

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230911001

# 受火预应力混凝土箱梁桥温度场数值模拟分析\*

刘旭政<sup>1,2</sup>, 余晨曦<sup>1,3</sup>, 饶文真<sup>1</sup>, 刘嘉奕<sup>1</sup>, 郑尚敏<sup>1</sup>, 吴刚<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 福建省交通科研院所有限公司, 福建 福州 350004)

**摘要:** 火灾下桥梁内部温度场随着时间与空间的变化规律是研究火灾作用下桥梁结构安全及抗火性能研究的基础。以一座实际受火预应力箱梁桥为例, 采用火灾动力学软件FDS重构桥梁火灾场景, 研究火灾作用下预应力箱梁表面温度分布规律。通过有限元软件ANSYS计算分析箱梁内部温度场, 并将火灾后现场检测结果与模型计算结果进行对比分析。研究结果表明: ①火灾作用下混凝土结构表面温度逐渐升高, 高温区域集中在火源正上方的底板区域及底板边缘与腹板相交位置处, 最高温度约为750℃; ②随着火灾时间的不断增加, 箱梁构件内部温度不断升高, 构件温度梯度增大, 底板表面最高温度为754℃, 距表面20 cm深度处温度为28℃; ③采用二次曲线拟合得出了受火箱梁距表面深度与计算温度的关系曲线, 并与规范建议值进行了对比。二者温度变化趋势较为一致。但是由于温升曲线及构件尺寸的不同, 其内部温度计算值与规范建议值存在一些差异; ④现场火灾影响区域与FDS模拟箱梁底面温度场所显示的高温区域基本一致, 火源上方箱梁底板、腹板位置为主要损伤区域。内部温度场的数值分析结果与现场检测推定结果基本吻合, 说明采用ANSYS计算构件内部温度场具有较好的准确度。

**关键词:** 桥梁工程; 火灾; 数值模拟; FDS; ANSYS; 温度场

**中图分类号:** U448.213; U447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1377-09

## Numerical Simulation of Temperature Field of Prestressed Concrete Box Girder Bridge After Fire Exposure

LIU Xuzheng<sup>1,2</sup>, YU Chenxi<sup>1,3</sup>, RAO Wenzhen<sup>1</sup>, LIU Jiayi<sup>1</sup>, ZHENG Shangmin<sup>1</sup>, WU Gang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Fujian Provincial Transportation Research Institute Co.Ltd., Fuzhou 350004, China)

**Abstract:** The variation of the internal temperature field of the bridge with time and space under fire is the basis for studying the safety and fire resistance of the bridge structure under fire. Taking a prestressed box girder bridge under actual fire as an example, the fire dynamics software FDS was used to reconstruct the fire scenario of the bridge, and the surface temperature distribution pattern of the prestressed box girder under fire was studied. The internal temperature field of the box girder was calculated and analyzed using finite element software ANSYS, and the post-fire field test results were compared with the model calculation results. The results showed that: 1) The surface temperature of the concrete structure gradually increased under fire exposure, with high-temperature areas concentrat-

\* 收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2024-02-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52068026; 52068025; 52368073)、赣鄱俊才支持计划-主要学科学术和技术带头人培养项目—领军人才(产学研类)(20243BCE51050)、江西省自然科学基金项目(20232BAB204070; 20232BAB204071)资助

**作者简介:** 刘旭政(1980—), 男, 教授, 博士。主要从事桥梁结构安全评价研究。E-mail: urbwolf@126.com

ed in the bottom plate area directly above the fire source, and at the intersection of the bottom plate edge and the web, reaching a maximum temperature of approximately 750 °C. 2) With the continuous increase of fire time, the internal temperature of the box girder components continued to rise, and temperature gradient of the components kept increasing. The maximum temperature on the surface of the bottom plate was 754 °C, while the temperature at a depth of 20 cm from the surface was 28 °C. 3) The relationship curve between the depth of the box girder from the surface and the calculated temperature was obtained by quadratic curve fitting, and compared with the recommended values in the specification. The temperature variation trends were generally consistent. However, due to the differences in the temperature rise curve and component size, there were some differences between the calculated value of internal temperature and the recommended values in the specification. 4) The fire-affected area on site was generally consistent with the high-temperature areas displayed by the FDS simulation of the box girder's bottom surface temperature field, with the main damage occurring at the bottom plate and web areas directly above the fire source. The numerical analysis results of the internal temperature field closely matched the field test results, indicating that the internal temperature field calculation of the components provides good accuracy.

**Keywords:** bridge engineering; fire; numerical simulation; FDS; ANSYS; temperature field

## 0 引言

随着我国交通运输行业的迅猛发展,桥梁数量也不断增长。近年来,因人为或自然因素所造成的桥梁火灾事故屡屡发生,已成为损坏在役桥梁结构性能的危害之一。随着火灾高温的持续作用,受火桥梁构件温度不断攀升,引起混凝土和钢材力学性能的恶化,造成桥梁结构开裂、承载力下降,严重时导致桥梁发生倒塌。

J. Alos-Moya等<sup>[1]</sup>研究发现,在全桥跨使用欧洲规范的碳氢化合物HC火灾温升曲线不能真实模拟中长跨度桥梁的火灾响应作用,且活荷载对桥梁的火灾响应基本上不会产生影响。P. Kumar等<sup>[2]</sup>提出了一种用于模拟预应力混凝土梁在火灾及受荷作用下结构响应的计算方法。M. Garlock等<sup>[3]</sup>通过对12.2 m的钢架桥数值模拟,发现在模型中需要考虑墩台的支座约束类型,不同的钢材类型也会影响火灾作用下桥梁的坍塌持时。M. Z. Naser等<sup>[4]</sup>提出了一种基于火灾隐患对桥梁进行精简分类的方法。陆洲导等<sup>[5-7]</sup>提出了一种可以较好地预测火灾高温后钢筋混凝土连续梁力学性能的计算方程,继而研究了火灾后混凝土梁柱的抗震性能。熊学玉等<sup>[8]</sup>研究不同尺寸截面受火后的物理性能变化,推导得到温度场各等温线的位置,建立了火灾高温下受弯构件承载力计算公式。奚勇<sup>[9]</sup>针对混凝土火灾损伤的特点,结合工程实例,介绍火灾受损钢筋混凝土桥梁检测评价的方法。李国强等<sup>[10-12]</sup>、张岗等<sup>[13-15]</sup>采用

试验及数值模拟手段,对标准升温曲线下的钢结构、混凝土结构和组合结构火灾后的结构性能及抗火性能进行了较为全面的梳理与研究。

桥梁火灾后承载力评定围绕材料受损程度进行,而材料受损、失效程度又与火灾过程中所受的最高温度和火灾的持时有着密切的关系<sup>[16-17]</sup>。故分析火灾过程中桥梁结构的温度场变化,以及处于温度场的桥梁结构构件所产生的一系列性能变化显得十分重要。目前对于受火桥梁的研究多是按标准温升曲线,有别于实际受火桥梁的温度场及温度变化。本文基于火灾动力学软件FDS(Fire Dynamic Simulation)、通用有限元计算软件ANSYS Workbench对遭受火灾损伤的桥梁进行数值模拟,获得火灾高温作用下箱梁表面和内部的温度场分布情况。将火灾后现场检测结果与模型计算结果进行对比分析,旨在验证受火混凝土箱梁桥温度场数值分析结果的正确性。

## 1 桥梁概况和火灾背景

### 1.1 桥梁概况

K61+479.541分离立交为申嘉湖高速S12湖州段连接线上的一座连续预应力混凝土箱梁桥,如图1所示。桥梁跨径组合为4 m×25 m,上部结构采用现浇预应力混凝土连续箱梁,单箱双室截面,等高度腹板,梁高1.4 m。桥面为普通钢筋混凝土铺装,桥梁全宽12 m,桥梁横向布置为:11 m(行车道)+2×0.5 m(防撞护栏)。

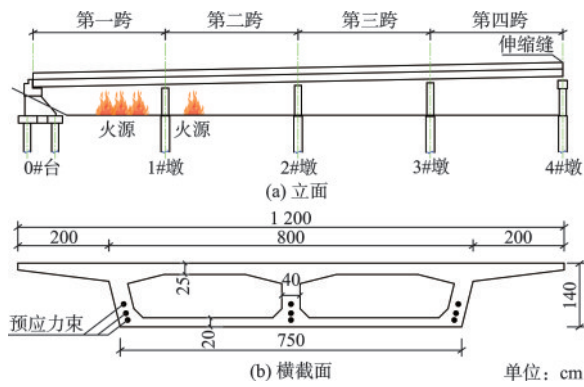


图1 受火桥梁示意图

Fig.1 Schematic diagram of bridge under fire

## 1.2 火灾情况

火灾发生在凌晨2点左右,高速巡查人员发现火情,经当地消防部门全力扑救,历时约2小时将火焰扑灭。火灾主要由于第1跨桥下纺织品废料和第2跨桥下木材起火引燃,当地气温约28℃,火场通风条件好,桥梁灾后现场调查残余燃烧物如图2所示<sup>[18]</sup>。



图2 受火桥跨灾后残余燃烧物

Fig.2 Residual combustion materials after bridge fire across the disaster

## 2 基于FDS的表面温度场分析

FDS (Fire Dynamic Simulation)是由美国国家标准与技术研究院NIST (National Institute of Standards and Technology) 基于场模拟开发的火灾动力学软件,用于预测模拟区域内的变化量(温度、烟气

运动、气体浓度)。建立FDS模型需定义:空间网格大小的确定;材料特性(密度、比热、传导性);创建构筑物;火源的设定;探测器和切片的布置。

### 2.1 FDS计算模型

结合该桥火场调查资料,对实际火灾场景进行模拟。选取受火的两跨桥梁建立FDS模型如图3所示。FDS计算空间为52 m×14 m×7 m,桥下净空4.9 m,根据现场燃烧物余烬推测第1跨桥下火源燃烧面积为2 m×8 m,第2跨为2 m×3 m,堆积物高度约为1.8 m,距梁底表面3.1 m<sup>[18]</sup>。桥梁火灾具有空间开放、通风条件好等特点,除地面设为惰性表面外,其余5个面均设置为开放表面。

FDS模拟计算精度受到网格划分尺寸的影响。网格划分越精细,计算结果越精确,同时计算耗时也随之增加。考虑到计算精度及计算时间,计算网格尺寸划分为0.2 m×0.2 m×0.2 m,共计637 000个网格数量。在主梁底面、墩柱关键位置布置切片及探测器获取计算温度。

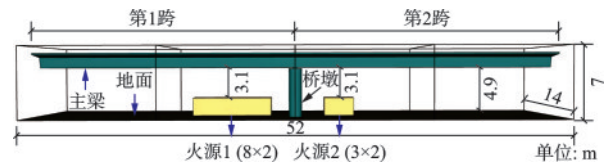


图3 桥梁火灾FDS模型

Fig.3 FDS model of bridge fire scenario

### 2.2 主要计算参数

在火灾的发展过程中,通常是其中一件可燃物先被点燃,在热辐射的作用下周围的其他可燃物相继被引燃,导致火势蔓延。而可燃物堆积的组合方式多样复杂,研究者通过各个不同可燃物的热释放速率曲线进行相应叠加,得到火源的总热释放速率,即为火场环境的火源功率<sup>[19]</sup>。

火灾增长定义中最最重要的一个变量是热释放率(HRR)。对于现有的火灾模拟程序来说,火灾的热释放速率是一个基本的输入参数,只有确定了它的大小才能进行火灾发展与烟气流动的计算。热释放速率可以通过式(1)表示:

$$Q = A \times HRRPUA = \alpha t^2 \quad (1)$$

其中, $\alpha$ 为火灾增长系数; $A$ 为火源燃烧面积, $m^2$ ;  $HRRPUA$ 为单位面积热释放速率, $kw/m^2$ ;  $t$ 为燃烧时长, $s$ ;  $Q$ 为火灾热释放速率, $kw$ 。

桥梁火灾的发生处于开放环境,氧气供应充足,为燃料控制型火灾,FDS计算中通过热释放速率来定义火灾的大小。现场燃烧物主要由废弃棉纺织物、秸秆、木材、橡胶等多种材料混合堆积组成,各类材料的实际热释放速率、数量占比、具体位置等难以精确获取。根据美国消防手册<sup>[20]</sup>以及相关文献结论<sup>[21-22]</sup>中堆积木材或纺织类材料的HRRPUA取值范围应为500~1 000 kw/m<sup>2</sup>。前期研究中对比分析了HRRPUA分别为580、780和980 kw/m<sup>2</sup>时箱梁底部温度测点的计算值如图4所示。根据FDS计算结果,HRRPUA越大,进入稳定燃烧阶段的时间更长,梁底温度更高。HRRPUA为780 kw/m<sup>2</sup>时,火灾初始增长持续时间约为605 s,梁底最高温度约为750℃。根据前期研究结果,本文研究的桥梁火灾燃烧时单位面积的热释放速率统一采用780 kw/m<sup>2</sup>。

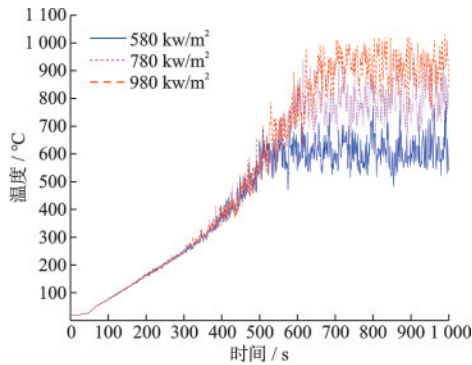


图4 不同燃烧释放率的箱梁底部温度

Fig.4 Bottom plate temperatures under various combustion heat release rate

由于可燃物种类的不同,火灾初始增长阶段的火灾发展速率也各不相同。通过火灾增长系数来描述火灾的发展速率,主要分为慢速、中速、快速、极快速4种增长类型。火灾随着燃烧时间的不断延长,燃烧发展持续到热释率达到一个最大值,维持一段时间的稳定发展,主要受到燃烧物表面积和通风状况的影响。根据燃烧物种类、火灾燃烧时长,判定火灾增长类型为快速型,增长系数为0.046 89 kw/s<sup>2[20]</sup>。

根据热释放速率计算公式(1),在其他参数确定的前提下计算出火灾初始增长持续时间约为605 s,之后火源保持稳定燃烧状态。当释放率稳定时,火灾温度场也趋于稳定,因此数值模拟的计算时间应超出达到稳定温度场的时间。本文计算时长设为1 000 s。火灾热释放速率时程曲线如图5所示。

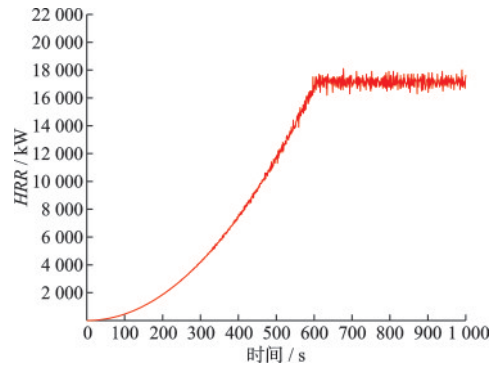


图5 火灾热释放速率时程曲线

Fig.5 Time history curve of fire heat release rate

### 2.3 火灾温度场分析

火灾发生时,火源的面积大小、火灾的持续时长以及火焰温度对构件温度有很大的影响。图6为火灾燃烧过程中梁底温度场分布图。在时长605 s的燃烧初始发展阶段,空间温度逐渐上升,当燃烧稳定后,火场温度保持稳定。梁底火源中心上方处温度最高,由火源中心向周围逐渐递减。随着火灾作用时间的增加,混凝土结构表面温度逐渐升高,高温分布范围逐渐扩大,梁底最高温度保持在750℃左右。火灾对桥梁产生的高温区域主要分布在第1跨和第2跨火源上方的箱梁处,其中底板受高温作用最为明显。箱梁的底板边缘与腹板相交位置处由于热量汇聚,也是最高温度区域。

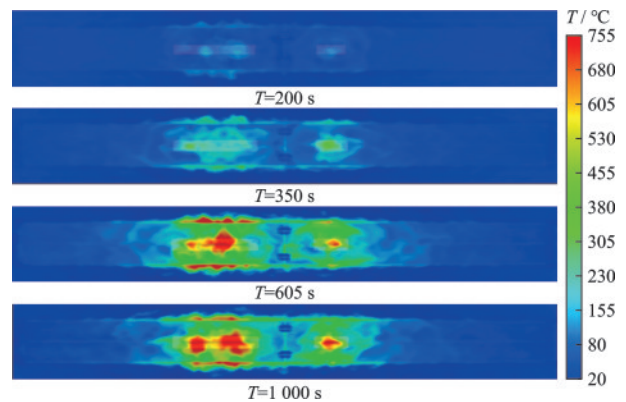


图6 箱梁底板温度场分布图

Fig.6 Temperature field distribution of bottom plate

为考察梁底高温区域整体分布情况,将FDS模型中605 s时梁底温度场通过可视化后处理软件Tecplot绘制成温度等值线云图进行分析。图7显示了第1跨梁底纵向14~26 m范围及第2跨梁底纵向26~38 m范围的温度等值线云图。由于第1跨火

源纵向范围大于第2跨,对应位置处第1跨梁底的高温区域( $>600\text{ }^{\circ}\text{C}$ )纵向长度也明显大于第2跨;第1、2跨的高温区域( $>600\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的横向长度都在1.8 m左右,中温区域( $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的横向长度分别为8.5和6 m左右。

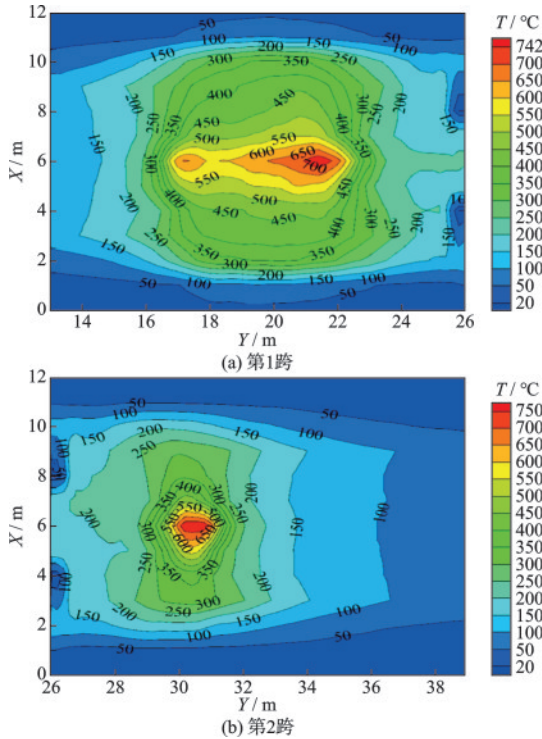


图7 底板温度等值线分布图  
Fig.7 Temperature contour distribution of bottom plate

### 3 基于ANSYS的内部温度场分析

考虑到桥梁受火试验昂贵而较难实现,国内外多采用有限元软件模拟计算桥梁的受火状况。本文选用ANSYS Workbench为研究工具,进行受火构件内部温度场的热耦合和热传导模拟计算。计算流程是先设置稳态热分析再设置瞬态热分析,将稳态热分析结果作为瞬态热分析的起始条件,通过稳态热分析与瞬态热分析进行耦合计算。图8所示为采用ANSYS建立的有限元模型,纵向长度取5 m,箱梁横截面的网格划分应尽可能的精细,以确保模型分析模拟结果的精确性,网格划分尺寸为0.1 m。综合计算机运行时长、效率,以及现实消防预警、扑灭等进行考虑,取燃烧模拟时长2小时。

本文初始温度取值 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,以第一类边界条件施加初始温度场。采用综合换热系数来考虑受火面

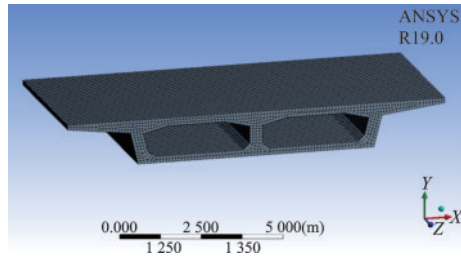


图8 箱梁热分析有限元模型  
Fig.8 Thermal analysis FEM model of box girder

的对流辐射。背火面外表面自然对流系数值取为 $15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,热辐射系数取0.9。背火面的内表面,自然对流系数值取为 $15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,热辐射系数取 $0.5^{[23-24]}$ 。箱梁内腔温度选用常温,混凝土取导热系数 $2.33\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、比热容 $970\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、密度 $2\,500\text{ kN}/\text{m}^3$ 。输入的温度—时间升温曲线的温度为FDS模拟计算出的受火箱梁底面温度分布,升温速率参考火灾标准升温曲线取为对数函数,将温度函数加载到ANSYS当中进行受火构件内部温度场分析<sup>[25]</sup>。

#### 3.1 箱梁温度场随时间变化规律

截面高温区主要位于底板中心与两侧区域。随着燃烧时间的增加,箱梁截面温度也随之增大,燃烧30、60、90、120 min时,箱梁截面的最高温度分别为 $548、688、733、754\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其中燃烧90 min时箱梁截面温度分布如图9所示。箱梁内部温度分布呈现较为明显的分层,温度随着深度的增加而减小。燃烧时间超过60 min后,箱梁表面最高温度逐渐趋于稳定,截面内部温度分布也逐渐保持稳定。

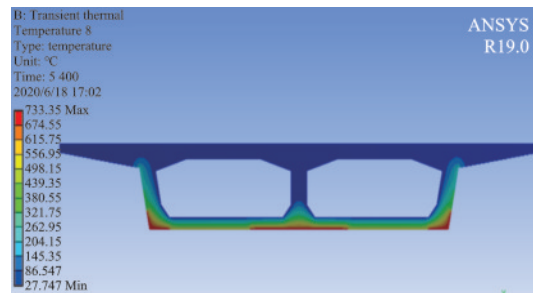


图9 90 min箱梁截面温度分布图  
Fig.9 Temperature distribution of box girder cross-section at 90 minutes

图10为箱梁在受火过程中,最大温度、最小温度以及平均温度的时程曲线。箱梁截面的最低温度为空气的初始温度 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,箱梁顶板位置处未受到火灾影响。最高温度曲线在受火初期温度上升迅

速,45 min之后温度爬升越来越慢,温升曲线趋于平缓,最高温度值为754℃。箱梁截面底板各深度平均温度上升缓慢,最大值接近200℃。

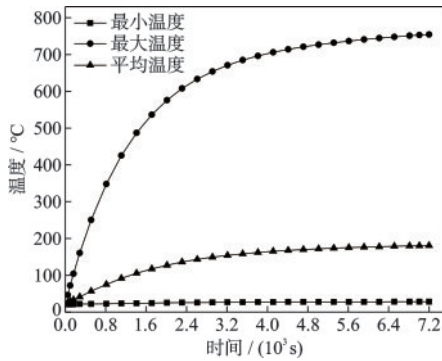


图10 各类温度时程曲线图

Fig.10 Time history curves of different temperature types

### 3.2 箱梁内部温度场分布

在火灾发生的过程中,构件截面热量的传播是由表及里的,混凝土具有热传导性,随着时间的推移导致内部温度升高。在底板厚度方向选取5个测点,分别距离底板0、5、10、15、20 cm;腹板厚度方向选取测点6-11,分别距离腹板0、8、16、24、32、40 cm。图11为箱梁截面角点处的温度云图。从图中可以看出,腹板与底板、翼缘板的交接位置角点的温度均高于截面上其他点温度,原因是角点处温度传导发生了叠加,热量汇聚,引起角点区域温度提高较快,且该位置处的高温分布范围高于截面上其他位置。

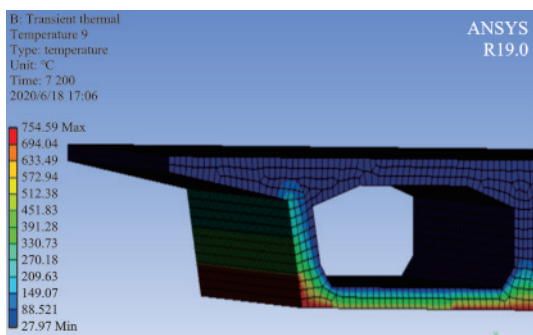


图11 箱梁截面角点处温度场分布

Fig.11 Temperature field distribution of box girder cross-section corner

图12、图13为箱梁底板和腹板各深度位置的温升时程曲线图。随着受火时间的增加,温度会通过箱梁混凝土自身的导热性递至箱梁内部。随着混凝土构件深度的增加,箱梁内部温度逐渐减小,并

且各深度测点温升趋势一致。底板表面测点的温度最高,最高温度达到754℃,深度20 cm的测点5温度最低,为初始温度28℃;腹板表面测点最高温度达到778℃,深度40 cm的测点11的温度最低,为初始温度28℃。

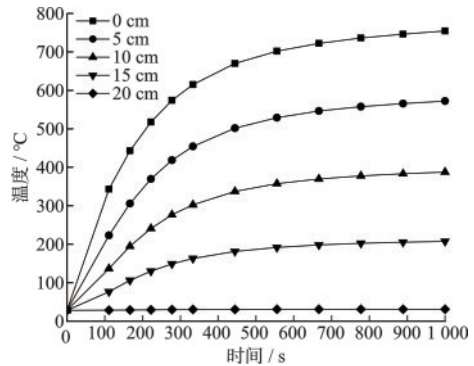


图12 底板各深度温度测点时程曲线图

Fig.12 Time history chart of temperature measuring points in various depths of bottom plate

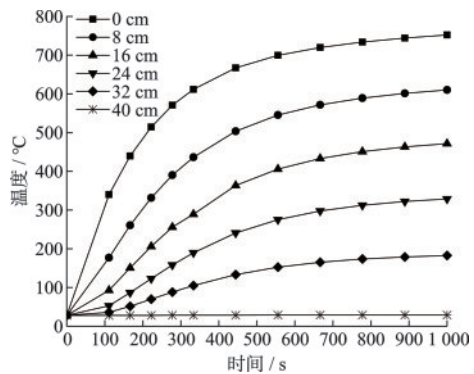


图13 腹板各深度温度测点时程曲线图

Fig.13 Time history curves of temperature measuring points at various depths of web plate

## 4 与火灾后现场检测结果对比分析

### 4.1 受损区域对比

根据火灾后检测结果,火灾后现场检测箱梁受火损伤照片如图14、15所示,绘制梁底受损严重区域如图16所示<sup>[26]</sup>。根据《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)<sup>[27]</sup>,混凝土受火温度超出700℃时,开始出现大面积爆裂、剥落。对比FDS计算结果(图6、7)分析可知,位于火源上方的箱梁底板范围、腹板与底板相交位置为主要损伤区域,混凝土表面温度超过了700℃,现场火灾影响区域与FDS计算出的高温区域范围和高温受损区形状基



图14 底板与腹板角点处破损严重

Fig.14 Severe damage at intersection corner of bottom and web plate



图15 第2跨底板大面积露筋

Fig.15 Extensive exposed reinforcement on the bottom plate of the second span

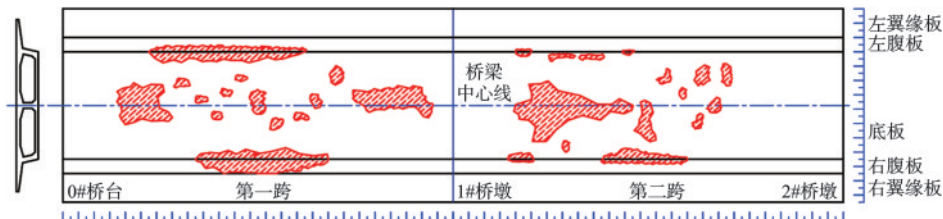


图16 梁底火灾受损严重区域示意图

Fig.16 Seriously damaged zone of the bottom plate after fire disaster

本符合,表明在燃烧物位置、燃烧释放率准确的前提下FDS用于火灾温度场的计算模拟准确性较好。

#### 4.2 温度场对比

图17为采用ANSYS计算得出的箱梁受火90 min时构件温度与深度关系图。0~2 cm深度混凝土构件温度在700~755℃,2~4 cm深度混凝土构件温度在560~700℃,3~8 cm深度混凝土构件温度在320~560℃,8~10 cm深度混凝土构件温度在210~320℃,大于10 cm深度的混凝土构件温度小于200℃,在20 cm深度时温度为初始温度28℃。可按二次方程拟合出箱梁深度与计算温度关系曲线如式(2)表示:

$$T = 795 - 72.7H + 1.75H^2 \quad (2)$$

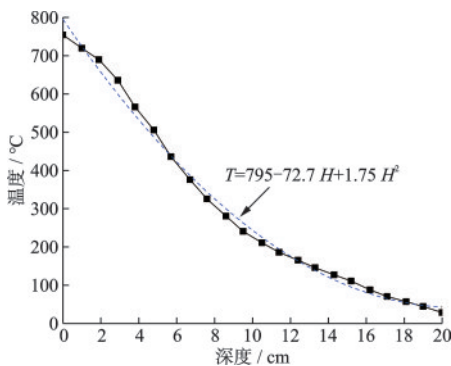


图17 箱梁深度与计算温度关系曲线

Fig.17 Relationship curve between depth below the surface of box girder and calculated temperature

其中, $T$ 为计算温度,℃; $H$ 为构件深度,cm。

将拟合得出的温度曲线与厚120 mm混凝土板(规范给出的最大厚度板)在标准升温条件下温度场曲线图(图18)进行对比<sup>[27]</sup>;二者的温度变化趋势较为一致,受火时间越长,混凝土构件表面温度越高,高温沿构件深度方向逐渐推进。因实际受火桥梁的温升曲线与标准温升曲线有所不同,受火桥梁构件厚度也较大,因此计算出的受火桥梁内部温度与规范建议值有一定差异。根据对该受火桥梁的文献[25],推断出直接受火灼烧的混凝土结构构件表面及内部曾达到的温度,对比数值分析结果列于表1。模拟结果与检测推定值基本吻合,说明采用FDS计算受火桥梁表面温度场和采用ANSYS计算构件内部温度场可以较为准确地推断出受火桥梁的温度场。参考现有评定标准及研究成果,该

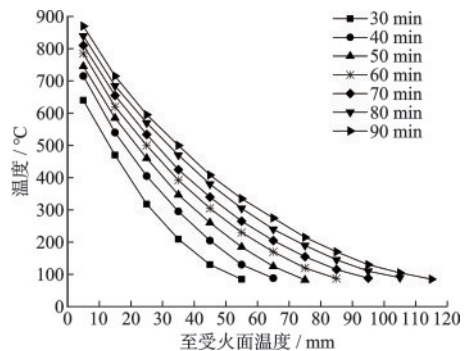


图18 厚120 mm混凝土板温升曲线

Fig.18 Temperature rising curves of 120 mm concrete plate

表1 底板各深度区域的计算温度与现场检测温度对比  
Table 1 Comparison between calculated temperature in various depth of bottom plate and field test temperature

构件	深度/cm	模拟推定温度/°C	现场检测温度/°C
箱梁 底板	0~2	700~755	700~750
	2~4	560~700	550~700
	3~7	320~560	350~550
	7~10	210~320	200~350
	10~14	<200	<200

受火桥梁安全等级初步评估为Ⅲ级,属于中度灼烧。有限元计算评定结果与现场灾后评定等级相同,表明计算精度较高,采用本文的研究成果可用于指导现场检测及后续加固维修。

## 5 结论

(1)通过火灾后现场调查,确定了燃烧物尺寸、位置,燃烧释放率及火灾增长系数,采用FDS模拟计算了受火箱梁的表面温度分布。计算结果表明:火灾处于稳定燃烧阶段时,桥梁火场温度保持稳定,此时火源上方箱梁底板以及底板与腹板交接区域的温度较高,最高温度约为750℃。

(2)将FDS计算出的温度-时间升温曲线加载到ANSYS进行稳态、瞬态热分析计算,得到了不同燃烧时间的受火箱梁内部温度场。随着受火时间增加,箱梁构件的温度不断升高,构件内部温度与箱梁横截面呈现出平行分布的趋势。随着混凝土构件深度的增加,温度衰减较快,底板表面最高温度为754℃,距表面20cm处温度为初始温度28℃。

(3)根据计算结果拟合出了受火箱梁距表面深度与计算温度的关系曲线,采用二次曲线拟合具有较好的精度。通过与《鉴定标准》的建议温度值进行对比,可以看出二者温度变化趋势较为一致。但是由于温升曲线及构件尺寸的不同,其内部温度计算值与规范建议值存在一些差异。

(4)现场调查的火灾影响区域与FDS计算出的高温区域范围和高温受损区形状基本符合,表明在燃烧物位置、燃烧释放率准确的前提下FDS对于火灾温度场的计算模拟准确有效。内部温度场的数值分析结果与现场检测推定结果基本吻合,说明采用ANSYS计算构件内部温度场具有较好的准确度。

## 参考文献:

- [1] Alos-Moya J, Paya-Zaforteza I, Garlock M, et al. Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models[J]. Engineering Structures, 2014, 68(1): 96-110.
- [2] Kumar P, Kodur V K R. Response of prestressed concrete beams under combined effects of fire and structural loading [J]. Engineering Structures, 2021, 246 (9) : 113025.
- [3] Garlock M, Paya-Zaforteza I. A numerical investigation on the fire response of a steel girder bridge[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012,75: 93-103.
- [4] Naser M Z, Kodur V K R. A probabilistic assessment for classification of bridges against fire hazard [J]. Fire Safety Journal, 2015, 76: 65-73.
- [5] 陆洲导,李刚,许立新. 无粘结预应力混凝土框架火灾下结构反应分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 30-35.  
Lu Z D, Li G, Xu L X. Analysis for structural response of unbounded prestressed reinforced concrete frames in fire environments[J]. China Civil Engineering Journal, 2003,36(10): 30-35. (in Chinese)
- [6] 陆洲导,魏轶,苏磊,等. 高温后钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019, 47(1): 29-37.  
Lu Z D, Wei K, Su L, et al. Quasi-static test of reinforced concrete frames after high temperature [J]. Journal of Tongji University: Nature Science Edition, 2019, 47(1): 29-37. (in Chinese)
- [7] 陆洲导,陈宇,李凌志,等. 火灾后平面及空间混凝土梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 340-348.  
Lu Z D, Chen Y, Li L Z, et al. Experimental study on seismic behavior of plane and spatial concrete beam-column joints after exposure to fire [J]. Journal of Tongji University: Nature Science Edition, 2020, 48(3): 340-348. (in Chinese)
- [8] 熊学玉,蔡跃,黄鼎业. 火灾下预应力混凝土结构极限承载力计算方法[J]. 自然灾害学报, 2005, 24(2): 147-154.  
Xiong X Y, Cai Y, Huang D Y. Calculation of ultimate bearing capacity for prestressed concrete structure subjected to fire [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 24(2): 147-154. (in Chinese)
- [9] 奚勇. 火灾受损桥梁的检测与评估[J]. 世界桥梁, 2007(4): 62-65.  
Xi Y. Inspection and evaluation of fire damaged bridges [J]. World Bridges, 2007(4): 62-65. (in Chinese)

- [10] 李国强,王银志,郝坤超. 约束组合梁抗火性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(6): 93-98.  
Li G Q, Wang Y Z, Hao K C. Experimental study on fire resistance of constrained composite beams [J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(6): 93-98. (in Chinese)
- [11] 李国强,王卫永. 钢结构抗火安全研究现状与发展趋势[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 1-8.  
Li G Q, Wang W Y. State-of-the-art and development trend of fire safety research on steel structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12): 1-8. (in Chinese)
- [12] 李国强,吉蔚,冯程远,等. 火灾下门式钢刚架倒塌试验与雷达位移测试系统有效性研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(9): 56-65.  
Li G Q, Ji W, Feng C Y, et al. Collapse test of steel portal frame under fire and effective analysis of radar-based displacement measuring system [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(9): 56-65. (in Chinese)
- [13] 张岗,宋超杰,李建章,等. 火灾后钢-混凝土组合梁承载能力评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(2): 1-11.  
Zhang G, Song C J, Li J Z, et al. Evaluation method of load-carrying capacity of steel-concrete composite girders after fire exposure[J]. Journal of Chang'an University: Nature Science Edition, 2021, 41(2): 1-11. (in Chinese)
- [14] 张岗,贺拴海,宋超杰,等. 钢结构桥梁抗火研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 1-11.  
Zhang G, He S H, Song C J, et al. Review on fire resistance of steel structural bridge girders[J]. China Journal of Highway and Transportation, 2021, 34(1): 1-11. (in Chinese)
- [15] 张岗,宋超杰,李徐阳,等. 燃油火灾下预应力混凝土梁耐火试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 210-221.  
Zhang G, Song C J, Li X Y, et al. Experimental study on fire resistance of prestressed concrete under fuel fire exposure[J]. China Journal of Highway and Transportation, 2022, 35(1): 210-221. (in Chinese)
- [16] 蔡新江,戚晨望,毛小勇,等. 钢筋混凝土框架的多尺度抗火混合模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(2): 383-390,410.  
Cai X J, Qi C W, Mao X Y, et al. Multi-scale hybrid simulation of fire resistance of reinforced concrete frame [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 383-390,410. (in Chinese)
- [17] 李永进,任庆新,翁兴贵. 火灾作用下钢管混凝土叠合柱偏压力学性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(6): 10-17.  
Li Y J, Ren Q X, Weng X G. Research on mechanical properties of concrete filled steel tube reinforced concrete column under fire [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(6): 10-17. (in Chinese)
- [18] K61+479.541 分离立交火烧后特殊检查报告[R]. 西安: 西安长大公路工程检测中心, 2015.
- [19] 杨文旭,秦广冲,杨佳立,等. 基于热-力耦合的悬索桥结构抗火性能研究[J]. 公路工程, 2024, 49(1): 53-59,81.  
Yang W X, Qin G C, Yang J L, et al. Study on fire resistance of suspension bridge structure based on thermal mechanical coupling[J]. Highway Engineering, 2024, 49(1): 53-59,81. (in Chinese)
- [20] Morgan J H. SFPE handbook of fire protection engineering (fifth edition)[M]. USA: Springer Science Business Media, 2016: 830-831.
- [21] Zhang G, Yuan Z Y, Ding Y H, et al. Fire behavior of composite steel truss bridge girders numerical investigation and design strategies[J]. Advances in Bridge Engineering, 2024, 4(2): 36.
- [22] 刘旭政,李任福,余晨曦,等. 火灾后混凝土桥梁结构安全初步评估方法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(1): 62-73.  
Liu X Z, Li R F, Yu C X, et al. Preliminary safety assessment method for concrete bridge structure after fire exposure[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2022, 47(1): 62-73. (in Chinese)
- [23] 张熾妮,刘雪梦,舒盼,等. 火源位置对凹型砖木结构古建筑火蔓延特性影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1313-1321.  
Zhang Y N, Liu X M, Shu P, et al. Study on the influence of fire source location on fire propagation characteristics of ancient buildings with concave brick and wood structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1313-1321. (in Chinese)
- [24] Wu X Q, Huang T, Au F, et al. Posttensioned concrete bridge beams exposed to hydrocarbon fire [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(10): 04020210.
- [25] Song C J, Zhang G, Lu Z L, et al. Fire resistance tests on polypropylene-fiber-reinforced prestressed concrete box bridge girders [J]. Engineering Structures 2023, 282: 115800.
- [26] Liu X Z, Yu C X, Quan W, et al. Inspection, materials testing and field testing of a prestressed concrete box bridge after fire exposure[J]. Fire Safety Journal, 2019, 108.102852.1-102852.13.
- [27] 火灾后工程结构鉴定标准:T/CECS252—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

(本文编辑:赵霞)