

文章编号:1671-1637(2020)01-0042-18

钢-混凝土组合梁桥温度作用与效应综述

刘永健, 刘 江

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为深化对钢-混凝土组合梁桥温度作用与效应的认识,从施工阶段水化热温度作用与效应计算,运营阶段温度作用模式与取值,以及温度效应计算方法等方面,综述了国内外研究现状,探讨了后续的研究重点和方向。研究表明:现浇组合梁桥施工阶段水化热温度作用是桥面板早期开裂的重要原因,准确计算组合梁水化热温度效应的关键在于选取更为准确适用的水化热模型和考虑温度变化对混凝土硬化过程中弹性模量、抗拉强度以及剪力钉连接刚度发展的影响;运营环境下组合梁桥主要考虑均匀温度、正负温度梯度等 3 种温度作用模式,由于不同国家气候环境的差异及研究历程的不同,各国规范关于组合梁桥温度作用模式和取值的规定尚不统一,温度梯度作用的取值并非基于统计分析方法得到,在取值时亦未充分利用已有历史气象数据资源;组合梁桥温度效应的计算多基于有限元数值模拟展开,求解组合梁温度效应的解析计算方法也逐渐准确化,钢-混界面关系已从不考虑界面滑移发展到考虑界面滑移,温度分布模式从简单的钢-混均匀温差发展到钢与混凝土任意温度分布,但还应加强建立任意边界组合梁温度效应求解的理论模型;组合梁桥温度问题研究的未来发展方向应集中在开展基于效应分类的组合梁温度作用模式研究,从机理上加强对组合梁温度自生效应和次生效应的认识,加强组合梁桥长期温度实测,基于统计分析确定组合梁温度作用代表值;同时充分利用中国各地区气象部门历史气象数据,开展组合梁温度作用地域差异性取值研究。

关键词:桥梁工程;综述;钢-混凝土组合梁;温度作用;温度效应;解析方法

中图分类号:U442.59 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.01.003

Review on temperature action and effect of steel-concrete composite girder bridge

LIU Yong-jian, LIU Jiang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To understand the temperature action and effect of composite girder bridge in depth, the research status of domestic and overseas, including the temperature action and effect of hydration heat in construction stage, the temperature action patterns and finding values methods in the operation stage, and the calculation methods of temperature effect, was summarized and analyzed. The subsequent research emphases and directions were discussed. Research result shows that the hydration heat temperature effect is an important reason for the early cracking of decks in cast-in-situ composite girder bridges. The accurate selection of applicable hydration heat model and the consideration of the effect of temperature history on the elastic modulus and tensile strength of hardening concrete and the connection stiffness of studs are the keys to accurately

收稿日期:2019-09-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51978061);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219310);陕西省交通运输厅科研项目(17-14k)

作者简介:刘永健(1966-),男,江西玉山人,长安大学教授,工学博士,从事钢桥与组合结构桥梁研究。

calculate the hydration heat temperature effect of composite girder. Three temperature action patterns, including uniform temperature, positive and negative temperature gradients, are generally taken into consideration on the composite girder bridge in the operation environment. The specifications of temperature action patterns and values of composite girder bridges are not coincident due to the differences in climate environments and research histories in different countries. Additionally, the temperature gradients are not obtained based on the statistical analysis and the existing historical meteorological data resources are not fully utilized. The temperature effect calculations of composite girder bridges are mostly based on the finite element numerical simulation. The analytical calculation methods for solving the temperature effect of composite girders are also improved, from taking no account of the interfacial slip and simple steel-concrete uniform temperature difference to considering the interfacial slip and arbitrary temperature distribution of steel and concrete. However, the theoretical model for solving the temperature effect of composite girder with arbitrary boundaries should be strengthened. The future research directions of composite girder bridge temperature problem should focus on the composite girder temperature action pattern based on effect classification, the in-depth understanding the temperature self-generated and secondary effects from the mechanism, and strengthening the long-term temperature measurement to determine the representative values of temperature actions by statistical analysis, as well as fully using the historical meteorological data of the meteorological departments in various regions of China to study the regional differences of the temperature action values. 4 tabs, 13 figs, 75 refs.

Key words: bridge engineering; review; steel-concrete composite girder; temperature action; temperature effect; analytical method

Author resume: LIU Yong-jian(1966-), male, professor, PhD, liuyongjian@chd.edu.cn.

0 引言

钢-混凝土组合梁能够充分发挥钢和混凝土 2 种材料的优势,具有自重轻、承载力高、动力性能好、经济性突出和利于工业化建造等优点,已经成为中小跨径桥梁极具竞争力的桥型,在欧美等发达国家的桥梁建设中占有重要地位^[1]。自 2015 年来,中国交通运输部制定了一系列关于推进钢-混组合梁桥发展的政策,极大地加快了组合梁在中国桥梁工程中的应用^[2]。

钢-混组合梁在 20 世纪 50 年代开始应用于桥梁工程,到目前为止,国内外有关组合梁的研究主要集中在其静、动力性能和设计方法等方面,取得了丰硕的成果^[1-3]。但是,桥梁结构除了承受静、动力荷载外,还时刻受到自然环境中周期性太阳辐射和气温变化的作用,极端情况下产生的温度效应甚至能超过恒载和活载,成为控制桥梁设计的第一作用,混凝土桥梁及墩柱的温致裂缝多因此产生^[4],在欧洲,甚至还出现过由于温度应力过大引起桥梁施工时垮塌的现象^[5-6]。刘兴法最早在中国开展了桥梁结构温度作用

与效应的研究^[7],其指出,桥梁温度作用有如下 3 个特点:温度作用产生的应力不再符合简单的虎克定律关系;温度沿桥梁构件的分布具有典型的非线性特征;桥梁结构的温度分布及产生的温度应力瞬时变化,具有明显的时间性。以上 3 个特点使得温度效应的计算较其他荷载形式更为复杂。但现有关于组合梁温度作用与效应的研究并不充分,尤其国内的研究现状还不足以形成系统的温度设计方法。

提出适用的温度作用模式是准确评估桥梁温度效应的前提,但关于组合梁温度作用模式的研究远滞后于混凝土桥梁,现有规范体系关于组合梁桥温度作用的规定大都承接于对混凝土箱梁桥的研究,而组合梁由钢和混凝土 2 种导热性能相差 50 倍左右的材料组成,使得日照作用下组合梁桥温度分布的非线性程度较混凝土桥梁更强^[4],这种对混凝土箱梁温度作用模式的简单借鉴难以满足组合梁温度效应准确计算的需求。由于界面剪力连接件的存在,组合梁温度效应的计算方法与混凝土梁亦有根本不同^[8]。除此之外,对于现浇桥面板的组合梁桥,混凝土水化热温度效应联合收缩、徐变效应引起的

拉应力,是桥面板早期开裂重要原因,且已得到了国外学者的关注,由于国内组合梁应用较晚,此处的研究则相对空白,现行规范对此亦无明确说明。

为进一步推进钢-混组合梁桥在中国的应用,特别推进组合梁在中国西部气候更极端、桥梁温度效应更显著的高原高寒地区的应用,本文对国内外组合梁施工、运营阶段的温度作用及效应研究现状进行了综述和分析,对未来研究的发展趋势和主要方向进行了预测和展望,以求在中国逐步建立起钢-混组合梁桥的温度设计理论,完善现有的规范体系。

1 施工水化热作用下组合梁的温度作用与效应

1.1 组合梁水化热温度场

现浇桥面板水化热作用下的温度应力及桥面板的早期裂缝是施工阶段需要特别关注的组合梁温度效应问题。水化热作用下,桥面板温度迅速上升,在 10~20 h 即可达到峰值,由于桥面板混凝土方量较小,其水化热温升往往不超过 20 °C,远小于桥梁墩柱、混凝土箱梁及零号块等部位的水化热温升^[9-10]。由于组合梁的水化热温度场变化是由混凝土内部放热引起,因此,桥面板内部的温度往往高于边缘,形成了类似于环境降温时组合梁的竖向温度分布模式^[9]。由于钢梁与混凝土桥面板底面直接接触,温度也会随之升高,并向钢梁底部逐渐传递。

组合梁在混凝土水化热作用下的温度场计算往往采用有限元数值模拟方法,与一般混凝土结构并无太大的区别,但需要考虑钢梁对桥面板温度场的影响,一般认为钢和混凝土紧密接触,界面温度和热流量连续,满足第 4 类热传导边界条件的假定。水化热温度场准确计算的关键是选取合适的混凝土水化热模型或绝热温升曲线,但绝热温升试验要求条件复杂,在无绝热温升试验条件的情况下,可以采用水泥水化热经验模型计算温度场。朱伯芳总结了常用的水泥水化热模型^[11],主要包括美国垦务局提出的指数式、蔡正咏提出的双曲线式以及朱伯芳提出的复合指数式模型,这些模型都是基于大体积混凝土水工结构在 15 °C~25 °C 浇筑温度下水化热绝热温升实测数据提出的经验公式,亦未充分考虑混凝土温度发展历程对水泥水化反应速率的影响,且桥梁用水泥品种和混凝土配合比均与水工结构相差较大,故在选用水泥水化热模型时应根据实测绝热温升数据拟合待定系数选取。Crsitofari 等则依据化学反应动力学原理,提出了同时考虑浇筑温度和

龄期的水泥水化热模型,见式(1)^[12]。图 1 对比了 4 种水泥水化热模型的放热速率,仅 Crsitofari 模型的放热速率存在速率峰值,即放热速率先快速升高后又逐渐减缓。Crsitofari 模型与多数学者的放热实测结果相符,同时,其可以考虑不同浇筑温度的影响,有助于提高组合梁水化热温度场的模拟精度。

$$Q(t) = Q_0 \exp \left\{ -\lambda \left[2\beta \exp(\gamma T_0) \frac{t}{60} \right]^{-\zeta} \right\} \quad (1)$$

式中: $Q(t)$ 为累计水化热; Q_0 为最终累计水化热; T_0 为浇筑温度; t 为龄期; λ 、 β 、 γ 、 ζ 均为经验参数。

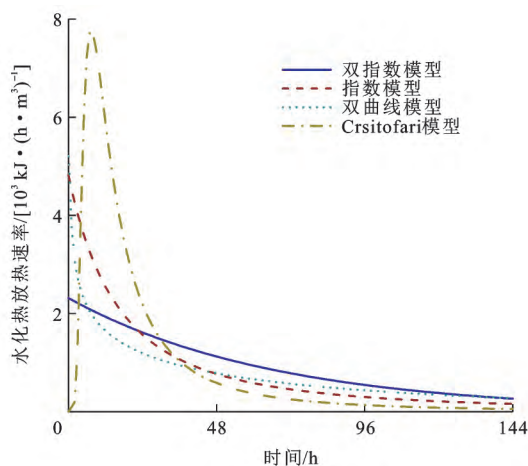


图 1 不同水化热模型放热速率对比

Fig. 1 Comparison of heat release rates of different hydration heat models

1.2 组合梁水化热温度效应

由于水泥水化热的放热过程也是混凝土力学性能逐渐形成的过程,水化热温度效应往往采用增量方法计算,因此,组合梁水化热温度效应的模拟需要重点考虑混凝土硬化过程中力学特性随龄期的增长。与水化热模式类似,指数、对数或双曲线公式等均可从经验上拟合混凝土弹性模量、抗拉强度的发展过程,但这些公式同样无法考虑温度变化对水化反应速率的改变及对混凝土力学性能的影响^[13]。水化速率随温度的变化可以用 Arrhenius 方程^[14]表示,Bazant 进一步提出了成熟函数用来计算相对于参考温度的混凝土等效龄期,通过温度历程与参考温度的对比,可以反映出在水化反应过程中的水化速率^[15]。有了等效龄期的概念,便可以定量考虑温度历程对水化热 η (水化热反应程度) 的影响。De Schutter 等在大量试验的基础上发现混凝土力学性能发展和水化热有强烈的相关性,并建立了早龄期混凝土水化热与混凝土抗压强度、抗拉强度和弹性模量的表达式^[16],为

$$\frac{f_c(\eta)}{f_c(\eta=1)} = \left(\frac{\eta-\eta_0}{1-\eta_0}\right)^a \quad (2)$$

$$\frac{f_t(\eta)}{f_t(\eta=1)} = \left(\frac{\eta-\eta_0}{1-\eta_0}\right)^{na} \quad (3)$$

$$\frac{E_c(\eta)}{E_c(\eta=1)} = \left(\frac{\eta-\eta_0}{1-\eta_0}\right)^{ma} \quad (4)$$

式中: $f_c(\eta)$ 、 $f_t(\eta)$ 和 $E_c(\eta)$ 分别为水化热度为 η 时对应的混凝土抗压强度、抗拉强度和弹性模量; $f_c(\eta=1)$ 、 $f_t(\eta=1)$ 和 $E_c(\eta=1)$ 分别为水化热完成时对应的混凝土抗压强度、抗拉强度和弹性模量; η_0 为混凝土开始形成刚度时的临界水化热度; a 、 n 、 m 均为系数,对于普通硅酸盐水泥(即波特兰水泥), $a=3/2$, $n=2/3$, $m=1/3$ 。

组合梁的剪力钉连接件刚度与混凝土的弹性模量和抗压强度直接相关,因此,在混凝土硬化过程中界面刚度也在随龄期逐渐提高。桥面板在水化热升温时受到钢梁约束产生压应力,但因混凝土硬化初期组合梁界面刚度小,桥面板形成的压应力储备不足,在水化热后期,桥面板温度降低,受钢梁约束则产生拉应力,由于此时的组合梁界面刚度较大,因此,桥面板会产生较大的拉应力,进一步增加了桥面板开裂的风险。Topkaya 等对龄期在 4~28 h 的剪力钉连接件开展了推出试验,其发现在混凝土浇筑后的短期内剪力钉连接件便可形成可观的强度和刚度,并建议采用美国混凝土协会(American Concrete Institute, ACI)公式计算早龄期混凝土剪力钉抗剪刚度,以考虑混凝土弹性模量和抗压强度形成过程的影响^[17],为

$$\frac{k(\eta)}{k(\eta=1)} = \sqrt{\frac{E_c(\eta)f_c(\eta)}{E_c(\eta=1)f_c(\eta=1)}} \quad (5)$$

式中: $k(\eta)$ 为水化热度为 η 时的剪力钉抗剪刚度。

组合梁的钢梁上翼缘顶部与混凝土桥面板底部

紧密接触,钢梁温度亦受水化热升温的影响逐渐升高,在温度效应计算时不应忽视钢梁的温度分布。表 1 列出了组合梁的水化热温度场和温度效应部分典型研究,Subramaniam 等对现浇简支组合梁水化热阶段的温度和应力进行了测试,证实了升温阶段钢梁上的温度梯度对水化热末端桥面板的拉应力有较大贡献^[18]。混凝土的水化过程必然还伴随着混凝土的收缩和徐变现象,Gara 等认为组合梁桥面板的早期开裂与水化热温度效应、收缩和徐变均有较大关系^[19]。Choi 等制作了梁高为 0.76 m、跨径为 8 m 的简支组合梁桥缩尺模型,对其水化热阶段的温度、应变和环境气象参数进行了充分的测试,为组合梁水化热阶段热-湿-力耦合行为的研究提供了充足的试验数据,并进一步对组合梁模型在太阳辐射、气温及水化热作用下的温度分布、湿度分布以及产生的效应进行了精细化的数值模拟,其研究结果表明:温度和收缩是引起早龄期混凝土桥面板开裂最为主要的原因;均匀收缩模型会显著低估桥面板顶部的收缩拉应力;由于水化热阶段的混凝土应力处在拉压交替变化的阶段,徐变对组合梁桥面板温致裂缝的影响并没有想象中那么大^[10,20]。Bertagnoli 等则假定组合梁桥面板收缩沿截面均匀分布,水化热温度分布为钢-混均匀温差,其基于 Newmark 的组合梁滑移理论提出了考虑水化热温度、收缩和徐变的早龄期混凝土桥面板应力简化计算方法,证实了考虑早龄期组合梁界面剪力钉刚度增长对组合梁水化热温度效应计算的重要性^[21]。以上学者主要研究了组合梁在水化热作用下易发生早期开裂的机理,还有学者从桥面板养护、浇筑顺序及材料等方面研究了组合梁桥面板的防早裂技术^[22-24],此处不再赘述。

表 1 组合梁的水化热温度场和温度效应部分典型研究

Tab. 1 Some typical reseaches on hydration heat caused temperature field and temperature effect of composite girder

作者	时间	研究对象	研究方法	主要研究内容
Subramaniam 等 ^[18]	2010 年	跨径为 32.4 m 的简支钢板组合梁桥	实桥测试	桥面板水化热引起的组合梁钢和混凝土温度分布及温度应力实测
Gara 等 ^[19]	2013 年	跨径组合为(40+50+40) m 的连续钢箱组合梁桥	数值模拟	组合梁桥面板早期开裂产生的原因和防开裂控制方法
Choi 等 ^[10,20]	2011 年	跨径为 8 m 的简支钢板组合梁缩尺模型	模型测试与数值模拟	桥面板水化热引起的组合梁温度分布和湿度分布规律,早龄期桥面板收缩、徐变和温度效应的变化规律
Bertagnoli 等 ^[21]	2017 年	梁高为 3.35 m 简支钢板组合梁	理论推导	基于 Newmark 理论建立了水化热阶段考虑界面滑移的组合梁温度、收缩和徐变效应耦合的组合梁效应解析解

需要指出的是,现有规范关于组合梁水化热阶段的温度场和温度应力计算并未给出具体的规定,若能提出水化热阶段组合梁的简化温度作用模式和非均匀收缩模式,则可以采用杆系模型代替精细化

的有限元数值模拟,极大简化水化热阶段组合梁温度效应的计算与桥面板早期开裂的评估。

2 运营环境作用下组合梁的温度作用

在运营阶段,设计与工程人员往往更关注太阳辐射、气温和风速等环境因素下温度作用对桥梁结构的影响。早期学者便开始了钢-混凝土组合梁温度作用的研究,或是基于短期实测展开温度分布特性及空间分布规律的研究^[25-26],或是采用有限差分和有限单元法自编程序展开日照组合梁温度场数值模拟方法的研究^[27-28]。这些早期的研究并未提出可以直接用于指导钢-混组合梁桥设计计算的温度作用模式,后续的学者则逐渐针对组合梁的设计与计算方法,开展了组合梁的温度作用模式和温度作用取值的研究。

2.1 组合梁温度作用的分类及影响因素

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与计算十分不便,需要提出相应的温度作用模式以简化桥梁温度效应的计算。

就环境因素而产生的温度作用,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^[7],如表 2 所示。其中,日照温度作用的主要影响因素为太阳辐射,作用时间短而急变,主要使组合梁顶面快速升温,造成温度竖向不均匀分布,作用特点具有明显的局部性。骤然降温作用主要由寒潮(强冷空气)引起,中国气象部门规定,使气温一天内下降 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上且最低降至 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的冷空气过程称为寒潮。寒潮造成桥梁构件外部逐渐降温,由于导热滞后性内部温度变化则相对缓慢,使得温度在桥梁构件上不均匀分布。年温变化作用引起桥梁结构温度变化为长期的缓慢作用,主要影响桥梁结构的整体均匀温度,因而较日照温度作用和骤然降温作用更为简单。

表 2 温度作用的特点

Tab. 2 Characteristics of temperature actions

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

在现行的国内外规范体系中,对简单梁式桥温度作用的规定大多基于上述的分类,其中,日照温度作用对应于竖向正温度梯度,骤然降温作用对应于竖向负温度梯度,而年温变化则一般对应于桥梁的

均匀温度作用。

2.2 均匀温度作用

显而易见,桥梁的伸缩变形取决于桥梁的均匀温度而不是气温,但气温是确定桥梁均匀温度最重要的气象参数。桥梁设计时,往往需要确定桥梁设计基准期可能发生的极端最高均匀温度和最低均匀温度,以此控制伸缩缝、支座甚至桥墩的设计与选型。由于多数学者认为桥梁均匀温度变化引起的纵向伸缩变形是由年温变化引起,因此,在建立桥梁均匀温度作用与气象参数的相关性公式时多采用遮阴处气温(Shade Air Temperature)这一参数,亦有学者采用常规气温建立预测公式,但这些研究均未直接引入太阳辐射参数来考虑日照对均匀温度的影响。

表 3 收集了现有关于组合梁桥均匀温度计算的公式及其参数类型和适用范围,其中: $T_{u,\max}$ 和 $T_{u,\min}$ 分别为组合梁的最高和最低均匀温度; $T_{a,N}$ 为当日夜最低气温; $T_{a,S}$ 为前日白天最高遮阴处气温; $T_{a,\max}$ 和 $T_{a,\min}$ 分别为最高和最低气温; $T_{ai,\max}$ 和 $T_{ai,\min}$ 分别为第 i 天的最高和最低气温。Emerson 最早对组合梁的均匀温度取值展开研究,其于 1976~1981 年期间在英国开展了 5 座桥梁为期 3.5 年的温度实桥测试,并基于大量的实测数据建立了计算组合梁日均匀温度最值的经验公式^[29-30]。Emerson 认为组合梁的日最低均匀温度与当日夜最低气温和前日白天最高遮阴处气温两者的均值有明显的线性关系,但并未建立组合梁日最高均匀温度的直接预测公式,而是通过日最低均匀温度加上均匀温度日最大变化幅值来确定组合梁的日最高均匀温度,其给出的均匀温度日最大变化幅值为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。英国 BS5400 规范对 Emerson 研究成果进行了调整并简化了其计算公式,给出了遮阴处气温和均匀温度对应的列表形式。Imbsen 等基于美国气象环境多样性的特点,对 Emerson 和英国 BS5400 的结论进行外推,同样给出了适用于美国温度范围的常规气温和极端均匀温度的对应列表。笔者通过拟合给出了表中的多项式表达式,拟合结果的决定系数分别为 1 和 0.996^[31]。较英国相比,美国国土面积更大,气象的地域差异性更为显著,而 Imbsen 等用简单外推已有的英国计算式的方法进行美国组合梁均匀温度取值并不严格准确,因此,Moorty 等通过准确的数值模拟,选取了极端气温数据而非日遮阴处气温建立了组合梁极端均匀温度的预测公式,其提出的公式表明,组合梁桥的极端最高均匀温度与夏季最热时连续 4 d 的日最高气温均值线性相关,极端最低

表 3 组合梁均匀温度的简化计算方法
Tab. 3 Simplified calculation methods of uniform temperatures of composite girder

来源	均匀温度类型		关系式	气温类型	适用气温范围	适用地区
Emerson ^[29-30]	极端日均均匀温度	最高	$T_{u,max}=T_{u,min}+12$	遮阴处气温	常规气温条件, 非极值气温	英国
		最低	$T_{u,min}=0.565(T_{a,S}+T_{a,N})-2.1$			
Imbsen ^[31]	极端均匀温度	最高	$T_{u,max}=-0.000\ 3T_{a,max}^3+0.014\ 6T_{a,max}^2+0.738\ 5T_{a,max}+9.796\ 2$	常规气温	12.8℃~43.3℃	美国
		最低	$T_{u,min}=-0.000\ 1T_{a,min}^3+0.003\ 8T_{a,min}^2+0.947\ 6T_{a,min}+0.395\ 5$		-34.5℃~4.5℃	
Moorty 等 ^[32-33]	极端均匀温度	最高	$T_{u,max}=0.254\sum_{i=1}^4T_{ai,max}+3.878$	常规气温	美国的极端气温条件	美国
		最低	$T_{u,min}=0.274\sum_{i=1}^4T_{ai,min}+6.740$			
BS5400	极端均匀温度	最高	表格形式(数据有台阶,无法拟合)	遮阴处气温	24℃~38℃	英国
		最低	表格形式(数据有台阶,无法拟合)		-24℃~-5℃	
Eurocode-1	极端均匀温度	最高	$T_{u,max}=T_{a,max}+4$	遮阴处气温	30℃~50℃	欧洲
		最低	$T_{u,min}=T_{a,min}+4$		-50℃~0℃	
澳大利亚桥梁规范	极端均匀温度	最高	$T_{u,max}=0.000\ 4T_{a,max}^3-0.042\ 0T_{a,max}^2+2.087\ 5T_{a,max}+10.513\ 0$	遮阴处气温	30℃~50℃	澳大利亚
		最低	$T_{u,min}=-0.001\ 5T_{a,min}^3+0.018\ 5T_{a,min}^2+0.648\ 1T_{a,min}+0.209\ 9$		-8℃~10℃	
《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)	极端均匀温度	最高	$T_{u,max}=28.23+0.964(T_{a,max}-20)$	日平均气温最值或日极端气温最值	20℃~45℃	中国
		最低	$T_{u,min}=-0.120+0.826T_{a,min}$		-2℃~-50℃	

均匀温度与冬季最冷时连续 4 d 的日最低气温均值线性相关^[32-33]。Roeder 对比了 Moorty 等和 Emerson 的方法后发现,与 Moorty 等的方法相比,Emerson 方法会高估桥梁的均匀温度,即更为保守^[34],如图 2 所示,主要原因在于 Emerson 方法是以实测数据为基础通过大量常规日温度和气温数据建立的组合梁均匀温度计算式,覆盖的温度极端情况较少,不能很好地反映极端条件下组合梁均匀温度和气温的关系,因此,Emerson 方法预测组合梁的常规日均温

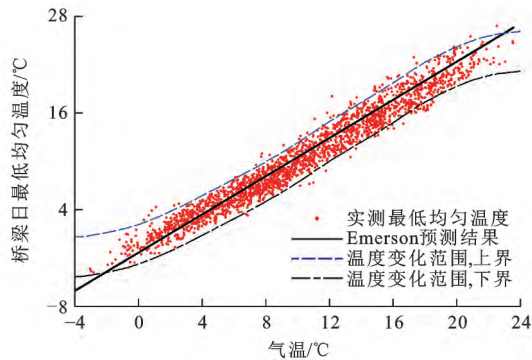


图 2 Emerson 方法与桥梁均匀温度对比
Fig. 2 Comparison between Emerson method and bridge uniform temperatures

度更为准确,而 Moorty 等的方法则更适合预测组合梁的极端均匀温度。在此基础上,Roeder 充分调研了美国 1 273 个气象站点至少 60 年的历史气象数据,采用 Moorty 等的方法计算了美国各地的组合梁极端均匀温度取值,绘制了组合梁计算均匀温度等温线图^[35-36]。欧洲标准 Eurocode 1 继承了英国 BS5400 温度作用的大部分条款,在其基础上对均匀温度作用取值方式进行了简化。现行 Eurocode 1 认为,组合梁的最高和最低均匀温度可取最高或最低遮阴处气温加 4℃,公式适用的气温范围也较 BS5400 有了明显的延伸。澳大利亚桥梁规范以列表的形式给出了遮阴处气温和组合梁均匀温度的关系,在表中给出了拟合后的多项式表达式,拟合结果的决定系数分别为 1 和 0.996。中国《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)根据气候区划图选取组合梁的均匀温度取值,同时在附录中给出了组合梁均匀温度和气温的关系式,并指明对混凝土和钢结构,气温可分别取历年最高或最低日平均气温和最高或最低气温,但并未明确对于组合梁桥气温该如何取值。

图 3 对比了表 2 中各组合梁均匀温度的计算方

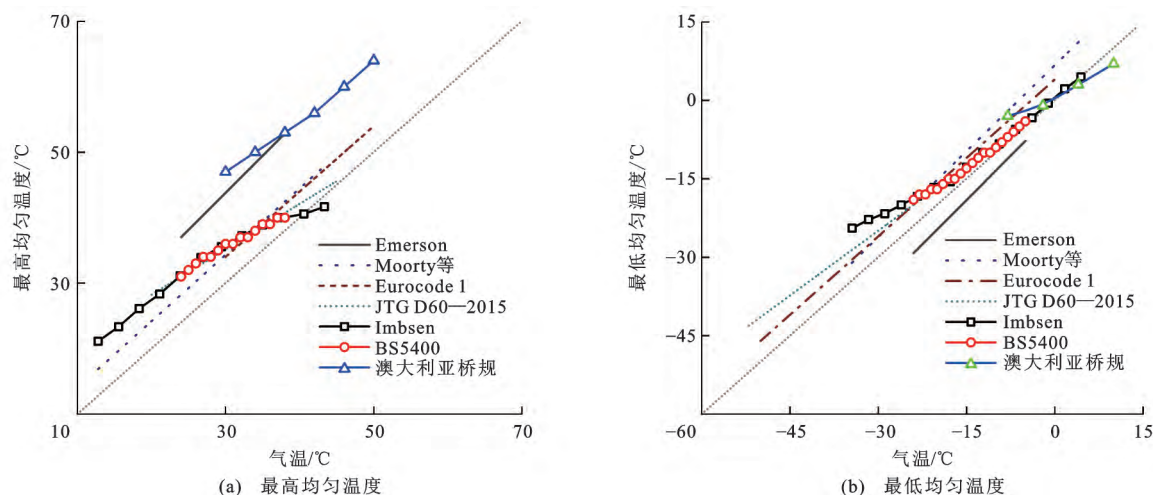


图 3 组合梁均匀温度的简化计算方法对比

Fig. 3 Comparison of simplified calculation methods of uniform temperature of composite girder

法,其中 Emerson 方法的横坐标气温取 $\frac{T_{a,S} + T_{a,N}}{2}$,

Moorty 等的方法中对应最高和最低均匀温度的横

坐标气温分别取 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 T_{ai,max}$ 和 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 T_{ai,min}$, 可以

看到,各种方法确定的组合梁最高均匀温度中仅 Imbsen 方法在极端高温时略低于气温值,其余均高于对应气温,其中澳大利亚桥梁规范的规定最为保守。相比于最高均匀温度,各种计算方法得到的最低均匀温度曲线更为接近,除 Emerson 方法和澳大利亚桥梁规范在确定组合梁最低均匀温度时低于气温外,其余方法均高于最低气温。

以上均匀温度计算的目的在于解决不同地区气温差异带来的组合梁极端均匀温度取值问题。BS5400 和 Eurocode 1 分别以列表和公式形式给出了气温和均匀温度的关系,同时给出英国或欧洲各

国的极端气温等温线图来间接确定不同地区组合梁的极端均匀温度取值。美国 AASHTO 规范一方面给出了通过温热和寒冷气候分区确定组合梁极端均匀温度的简化方法,同时又基于 Roeder^[35-36] 的研究成果给出了直接用于组合梁最高和最低均匀温度取值的等温线地图,如图 4、5 所示,较简单的分区取值更为准确。澳大利亚桥梁规范则与 BS5400 类似,但其并未直接给出极端气温的取值等温图,而是根据纬度、内陆、沿海及海拔等因素确定极端气温后间接确定组合梁极端均匀温度。中国 JTG D60—2015 与美国 AASHTO 规范的简化方法类似,但气候分区图是在中国建筑气候区划图的基础上合并形成了严寒、寒冷和温热 3 个分区,这种粗犷的分区取值方式无法体现各分区内部均匀温度取值的差异性,显然较直接等温线的取值方式更为粗糙。

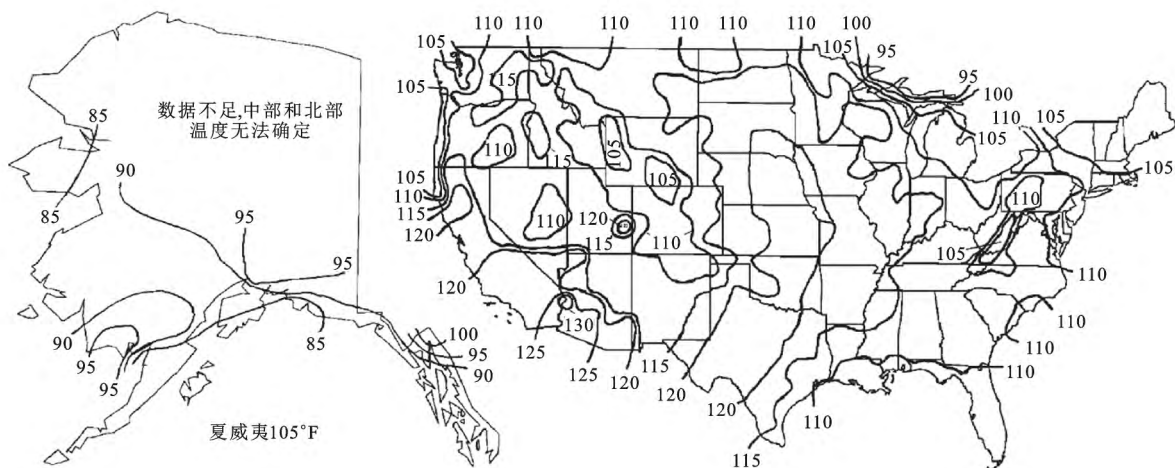


图 4 AASHTO 中组合梁最高均匀温度等温线地图(单位:°F)

Fig. 4 Isotherm map of maximum uniform temperature of composite girder in AASHTO (unit: °F)

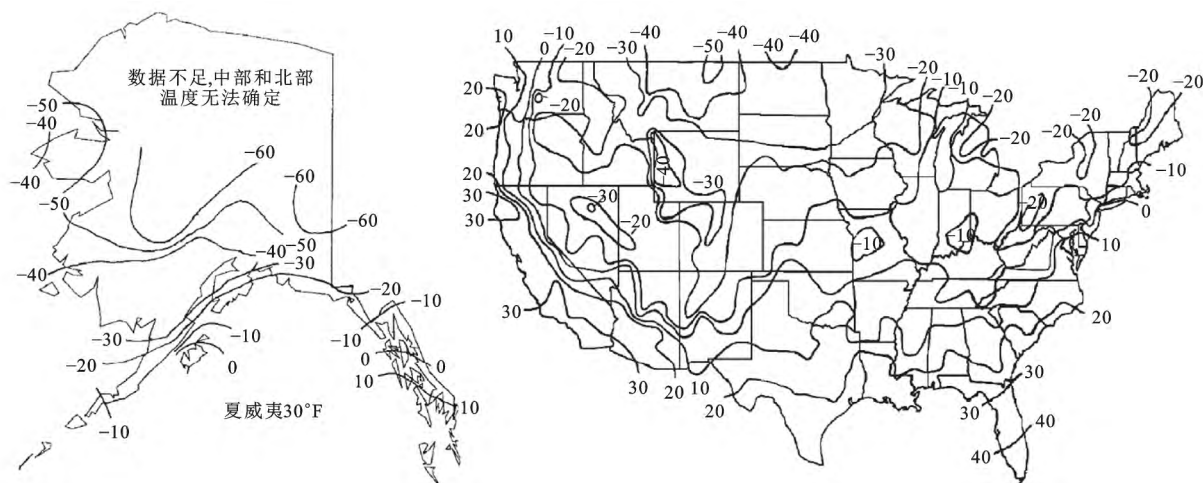


图 5 AASHTO 中组合梁最低均匀温度等温线地图(单位:°F)

Fig. 5 Isotherm map of minimum uniform temperature of composite girder in AASHTO (unit: °F)

2.3 竖向温度梯度作用

刘永健等指出:桥梁竖向温度梯度曲线一般可采用多次抛物线、指数曲线和多折线的形式表达,这些曲线形式能够较好地反映日照作用对桥梁顶部升温的影响^[4]。图 6、7 分别给出了中国 JTG D60—2015、美国 AASHTO、Eurocode 1 和澳大利亚桥梁规范中规定的组合梁正温度梯度模式和负温度梯度模式,其中: T_1 、 T_2 和 T_3 均为温度梯度模式中的温差基数; h_c 为混凝土桥面板的厚度; $T(x)$ 为温度梯度模式; x 为由组合梁桥面板顶面向下的距离。

由图 6 可知:对于正温度梯度模式(升温模式),

除 Eurocode 1 的简化模式给出钢与混凝土 10 °C 的整体温差外,其他各规范均认为日照作用引起的组合梁顶部温度梯度按照非线性形式由顶面向下逐渐减小,其中,中国 JTG D60—2015、美国 AASHTO 和 Eurocode 1 一般模式均采用了双折线的形式,而澳大利亚桥梁规范则采用了 5 次抛物线的形式,在这些形式中,组合梁顶部温度梯度分布的范围均须根据桥面板厚度 h_c 来确定。以上非线性的温度分布模式得到了多数学者实测或数值模拟的验证^[37-40],Chen 等

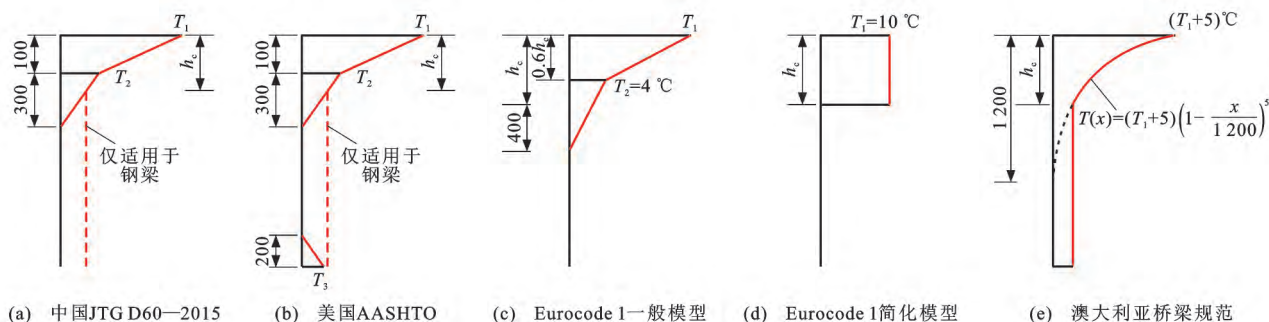


图 6 各国规范的正温度梯度模式(单位:mm)

Fig. 6 Positive temperature gradient patterns in specifications of different countries (unit:mm)

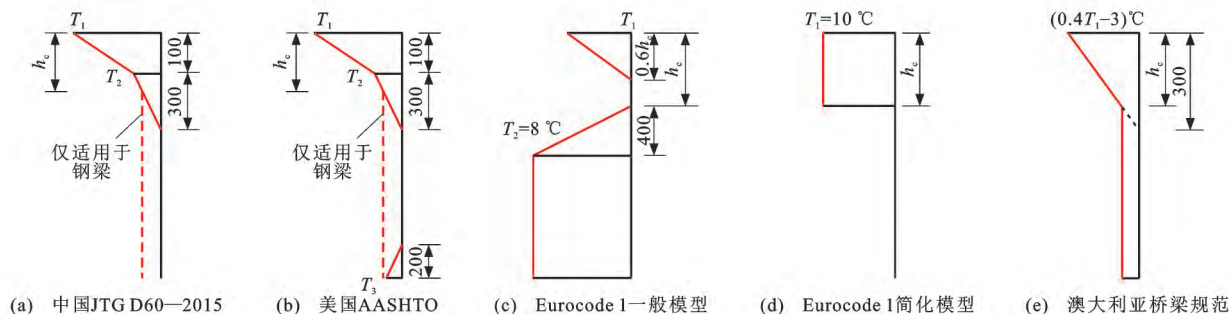


图 7 各国规范的负温度梯度模式(单位:mm)

Fig. 7 Negative temperature gradient patterns in specifications of different countries (unit:mm)

亦结合实测和数值模拟给出了组合梁多次抛物线式的温度梯度模式^[38-39]。

由图 7 可知:对于负温度梯度模式(降温模式),除 Eurocode 1 外的各规范均认为仅有混凝土桥面板存在温度梯度,钢梁上的温度则分布均匀,中国 JTG D60—2015 和美国 AASHTO 分别取各自正温度梯度乘 -0.5 和 -0.3 ,Eurocode 1 简化模式取钢-混整体 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差,澳大利亚桥梁规范则认为温度在桥面板上线性分布。可以看到,仅有 Eurocode 1 一般模式认为钢梁上存在明显的温度非线性分布。已有的实测与计算研究表明,Eurocode 1 的负温度梯度模式更符合夜晚或寒潮降温时组合梁的温度分布形式^[37-41],在白天日照时混凝土温度较钢梁高,夜晚或寒潮降温时,混凝土桥面板顶部降温快而内部降温慢,在桥面板形成了负温差,而钢梁的热传导率为混凝土桥面板的 50 倍左右,温度迅速下降,但在与混凝土连接的顶部温度下降并没那么快,因此在钢梁的顶部形成了明显的负温差。

其实,各国规范规定的温度梯度模式是存在相互借鉴的。Priestley 最早基于一维热传导分析提出了适用于混凝土箱梁的顶部 5 次抛物线温度梯度模式^[42],随后被新西兰和澳大利亚桥梁规范采用,并变异形成了组合梁相应的温度梯度模式,而美国 AASHTO 规范则是借鉴并简化了澳大利亚桥梁规范的形式。中国 JTG D60—2015 的相关规定则源于美国 AASHTO 太阳辐射 2 区的温度梯度取值,并根据中国环境特点进行了相应调整。可见,以上这些规范的组合梁温度梯度模式并不是针对组合梁的专门研究提出,而是基于混凝土箱梁修正或变异得到的,因此,对组合梁的适用性并不强。而 Eurocode 1 的温度梯度模式则来源于英国 BS5400,是基于对组合梁温度分布实测得到的,故与多数学者们的实测结论更为一致。对于组合梁温度梯度模式中温差基数 T_1 和 T_2 的取值,各规范一般需根据桥面板厚度、铺装类型和铺装厚度等因素综合确定,不同规范之间温差基数的取值依据存在一定偏差,如美国 AASHTO 中温差基数的取值就并未考虑沥青铺装的影响,而统一取裸露混凝土桥面板更不利的温差取值以进行偏安全的设计计算。

除以上的温度梯度模式外,早期学者 Kennedy 等还提出了夏季和冬季共 4 种组合梁的温度梯度模式^[43],这些模式的提出均基于一维竖向计算。对于宽悬臂组合梁,钢梁腹板或底板往往没有太阳照射,一维竖向计算的假定是成立的,这种假定也适用于多

主梁体系中的中梁。但是对于悬臂长度较短的边梁或大跨缆索承重体系桥梁中常用的短悬臂甚至无悬臂的高腹板组合梁,腹板的一部分会长时间暴露在太阳照射下,一维竖向的假定不再成立,对应的竖向温度梯度模式亦会不同。Liu 等对青海省海黄大桥的短悬臂上字形钢-混组合梁进行了长期温度实测,并结合数值模拟提出了 2 种正温度梯度模式和 1 种负温度梯度模式^[44],如图 8 所示,图中: l_c 为悬臂板宽度; h_w 为腹板高度; h_s 为钢梁顶部温度分布范围。3 种模式的表达式见式(6)~(8)。其中,正温度梯度模式 1 为顶部 5 次抛物线和底部线性温差模式,负温度梯度模式为桥面板顶部 2 次抛物线和钢梁顶部线性温差模式。以上 2 种模式均为组合梁温度梯度的常规模式,而正温度梯度模式 2 则针对组合梁腹板受太阳辐射升温的情况而提出,表达式中考虑了钢梁腹板顶部 2 次抛物线形式的非线性温度分布,且给出了分布范围 h_s 和悬臂板宽度与腹板高度比值的关系,补充了腹板受日照时组合梁的温度作用模式。

正温度梯度模式 1 为

$$T(y) = \begin{cases} T_1 [1 - y/(1.5h_c)]^5 & 0 \leq y < 1.5h_c \\ 0 & 1.5h_c < y \leq 3\ 000 \\ T_2 (2y - 6) & 3\ 000 < y \leq 3\ 500 \end{cases} \quad (6)$$

正温度梯度模式 2 为

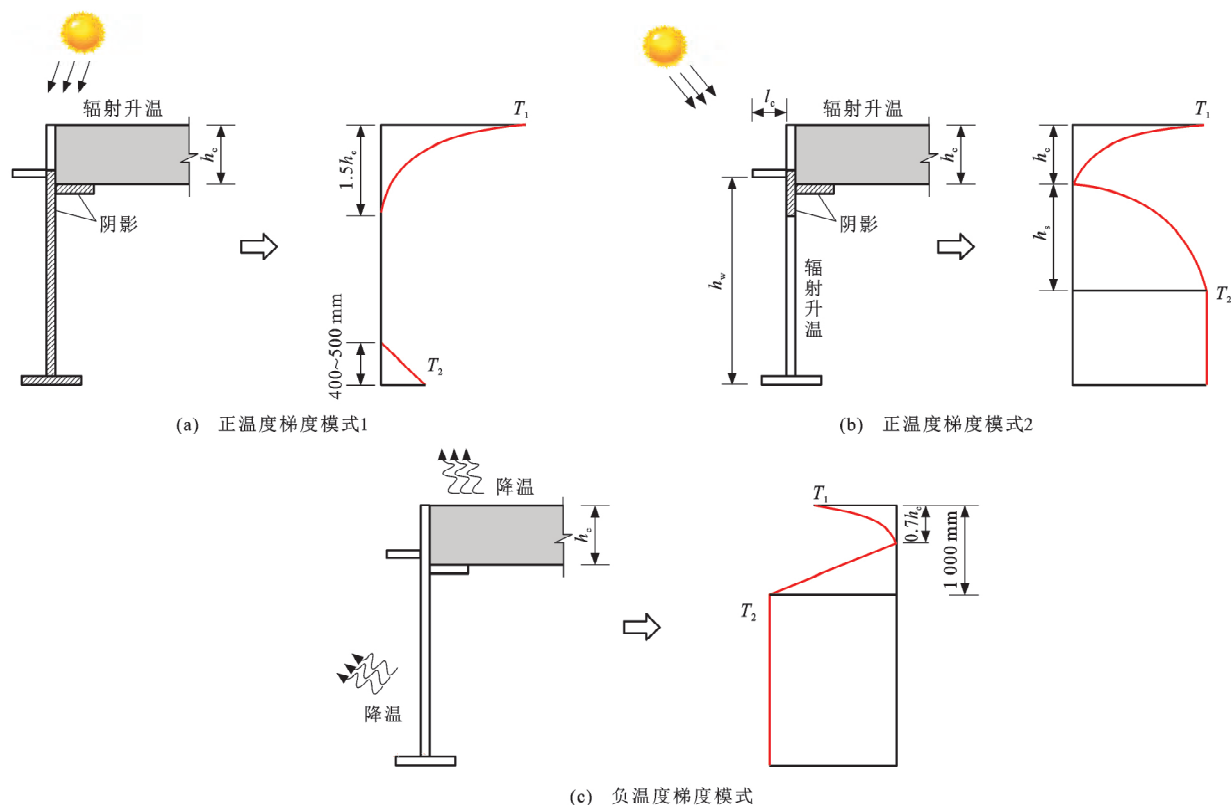
$$T(y) = \begin{cases} T_1 [1 - y/h_c]^2 & 0 \leq y < h_c \\ T_2 - T_2 [1 - (y - h_c)/h_s]^2 & h_c < y \leq h_c + h_s \\ T_2 & h_c + h_s < y \leq h_w \end{cases} \quad (7)$$

负温度梯度模式为

$$T(y) = \begin{cases} T_1 [1 - y/(0.7h_c)]^2 & 0 \leq y < 0.7h_c \\ T_2 (y - 0.7h_c)/(1 - 0.7h_c) & 0.7h_c < y \leq 1\ 000 \\ T_2 & 1\ 000 < y \leq 3\ 500 \end{cases} \quad (8)$$

2.4 统计意义上的桥梁温度作用代表值

概率极限状态设计法要求桥梁温度作用标准值应取桥梁设计基准期(中国为 100 年)内可能达到的最不利取值,即统计意义上的温度作用代表值。Roeder 在建立美国均匀温度取值等温图时,采用的气象站平均数据时长超过了 60 年,但并未涉及概率统计分析给出真正统计意义上的极端均匀温度代表值^[35-36]。英国 BS5400 和 Eurocode 1 在确定组合梁的极端均匀温度作用时,均采用了 50 年重现期(即超越概率 $P=0.02$)的遮阴处气温代表值,Eurocode 1 还基于海拔对气温代表值进行调整,并给出了超越概率不为 0.02 时的遮阴处气温代表值转换公式。中国 JTG D60—2015 及澳大利亚桥梁规范对均匀

图 8 刘江等提出的竖向温度梯度模式^[44]Fig. 8 Vertical temperature gradient patterns proposed by LIU Jiang et al. ^[44]

温度作用的规定也并未明确统计意义上的重现期和超越概率。对于温度梯度作用,现行的各国规范亦未从统计意义的角度明确温差基数的取值,这显然不满足概率极限状态设计法的基本要求。

刘永健等指出:极值统计理论是确定桥梁温度作用代表值的有效方法,且已在混凝土桥梁温度作用的确定中得到了广泛应用^[4,45-47]。多数学者基于若干年的桥梁实测温度数据采用极值统计理论计算温度作用代表值^[45-47],但极值统计理论主要关注随机变量极端情况下的统计规律^[48-49],几年的桥梁温度实测数据无法提供足够的温度作用极值样本,因此,结合数据跨度更长的气象数据(往往超过几十年)开展桥梁温度作用的极值统计分析更具有理论意义。BS5400 和 Eurocode 1 虽然给出了气温参数的代表值,但并未进行极值分析直接给出温度作用的代表值。Chen 采用了 45 年足日气象数据对美国德克萨斯州某钢箱组合梁温度场进行 16 436 次计算,得到了桥梁温度作用数据样本,选取了其中不超过 1% 的极端数据进行温度作用极值统计分析,得到了组合梁桥极端均匀温度和温度梯度具有 100 年和 50 年重现期的代表值^[38]。这种方法结合长期历史气象数据和数值模拟得到了桥梁温度作用充足的

样本数据,由此计算桥梁温度作用代表值更为直接准确,前提是采用的数值模拟方法应得到不同气候条件的充分检验。

3 组合梁温度效应的计算方法

在已知组合梁温度分布或温度作用的情况下,目前的研究多采用有限元数值模拟或理论解析方法计算组合梁的温度效应,包括温度应力、界面剪力和温度变形等。

3.1 有限元数值模拟求解组合梁温度效应

有限元数值模拟方法可以基于热传导分析得到的组合梁三维温度场,进一步通过热-力顺序耦合计算得到组合梁温度效应结果,其计算的准确性主要取决于组合梁日照温度场计算的准确性和组合梁界面刚度的模拟精度。刘永健等提到,结构日照温度场的准确模拟关键在于太阳辐射计算模型和对流换热边界条件的准确选取^[4]。而组合梁钢-混界面的连接刚度则主要采用不考虑滑移的“绑定”模拟和考虑滑移的“弹簧”模拟 2 种方式实现^[50]。

在现有的桥梁规范体系下,多数学者在计算组合梁的温度效应时均认为钢和混凝土完全粘结,在温度作用下不产生滑移。王达等借助 ANSYS 程序

计算了大跨桥梁的钢-混组合桥面系的温度效应,对比了中国和欧美等不同规范温度梯度模式产生的温度应力,发现各规范的计算结果差异十分显著^[51];陈彦江等^[41-54]均针对常规组合梁桥进行了温度场数值模拟,在此基础上采用数值模拟方法计算了组合梁的温度应力,结论大体均说明现有规范的温度作用模式难以涵盖组合梁的最不利温度作用;赵品等^[55-57]则采用有限元方法对波形钢腹板组合梁桥的日照温度效应进行了分析,结构形式虽与常规组合梁有一定区别,但计算温度效应的数值模拟方法则基本一致。

3.2 理论解析方法求解组合梁温度效应

3.2.1 不考虑滑移的组合梁温度效应解析方法

采用理论解析方法计算组合梁温度效应有利于从机理上认识温度对组合梁的作用规律,但解析方法较为复杂,早期学者和规范往往引入较多的假定来简化计算过程,以便得到更简洁的公式指导组合梁设计。

Eurocode 4 和中国《公路桥涵钢结构及木结构

设计规范》(JTJ 025—1986)中均假定组合梁中仅存在钢和混凝土的整体温差,并基于此假定,给出了组合梁不考虑界面滑移时的温度应力计算方法。即将温差假设为作用在混凝土和钢梁上的轴力,根据应变协调条件可求得轴力,将混凝土桥面板和钢梁视为轴力作用下的偏心受压或偏心受拉构件,即可求得温度应力。该方法考虑了结合面处应变协调条件,但并没有准确的考虑组合梁按抗弯刚度分担弯矩的事实。基于上述方法存在的问题,周良等进一步考虑了钢与混凝土弯曲变形协调条件,推导了不考虑滑移时更为准确的温度应力计算方法,并给出了双折线温度梯度和矩形温差作用下组合梁温度应力计算公式^[58];刘永健等认为不考虑滑移的组合梁与混凝土梁温度应力的计算方法相同,仅是弹性模量和线膨胀系数沿梁高方向存在变化,基于此,根据温度自应力在组合梁截面产生轴力和弯矩为零的原则,给出了任意竖向温度分布模式下组合梁温度应力的解析计算公式,计算图式见图 9^[59]。

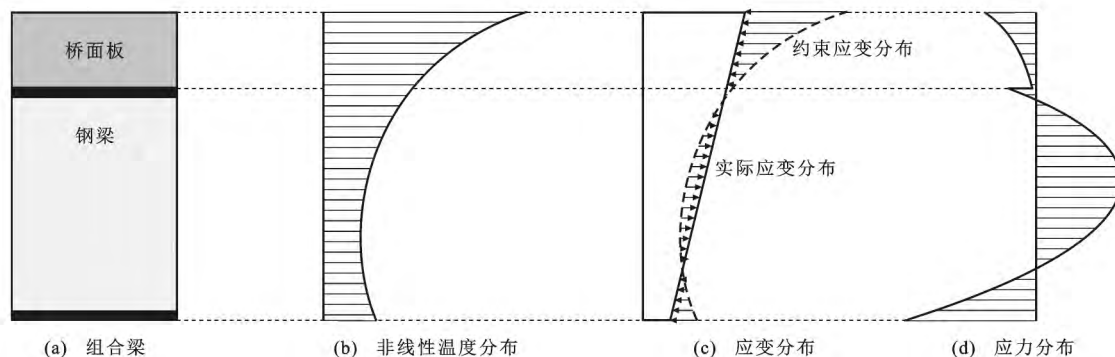


图 9 不考虑滑移时组合梁温度应力分布

Fig. 9 Temperature stress distributions of composite girder without considering slip

3.2.2 考虑滑移的组合梁温度效应解析方法

理论上,若剪力连接件刚度无穷大,则钢-混界面不存在滑移,此时混凝土和钢的材料优势能够完全发挥,然而在工程实际中达到如此理想情况是难以实现的。试验研究表明,即使在很小的荷载作用下,由于剪力连接件有限的刚度,钢-混界面仍然会产生滑移,且对组合梁结构性能会产生显著的影响^[4-5],因此,组合梁温度效应的分析过程不应忽视刚-混界面滑移效应的影响。

吴迅等最早考虑了钢-混界面滑移,推导了简支组合梁在钢-混均匀温差作用下的界面剪力分布模式^[60];陈玉骥等则假定温度在桥面板与钢梁上线性分布,考虑钢梁与混凝土之间的变形协调条件,给出了考虑剪切滑移和不考虑剪切滑移时的界面剪力和相对滑移计算公式,认为剪切变形对组合梁温度应

力的影响可以忽略^[61]。在求解简支梁温度应力的基础上,其进一步对 3 跨钢-混凝土组合连续梁的温度效应展开研究,给出了考虑受拉区开裂的连续组合梁温度应力和挠度的计算方法^[62]。朱坤宁等忽略剪切变形的影响,建立了线性温差及均布外荷载作用下组合梁的平衡方程、变形协调条件及本构关系,推导了荷载和温差作用下界面剪力分布公式^[63];周勇超等在假定桥面板存在温度梯度而钢梁温度均匀分布的基础上,考虑了钢-混界面微小滑移,推导了考虑滑移作用时组合梁界面剪力、相对滑移和温度应力的计算公式,认为桥面板厚度及温度分布是影响温度内力和变形的主要因素^[64];阴存欣则采用换算截面电算方法对简支组合梁和连续组合梁的温度效应进行理论推导^[65];刘永健等认为,采用过于简化的温度分布模式显然会使组合梁温度效

应计算结果与真实值产生较大偏差,其进一步给出了任意温度分布模式下组合梁的界面剪力、相对滑移以及钢和混凝土温度应力的解析表达式^[59]。

表 4 汇总了上述文献中考虑和不考虑界面滑移的组合梁温度效应解析计算方法。在不考虑界面滑移时,组合梁温度效应的求解其实为沿梁高的一维问题,组合梁界面剪力和温度应力均为定值,不随梁长变化。在考虑界面滑移时,组合梁在温度作用下

的界面剪力和温度应力均随梁长发生变化。由表 4 可知,这种变化往往通过建立界面剪力的二阶微分方程进行求解,简支梁组合梁温度作用产生的界面剪力沿梁长按双曲余弦函数分布,即温度作用产生的剪力主要分布在梁端部,在跨中位置则为零。仅陈玉骥等考虑了钢与混凝土剪切变形的影响,建立了更为准确的 4 阶微分方程,求解得到了界面剪力的组合式双曲余弦分布模式^[61]。

表 4 组合梁温度效应的解析计算方法

Tab. 4 Analytical calculation methods on temperature effect of composite girder

文献	时间	界面滑移假定	温度分布形式	组合梁体系	核心微分方程	界面剪力分布
Eurocode 4、JTJ 025—1986		界面无滑移	钢-混整体矩形温差	静定体系		均匀分布
[58]	2012 年		混凝土双折线温度梯度及钢-混矩形温差	静定体系		均匀分布
[59]	2017 年		钢与混凝土任意温度分布	静定体系		均匀分布
[60]	2009 年	界面有滑移,满足线性滑移-剪力关系	钢-混整体矩形温差	简支梁	界面剪力二阶微分方程	双曲余弦分布
[61]	2001 年		钢和混凝土温度均线性分布	简支梁	界面剪力四阶微分方程	组合双曲余弦分布
[62]	2004 年		混凝土温度线性分布,钢均匀温度分布	连续梁		
[63]	2011 年		钢-混整体矩形温差	简支梁	轴力二阶微分方程	双曲余弦分布
[64]	2013 年		混凝土非线性温度分布,钢梁均匀温度	简支梁	界面剪力二阶微分方程	双曲余弦分布
[65]	2014 年		钢-混整体矩形温差	简支梁和连续梁	轴力二阶微分方程	双曲余弦分布(简支梁)
[59]	2017 年		钢与混凝土任意温度分布	简支梁	界面剪力二阶微分方程	双曲余弦分布

可以看到,组合梁温度效应解析计算方法的发展实际是计算假定逐渐减少的过程,钢-混界面关系从不考虑滑移到考虑一定的滑移,温度分布模式从最初简单的钢-混均匀温差发展到钢与混凝土截面

的任意分布模式,温度效应的计算也更加准确。刘永健等指出,不考虑滑移会高估组合梁端部混凝土与钢梁的温度应力,甚至会出现应力符号相反的情况^[59]。图 10 为文献^[59]中简支组合梁在 Eurocode 1

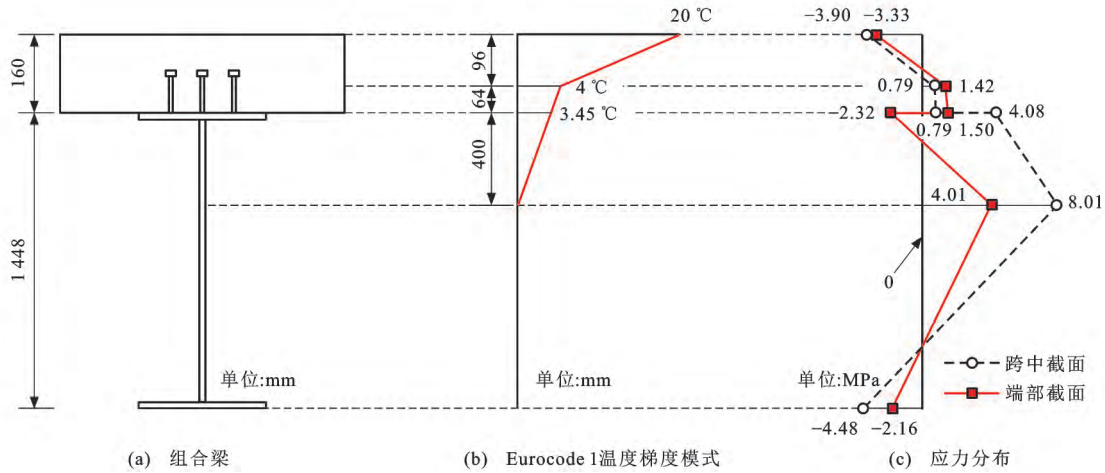


图 10 界面滑移对组合梁跨中截面和端部截面温度应力的影响

Fig. 10 Effects of interfacial slip on temperature stress of composite girder at mid-span and end sections

的正温度梯度模式作用下跨中和端部截面温度应力竖向分布对比,在钢梁上翼缘温度应力甚至出现了拉压相反的情况,可见界面滑移对组合梁不同位置处温度应力的影响非常显著。刘永健等还指出,不考虑钢梁的非线性温差分布会使计算结果产生一定偏差,且这种偏差会随着非线性温差的增大而增大^[59]。

需要注意的是,表4中考虑滑移时组合梁温度效应的解析解均基于简支梁体系提出,关于连续梁次生温度效应的求解则是在假设不考虑滑移基础上通过结构力学的方法得到,这显然不够严谨,因此,有必要建立一种求解任意边界条件下组合梁温度效应的控制微分方程。Girhammar 等曾基于 Euler-Bernoulli 梁理论提出了侧向均布荷载、弯矩和轴力组合作用下组合梁的6阶挠度微分方程^[66],见式(9),并给出了通解形式,见式(10)、(11),可以很好地适应组合梁不同边界条件的求解,给任意边界条件下组合梁温度效应的准确计算提供了参考。

$$w^{(6)} - \alpha^2 w^{(4)} = -\frac{\alpha^2 q}{EI_\infty} + \frac{q''}{EI_0} \quad (9)$$

通解为

$$w = a_1 \sinh(\alpha l) + a_2 \cosh(\alpha l) + a_3 l^3 + a_4 l^2 + a_5 l + a_6 + w_p \quad (10)$$

$$w_p = \frac{1}{\alpha^5 EI_\infty} \int_0^l \left[\alpha^2 q(s) - \frac{EI_0}{EI_\infty} q''(s) \right] \cdot \left\{ \alpha(l-s) + \frac{\alpha^3(l-s)^3}{6} - \sinh[\alpha(l-s)] \right\} ds \quad (11)$$

式中: w 为挠度; α 为与组合梁界面连接刚度和抗弯刚度有关的参数; q 为侧向分布荷载; EI_∞ 和 EI_0 分别为组合梁完全抗剪连接时和完全无抗剪连接时的抗弯刚度; l 为组合梁纵向坐标; $a_1 \sim a_6$ 为通解的待定系数; w_p 为特解; s 为虚拟变量。

4 研究展望

4.1 基于效应分类的组合梁桥温度作用模式研究

现有各国规范体系均基于环境因素将温度作用分为均匀温度和温度梯度,这种分类方式虽便于理解,但不利于从机理上去解释温度作用对桥梁结构效应的影响。年温变化引起的均匀温度作用会在静定结构中产生桥梁轴向伸缩变形,在超静定结构中还会进一步引起轴向次应力。对于日照或降温引起的竖向温度梯度作用,其在静定结构中不仅产生小部分轴向伸缩变形、弯曲变形,还包括自平衡的温度自应力,在超静定结构中则进一步产生轴向次应力和弯曲次应力,亦包括温度自应力。显然,温度梯度模式产生的效应杂合了次生温度效应和自生温度效应,同时与均匀温度产生轴向效应会重复计入。

Eurocode 1 除了基于环境因素对温度作分类外,还给出了基于温度效应的分类方式。其规定: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 $\Delta T_r(y, z)$ 4个部分,图11给出了组合梁的上述温度作用分解图式。Chen 基于组合梁平截面假定和钢和混凝土线膨胀系数相等的假定,选择组合梁的截面形心作为计算坐标系原点,推导了各温度作用的计算式^[38],为

$$\Delta T_u = \frac{E_c \int_{A_c} T(y, z) dA + E_s \int_{A_s} T(y, z) dA}{E_c A_c + E_s A_s} \quad (12)$$

$$\Delta T_y = B \frac{E_c \int_{A_c} T(y, z) y dA + E_s \int_{A_s} T(y, z) y dA}{E_c \int_{A_c} y dA + E_s \int_{A_s} y dA} \quad (13)$$

$$\Delta T_z = H \frac{E_c \int_{A_c} T(y, z) z dA + E_s \int_{A_s} T(y, z) z dA}{E_c \int_{A_c} z dA + E_s \int_{A_s} z dA} \quad (14)$$

$$\Delta T_r(y, z) = T(y, z) - \Delta T_u - \frac{y}{B} \Delta T_y - \frac{z}{H} \Delta T_z \quad (15)$$

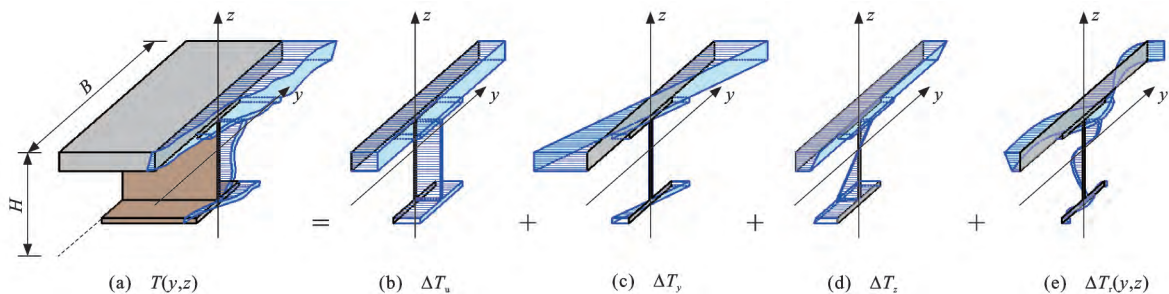


图 11 组合梁温度作用分解

Fig. 11 Temperature action decompositions of composite girder

式中: $T(y, z)$ 为组合梁截面温度场; y, z 分别为截面横向和竖向坐标; E_c, E_s 分别为混凝土和钢的弹性模量; B, H 分别为截面的宽度和高度; A_c, A_s 分别为混凝土和钢梁桥面板的面积。

图 12 给出基于气象因素分类和基于效应分类的温度作用和效应的对应关系。采用上述基于效应的温度作用分类方式, 均匀温度只产生轴向效应, 竖向线性温差和横向线性温差只引起弯曲效应, 残余温度分布则只引起截面自相平衡的应力, 与结构体系是否静定无关, 不产生结构变形和内力。需要指出的是, 与现有规范体系的均匀温度不同, 此处的均匀温度不仅由年温度变化引起, 其取值还应考虑日照升温的影响。已有学者在建立钢箱梁的均匀温度计算公式时, 认为太阳辐射的影响不应忽视^[67-68], 因

此, 对于钢梁高度较高的组合梁, 其均匀温度的取值亦应充分考虑日照升温作用的贡献。Liu 等^[44] 和 Chang 等^[69] 分别对大跨斜拉桥的双边组合梁和城市钢箱组合梁开展了长期测试, 试验数据均表明, 组合梁的最大竖向线性负温差普遍出现在冬季日照较强的白天, 因冬季太阳高度角低、光线易照射到组合梁腹板和底板而产生。这种线性负温差产生的次生效应会使组合梁桥面板顶面出现明显的拉应力, 可能成为桥面板开裂的重要原因。Liu 等^[44] 和 Chang 等^[69] 的实测数据还表明, 仅残余温度引起的桥面板温度自应力便可达到 2.42 MPa, 引起的钢梁最大压应力甚至可达到 -45.40 MPa, 同样由冬季低温时腹板受阳光照射引起, 这无疑增加了钢梁腹板屈曲的风险。

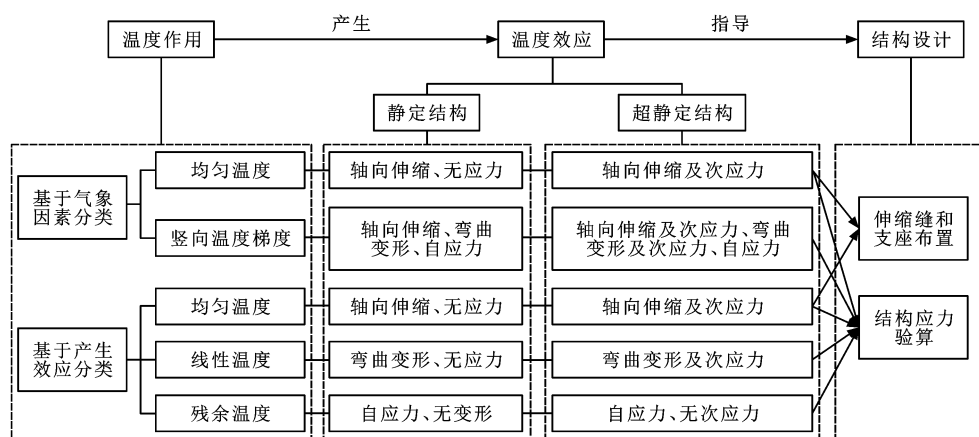


图 12 组合梁桥的温度作用分类与对应效应

Fig. 12 Temperature action classifications and corresponding effects of composite girder bridge

可见, 基于效应的温度作用分类方式更利于从次生效应和自生效应 2 方面更全面的进行组合梁温度效应计算。但现有关于组合梁长期实测温度数据积累仍不充足, 刘永健等汇总了 18 个桥梁长期温度测试案例, 仅有 2 个是针对组合梁桥开展的^[4], 因此, 后续研究应加强组合梁温度实测与数值计算, 开展组合梁温度作用代表值研究, 提出适用于组合梁温度自应力计算的残余温度分布模式, 完善基于效应分类的组合梁温度作用规范体系。

4.2 中国组合梁桥温度作用的地域差异化取值

中国不同地理位置气候差异巨大, 组合梁温度作用存在明显的地域差异性。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。组合梁的截面线性温差和残余温度均与太阳辐射关系更大, 而考虑太阳辐射进行桥梁温度作用地域差异性取值的研究主要集中在混凝土桥梁。Potgieter 等在 26 个主要气象站历史数据的

基础上, 计算了美国不同地区混凝土箱梁的温度梯度作用^[70]; Mirambell 等则绘制了伊比利亚半岛混凝土梁竖向线性温差取值的等温线地图^[71]; Imbsen 等将美国分为了 4 个太阳辐射强度等级不同的地区, 给出了各区混凝土箱梁的温度梯度取值, 其研究成果被美国 AASHTO 采用^[31]。

目前尚未见有学者考虑太阳辐射的地域差异对组合梁温度作用取值进行研究, 中国桥梁规范 JTG D60—2015 亦未对组合梁的竖向温度梯度进行分区取值, 显然, 采用统一的取值方式可能会导致中国西北高海拔、强辐射地区的组合梁桥的温度效应被严重低估^[72-74]。中国共有 756 个基准气象站, 其中有 122 个站点可进行太阳辐射观测, 站点分布见图 13。这些气象站大多从 1957 年开始, 记录了各地平均 60 年的历史气象数据^[75]。后续关于组合梁温度作用取值的研究应充分利用这些历史气象数据, 以便通过气象数据更为准确的计算桥梁温度作用,

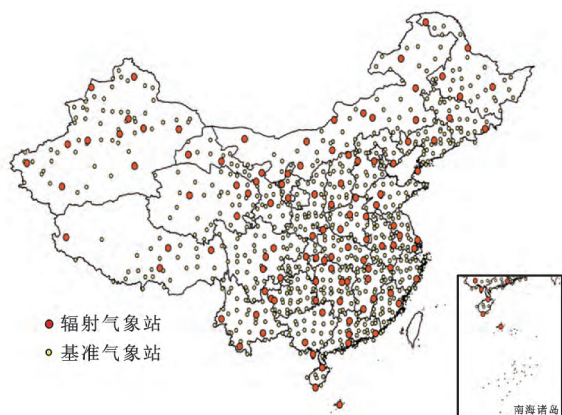


图 13 基准气象站和太阳辐射站分布

Fig. 13 Distributions of basic weather stations and solar radiation stations

绘制组合梁温度作用地域差异性取值的等温线地图,从而提高组合梁温度作用取值和温度计算理论的精度。

3 结 语

(1)现浇组合梁桥施工阶段水化热温度作用是桥面板早期开裂的重要原因,准确计算组合梁水化热温度效应的关键在于选取更为准确适用的水化热模型,同时考虑温度变化对混凝土硬化过程中弹性模量、抗拉强度以及剪力钉连接刚度发展的影响。

(2)运营环境下组合梁主要考虑均匀温度、正负温度梯度等 3 种温度作用模式,由于不同国家气候环境的差异及研究历程的不同,各国规范关于组合梁桥温度作用模式和取值的规定尚不统一,温度梯度作用的取值并非基于统计分析方法得到,在取值时亦未充分利用已有历史气象数据资源。

(3)组合梁桥温度效应的计算多基于有限元数值模拟展开,求解组合梁温度效应的解析计算方法也逐渐准确化,钢-混界面关系已从不考虑滑移发展到考虑滑移,温度分布模式从简单的钢-混均匀温差发展到钢与混凝土任意温度分布,但还应加强建立任意边界组合梁温度效应求解的理论模型。

(4)组合梁桥温度问题研究的未来发展方向应集中在开展基于效应分类的组合梁温度作用模式研究,从机理上加强对组合梁温度自生效应和次生效应的认识;加强组合梁桥长期温度实测,基于统计分析确定组合梁温度作用代表值;同时充分利用中国各地区气象部门历史气象数据,开展组合梁温度作用地域差异性取值研究。

(5)本文对已有研究成果进行综述,对未来研究方向进行展望,以求引起学者对组合梁温度问题的

关注和重视,逐步建立适用于中国气候、地理环境特点的钢-混组合梁桥温度设计理论,完善组合梁设计规范体系,进一步推进钢-混组合梁桥在中国,特别是西部气候更极端、桥梁温度效应更显著的高原高寒地区的应用。

参考文献:

References:

- [1] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 110-122.
NIE Jian-guo, TAO Mu-xuan, WU Li-li, et al. Advances of research on steel-concrete composite bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 110-122. (in Chinese)
- [2] 刘永健,高诣民,周绪红,等. 中小跨径钢-混凝土组合梁桥技术经济性分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 1-13.
LIU Yong-jian, GAO Yi-min, ZHOU Xu-hong, et al. Technical and economic analysis in steel-concrete composite girder bridges with small and medium span[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 1-13. (in Chinese)
- [3] 聂建国,王宇航. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究综述[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 1-11.
NIE Jian-guo, WANG Yu-hang. Research status on fatigue behavior of steel-concrete composite beams[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 1-11. (in Chinese)
- [4] 刘永健,刘江,张宁. 桥梁结构日照温度作用研究综述[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 59-78.
LIU Yong-jian, LIU Jiang, ZHANG Ning. Review on solar thermal actions of bridge structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 59-78. (in Chinese)
- [5] WITTFHOHT H. 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): 61-72.
WITTFHOHT H. Reasons for the destruction of the Cannavino Bridge in Italy during construction[J]. World Bridges, 1986(4): 61-72. (in Chinese)
- [6] HECKEL R. The Fourth Danube Bridge in Vienna—damage and repair[J]. Development of Bridge Design and Construction Process, 1971: 588-598.
- [7] 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.
LIU Xing-fa. Analysis of Temperature Stress of Concrete Structure[M]. Beijing: China Communications Press, 1991. (in Chinese)
- [8] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
NIE Jian-guo. Steel-Concrete Composite Structure Bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [9] 张宁,周鑫,刘永健,等. 基于点阵式测量的混凝土箱梁水化热温度场原位试验[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 76-86.
ZHANG Ning, ZHOU Xin, LIU Yong-jian, et al. In-situ test on hydration heat temperature of box girder based on array measurement[J]. China Civil Engineering Journal,

- 2019, 52(3): 76-86. (in Chinese)
- [10] CHOI S, CHA S W, OH B H, et al. Thermo-hygro-mechanical behavior of early-age concrete deck in composite bridge under environmental loadings. Part 1: temperature and relative humidity[J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(7): 1325-1346.
- [11] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
ZHU Bo-fang. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012. (in Chinese)
- [12] CRSITOFARI C, NOTTON G, LOUCHE A. Study of the thermal behaviour of a production unit of concrete structural components[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(7): 1087-1101.
- [13] SCHUTTER G D. Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration-based material laws[J]. *Computers and Structures*, 2002, 80(27-30): 2035-2042.
- [14] ULM F J, COUSSY O. Modeling of thermochemomechanical couplings of concrete at early ages[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1995, 121(7): 785-794.
- [15] BAZANT Z P. Constitutive equation for concrete creep and shrinkage based on thermodynamics of multiphase system[J]. *Materials and Structures*, 1970, 3(13): 3-36.
- [16] DE SCHUTTER G, TAERWE L. Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete[J]. *Materials and Structures*, 1996, 29(6): 335-344.
- [17] TOPKAYA C, YURA J A, WILLIAMSON E B. Composite shear stud strength at early concrete ages[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(6): 952-960.
- [18] SUBRAMANIAM K V, KUNIN J, CURTIS R, et al. Influence of early temperature rise on movements and stress development in concrete decks[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(1): 108-116.
- [19] GARA F, LEONI G, DEZI L. Slab cracking control in continuous steel-concrete bridge decks[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(12): 1319-1327.
- [20] CHOI S, CHA S W, OH B H, et al. Thermo-hygro-mechanical behavior of early-age concrete deck in composite bridge under environmental loadings. Part 2: strain and stress[J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(7): 1347-1367.
- [21] BERTAGNOLI G, GINO D, MARTINELLI E. A simplified method for predicting early-age stresses in slabs of steel-concrete composite beams in partial interaction[J]. *Engineering Structures*, 2017, 140: 286-297.
- [22] LEBET J P, DUCRET J M. Experimental and theoretical study of the behaviour of composite bridges during construction[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1998, 46(1-3): 69-70.
- [23] LEBET J P, DUCRET J M. Early concrete cracking of composite bridges during construction[C]//ASCE. Proceedings of the Conference, Composite Construction in Steel and Concrete. New York: ASCE, 2000: 13-24.
- [24] ANSNAES V, ELGAZZAR H. Concrete cracks in composite bridges[R]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012.
- [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] DILGER W H, GHALI A, CHAN M, et al. Temperature stresses in composite box girder bridges[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(6): 1460-1478.
- [28] FU H C, NG S F, CHEUNG M S. Thermal behavior of composite bridges[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 116(12): 3302-3323.
- [29] EMERSON M. Bridge temperature estimated from the shade temperature[R]. Berkshire: Department of Transportation, 1976.
- [30] EMERSON M. Thermal movements in concrete bridges—field measurements and methods of prediction[R]. Detroit: American Concrete Institute, 1981.
- [31] IMBSEN R A, VANDERSHAF D E, SCHAMBER R A, et al. Thermal effects in concrete bridge superstructures[R]. Washington DC: TRB, 1985.
- [32] MOORTY S, ROEDER C W. Temperature-dependent bridge movements[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(4): 1090-1105.
- [33] MOORTY S. Thermal movements in bridges[D]. Seattle: University of Washington, 1991.
- [34] ROEDER C W. Thermal movement design procedure for steel and concrete bridges[R]. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program, 1998.
- [35] ROEDER C W. Thermal movement design procedure for steel and concrete bridges[R]. Washington DC: TRB, 2002.
- [36] ROEDER C W. Proposed design method for thermal bridge movements[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2003, 8(1): 12-19.
- [37] 孙国晨, 关荣财, 姜英民, 等. 钢-混凝土叠合梁横截面日照温度分布研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(11): 122-127, 138.
SUN Guo-chen, GUAN Rong-cai, JIANG Ying-min, et al. Sunshine-induced temperature distribution on cross section of steel-concrete composite beams[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(11): 122-127, 138. (in Chinese)
- [38] CHEN Quan. Effects of thermal loads on Texas steel bridges[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2008.
- [39] 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 Yong-jian, FANG Jian-hong, et al. Vertical temperature gradient patterns of 上-shaped steel-concrete composite girder in arctic-alpine region[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(4): 32-44. (in Chinese)
- [40] 盛兴旺, 郑纬奇, 朱志辉, 等. 小半径曲线刚构箱梁桥日照时变温度场与温度效应[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(4): 24-34.

- SHENG Xing-wang, ZHENG Wei-qi, ZHU Zhi-hui, et al. Solar radiation time-varying temperature field and temperature effect on small radius curved rigid frame box girder bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 24-34. (in Chinese)
- [41] 陈彦江,王力波,李 勇. 钢-混凝土组合梁桥温度场及温度效应研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(11): 85-91.
CHEN Yan-jiang, WANG Li-bo, LI Yong. Research of temperature field and its effect of steel-concrete composite girder bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(11): 85-91. (in Chinese)
- [42] PRIESTLEY M J N. Design of concrete bridges for temperature gradients[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1978, 75(5): 209-217.
- [43] KENNEDY J B, SOLIMAN M H. Temperature distribution in composite bridges[J]. Journal of Structure Engineering, 1987, 113(3): 475-82.
- [44] LIU Jiang, LIU Yong-jian, JIANG Lei, et al. Long-term field test of temperature gradients on the composite girder of a long-span cable-stayed bridge[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(13): 2785-2798.
- [45] 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.
- [46] LI Dong-ning, 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.
- [47] 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 Yong-gang, et al. Study on temperature gradient of concrete box girder based on probability analysis[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(8): 1353-1361. (in Chinese)
- [48] 史道济. 实用极值统计方法[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2006.
SHI Dao-ji. Practical Extremum Statistical Method[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [49] 鲁乃唯,刘 扬,肖新辉. 实测车流作用下大跨桥梁荷载效应极值外推法[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(5): 47-55.
LU Nai-wei, LIU Yang, XIAO Xin-hui. Extrapolating method of extreme load effects on long-span bridge under actual traffic loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(5): 47-55. (in Chinese)
- [50] 聂建国,沈聚敏. 滑移效应对钢-混凝土组合梁弯曲强度的影响及其计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(1): 31-36.
NIE Jian-guo, SHEN Ju-min. Influence of slip effect on bending strength of steel-concrete composite beams and its calculation[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(1): 31-36. (in Chinese)
- [51] 王 达,王海柱,刘 扬,中、美、欧标准中钢-混组合结构桥面系竖向温度梯度效应的比较[J]. 工业建筑, 2016, 46(10): 163-168, 173.
WANG Da, WANG Hai-zhu, LIU Yang. In comparison with vertical temperature gradient effects of steel-concrete composite bridge deck in Chinese, American and EU Codes[J]. Industrial Construction, 2016, 46(10): 163-168, 173. (in Chinese)
- [52] 苏靖海,段树金. 钢-混凝土双面组合箱梁日照温度场研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2012, 25(2): 6-10, 80.
SU Jing-hai, DUAN Shu-jin. Study on sunshine temperature field of double steel-concrete composite box girder by solar radiation[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2012, 25(2): 6-10, 80. (in Chinese)
- [53] 苏靖海,段树金. 钢-混凝土双面组合箱梁日照温度效应研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(4): 11-14.
SU Jing-hai, DUAN Shu-jin. Study of temperature effects of double steel-concrete composite box girder by solar radiation[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2013, 26(4): 11-14. (in Chinese)
- [54] CHEN Xiao-qiang, LIU Qi-wei, ZHU Jun. Measurement and theoretical analysis of solar temperature field in steel-concrete composite girder[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2009, 25(4): 513-517.
- [55] 赵 品,叶见曙. 波形钢腹板箱梁桥面板横向温度效应分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(5): 974-978.
ZHAO Pin, YE Jian-shu. Analysis of transverse temperature effects on the deck of box girder with corrugated steel webs[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(5): 974-978. (in Chinese)
- [56] 董 旭,邓振全,李树忱,等. 大跨波形钢腹板箱梁桥日照温度场及温差效应研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 230-238.
DONG Xu, DENG Zhen-quan, LI Shu-chen, et al. Research on sun light temperature field and thermal difference effect of long span box girder bridge with corrugated steel webs[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 230-238. (in Chinese)
- [57] 郭翔飞. 波纹钢腹板预应力混凝土箱梁温度效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
GUO Xiang-fei. Research on temperature effect of prestressed concrete box girder with corrugated steel webs[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [58] 周 良,陆元春,李雪峰. 钢-混凝土组合梁的温度应力计算[J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 83-88.
ZHOU Liang, LU Yuan-chun, LI Xue-feng. Calculation of temperature stress of steel-concrete composite beam[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(5): 83-88. (in Chinese)
- [59] 刘永健,刘 江,张 宁,等. 钢-混凝土组合梁温度效应的解析解[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 9-19.
LIU Yong-jian, LIU Jiang, ZHANG Ning, et al. Analytical solution of temperature effects of steel-concrete composite girder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 9-19. (in Chinese)
- [60] 吴 迅,陈经纬,肖 春,等. 温差、收缩引起的钢-混凝土组合梁界面处剪力作用研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(1): 41-44, 54.

- WU Xun, CHEN Jing-wei, XIAO Chun, et al. Study on shear effect caused by temperature and shrinkage on the interface of steel-concrete composite beams [J]. Structural Engineers, 2009, 25(1): 41-44, 54. (in Chinese)
- [61] 陈玉骥,叶梅新. 钢-混凝土结合梁在温度作用下的响应分析[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(5): 48-53.
- CHEN Yu-ji, YE Mei-xin. Analyses of responses of composite girders under the action of temperature[J]. China Railway Science, 2001, 22(5): 48-53. (in Chinese)
- [62] 陈玉骥,叶梅新. 钢-混凝土连续结合梁的温度效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(1): 142-146.
- CHEN Yu-ji, YE Mei-xin. Temperature responses of steel-concrete continuous composite girders[J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2004, 35(1): 142-146. (in Chinese)
- [63] 朱坤宁,万 水. 温差和荷载引起的 FRP-钢组合梁界面剪应力分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(4): 387-392.
- ZHU Kun-ning, WAN Shui. Interfacial shear stress of FRP-Steel composite beams subjected to temperature and load action [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(4): 387-392. (in Chinese)
- [64] 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 Yong-chao, HU Sheng-neng, 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)
- [65] 阴存欣. 钢-混组合梁温度及收缩效应分析的电算方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(11): 76-83.
- YIN Cun-xin. Computing method for effect analysis of temperature and shrinkage on steel-concrete composite beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11): 76-83. (in Chinese)
- [66] GIRHAMMAR U A, GOPU V K A. Composite beam-columns with interlayer slip—exact analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(4): 1265-1282.
- [67] LUCAS J M, BERRED A, LOUIS C. Thermal actions on a steel box girder bridge[J]. Structures and Buildings, 2003, 156(2): 175-182.
- [68] LUCAS J M, VIRLOGEUX M, LOUIS C. Temperature in the box girder of the Normandy Bridge[J]. Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering, 2005, 15(3): 156-165.
- [69] CHANG S P, IM C K. Thermal behaviour of composite box-girder bridges[J]. Structures and Buildings, 2000, 140(2): 117-126.
- [70] POTGIETER I C, GAMBLE W L. Nonlinear temperature distributions in bridges at different locations in the United States[J]. Journal of Precast/Prestressed Concrete Institute, 1989, 34(4): 80-103.
- [71] MIRAMBELL E, AGUADO A. Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(9): 2388-2409.
- [72] 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 De-jun, LIU Jiang, ZHANG Zhuan-fang, 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)
- [73] 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 Zhi-xiang. 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)
- [74] 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 Guang-long, LIU Jiang, LIU Yong-jian, 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)
- [75] ZANG Hai-xiang, XU Qing-shan, BIAN Hai-hong. Generation of typical solar radiation data for different climates of China[J]. Energy, 2012, 38(1): 236-248.