

## 日照下波形钢腹板箱梁桥竖向温度分布研究\*

刘阳帆<sup>1</sup>, 钟扬<sup>2</sup>, 樊林杰<sup>1</sup>, 袁以鑫<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.湖南机场管理集团有限公司, 湖南 长沙 410141)

**摘要:** 从日照温度场分布、温度作用模式、参数取值等方面,参考国内外波形钢腹板箱梁桥温度作用研究现状,结合日照辐射模型,考虑太阳辐射、风速、大气温度等因素,提出波形钢腹板箱梁桥竖向温度梯度计算模型;将模型计算所得竖向温度与实测温度、《公路桥涵通用设计规范》中温度梯度模式计算温度进行比较,并采用有限元软件分析竖向温差效应。结果表明,采用文中温度梯度模型计算所得温度与实测温度吻合较好;与规范中温度梯度模式相比,在温差效应影响下,波形钢腹板箱梁桥顶板下缘处产生较大横向拉应力,波形钢腹板箱梁桥设计和施工中应予以重视。

**关键词:** 桥梁;波形钢腹板箱梁桥;竖向温度分布;日照

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)03-0086-04

桥梁处于露天的外界环境中,受太阳辐射等环境因素的影响,桥梁结构会产生较大温度应力。目前对砼桥梁温度效应或温度场的研究较多,但对波形钢腹板箱梁桥温度效应或温度场的研究还不完善。赵品等根据波形钢腹板箱梁桥观测数据,提出了波形钢腹板箱梁温差计算模式。姚晨等通过对波形钢腹板箱梁桥的长期观测,提出了顶板横向正应力温度计算公式。陈中刚等对波形钢腹板箱梁桥横向温度应力进行计算,并与砼箱梁桥进行比较,得出波形钢腹板箱梁桥由温度变化引起的内力变化较小。董旭等对大跨度波形钢腹板箱梁桥进行现场实测,分析其温度效应,提出了温度梯度模式。大部分研究针对某地区的波形钢腹板箱梁桥,温度梯度模式根据测量数据通过拟合确定。该文基于桥梁日照温度场分布,结合适用于波形钢腹板箱梁桥的温度场求解方法,参考国内外箱梁桥温度作用研究现状,研究波形钢腹板箱梁桥竖向温度梯度模式。

## 1 温度场分布特性和求解方法

### 1.1 温度场分布特性

在日照、大气温度、风速等作用下,桥梁内部温度场发生变化。桥梁结构内部热量传递主要取决于材料的导热系数,钢材的导热性好,砼的导热性能比钢材差很多。波形钢腹板箱梁的底板受到的日照时间最短,且处于高空,通风冷却效果很好,是整个箱

梁截面温度最低的位置。地面、水面或大气将太阳辐射反射到箱梁底板底面,导致底板竖向存在一定温差。

### 1.2 温度场的求解方法

实际工程中大都使用指数函数描述截面的竖向温差。文献[8]根据实测数据建立的沿梁高方向的温差分布函数为:

$$T_y = T_0 e^{-ay} \quad (1)$$

式中: $T_0$ 为沿梁高方向的温差; $y$ 为计算点至顶板表面的距离(m); $a$ 为指数,受结构形式等因素的影响。

## 2 竖向温度梯度模式

由于波形钢腹板箱梁桥的材料特性不同及腹板形式的变化,规范中温度梯度模式不一定适用。下面通过对波形钢腹板箱梁桥顶板、波形钢腹板及底板温度的分析,研究其竖向温度梯度分布。

### 2.1 顶板

波形钢腹板箱梁桥顶板为砼结构,温度分布形式与砼梁桥相差无几。主要受太阳辐射的作用,顶板表面温度较高,远离顶板的位置温度迅速降低,顶板的竖向温度可采用式(1)来表达。

#### 2.1.1 顶板竖向温差

无本地区实测数据时,可根据所在地区气象及经纬度等构建理想的经验公式。文献[11]采用逐步

\* 基金项目:湖南省教育厅重点科学研究项目(18A131)

回归法,根据当地气象数据得到箱梁顶部温差预测公式[见式(2)],该公式能较准确地预测不同地区桥梁结构的竖向温差。因此,波形钢腹板箱梁桥顶板竖向温差采用式(2)计算。

$$T_0 = 2.57 + 0.181\Delta T + (0.534I - 0.002691I^2) - (1.32v - 0.208v^2) \quad (2)$$

式中: $T_0$  为顶部温差; $\Delta T$  为日大气温差; $I$  为日最大太阳辐射量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ); $v$  为风速。

太阳辐射强度采用 Hottel 模型计算,根据辛普生法通过积分得到全天水平地面上的太阳辐射能量。

### 2.1.2 指数 $a$ 的取值

大多根据实测数据确定指数  $a$  的取值。若无实测数据,可通过砼梗腋高度  $y_g$  来确定。如图 1 所示, $y_g$  为:

$$y_g = (m + n)/2 \quad (3)$$

式中: $m$  为箱内梗腋转折点到顶板顶面的距离; $n$  为箱外梗腋转折点到顶板顶面的距离。

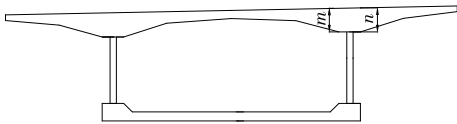


图 1 梗腋示意图

桥面铺装厚度为 0、50 mm、100 mm 时, $a$  可分别通过  $-3.20y_g + 5.66$ 、 $-2.39y_g + 4.88$ 、 $-2.15y_g + 4.30$  计算得到。

## 2.2 波形钢腹板

温度影响需考虑不同材料间的热传递及钢板受热性能与砼板的不同。波形钢腹板的导热性能是砼板的几十倍,其温度变化幅度较小。考虑到波形钢腹板与砼板交界处有热交换发生,其上下翼缘处的温度较低。

在日照作用下,上翼缘存在一定阴影面,不会受到太阳直接辐射。阴影长度通过悬臂长度计算得到,公式如下:

$$B = A \sinh / \sin(\beta - h) \quad (4)$$

式中: $B$  为阴影长度; $A$  为翼缘板长度; $h$  为太阳高度角; $\beta$  为腹板与水平面的夹角。

为便于计算,将波形钢腹板简化为非稳态无内热源的温场。因为波形钢腹板的厚度较小,且导热性能良好,近似认为其仅有竖向温差,横向温度梯度分量为零。热交换过程由傅立叶定律转换得到:

$$q_c + q_r + q_s = -k \partial T / \partial y_n \quad (5)$$

式中: $q_c$  为对流换热热流密度( $\text{W}/\text{m}^2$ ),按式(6)计算; $q_r$  为热辐射换热热流密度( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $q_s$  为太阳辐射换热热流密度( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $k$  为导热系数; $\partial T / \partial y$  为温度梯度在坐标系上的分量; $n_y$  为法线的方向余弦。

$$q_c = h_c (T_a - T_s) \quad (6)$$

式中: $h_c$  为对流热交换系数( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ); $T_a$  为空气的绝对温度; $T_s$  为表面的绝对温度。

$h_c$  的计算公式为:

$$h_c = 6.31v^{0.656} + 3.25e^{-1.91v} \quad (7)$$

在没有大气温度实测数据时,可参考余弦函数,按下式计算空气的绝对温度:

$$T_a = \theta_v + \theta_s \cos[\pi(t/3600 - t_0)/12] \quad (8)$$

式中: $\theta_v$  为日平均气温; $\theta_s$  为日温度变化幅值; $t$  为当日某时刻; $t_0$  为当日气温最大的时刻。

长波热辐射导致的换热热流密度  $q_r$  可通过斯特藩-玻尔兹曼定律表示为:

$$q_r = C_s \epsilon [(\bar{T} + T_a)^4 - (\bar{T} - T_s)^4] \quad (9)$$

式中: $C_s$  为斯特藩-玻尔兹曼常数,约为  $5.667 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ; $\epsilon$  为辐射率,砼的辐射率取 0.88,钢材取 0.4~0.9; $\bar{T}$  为绝对温度 273.15  $^\circ\text{C}$ 。

考虑太阳辐射导致的热交换,太阳辐射换热热流密度  $q_s$  可表示为:

$$q_s = a_t I_t \quad (10)$$

$$I_t = I_a + I_\beta + I_f \quad (11)$$

式中: $a_t$  为太阳辐射吸收系数; $I_a$  为太阳直接辐射; $I_\beta$  为散射辐射; $I_f$  为反射辐射。

散射辐射从天空的各个方向辐射到地球表面,可表示为:

$$I_\beta = 0.5J_0 \sinh \sin^2(\beta/2)(q_a - q_T) \quad (12)$$

式中: $J_0$  为太阳常数, $J_0 = 1367 \text{ W}/\text{m}^2$ ; $\beta$  为腹板与水平面的夹角; $q_a$  为扣除大气吸收的透射系数; $q_T$  为大气总透射系数。

因为桥梁结构一般离地表较近,波形钢腹板箱梁桥会受到反射辐射。反射辐射计算公式为:

$$I_f = 0.5J_0 R \sinh \cos^2(\beta/2)(q_a - q_T) \quad (13)$$

式中: $R$  为反射系数。

将砼顶、底板表面温度作为波形钢腹板的边界条件,结合上述公式,根据热流平衡,桥梁表面热流密度在一段时间后处于相对平衡状态,解平衡方程即可得到任意时刻波形钢腹板表面温度。通过计算各点热流密度并运用傅立叶定律得到各点温度,从而得到波形钢腹板的竖向温度变化。

### 2.3 底板

底板主要受到反射辐射的影响,直接辐射和散射辐射的影响较小,且底板温度远低于砼顶板。在考虑日照作用形成的正温度梯度时,普遍认为桥梁底部存在一定温差,但温差变化较小,根据美国规范 AASH-TO,最大温差在 3℃ 以内,故考虑用线性表示。

底板温度梯度斜率可根据底板下缘温度减去底板上缘温度除以底板高度求得。查阅相关文献及美国、新西兰规范,底板上缘温度梯度接近于零。参考新西兰桥梁规范,波形钢腹板箱梁桥底板上下缘的温差取 1.5℃。

综上,顶板温度分布模式采用指数函数,波形钢腹板与底板的温度分布模式采用线性函数(见图 2),计算公式如下:

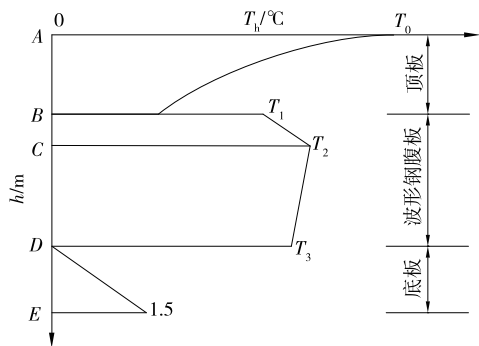


图 2 竖向温度梯度模式

$$T_y = \begin{cases} T_0 e^{-ay}, A \leq y \leq B \\ (y-B)/(T_2-T_1) + T_1, B < y \leq C \\ T_2 - (y-C)/(T_2-T_3), C < y < D \\ 1.5(y-D), D \leq y \leq E \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $T_y$  为沿波形钢腹板高度  $y$  的竖向温度;  $T_0$  为顶板上下缘最大温差值;  $T_1$ 、 $T_3$  分别为波形钢腹板顶面、底面温度;  $T_2$  为波形钢腹板上的最高温度。

### 3 实测温度场对比分析

#### 3.1 工程背景

前山河特大桥主桥跨径布置为 90 m+160 m+90 m,波形钢腹板箱梁桥顶、底板采用 C50 砼,顶板宽度为 15.75 m,设 2% 横坡。采用 1600 型波形钢腹板,板厚 22 mm。跨中截面尺寸见图 3,材料参数见表 1。

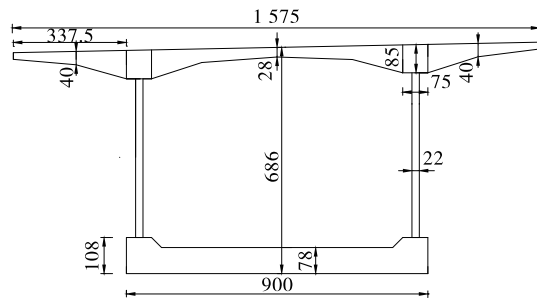


图 3 跨中截面尺寸示意图(单位:cm)

表 1 材料参数

材料名称	弹性模量/GPa	导热系数/ ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	线膨胀系数/ ( $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ )	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	比热容/ ( $\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
C50 钢筋砼	34.5	2.3	1.0	2 550	0.2	900
Q345 钢	206.0	58.2	1.2	7 850	0.3	480

#### 3.2 有限元建模

采用 ANSYS 软件建立箱梁有限元精细化模型(见图 4)。砼顶板、底板选用实体单元 Solid45 模拟,波形钢腹板选用壳单元 Shell93 模拟。壳单元和实体单元连接处采用共节点,主节点为壳单元的节点,考虑自由度设置约束方程形成刚性连接。

在 7 月 23 日 16:00 时对该桥进行温度场测量。依据气象资料,当日大气温差为 7.1℃,风速为 3 m/s。根据太阳直射、散射和地面反射等因素,顶板的温度梯度为  $19.84e^{-2.94y}$ ,计算得到顶板底面温度为 1.63℃。底板顶面温度取零。将两者作为波形钢腹板顶面和底面温度的初始边界条件,计算得其温度梯度为:

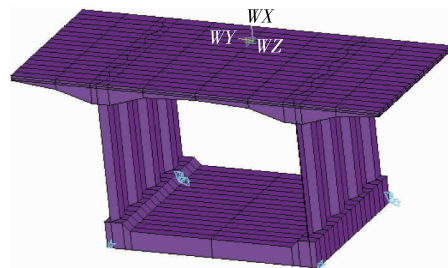


图 4 箱梁空间有限元模型

$$T_y = \begin{cases} 19.84e^{-2.94y}, A \leq y \leq B \\ 2.4(y-B) + 4.8, B < y \leq C \\ 7.2 - 0.61(y-C), C < y < D \\ 1.5(y-D), D \leq y \leq E \end{cases} \quad (15)$$

采用 ANSYS 进行分析,设荷载步时间为 3 600 s。

根据阴影状态判断腹板上是否有太阳直接辐射作用。长波热辐射、太阳辐射和对流采用综合气温、综合热对流系数施加在边界节点上。该桥 16:00 时温度计算结果见图 5,与计算所得竖向温度差值基本一致。

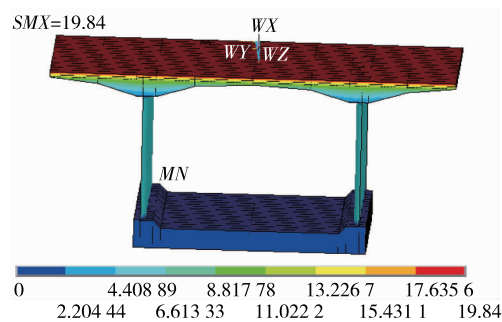


图 5 箱梁 16:00 时温度云图(单位:℃)

3.3 对比分析

将实测温度与按 JTG D60—2015《公路桥涵通用设计规范》温度梯度计算所得竖向温度、采用文中温度梯度计算所得竖向温度进行对比,结果见图 6。

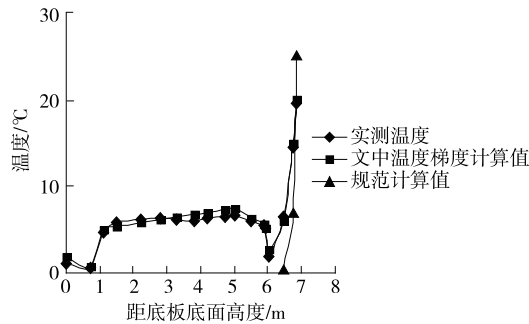


图 6 实测温度与计算温度对比

由图 6 可知:采用文中温度梯度模式计算得到的温度与实测数据非常接近,与规范计算值相比,顶板数值与变化十分相近。虽然《公路桥涵通用设计规范》中温度梯度计算值在顶板上缘与实测温度相差不大,但在波形钢腹板及底板处没有温度变化。而根据实测数据,波形钢腹板与底板处存在一定温度变化,在选取规范中温度梯度模式时应注意这一点。

实际工程中,箱梁顶、底板处易出现裂缝,尤其是顶、底板中轴线上纵向裂缝较多,影响桥梁结构的正常使用。将文中温度梯度模式与《公路桥涵通用设计规范》中温度梯度模式进行横向温度应力对比,结果见表 2。

由表 2 可知:2 种温度梯度模式下横向温度应力作用方向基本一致,且除顶板中轴线下缘横向拉

表 2 不同温度梯度模式下横向温度应力 MPa

温度梯度模式	横向温度应力			
	顶板上缘	顶板下缘	底板上缘	底板下缘
文中模式	-1.217	0.489	-0.141	0.098
规范模式	-1.574	0.257	-0.170	0.113

应力外,采用《公路桥涵设计通用规范》温度梯度模式得到的横向温度应力都比文中温度梯度模式的大。在无实测温度的情况下,采取规范中温度梯度模式进行设计时,应考虑顶板下缘横向温度拉应力。

4 结论

(1) 提出一种在无实测数据的情况下考虑太阳辐射、大气温度的温度梯度模式,算例表明,利用该模式能较精确地计算不同地区的竖向温差,为温度荷载效应计算提供参考。

(2) 波形钢腹板箱梁桥设计时,在无实测温度数据而选用《公路桥涵通用设计规范》中温度梯度模式的情况下,应重视顶板中轴线下缘横向温度拉应力。

参考文献:

[1] 王力,牛思胜,刘世忠,等.新型波形钢腹板组合箱梁桥温度效应研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(8): 2021—2029.

[2] 刘江,刘永健,白永新,等.混凝土箱梁温度梯度模式的地域差异性及分区研究[J].中国公路学报,2020,33(3):73—84.

[3] LEE J H, KALKAN I. Analysis of thermal environmental effects on precast prestressed concrete bridge girders: Temperature differentials and thermal deformations[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(3): 447—459.

[4] 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.

[5] 姚晨,刘冠之,张峰.波形钢腹板箱梁顶板横向温度应力分析[J].山东交通学院学报,2016,24(4):58—63.

[6] 陈中刚,黄浩.波形钢腹板组合箱梁横向温度应力计算分析[J].工程建设与设计,2013(1):133—136+143.

[7] 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.

[8] 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.

由图 13 可知:塔梁同步施工主要影响同步施工的索塔节段位移,对竖向位移有一定影响,但影响不大;对纵桥向位移的影响较大,塔梁同步施工的索塔节段纵桥向位移小于先塔后梁施工的索塔节段,先塔后梁施工时成桥塔顶端纵桥向位移为 69 mm(往边跨侧),塔梁同步施工时为 17 mm(往边跨侧),减小 52 mm。这是由于塔梁同步施工中,斜拉索的张拉使索塔纵桥向往边跨侧移动,而同步施工的索塔节段施工时间较晚,其纵桥向位移累积较少,且越晚同步施工的索塔节段其成桥纵桥向位移越小。

#### 4 结论

(1) 在索塔 3 种施工方案中,方案二和方案三塔肢与中横梁同步施工较方案一塔肢与中横梁异步施工更能有效控制索塔应力,而方案三的主动横撑数量比方案二少,方案三更优。

(2) 塔肢和横梁的施工顺序、横撑位置及所施加主动力大小等发生改变会使索塔的横向位移产生变化,故索塔施工方案需提前确定。如果在施工中发生施工工序较大改变而又没有提前预偏,会给塔柱线形带来不利影响。

(3) 塔梁同步施工对成桥状态下索塔应力、斜拉索索力、主梁应力和线形的影响不大,塔梁同步施工安全可行。但应充分考虑塔梁同步施工作业面交叉可能带来的高空坠物等安全隐患并采取必要的遮挡措施。

(4) 塔梁同步施工对成桥索塔竖向位移的影响较小,对成桥索塔纵桥向位移的影响较大。塔梁同步施工时成桥塔顶端纵桥向位移小于先塔后梁施工时。

#### 参考文献:

- [1] 胡晓东,陈平.甬江铁路斜拉桥索塔塔梁同步施工方法对比分析[J].铁道标准设计,2016,60(2):89—92.
- [2] 严瑾.独塔斜拉桥主塔主动横撑结构计算[J].公路工程,2017,42(3):180—183.
- [3] 卫军,曾志豪,李定有.斜拉桥异型拱塔施工临时横撑方案比选[J].桥梁建设,2017,47(4):113—118.
- [4] 吕长荣,王岩.内倾式斜拉桥桥塔临时横撑施工方案优化应用研究[J].公路,2018(9):105—111.
- [5] 陈明宪.斜拉桥建造技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [6] 王正.带协作跨预应力混凝土斜拉桥裂缝成因分析及防治对策[D].西安:长安大学,2016.
- [7] 张淑坤,张向东,陆启珂.大跨度斜拉桥塔梁同步施工控制技术[J].广西大学学报(自然科学版),2012,37(1):88—93.
- [8] 张玉平.多塔空间索斜拉桥施工控制关键技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [9] 王彬力.不对称独塔斜拉桥塔梁同步施工预测探析[J].公路工程,2017,42(6):165—170+187.
- [10] 熊琦,郭辉,刘爱林,等.矮塔斜拉桥塔梁同步施工可行性分析[J].铁道建筑,2019,59(7):37—41.
- [11] 张永良,刘晨,华峰,等.柴埠大桥塔梁同步施工控制技术[J].公路,2017(5):105—110.
- [12] 顾箭峰,曾祥红.混合梁斜拉桥塔梁同步施工可行性分析[J].桥梁建设,2016,46(1):111—116.
- [13] 曾洋,冯仲仁.混合梁斜拉桥塔梁同步施工中主塔偏位影响因素分析[J].中外公路,2017,37(6):205—209.
- [14] 陶龙,徐国挺,邓亨长,等.赤水河红军大桥门式框架桥塔施工关键技术[J].世界桥梁,2020,48(1):30—34.

收稿日期:2021—03—08

(上接第 89 页)

- [9] 徐向峰,张峰,刘佳琪.波形钢腹板箱梁温度分布[J].重庆交通大学学报,2018,37(12):1—10.
- [10] 廖乾健.波纹钢腹板箱梁桥的温度效应与疲劳性能研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [11] SALLAL R Abid, NILDEN Tayşi, MUSTAFA Özakça. Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders[J].Construction and Building Materials,2016,106:523—532.
- [12] 王毅.预应力混凝土连续箱梁温度作用的观测与分析研究[D].南京:东南大学,2006.
- [13] 姚彬,李国平,陈贤俊,等.混凝土箱梁日照温度效应

研究[J].中国市政工程,2019(4):81—85.

- [14] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [15] 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.
- [16] 张峰,刘佳琪,高磊,等.波形钢腹板 PC 组合箱梁内衬混凝土部位温度分布研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(1):123—133.
- [17] 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.

收稿日期:2021—03—09