

# 钢-混凝土双面组合箱梁日照温度效应研究

苏靖海<sup>1,2</sup>, 段树金<sup>1,3</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院 河北 石家庄 050043; 2. 河北建研科技有限公司 河北 石家庄 050021;  
3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 在自然环境下, 钢-混凝土双面组合箱梁受一天中日照变化的影响, 在梁体内部会产生相应的温度应力和变形。以三跨钢-混凝土双面组合箱梁为研究对象, 对组合梁在 6:00 至 18:00 日照条件下的温度应力与位移进行计算分析。利用有限元软件 ANSYS10.0 建立三跨连续组合箱梁有限元模型, 采用间接耦合解法进行热-结构耦合场的运算。得到了温度应力与温度位移的分布规律及时程分析, 并对箱梁混凝土底板对温度效应的影响进行探讨。

**关键词:** 钢-混凝土双面组合箱梁; 太阳辐射; 温度应力; 位移

**中图分类号:** TU398+.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)04-0011-04

在自然环境中, 组合梁受到不同外界因素的影响。在日照作用下, 梁体温度分布不均匀, 并且由于有外部约束存在, 其内部会有相应的温度应力产生。这些温度产生的应力在某些条件下甚至超过了荷载产生的应力, 与此同时产生的温度变形可能导致混凝土开裂等一系列后果, 对梁体造成严重的危害, 所以对组合梁温度效应的研究是非常必要的。

虽然国内外对普通组合箱梁的温度场和温度效应的研究取得了一定进展<sup>[1-3]</sup>, 但关于钢-混凝土双面组合梁<sup>[4-5]</sup>温度场和温度效应的研究文献却甚为罕见<sup>[6-7]</sup>。

如果温度梯度为非线性变化, 那么截面的变形不能满足平截面假定, 不论结构静定与否, 都会有温度自应力的产生; 在超静定结构中, 由于有多余约束的作用, 阻止了热胀冷缩产生的温度变形, 会产生温度次内力。

本文根据文献[6]所得钢-混凝土双面组合箱梁在日照条件下正负弯矩区截面的温度分布, 应用有限元软件 ANSYS 分别对正负弯矩区不同位置施加不同的温度荷载进行温度效应计算。采用间接耦合解法, 即对于热-结构耦合场的运算, 先进行温度场的计算, 得到结构温度场, 在 ANSYS 中得到 rth 文件, 再将温度场作为体力代入到模型中计算结构的应力场。这种方法需要在运算过程中进行单元的转变, 但对单元的要求有所降低。在温度场计算时, 单元只需温度自由度, 在结构场计算时, 转换为结构单元。其方法与直接耦合解法相比, 各个点的矩阵方程减小了, 运算仅为单场运算, 计算快捷, 在研究和实际工程计算中运用较为广泛。

## 1 有限元模型建立

本文模型与文献[6]相同, 为一座三跨钢-混凝土双面组合连续箱梁桥, 跨度为 45 m + 60 m + 45 m, 位于经度 112.5°, 纬度 28.3°, 梁体径向为正南北方向, 7 月 21 日当天温度为 25 ~ 43.6 °C。经初步计算负弯矩区长度为 25 m, 边跨负弯矩区长度 13 m, 中跨负弯矩区长度 12 m。选取整个梁体的一半进行分析, 模型结构计算简图如图 1 所示。

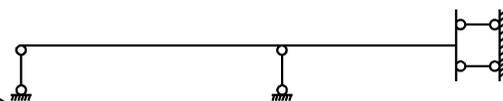


图 1 模型的结构计算简图

收稿日期: 2013-03-07

作者简介: 苏靖海 男 1987 年出生 硕士研究生

基金项目: 河北省科技支撑计划项目(09215625D)

采用 C50 混凝土,弹性模量  $E_c = 3.078 \times 10^4$  MPa,泊松比为  $\nu = 0.2$ ,本构关系采用多线性等向强化模型 MISO 模拟。混凝土顶板与底板均采用双层配筋,配筋率为 0.89%。钢筋采用 HR335 钢筋,其屈服强度  $f_y = 335$  MPa,  $E_s = 2.1 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ 。

钢梁采用 Q345 钢,屈服强度  $f_y = 345$  MPa,弹性模量  $E_s = 2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ ,本构关系采用双线性等向强化模型 BISO 模拟。

在计算温度场时,混凝土和钢梁均采用 SOLID70 单元;在结构分析时,转化为 SOLID65。

本模型中混凝土板与钢梁采用栓钉连接,栓钉直径为  $\Phi 22$ ,每个钢翼板横向设置 8 个栓钉,栓钉纵向间隔约为 300 mm。

采用 Ollgaard 提出的连接件剪力-滑移曲线的模型,其公式为

$$V = V_u (1 - e^{-ns_1})^m \quad (1)$$

式中,  $V_u$  为栓钉的极限承载力;  $S_1$  为栓钉变形量;  $m$ 、 $n$  为模型参数,本文分别采取  $m = 0.4$ 、 $n = 0.702$ 。

在温度场计算时,忽略剪力件的热传导影响。不同材料之间的热传递采用建立热耦合的方法来实现。在结构计算时,剪力件选用非线性弹簧单元 COMBIN39 进行模拟。该单元可以进行轴向和扭转的选择,具有大位移功能。单元本身没有质量和热容量的存在。

根据箱梁的几何尺寸,建立 ANSYS 实体计算模型。双面组合连续箱梁有限元模型如图 2 所示,横截面如图 3 所示。本文采用三维六面体映射网格划分的方法,截面网格划分基本与二维模型相同,纵向单元长度约为 0.3 m。模型单元总数为 38 812 个,节点数为 66 823 个。



图 2 双面组合连续箱梁有限元模型

对实体模型的加载与文献 [6] 平面模型外界环境相同。在三维模型计算中为了减少单元数,减少运算时间,提高计算效



图 3 双面组合连续箱梁横截面有限元模型

率,并模拟实际监测情况,对正、负弯矩区二维平面模型箱内的关键点进行数据提取,作为三维模型箱内的热源进行加载。

三跨连续组合箱梁中跨跨中施加对称约束,其他支座处施加竖向约束。虽然没有横向力的作用(横向的变形是对称的),但是由于实体模型在 ANSYS10.0 的计算中可能会出现很大的横向刚体位移,甚至计算将会由于位移太大而不收敛,所以有必要在支座处增加横向约束。

三维模型采用瞬态法加载。加载方式采用斜坡荷载。每个荷载步的长度为 1 h。在温度场计算时,每个荷载步分为 120 个荷载子步。在结构计算时,每个荷载步分为 12 个荷载子步。

## 2 日照条件下温度效应分析

### 2.1 温度变形分析

通过对三维有限元模型的计算,得到了从 6:00 至 18:00 之间组合梁各节点的位移时程结果,发现不均匀温度场会对组合梁产生很大影响。重点讨论箱梁边跨跨中、中跨跨中及中支座处混凝土板与钢底板温度变形和温度应力的时程反应。

因为忽略了翼缘板对钢腹板的遮挡作用,所以对模型横向的温度加载是对称的,模型  $x$  轴方向的变形也是对称的。模型在 15:00 混凝土翼缘板两边缘达到最大横向位移 0.75 mm。

模型在中跨跨中处设置了对称约束,在支座处并未设置  $z$  方向(纵向)的约束,所以中跨跨中处纵向位移为零。在 16:00 外支座处最大纵向位移达到 1.24 cm。组合梁自上而下位移量有明显的减小。负弯矩区的混凝土底板与钢腹板的变形量要明显小于正弯矩区。混凝土顶板在纵向不断伸长,但由于温度梯度原因,混凝土板上下两侧的伸长量不同,导致自身发生弯曲变形,同时这种作用也发生在钢腹板上。负弯矩区混凝土底板由上到下温度递增,其自由变形应该是下边缘伸长量大于上边缘,对组合梁整体的弯曲变形起到抑制作用。

竖向位移的研究对钢-混凝土双面连续组合梁的起拱度、挠度有重要意义。图 4 与图 5 分别描述了组合梁边跨跨中与中跨跨中的混凝土顶板与钢底板挠度的时间历程。由图 4、图 5 可知,挠度均随温度上升而逐渐增大,至最大值后再逐渐减小,但存在滞后现象。混凝土顶板上下表面挠度的时间历程曲线相差不大,而钢底板的挠度均大于混凝土顶板。在 10:00 时,边跨跨中的混凝土顶板上下表面达到最大挠度 3.8 mm;而钢底板在 12:00 达到最大挠度 5.16 mm。中跨跨中处混凝土顶板上下表面及钢底板的挠度均在 15:00 达到极值,挠度分别为 6.8 mm 与 8.3 mm。

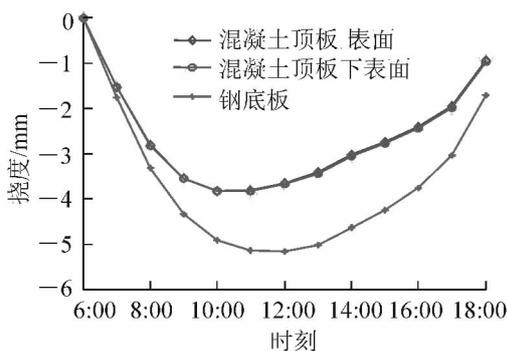


图 4 边跨跨中挠度的时间历程

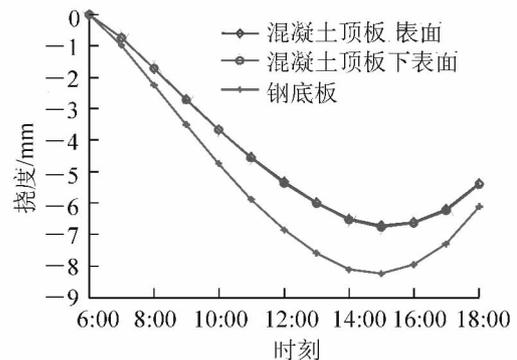


图 5 中跨跨中挠度的时间历程

## 2.2 温度应力分析

由于横向与竖向温度应力对结构产生影响较小,所以本文仅考虑纵向温度应力产生的影响。边跨跨中、中跨跨中处混凝土顶板上、下表面及钢底板纵向温度应力的时间历程分别如图 6 与图 7 所示。混凝土顶板上、下表面纵向温度应力的发展趋势相反,并由上而下应力值逐渐减小。在日照条件下,混凝土顶板上表面的伸长由于受到混凝土板材料自身的约束,压应力随着温度的升高而逐渐增大;并在达到最大值后随温度下降而逐渐减小。钢底板的温度纵向应力的发展随温度变化较为迅速,在 10:00 达到最大纵向压应力。

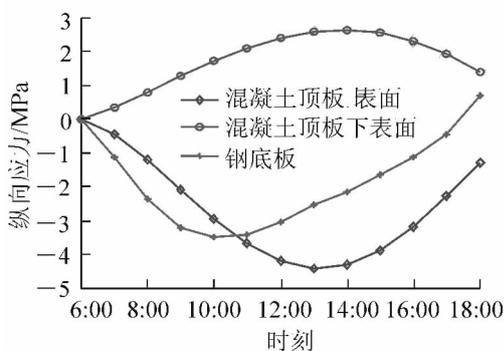


图 6 边跨跨中纵向应力时间历程

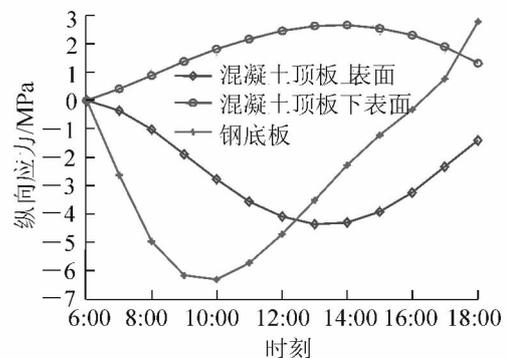


图 7 中跨跨中纵向应力时间历程

中支座处混凝土顶板上、下表面与混凝土底板上、下表面的纵向温度应力时间历程如图 8 所示。混凝土顶板上、下表面纵向温度应力的时间历程与边跨跨中相似。混凝土底板受温度影响明显小于顶板,其温度梯度较小,温度应力的变化趋势也较为缓和,其变形也相对滞后于钢腹板。混凝土底板下表面受压,说明对双面组合箱梁整体的温度弯曲变形起到了一定的抑制作用。

### 3 结束语

(1) 通过对三跨钢-混凝土双面组合连续箱梁在日照条件下的有限元分析计算,得到了 6:00 至 18:00 组合梁温度变形与温度应力的时间历程,可供双面组合连续梁桥设计计算参考。

(2) 混凝土底板对组合梁的变形具有一定的抑制作用,但温度应力在某些部位仍然较大,所以应当重视组合箱梁温度效应对结构安全的影响。

(3) 连续梁支座的摩阻会对结构日照温度效应产生影响,本文未予考虑。

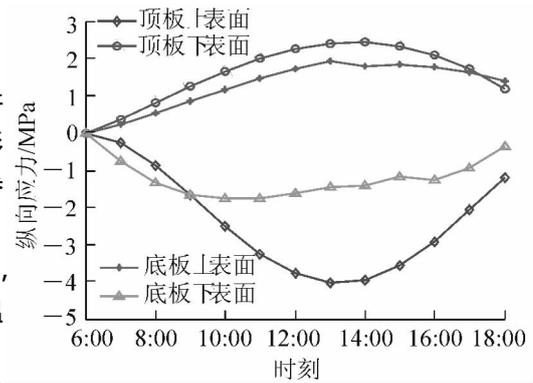


图 8 中支座处混凝土板纵向应力的时间历程

### 参 考 文 献

- [1] 郑学军. 钢-砼组合结构中的温度效应[J]. 长沙铁道学院学报, 1997, 15(4): 88-95.
- [2] 杨虹, 李丽芬, 罗旗帜. 用七自由度单元对钢-混凝土组合梁考虑滑移及温度的应力分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2004, 2(3): 11-15.
- [3] 张药. 钢箱-混凝土组合梁的温度变形分析[J]. 四川建筑, 2010, 30(2): 161-163.
- [4] Reiner Saul. Bridges with Double Composite Action [J]. Structural Engineering International, 1996(1): 32-36.
- [5] 段树金, 霍军会, 安蕊梅. 钢-混凝土双面组合连续梁承载能力研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(5): 82-87.
- [6] 苏靖海, 段树金. 钢-混凝土双面组合连续箱梁日照温度场研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2012, 25(2): 6-10, 80.
- [7] 苏靖海. 钢-混凝土双面组合连续箱梁温度效应研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学土木工程学院, 2012.

## Study of Temperature Effects of Double Steel-concrete Composite Box Girder by Solar Radiation

Su Jinghai<sup>1,2</sup>, Duan Shujin<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Jianyan Technology Company, Shijiazhuang 050021, China;

3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In the natural environment, temperature stresses and flexure will occur in the double steel-concrete composite box girder from the change of sunshine during daytime. In this paper, with a double steel-concrete composite three-span continuous box girder as an example, temperature stresses and flexure are calculated and analysed in the action of the sunlight during 6:00-18:00. A modal of a double steel-concrete composite three-span continuous box girder is built by the finite element program ANSYS. The thermal-structure coupled field is calculated using indirect coupling approach. The regularities of distribution and time-procedure analysis of the flexure and stress are derived. The effect of the bottom concrete slab is also investigated.

**Key words:** double steel-concrete composite box girder; solar radiation; temperature stress; displacement  
(责任编辑 刘宪福)