

油池火灾下空心板通道桥温度场及结构损伤分析

刘旭政^{1,2}, 邵建业¹, 郭河³, 乔磊³, 郑尚敏¹, 吴刚¹

(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.中交路桥检测养护有限公司, 北京 101301)

摘要: 为研究油池火灾下空心板通道桥梁底温度场分布及结构损伤特征, 利用 FDS 分析不同油池火灾场景下空心板通道桥梁底温度场分布, 利用 ABAQUS 对所有火灾场景中最不利的空心板梁进行热传导分析, 获取梁体内部温度场, 最后利用基于强度折减的虚拟层截面等效原理, 计算其火灾损伤程度。结果表明: 空心板通道桥跨径越小、桥下净高越大、油池面积越大, 梁底温度越高; 梁底宽度对梁底温度场的影响不显著; 在风速较小时, 梁底最高温度会升高, 但风速过大时, 火焰被吹出通道桥, 导致梁底温度变低。火灾场景 V-2 下 10#梁底绝热温度出现最大值, 达到 1 440 °C。不同受火时间下 10#梁跨中截面温度场呈现平行于受火面的层状分布, 在受火 180 min 时, 梁底混凝土和底板钢绞线的最高温度分别达到 1 417 °C 和 718 °C, 底板混凝土合计烧损深度达到 7.94 cm, 钢绞线 S1 和钢筋 S3 的剩余强度仅为 96 MPa 和 19 MPa。根据钢绞线、钢筋和混凝土虚拟层的损伤数据, 分阶段建立了油池火灾下空心板梁跨中截面抗弯承载力保有率的预测公式。研究结果可为通道桥的灾后评定、加固和修复方案制定、防火措施研究等方面提供参考。

关键词: 油池火灾; 空心板; 通道桥; 温度场; 火灾损伤

中图分类号: U447

文献标志码: A

Analysis of Temperature Field and Structural Damage of Hollow Slab Channel Bridges under Oil Pool Fire

Liu Xuzheng^{1,2}, Shao Jianye¹, Guo He³, Qiao Lei³, Zheng Shangmin¹, Wu Gang¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2.State Key Lab. of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3.China Communications Construction Road & Bridge Inspection and Maintenance Co., Ltd., Beijing 101301, China)

Abstract: To study the temperature field distribution and structural damage characteristics of hollow slab channel bridges under oil pool fire scenarios, FDS was used to analyze the temperature field distribution at the bottom of hollow slab channel bridge under different oil pool fire scenarios. ABAQUS was used to conduct heat conduction analysis on the most unfavorable hollow slab girder in all fire scenarios, and the internal temperature field of the girder was obtained. Finally, based on the equivalence principle of cross sectional virtual layer due to the reduction of the strength, the fire damage degree was calculated. The results showed that the smaller the span of hollow slab channel bridge, the larger the bridge vertical clearance and the larger the area of the oil pool, the higher the temperature at the girder bottom. The influence of girder bottom width on temperature field of girder bottom is not significant. When the wind speed is small, the maximum temperature at the girder bottom will increase, but when the wind speed is too large, the flame will be blown out of the channel bridge, resulting in lower temperature at the girder bottom. In the fire scenario V-2, the adiabatic temperature at the bottom of 10# girder reaches the maximum value, at 1 440 °C. Under different fire times, the temperature field of the mid-span section of 10# girder presents a layered distribution parallel to the fire exposure surface. When the fire-exposure time reaches 180 min, the maximum temperature of the concrete at the girder bottom and the steel strand at the bottom slab reach 1 417 °C and 718 °C respectively, the total burning depth of bottom slab concrete reaches 7.94 cm, and the residual strengths of steel strand S1 and steel bar S3 are only 96 MPa and 19 MPa. According to the damage data of steel strands, steel bars and concrete virtual layers, the prediction formula of flexural capacity retention rate of hollow slab girder under oil pool fire

收稿日期: 2025-01-04

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(20232BAB204070, 20232BAB204071)

is established in stages. The research results can provide reference for the post-disaster assessment, formulation of plans to reinforcement and repair, and fire prevention measures research of the channel bridges.

Key words: oil pool fire; hollow slab; channel bridge; temperature field; fire damage

近年来,我国在交通基建领域发展迅速,路线交叉的情况也在日益增多,当公路与公路交叉时,上行公路两端路堤间常设计空心板通道桥横跨下行公路。随着车流量的不断提升,交通类火灾事故也愈加频繁,其中最危险且发生频率最高的是罐车火灾^[1]。易燃危化品因闪点低、燃烧速度快等特点,导致罐车的罐体发生液体燃料泄漏时,极易引发大面积油池火灾,若油池火灾发生在通道桥下方,由于其桥下空间相对封闭,火灾热量散失较为困难,主梁会在火灾作用下快速升温,严重威胁通道桥的安全性。推定结构温度场是桥梁火损评估的重要一步,因此,系统地研究不同油池火灾场景下空心板通道桥的梁底温度场分布,并对油池火灾下空心板梁的损伤情况进行评估,对通道桥的防火设计、灾后损伤评估、加固和修复方案的制定等方面具有重要意义。

国内外学者在桥梁火灾试验、火灾数值模拟、防火措施和灾后损伤评估等方面展开了大量研究工作。在火灾试验方面,许肇峰等对空心板梁进行了火灾试验,获取了梁体温度场随受火时间的变化规律^[2]。罗文林等对 10 片空心板梁进行了火灾试验,分析了火灾全过程试件状态及火灾后剩余承载力,揭示了火灾对空心板梁受力性能的影响机制^[3]。Beneberu 等对 1 座预应力混凝土桥开展了油池火灾试验,发现对主梁增加防火保护将大大提高其抗火性能^[4]。张岗等对缩尺预应力混凝土双 T 形梁和箱梁分别开展了燃油火灾试验,发现双 T 形梁的耐火性能明显弱于箱梁^[5]。Alos-Moya 等对 1 座缩尺钢混组合梁桥进行了室外明火试验,发现火灾强度和火源到梁底的净距是影响火灾温度场的重要因素^[6]。在火灾数值模拟方面,李永进等利用 ABAQUS 研究了火灾下钢管混凝土叠合柱的力学性能^[7]。刘旭政等以某实际遭受火灾的预应力箱梁桥为研究对象,利用 FDS 探究了火灾下预应力箱梁表面温度分布特征,并利用 ANSYS 软件对箱梁内部温度场进行了分析^[8]。杨文旭等利用 FDS 和 ABAQUS 对火灾下悬索桥的温度场及力学响应进行了数值模拟,发现火灾强度增大会显著降低悬索桥的耐火时间^[9]。Alos-Moya 等对组合梁桥的室外明火试验进行了数值模拟,发现 FDS 可以很好地预测火灾温度变化,验证了其模拟火灾的可行性^[10]。刘旭政等采用 FDS 分析了火源面积及梁底距可燃物高度对混凝土桥梁梁底温度场的影响,并提出了混凝土桥梁在火灾后的初步评估方法^[11]。李鸣鹤等采用 FDS 分析了风速、梁底距燃烧面高度、火灾位置和火灾强度对空心板梁梁底温度场的影响^[12]。郑净等利用 FDS 分析了不同油池火灾场景下 T 梁桥边界温度分布规律,发现横隔梁可以显著降低火焰非直接作用梁段的温度^[13]。Ma 等利用 FDS 对车辆诱发的桥面火灾进行了模拟,发现风速会影响桥面火灾的燃烧过程^[14]。Wu 等分析了油罐车火灾对 PC 箱梁温度场及力学响应的影响,发现火灾会使钢束产生较大预应力损失从而降低主梁承载力^[15]。Peris-sayol 等分析了油罐车火灾对钢混组合梁桥的影响,发现下部结构为桥台时主梁的温度比桥墩时更高^[16]。在灾后损伤评估方面,龙华春等根据火灾后混凝土的颜色、敲击声音及疏松程度判断受火涵洞盖板的损伤等级^[17]。Liu 等开展了受火预应力混凝土箱梁桥的灾后检测、材料测试及荷载试验,最后对该桥的承载力进行了评估^[18]。王成明等对受火空心板梁进行了外观检查、过火温度检测和加载试验,发现钢绞线遭受的最高温度是空心板梁火损评估的重要指标^[19]。

综上所述,国内外学者在桥梁火灾方面展开了较为丰富的研究,但是很少考虑桥梁下部结构对主梁温度场的影响,本文研究的空心板通道桥的下部结构为桥台,其相对于普通墩柱桥梁,桥下空间更为封闭,桥下发生火灾时热量不易散失,主梁更容易发生结构损伤,特别是针对于油池火灾下通道桥的温度场及结构损伤尚未开展相关研究。因此,本文利用火灾动力学软件 FDS 对比分析了不同影响参数(空心板梁跨径、空心板桥梁底宽度、桥下净高、油池面积和风速)对油池火灾下通道桥梁底温度场分布的影响;将最不利场景下的温度场导入 ABAQUS 软件进行热传导分析,计算出空心板主梁内部温度场,基于强度折减的虚拟层截面等效原理计算出空心板主梁的火灾损伤程度及剩余承载力。研究结果可为通道桥的灾后评定和防火措施研究提供参考。

1 空心板通道桥概况

当两条公路出现路线交叉,下跨道路宽度不大时常采用单跨桥梁跨越。上跨桥梁跨径一般在 10 m~20 m

范围内，主梁常采用空心板构造。空心板通道桥桥下空间相对封闭，当桥下发生油池火灾时，空心板梁极易受损，危害桥梁结构安全。发生油池火灾时的三维简图见图 1。

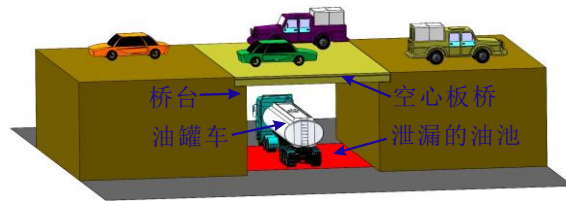


图 1 空心板通道桥三维简图

Fig.1 Three-dimensional diagram of the hollow slab channel bridge

根据下行公路不同车道数，空心板梁的跨径常取 10、13、16 或 20 m；上行公路的不同宽度则通过调整空心板梁的片数来实现。空心板梁截面信息参照交通运输部颁布的标准图，以 10 m 空心板梁为例，全长 9.96 m，梁宽 1.24 m，梁高 0.6 m，上部倒角 15 cm×8 cm，下部倒角 12 cm×8 cm，顶板和底板厚度均为 12 cm，其半立面和横断面见图 2。

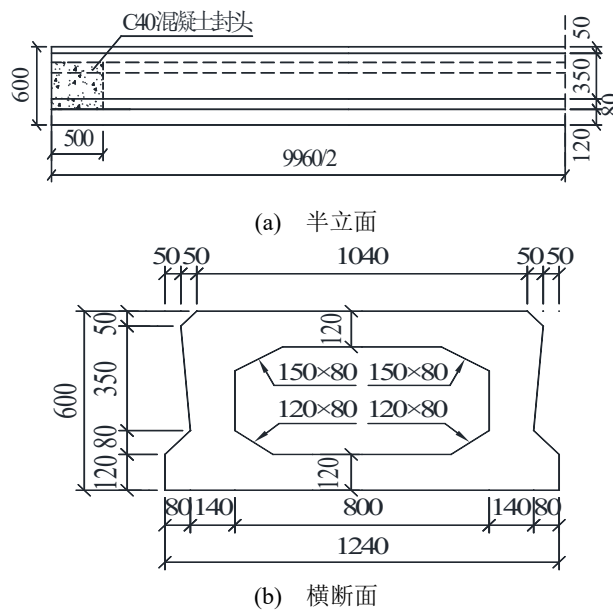


图 2 10 m 空心板梁半立面和横断面(单位:mm)

Fig.2 Half elevation and cross-section of 10 m hollow slab girder (Unit:mm)

2 通道桥 FDS 火灾模型建立

FDS 由美国国家标准与技术研究院 (NIST) 开发，是一款分析火灾流体动力学问题的通用软件，能够较为准确地模拟火灾烟气流动和空间热传递过程，其计算三维火灾问题的可靠性已经得到了许多火灾试验验证^[10,13-14]，在火灾科学领域应用广泛。因此，本文采用 FDS 模拟桥下油池火灾。

2.1 油池火灾参数设定

火灾发展过程可分为三个阶段：增长阶段、稳定燃烧阶段和衰减阶段，本文油池火灾热释放速率模型采用平方增长模型^[4]，即火灾增长阶段采用平方关系增长，在热释放速率 Q 达到最大后进行稳定燃烧，为保守考虑，不考虑衰减段，其表达式如下：

$$Q = \begin{cases} \alpha t^2 & 0 < t \leq t_{\max} \\ Q_{\max} & t_{\max} < t \end{cases} \quad (1)$$

式中： Q_{\max} 为最大热释放速率，MW； t 为火灾时间，s； t_{\max} 为热释放速率达到最大值的时间，s； α 为火

灾增长系数，取 1.0 kW/s^2 。

汽油在传统能源领域和交通运输中具有重要地位，是一种常见的罐车运输危化品，因此，本文研究的油池燃料类型为汽油，根据《SFPE 消防工程手册》^[20]，其单位面积热释放速率 q 为 2.4 MW/m^2 。

泄漏油池的面积通常决定油池火灾的严重程度，Ma 等建议将油池长度视为 12 m ，油池宽度 W 根据式 (2) 进行计算^[14]。

$$W = \frac{Q_{\max}}{28.8} \quad (2)$$

国内外学者对于油罐车火灾最大热释放速率 Q_{\max} 的建议值大多处于 $100\sim 300 \text{ MW}$ 之间，利用式 (2) 计算可得，油池宽度处于 $3.5\sim 10.4 \text{ m}$ 之间，鉴于空心板梁跨径为 10 m 时，两桥台净距仅 8.5 m ，故本文设定油池宽度最大值为 8.5 m 。泄漏油池的面积具有随机性，本文以 Q_{\max} 每间隔 50 MW 左右设定一种宽度，从而方便后续对油池面积进行参数分析。不同油池的火灾设计参数见表 1。

表 1 不同油池的火灾设计参数

油池面积/ m^2	t_{\max}/s	$q/(\text{MW}/\text{m}^2)$	Q_{\max}/MW
12×3.5	317	2.4	100.8
12×5.5	398	2.4	158.4
12×7.0	449	2.4	201.6
12×8.5	495	2.4	244.8

2.2 火灾场景设置

本文通过控制变量的方法，分别探讨空心板梁跨径 L 、通道桥梁底宽度 D 、桥下净高 H 、油池面积 S 和风速 V 对通道桥梁底温度场的影响。空心板梁跨径根据实际工程常用值进行选取；通道桥梁底宽度取 16.24 、 23.74 和 31.24 m ，分别对应空心板梁片数 13 、 19 和 24 片，相邻空心板梁间勾缝宽 1 cm ；桥下净高的下限值对应《公路工程技术标准》^[21]规定的最小值；火灾发生在混凝土桥的跨中部位往往危害更大，故本文分析时，油罐车和油池均位于空心板桥的梁底中央部位，油池长边方向为桥宽方向，油池长度取 12 m ，油池面积大小仅随油池宽度改变，具体取值见表 1；风速分别取 0 、 1 、 2 和 3 m/s 。本文定义一个典型火灾场景，其各变量取值如下： $L=10 \text{ m}$ ， $D=16.24 \text{ m}$ ， $H=6.5 \text{ m}$ ， $S=12 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$ ， $V=0 \text{ m/s}$ 。在对某变量进行分析时，仅在典型火灾场景的基础上，改变该变量的取值，其余变量取值保持不变。各火灾场景设置见表 2，其中火灾场景 I-1、II-1、III-5、IV-4 和 V-1 均为典型火灾场景。

表 2 火灾场景设置

变量	参数	火灾场景编号
空心板梁跨径	$L=10 \text{ m}$	I-1
	$L=13 \text{ m}$	I-2
	$L=16 \text{ m}$	I-3
	$L=20 \text{ m}$	I-4
通道桥梁底宽度	$D=16.24 \text{ m}$	II-1
	$D=23.74 \text{ m}$	II-2
	$D=31.24 \text{ m}$	II-3
桥下净高	$H=4.5 \text{ m}$	III-1
	$H=5.0 \text{ m}$	III-2
	$H=5.5 \text{ m}$	III-3
	$H=6.0 \text{ m}$	III-4
	$H=6.5 \text{ m}$	III-5
油池面积	$S=12 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$	IV-1

	$S=12\text{ m}\times 5.0\text{ m}$	IV-2
	$S=12\text{ m}\times 7.0\text{ m}$	IV-3
	$S=12\text{ m}\times 8.5\text{ m}$	IV-4
风速	$V=0\text{ m/s}$	V-1
	$V=1\text{ m/s}$	V-2
	$V=2\text{ m/s}$	V-3
	$V=3\text{ m/s}$	V-4

2.3 FDS 模型建立

典型火灾场景的 FDS 模型见图 3，计算域长 30 m，宽 37 m，高 13 m。模型中油罐车按实际尺寸进行简化，车长 14.25 m，车宽 2.5 m，车高 3.5 m，油罐车表面设置为钢表面，见图 4。空心板梁的绝热表面温度（Adiabatic Surface Temperature）是后续进行结构内部热传导分析的关键数据，绝热表面温度的概念由 Wickstrom 等^[22]提出，对应于假设结构为绝热体时获得的虚拟温度，通常用于计算对流和辐射传热，可以引入 ABAQUS 中进行结构热传导分析^[15-16]，所以空心板桥表面设置为绝热。地面、路堤和桥台的表面均简化设置为混凝土表面。计算域底面设为惰性，其余各面设为开放。为提高计算效率，运用 FDS 内置的多重网格技术，将模型分为 3 个网格部分，见图 3。Mesh2 是空心板桥、油罐车和油池所在的网格，且油池燃烧时，该网格空间温度最高，产生的烟气也基本处于该网格内，故网格单元尺寸应较细，设为 $0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}$ 。Mesh1 和 Mesh3 的单元尺寸可较粗，但其单元边长需是 Mesh2 的整数倍，故设为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 。由于 FDS 在分析时，物体的大小都会按网格单元尺寸进行调整，故空心板桥的实际梁底宽度为 16.24、23.74 和 31.24 m，建模时将其设为 16.25、23.75 和 31.25m。空心板桥两端各有 0.75 m 处于桥台台帽上方，因梁板与台帽的间隙较小，而网格单元边长最小为 0.25 m，导致该间隙难以创建，并且该间隙是否创建对中间 8.5 m 梁段底面温度场的影响较小，所以建模时将其忽略，让梁板与台帽紧贴，见图 3 放大部分。由于热释放速率达到最大值后，火灾温度场便开始保持稳定，为节省软件分析时间，设定 FDS 火灾模拟时长为 1 200 s，环境温度设为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

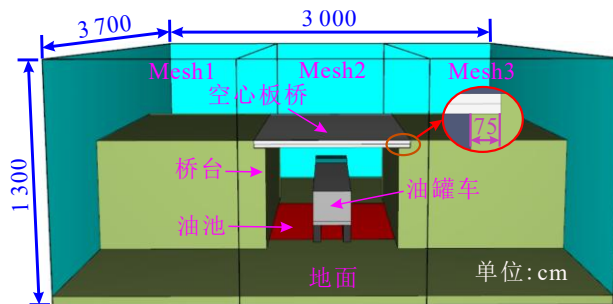


图 3 通道桥油池火灾 FDS 模型

Fig.3 FDS model of channel bridge under oil pool fire

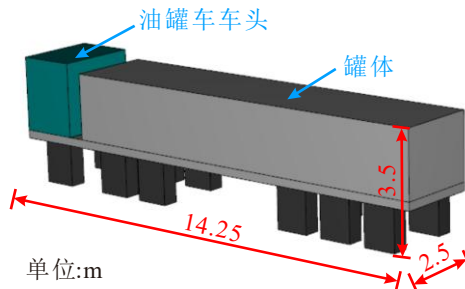


图 4 油罐车简化模型

Fig.4 Simplified model of oil tank truck

其余火灾场景的 FDS 模型按照上述同样的方式进行创建。各火灾场景 FDS 模型计算域参数见表 3，表中未列出的火灾场景计算域参数均与典型火灾场景设置相同。

表 3 各火灾场景计算域参数

Tab.3 Computational domain parameters of various fire scenarios

火灾场景编号	长/m	宽/m	高/m	网格总数
I-1 (典型火灾场景)	30	37	13	348 800
I-2	33	37	13	477 152
I-3	36	37	13	569 504
I-4	40	37	13	692 640
II-2	30	45	13	468 000
II-3	30	52	13	540 800

2.4 温度测点布置

通过设置温度测点来获取通道桥梁底绝热表面温度，用 T_a 表示。沿空心板桥跨径和桥宽方向每间隔 50 cm 布置一个温度测点，部分测点的间距因不是 50 cm 的整倍数，按间距 75 cm 进行布置，以典型火灾场景为例，空心板桥梁底温度测点布置和坐标系定义见图 5，共设置 297 个测点。由于空心板桥、油罐车和油池均关于平面 $X=4.25$ m 对称，故测点布置于梁底 1/2 区域即可，空心板桥两端各有 0.75 m 位于桥台帽上方，故该部分无温度测点。

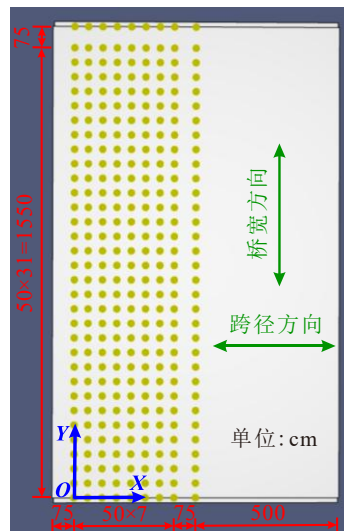


图 5 温度测点布置

Fig.5 Temperature measurement points arrangement

3 通道桥梁底温度场参数分析

3.1 梁底计算温度及温度拟合曲线

典型火灾场景下通道桥梁底部分测点的温度变化曲线及其拟合曲线见图 6，可以看出：0~495 s 时，火灾处于增长阶段，测点温度在不断升高；火灾时间超过 495 s 后，火灾进入稳定燃烧阶段，测点温度开始保持稳定，仅在某一温度值处小幅波动，文中采用拟合曲线确定其稳定温度 ($T_a^{\text{稳定}}$)，后续各测点温度均采用稳定温度。值得注意的是，本章利用 FDS 分析得到的梁底温度场为绝热温度，并非梁底混凝土的温度。

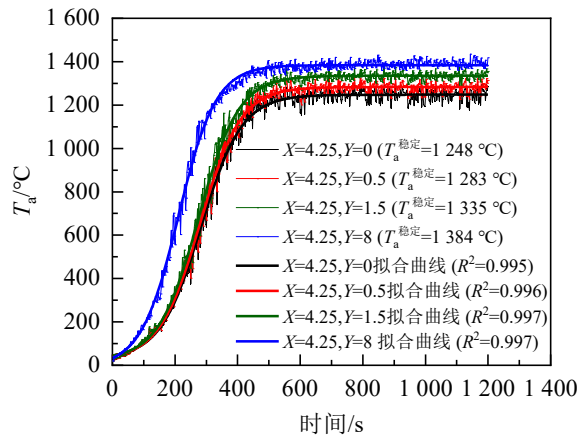


图6 部分测点的温度变化曲线

Fig.6 Temperature variation curves of some measurement points

3.2 空心板梁跨径影响分析

图7为空心板通道桥在不同跨径时的梁底温度场，可以看出：①油池火灾下空心板桥的梁底高温区分布大致呈现“十字形”；②梁底温度随跨径的增大而减小，主要是由于空心板桥的跨径增大时，桥下空间更为宽敞，火灾热量散失加快，导致梁底温度更低。

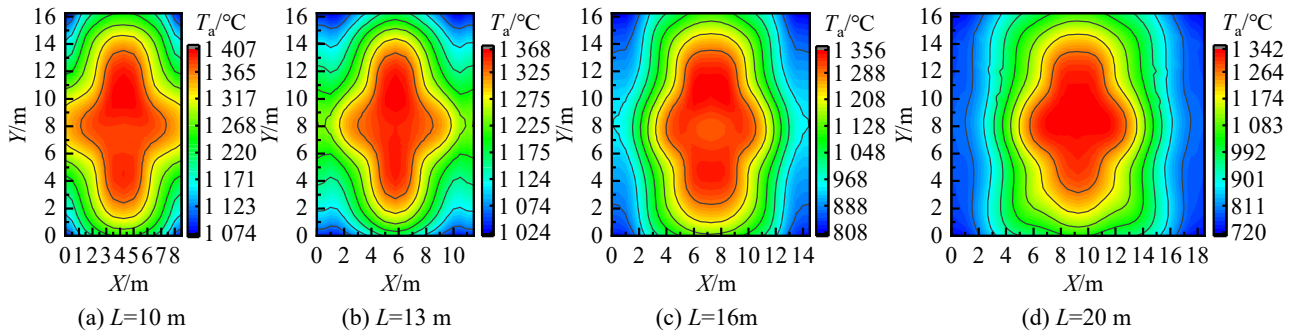


图7 不同跨径时梁底温度场

Fig.7 Temperature field of girder bottom with different spans

3.3 空心板桥梁底宽度影响分析

图8为空心板通道桥在不同梁底宽度下的梁底温度场，可以看出：各火灾场景下梁底最高温度差异较小且温度场分布情况大体一致，梁底宽度因素对油池火灾下空心板通道桥梁底温度场的影响并不显著。

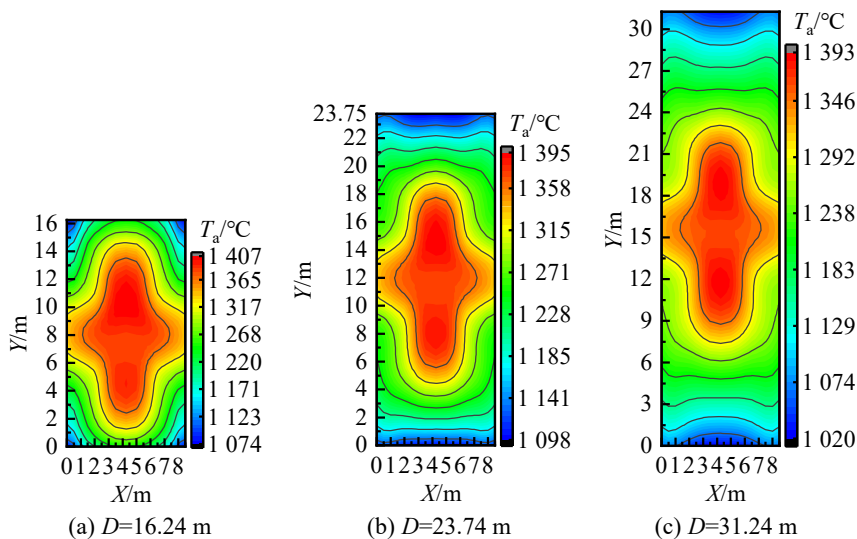


图8 不同梁底宽度时梁底温度场

Fig.8 Temperature field of girder bottom with different widths

3.4 桥下净高影响分析

图 9 为空心板通道桥在不同桥下净高时的梁底温度场，可以看出：桥下净高对梁底温度场的影响主要体现在最高温度和高温区位置。随着桥下净高的增大，梁底最高温度由 1 189 °C 升高至 1 407 °C，主要是由于桥下净高增大使得梁底逐渐由油池火焰的内焰区向外焰区转移。桥下净高由 4.5 m 增加到 6.5 m 的过程中，高温区域逐渐由 4 块→2 块→1 块进行演变，而且在桥下净高较小时，会在梁底中央部位形成低温区，这主要是由罐车外轮廓以及梁底与罐车顶面的净距较小所导致，以 $H=4.5$ m 为例，梁底与罐车顶面的净距仅 1 m，空间较为狭窄，油罐车的存在使梁底中央部位的火焰灼烧程度变小，从而形成低温区。

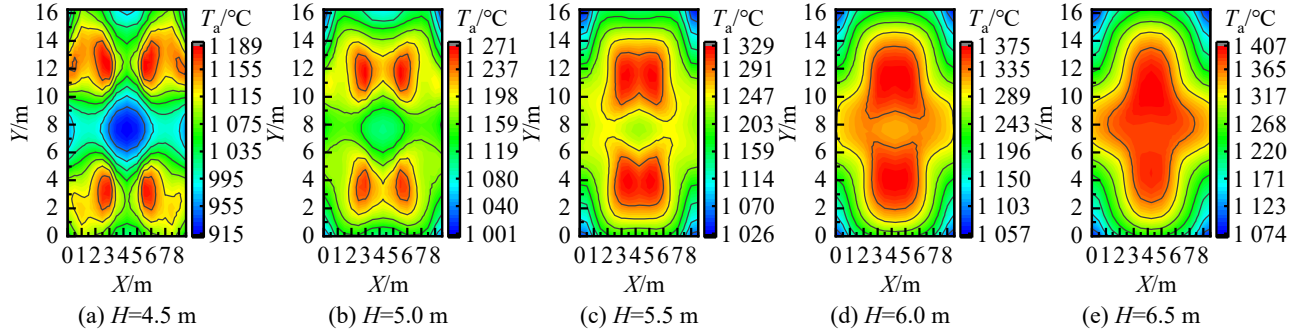


图 9 不同桥下净高时梁底温度场

Fig.9 Temperature field of girder bottom with different bridge vertical clearances

3.5 油池面积影响分析

图 10 为空心板通道桥在不同油池面积时的梁底温度场，可以看出：梁底温度随油池面积的增大而升高，主要是由于油池面积越大，燃烧时释放的热量越多，梁底温度也就越高。

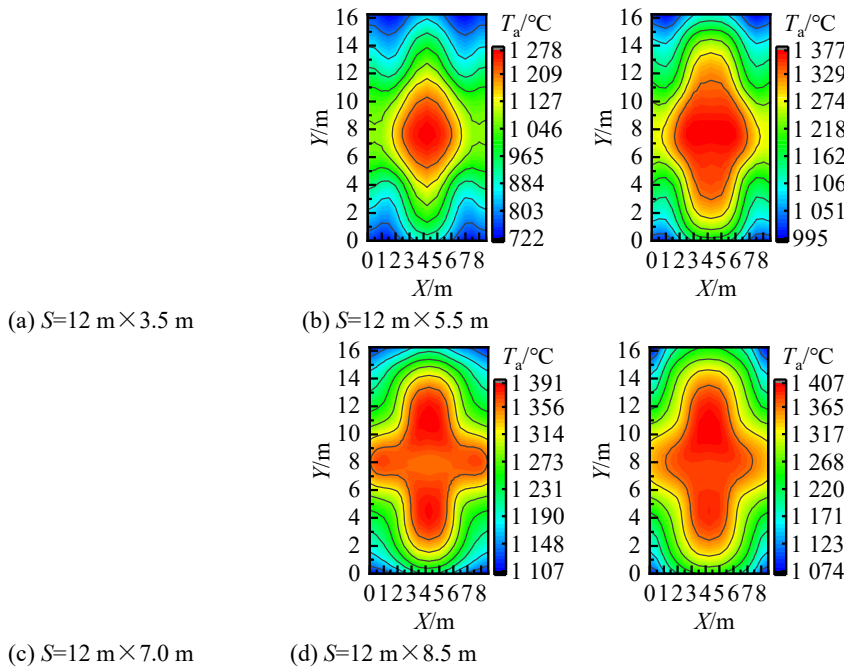


图 10 不同油池面积时梁底温度场

Fig.10 Temperature field of girder bottom with different oil pool areas

3.6 风速影响分析

图 11 为空心板通道桥在不同风速时的梁底温度场，图 12 为梁底沿中心线 $X=4.25$ m 处温度曲线，由图 11~12 可知：梁底最高温度随风速的增大呈现先升高后降低的趋势；随着风速的增大，梁底高温区逐渐向背风口移动。4 种风速下油池燃烧情况见图 13，可以看出：无风时火羽流和高温烟气均匀地由通道桥两侧洞口流出，见图 13(a)；风速较小时，火焰发生轻微倾斜，一部分本来应该由迎风口流出的火羽流和高温烟气被动地从背风口流出，使靠近背风口的梁板底部能够吸收更多热量，导致其梁底温度变高，见图 13(b)；

风速过大时，绝大部分火羽流和高温烟气都从背风口流出，且火焰倾斜程度高，火焰基本被吹出通道桥，导致梁底温度降低，见图 13(c)和图 13(d)。本文 4 种风速场景下， $V=1\text{ m/s}$ 时梁底温度出现最大值 $1440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

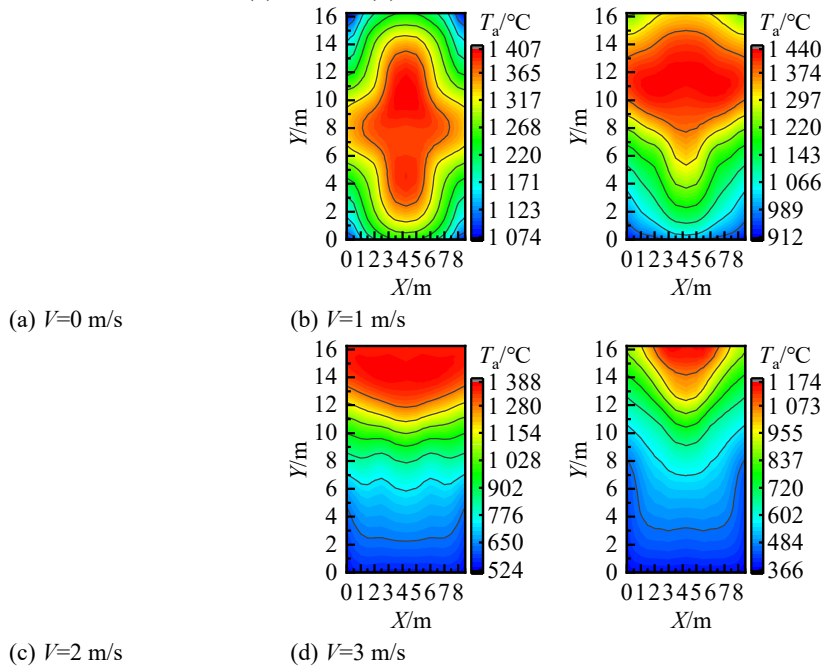


图 11 不同风速时梁底温度场

Fig.11 Temperature field of girder bottom with different wind speeds

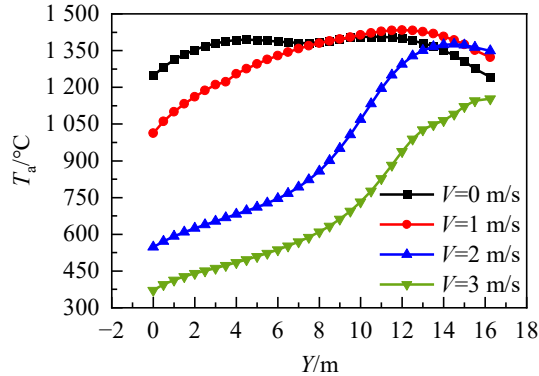


图 12 不同风速时梁底中心线 $X=4.25\text{ m}$ 处温度

Fig.12 Temperatures at the centerline $X=4.25\text{ m}$ of girder bottom with different wind speeds

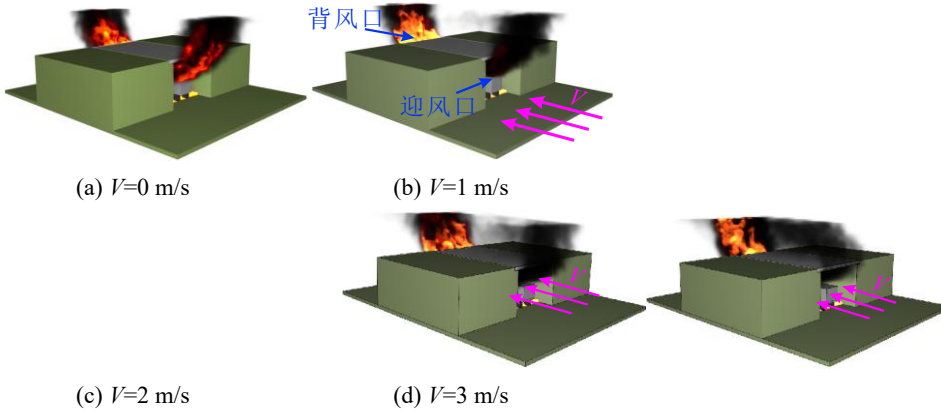


图 13 不同风速下油池燃烧图

Fig.13 Oil pool combustion diagrams with different wind speeds

4 空心板梁热传导分析

图 14 展示了最不利火灾场景(V-2)下各片梁的底面温度场,10#梁底绝热温度基本处于 1 400~1 440 °C 之间,为最不利梁,故本文以 10#梁为研究对象,分析其在火灾下的损伤特征及剩余承载力。FDS 计算得到的梁底温度场为绝热温度,并未考虑梁体内部的热传导,由于 10#梁底面各处温度差异较小,划分区域施加升温条件的意义不大,故将该梁底部所有测点的升温曲线进行拟合(见图 6),然后将各温度拟合曲线进行平均化,作为 10#梁底部受火面的升温条件,再利用 ABAQUS 进行梁内热传导模拟。

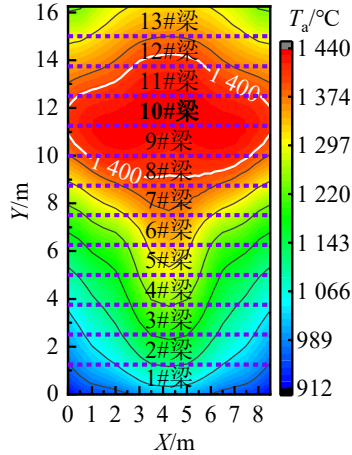


图 14 火灾场景 V-2 下各片梁的底面温度场

Fig.14 Temperature field of the each girder bottom under fire scenario V-2

4.1 ABAQUS 有限元模型建立

10#梁相关信息见图 2,钢绞线和钢筋布置见图 15,本文仅对 10#梁中间的 8.5 m 梁段进行分析。10#梁采用 C50 混凝土,钢绞线采用 1 860 MPa 高强低松弛钢绞线,钢筋采用 R235 和 HRB335 级钢筋,钢绞线和钢筋参数见表 4。混凝土导热系数、比热容和密度随温度的变化参照文献[2];钢筋和钢绞线的热工性能相近,两者导热系数和比热容随温度的变化参照文献[23],钢的密度取 7 850 kg/m³。

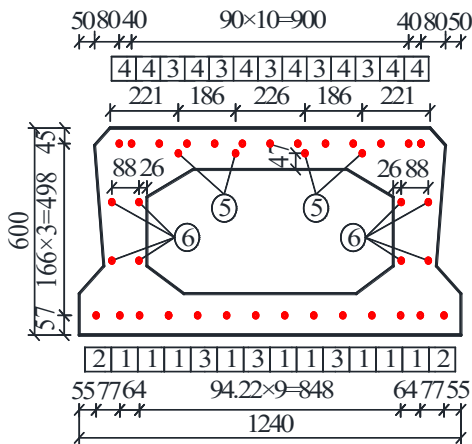


图 15 钢绞线和钢筋布置图(单位:mm)

Fig.15 Layout of steel strand and steel bar (Unit:mm)

表 4 钢绞线和钢筋参数

Tab.4 Parameters of steel strand and steel bar

编号	类型	型号
1	1 860 MPa 预应力钢绞线	7A ^{15.2}
2	HRB335 级钢筋	B25
3	HRB335 级钢筋	B12
4	HRB335 级钢筋	B10
5	R235 级钢筋	A8
6	R235 级钢筋	A6

10#梁两侧铰缝会对梁内热传导产生影响,建模时需考虑,10#梁有限元模型的跨中截面见图 16。混凝土采用 DC3D8 单元,钢绞线和钢筋采用 DC1D2 单元,钢筋节点与混凝土节点采用共节点。模型初始温度设为 20 °C, Stefan-Boltzmann 常数取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$,绝对零度取 $-273.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。有限元模型的热边界条件设置见图 16。10#梁底面为受火面,受火面对流换热系数取 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$,辐射换热系数取 $0.8^{[15]}$;10#梁的顶面有桥面铺装层覆盖,两个侧面有铰缝存在,两个端面分别与原 10#梁两端的 0.73m 梁端相接,故 10#梁顶面、两侧面和两端面均设为绝热边界;原 10#梁的两端存在混凝土封头(见图 2),使得孔洞内空气基本无法与外界产生对流换热,故孔洞壁面简化为绝热边界^[2]。

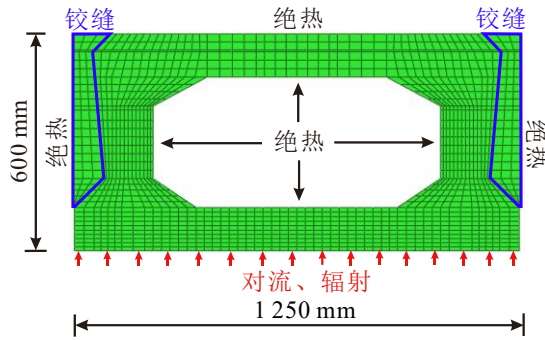


图 16 有限元模型的跨中截面

Fig.16 Mid-span section of the finite element model

10#梁仅底面受火,故由下至上将其分层,具体分层情况见图 17。底板混凝土划分为 $1.14 \text{ cm} \times 5 + 1.26 \text{ cm} \times 5$,共 10 层,布置 11 条温度监测线(A1~A11);腹板混凝土划分为 $1.6 \text{ cm} \times 5 + 2.3 \text{ cm} \times 7 + 2.8 \text{ cm} + 1.1 \text{ cm} + 2.0 \text{ cm} \times 4$,共 18 层,布置 19 条温度监测线(B1~B19);顶板混凝土划分为 $2.35 \text{ cm} \times 2 + 2.3 \text{ cm} + 0.5 \text{ cm} + 2.25 \text{ cm} \times 2$,共 6 层,布置 7 条温度监测线(C1~C7)。每条监测线上所有节点的温度平均值作为监测线温度,相邻监测线的温度平均值作为所夹混凝土层的平均温度,如 A1,2 为 A1 与 A2 监测线温度的平均值,表示底板最外层混凝土的平均温度,见图 17 红色部分,B1,2 代表绿色部分混凝土层的平均温度,C1,2 代表蓝色部分混凝土层的平均温度。由于 10#梁左右对称,钢绞线和钢筋的温度测点布置于空心板梁右半部分每根钢绞线和钢筋处即可,钢绞线和钢筋的编号见图 18。

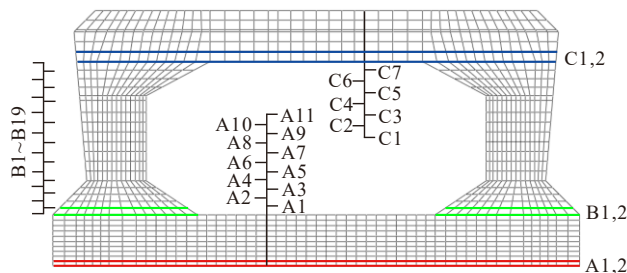


图 17 混凝土层的温度监测线

Fig.17 Temperature monitoring line of concrete layer

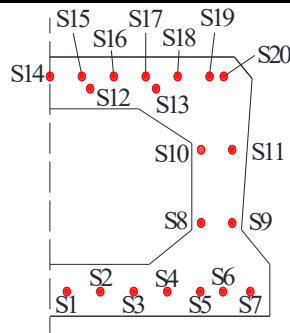
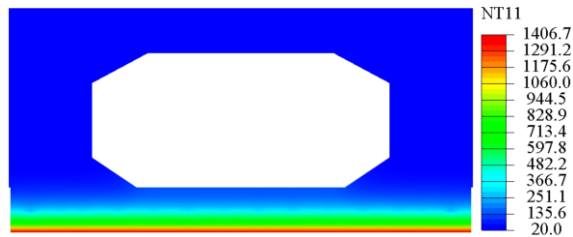


图 18 钢绞线和钢筋编号

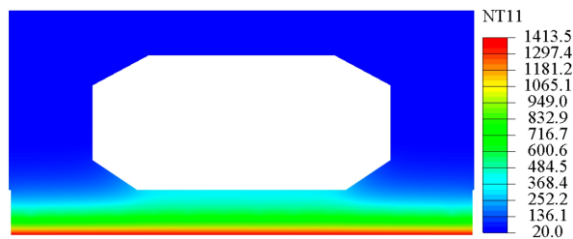
Fig.18 Numbering of steel strand and steel bar

4.3 空心板梁跨中截面温度云图

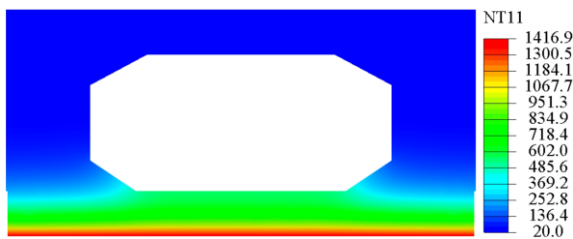
对于空心板梁，跨中截面是分析的关键截面，图 19 为不同受火时间下 10#梁跨中截面温度云图，可以看出：①截面温度场大致呈现水平层状分布；②随着受火时间的增加，梁底温度逐渐升高，受火 180 min 时，梁底混凝土温度达到 1 417 °C；③由于混凝土具有良好的热惰性，沿底板厚度方向温度会急剧降低，在受火 0~180 min 范围内，高温区域始终处在底板，腹板和顶板一直保持较低温度。



(a) 受火 60 min



(b) 受火 120 min



(c) 受火 180 min

图 19 跨中截面温度云图

Fig.19 Mid-span cross sectional temperature profiles

4.4 混凝土层温度时程分析

图 20 为底板混凝土层的温度时程曲线，可以看出：各混凝土层的平均温度随受火时间的增加而逐渐升高，但升高速率在不断变缓，在受火 180 min 时，混凝土层 A1,2 的平均温度达到了 1 321 °C。

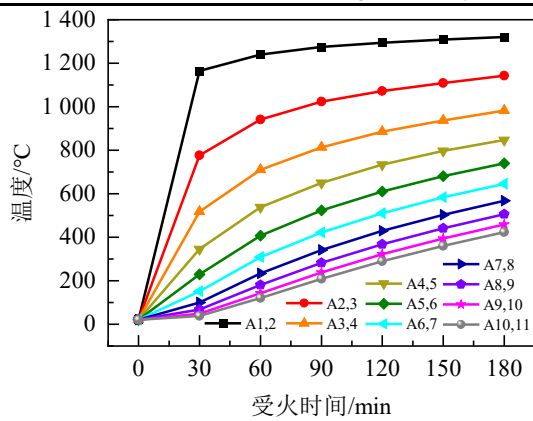


图 20 底板混凝土层的温度时程曲线

Fig.20 Temperature time history curves of bottom slab concrete layers

图 21 为腹板混凝土层的温度时程曲线，可以看出：腹板和顶板受火灾的影响较小，受火 180 min 时，仅腹板混凝土层 B1,2~B5,6 的平均温度在 100 °C 以上。

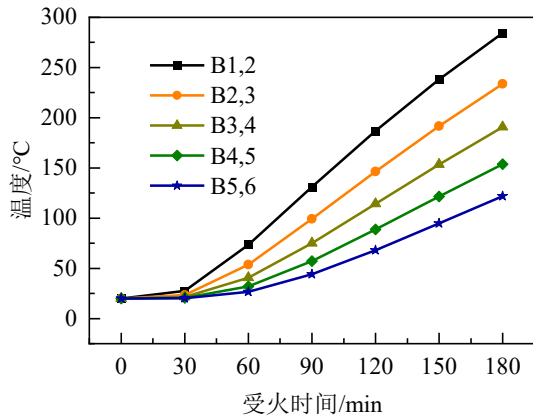


图 21 腹板混凝土层的温度时程曲线

Fig.21 Temperature time history curves of web concrete layers

4.5 钢绞线和钢筋温度时程分析

由于腹板和顶板内的钢筋远离受火面，其温度始终低于 100 °C，而底板钢绞线和钢筋因靠近受火面，温度较高，图 22 为底板钢绞线和钢筋 S1~S7 的温度时程曲线，可以看出：各底板钢绞线和钢筋的温度随受火时间的延长而增大，受火 180 min 时，钢绞线 S1 最高温度达到 718 °C；由于空心板梁存在孔洞，导致孔洞下方钢绞线 S1、S2 和钢筋 S3 的温度会略高于其他钢绞线和钢筋。

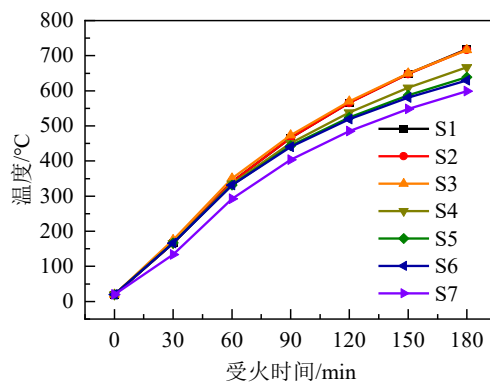


图 22 底板钢绞线和钢筋的温度时程曲线

Fig.22 Temperature time history curves of bottom slab steel strands and steel bars

5 空心板梁火灾损伤分析

混凝土和钢筋的强度随温度的变化规律参照文献[24]。本文利用基于强度折减的虚拟层等效换算原理^[25]，对不同受火时间下空心板梁的火灾损伤程度进行分析。空心板梁虚拟层划分见图 17，根据材料常温与高温等效换算原理确定烧损深度，等效换算公式如下：

$$\sigma A = \sum_{i=1}^N \sigma_i A_i \quad (3)$$

式中， σ 为常温下混凝土的强度； A 为常温下载面的面积； N 为截面虚拟层的总层数； σ_i 为第 i 虚拟层的材料强度； A_i 为第 i 虚拟层的截面面积。

5.1 空心板梁烧损分析

图 23 为不同受火时间下底板混凝土烧损深度曲线，可以看出：底板混凝土的烧损深度随受火时间的延长而逐渐增大，受火 180 min 时，底板混凝土的合计烧损深度达到 7.94 cm。由于腹板的温度较低，换算得到的烧损深度很小，在受火 180 min 时，腹板的合计烧损深度仅 0.48 cm。

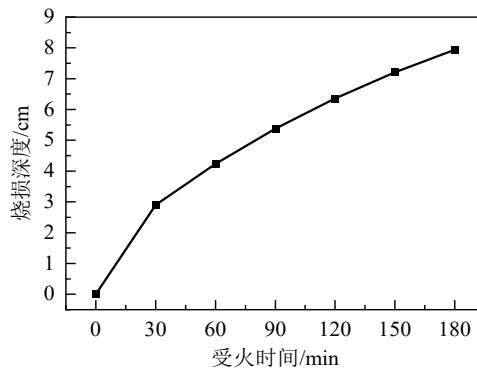


图 23 底板混凝土烧损深度

Fig.23 Burning depths of bottom slab concrete

钢绞线 S1 和 S2、S5 和 S6 的温度时程曲线几乎重合，故本文仅列出钢绞线 S1、S4 和 S5 的抗拉强度衰变曲线，如图 24 所示，可以看出：各钢绞线的抗拉强度随受火时间的延长而不断减小，在火灾前期（ ≤ 30 min），钢绞线抗拉强度降低速率较慢，梁底混凝土保护层对钢绞线起到了较好的保护作用，而火灾时间超过 30 min 后，钢绞线抗拉强度降低速率显著加快，在受火 180 min 时，钢绞线 S1、S4 和 S5 的剩余强度仅为 96、176 和 239 MPa。

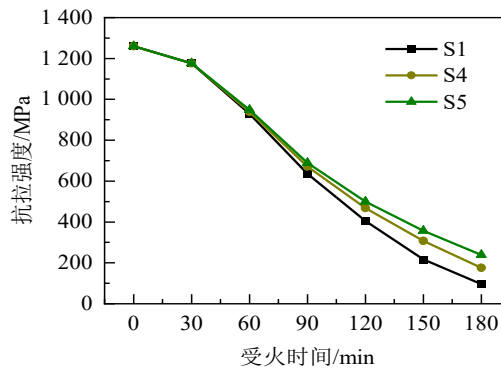


图 24 钢绞线抗拉强度衰变曲线

Fig.24 Degradation curves of strength in steel strands

钢筋 S3 和 S7 的强度衰变曲线见图 25，可以看出：普通钢筋的剩余强度随受火时间的延长而不断减小，受火 180 min 时，普通钢筋 S3 和 S7 的剩余强度仅为 19 和 51 MPa。

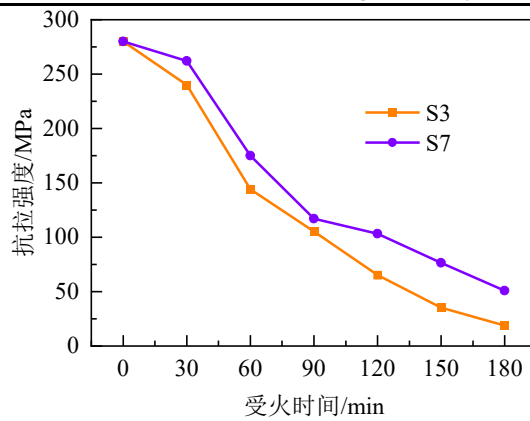


图 25 钢筋强度衰变曲线

Fig.25 Degradation curves of strength in steel bars

5.2 跨中截面抗弯承载力分析

表 5 为不同受火时间下 10#梁跨中截面抗弯承载力(计算正截面抗弯承载力时忽略较缝),可以看出:随着受火时间的增加,油池火灾下空心板梁跨中截面抗弯承载力从受火前的 953.1 kN·m 降至 139.4 kN·m。

表 5 不同受火时间下跨中截面抗弯承载力

Tab.5 Flexural capacity of mid-span section at different fire times

受火时间/min	正截面抗弯承载力/(kN·m)
0	953.1
30	887.8
60	679.8
90	481.0
120	338.3
150	224.6
180	139.4

定义空心板梁跨中截面抗弯承载力保有率 K_M 为反映火灾损伤的指标,有

$$K_M = M_t / M_0 \quad (4)$$

式中: M_t 为受火时间 t 时空心板梁跨中截面抗弯承载力; M_0 为受火前空心板梁跨中截面抗弯承载力。

图 26 为空心板梁跨中截面抗弯承载力保有率 K_M 与受火时间 t 的关系,可以看出: K_M 的衰变过程可分为两个阶段,并且其与底板钢绞线和钢筋的强度衰减规律直接相关。在阶段 1 ($t \leq 30$ min), K_M 衰变过程可近似为直线段,该阶段跨中截面抗弯承载力降低速率较慢,因为混凝土保护层对底板钢绞线和受拉钢筋起到了较好的保护作用,导致火灾前期底板钢绞线和受拉钢筋的强度衰减较慢;在阶段 2 ($t > 30$ min),底板钢绞线和钢筋的强度快速降低, K_M 衰减也随之加快,且 K_M 随 t 的延长呈抛物线递减,受火 180 min 时, K_M 仅为 0.146。以受火时间 t (单位: min) 为自变量, K_M 为因变量,分段建立油池火灾下空心板梁跨中截面抗弯承载力保有率预测公式,即

$$K_M = \begin{cases} 1 - 0.00228t & t \leq 30 \\ 1.1988 - 0.00942t + 0.00001987t^2 & 30 < t \leq 180 \end{cases} \quad (5)$$

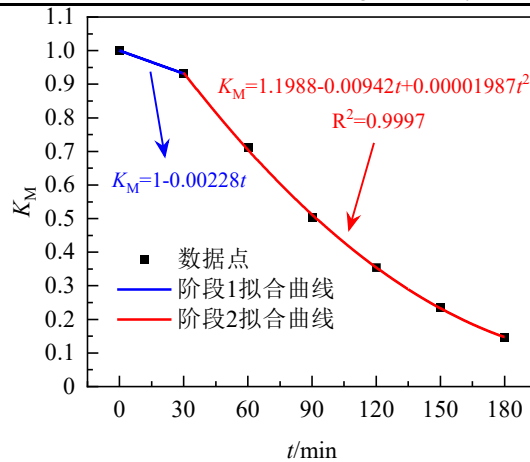


图 26 K_M 与 t 的关系

Fig.26 Relationship between K_M and t

本文详细分析了油池火灾下空心板通道桥的温度场分布及主梁损伤情况,可为灾后结构温度场推定、主梁承载力评估、加固和修复方案制定提供参考。另外,对于预应力混凝土空心板梁,通过增加底板混凝土保护层厚度或在底板表面涂覆防火涂料,不仅可以在发生火灾时有效降低底板钢绞线和受拉钢筋的温度以提高主梁抗火能力,而且可以延长底板钢绞线和受拉钢筋达到较高温度的时间,为消防救援提供更多时间。

6 结论

采用 FDS 与 ABAQUS 相结合的方法,对油池火灾下空心板通道桥的温度场分布及损伤情况进行了研究,得出以下结论:

1) 利用 FDS 模拟油池火灾过程,发现空心板桥跨径越小、桥下净高越大、油池面积越大,梁底温度越高;空心板通道桥梁底宽度对油池火灾下梁底温度场的影响较小;在风速较小时,梁底最高温度会升高,但风速过大时,火焰被吹出通道桥,导致梁底温度变低。在所有火灾场景中,场景 V-2 下梁底绝热温度出现最大值,达到 1 440 °C。

2) 利用 ABAQUS 对所有油池火灾场景中最不利的一片梁进行热传导分析,发现不同受火时间下空心板梁跨中截面温度场呈现平行于受火面的层状分布,受火 180 min 时,梁底混凝土和底板钢绞线的最高温度分别达到 1 417 °C 和 718 °C。

3) 分析了不同受火时间下混凝土烧损深度以及钢绞线和普通钢筋的强度衰变特征,受火 180 min 时,底板混凝土合计烧损深度达到 7.94 cm,部分钢绞线和钢筋的剩余强度仅为 96 MPa 和 19 MPa。

4) 分析了油池火灾下空心板梁跨中截面抗弯承载力保有率的衰变规律,并分阶段建立了不同受火时间下空心板梁跨中截面抗弯承载力保有率的预测公式。

参考文献:

- [1] 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(01):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(01):1-11.
- [2] 许肇峰, 陈映贞, 饶瑞.火灾下混凝土空心板温度场及损伤规律研究[J].中国公路学报,2019,32(01):87-98.
XU Z F, CHEN Y Z, RAO R. Temperature fields and damage pattern of hollow-core concrete slab exposed to fire[J]. China Journal of Highway and Transportation, 2019,32(01):87-98.
- [3] 罗文林,刘其伟,储智峰.预应力混凝土空心板梁火灾损伤特性研究[J].桥梁建设,2021,51(02):91-98.
LUO W L, LIU Q W, CHU Z F. Study of fire damage characteristics of prestressed concrete hollow slab beam[J]. Bridge Construction,2021,51(02):91-98.
- [4] BENEBERU E, YAZDANI N. Residual strength of CFRP strengthened prestressed concrete bridge girders after hydrocarbon fire

- exposure[J]. *Engineering Structures*, 2019, 184:1-14.
- [5] 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(01):210-221.
ZHANG G, SONG C J, LI X Y, et al. Experimental Study on fire resistance of prestressed concrete girders under fuel fire exposure[J]. *China Journal of Highway and Transportation*, 2022,35(01):210-221.
- [6] 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.
- [7] 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(06): 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(06):10-17.
- [8] 刘旭政,余晨曦,饶文真,等.受火预应力混凝土箱梁桥温度场数值模拟分析[J].*防灾减灾工程学报*,2024,44(06): 1377-1385.
LIU X Z, YU C X, RAO W Z, et al. Numerical simulation of temperature field of prestressed concrete box girder bridge after fire exposure[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*,2024,44(06):1377-1385.
- [9] 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(01):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(01): 53-59+81.
- [10] ALOS-MOYA J, PAYA-ZAFORTEZA I, HOSPITALER A, et al. Valencia bridge fire tests: Validation of simplified and advanced numerical approaches to model bridge fire scenarios[J]. *Advances in Engineering Software*, 2019, 128: 55-68.
- [11] 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(01):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.
- [12] 李鸣鹤,刘志文,邵光强.桥下火灾空心板梁底温度场数值模拟[J].*公路交通科技*,2023,40(11):123-130+156.
LI M H, LIU Z W, SHAO G Q. Numerical simulation on temperature field of hollow slab girder bottom in fire under bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*,2023,40(11): 123-130+156.
- [13] 郑净,李小珍,毛小艺.油池火下横隔梁对多肋钢筋混凝土 T 梁桥温度场的影响[J].*土木与环境工程学报(中英文)*,2019,41(03):104-110.
ZHENG J, LI X Z, MAO X Y. Impact analysis of transverse diaphragms on the temperature field of reinforced concrete T-girder bridge under pool fires[J].*Journal of Civil and Environmental Engineering*,2019,41(03):104-110.
- [14] MA R J, CUI C J, MA M L, et al. Numerical simulation and simplified model of vehicle-induced bridge deck fire in the full-open environment considering wind effect[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*,2021,17(12): 1698-1709.
- [15] WU X Q, HUANG T, AU F T K, et al. A localized fire model for predicting the surface temperature of box girder bridges subjected to tanker truck fire[J]. *Fire Technology*, 2020, 56: 2059-2087.
- [16] PERIS-SAYOL G, PAYA-ZAFORTEZA I, ALOS-MOYA J, et al. Analysis of the influence of geometric, modeling and environmental parameters on the fire response of steel bridges subjected to realistic fire scenarios[J].*Computers & Structures*,2015,158:333-345.
- [17] 龙华春,丁杰栋,杨晓娟,等.公路盖板涵洞混凝土火灾损伤特征分析[J].*华东交通大学学报*,2009,26(01):19-24.
LONG H C, DING J D, YANG X J, et al. Damage feature analysis of the highway culvert concrete in conflagration [J].*Journal of East China Jiaotong University*,2009,26(01): 19-24.
- [18] 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.
- [19] 王成明,李捷,刘其伟,等.火损后预应力混凝土空心板梁检测、评估与加固技术研究[J].*公路交通科技*,2018, 35(01):79-87+104.
WANG C M, LI J, LIU Q W, et al. Study on detection, evaluation and reinforcement technology on fire damaged PC hollow beam[J].*Journal of Highway and Transportation Research and Development*,2018,35(01):79-87+1044.
- [20] HURLEY M J, GOTTUK D, HALL J R, et al. SFPE hand-book of fire protection engineering[M].5th ed. New York:

Springer,2016.

[21]中华人民共和国交通运输部.公路工程技术标准:JTG B01-2014[S].北京:人民交通出版社,2014.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard for highway engineering:JTG B01-2014[S].Beijing:China Communications Press,2014.

[22]WICKSTROM U, DUTHINH D, MCGRATTAN K. Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures[C]//Proceedings of the Eleventh International Interflam Conference. London: Interscience Communications,2007:167.

[23]European Committee for Standardization.Eurocode 3: design of steel structures-Part 1-2: general rules-structural fire design: EN 1993-1-2[S]. Brussels:European Committee for Standardization,2005.

[24]European Committee for Standardization.Eurocode 2: design of concrete structures-Part 1-2: general rules- structural fire design: EN 1992-1-2[S].Brussels: European Committee for Standardization,2004.

[25]王翠娟.火灾模式下多梁式混凝土 T 型梁桥结构性能研究[D].西安:长安大学,2013.

WANG C J.Study on structure performance for multi-beam concrete T-shaped section beam girder subjected to fire[D].Xi'an:Chang'an University,2013.



通信作者: 刘旭政 (1980—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为桥梁结构安全评价。E-mail: urbwolf@126.com。