

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.055



油池火下横隔梁对多肋钢筋混凝土 T 梁桥 温度场的影响

郑净^{1,2}, 李小珍¹, 毛小艺¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 皖西学院 建筑与土木工程学院, 安徽 六安 237012)

摘要:基于油池火焰蔓延特性,探究了火灾下横隔梁对多肋钢筋混凝土 T 梁桥温度场的影响。理论分析了 T 梁底火焰蔓延总长度与热释放速率间的无量纲关系,用 FDS 建立 4 种火灾场景的流体计算模型,分析 T 梁边界温度时空分布规律,将 FDS 计算结果加载到 T 梁桥有限元模型上,计算截面内部温度场。结果表明:在开放空间, T 梁底火蔓延与无量纲热功率之间的线性比值大于封闭空间的 2.58;横隔梁有效降低了火焰邻近区域的温度,在顺桥向将 T 梁边界温度场分成 4 个区域,各分区温度比无横隔梁时分别降低 9.7%、41%、56.8%。说明横隔梁限制了热传递,使火源直接作用的梁构件温度梯度梁肋中部提高 33%,梁底提高 13.3%,翼板底提高 5%。

关键词:油池火;火焰蔓延总长度;横隔梁;温度分布;桥梁

中图分类号:TU997 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)03-0104-07

Impact analysis of transverse diaphragms on the temperature field of reinforced concrete T-girder bridge under pool fires

Zheng Jing^{1,2}, Li Xiaozhen¹, Mao Xiaoyi¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, West Anhui University, Lu'an 237012, Anhui, P. R. China)

Abstract: The effect of transverse diaphragms on the temperature field of concrete bridge with T-girders under fire was investigated based on the character of pool fire flame spread in this study. Firstly, the dimensionless relationship between the total flame extension length and the heat release rate was studied theoretically. Then the fire models of the T-girders bridge with 4 fire scenarios were built in the FDS to analyze the spatio-temporal distribution of the boundary temperature. Boundary temperature and heat flux were subsequently translated to the finite element model of T-girder after surface fitting in order to analyze numerically the temperature field inside the T-girders. The simulation result shows that: the proportional coefficient of 2/5 power of dimensionless heat release rate to the dimensionless total flame extension length is greater than 2.58. The diaphragm effectively reduces the boundary temperature of the indirect influence area of the fire source, and divides the boundary temperature along T-girders into four step sections with 9.

收稿日期:2018-07-29

基金项目:安徽高校自然科学研究项目(KJ2018A0412)

作者简介:郑净(1984-),女,博士,主要从事桥梁结构研究,E-mail:303831776@qq.com。

李小珍(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:xzhli@home.swjtu.edu.cn。

Received:2018-07-29

Foundation item:Natural Science Research Project of Anhui University(No. KJ2018A0412)

Author brief:Zheng Jing(1984-), PhD, main research interest: bridge structure, E-mail: 303831776@qq.com.

Li Xiaozhen (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xzhli@home.swjtu.edu.cn.

7%, 41%, and 56.8% respectively in boundary temperature reduction compared to the case of no diaphragm. Besides, diaphragm restrains the heat transmitting along the girders. In the section above fire source, the temperature girders of the T-girder are 33% and 13.3% higher in the center and bottom of the rib and 5% higher in the bottom of flange than the similar case without diaphragms.

Keywords: pool fire; total flame extension length; diaphragms; temperature distribution; bridge

火灾是威胁桥梁安全的突发灾害,经调查,桥梁火灾多由油罐车、重载货车及其他燃油车辆事故造成^[1-2],最为典型的是油罐车事故导致的油池火灾。油罐车一旦倾覆,泄露的燃油形成油池并蒸发,遇火花迅速燃烧,在短时间内达到高温并形成燃烧直径大于 1 m 的火焰,热释放速率高,蔓延快,扑救困难。近几年发生了多起油罐车爆燃致使桥梁倒塌或严重损毁事故,因此,桥梁的火灾问题引起了越来越多学者的关注。Lattimer 等^[3]、Nahid 等^[4]、Woodworth 等^[5]分析了桥梁火灾的火源位置、大小、通风条件对结构的影响,采用 CFD 数值模拟方法研究了火灾下钢桥或组合桥的破坏特征。Nahid 等^[6]对比分析了槽型钢梁桥和组合梁桥在 HGV 性火灾下的热-力耦合。Alos-moya 等^[7]用 FDS 火灾分析软件重现了美国伯明翰的 I65 高速立交桥的火灾过程。张岗等^[8-9]、姚伟发等^[10]通过计算桥梁火灾的温度场分布,探讨了火灾下预应力衰减问题、高温时变效应、钢管混凝土拱桥承载力、组合梁火灾下基本力学性能与特征。

目前,桥梁火灾分析较多选用标准升温曲线,如 ASTM E119^[11]、ISO 834^[12]等作为火源,但标准曲线均在封闭燃烧空间获得,与桥梁半开放空间液体油池燃烧升温过程并不相同,不能代表桥梁火灾的温度时程;同时,已有关于结构火灾试验的文献将构件整体在熔炉中加热,与桥梁局部受火不同;另外,桥梁比其他建筑结构具有更大的跨度和截面尺寸,更注重构件间的联系,而多数研究仅针对某个构件,难以代表桥梁整体结构的火灾特性。

钢筋混凝土 T 梁桥是常用的桥型,其上部结构由多道横隔梁横向连接 T 梁,有时为减轻自重会将横隔板开孔,这将对桥下火灾火焰流动产生影响。本文基于油池火焰流动特性对比分析有无横隔梁的火灾下多肋钢筋混凝土 T 梁桥温度场的分布。首先,分析油池火在 T 梁底火焰蔓延总长度与热功率的无量纲关系。其次,建立桥梁火灾流体力学模型,计算不同火灾场景下 T 梁桥边界温度分布的时间和空间特性。最后,将热边界加载在 T 梁桥有限元模型上,探讨横隔梁对 T 梁的瞬态温度场的影响。

1 相关理论

1.1 火灾动力学

可燃物燃烧后,在可燃物上方形成了气相火焰羽流,火焰高度 H_{fm} 是表示燃烧速率及火焰蔓延规律的重要参数,与火源直径 D 及热释放率 \dot{Q} 有密切关系^[13]。

$$H_{fm} = 0.235 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (1)$$

火羽流垂直向上运动至顶棚,并沿着顶棚水平流动形成顶棚射流。火蔓延总长度为顶棚以下火焰垂直方向的高度 H_{ef} 与火焰水平蔓延长度 r 之和。火蔓延总长度与火焰垂直高度 H_{ef} 、火源热释放率 \dot{Q} 、空气密度 ρ_0 、空气热熔 C_p 、初始温度 T_0 、重力加速度 g 和火源直径 D 等因素相关,火焰总长度可以表达为

$$\frac{r + H_{ef}}{H_{ef}} = f\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p T_0 g^{1/2} D H_{ef}^{3/2}}\right) = f(Q_{HD}^*) \quad (2)$$

Q_{HD}^* 是包含火源直径 D 和有效高度 H_{ef} 的无量纲火源功率。无量纲火焰蔓延总长度与无量纲火源功率呈现良好的线性关系。即

$$\frac{r + H_{ef}}{H_{ef}} = k \cdot Q_{HD}^{*2/5} \quad (3)$$

式中: k 为常数,不同学者采用不同边界条件和不同燃料所得到的 k 并不相同,封闭空间的范围为 1.04~2.585^[14-16],无限大平板为 3.15^[3]。

1.2 瞬态传热有限元法

火灾环境下,桥梁构件通过与周围火灾高温的热传递与构件内部的热传导来完成构件的升温,属于瞬态传热过程。反映混凝土热物性的物理参数,如比热容 C 、热传导率 K 、密度 ρ 、对流换热系数 h 等均随着温度而变化,结构构件的边界温度、热流密度等也是时变的,属于非线性问题,根据能量守恒原理,非线性瞬态传热可以表示为

$$C(T) \dot{T} + KT = Q(T) \quad (4)$$

式中, \dot{T} 、 T 分别为节点温度梯度及温度向量; $Q(T)$ 为节点热流率向量。温度场分析时,需要将该微分方程联立边界条件和初始条件进行求解,称为定解条件。初始条件为桥梁及周围环境的初始温度,即

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (5)$$

传热过程的三类边界条件均可用第三类边界条件表示。第三类边界条件中,与物体相接触的流体介质的温度 T_f 和换热系数 h 已知,用公式表示为

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_t = h(T - T_f) \Big|_t \quad (6)$$

流体介质的温度 T_f 和换热系数 h 可以是随时间和位置变化的函数。

2 研究工况

桥下火灾对桥梁结构的破坏较大,结合油罐车火灾油池火燃烧特性,确定了 3 种研究工况,见表 1。表中,采用了 3 种热释放速率 500、1 500、2 500 kW/m²,其中,2 500 kW/m² 对应油罐中燃料燃烧最大热释放速率^[17]。500 kW/m² 对应油罐车事故后燃料溢流到地面对应的最小热释放率^[18],仅考虑火源设置在靠近桥墩西侧。火灾场景见表 1。

表 1 数值模拟火灾场景

Table 1 Fire scenarios in numerical investigation

场景	序号	面积/m ²	热释放率/(kW·m ⁻²)	高度	横梁
1	A	1.5×1.8	500	地上 1 m	有
2	B	1.5×1.8	1 500	地上 1 m	有
3	C	1.5×1.8	2 500	地上 1 m	有
3	D	1.5×1.8	2 500	地上 1 m	无
4	E	2.5×10	2 500	地面	有
4	F	2.5×10	2 500	地面	有

3 建立火灾模型

采用 FDS 分析多肋混凝土 T 梁的火灾特性,计算分析横隔板对火灾边界温度场分布的影响。

3.1 模型建立

以某公路钢筋混凝土简支 T 梁桥为背景,建立火灾模型进行计算。该 T 梁桥单跨跨径 16 m,顺桥向由 5 道横隔板横桥向连接 3 片 T 梁,桥梁横向结构布置如图 1 所示。由于 FDS 仅支持矩形网格,因此,将主梁变厚度的翼缘板简化成阶梯。建模时将构件表面设为绝热表面,避免材料吸热造成边界温度降低。在 T 梁模型中,布置一定数量的热电偶和温度,以测定火灾下构件边界温度的变化。热电偶的布置如图 2 所示。

3.2 控制体和计算网格

相对于封闭的隧道或房屋建筑,桥下火灾处在半开放环境中,控制体中的燃烧过程应满足能量守恒条件和质量守恒条件,数值计算结果的精度直接受网格尺寸的影响。控制体的体积较大或者计算网

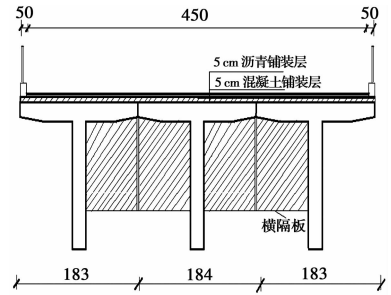
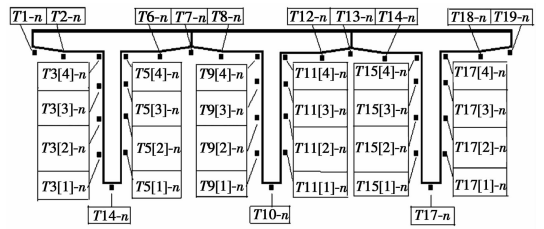


图 1 T 梁桥横向结构布置

Fig. 1 Layout of Bridge Structure



注: T/N[X]-n 为热电偶编号方法;其中: T: 热电偶; N: 横桥向编号; [X] 为垂直方向编号,距梁底为 1/4 肋高; n: 为横桥向编号,距端横隔板每隔 0.5 m 布置。

图 2 热电偶布置图

Fig. 2 The arrangement of thermocouples

格过小,均会导致计算结果不收敛或者计算效率过低。控制体尺寸、网格尺寸的取值通过温度敏感分析获得,即当增大控制尺寸或缩小网格尺寸时,整个控制体内部均不会导致明显的温度变化。最终确定本桥模型控制体的体积为 34 m×20 m×13 m。MA^[19] 运用 0.05D* 的网格尺寸模拟轴对称火焰运动规律,获得可靠的结果, Baum 等^[20]、Yang 等^[21] 在模拟温度分布时采用 0.1D* 的网格,与实验结果一致。其中

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_0 T_0 \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (7)$$

分析桥梁温度分布,采用不大于 0.1D* 的尺寸划分网格,得到网格数为 414 720,见图 3。

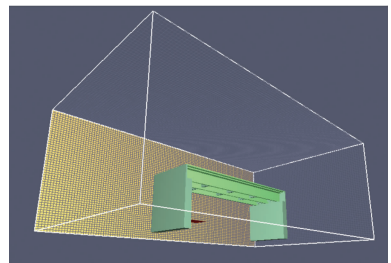


图 3 T 梁 FDS 火灾模型

Fig. 3 FDS model of bridge T-girders bridge

3.3 模型验证

利用西班牙瓦伦西亚理工大学 Paya 对 12.6 m 钢-混凝土简支梁桥足尺火灾试验(如图 4)验证 FDS 求解桥梁火灾温度问题的适用性^[22]。按照

3.1、3.2节同样过程在 FDS 中建立试验桥梁的火灾模型,按文献[20]试验场景 3 进行数值加载。图 5 为试验桥梁数值模型,控制体为 22 m×18 m×9 m、网格尺寸为 0.2 m×0.18 m×0.15 m,网格数为 48 000。模拟计算结果与试验结果的温度分布对比见图 5,可以看出 FDS 数值模拟计算结果与试验结果一致,数值模拟计算结果在可接受范围内略大于试验结果,这是由于实际试验在室外场地进行,受到自然风的影响。可见,FDS 适用于分析桥梁火灾问题。

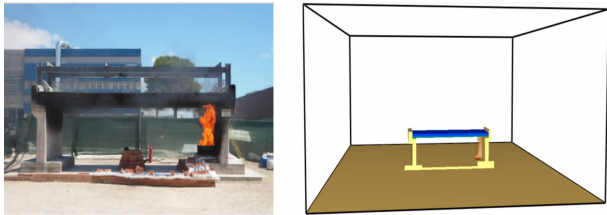


图 4 Paya 试验与模型结果对比

Fig. 4 Experiment of paya and numerical model

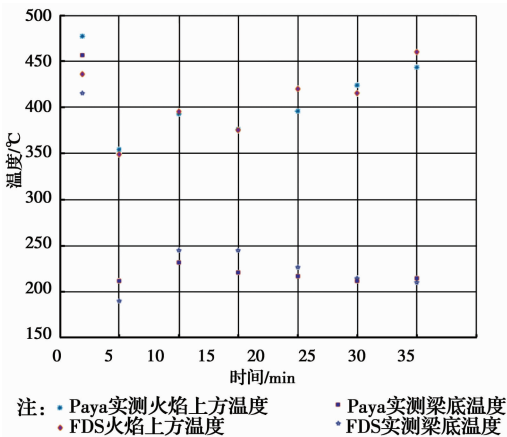


图 5 FDS 温度计算与 Paya 试验结果对比

Fig. 5 Comparison between FDS and test results

4 结构温度场分析模型

采用有限元软件 ANSYS 分析钢筋混凝土 T 梁的温度问题,建立的 T 梁桥模型如图 6 所示。混凝土采用 solid70 单元,钢筋采用 link33 单元,纵桥向网格采用自由网格,在火焰直接作用区采用尺寸为 0.05 m 的精细网格,相邻区域选用自由网格过渡,远离火焰作用的区域采用粗略网格划分。在火焰直接作用的梁肋断面的温度梯度方向,采用分层过渡单元,以保证计算的精度和效率。

求解 T 梁构件内部温度时,需将上述 FDS 火灾模型计算的构件表面温度、热流密度等结果输出并加载到 ANSYS 有限元模型中。但由于 FDS 模型与有限元模型采用的网格精度与单元类型不同,难

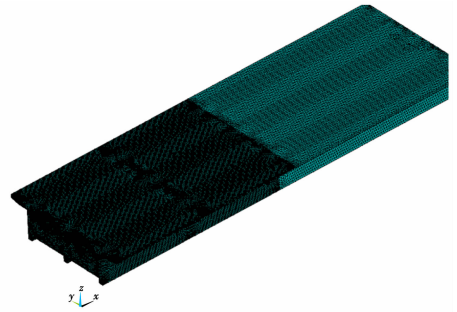


图 6 T 梁有限元模型

Fig. 6 Finite Element Model of T-girders

以实现不同软件间边界条件的映射。根据 FDS 模拟结果可知,火灾下构件边界温度、热流密度与燃烧时间和节点位置相关的大量离散数据,均可表示为一个三维曲面。将曲面时空分布荷载函数施加在 ANSYS 中,可实现不同软件之间的数据对接。

选择纵桥向由横隔梁划分的不同区段 T 梁截面 X_1 、 X_2 、 X_3 节点(肋底角部节点、肋中节点、翼板低节点)来分析 T 梁构件温度场,如图 7 所示。

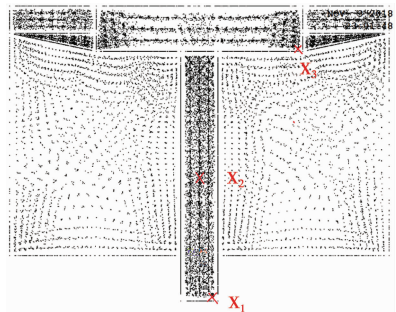


图 7 T 梁截面内温度测点布置

Fig. 7 Measuring point in T-girder

5 结果分析

5.1 梁底火焰蔓延特性

图 8(a)、(c)为火灾场景 3D、4F 中火焰蔓延情况,场景 3 火焰高度达到了翼板底,场景 4 火焰沿着板底水平流动。火灾场景 1~3 未产生顶棚射流,场景 4 发生顶棚射流,且水平蔓延长度超过横隔板间距。而根据式(1)~式(3),将场景 3 运用到封闭隧道空间,会产生顶棚射流现象。可见,T 梁桥梁底火蔓延与无量纲热功率之间的线性比值大于封闭空间的 2.58,这是由于桥下空间油池火热释放速率小于封闭空间。

图 8(b)、(c)表明横隔梁对火蔓延的影响。无横隔梁时,火焰沿梁底纵桥向水平蔓延,撞击到桥梁另一侧端横隔板处火焰汇集;有横隔梁时,火焰水平蔓延受横隔板限制,火焰仅在火源直接作用的梁底聚集。

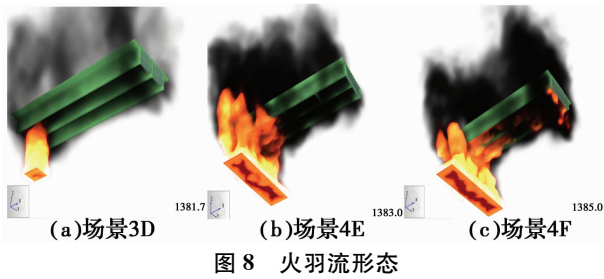


图 8 火羽流形态

Fig. 8 Fire plume dynamics of four scenarios

5.2 T 梁边界温度的时空分布特性

图 9(a)、(c)是 4E 和 3C 场景温度分布沿梁肋高度变化情况。场景 3C 中,温度在 200 s 内达到 630 °C,随后的 1 800 s 保持相对稳定。不同高度温度相近, $T5[3]$ 与 $T5[4]$ 温度时程曲线重合,高于 $T5[2] \sim T4[4]$,肋底 $T4[4]$ 温度最低,表明垂直方向温度小幅递增,到梁肋中部以上温度恒定。场景 4E 处于梁底的 $T4[4]$ 温度最高,达到 1 100 °C,随高度增高, $T5[1] \sim T5[3]$ 温度逐渐降低, $T5[4]$ 与 $T5[3]$ 温度相同。可见,火焰运动是否发生顶棚射流会影响构件表面温度分布,场景 3 未发生顶棚射流,位置较高处通过热辐射升温,场景 4 发生顶棚射流,主要通过热对流传热,而油池火传热以辐射热为主。

图 9(b)、(d)为无横隔梁的 4F、3D 场景温度空间分布,其规律与有横隔梁相似,但场景 3D 中 $T5[3]$ 、 $T5[4]$ 最高温度 540 °C,低于有横隔梁的 3C 场景同高度温度的 20%。

纵桥向横隔梁将梁长分为 4 段,图 9 中 $T5[2]-4$ 、 $T5[2]-12$ 、 $T5[2]-20$ 、 $T5[2]-28$ 为分别位于各梁段同一高度的热电偶,考虑有横梁时火焰直接作用的第一梁段 $T5[2]-4$ 温度高于无横梁时的温度,其他梁段有横隔梁时的温度低于无横隔梁时的温度, $T5[2]-12$ 、 $T5[2]-20$ 、 $T5[2]-28$ 在场景 4E 中的温度相比于 4F 分别降低 9.7%、41%、56.8%。可见,横隔梁有效降低了非火源直接作用处构件的边界温度。

图 10 为场景 4E、4F 下不同高度的热电偶 $T5[1]$ 、 $T5[2]$ 、 $T9[3]$ 、 $T7$ 测得温度沿纵桥向分布情况。由图 10 可知,无横隔梁时,不同高度处温度在离开火源作用区时均呈现线性递减规律。而有横隔梁时,每个梁段内温度相近,不同梁段边界温度跃阶降低。

综上,同样燃烧条件下,横隔梁有效降低了火焰非直接作用梁段的温度,横隔梁在顺桥向将 T 梁边界温度场进行了分区,各分区间温度跃阶降低,这一规

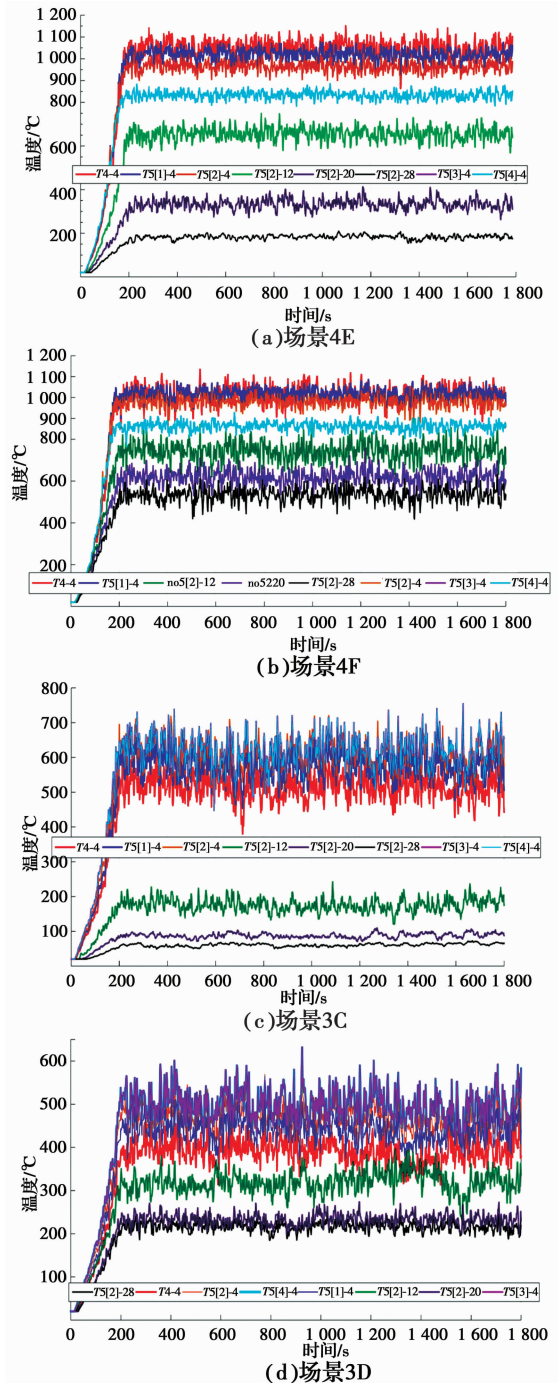


图 9 温度沿梁高分布

Fig. 9 Temperature with the height of T girder

律可用于分析 T 梁温度场按分区简化及计算模型。

5.3 T 梁截面温度场分布特性

图 11 为场景 4 时纵桥向 T 梁截面温度分布规律,相对于无横隔梁场景,有横隔梁时火源直接作用的第一梁段 900 °C 以上的高温面积大 9%,距离火源水平距离越远的其他梁段,截面温度低于无横隔梁的场景。

图 12 为场景 3 时 T 梁第 1、3 梁段断面温度分

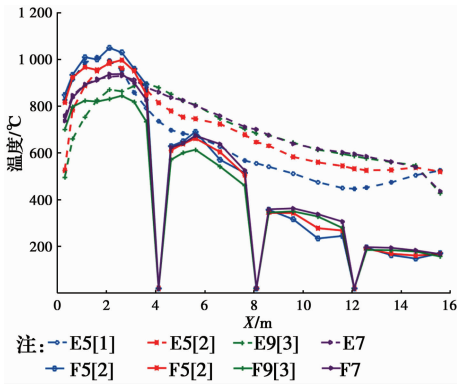


图 10 横隔板对温度作用

Fig. 10 Effect of diaphragm on temperature

布情况。无横梁时火源直接作用的第 1 梁段截面高温面积低于有横梁时的 25%，第 3 区段断面温度高于有横隔梁时的情景。这是由于边界温度分布规律不同向截面内部传热形成的结果。

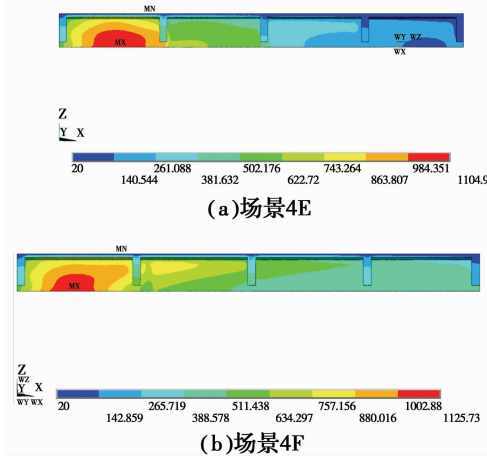
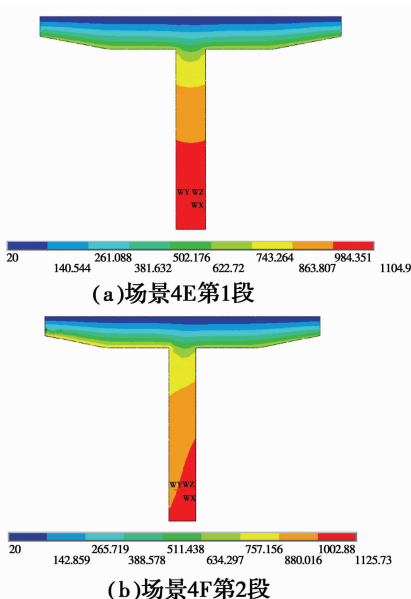


图 11 场景 4 沿梁长温度场

Fig. 11 Temperature field under scenario 4



(b)场景4F第2段

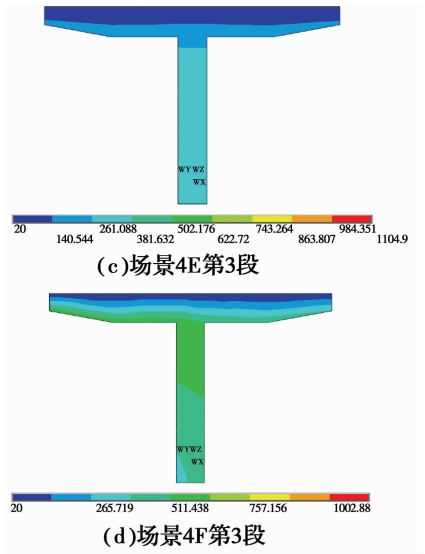


图 12 场景 4 不同梁段截面温度场

Fig. 12 Temperature fields of T-girder Sections Scenario 4

图 13 为从场景 3 时 T 梁第 1 梁段截面测点 X_1 、 X_2 、 X_3 温度梯度,实线为场景 3C,虚线为场景 3D。相比无横隔梁的 3D 场景,有横隔梁时梁肋 X_2 温度梯度增大了 33%,梁底 X_1 测点温度梯度提高了 13.3%,翼板 X_3 温度梯度提高了 5%。可见,横隔梁能有效限制热传递,使火源直接作用的梁段断面温度高于无横隔梁的情况。

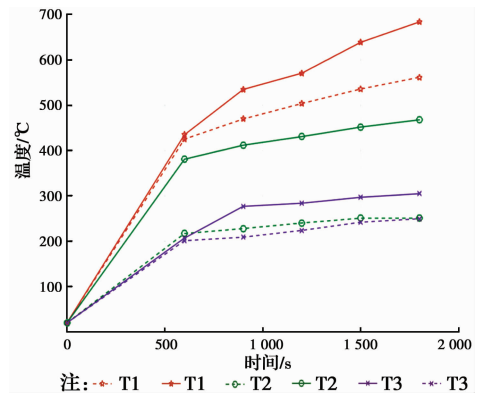


图 13 场景 3 温度梯度

Fig. 13 Temperature gradient under scenario 3

6 结论

通过钢筋混凝土多肋 T 梁桥火焰运动计算流体力学模型,分析了桥下近墩处车辆油池火灾的燃烧过程,讨论了不同火灾场景下梁下火焰蔓延特性、T 梁边界温度空间分布规律以及横隔梁对 T 梁截面温度分布的影响,结果表明:

- 1) T 梁桥梁底火蔓延与无量纲热功率之间的线性比值大于隧道封闭空间的最大值 2.58;
- 2) 未达到顶棚射流时,构件表面温度随高度增

加而增大;达到顶棚射流时,构件表面温度随高度增高而降低,到梁肋中部以上温度恒定。

3)同样燃烧条件下,横隔梁有效降低了火焰邻近区域的温度,在顺桥向将 T 梁边界温度场进行了分区,各分区间温度分别降低 9.7%、41%、56.8%。这一规律可用来简化 T 梁温度分析的计算模型。

4)火源直接作用的区域,相比无横隔梁的情况,有横隔梁时温度梯度梁肋中部增大了 33%,梁底提高了 13.3%,翼板底提高了 5%。可见,横隔梁能有效限制热传递,使火源直接作用的梁构件温度高于无横隔梁时的情况。

参考文献:

- [1] BENNETTS I, MOINUDDIN K. Evaluation of the impact of potential fire scenarios on structural elements of a cable-stayed bridge [J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2009, 19(2): 85-106.
- [2] PERIS-SAYOL G, PAYA-ZAFORTEZA I, BALASCH-PARISI S, et al. Detailed analysis of the causes of bridge fires and their associated damage levels [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(3): 04016108.
- [3] LATTIMER B Y, MEALY C, BEITEL J. Heat fluxes and flame lengths from fires under ceilings [J]. *Fire Technology*, 2013, 49(2): 269-291.
- [4] NAHID MNH. Computational study of highway bridges structural response exposed to a large fire exposure [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2015.
- [5] Woodworth M A. Fire hazard assessment for highway bridges with thermal mechanical modeling [J]. *Dissertations & Theses-Gradworks*, 2013.
- [6] NAHID M N H, SOTELINO E D, LATTIMER B Y. Thermo-structural response of highway bridge structures with tub girders and plate girders [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(10): 04017069.
- [7] ALOS-MOYA J, PAYA-ZAFORTEZA I, GARLOCK M E M, et al. Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models [J]. *Engineering Structures*, 2014, 68: 96-110.
- [8] ZHANG G, KODUR V, XIE J C, et al. Behavior of prestressed concrete box bridge girders Under hydrocarbon fire condition [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 210: 449-455.
- [9] 张岗,王高峰,毛东,等. 火灾后钢管混凝土拱桥的承载力研究[J]. *公路*, 2018(1): 56-63.
ZHANG G, WANG G F, MAO D, et al. Study of bearing capacity CFST arch bridge after fire [J]. *Highway*, 2018(1): 56-63. (in Chinese)
- [10] 姚伟发,黄侨,张娟秀. 火灾环境下钢-混凝土组合梁力学性能试验研究[J]. *工程力学*, 2016(8): 58-65.
YAO W F, HUANG J, ZHANG J X. Experimental Study on mechanical performane of steel concrete girders under fire loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2016(8): 58-65. (in Chinese)
- [11] Standard test methods for fire tests of building construction and materials: ASTM E119-E115 [S]. West Conshohocken, 2015.
- [12] Fire resistance tests-elements of building construction-Part 1: general requirements: ISO 834-1:1999 (2015) [S].
- [13] HESKESTAD G. Luminous heights of turbulent diffusion flames [J]. *Fire Safety Journal*, 1983, 5(2): 103-108.
- [14] QUIEL S E, YOKOYAMA T, BREGMAN L S, et al. A streamlined framework for calculating the response of steel-supported bridges to open-air tanker truck fires [J]. *Fire Safety Journal*, 2015, 73: 63-75.
- [15] MCGRATTAN K B, BAUM H R, HAMINS A. Thermal radiation from large pool fires [R]. National Institute of Standards and Technology, 2000, Doi: 10. 6028/nist.ir. 6546.
- [16] 钟委,王涛,梁天水. 隧道火灾中正庚烷池火燃烧特性的实验研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(8): 241-248.
ZHONG W, WANG T, LIANG T S. Experimental investigation on the burning characteristic of n-heptanes pool fire in tunnel [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(8): 241-248. (in Chinese)
- [17] KARLSSON B, QUINTIERE J. Enclosure fire dynamics [M]. CRC Press, 1999. Doi:10. 1201/9781420050219.
- [18] HASEMI Y. Surface flame spread [M]// SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016.
- [19] MA T G, QUINTIERE J G. Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations [J]. *Fire Safety Journal*, 2003, 38(5): 467-492.
- [20] BAUM, HR, McC BJ. Fire induced flow field-theory and experiment [C]//Fire Safety Science-Proceedings of the Second International Symposium, Hemisphere Publishing, Newport, Australia, 1989: 129-148.
- [21] YANG P Z, TAN X, XIN W. Experimental study and numerical simulation for a storehouse fire accident [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(7): 1445-1459.
- [22] ALOS-MOYA J, PAYA-ZAFORTEZA I, HOSPITALER A, et al. Valencia bridge fire tests: Experimental study of a composite bridge under fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 138: 538-554.