qiang Shizhong, Li Song. Temperature distributions in dumbbell cross section concrete-filled steel tube arches due to solar radiation [J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 71-75 (in Chinese))
- [116] 林春姣, 郑皆连, 秦荣. 哑铃形钢管混凝土截面水化热温度分布有限元分析[J]. 中外公路, 2007, 27(4): 125-127
- [117] 曹宝春, 刘振宇. 日照作用下钢管混凝土桁拱温度场实测研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3): 72-79 (Cao Baochun, Liu Zhenyu. Research on thermal field test of concrete filled steel tubular truss arch under solar radiation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3): 72-79 (in Chinese))
- [118] 刘振宇, 余健. 上承式钢管混凝土桁拱温度作用取值与温度效应分析[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2012, 34(4): 373-377 (Liu Zhenyu, Yu Jian. Thermal action magnitude and temperature effect analyses on half-through concrete filled steel tubular truss arch [J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology Edition, 2012, 34(4): 373-377 (in Chinese))
- [119] 周勇超, 胡圣能, 宋磊, 等. 钢-混凝土组合梁的温度骤变效应分析[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(1): 20-26 (Zhou Yongchao, Hu Shengneng, Song Lei, et al. Effect analysis of steel-concrete composite beam caused by sudden change of temperature[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(1): 20-26 (in Chinese))
- [120] 徐长武, 任志刚, 霍凯成. 太阳辐射作用下钢管膨胀混凝土界面性能试验与分析[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 201-210 (Xu Changwu, Ren Zhigang, Huo Kaicheng. Experiment and analysis on interfacial performance of concrete filled steel tubes under solar radiation [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8): 201-210 (in Chinese))
- [121] Mirambell E, Aguado A, Mendes P A, et al. Design temperature differences for concrete bridges [J]. Structural Engineering International, 1991, 1(3): 36-40
- [122] Imbsen R A, Vandershaf D E, Schamber R A, et al. Thermal effects in concrete bridge super structures [R]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1985
- [123] 季德钧, 刘江, 张琢芳, 等. 高原高寒地区钢-混凝土组合梁斜拉桥温度效应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 113-119 (Ji Dejun, Liu Jiang, Zhang Zhuanfang, et al. Temperature effect analysis of steel-concrete composite girder cable-stayed bridge in arctic-alpine region [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 113-119 (in Chinese))
- [124] 王志祥. 高寒地区钢-混凝土组合梁斜拉桥施工阶段温度效应分析[D]. 西安: 长安大学, 2017 (Wang Zhixiang. The temperature effect of the steel-concrete composite cable-stayed bridge during the construction phase in arctic-alpine region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017 (in Chinese))
- [125] 刘广龙, 刘江, 刘永健, 等. 西北极寒地区混凝土箱梁温度场实测与仿真分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(3): 64-71 (Liu Guanglong, Liu Jiang, Liu Yongjian, et al. Measurement and simulation of temperature field of concrete box girder in northwest severe cold area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(3): 64-71 (in Chinese))
- [126] 尹冠生, 赵振宇, 徐兵. 太阳辐射作用下拱桥温度场研究[J]. 应用力学学报, 2014(6): 939-944 (Yin Guansheng, Zhao Zhenyu, Xu Bing. Computer program for directed structure topology optimization [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014(6): 939-944 (in Chinese))
- [127] Zhu J, Meng Q Effective and fine analysis for temperature effect of bridges in natural environments [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 1-19
- [128] 陈拯, 金峰, 王进廷. 拱坝坝面太阳辐射强度计算[J]. 水利学报, 2007, 38(12): 1460-1465 (Chen Zheng, Jin Feng, Wang Jinting. Ray-tracing algorithm for solar radiation intensity computation of arch dam surface [J]. Shuili Xuebao, 2007, 38(12): 1460-1465 (in Chinese))

刘永健 (1966—), 男, 博士, 教授。主要从事钢桥与组合结构桥梁理论方面的研究。

刘江 (1991—), 男, 博士研究生。主要从事组合结构桥梁温度效应方面的研究。

张宁 (1981—), 男, 博士, 副教授。主要从事桥梁工程方面的研究。