

# Study on the Thermal Gradient Effect of the Continuous Curved Box-Girders

Ruifeng Ping<sup>1,2</sup>, Guobin Tang<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Research and Development Center on Bridge Safety Detection & Reinforcement Technology, Ministry of Transport, PRC, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Henan Highway Development CO., LTD. Sanmenxia Branch, Sanmenxia Henan

<sup>3</sup>Henan Transportation Research Institute CO., LTD, Zhengzhou Henan

Email: [tanguobin@foxmail.com](mailto:tanguobin@foxmail.com)

Received: Mar. 5<sup>th</sup>, 2016; accepted: Mar. 20<sup>th</sup>, 2016; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

According to the railway bridge code and highway bridge code, the thermal-structural coupling method was adopted in the research of the thermal gradient effect of the continuous curved box-girders. The results showed that the thermal effect calculated according to the railway code is greater than that calculated according to the highway bridge code except the radial stress. Also the factor impacting on the thermal gradient effect was studied through the calculating of the curved box-girders with different radius according to the high bridge code. It is shown that the radius has a great influence on the vertical deformation, longitudinal stress and support reaction, and the degree of non-uniform bearing performance in curved box-girders is linear with the central angle.

## Keywords

Curved Box-Girder, Thermal Gradient, Thermal Field, Stress Field, Radius

---

# 曲线连续箱梁温度梯度效应研究

平瑞锋<sup>1,2</sup>, 唐国斌<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>公路桥梁安全检测与加固技术交通运输行业研发中心, 河南 郑州

<sup>2</sup>河南高速公路发展有限责任公司三门峡分公司, 河南 三门峡

\*通讯作者。

文章引用: 平瑞锋, 唐国斌. 曲线连续箱梁温度梯度效应研究[J]. 土木工程, 2016, 5(2): 46-52.

<http://dx.doi.org/10.12677/hjce.2016.52006>

<sup>3</sup>河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州  
Email: tangguobin@foxmail.com

收稿日期: 2016年3月5日; 录用日期: 2016年3月20日; 发布日期: 2016年3月28日

## 摘要

参照中国公路桥规和铁路桥规对温度梯度的规定, 利用热-结构耦合分析的方法对连续曲线梁桥温度效应进行分析。结果表明除径向应力外, 依据公路桥规计算的温度效应值均小于铁路桥规计算值。同时对影响曲线箱梁温度效应的参数进行分析, 依据公路桥规对不同曲率半径箱梁的温度梯度效应进行计算, 结果表明温度梯度作用下曲率半径对箱梁竖向变形、纵向应力以及支座反力影响较为显著, 且曲线箱梁受力不均匀程度随圆心角的增大线性增长。

## 关键词

曲线箱梁, 温度梯度, 温度场, 应力场, 曲率半径

## 1. 前言

连续曲线箱梁桥由于能很好地适应地形、地物的限制, 而且线条平顺、流畅、明快, 因而在城市立交、高架桥建设中得到广泛的应用。然而许多曲线箱梁在使用不久就出现病害, 已有研究表明[1], 温度荷载作用是造成箱梁病害的主要因素之一。温度荷载一般可分为日照温度荷载、骤然降温温度荷载和年温度变化荷载三种类型, 大量试验研究表明[2], 变化急剧的短时太阳辐射引起的结构温度变化, 对于混凝土结构的影响比长期缓慢的年气温荷载要大得多。本文主要研究预应力混凝土连续曲线箱梁温度梯度效应, 以一座曲线连续箱梁桥为工程背景, 通过对不同温度梯度模式的计算和分析比较, 研究温度梯度效应对曲线连续箱梁桥受力性能的影响, 并对影响曲线箱梁温度梯度效应的参数进行研究。

## 2. 温度梯度

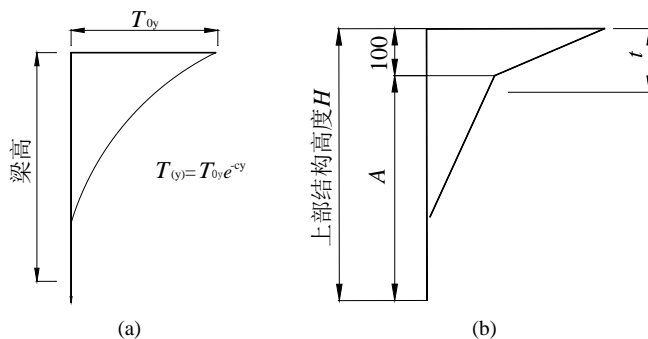
混凝土箱梁在日照作用下, 构件表面和内部的温度, 因对流、辐射、传导等方式形成瞬时不均匀分布状态。由于混凝土的导热系数小, 在外部因素和内部因素的共同作用下, 其温度场变化存在明显的滞后现象, 导致箱梁各部分所得到或者扩散的热量有较大的差异, 从而在箱梁中形成了较大的温度梯度。

欲精确计算混凝土箱梁的温度梯度, 需根据 Fourier 热传导理论, 求得三维非稳定导热方程, 依据相应的边界条件, 利用三维有限元计算。采用这种方法虽然更加符合实际, 但其计算量将十分庞大。事实上对温度梯度的研究, 目前更多采用的方法是半经验半理论法, 通过分析大量的实测资料并结合理论研究, 得出某一地区的温度梯度模式。已有研究表明, 混凝土桥梁沿梁高的温度梯度是非线性分布的, 并与各地的地理、气象条件、结构截面形式、桥面铺装材料以及材料热传导性能等因素有直接关系。关于温度梯度模式及温度设计值, 世界各国都在实践中获得大量的数据和经验, 并在各国规范中得以体现。

大量实测资料表明, 预应力混凝土箱梁桥沿梁高方向的日照温度梯度可简化为指数函数曲线, 因而我国的铁路桥涵设计规范规定[3], 采用图 1(a)温度梯度曲线, 日照温差荷载按下式计算:

$$T(y) = T_{0y} e^{-c_y y} \quad (1)$$

式中:  $T_{0y}$  为箱梁顶、底面温差值,  $c_y$  为指数系数,  $y$  为计算点距箱梁外表面的距离。新西兰桥梁规范对



**Figure 1.** The temperature distribution of the box-girder (size of the unit: mm). (a) The railway bridge code; (b) The highway bridge code

**图 1.** 箱梁竖向温差分布(尺寸单位: mm)。(a) 铁路桥规; (b) 公路桥规

箱梁也采用类似的曲线。

我国的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023-85)中,对整体浇筑的 T 形截面连续梁规定了日照温度梯度模式(桥面板温度变化  $5^{\circ}\text{C}$ )及相应温度力的计算,而对箱梁则未做规定。研究表明[4],采用此种模式计算箱梁温度梯度效应,是偏于不安全的。我国现行的新桥规[5],参考美国 AASHTO 规范的温度梯度曲线,并做出相应修改如图 1(b)所示,该曲线比较简单,计算起来也较为快捷。

### 3. 工程实例

#### 3.1. 桥梁概况

某航道桥引桥为预应力混凝土等截面连续箱梁,其平面布置为圆曲线( $R = 200\text{ m}$ ) + 缓和曲线 + 圆曲线( $R = 150\text{ m}$ ),采用单箱三室截面,其跨径布置为  $5 \times 3 \times 33.1\text{ m}$ ,桥面宽度  $18.5\text{ m}$ ,设计荷载等级为公路-I 级。箱梁顶板厚由支点处  $43\text{ cm}$  变至跨中  $23\text{ cm}$ ,底板厚度由支点处  $42\text{ cm}$  变至跨中  $22\text{ cm}$ 。支座类型为盆式橡胶支座,除墩台内侧为固定支座外,其余均为单向活动支座,沿桥纵向均可自由滑移。

#### 3.2. 计算参数

箱梁温度梯度效应分析是温度场和应力场的耦合分析,不仅要计算由环境、地理位置、几何材料等因素影响的结构温度场,而且还需计算由温度场引起的应力场[6]。本文利用有限元软件提供的热-结构耦合分析功能进行连续曲线梁桥温度效应计算,采用 20 节点等参单元 Solid90 和 Solid95 单元,其中前者具有一个温度自由度,用来进行温度场计算,后者具有三个位移自由度,用来进行结构分析,单元尺寸在  $0.1\sim 0.5\text{ m}$  范围内。箱梁的热传导系数  $2.71\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,线膨胀系数  $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,弹性模量  $3.5 \times 10^5\text{ MPa}$  (图 2)。

#### 3.3. 温度场计算

本文计算的竖向非线性温度梯度分别采用两种模式:模式一采用图 1(b)的梯度分布,其中  $T_1 = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 6.7^{\circ}\text{C}$ ;模式二采用图 1(a)的梯度分布,其中  $T_{0y} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $c_y = 5$ 。通过有限元软件对曲线箱梁的有限元模型进行热分析,可求得箱梁任一位置温度场,图 3 是两种温度梯度计算的箱梁跨中截面温度场。

#### 3.4. 应力场计算

将以上温度场分析的结果作为结构场分析的载荷,实现温度场和应力场的耦合,可计算曲线箱梁的

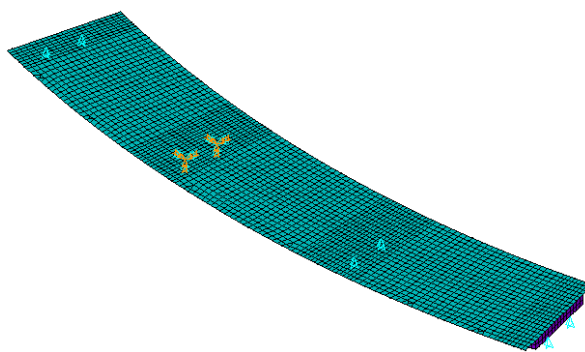


Figure 2. Finite element model

图 2. 有限元模型

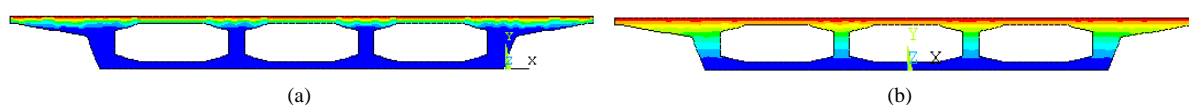


Figure 3. The temperature field of mid-span section of box-girder with different thermal gradient. (a) The highway bridge code; (b) The railway bridge code

图 3. 不同温度梯度箱梁跨中截面温度场。(a) 公路桥规; (b) 铁路桥规

温度效应。为比较两种梯度模式对连续曲线箱梁受力性能的影响,取箱梁底板中点为特征点,分别绘出顺桥向该点的应力和变形分布。

图 4 是特征点纵向应力分布图,从图中可知,两种温度梯度模式计算纵向应力分布一致,在箱梁端部出现压应力,其余部位均为拉应力,并在中跨达到最大值,且基本保持不变。从应力大小来看,模式二计算的纵向应力约为模式一计算值 1.6 倍。

图 5 是特征点径向应力分布图,从图中可知温度梯度作用下,箱梁底板径向承担较小的压应力。从温度应力大小来看,模式一的径向应力大于模式二。径向拉应力主要出现在箱梁横梁、跨中横隔板和顶板下缘,如图 6 所示。根据模式一计算的径向最大拉应力 2.67 MPa 位于箱梁中横梁上,其中箱梁顶板最大拉应力 1.33 MPa,已接近混凝土抗拉强度。根据模式二计算的中横梁上径向最大径向拉应力 0.96 MPa,箱梁顶板径向最大拉应力 0.67 MPa。由此可见,采用公路桥规计算的曲线梁桥径向应力大于铁路桥规。

图 7 是不同温度梯度下曲线箱梁特征点变形图,其中径向位移以向曲梁外侧为正,内侧为负,竖向位移以向下为正,向上为负。从图中可知,模式二计算的位移值均大于模式一的计算值。由图 6(a)可知,两种温度梯度计算的径向位移值均较小,这是由于箱梁所有支座均施加径向约束。由图 6(b)可知,纵向位移在箱梁端部达到最大,且按照模式二计算的最大值约为模式一的 2.7 倍,两种梯度模式计算结果差别较大,这对桥梁伸缩缝设置较为不利。由图 6(c)可知,温度梯度作用将引起较大的竖向变形,两种模式计算最大值分别为 9.25 mm 和 9.36 mm,从变形分布来看,箱梁边跨将向上拱起,这对桥面铺装层受力不利。

综上所述,采用两种温度梯度模式计算的连续弯箱梁的温度效应存在较明显的差别,除径向应力外,依据公路桥规计算的温度效应值均小于铁路桥规计算值。

#### 4. 曲率半径对温度效应影响

曲线箱梁的弯曲程度是影响曲线梁桥受力特性的重要因素,本文依据公路桥规采用的温度梯度,分别计算半径为 100 m、200 m 和 300 m 的连续曲线箱梁,同时为明确曲线箱梁与直线箱梁温度效应的差别,对一连续直线箱梁进行计算,箱梁截面特征同上述分析一致。

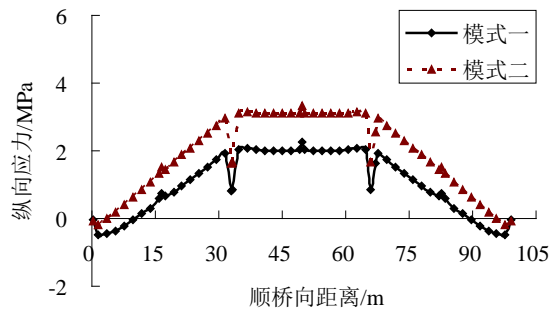


Figure 4. The distribution of longitudinal stress  
图 4. 纵向应力分布图

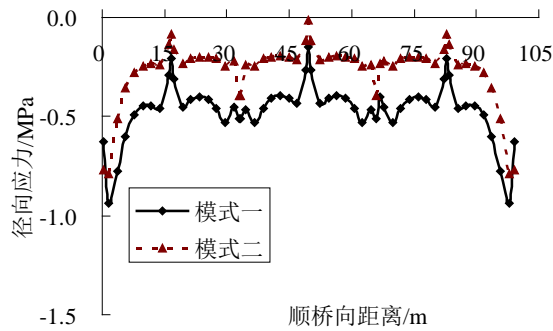


Figure 5. The distribution of radial stress  
图 5. 径向应力分布图

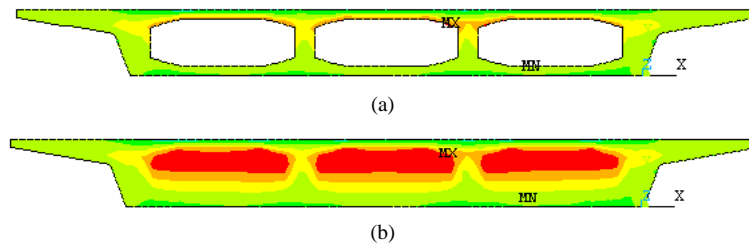


Figure 6. The isoline of radial stress of the box-girder. (a) The mid-span section; (b) The cross beam section  
图 6. 箱梁横断面径向应力等值线图。(a) 跨中截面; (b) 中横梁截面

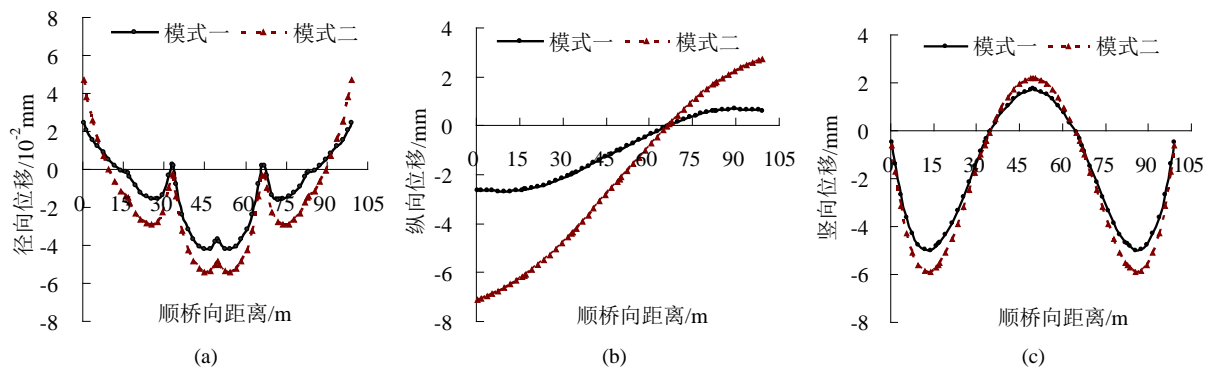


Figure 7. The deformation of the curved box-girder with different thermal gradient. (a) The radial deformation; (b) The longitudinal deformation; (c) The vertical deformation  
图 7. 不同温度梯度曲线箱梁位移图。(a) 径向位移; (b) 纵向位移; (c) 竖向位移

表 1 是不同曲率半径箱梁温度效应计算最大值。其中竖向位移分别取边跨和中跨最大值, 纵向位移分别取桥头和桥尾最大值, 径向位移最大值位于箱梁端部, 径向应力最大值位于桥梁中横梁处, 纵向应力最大值位于箱梁中跨跨中截面。由表可知, 曲率半径对边跨最大竖向位移, 整桥横向位移以及径向应力影响较小, 而对径向位移、中跨竖向位移及纵向应力影响较为明显, 随着曲率半径的减小相应增大, 当曲率半径为 100 m 时, 分别为直线箱梁计算值的 1.18 倍、1.20 倍和 1.25 倍。

表 2 列出不同曲率半径支座反力计算值, 其中竖向反力以负值表示受压, 径向应力以向箱梁内侧为负。由表可知, 温度梯度作用在直线箱梁 1、4 号支座产生压力(超载), 2、3 号支座产生拉力(卸载), 随着曲率半径的减小, 1、4 号墩台外侧支座压力逐渐增大, 内侧压力逐渐减小, 内外侧支座竖向反力相差逐渐加大, 曲线箱梁受力不均匀现象趋于明显。以圆心角表示曲线箱梁弯曲程度, 以支座内外侧变形差反映箱梁受力不均匀程度, 绘出曲线箱梁受力不均匀程度随圆心角变化关系如图 8 所示, 由图可知, 曲线箱梁受力不均匀程度与圆心角成线性关系, 且靠近跨中截面处受力不均匀程度大于其它位置。

Table 1. The worst thermal effect of curved box-girder with different radius

表 1. 不同曲率半径的曲线梁桥温度效应计算最大值

半径	竖向位移/mm		纵向位移/mm		径向位移/mm	径向应力/MPa	纵向应力/MPa
	边	中	桥头	桥尾			
100	-5.51	10.10	2.21	4.60	1.76	2.71	3.23
200	-5.51	9.25	2.13	4.42	1.58	2.67	2.90
300	-5.51	8.73	2.12	4.38	1.55	2.67	2.63
$+\infty$	-5.51	8.43	2.12	4.32	1.49	2.65	2.59

Table 2. The reaction solution of the curved box-girder with different radius

表 2. 不同曲率半径的曲线梁桥支座反力值(单位: kN)

半径	竖向反力				径向反力			
	1 外	1 内	2 外	2 内	1 外	1 内	2 外	2 内
100	-371.8	-67.4	-465.2	904.4	746.7	-508.9	156.3	-422.5
200	-297.7	-146.0	-121.6	565.3	694.6	-574.1	231.2	-354.7
300	-272.7	-171.8	-6.9	451.4	673.3	-597.8	255.4	-331.7
$+\infty$	-222.9	-222.3	220.1	225.1	627.9	-645.0	302.6	-285.5

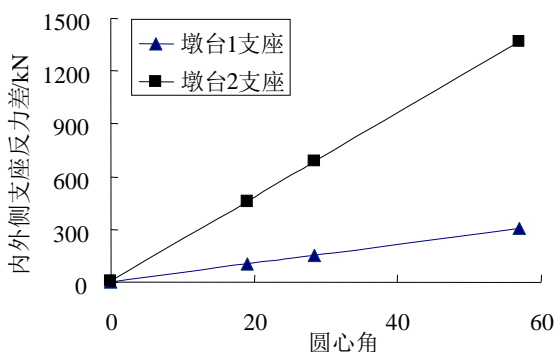


Figure 8. The influence of the central angle on the non-uniform bearing performance

图 8. 圆心角对受力不均匀现象的影响



从表 2 可知, 径向反力的变化趋势与支座位置有关, 随着曲率半径减小, 1 号墩台外侧支座径向反力逐渐增大, 内侧支座反力减小, 而 2 号墩台径向反力变化趋势则与 1 号墩台相反。由此可见, 在曲线箱梁设计时, 应充分考虑不同位置支座由于温变引起的支座反力重分配。

## 5. 结论

1) 对影响桥梁结构温度梯度因素进行分析, 介绍国内通用的两种温度梯度模式, 并借助有限元软件完成曲线箱梁温度场计算。

2) 采用公路桥规和铁路桥规规定的箱梁竖向温度梯度曲线计算的温度效应值有较大的差别。采用前者计算的箱梁径向应力明显大于后者计算结果; 而采用后者计算的箱梁位移约为前者计算结果的 2.7 倍, 计算的纵向应力约为前者计算结果的 1.6 倍。

3) 曲率半径对箱梁温度效应具有显著的影响, 随着半径减小, 箱梁位移和应力逐渐增大, 但应力变化不大。曲率半径对箱梁反力影响较大, 随曲率半径减小, 箱梁内外侧支座竖向反力差逐渐加大, 且反力差的增大通曲线箱梁圆心角约成线性关系。

## 基金项目

河南省科技攻关项目、河南省交通运输科技计划项目资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 凯尔别克. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
- [3] 中铁工程设计咨询集团有限公司. TB10002.3-99 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [4] 王林, 项贻强, 汪劲丰, 等. 各国规范关于混凝土箱梁桥温度应力计算的分析与比较[J]. 公路, 2004(6): 76-79.
- [5] 中交公路规划设计院. JTG D60-2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [6] 项贻强, 唐国斌. 混凝土箱梁桥开裂机理及控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.