

桥梁设计中温度应力影响及控制方法研究

王 恒

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074

[摘要]温度应力是桥梁结构设计时必须考虑的因素之一,桥梁结构长期处在自然环境下受到日光照射以及不同季节和突然降温等因素造成的温度变化的作用下,在结构内会引起复杂的温度场分布从而导致产生相应的温度应力及温度变形;针对超静定桥梁结构而言由于温度变化产生的约束温度应力有可能会大于活载应力,直接影响到结构的整体安全问题以及使用寿命,温度的变化会影响到桥梁结构的受力与变形情况,而且随着温度的不同其影响程度也有所不同,需要在不同时刻对结构状态进行测量,所得到的结果也不相同。文章通过对温度应力作用机理的研究及对各种桥梁形式的温度应力反应特性的研究以及温度应力计算方法的研究提出了针对温度应力的设计优化及控制措施,结论是合理地选择结构体系、优化伸缩缝及支座设计、在施工过程中进行温度控制等可以有效地降低温度应力的危害程度。

[关键词]桥梁设计; 温度应力; 温度场; 有限元分析; 设计优化

DOI: 10.33142/ect.v4i6.19938

中图分类号: U441.5

文献标识码: A

Research on the Influence and Control Methods of Temperature Stress in Bridge Design

WANG Heng

Central South Survey Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: Temperature stress is one of the factors that must be considered in the design of bridge structures. Long term exposure of bridge structures to natural sunlight and temperature changes caused by different seasons and sudden cooling can lead to complex temperature field distribution within the structure, resulting in corresponding temperature stress and deformation; For statically indeterminate bridge structures, the constrained temperature stress generated by temperature changes may exceed the live load stress, directly affecting the overall safety and service life of the structure. Temperature changes can affect the stress and deformation of the bridge structure, and the degree of influence varies with different temperatures. The results obtained from measuring the structural state at different times are also different. The article proposes design optimization and control measures for temperature stress through the study of the mechanism of temperature stress, the response characteristics of temperature stress in various bridge forms, and the calculation methods of temperature stress. The conclusion is that a reasonable selection of structural system, optimization of expansion and contraction joint and support design, and temperature control during construction can effectively reduce the degree of harm caused by temperature stress.

Keywords: bridge design; temperature stress; temperature field; finite element analysis; design optimization

引言

桥梁是交通运输系统的重要组成部分之一,它的安全性及使用寿命也是不容忽视的问题,在各种荷载的作用下,温度作用是最容易使桥梁结构发生应力以及变形的原因之一,连续刚构属于一种超静定类型的建筑结构,由于外界环境的变化而造成的局部区域温差所引起的温度效应往往难以精确计算出来。国内外许多学者对桥梁的温度作用进行了大量的测量实验、数值仿真、理论推导等研究工

作。其中有关温度应力精确计算及控制依然是目前工程建设领域的一个难题所在。温度荷载可以分为两种,一种是均匀温度变化;另一种是非均匀温度梯度(例如日光导致的温差)。均匀温度变化会导致结构出现膨胀或者收缩形变,而非均匀温度梯度会使得结构内部形成一种相互抵消的约束应力。日照温度场以及温度效应对桥梁结构安全及持久性能的影响较大,在大跨度桥梁的设计过程中温度效应的影响更大,所以在设计时应该重视起来。本文针对桥

梁设计温度应变影响及其控制方式进行了探究,对温度应变影响分析、各种桥梁反应特点、计算方式、处理优化等加以说明,以便为桥梁工程设计借鉴经验。

1 温度应力对桥梁结构的影响分析

1.1 均匀温度变化对结构的影响

均匀升温降温是指整个桥梁温度同时升高或降低的情况,即年度温差以及日间温差。在结构上施加均匀温度作用下,当结构是静定体系时,只会有自由变形而不会产生温度应力,如果是超静定结构变形受限则会出现温度应力,整体的升降温会导致桥梁梁体产生较大的伸缩变形以及主塔顶点沿桥梁方向位移还有塔柱体内较大应力等。大跨径连续梁及刚构桥的均匀温度作用产生的纵向位移在几到几十公分之间,需要利用伸缩缝、支座来调整。

1.2 非均匀温度梯度效应分析

非均匀的温度梯度导致了温度应力的产生,在太阳辐射的作用下,桥梁行车道顶板温度高于底板,形成竖直方向上的温度梯度,向阳侧与阴侧存在温差形成水平方向上的温度梯度。太阳辐射作用下,双层桥面钢桁梁斜拉桥表面温度场具有很强的时间波动性和空间非均匀性的特点,由于上面一层桥面的阻挡,钢桁架结构的竖向温差在夏天可达到 23.0°C 。如此巨大的温差会导致在结构内造成很大的温度应力,从而引起混凝土开裂或者是钢结构的屈曲变形。温度梯度的影响程度取决于结构形式,在混凝土箱梁中由于截面的热量传导能力不同,其竖向温差最大为 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 左右,在钢箱梁中由于导热速度快、但是比热低的原因使得其温度梯度更加陡峭。突然冷空气情况下,结构表面迅速冷却,内部温度依然较高,产生逆向的温度梯度,这种应力作用同日照梯度一样重要。我国《公路桥规》规定竖向温度梯度模式取指数曲线的形式,是通过大量的实际观测数据进行回归获得的。适合用于计算混凝土简支梁桥的温度应力影响。而对于一些宽箱梁及钢砼组合梁还应考虑侧向温度梯度及构件间温差传递的问题。

1.3 日照与季节变化引起的温度效应

日照辐射是桥梁非均匀温度场的主要热源,在一定的光照条件下,太阳辐射强度、空气温度、风速以及材料的各种热学参数等均会影响着桥梁结构体内的温度场分布规律。混凝土箱梁梁体竖直方向上的温度分布符合指数温差模型较为贴切。而由于季节的变化带来的温度变化范围也十分之广,针对大型跨越桥梁而言,无论是季节温差还是日照温差都会产生叠加效用,这就使得温度场分布变得更加错综复杂。在现场测试的基础上结合曲线拟合的方式,可

以在施工过程中对温度的影响做出调整。

1.4 温度应力对桥梁线形与内力的影响

温度应力对桥梁的几何线形、内力都有直接影响。在悬臂浇筑法修建的连续刚构桥中,日照温差会使得悬臂端产生竖向位移从而影响合龙控制精度。温度的变化对桥梁结构的内力以及变形有很大影响,在不同的时刻对同一个结构测量得到的结果也是不同的。温度产生的线形偏差如果得不到有效控制会导致桥梁成型线形与预想不符,从而降低车辆行驶性能及结构受力情况。

2 不同桥型温度应力响应特征

2.1 梁桥温度应力分析

梁桥类型最为常见,它的温度响应和结构体系有关,简支梁桥对均匀的温度变化不太敏感,但是日照温差导致的梯度温度影响会引起较为明显的应力反应。连续梁桥由于其超静定次数较多,无论是均匀温度还是梯度温度都会产生较大的应力反应约束。连续刚构桥是现代工程技术中的一种重要形式,它的温度问题一直作为桥梁工程研究的重点。箱型截面梁顶板受热膨胀被底板限制,在顶板产生压应力在底板产生拉应力。变截面连续梁桥温度应力分布的情况取决于截面高度的变化情况,在支点周围梁高较高的位置顶板与底板温差传递路线更长,梁内自平衡的应力最大。而在跨中梁高较小的地方,则温差应力比较均匀,在预应力混凝土梁桥里,温差应力与预应力有相互影响的关系,温度升高所导致的结构伸长将会对预应力造成的收缩产生抵消效果。对于宽箱梁来说,横桥向温差应力造成的畸变应力也不容小觑,有可能会造成腹板出现裂缝或者顶板发生横向裂缝。

2.2 拱桥温度效应特征

拱桥比较敏感于环境温度的变化,温度的影响是拱桥设计的主要限制条件之一,均匀加热会使拱肋膨胀伸长,拱顶上升;均匀冷却导致拱肋收缩,拱顶下移,对于大跨径拱桥而言,在温度影响下还会出现吊杆内力重分布的情况,上下拱肋之间的温差会导致主梁产生较大变形以及梁端转动角度,它们都相当于最不利活载情况下的一半左右。所以,在拱桥的设计过程中一定要合理选择合龙温度,降低由此产生的温度次内力。钢管混凝土拱桥当中由于钢管与核心混凝土线膨胀系数的不同会产生套箍现象,温度影响变得非常复杂。

2.3 斜拉桥温度响应分析

斜拉桥结构体系比较复杂,温度效应包括主梁、主塔及拉索这三部分内容。太阳照射时,桥塔两面温度不同,

在一定程度上会造成塔顶移动,从而引起拉索张力的变化以及主梁的线形变化。主塔顺桥向温度变化导致塔顶顺桥向位移量更大,几乎接近最大活载工况下的位移量大小。斜拉桥的温度效应有着很强的空间、时间上的表现,有必要做好设计、施工过程中的精确评估。

3 温度应力计算方法与分析模型

3.1 经验公式法与简化计算方法

经验公式法是通过实测数据回归求得的一种简化的计算方式,优点有简便易行,方便工程师使用等优点。不同国家的规范中对温度梯度方式的要求有所不同,我国公路桥规规定使用的是竖向指数型曲线梯度方式,用实测温度梯度指数曲线拟合之后,与实测理想数据相比较两者相符合程度较高。简化计算适用于一般桥梁温度效应估计。

3.2 有限元分析方法

有限单元法是实现温度应力精确化的技术之一,在此基础上建立了三维热传导模型可以仿真出桥梁温度场的时间和空间上的变化规律。基于通用有限元软件编写用户自定义子程序开发了兼顾实时阴影作用下组合梁桥日照温度场数值模型,从而实现了组合梁桥日照温度场长时间精确模拟的能力。而采用有限元法可以考虑到复杂的边界约束、材料非线性问题以及构件之间的相互遮挡等,其计算的结果比较精确。对热边界条件设置正确与否直接影响到温度场模拟的效果,太阳辐射强度要结合地理坐标系、日期、时间、大气透明度等来确定;对流换热系数则和风速和构件表面粗糙度有关。针对大跨径桥梁,应当考虑到各构件间的相互遮挡作用,例如拉索对主梁的遮阴、桥塔对梁体的遮挡等都会对温度场的空间分布特性有较程度的影响^[1]。结构的热物理参数选择也是非常重要的,混凝土导热系数、比热容及热膨胀系数都与自身温度相关,并呈非线性关系,在进行瞬态热分析中,可以通过一天不同时间段的温度场的变化来求解结构的温度应力响应历程。而对于复杂的桥梁类型,如斜拉桥、悬索桥等,其结构有限元模型必须包括主梁、桥塔、拉索、吊索等所有部分并且要用节点耦合或者接触的方法模拟其之间的热传导问题。利用参数灵敏度研究,可以找到对温度应力有较大作用的因素,作为设计方案的参考。精确化的有限元仿真值与实际测试结果相吻合证明此方案可用于实际工程。

3.3 温度荷载组合与工况分析

温度荷载组合是桥梁结构设计的重要部分,在进行结构设计的时候需要满足规范的要求,对于均匀温度及梯度温度作用的组合,还要和其他的设计进行最不利的组合^[2]。

选用了9种温度工况:整体升温或降温、日照和不同高度等造成各构件之间的温差都包括进去。对温度工况的选择影响到结构的安全性,因此在选择时要结合桥梁的具体形式以及所处的地理环境和当地的气候情况来选择。

表1 温度荷载组合工况表

工况编号	荷载类型	组合方式	控制目标
TC-01	整体升温+正温差梯度	基本组合	梁体受压、支座位移
TC-02	整体降温+负温差梯度	基本组合	梁体受拉、裂缝宽度
TC-03	日照温差(竖向梯度)	日照温差(竖向梯度)	顶板应力、疲劳性能
TC-04	日照温差(横向梯度)	频遇组合	箱梁畸变、横向应力
TC-05	骤然降温	准永久组合	长期变形、徐变影响
TC-06	合龙温差±10℃	施工组合	合龙精度、初始应力

4 温度应力控制与设计优化方法

4.1 结构体系优化设计

结构体系的选择是最有效的控制温度应力的办法。减少超静定次数可以减少温度拘束应力,但是需要兼顾抗震和整体性的要求,在大跨径连续刚构桥上适当的布置墩梁固结及支座边界能改善温度应力状态。关于连续刚构桥梁温度效应的研究主要针对上部结构部分,缺少桥梁墩方面的内容,由于桥墩对连续刚构的影响较大,因此有必要对其上的温度荷载加以分析^[3]。在结构体系的设计优化过程中合理选取合龙温度也是减小温度次内力的重要步骤之一。针对超静定桥梁结构的合龙温度状况将成为温度应力分析的基础条件,合龙温度与年平均温度相差多少决定了均匀温度变化产生应力的程度,在实际应用过程中应在年平均温度附近并保持一定的稳定气温和环境条件下实施合龙工作,需要时也可采取强迫合龙及体系切换的方法来完成合龙过程。对于连续梁桥来说,通过对固定支座位置的选择可以使温度产生的变形均衡分布在各个桥墩上,从而避免某个桥墩受到较大的温度水平力的作用。而在大跨度斜拉桥的设计当中,则可以采用半漂浮体系代替全漂浮体系的办法,通过加设竖向约束装置的方式限制温差带来的梁端转角。针对钢桥及钢混组合梁桥,使用滑移支座加弹性约束支座的形式,这样不仅可以使整个结构保持稳定还能释放一定量的温度变形;另外在桥墩以及桥台上预留合适的构造缝隙,防止由于梁体伸长后与背墙相撞产生过大的摩擦力,这也属于结构体系的设计优化,在根本处减少温度应力带来的危害。

4.2 伸缩缝与支座设计优化

伸缩缝以及支座是防止热胀冷缩引起破坏的重要设施。伸缩缝的选择应当以计算出的位移量来选择,留有足够的安全余地。伸缩缝作为一种调节结构伸缩、消除温差应力的主要部件,如果发生故障会导致车辆跳跃、产生噪音、出现漏水等现象,严重的情况下会影响桥梁的安全。支座设置要满足温度变化的要求,活络支座要有一定的活动距离。

4.3 施工阶段温度控制措施

施工过程中的温度控制也是保证桥梁工程成桥质量的关键步骤之一,比如大体积混凝土水化热温控、合龙时机的选择、悬臂施工时温度修正、合理安排养护时间等措施都可以有效地降低或消除由于温度引起的内应力。通过沪蓉西高速公路湖北野三河特大桥的实际施工情况,采用有限元分析的方法对水泥水化热引起的温度效应进行了研究,对大体积混凝土结构以及预应力损失都有所影响。合龙最好选在一昼夜温差最小的时刻。

5 结语

温度应力为桥梁结构设计不容轻视的一个重要方面,在文中对温度应力引起桥梁结构变形破坏的作用原理进行了全面的研究,在此基础上对不同类型的桥型的温变特

点也进行了解析。最后提出了温度应力计算方法以及采取的控制办法。结论如下:不管是均一温度变化还是非均一温度梯度都会带来明显的温度影响,不同的桥型有不同的温变性能,要具体问题具体分析;有限元法是对温度应力进行精确分析的一种较好方法,通过改变结构体系,合理设置伸缩缝支座,控制好施工时的温度等都可以降低温度应力的影响。所以桥梁的设计中应该重视温度应力的作用,根据实际情况选择合适的温度应力计算方法及相应的控制措施以保证桥梁结构安全可靠与持久耐用。

[参考文献]

- [1]陈歆,黄馨,刘旭.高海拔地区桥墩混凝土表层温度应力分析[J].硅酸盐学报,2025,53(11):3258-3272.
- [2]秦世强,杨仁杰,张忠财,等.温度作用下钢-UHPC 轻型组合桥面疲劳性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(2):337-341.
- [3]王凯,张勇,刘建磊,等.基于 BP 神经网络的混凝土箱梁最大温度梯度预测[J].铁道科学与工程学报,2024,21(2):837-850.

作者简介:王恒(1996—),男,汉族,湖北洪湖人,工程师,武汉理工大学交通运输工程专业毕业,硕士,研究方向为桥梁设计方向。