论文

预应力混凝土槽型梁日照温度荷载模式研究

薛嵩^①, 戴公连^②, 闫斌^{②*}^① 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051;^② 中南大学土木工程学院, 长沙 410075

* E-mail: ketchup-110@163.com

收稿日期: 2014-11-28; 接受日期: 2015-10-15

国家自然科学基金(批准号: 51378503)资助项目

摘要 为研究日照作用下槽型梁的温差分布模式, 以沪昆客专上某预应力混凝土槽型截面独塔斜拉桥为例, 推导了结构自身遮挡下任意斜面上阴影长度的计算方法, 建立了考虑大气环境参数、桥梁方位和走向, 以及箱室遮挡作用的槽型梁热力学仿真模型, 分析日照作用下槽型梁截面上的温差荷载模式. 研究表明: 槽型梁腹板受太阳直接辐射, 而底板受到箱室遮挡, 导致槽型梁内温度分布较为复杂, 现行规范中的温差荷载模式并不适用于槽型梁; 以应力等效为原则提出槽型梁的温差荷载模式: 槽型梁箱室上缘最大温差 20℃, 向下至腹板内符合指数函数分布; 下缘最大温差 2.5℃, 在 0.2 m 范围内线性变化至 0℃.

关键词 桥梁工程, 日照温差, 阴影长度, 槽型梁, 温差模式

1 引言

混凝土桥梁结构与周围环境热交换过程中, 由于混凝土材料导热性能较差, 混凝土桥梁横截面上温度场呈非线性分布, 该非线性温差产生的温度应力和温度变形是影响桥梁结构安全性和耐久性的重要因素之一. 关于日照作用下混凝土桥梁竖向温度梯度分布规律, 国内外学者已进行了广泛而深入的研究, 各国规范也相应制定了温差荷载模式^[1-9]. 但既有研究多未考虑翼缘板等结构的遮阳作用^[10,11], 且研究对象多为普通箱梁或 T 梁, 对某些特殊截面如槽型截面梁, 其温差荷载模式尚不明确.

为研究槽型梁温度场分布模式, 本文在既有研

究基础上, 推导了任意斜度截面上阴影长度的计算方法, 并采用文献中的实测结果进行验证; 基于混凝土桥梁日照温度场的基本理论, 采用大型通用有限元软件 ANSYS, 建立了考虑大气环境参数、桥梁地理和走向, 以及结构自身遮挡作用的槽型梁日照温度场热力学分析模型. 在此基础上分析槽型梁截面上日照温度场的分布规律, 提出槽型梁箱室和底板的温差荷载模式, 进一步丰富槽型梁温差荷载及温度应力计算理论.

本文工程实例位于沪昆客运专线杭长段长沙地区跨越武广高铁处, 采用预应力混凝土转体斜拉桥方案, 塔高 51.8 m, 孔跨布置为(32+80+112)m, 为单塔双索面半漂浮体系(图 1).

引用格式: 薛嵩, 戴公连, 闫斌. 预应力混凝土槽型梁日照温度荷载模式研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 286-292

Xue S, Dai G L, Yan B. Sunshine temperature mode of prestressed concrete bridge with U-shape section (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 286-292, doi: 10.1360/N092014-00418

图1 沪昆客专某斜拉桥布置图(单位: m)

主梁采用槽形截面, 该截面形式有利于提高主梁抗扭刚度并可防止道砟掉落至桥下既有线路。主梁全宽 10.8 m, 底板宽度 6.6 m, 小跨侧梁高 3.7 m, 大跨侧梁高 3.5 m, 道砟厚度 0.5 m。断面布置如图 2 所示。

日照作用下, 槽型断面外腹板受到太阳直接辐射, 底板和内腹板受到箱室遮挡, 其温度场分布模式与箱梁存在较大差异。

2 阴影长度推导及验证

混凝土桥梁与周围环境的热交换过程可分为太阳辐射、对流换热和辐射热交换三类, 相关计算理论可参见文献[2]。由于槽形梁结构特殊必须考虑箱室的遮挡作用, 故本文将推导结构自身遮挡下任意截面阴影长度的计算方法。

2.1 受顶板遮挡的腹板上阴影长度

对于普通箱梁或 T 梁, 其顶板受到太阳的直接辐射, 腹板受到翼缘的遮挡, 图 3 为腹板上阴影示意图。

其中向量 s 和 n 分别为太阳入射光线及腹板外法线, α_s 和 α_n 为太阳入射线与腹板法线和正南方向的夹角, β_s 和 β_n 为太阳入射线与腹板法线和水平面的夹角, 为腹板与水平面的夹角, 为悬臂长度, l_s 为阴影长度。当 $|\alpha_s - \alpha_n| < 90^\circ$ 时, AB 长度为

图2 槽型梁断面布置图

图3 腹板日照阴影示意图

$$L_{AB} = \frac{l_s}{\cos(\alpha_n - \alpha_s)}. \quad (1)$$

将图 3 沿太阳入射方向(即 1-1)剖开, 得到阴影长度的剖面示意图, 如图 4 所示。

由图示几何关系可知, 在 $\triangle AOE$ 中, $\angle A = \beta_n$, $\angle E = 90^\circ - \beta_s$, $\angle O = 180^\circ - \angle A - \angle E = 90^\circ - \beta_n - \beta_s$, 由正弦定理:

$$\frac{\sin \angle E}{\sin \angle O} = \frac{l_s}{L_{AE}}. \quad (2)$$

又

$$L_{AE} = L_{AB} - \tan \beta_s. \quad (3)$$

综合(1)~(3), 可得

$$l_s = \begin{cases} \frac{l_s \times \tan \beta_s \times \cos \beta_s}{\cos(\alpha_s - \alpha_n) \times \cos(\beta_s - \beta_n)} & (|\alpha_s - \alpha_n| < 90^\circ), \\ \infty & (|\alpha_s - \alpha_n| \geq 90^\circ). \end{cases} \quad (4)$$

(4)式即为腹板上阴影长度的计算公式。

图4 腹板日照阴影 1-1 剖面示意图

2.2 受腹板遮挡时顶(底)板上的阴影长度

槽型截面梁在太阳辐射作用下, 腹板受到太阳直接辐射, 顶板或底板(视槽型断面形式而定)受到腹板的遮阳作用, 如图 5 所示.

各符号意义如前所述. 由几何关系可知, 当 $|\alpha_s - \alpha_n| \neq 90^\circ$ 时, 有

$$l_s = L_{OA} \times \cos(\alpha_n - \alpha_s). \quad (5)$$

将上图沿 1-1 剖开, 如图 6 所示. 在 $\triangle OAB$ 中, 由正弦定理得

$$\frac{\sin \angle A}{\sin \angle B} = \frac{L_{OB}}{L_{OA}}, \quad (6)$$

其中, $\angle A = \beta_s + \gamma$, $\angle B = 180^\circ - \beta_s$, 且规定当顶(底)板在水平面以下时 γ 为负, 反之为正.

又

图 5 顶(底)板日照阴影示意图

图 6 顶(底)板日照阴影示意图

$$L_{OB} = \frac{l_c}{\tan \beta_s}. \quad (7)$$

综合式(5)~(7), 可得

$$l_s = \begin{cases} \frac{l_s \times \cos(\alpha_s - \alpha_n) \times \sin \beta_s}{\sin(\beta_s - \gamma) \times \tan \beta_s} & (|\alpha_s - \alpha_n| \neq 90^\circ), \\ 0 & (|\alpha_s - \alpha_n| = 90^\circ). \end{cases} \quad (8)$$

2.3 算例验证

文献[3]针对南京长江二桥北汊桥预应力混凝土连续箱梁桥, 对其日照温差分布模式进行了现场观测, 通过对观测结果的二次回归分析, 得出了温度场的分布模式, 并提出在日照作用下, 沿桥纵向不同位置、不同梁高的箱型截面具有一致的分布模式.

基于前文中阴影长度的计算方法及文献[3]中计算的算参数, 对箱梁桥典型断面(见图 7)建立有限元模型, 并对比三种工况的计算结果: ①考虑箱梁腹板阴影对温度分布的影响; ②忽略箱梁腹板上的太阳直接辐射作用; ③不考虑悬臂的遮阳作用(即假设太阳辐射直接作用在腹板上). 见图 8 所示.

图 7 箱梁典型断面示意图

图 8 (网络版彩图)箱梁日照温差分布

由图 8 可知, 箱梁温差的分布模式基本与我国铁路规范规定的指数函数分布模式一致; 另外, 相对于其他两种情况, 考虑悬臂阴影影响(工况①)计算所得混凝土箱梁内部温差分布与实测结果最为接近. 除底板温差相差 1.5°C 外, 其余各点误差均在 5% 以内, 因此可认为本文中对悬臂阴影分析方法是能够反映实际情况的.

3 槽型梁温差模式

3.1 槽型梁日照温度场仿真模型

基于大型通用有限元软件 ANSYS, 采用八节点四边形平面单元模拟槽型截面, 并将太阳辐射、对流换热和辐射热交换统一转化为辐射热流密度, 储存至以时间、温度和坐标为索引的三维表格中, 以该表格作为边界条件加载至槽型梁外表面进行计算. 混凝土表面短波辐射吸收率 0.65, 长波辐射吸收率 0.9. 忽略槽型梁箱室内空气与箱外的热交换, 并假设空气温度高于混凝土温度 1.5°C [11].

为得到槽型梁最不利的温差分布, 选取一年中太阳辐射最强的时间对其进行分析. 我国所处纬度范围内, 不同地区的最大辐射都出现在夏至前后 [2]. 本文中槽型梁地理位置处于北纬 28.1° , 东经 113.1° , 桥梁轴线方位角为 144.5° . 针对本地区, 通过多次比较计算, 确定 6 月 21 日太阳辐射较强的一天作为计算日期. 计算参数如下: 环境温度为 $28\sim 42^{\circ}\text{C}$, 平均风速为 1 m/s , 大气透明度系数为 0.85.

此外, 为了减少初始条件误差的影响, 采用该条件进行多天循环迭代计算 [12].

3.2 槽型梁温度场日变化规律

采用大跨截面进行分析, 计算图 9 中 T1、T2 及 T3 三点 6 月 21 日温度场日变化规律, 见图 10 所示.

由图 10 可以看出, 由于槽型梁顶板受到太阳直接辐射, T1 测点温度变化幅度较大, 幅值为 10°C 左右; 底板受到箱室的遮阳作用, 温度变化幅值相对较小, 为 8°C 左右; T3 测点由于不能受到太阳辐射作用, 其温度变化幅度很小, 仅为 3°C 左右. 可以看出, 受太阳辐射作用越强, 温度变化幅度越大, 温度值也越高. 同时可以看出, 当计算进行到第 5 天时, 日变化温度曲线已基本稳定, 故选取第 6 天的数据作为计算结果.

图 9 槽型梁典型断面示意图(单位: cm)

图 10 (网络版彩图)槽型梁内部测点温度日变化规律

3.3 槽型梁温度场分布模式

通过分析发现, 在第 6 天下午 14:00 时刻, 槽型梁截面内竖向温差出现最大值, 为更加直观地看出阴影对槽型梁温度分布的影响, 现将不考虑阴影影响的计算结果一并列出, 如图 11 和 12 所示.

可以看出, 外侧腹板受到太阳直接辐射作用, 不存在阴影遮挡效应; 底板虽然存在遮挡效应, 但其在辐射最强的时刻(正午左右)也受到太阳的直接辐射, 故阴影对其影响较小; 而底板横向温度分布受阴影影响较大, 除箱室部分的底板外, 考虑阴影影响计算所得结果明显小于不考虑阴影影响的计算结果.

此外, 槽型梁的温差模式与箱梁差异较大. 由于槽型梁腹板收到太阳直接辐射作用, 其竖向温度衰减较慢, 且由于槽型梁中性轴较低, 腹板内温差和顶

图 11 槽型梁第 6 天 14:00 时刻温度场整体分布图
(a) 考虑阴影影响; (b) 不考虑阴影影响

板温差产生效应将相互叠加, 忽略腹板温差对于结构计算是不准确的(应力计算结果见后文), 同时由图 12 温度分布曲线可以看出, 现行规范中的温差荷载模式已不适用于槽型梁。

3.4 槽型梁温度梯度模式

对于较为复杂的温差曲线, 可根据截面内同高度温差应力不变的原则来进行简化和拟合。任意截面温差应力的计算图示见图 13。

截面内任意高度 y 处的温差应力:

$$\sigma_t(y) = E\alpha t_y - \frac{N_t^0}{A_0} - \frac{M_t^0}{I_0} y, \quad (9)$$

式中,

$$N_t^0 = E\alpha \int_h t_y b_y dy, \quad (10)$$

$$M_t^0 = E\alpha \int_h t_y (y - y_c) b_y dy. \quad (11)$$

当 t_y 较小时, 令截面内的初始轴力 N_t^0 和初始弯矩 M_t^0 不变, 即可保证 $\sigma_t(y)$ 不变。

基于此方法并结合图 12(a)中箱室竖向温度曲线, 获得槽型梁箱室竖向温差曲线如图 14 所示。

由于槽型梁横向最大温差仅为竖向最大温差的一半, 且槽型梁横向抗弯惯性矩又约为竖向抗弯惯性矩的 10 倍, 由横向温差引起的应力相比较竖向温差是非常小的, 所以在以应力等效为原则的前提下, 对截面温差的拟合可以不考虑横向温差的影响。

图 12 槽型梁第 6 天 14:00 时刻内部温度路径分布

(a) 路径 1-1 温度分布; (b) 路径 2-2 温度分布; (c) 路径 3-3 温度分布

实际温度场作用下槽型梁的应力分布, 可以基于应变阻止法^[11]以及 ANSYS 的耦合分析功能计算得到。现将实际温度场作用、忽略腹板温差(只考虑顶板 0.5 m 内温差及底板温差)、拟合温差以及我国铁路规范温差四种工况下路径 1-1(图 11)应力分布一并给出, 如图 15 所示。

图13 温差应力计算图示

图14 槽型梁箱室温差模式(单位: m)

图15 (网络版彩图)路径1-1应力分布

由上图可见,按我国铁路规范温差计算,槽型梁下缘应力与实际情况偏差较大,这是由于我国铁路规范中没有考虑梁体下缘温差导致的;同时可以看出,忽略腹板内温差后计算所得应力结果较实际温度场偏小,因此是偏于不安全的;按本文中拟合温差计算结果已基本符合实际应力的分布规律,因此认为本文中拟合温差可以适用于槽型截面梁。

4 结语

本文通过建立考虑大气环境参数、桥梁方位和走向,以及箱室遮挡作用的槽型截面热力学分析模型,推导了日照作用下由于结构自身遮挡效应所产生的阴影长度计算方法,分析了槽型梁温度场日变化规律,提出槽型梁箱室和底板的温差模式。得到的主要结论包括:

(1) 采用本文所述方法可正确考虑结构自身遮挡效应的影响,可用于槽型截面梁的日照温度场分析。

(2) 槽型梁日照温度场时变规律的分析表明,不同位置混凝土内温度场变化规律不同,受到太阳直接辐射的部位如顶板温度变化幅度较大,幅值为 10°C 左右;受到结构遮阳作用的部位如底板,温度变化幅值相对较小,为 8°C 左右;未受到太阳直接辐射的部位,其温度变化幅度很小,仅为 3°C 左右。受太阳辐射作用越强,温度变化幅度越大,温度值也越高。

(3) 槽型梁腹板内温度衰减较慢,使其温差分布模式较为特殊,无法用单一函数模式模拟,现行规范中的温差模式不适用于槽型截面。

(4) 以应力等效为原则,提出槽型梁的温差模式:箱室上边缘最大温差值为 20°C ,向下至腹板符合指数函数分布;下边缘最大温差值为 2.5°C ,并在 0.2 m 范围内线性变化至 0°C 。

参考文献

- 1 刘兴法. 预应力箱梁温度应力计算方法. 土木工程学报, 1986, 19: 31-42
- 2 彭友松. 混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2007. 114-122
- 3 叶见曙, 贾琳, 钱培舒. 混凝土箱梁温度分布观测与研究. 东南大学学报, 2002, 32: 788-793
- 4 陈权, 王丽娟, 张元海, 等. 连续箱梁的日照温差应力计算研究. 公路交通科技, 2009, 26: 99-104
- 5 姜全德, 蒋鸿. 钢筋混凝土箱形梁桥日照温度场和温度应力平面有限元数值分析方法. 桥梁建设, 1990, 3: 34-48
- 6 Enrique M, Antonio A. Distribution of temperature and stress in concrete box-girder bridge. J Struct Eng, 1990, 116: 2388-2409

- 7 Elbadry M M, Ghali A. Temperature variations in concrete bridges. *J Struct Eng*, 1983, 109 : 2355–2374
- 8 Priestley M J N. Thermal gradient in bridges-some design consideration. *New Zealand Eng*, 1972, 27: 228–233
- 9 邵旭东, 李立峰, 鲍卫刚. 混凝土箱形梁横向温度应力计算分析. *重庆交通学院学报*, 2000, 19: 5–10
- 10 薛嵩. 槽型断面斜拉桥日照温差模式及效应研究. 硕士学位论文. 长沙: 中南大学, 2013: 15–16
- 11 肖祥南. 64 米简支槽形箱梁的温度场及效应研究. 硕士学位论文. 长沙: 中南大学, 2010: 56–57
- 12 戴公连, 郑鹏飞, 闫斌, 等. 日照作用下箱梁桥上无缝线路纵向力. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47: 609–614
- 13 Branco P A, Mendse P A. Thermal actions for concrete bridge design. *J Struct Eng*, 1993, 119: 2313–2331
- 14 Mirambell E, Aguodo A. Temperature and stress distribution in concrete box girder bridges. *J Struct Eng*, 1990, 116: 2388–2409
- 15 铁道部科学研究院西南研究所桥梁室温度应力专题组. 九江大桥混凝土箱形梁日照温度场与温度应力的实验研究报告. 成都, 1984

Sunshine temperature mode of prestressed concrete bridge with U-shape section

XUE Song¹, DAI GongLian² & YAN Bin²

¹ *Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China;*

² *School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China*

In order to analyze the sunshine temperature difference mode of U-shape beam, the U-shape section of prestressed concrete single-tower cable-stayed bridge on the Shanghai-Kunming Passenger Dedicated Line was taken for case-study. The shadow length on sloping section of arbitrary angle caused by the structure was carried out. A thermodynamics simulated model considering the parameter of atmospheric environment, the location and position, and the shadow was established to analyze the temperature difference mode of U-shape beam. The study shows that the temperature field in U-shape beam is more complicated than box-shape beam because the web of U-shape beam is shined directly and the bottom slab is covered by the box. The temperature difference mode of U-shape beam cannot be simulated by single curve and the modes. The existed bridge codes were not suited for U-shape beam. Under the principle of stress equality, the temperature difference of U-shape beam was suggested as follows: the maximum temperature difference at highest point of the box room of U-shape beam up-slab is 20°C, reducing to zero with a distribution of exponential function; the maximum temperature difference at down-slab of U-shape beam is 2.5°C and reduces linearly within a height of 0.2 m.

bridge engineering, sunshine temperature, shadow length, U-shape beam, temperature difference mode

doi: 10.1360/N092014-00418