

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.007

单箱三室混凝土箱梁温度分布研究

潘旦光¹, 郭馨远¹, 丁民涛¹, 杨少平²

(1. 北京科技大学土木系, 北京 100083; 2. 中国水电建设集团十五工程局有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 以西安西咸新区沣河大桥单箱三室预应力混凝土箱梁桥为研究对象, 进行断面温度分布测试, 研究箱梁的温度分布规律, 讨论了箱梁的温度分布模式和温度基数, 提出了指数函数和线性函数相结合的温度梯度模式。结果表明: 受环境温度影响, 外表面的混凝土温度每天随环境温度急剧变化, 内表面除上翼板内侧外其余位置温度比较恒定; 从竖向温度分布看, 一维热传播理论适用于上翼板和下翼板, 但不适用于腹板, 且下翼板内外表面温差显著; 最大正温度梯度主要出现在夏季, 而最大负温度梯度主要出现在冬季。

关键词: 单箱三室; 混凝土箱梁; 温度试验; 温度梯度

中图分类号: U448.35 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)06-0513-08

Study on the temperature distribution of a single box three-room concrete girder

PAN Danguang¹, GUO Xinyuan¹, DING Mintao¹, YANG Shaoping²

(1. Department of Civil Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Sinohydro Engineering Bureau 15 Co. LTD, Xi'an 710068, China)

Abstract: To investigate the temperature distribution of box girder, an experiment is conducted to reveal the temperature distribution of a section of Fenghe Bridge, which is a single box three-room concrete bridge located in the Xixian New District of Xi'an City. Experimental results show that the concrete temperature of outside surface was greatly affected by the ambient temperature that fluctuates rapidly every day, but the temperature of inside surface was relatively constant except the top plate. From the viewpoint of vertical temperature distribution, the one-dimensional heat transmission theory is suitable for the upper and bottom flange, but not for the web. Meanwhile, the temperature difference between outside and inside bottom flange is obvious. In addition, the maximum gradient of positive temperature mainly appeared in summer, while the maximum gradient of negative temperature mainly appeared in winter. According to the experimental data, the temperature distribution pattern and temperature base of box girder were discussed, and a new temperature gradient function has been proposed by combing with exponential and linear functions.

Key words: single box three-room; concrete box girder; temperature experiment; temperature gradient

桥梁处于自然环境中,在日照作用下而使桥梁结构表面和内部产生温差。为计算日照温差对结构的效应,关键是确定结构的温度场。已有的研究表明,沿桥梁纵向温度分布基本一致^[1],因此,桥梁温度场的确定可简化为沿桥梁横向和竖向的温度分布。由于桥梁的特点和自然环境影响截面的温度分布,因此,许多学者对各种类型桥梁截面的温度分布进行了试验研究。

Hoffman 等^[2]考虑到太阳辐射为主要影响因素,对箱梁温度场问题分别从日照温差、骤然降温、年温差 3 个方面进行了分析。Mirambell 等^[3]、程海根等^[4]结合混凝土热传导理论提出了箱梁竖向温度分布模式。

基金项目: 北京市自然科学基金(8143037);北京科技大学教改项目(JG2013M11)
作者简介: 潘旦光(1974—),男,研究员,主要从事防灾减灾研究。E-mail:pdg@ustb.edu.cn
引用本文: 潘旦光,郭馨远,丁民涛,等. 单箱三室混凝土箱梁温度分布研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):513-520.
PAN Danguang, GUO Xinyuan, DING Mintao, et al. Study on the temperature distribution of a single box three-room concrete girder [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(6):513-520.

雷笑等^[5]、叶见曙等^[6]对长期观测数据利用统计分析的方法计算出了混凝土箱梁正负温差标准值。Kennedy等^[7]综合不同的理论以及对大量实测数据的分析,提出了符合北美情况的简单又合理的竖向温度梯度模式。方志等^[8]对箱梁温度场变化规律进行分析,提出了横竖向温度梯度模式,并将有限元计算结果与实测比较,吻合程度很好。陶翀等^[9]对某连续刚构桥基于两年观测数据的基础上运用概率分析提出了可靠的正温度梯度模式。李自林等^[10]对某单箱多室混凝土箱梁桥进行长期观测,拟合出了相应的温度梯度模式,并验证了其可靠性。在试验研究的基础上,各国规范分别确定了相应的温度梯度函数。较多规范采用折线函数^[11-15],新西兰规范^[16]采用幂函数,我国的铁路桥涵设计基本规范^[17]采用指数函数。同时,不同规范对梁底温差分布的规定也不尽相同,部分规范考虑了梁底的温度差别。

温度梯度包括函数形式和基数两个方面。函数形式反映了截面中热的传播规律,温度基数反映了实际桥梁截面的最大温差。对于箱梁,空腔导致上翼板和腹板的热传导规律不同,边腹板和中腹板的温度分布不同。目前,部分规范没有明确截面的类型;有些规范规定了箱梁的温度分布,但主要是以单箱单室为依据建立的。规范的温度梯度是否适合单箱多室是一个需要研究的问题。本文以陕西西安沔河大桥这座截面宽度达27 m的单箱三室混凝土箱梁桥为试验对象,进行1 a左右的温度分布试验研究。可为类似桥梁设计和施工提供参考。由于测试期间为施工阶段,故研究分析中未考虑铺装的影响。

1 箱梁桥温度场测试

1.1 工程概况

沔河大桥位于陕西西安西咸新区,地处关中平原中部,秦岭以北,属中纬度暖温带半湿润大陆性季风气候区。主桥上部结构采用55 m+5×100 m+55 m变截面预应力混凝土连续桥,东西走向,上下行分离,桥位跨越处的沔河规划水面宽度为427 m,桥梁混凝土等级C55,截面为单箱三室,箱梁上翼板宽27 m,下翼板宽19.5 m,翼缘悬臂宽3.75 m,箱梁截面尺寸如图1所示。箱梁最高8 m,最低2.5 m。上翼板厚度为0.3 m,下翼板厚度由0.32 m按1.8次抛物线以及圆曲线平滑过渡到根部的1.4 m。

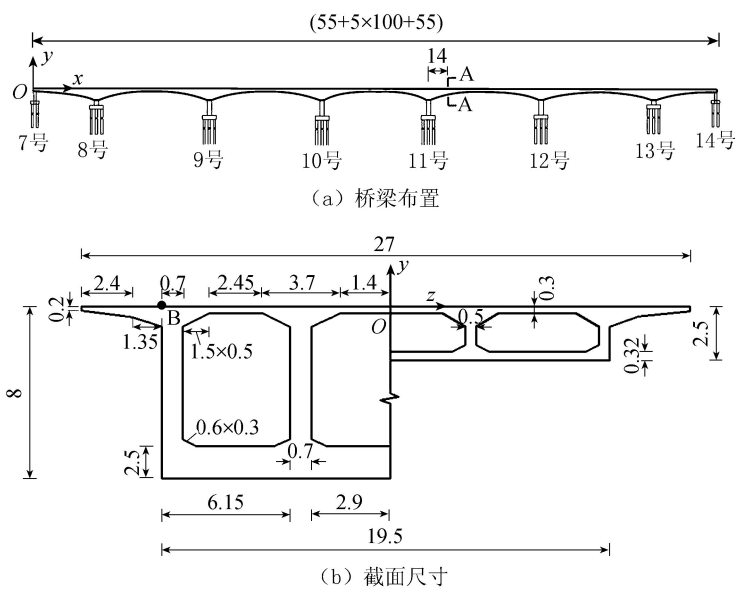


图1 沔河大桥(单位:m)

Fig.1 Fenghe bridge (units: m)

1.2 测点布置

温度传感器布置截面位于南侧半幅桥体11号墩中轴线东侧14 m处(图1中A-A截面位置),传感器测点布置如图2所示。该截面总共安装了65个PT100温度传感器进行数据采集,其中T1~T58固定在混凝土表面,T59~T65悬挂于空中,安装后的传感器如图3所示。安装在混凝土表面的传感器首先将热敏探头固定在混凝土表面,然后,在传感器表面覆盖一层薄的水泥砂浆,如图3(a)所示。温度采集从2015年6月8日开始,至2016年7月28日结束。采集数据频率为1次/min。

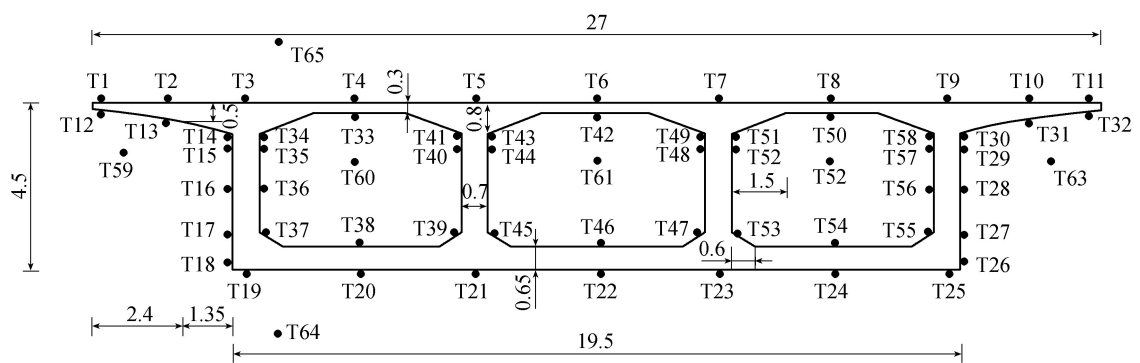
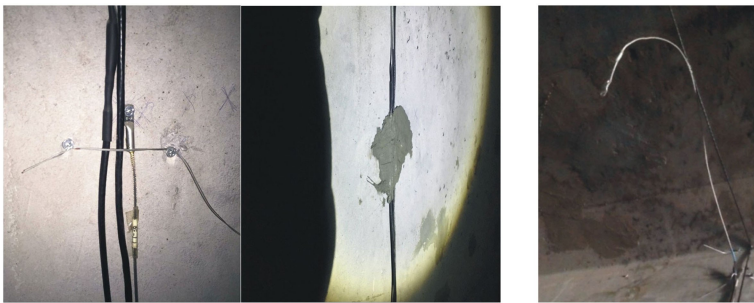


图 2 传感器测点布置(单位:m)
Fig.2 Measuring point layout of sensors (units: m)



(a) 监测混凝土温度 (b) 监测空气温度

图 3 安装的温度传感器照片
Fig.3 Photos of installed temperature sensors

2 温度分布试验结果

2.1 上翼板横向温度分布

图 4(a)为 2015 年 7 月 31 日上翼板上表面的温度。由图 4(a)可以看出,上表面的温度相对均匀,上翼缘右边上表面(T10 和 T11)的传感器温度明显低于其余位置的温度,这是由于该传感器旁边修建了监控室产生的遮阴影响,因此在后面的温度统计时,仅统计 T1 ~ T9 传感器的数据。图 4(b)为上翼板上表面 T1 ~ T9 平均温度随时间的变化曲线,同时也将 T65 的空气温度列上以进行比较,这表明上翼板上表面的温度和空气温度的变化是同步的。

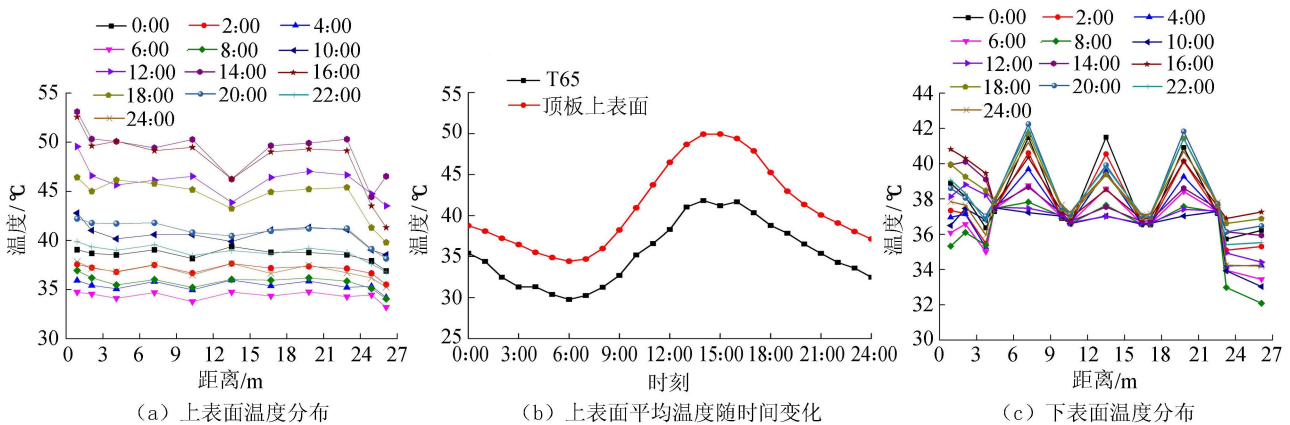


图 4 上翼板温度分布
Fig.4 Temperature distribution of the upper flange

图 4(c)为 2015 年 7 月 31 日上翼板下表面的温度变化情况。根据传感器的位置,下表面可以分为 3 个类型:(a)悬臂翼板下表面,T12、T13、T14、T30、T31(已被破坏)、T32;(b)承托下方,T34、T41、T43、T49、T51、

T58;(c)箱室上方上翼板内表面 T33、T42、T50。悬臂翼板下表面与室外空气直接接触,因此,其温度随着室外温度变化而变化。对于箱室内表面,由于室内温度基本不随环境温度变化,因此,承托部位混凝土的温度一天之内也基本不变。但是由于上翼板较薄,上翼板上表面的温度通过热传导而影响内表面的 T33、T42、T50,这造成箱室上方上翼板内表面的温度也随室外温度的变化而急剧变化。

2.2 下翼板横向温度分布

图 5(a)为 2015 年 7 月 31 日下翼板下表面位置(T19 ~ T25)的温度分布情况。由于箱梁两侧受阳光照射作用的影响,下翼板下表面南、北两侧的温度高于中部(T20 ~ T24)温度,且中部温度基本相同。结合后面的腹板的温度统计,将南北两侧与中部的温度以温差的形式表达,以形成箱梁横向温度分布。因此,以中部 T20 ~ T24 的平均温度作为下翼板外表面的温度。图 5(b)为下翼板下表面平均温度和 T65 空气温度随时间的变化曲线。由图 5(b)可知,下翼板下表面的温度略滞后于空气温度的变化,滞后时间约为 2 h。图 5(c)为下翼板上表面(T17、T37、T38、T39、T45、T46、T47、T53、T54、T55、T27)的温度分布情况。其中 T17 和 T27 位于箱外。由图 5(c)可知:(a)箱内混凝土的温度基本相同,且一天内温度变化仅为 1 ~ 2℃。加腋上方的温度和下翼板上表面的温度基本一致,这一点与上翼板下表面的温度分布不同。这是由于下翼板较厚(0.7 m),热从下翼板下表面向内传播过程中,在一定厚度范围外的温度可以认为是相同。(b)在下翼板同一高度的腹板外侧(T17 和 T27),其温度变化规律和箱内是完全不同的。箱外混凝土受外部环境影响而每天剧烈波动,内部混凝土受箱内环境影响而基本保持不变,这导致箱梁的横向温度分布,主要存在于边腹板的内外表面,而中腹板可认为没有温差。

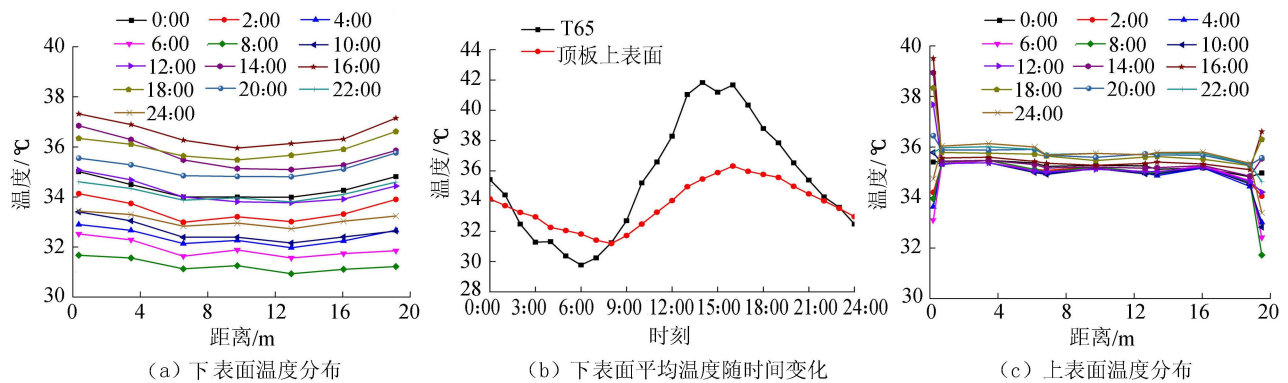


图 5 下翼板温度分布
Fig.5 Temperature distribution of the bottom flange

2.3 竖向温度分布

由图 5(a)和图 5(c) 可以看出,对于腹板和下翼板,从竖向来看,除边腹板的外表面外,其余部分的温度基本一致。因此,在进行竖向温度分布时,以中腹板为代表进行统计,而边腹板外表面的温度差别从横向温度分布角度进行考虑。

图 6 为夏天(2015 年 7 月 31 日)、冬天(2016 年 1 月 23 日)和秋天(2015 年 9 月 23 日)的温度竖向分布情况。由图 6 可以看出:(a)夏天 12:00—18:00,截面的温度分布为正温度梯度的 C 形分布,而其余时刻,由于箱室的影响,上翼板内表面的温度变化滞后于上翼板外表面,由此温度呈 S 形分布;即不会出现反 C 形的负温度梯度分布。(b)冬天 19:00 至次日 6:00 的温度为负温度梯度的反 C 形分布,其余时刻的温度梯度同样也呈 S 形分布,即在冬季不会出现 C 形的正温度梯度分布。(c)对于秋天,一天内会从下午 15:00 的 C 形正温度梯度分布转变到次日凌晨 6:00 的反 C 形负温度梯度分布,但温度值介于夏冬之间。

3 竖向温度梯度

由实测温度可知,箱梁的温度场是非常复杂的。温度梯度的统计需要考虑两个方面:(a)梯度函数的形式;(b)函数中温度基数的大小。其中梯度函数反映的是截面中不同高度温度的变化规律,它与截面的类型、材料相关。温度基数的大小具有显著的地区特性,因为不同地方的日温差变化幅值、光照强度等环境因素是不相同的。

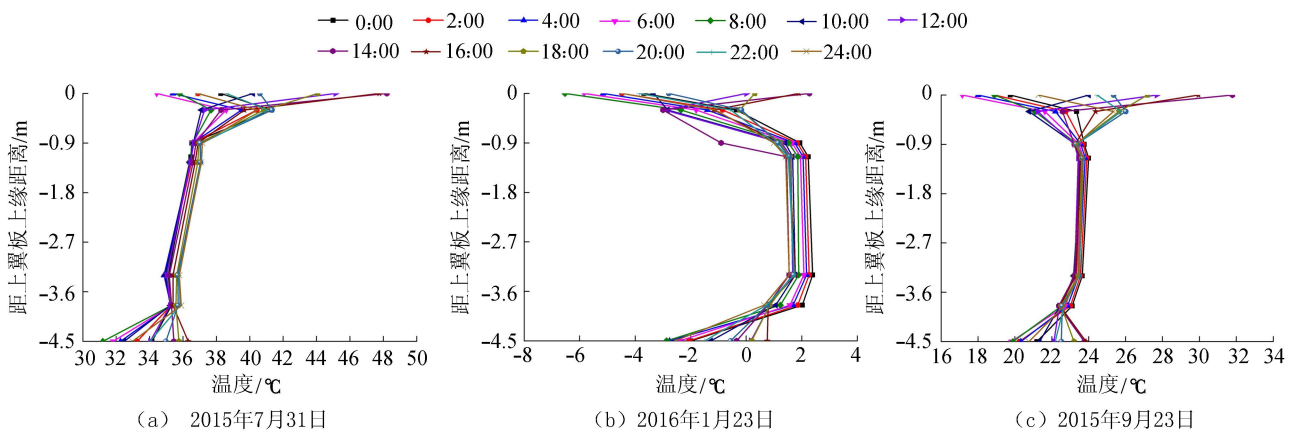


图 6 中腹板竖向温度分布

Fig. 6 Vertical temperature distribution of the middle web

3.1 箱梁的竖向温度梯度函数

从计算角度看,温差分布分为竖向和横向的温度梯度。本文主要分析竖向温度梯度,横向温度梯度将另文详述。对于竖向温度梯度,国内外规范的温度梯度通常是统计一天的最高温时刻的 C 形分布作为正温度梯度,以低温时刻的反 C 形分布作为负温度梯度。秋季的最大正温度梯度的幅值低于夏季,最大负梯度的幅值低于冬季,故下面主要针对夏、冬两个极端季度进行分析。

3.1.1 梯度函数与实测结果比较

为便于观察实测温度 and 不同函数分布的吻合程度,将所有规范的上翼板上表面温度基数统一调整为 1℃,竖向按比例进行缩放。实测温度以下翼板内表面温度为基准,箱梁沿竖向不同位置与之求得的温差同样按比例缩放,不同规范与实测温度梯度的比较如图 7 所示。其中图 7(a)为 2015 年 7 月 30 日、7 月 31 日、8 月 1 日、8 月 22 日和 9 月 14 日天晴且温度最高时刻的温差。图 7(b)为 2016 年 1 月 19—23 日、2 月 6 日、3 月 26—27 日实测最低温时刻的温差。

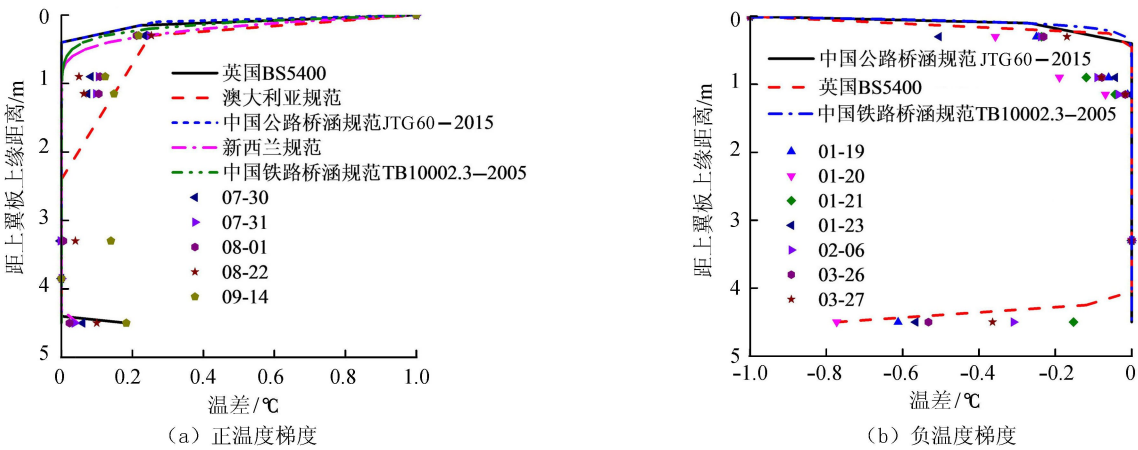


图 7 竖向温度分布比较

Fig. 7 Comparison of vertical temperature distributions

对比实测温差与规范温度梯度可知,不同规范都反映了上翼板温度急剧降低的特点,这是由于上翼板的混凝土基本符合一维热传播规律,因为混凝土的导热系数很小而使温度急剧降低。对于腹板部分,由于受箱内空气的影响,此时混凝土温度从上向下变化不再符合一维热传播规律,因此,基于一维热传播理论所得的梯度函数与实测温度差别较大。对于下翼板,内外表面是有温差存在的,这一点在英国规范 BS5400^[12]中的下翼板温度分布与实测吻合较好。

3.1.2 拟合竖向温度分布函数

根据上述实测温度分布可知,箱梁的竖向温度可以分为 3 个部分,上翼板和下翼板的温度可采用一维热传导理论而采用指数函数分布,腹板实际上是复杂的二维温度场问题。为此建立了图 8 所示的指数函数和

线性函数相结合的温度梯度函数。该温度梯度以下翼板内表面的温度为零点;在 h_1 范围内混凝土温度按指数衰减; h_2 为腹板中从上翼板内表面温度按线性变化降低到零的高度;参考英国规范^[12]、新西兰规范^[16]和中国铁路桥涵设计规范^[17],将下翼板厚度范围内的温度分为2段,在下翼板外表面0.2 m 范围内按指数衰减且衰减系数与上翼板相同,然后,按线性规律衰减到零。在这个函数曲线中,认为上翼板和下翼板的温度变化是符合一维热传导规律的

的,因此,在上翼板范围内按指数衰减。对于腹板部分,其温度变化实际上是非常复杂的,但由于其温度变化相对较小,因此直接采用线性温度分布的假定。根据实测数据进行曲线拟合,所得函数如式(1)所示:

正温差

$$T_y = \begin{cases} T_1 e^{-5y} & 0 \leq y \leq h_1 \\ -3.94y + 3.94h_1 + T_1 e^{-5h_1} & h_1 \leq y \leq h_1 + h_2 \\ 0 & h_1 + h_2 \leq y \leq h - h_3 \\ \frac{T_4 e^{-1}}{h_3 - 0.2} y - \frac{T_4 e^{-1}(h - h_3)}{h_3 - 0.2} & h - h_3 \leq y \leq h - 0.2 \\ T_4 e^{-5(h-y)} & h - 0.2 \leq y \leq h \end{cases}$$

负温差

$$T_y = \begin{cases} T'_1 e^{-5y} & 0 \leq y \leq h_1 \\ 3.036y - 3.036h_1 + T'_1 e^{-5h_1} & h_1 \leq y \leq h_1 + h'_2 \\ 0 & h_1 + h'_2 \leq y \leq h - h_3 \\ \frac{T'_4 e^{-1}}{h_3 - 0.2} y - \frac{T'_4 e^{-1}(h - h_3)}{h_3 - 0.2} & h - h_3 \leq y \leq h - 0.2 \\ T'_4 e^{-5(h-y)} & h - 0.2 \leq y \leq h \end{cases}$$

式中: y ——距上翼板上缘距离, m; T_1 、 T'_1 ——正温差、负温差上翼板上表面温度; T_2 、 T'_2 ——正温差、负温差上翼板下表面温度, $T_2 = T_1 e^{-5h_1}$, $T'_2 = T'_1 e^{-5h_1}$; T_3 、 T'_3 ——正温差、负温差距下翼板下表面0.2 m 处温度; T_4 、 T'_4 ——正温差、负温差下翼板下表面温度, $T_3 = T_4 e^{-1}$, $T'_3 = T'_4 e^{-1}$; h ——梁高; h_1 ——上翼板厚度; h_3 ——下翼板厚度, $h_3 = 0.2$ m; h_2 、 h'_2 ——正温差、负温差上翼板下表面温度线性衰减到零的距离, $h_2 = \frac{T_1 e^{-5h_1}}{3.94}$, $h'_2 = \frac{T'_1 e^{-5h_1}}{3.036}$ 。

3.2 温度基数

式(1)中的 T_1 、 T_4 、 T'_1 、 T'_4 的数值的大小与桥梁所处的自然环境和方位有关。下面根据试验结果讨论西安地区温度基数 T_1 、 T_4 的确定。

3.2.1 上翼板上表面及中腹板下端混凝土温度与室外空气温度

以 t_l 表示箱梁上方空气温度 T65 的温度, t_u 表示上翼板上表面 T1 ~ T9 的平均温度, t_c 表示中腹板下端 T39、T45、T47、T53 的平均温度。图9为 t_l 和 t_u 的散点图。两者的线性回归函数为

$$t_u = 1.16t_l - 0.97$$

(2)

相关系数为0.98,说明两者具有明显的线性关系。图中 t_{u1} 和 t_{u2} 表示95%置信度下的直线。但是, t_l 和 t_c 之间没有线性相关性。由于温度基数中的 T_1 是 t_u 和 t_c 之差,因此,直接利用环境温度,可以得到箱梁上表面混凝土的温度,但无法得到箱梁的温度基数 T_1 。

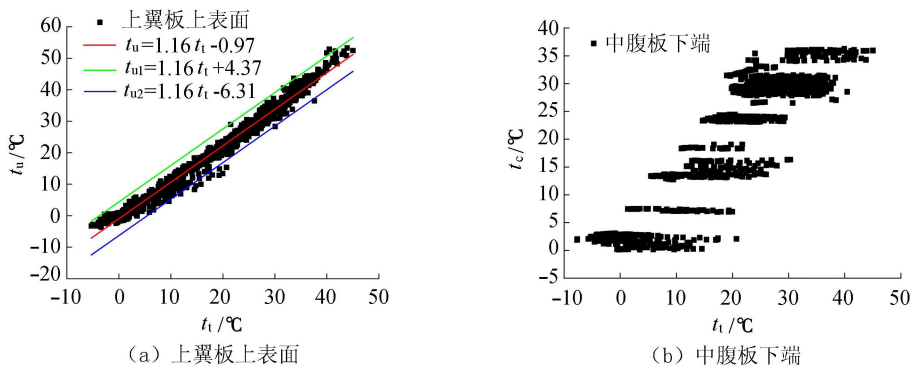


图 9 室外空气温度与混凝土温度关系

Fig. 9 Temperature relationship between air and concrete

3.2.2 箱室内外空气温差和混凝土温差

为表述方便,引入符号:

$$\Delta_{uc} = t_u - t_c \quad \Delta_{bc} = t_b - t_c \tag{3}$$
$$\Delta_a = t_t - t_a \tag{4}$$

式中: t_a ——3 个箱室空气温度 (T60、T61、T62) 的平均值; t_b ——下翼板下表面 T20 ~ T24 温度的平均值; Δ_{uc} 、 Δ_{bc} ——上翼板、下翼板外表面与箱内下翼板内表面的温差; Δ_a ——箱内外空气的温差。图 10 为夏季(7—9 月)、冬季(1—3 月)上翼板、下翼板混凝土温差与对应空气温差之间的关系。图 10 中 Δ_{uc1} 、 Δ_{uc2} 和 Δ_{bc1} 、 Δ_{bc2} 表示 95% 置信度下的直线。

图 10(a)(b)(c)(d)线性回归函数的相关系数分别为 0.85、0.74、0.86、0.78,由此表明上翼板、下翼板混凝土与空气温差存在较好的线性关系。升温时选取空气温差的最大值点所对应的置信上限,即分别以直线 $\Delta_{uc1} = 1.24\Delta_a + 8.54$ 和 $\Delta_{bc1} = 0.52\Delta_a + 0.65$ 的最大值点确定正温度梯度的基数, $T_1 = 22^\circ\text{C}$, $T_4 = 3^\circ\text{C}$;同理,降温时选取空气温差的最小值点所对应的置信下限,即分别以直线 $\Delta_{uc2} = 0.96\Delta_a - 2.38$ 和 $\Delta_{bc2} = 0.61\Delta_a - 1.52$ 的最小值确定负温度梯度, $T'_1 = -11^\circ\text{C}$, $T'_4 = -7^\circ\text{C}$ 。试验结果表明,箱内外混凝土温差和箱内外空气温差是具有线性相关性的,因此,对于箱梁而言,直接利用当地的环境温度是无法得到箱梁温度梯度分布的基数,而应该利用箱内外的温差计算梯度函数的基数。

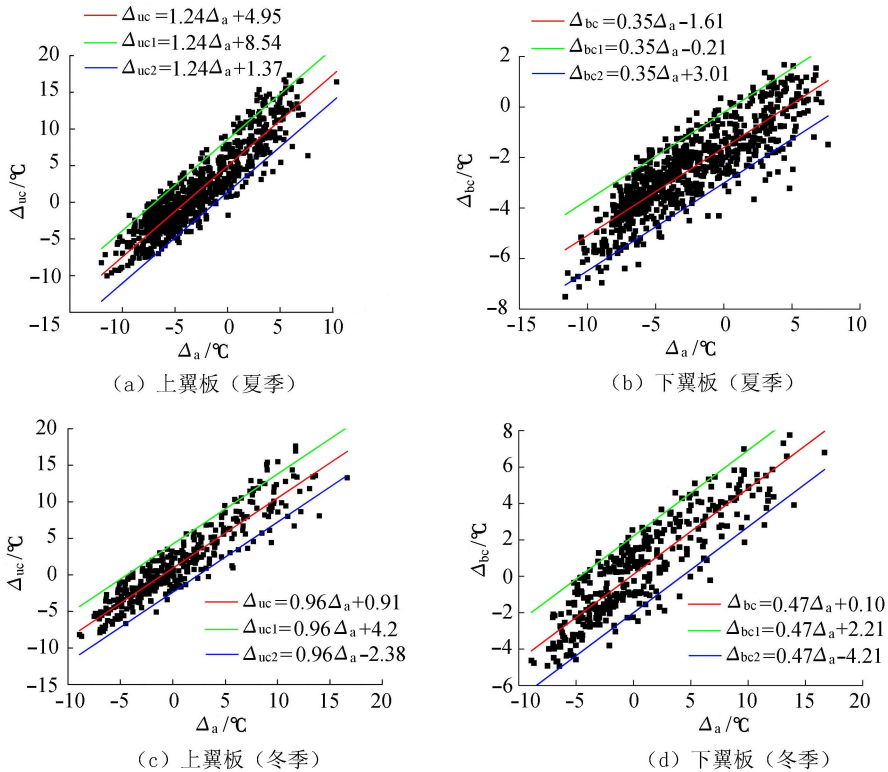


图 10 混凝土与空气温差

Fig. 10 Temperature difference between concrete and air

4 结 论

- a. 箱梁的横向温度变化主要集中在边腹板范围内,边腹板的内表面和中腹板的温度基本相同。
- b. 箱梁的竖向温度变化非常复杂,在夏季最高温时刻会出现正 C 形的正温度梯度,在冬季最低温时刻

会出现反C形的负温度梯度。在一天温度变化过程中,常出现S形的温度分布。

c. 从竖向的温度变化看,上翼板和下翼板范围内的温度变化基本上符合一维热传导规律而呈现指数衰减的关系,而腹板的温度变化不符合一维热传导规律。

d. 上翼板上方空气温度和箱内空气温度不存在线性关系。箱梁上、下翼板混凝土温差与相应空气温差线性相关性较好。因此,对于箱梁而言,箱梁温度梯度分布的基数取决于箱内外空气的温差。直接利用当地的环境温度是无法得到箱梁温度梯度分布基数的。

参考文献:

[1] 叶见曙,贾琳,钱培舒. 混凝土箱梁温度分布观测与研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2002, 32(5): 788-793. (YE Jianshu, JIA Lin, QIAN Peishu. Observation and research on temperature distribution in concrete box girders[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2002,32(5): 788-793. (in Chinese))

[2] HOFFMAN P C, MCCIURE R M, WEST H H. Temperature study of an experimental segmental concrete bridge[J]. PCI Journal, 1983, 28(3): 78-97.

[3] MIRAMBELL E, AGUADO A. Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(9): 2388-2409.

[4] 程海根,王美英,李雪超,等. 大气环境下混凝土箱梁横截面温度场试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012 (4): 142-146. (CHENG Haigen, WANG Meiyong, LI Xuechao, et al. Experimental study on temperature field of concrete box girder cross section under atmospheric environment[J]. Highway Traffic Science and Technology(Applied Technology), 2012 (4): 142-146. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 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))

[7] KENNEDY J B, ASCE F, SOLIMAN M H. Temperature distribution in composite bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(3): 475-482.

[8] 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))

[9] 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, et al. Temperature gradient model of concrete box girder based on probability analysis[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2014, 48(8): 1353-1361. (in Chinese))

[10] 李自林,李长辉,陈国胜,等. 无铺装层扁平预应力混凝土连续梁的温度梯度研究[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44 (6): 76-80. (LI Zilin, LI Changhui, CHEN Guosheng, et al. Study on temperature gradient of flat prestressed concrete continuous beam without pavement[J]. Journal of Hebei University of Technology 2015, 44(6): 76-80. (in Chinese))

[11] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specifications, SI Units [S]. 3th ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005.

[12] British Standards Institution. BS5400, Steel concrete and composite bridges: part2: 1978-Specifications for Loads[S]. London: British Standards Institution, 1978.

[13] European Committee of Standardization. EN 1991-1-5: 2003, Eurocode 1: Actions on structures-part1-5: generalactions-thermalactions[S]. Brussels: European Committee of Standardization, 2003.

[14] KIRKCALDIE D K, WOOD J H. Review of Australian standard as 5100 bridge design with a view to adoption-volume 1, Report 361 [S]. Wellington: NZ Transport Agency, 2008.

[15] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范:JTG60—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.

[16] Transit New Zealand. Bridge Manual. Section3: design loading[S]. 2th ed. Auckland: Transit New Zealand, 2003.

[17] 中华人民共和国铁道部. 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范:TB 10002. 3—2005[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.