

# Study on Temperature Field of Prestressed Concrete Box Girder under Fire

Xuanfu Wang<sup>1</sup>, Zili Liu<sup>2\*</sup>, Fan Li<sup>1</sup>, Peipei Li<sup>1</sup>, Zairong Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>China Construction Science & Technology Co. Ltd., Guizhou Branch, Guiyang Guizhou

Email: \*1303612970@qq.com

Received: Sep. 4<sup>th</sup>, 2019; accepted: Sep. 18<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 25<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

Due to the high temperature effect on the bottom plate of the prestressed box girder, the temperature of the bottom surface of the box girder rises sharply and is conducted to the interior of the box. The concrete itself is affected by various factors such as sand, stone and mix ratio, thus transferring heat. The temperature field distribution inside the concrete is not uniform, and finally the mechanical properties of each material are different under different fire time. In this paper, the finite element software ANSYS is used to analyze the temperature field of concrete, ordinary steel bars and prestressed steel beams in the box girder for 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 90 min and 120 min. Finally, with the increase of the extension time, the temperature stratification of the concrete floor occurs, and the thickness of the high temperature layer decreases with the distance from the fire surface to the layer. According to the temperature of the prestressed steel bundle and ordinary steel, the temperature changes with the fire time. The temperature field changes and distribution patterns at different times are summarized.

## Keywords

Finite Element, Temperature Field, Heat Conduction

# 火灾下预应力混凝土箱梁温度场研究

王选富<sup>1</sup>, 刘子利<sup>2\*</sup>, 李 凡<sup>1</sup>, 厉佩佩<sup>1</sup>, 杨再荣<sup>1</sup>

<sup>1</sup>贵州大学, 土木工程学院, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>中建科技有限公司贵州分公司, 贵州 贵阳

Email: \*1303612970@qq.com

收稿日期: 2019年9月4日; 录用日期: 2019年9月18日; 发布日期: 2019年9月25日

\*通讯作者。

文章引用: 王选富, 刘子利, 李凡, 厉佩佩, 杨再荣. 火灾下预应力混凝土箱梁温度场研究[J]. 土木工程, 2019, 8(7): 1229-1236. DOI: 10.12677/hjce.2019.87143

## 摘 要

由于预应力箱梁底板受到高温作用,箱梁底面温度急剧上升并向箱室内部传导,而混凝土本身由于受沙、石、配合比等多种因素的影响的不均匀性,从而传热导致混凝土内部温度场分布不均匀,最终各材料的力学性能在不同的延火时间下出现差异。本文通过有限元软件ANSYS对混凝土、普通钢筋、预应力钢束在箱梁底板延火10 min、20 min、30 min、60 min、90 min、120 min时的温度场进行分析。最终得出随着延火时间的增加,混凝土底板出现温度分层现象,高温层厚度随距受火面由近到远逐层递减。根据预应力钢束和普通钢筋的温度随受火时间的变化,总结出不同时间的温度场变化情况及分布规律。

## 关键词

有限元, 温度场, 热传导

Copyright © 2019 by author(s) 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

## 1. 引言

随着科技的发展,桥梁的结构形式越来越多变,桥梁的跨径也越来越大,同时,桥上车辆装载量也不断在刷新记录,这不仅要求桥梁跨径不断变大的同时,更要求其具有更大承载能力。桥梁发展过程中,结构简单、受力明确的桥梁更加得到广泛的应用,然而桥梁事故也层出不穷,严重威胁人们的生命安全,给国家造成巨大经济损失。其中桥梁火灾更是无法预测,据统计在桥梁事故中,桥梁火灾事故占据 2.9% [1],火灾后桥梁的灾后评估工作极其重要,对烧损程度的正确认识及剩余承载力[2]的把握是减小经济损失和防止二次事故发生的关键所在。因对实桥进行受火试验分析成本高昂,软件仿真分析不仅很好解决这个问题,分析结果具有很大的参考价值[3]。

## 2. 材料的热工程参数及温升曲线

### 2.1. 材料的热工程参数

混凝土的导热系数  $\lambda_c$  是在稳定热条件下,在单位厚度材料两侧表面温差为 1 度时,单位时间内通过单位面积的热量,本文通过表达式(1)选取混凝土的热传导系数[4]。

$$\lambda_c = \begin{cases} 1.355 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 293^\circ\text{C} \\ 1.7162 - 0.001241T & T > 293^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_c$  式——温度场中混凝土的热传导系数。

$T$  为混凝土温度。

混凝土高温下比热容随温度变化表达式(2)

$$c = 840 + 494 \times \left( \frac{T}{10} \right) \quad (2)$$

高温下钢材的热传导系数随温度变化表达式(3)

$$\lambda_s = \begin{cases} 48 - 0.022T & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C} \\ 28.2 & T > 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

高温下钢材比热容随温度变化表达式(4)

$$C_s = 38 \times 10^{-5} T^2 + 20 \times 10^{-2} T + 470 \quad (4)$$

## 2.2. 升温曲线的选取

火灾下预应力混凝土箱梁底面的温度变化受多种因素的影响,其中有燃烧物的性质、数量、通风条件、受火时间等综合因素的影响。因此想要准确模拟结构受火是极为困难的。国内外学者在研究结构抗火时提出了很多温度-时间曲线,即升温模式曲线,主要有国际升温曲线 ISO-834, HCM, HC, ASTM-E119 [5]等,各升温曲线介绍如下:

标准升温曲线 ISO-834 公式:

$$T = 345 \lg(8t+1) + T_0$$

式中  $T$  为任意时间延火温度;  $T_0$  为初始温度;  $t$  为延火时间。

ASTM-E119 升温曲线公式:

$$T = 750 \left[ 1 - e^{\left( -3.79553 \sqrt{\frac{t}{60}} \right)} \right] + 170.1 \sqrt{\frac{t}{60}} + T_0$$

$$T = 1166 - 532e^{-0.01t} + 186e^{-0.05t} - 820e^{-0.2t} + T_0$$

式中符号的意义同前。

HC 升温曲线表达式:

$$T = 1080 \left( 1 - 0.325e^{-\frac{t}{6}} - 0.675e^{-2.5t} \right) + T_0$$

式中符号的意义同前。

HCM 升温曲线表达式如下:

$$T = 1296 \left( 1 - 0.325e^{-\frac{t}{6}} - 0.675e^{-2.5t} \right) + T_0$$

各升温曲线比较见图 1:

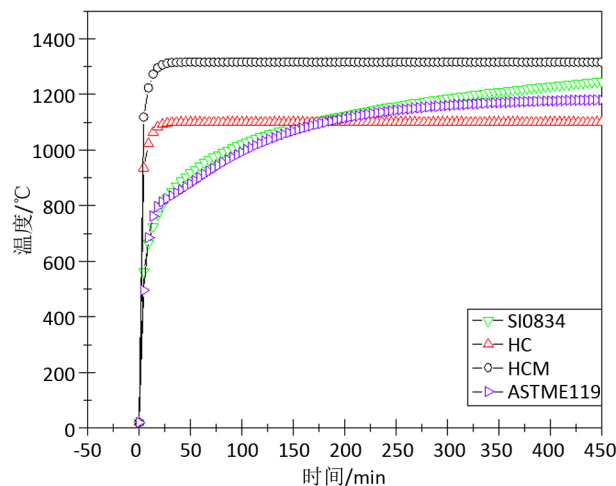


Figure 1. Comparison of temperature rise curves  
图 1. 升温曲线比较

图 1 为温升曲线比较图,横轴为延火时间,纵轴为升高的温度,由图中可看出 SIO834 和 ASTM E119 温升曲线比较接近,150 分钟内较 HC、HCM 曲线升温相对 HC、HCM 缓慢,150 分钟以后温度继续上升趋缓于 1200℃,HC、HCM 曲线升温剧烈,20 分钟内 HC 曲线就达到 1100℃,HCM 达到 1300℃。由于箱梁底部的火焰温度跟燃烧物的不同而存在升温差异极为明显,如泡沫、木板等燃烧物烧热的温度和汽油、车辆燃烧所产生的温度有一定的差异。本文采用国际升温曲线 ISO-834 模拟箱梁底部火源。

### 3. 温度场分析

温度场中混凝土采用 solid70 温度单元进行模拟,solid70 单元为 3D 热实体六面体单元,具有三个方向的热传导能力,具有 8 个节点且每个节点具有一个温度自由度。可用于三维静态或瞬态热分析。箱梁模型网格划分采用扫掠网格,网格尺寸为 0.2 m,如图 2 截面尺寸,图 3 为四分之一网格划分模型。

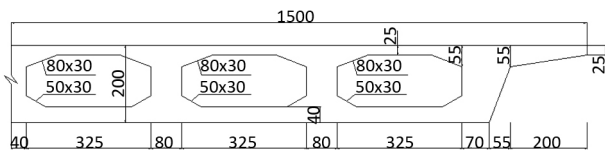


Figure 2. Sectional dimensions of concrete box girder  
图 2. 预应力混凝土箱梁截面尺寸

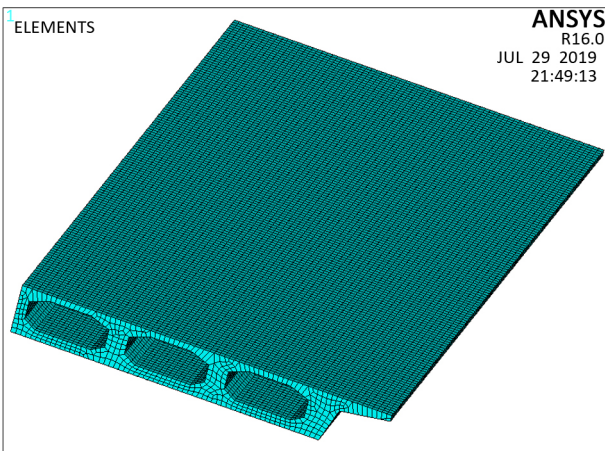


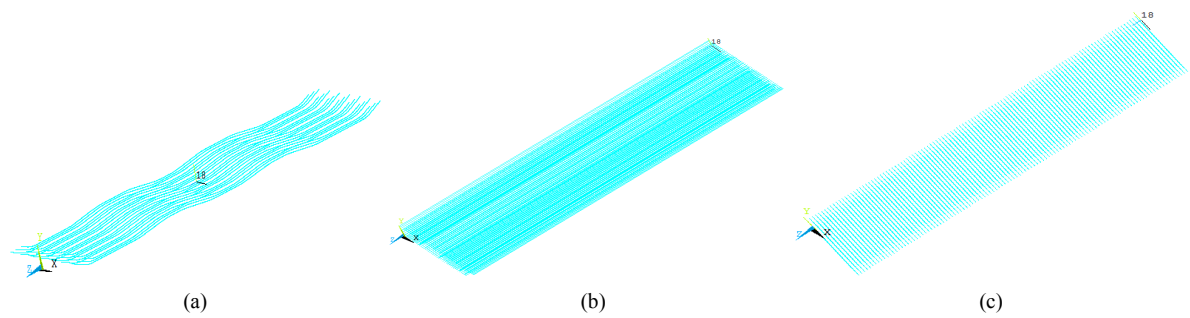
Figure 3. Quarter finite element model  
图 3. 四分之一有限元模型

Ansys 中模拟预应力混凝土钢筋时,一般有两种方法,实体钢筋法和等效荷载法,本文采用实体钢筋法进行分离式建模,温度场中钢筋单元采用三维热传导杆单元 link33 进行模拟,它是一个用于节点间热传导单轴单元且单元的每个节点只有一个温度自由度,钢筋单元的网格划分尺寸为 0.2 m,模型如图 4。

本文通过第一跨箱梁底面全截面受火工况,采用瞬态热分析的方法提取 SIO834 升温模式下混凝土、普通钢筋、预应力钢束的温度场进行分析。

前处理:根据桥型选取预应力钢筋混凝土箱梁截面相关尺寸数据,通过研究选取出混凝土和钢筋材料高温下的热传导系数、比热、线密度、热膨胀系数等热工参数,划分网格,通过\*GET 命令得到钢筋材料和混凝土材料的节点,使用 CEINTF 命令进行节点约束,从而保证温度荷载的传递。

求解:定义瞬态分析类型,定义荷载步总时间为 120 分钟,时间步长为 10 分钟,初始温度 20℃。通过 ASEL 和 NSEL 命令选择受火面上的所有节点,在节点上施加对流和辐射边界条件,求解温度场。

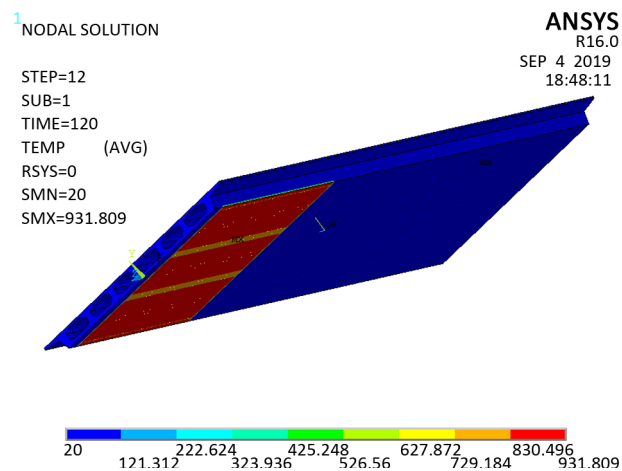


**Figure 4.** (a) Prestressed steel bundle; (b) Ordinary longitudinal reinforcement; (c) Ordinary stirrup  
**图 4.** (a) 预应力钢束; (b) 普通纵筋; (c) 普通箍筋

后处理：通过通用后处理 post1 选取延火时间为 10 分钟、20 分钟、30 分钟、60 分钟、90 分钟、120 分钟的混凝土、钢筋、预应力钢束温度场分布情况。

### 3.1. 混凝土温度场

本文选取第一跨箱梁底板全截面受火 10 分钟，20 分钟，30 分钟，60 分钟，90 分钟，120 分钟进行温度场分析，图 5 为混凝土温度云图。



**Figure 5.** Concrete temperature cloud map  
**图 5.** 混凝土温度云图

SIO834 升温模式下延火 10 分钟箱梁底部表面最高温度达到 154℃，延火 20 分钟时最高温度达到 285℃，高温区域由梁底部向内扩展，延火 30 分钟时梁底最高温度达到 402℃，箱室底面出现温度分层现象，高温向箱室内传导，高温区域逐渐增大；延火 60 分钟时箱梁底面温度达到 662℃，延火 90 分钟时箱梁底面温度达到 819℃，延火 120 分钟时箱梁底面温度达到 931℃，随着延火时间的增加，箱梁的最高温度也不断在上升，延火前 60 分钟温度上升比较迅速，60 分钟后温度也在上升，但相对比较平缓。延火 30 分钟时，箱梁底面出现温度分层现象，高温层距受火面最近，往箱室内温度层温度逐层递减。延火时间越长，温度分层现象越明显。

### 3.2. 预应力钢束温度场

第一跨底板全截面受火，选取跨中截面作为钢筋温度布设点，如图 6，字母 c 为预应力钢束 N1，字母 d 为预应力钢束 N2，字母 e 为预应力钢束 N3，字母 a 为箱梁底板纵向普通钢筋，字母 b 为箱室下层

纵向普通钢筋，预应力钢束温度云图见图 7。

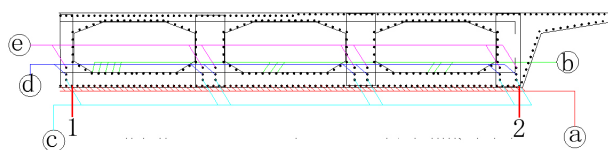


Figure 6. Rebar temperature layout points

图 6. 钢筋温度布设点

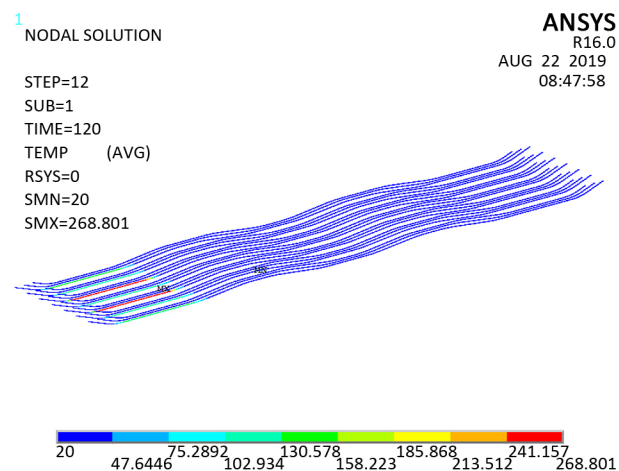


Figure 7. Prestressed steel temperature map

图 7. 预应力钢筋温度云图

随着延火时间增加，钢束 N1 延火 10 分钟预应力钢束的最高温度为 39℃，20 分钟为 62℃，30 分钟为 85℃，60 分钟为 154℃，90 分钟为 216℃，120 分钟为 268℃；钢束 N2 延火 10 分钟预应力钢束的最高温度为 22℃，30 分钟为 65℃，60 分钟为 124℃，120 分钟为 213℃；钢束 N3 延火 10 分钟温度 20℃，延火 60 分钟温度为 26℃，延火 120 分钟钢束温度为 38℃，同一延火时间钢束 N1、N2、N3 温度依次递减，因纵弯影响，预应力钢束跨中距受火面最近，保护层厚度最薄，钢束保护层厚度由跨中向两端逐渐变厚，钢束温度也越来越低；在 N1、N2、N3 钢束中，直线部分钢束温度最高，高温分布范围最大。

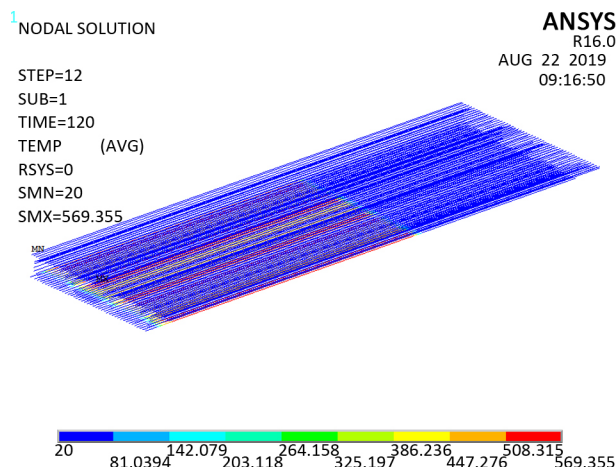


Figure 8. Rebar temperature cloud map

图 8. 钢筋温度云图



### 3.3. 普通钢筋温度场

图 8 为普通钢筋的温度云图, 钢筋 a 处延火 10 分钟钢筋的最大温度为 72℃, 延火 20 分钟混凝土钢筋的最大温度为 132℃, 延火 30 分钟钢筋温度为 190℃, 60 分钟后温度为 346℃, 90 分钟时温度达到 465℃, 120 分钟钢筋温度为 569℃; b 处钢筋延火 10 分钟温度为 25℃, 30 分钟温度为 72℃, 60 分钟温度达到 134℃, 120 分钟温度为 231℃。b 处钢筋由于保护层厚度大于钢筋 a 处, 同一时间节点 b 处钢筋温度明显低于钢筋 a 处; 延火中心区域钢筋由于温度场叠加和传热的影响, a 处钢筋测点 1 温度随延火时间增加较测点 2 处温度稍高。如图 9, 绿线为测点 1 温度时程曲线, 红线为测点 2 温度时程曲线。

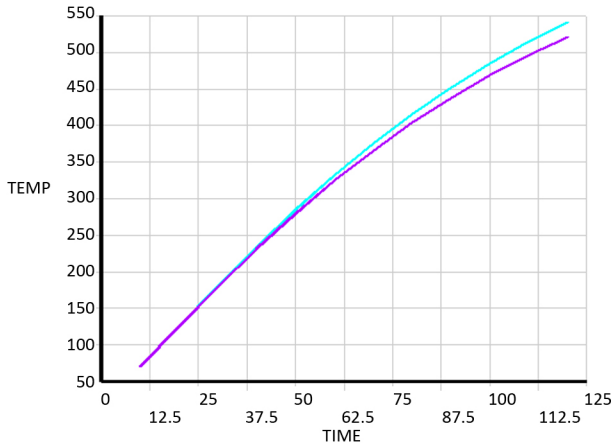


Figure 9. Temperature versus time curve of measuring points 1 and 2

图 9. 测点 1、2 温度随时间变化关系曲线

## 4. 结论

1) 预应力混凝土箱梁梁底在火灾作用下, 箱梁底部受火区域温度急剧升高, 随着受火时间延长至 30 min 时, 混凝土最高温度达到 402℃, 当延火时间为 60 min 时, 混凝土底板温度达到 662℃, 延火 120 min 时温度达到 931℃。随着延火时间延长混凝土高温迅速向箱梁内部传递, 箱梁底板温度场沿厚度方向出现明显的温度分层现象, 距离受火面越近高温影响层越厚, 距离受火面越远温度影响层越薄。

2) 预应力混凝土箱梁底板受火, 钢束温度随着底部受火时间的增加而不断升高, 钢束 N1 延火 60 min 钢筋温度达到 346℃, 延火 120 min 时温度达到 569℃。由于保护层厚度的影响, 钢束 N3 温度小于钢束 N2 的温度, 延火 60 分钟, 钢束 N2 温度为 124℃, 钢束 N3 为 26℃; 延火 120 分钟, 钢束 N2 温度为 213℃, 钢束 N3 为 38℃。钢束高温区域分布在跨中钢束直线部分, 其余温度较低, 钢束向两端逐渐弯起温度逐渐降低, 弯起角度越大, 温度下降越剧烈。

3) 混凝土普通钢筋由于底板受火 a 处钢筋温度剧烈上升, 延火 30 分钟温度接近 200℃, 60 分钟温度为 346℃, 60 分钟为 569℃, a 处钢筋温度明显高于 b 处钢筋温度, b 处钢筋延火 60 分钟温度为 134℃, 120 分钟温度为 231℃, 随延火时间增加, 箍筋温度沿顶板方向呈现出明显的温度梯度; 同一横截面上, 中心受火区域温度较高于边上受火区域温度。

## 参考文献

- [1] 刘美铭. 桥梁事故分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [2] 梁岩, 毛瑞敏, 冯冠杰, 班亚云. 桥梁火灾后力学性能退化研究[J]. 公路, 2017(10): U445.72.

- [3] 刘其伟, 王成明, 罗文林. 预应力空心板梁火灾仿真分析与评估[J]. 公路, 2014(1): U44-U75.
- [4] 侯伟. 预应力混凝土箱梁箱梁结构抗火性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [5] Kodur, V.K.R. and Dwaikat, M.B. (2007) Performance-Based Fire Safety Design of Reinforced Concrete Beams. *Journal of Fire Protection Engineering*, **17**, 293. <https://doi.org/10.1177/1042391507077198>