doi：10.3969/j.issn.1002－0268.2016.02.008

太阳辐射下混凝土箱梁温度场研究

顾 颖，李亚东，姚昌荣
（西南交通大学 土木工程学院，四川 成都 610031）

摘要：为研究太阳辐射作用下混凝土箱梁温度场的三维分布，基于ASHRAE晴空模型，运用ANSYS软件模拟了太阳辐射作用下某混凝土箱梁的温度场，并分析了风速、大气清洁度、桥梁方位及纬度等参数对混凝土箱梁温度场的影响。研究结果表明：混凝土箱梁的温度计算值与实测数据符合较好，偏差在3 ℃以内，说明ASHRAE晴空模型能有效地应用于混凝土箱梁的温度场分析；混凝土箱梁的温度梯度在竖向主要集中在梗腋区域，横向集中在底板靠近腹板的区域；当腹板受到太阳直射时，底板端部区域的横向温差较大，因此在设计验算时，对翼缘悬臂相对较短的混凝土箱梁，建议考虑底板横向温差对结构的影响；风速、大气清洁度对混凝土箱梁竖向温差影响较大，而桥梁方位和纬度的影响相对较小。

关键词：桥梁工程；混凝土箱梁；ASHRAE晴空模型；温度场；太阳辐射；遮蔽效应
中图分类号：U455.57 **文献标识码**：A **文章编号**：1002－0268（2016）02－0046－08

Research of Temperature Field of Concrete Box Girder under Solar Radiation

GU Ying, LI Ya-dong, YAO Chang-rong
(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: To research 3D temperature field of concrete box girder under solar radiation, the temperature field of a concrete box girder under solar radiation is simulated with ANSYS software based on ASHRAE clear-sky model. The influences of the main parameters, including wind speed, atmospheric cleanliness, bridge orientation and latitude, on the temperature field of the concrete box girder are analyzed. The result shows that (1) the calculated values of temperature are close to the measured ones and the deviation is less than 3 ℃, which indicates the ASHRAE clear-sky model can be used to effectively analyze the temperature field of concrete box girder; (2) the temperature gradient of the concrete box girder mainly concentrates in the haunch in vertical direction, and concentrates in the area of bottom plate near web in transverse direction; (3) the transverse temperature difference of bottom plate end is relatively larger when the web subjected to direct sunlight, thus it is recommended that the influence of the transverse temperature difference on the structure behaviors should be taken into account for those concrete box girders with shorter flange cantilevers; (4) wind speed and atmospheric cleanliness greatly affect the vertical temperature difference of concrete box girder, while the influence of orientation and latitude of bridges is comparatively little.

Key words: bridge engineering; concrete box girder; ASHRAE clear-sky model; temperature field; solar radiation; shielding effect

0 引言

由于混凝土导热系数较小，在太阳辐射作用下，混凝土结构内部的温度变化明显滞后于表面的温度变化[1]，形成较大的温度梯度，由此产生的温度应力已成为混凝土箱梁开裂甚至失效的主要原因

收稿日期：2015－01－04
基金项目：国家自然科学基金项目（51378430）
作者简介：顾颖（1986－），男，四川成都人，博士．（245697636@qq.com）

之一[2-3]。

国内外许多桥梁设计规范都对混凝土箱梁的温度荷载模式做出了相应的规定，但在太阳辐射作用下，影响结构温度分布的因素较多，如太阳辐射强度、大气（地表）温度、风速、遮蔽效应和混凝土热物理性能等[4]，加之这些因素对温度的影响程度又不尽相同，所以各规范中的温度荷载模式仅限于设计简化分析，对实际结构温度效应分析有一定的局限性。

温度场的准确模拟是温度效应分析的基础，也是确定温度荷载的关键，因此有必要对太阳辐射作用下的混凝土箱梁温度场进行细致深入的研究。本文基于 ASHRAE 晴空模型，对某混凝土箱梁在太阳辐射作用下的温度场进行了数值模拟，计算结果与实测数据符合良好，并对影响混凝土箱梁温度分布的主要因素进行了分析。

1　温度场计算理论基础

1.1　太阳辐射强度计算理论

本文采用美国供暖、制冷和空气调节工程师协会（ASHRAE）推荐的晴天太阳辐射模型（晴空模型）计算太阳辐射强度。根据 ASHRAE 晴空模型[5]，入射到建筑物表面的太阳总辐射由太阳直射辐射、天空散射辐射和反射辐射 3 部分组成。

（1）太阳直射辐射强度

垂直入射直射太阳辐射强度 G_{ND}为：

$$G_{ND} = \frac{A}{\exp(B/\sin\beta)}C_n, \tag{1}$$

式中，A 为大气质量为零时的太阳辐射强度；B 为大气消光系数；β 为太阳高度角；C_n为大气清洁度。

对于任意平面，太阳直射辐射强度 G_D为：

$$G_D = G_{ND}\max(\cos\theta,0), \tag{2}$$

式中 θ 为太阳光线与平面法线之间的夹角。

（2）天空散射辐射强度

垂直面上的散射辐射强度：

$$G_{d\theta} = \frac{G_{dV}}{G_{dH}}CG_{ND}, \tag{3}$$

式中，C 为水平面上的散射辐射与 G_{ND}的比值；G_{dV}/G_{dH}为垂直表面与水平表面入射散射辐射的比值，当 $\cos\theta > 0.2$ 时，

$$G_{dV}/G_{dH} = 0.55 + 0.437\cos\theta + 0.313\cos^2\theta, \tag{4}$$

否则，$G_{dV}/G_{dH} = 0.45$。

非垂直表面上的散射辐射强度：

$$G_{d\theta} = CG_{ND}F_{ws}, \tag{5}$$

式中，$F_{ws} = (1+\cos\alpha)/2$，为研究面对天空的角系数，$\alpha$ 为研究面与水平面的夹角。

（3）反射辐射强度

由地面或者周围环境反射到任意表面的辐射强度为：

$$G_R = \rho_g F_{wg}(\sin\beta + C), \tag{6}$$

式中，$F_{wg} = (1-\cos\alpha)/2$ 为研究表面对地面的角系数；ρ_g为地面或水平面的反射率。

所以，入射到建筑物表面的太阳总辐射为：

$$G_t = G_D + G_{d\theta} + G_R, \tag{7}$$

建筑物表面实际吸收到的太阳辐射强度为：

$$q_s = rG_t, \tag{8}$$

式中，q_s为建筑物表面实际吸收到的太阳辐射强度；r 为研究表面的太阳辐射吸收率。

1.2　对流换热计算理论

箱梁表面与周围空气的对流换热采用牛顿冷却公式计算：

$$q_c = h_c(T - T_a), \tag{9}$$

式中，q_c为对流换热热流密度；h_c为对流换热系数；T 为混凝土表面温度；T_a为大气温度。

1.3　长波辐射计算理论

箱梁表面得到的净长波辐射为：

$$q_r = \varepsilon\sigma[F_{wg}(T_s^4 - T^4) + F_{ws}(T_g^4 - T^4)], \tag{10}$$

式中，q_r为长波辐射热流密度；ε 为混凝土表面长波发射率；σ 为斯忒潘－玻尔兹曼常数，值为 5.67×10^{-8}；T_s为有效天空温度，其值取（$T_a - 6$）[6]；T_g为地表温度。

2　遮蔽效应的实现

在太阳光的照射下，由于混凝土箱梁顶板的遮挡使得部分腹板无法接受到太阳的直射辐射 G_D，只能接受到散射辐射 $G_{d\theta}$和反射辐射 G_R这两部分，为准确地模拟太阳辐射下混凝土箱梁的温度场，应考虑顶板对腹板的遮挡作用，本文基于计算机图形学理论，采用编制的 ANSYS APDL 程序来模拟箱梁顶板对腹板的遮挡。

2.1　求交算法

假设空间射线的起点为（x_0，y_0，z_0），方向为（d_1，d_2，d_3），如图 1 所示，则该射线可表示为：

$$\begin{cases} x = x_0 + td_1 \\ y = y_0 + td_2 \\ z = z_0 + td_3 \end{cases}, \tag{11}$$

假设空间任意一平面，其方程为：

$$ax + by + cz + d = 0, \tag{12}$$

将式（11）代入式（12），并提出参数 t 得：

$$t = -\frac{(ax_0 + by_0 + cz_0 + d)}{ad_1 + bd_2 + cd_3}, \tag{13}$$

当参数 $t>0$ 时，射线与平面相交；$t=0$ 时，射线与平面平行。

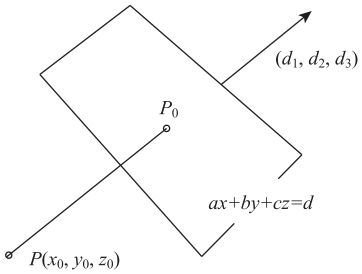

图1 求交运算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intersection algorithm

2.2 叉积算法

通过求交算法只能判断腹板上某点与太阳的连线是否与箱梁顶板同位置的无限大平面相交，但不能判断这个交点是否落在顶板内，只有交点处于顶板内部，才能保证腹板上的研究点被顶板所遮挡[7]，由此本文选用叉积算法来判断交点是否处于顶板角点确定的四边形内部。

假设交点为 P_0，箱梁顶板的角点按顺序排列为 P_1，P_2，P_3，P_4，令 $V_i = P_i - P_0 (i = 1,2,3,4)$，$V_5 = V_1$，如图2所示，若 P_0 处于四边形 $P_1P_2P_3P_4$ 内部，需满足叉积 $V_i \times V_{i+1} (i = 1,2,3,4)$ 符号相同。

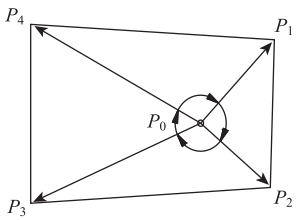

图2 叉积算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross product algorithm

2.3 遮蔽算法验证

根据上述计算机图形学知识，采用 ANSYS APDL 语言对西南走向的箱梁模型，在5月10日11:00时顶板对腹板的遮蔽作用进行了模拟，并使用 AUTO CAD 软件的三维渲染功能对结果进行验证（图3、图4）。通过图3、图4中的阴影可以看出，本文采用的遮蔽算法和编制的相应程序能够有效地模拟箱梁顶板对腹板的遮蔽作用。

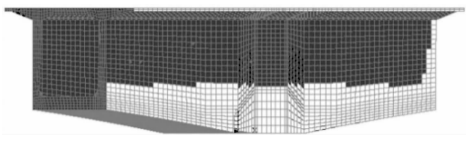

图3 ANSYS 模拟阴影

Fig. 3 Shadow simulated by ANSYS

图4 AUOT CAD 渲染阴影

Fig. 4 Shadow rendered by AUTO CAD

3 混凝土箱梁温度场实例

3.1 工程背景及测点布置

为研究混凝土箱梁温度场分布的一般规律，对某铁路桥梁太阳辐射下的温度场进行了实测。该桥为（60+100+60）m 的连续箱梁桥，主梁采用单箱单室截面，梁高 4.8～7.8 m，顶板宽 11.8 m，厚 45 cm，底板宽 6.7 cm，厚 44～90 cm。桥梁走向为东偏北 45°，测点布置于 0# 与 1# 块交界截面位置（图5）；测点布置截面尺寸及测点布置方式如图6所示，图中括号内的数值为主跨跨中截面尺寸。

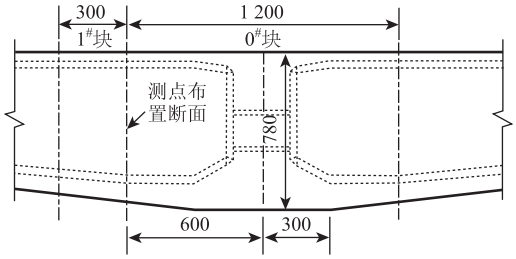

图5 测点布置位置（单位：cm）

Fig. 5 Positions of measuring points (unit: cm)

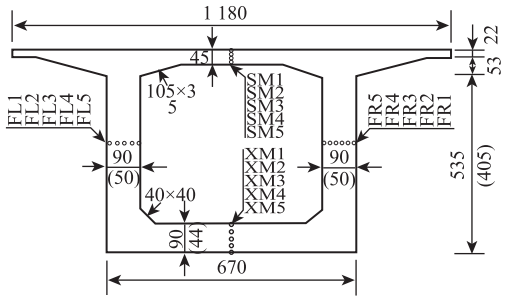

图6 测点布置方式（单位：cm）

Fig. 6 Arrangement of measuring points (unit: cm)

3.2 温度场分析的参数取值

ASHRAE 晴空模型中 A，B，C 这3个参数，采

用文献［8］中根据我国实测数据回归的方程计算；太阳高度角β、方位角可根据桥址的经纬度和地方太阳时等参数，按照文献［9］介绍方法求出；研究面对地表和天空的角系数F_{wg}，F_{wg}利用 ANSYS 内置函数提取各单元的方向余弦求得。测试桥梁横跨高速公路，下垫面为水泥路面，地面反射率ρ_g取 0.10；考虑到测试时天气情况和当地的污染程度，大气清洁度系数C_n取 0.7；由于测试箱梁的混凝土采用整体式钢模板浇注，且表面平整光滑，按文献［10］建议，混凝土表面太阳辐射吸收率r取 0.4；混凝土导热系数、比热容参考文献［11］，分别取 2.33 W/(m·K) 和 960 J/(kg·K)。对流换热系数h_c与风速有关，文献［12］对常用的 4 种计算方法拟合得到平均意义上的混凝土箱梁表面对流换热计算公式：

$$h_c = -0.035v^2 + 3.62v + 4.75, \qquad (14)$$

式中，v为风速，本文采用上式计算箱梁表面的对流换热系数，测试日风速为二级，计算箱梁外表面换热系数时，风速取 4 m/s；箱内空气流动小，计算箱梁内表面换热系数时，风速取为 0。

大气温度T_a和地表温度T_g可表示为随时间变化的正弦函数[13]，本算例根据实测温度极值及其发生时间计算各时刻温度值（图 7）；文献［14］指出箱梁内部气温在一天内变化很小，变化幅度为 1 ~ 2 ℃，设计时可认为保持不变，这与现场实测数据吻合，由此箱梁内部气温采用实测数据平均值 19.2 ℃。

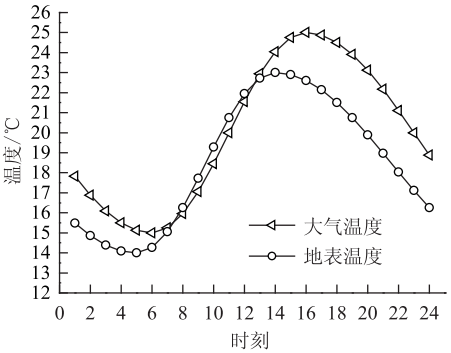

图 7　大气温度T_a及地表温度T_g曲线

Fig. 7　Curves of air and ground surface temperatures

3.3　温度场模拟及结果分析

本文基于 ASHRAE 晴空模型，运用 ANSYS APDL 语言编制了太阳辐射强度的逐时计算程序和遮蔽效应的判别程序，进行了太阳辐射下混凝土箱梁的温度场模拟。箱梁采用 SOLID70 单元模拟，边界条件通过表面效应单元 SURF152 施加。

测试断面混凝土箱梁顶板、腹板和底板的温度随时间的变化如图 8 所示，温度数据提取位置为板宽与板厚的中心位置。

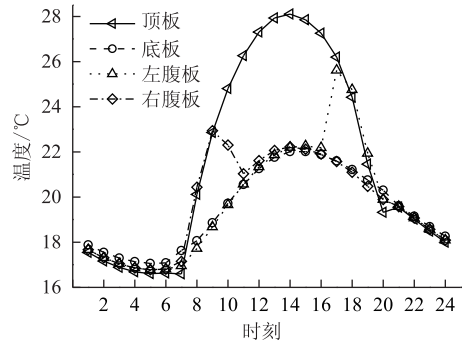

图 8　箱梁典型位置温度时程曲线

Fig. 8　Temperature-time curves of typical position of box girder

从图 8 可以看出：（1）在 8:00 前，由于太阳辐射强度较小，箱梁顶板、底板及腹板温度接近；（2）随着太阳辐射强度的增加，由于受到太阳的直射，顶板的温度迅速上升，与腹板、底板的温差也逐渐增大，在 14:00 时，顶板温度达到最大值，此时它与腹板、底板的温差也最大。相对于顶板，底板、腹板的峰值温度则滞后 1 h 出现，这主要是因为底板下缘会受到地表长波辐射的影响，而在晴朗的日子里，地表最高温度出现时间一般比大气达到最高温度时间要滞后一些；（3）在日落后（20:00 时），箱梁顶、底板与腹板的温差变小，温度趋近，这也说明在晴朗的日子里，顶板与腹板、底板的温差主要是由太阳的直射造成的；（4）东侧腹板的温度在 9:00 时发生了陡降，这是因为 9:00 时前温度提取位置能接受到太阳的直接照射，而随着太阳高度的增加，该位置因顶板遮挡而处于阴影中，由此导致了温度的突然下降。西侧腹板数据提取点在 17:00 时温度的突然增加，则是因为下午太阳高度的减小，之前被顶板遮蔽的位置逐渐进入太阳的直射区域。

混凝土箱梁顶板、底板及腹板部分测点的温度计算值与实测值对比如图 9 所示。

从图 9 可以看出，混凝土箱梁温度场的计算结果与实测数据吻合良好，二者随时间变化趋势基本一致，偏差在 3 ℃以内。偏差产生的原因主要包括：（1）计算误差，太阳辐射强度计算所需参数较多，各参数的取值与实际情况难免存在一定的偏差；（2）测试误差，如测点的实际位置可能与设计存在一定的偏差；（3）由于温度计是绑扎在钢筋上的，而计算与测试都难以考虑钢筋、温度计及混凝土三者的

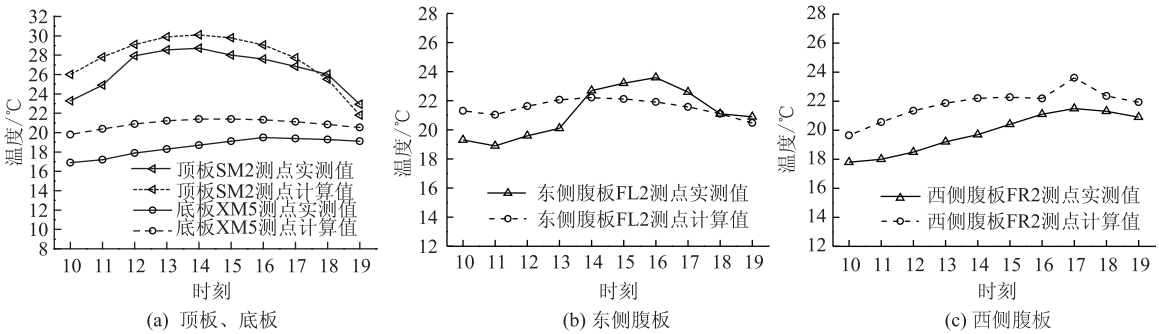

图9 混凝土箱梁温度计算值与理论值对比

Fig. 9 Comparison of calculated and theoretical temperatures of concrete box girder

相互影响，由此也会带来一定的误差。

前文分析了混凝土箱梁顶、底板及腹板温度随时间变化规律，而特定时刻箱梁横向、竖向梯度温度才是局部出现较大温度应力的主要原因，图10～图11给出了部分时刻箱梁横向、竖向的温差分布情况，相关计算参数与3.2节保持一致。

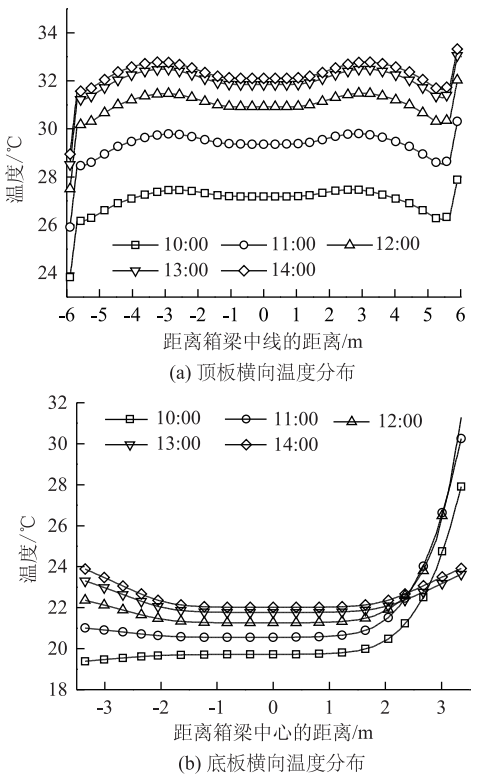

图10 混凝土箱梁横向温度分布

Fig. 10 Temperature transverse distribution of concrete box girder

从图10可以看出：（1）箱梁顶板在翼缘端部及梗腋变厚部分的温差稍大，其余位置基本为一定值，但总体来讲，顶板横向温差较小，且随时间变化较小；（2）在13:00，14:00时，箱梁底板横向温差很小（2 ℃以内），而在10:00～12:00时，底板靠东侧区域存在有较大的温差，达到10 ℃，其余位置温度接近，这主要是由于东侧腹板在午前受到太阳的直射，局部温度高，导致了温度在箱梁横向的差异。

关于箱梁的横向温差，我国铁路桥涵设计规范（TB10002.3－2005）也做出了相应规定，即无论是有碴箱梁，还是无碴箱梁，都应考虑横向温差荷载，而英国BS－5400规范、美国AASHTO规范等，未对此作出规定，就此而言，我国铁路规范考虑得更为全面。

由图11可知，箱梁腹板竖向的温度分布在各时刻都表现出较大的梯度，在13:00时，箱梁顶缘与腹板中的温差达到10.6 ℃，这个差值在腹板以下1 m位置减少为2 ℃，温度梯度较大。对此，我国铁路、公路桥涵设计规范、英国BS－5400规范、美国AASHTO规范等，都进行了相应的规定，只是在温度荷载模式上有所不同。

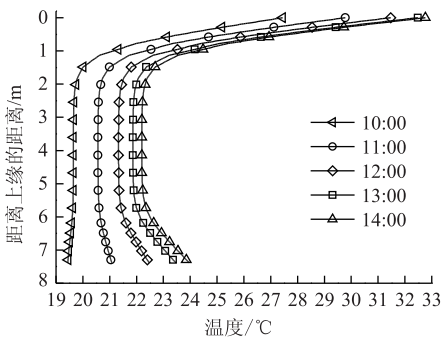

图11 混凝土箱梁竖向温度分布

Fig. 11 Temperature vertical distribution of concrete box girder

从图11还可以看出，腹板中段的温度基本上保持不变，而在腹板底部却存在一定的温差。英国BS－5400规范对此进行了考虑，而我国桥涵规范与美国的AASHTO规范未作相关规定，这可能是因为

此处温差较小，可以忽略，如在 13:00 时，温差不到 2 ℃。

4　混凝土箱梁竖向温差参数分析

当混凝土级配及标号确定后，混凝土箱梁的热物理性质就基本确定。如此，其在太阳辐射作用下的温度分布主要就由风速、大气清洁度、桥梁方位的纬度等参数确定。为研究这些参数对混凝土箱梁竖向温度分布的影响，选取 20 m 等截面箱梁为研究对象，截面尺寸同图 6 括号内数值，计算时间选取为夏至日前后的晴朗日子。需要说明的是：以下各套计算中大气及地表温度数据来源于《中国气象科学数据共享服务网》[15]；相关参数除特殊说明外均同 3.2 节；温度数据提取时间为地方太阳时 14:00 时，温度数据沿腹板中心线路径，从箱梁最上缘到最下缘提取。

4.1　风速的影响

选取南北走向标准箱梁段为研究对象，分别计算风速 $v=0$，2，4，6 m/s 条件下的混凝土箱梁竖向温差情况，如图 12 所示。

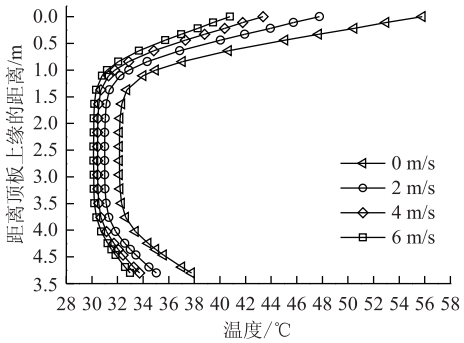

图 12　风速对混凝土箱梁竖向温差的影响

Fig. 12　Influence of wind spend on vertical temperature difference of concrete box girder

从图 12 可见，风速 $v=6$ m/s 时，顶板上缘与离顶板上缘 1 m 位置的温差为 9.6 ℃，而 $v=0$ m/s 时，这一差值就高达 20.8 ℃，为前者的 2 倍多；箱梁底缘与箱梁腹板中部的温差在 $v=0$，6 m/s 的差别很小，仅为 2.8 ℃，由此可见风速对混凝土箱梁顶板的温差影响较大，且风速越小温度梯度就越大，而风速对混凝土底板的影响则较小。

4.2　大气清洁度的影响

从式（1）可知，大气清洁度直接影响着太阳辐射强度，选取大气清洁度 $C_n=0.5\sim1.0$ 的几种情况计算箱梁的温度场，风速取 $v=2$ m/s，箱梁竖向温度结果提取如图 13 所示，其余条件同 4.1 节。

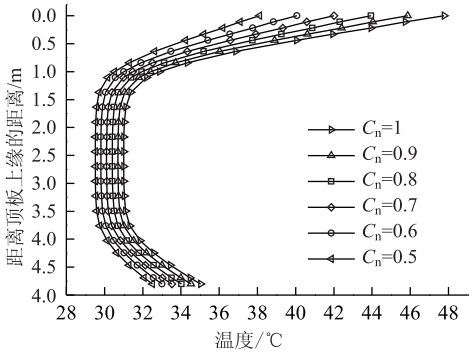

图 13　大气清洁度对混凝土箱梁竖向温差的影响

Fig. 13　Influence of atmospheric cleanliness on vertical temperature difference of concrete box girder

从图 13 可以看出，大气清洁程度对腹板及底板的温度梯度影响不大，而对顶板温度有较大的影响，且大气清洁程度越低，箱梁竖向温度分布越均匀，如 $C_n=1.0$ 时，顶板上缘与离顶缘 1 m 的温差为 14.9 ℃，而当 $C_n=0.5$ 时，这一差值降低为 7.6 ℃，约为前者的 1/2。

4.3　桥梁方位的影响

混凝土箱梁的方位不同，接受太阳照射情况就不同，从而影响到箱梁的温度分布，为研究这方面的影响，规定正北向为 0°方向，角度顺时针旋转为正，计算桥梁走向从 30°～180°变化时混凝土箱梁竖向温差分布情况（图 14），其余条件同 4.2 节。

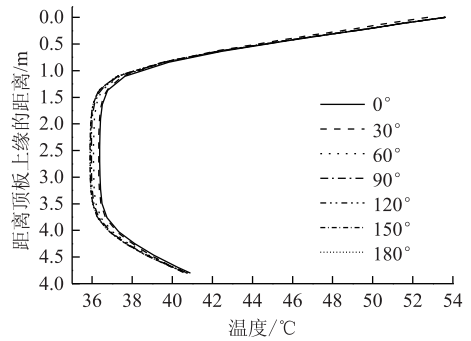

图 14　桥梁方位对混凝土箱梁竖向温差的影响

Fig. 14　Influence of bridge orientation on vertical temperature difference of concrete box girder

从图 14 可以看出，不同的桥梁方位下，顶板和底板的温度分布基本保持不变，仅在腹板有很小的差异，不到 1 ℃，说明桥梁方位对混凝土箱梁的竖向温度分布影响很小。

4.4　纬度的影响

选取广州、长沙、北京这 3 个地区来研究不同的纬度对太阳辐射作用下混凝土箱梁竖向温度的影响，温度提取结果示于图 15。从图 15 中可以发现，

北京、长沙和广州3个纬度对应的温度曲线在形状上基本不变，只在温度基数上发生变化，由此可见，纬度的变化对箱梁竖向温差的影响很小。

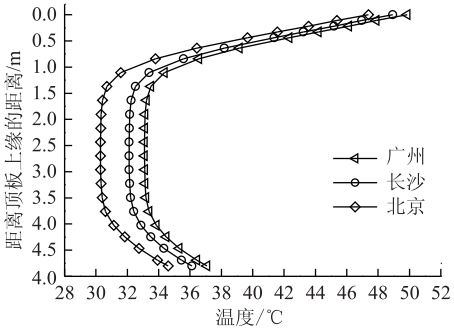

图15 纬度对混凝土箱梁竖向温差的影响

Fig. 15 Influence of latitude on vertical temperature difference of concrete box girder

5 结论

（1）混凝土箱梁温度场模拟结果与实测温度数据差异很小，偏差在3 ℃之内，说明了ASHRAE晴空模型能够有效地运用于太阳辐射作用下混凝土箱梁的温度场分析，也证明了本文编制的顶板对腹板的遮蔽算法的有效性。

（2）在太阳辐射作用下，混凝土箱梁顶板的横向温差较小；箱梁沿腹板中心线竖向温差变化较大，主要表现在顶板和加腋变厚区域内，而腹板中部区段温度分布较为均匀。

（3）底板温度横向差异随时间变化很大，这主要与腹板受太阳照射情况有关，当腹板受到太阳直接照射时，底板端部区域横向温差较大，所以在设计验算时，对翼缘悬臂相对较短的混凝土箱梁，建议考虑底板横向温差对结构的影响。

（4）风速及大气清洁度对混凝土箱梁竖向温差分布影响很大，对于温度效应而言，混凝土箱梁在无风（或微风）的，空气质量好的晴朗日子里最为不利；桥梁方位对混凝土箱梁竖向温度影响很小，不同纬度对应的箱梁竖向温度曲线在形状上基本一致，仅在温度基数上有一定的改变。

参考文献：

References：

[1] 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.

[2] 孙君，李爱群，丁幼亮. 润扬长江大桥钢箱梁的温度分布监测与分析［J］. 公路交通科技，2009，26（8）：94－98.
SUN Jun，LI Ai-qun，DING You-liang. Observation and Research on Temperature Distribution in Steel Box Girders of Runyang Yangtse River Bridge［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2009，26（8）：94－98.

[3] 彭友松，强士中. 混凝土桥梁结构温度自应力计算方法探讨［J］. 西南交通大学学报，2006，41（4）：452－455.
PENG You-song，QIANG Shi-zhong. Investigation into Computational Method of Self-equilibrating Thermal Stresses in Concrete Bridges［J］. Journal of Southwest Jiaotong University，2006，41（4）：452－455.

[4] 顾斌，陈志坚，陈欣迪. 大尺寸混凝土箱梁日照温度场的实测与仿真分析［J］. 中南大学学报：自然科学版，2013，44（3）：1252－1261.
GU Bin，CHEN Zhi-jian，CHEN Xin-di. Measurement and Simulation on Solar Temperature Field of Large Size Concrete Box Girder［J］. Journal of Central South University：Science and Technology Edition，2013，44（3）：1252－1261.

[5] 麦奎斯顿 F C，帕克 J D，斯皮特勒 J D. 供暖、通风及空气调节——分析与设计［M］. 6版. 俞炳丰，译. 北京：化学工业出版社，2005：161－164，197.
MCQUSITION F C，PARKER J D，SPITLER J D. Heating，Ventilating，and Air Conditioning Analysis and Design［M］. 6th ed. YU Bing-feng，translated. Beijing：Chemical Industry Press，2005：161－164，197.

[6] MCCLELLAN T M，PEDERSEN C O. Investigation of Outside Heat Balance Models for Use in a Heat Balance Cooling Load Calculation Procedure［C］// American Society of Heating，Refrigerating and Air-Conditioning Engineers（ASHRAE）Annual Meeting. Boston：American Society of Heating，Refrigerating and Air-Conditioning Engineers，1997.

[7] 赵振宇. 环境温度作用下拱桥温度——结构耦合场问题研究［D］. 西安：长安大学，2011：16－18.
ZHAO Zhen-yu. Study on Thermal-structural Coupled Field of Arch Bridge under Environmental Temperature Action［D］. Xi'an：Chang'an University，2011：16－18.

[8] 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，1998，19（1）：37－40.

LI Jin-ping, SONG Ai-guo. Compare of Clear Day Solar Radiation Model of Beijing and ASHRAE [J]. Journal of Capital Normal University, 1998, 19 (1): 37 - 40.

[9] 王炳忠. 太阳辐射计算讲座 第一讲 太阳能中天文参数的计算 [J]. 太阳能, 1999 (2): 8 - 10.
WANG Bing-zhong. First Lecture of Solar Radiation Calculations: Astronomical Parameters of Solar Energy [J]. Solar Energy, 1999 (2): 8 - 10.

[10] 张建荣，徐向东，刘文燕. 混凝土表面太阳辐射吸收系数测试研究 [J]. 建筑科学, 2006, 22 (1): 42 - 45.
ZHANG Jian-rong, XU Xiang-dong, LIU Wen-yan. A Test Study on the Solar Radiation Absorption Coefficient of Concrete Surface [J]. Building Science, 2006, 22 (1): 42 - 45.

[11] 赵建锋. 大跨度混凝土箱梁桥温度场及其效应研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007: 53 - 54.
ZHAO Jian-feng. Study on Temperature Field and Its Effect of Long-span Concrete Box-girder Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007: 53 - 54.

[12] 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 Key Factors of Temperature Effect of Concrete Box-girder Bridges [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.

[13] GB 50176—93, 民用建筑热工设计规范 [S].
GB 50176—93, Thermal Design Code for Civil Building [S].

[14] HAMBLY E C. Temperature Distributions and Stresses in Concrete Bridges [J]. Structural Engineer, 1978, 56A (5): 143 - 148.

[15] 中国气象科学数据共享服务网. 中国地面国际交换站气候资料日值数据集 [DB/OL]. 2008 (2013 - 01 - 31) [2013 - 04 - 22]. http: //cdc. cma. gov. cn.
China Meteorological Data Sharing Service System. Daily Values of Meteorological Data of China International Ground Exchange Station [DB/OL]. (2013 - 01 - 31) [2013 - 04 - 22]. http: //cdc. cma. gov. cn.

(上接第 45 页)

[11] 王夫亮. 侧风对轿车气动特性影响的数值模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
WANG Fu-liang. Numerical Simulation of Aero Dynamic Characteristics of Passenger Car under Horizontal Wind [D]. Changchun: Jilin University Press, 2005.

[12] 高广军，田红旗，姚松，等. 兰新线强横风对车辆倾覆稳定性的影响 [J]. 铁道学报, 2004, 26 (4): 36 - 40.
GAO Guang-jun, TIAN Hong-qi, YAO Song, et al. Effect of Strong Cross-wind on the Stability of Trains Running on the Lanzhou-Xinjiang Railway Line [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26 (4): 36 - 40.

[13] 姜翠香，梁习锋. 挡风墙高度和设置位置对车辆气动性能的影响 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27 (2): 66 - 70.
JIANG Cui-xiang, LIANG Xi-feng. Effect of the Vehicle Aerodynamic Performance Caused by the Height and Position of Wind-Break Wall [J]. China Railway Science, 2006, 27 (2): 66 - 70.

[14] 梁习锋，田红旗. 列车气动性能评估参数研究 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24 (1): 38 - 41.
LIANG Xi-feng, TIAN Hong-qi. Research on Evaluating Parameters of Train Aerodynamic Performance [J]. China Railway Science, 2003, 24 (1): 38 - 41.

[15] 武青海. 列车空气动力学数值仿真研究 [J]. 中国铁道科学, 2002, 23 (4): 132 - 135.
WU Qing-hai. Numerical Simulation of Aero Dynamic Properties of Train [J]. China Railway Science, 2002, 23 (4): 132 - 135.