

# 火灾对钢筋混凝土箱梁桥力学特性影响研究

邹兰林, 黄俊捷

武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年10月30日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2023年12月28日

## 摘要

对某钢筋混凝土箱梁桥火灾过程进行模拟, 研究了火灾高温对钢筋混凝土箱梁桥的力学特性影响。通过查阅现场资料确定模型边界条件以及混凝土本构模型, 同时考虑钢筋和混凝土的热工参数因高温影响而变化, 在此基础上得出桥梁随时间和空间变化的温度场。将自重与车道荷载作用下火灾前和火灾后该钢筋混凝土箱梁桥力学参数进行比较, 研究其力学变化规律, 并通过静载试验对其规律进行验证。结果表明, 对于小跨径钢筋混凝土箱梁桥受火后的温度场呈单峰状分布, 且受火处温度达到峰值; 对混凝土而言, 由于直接与火源接触, 材料受高温影响严重, 其强度损失远高于钢筋; 并由于各材料力学性能的退化, 导致桥梁受火跨整体承载能力降低。

## 关键词

钢筋混凝土箱梁桥, 火灾, 力学特性, 静载试验

# Study on the Influence of Fire on the Mechanical Properties of Reinforced Concrete Box Girder Bridge

Lanlin Zou, Junjie Huang

School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Oct. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The fire process of a reinforced concrete box girder bridge was simulated, and the influence of high temperature on the mechanical properties of reinforced concrete box girder bridge was studied. The boundary conditions of the model and the constitutive model of concrete are determined by consulting the field data, and the thermal parameters of steel and concrete are considered to change due to the influence of high temperature. On this basis, the temperature field of the bridge

with time and space is obtained. The mechanical parameters of the reinforced concrete box girder bridge before and after fire under self-weight and lane load are compared to study its mechanical variation law, and the law is verified by static load test. The results show that the temperature field of small span reinforced concrete box girder bridge after fire is a single peak distribution, and the temperature at the fire reaches the peak value. For concrete, due to direct contact with the fire source, the material is seriously affected by high temperature, and its strength loss is much higher than that of steel bar; due to the degradation of the mechanical properties of each material, the overall bearing capacity of the bridge under fire is reduced.

## Keywords

Reinforced Concrete Box Girder Bridge, Fire, Mechanical Properties, Static Load Test

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钢筋混凝土箱梁桥具有横向抗弯、抗扭性好, 预制梁片数量少, 现场浇筑时所用混凝土量较少, 结构稳定性好等优点[1], 因而在我国高速公路、城市道路和地方道路路网中被广泛应用。笔者在湖北省内某高架桥定期检测项目中发现, 该高架桥下由于堆积易燃垃圾、木柴以及其他易燃物, 在夏季极易发生火灾。桥梁火灾与一般建筑火灾相比具有受火面广、受火时间长、难以被及时发现等特点[2]。桥梁火灾一旦发生, 将会对桥梁的结构性能以及使用者的人身安全造成不可估量的危害。

## 2. 桥梁概况和火灾背景

### 2.1. 桥梁概况

此工程桥梁位于湖北某地, 总长 60 m, 上部结构为等截面斜腹板普通钢筋混凝土连续箱梁, 车道为单幅双向 2 车道, 基本跨径 20 m, 箱梁截面为单箱单室, 桥面宽度为 10 m, 其桥跨组合为(20 + 20 + 20) m, 设计荷载为公路 I 级, 桥墩均采用钢筋混凝土柱式墩, 桥台均采用一字型墙式桥台。

### 2.2. 火灾背景



Figure 1. Web concrete spalling, steel bar exposed

图 1. 腹板混凝土剥落、钢筋外露



**Figure 2.** Floor blackened, concrete spalling  
**图 2.** 底板熏黑、混凝土剥落

2022年5月3日凌晨,该桥第一跨桥下发生火灾,此次火灾一共持续大约30 min,经由当地消防部门全力扑救,但依旧对桥梁造成了十分严重的损害以及不同程度上的熏黑。

火灾后经过现场检测发现,该桥梁第一跨地板以及左右两侧腹板存在不同程度的烧灼痕迹,多处出现混凝土剥落,保护层破损等问题,如图1~图2所示。

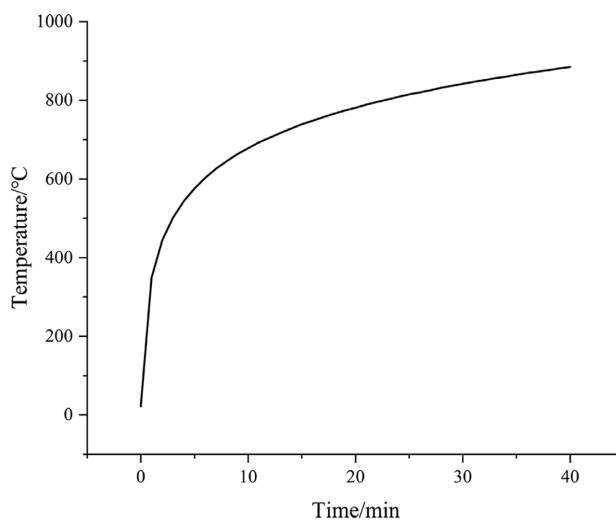
### 3. 火灾温度场的确定及各材料力学、热工性能参数分析

在火灾高温下,钢筋混凝土结构会在很大程度上遭到破坏,具体表现在:钢筋、混凝土的强度和弹性模量等力学性能参数在火灾的高温灼烧下不断下降,结构内各材料之间的黏结性能也持续衰减,这将对结构的安全性能和耐久性造成巨大影响[3]。

#### 3.1. 火灾等效时间模型及参数

##### 3.1.1. 火灾温度场的评定标准

目前常用的火灾标准升温曲线包括ISO-834、Eurocode、ASTM-E119和CAN4-S101等火灾升温曲线。根据火灾现场调研情况以及现场检测结果,确定火灾升温曲线为ISO-834标准升温曲线,其升温过程如图3所示。



**Figure 3.** ISO-834 standard temperature rise curve  
**图 3.** ISO-834 标准温升曲线

### 3.1.2. 混凝土在高温下的热工性能

结构温度场的分布及变化对材料高温力学性能无太大影响, 但与环境温度及材料热工性能有着密切的关系。混凝土的热工特性主要由密度、比热容、热传导系数这几个参数来反应, 在火灾的影响下, 这些参数会随着温度升高而改变, 取值如下表 1 所示。

**Table 1.** The change of thermal parameters of concrete under high temperature

**表 1.** 高温下混凝土热参数变化

温度/°C	比热容	热传导系数	质量密度
20	900	1.585	2395
100	900	1.453	2372
300	1050	1.161	2273
500	1100	0.924	2188
700	1100	0.743	2113
900	1100	0.618	2037

## 3.2. 火灾高温下混凝土性能

混凝土是一种非线性材料, 其性能随着其配合比的变化而变化, 在我国桥梁建设中, 采用的一般都是强度较高的高性能混凝土[4], 火灾高温对其强度造成影响的同时, 也影响了其力学特性和热工特性。不仅如此, 温度的高低也会对混凝土的力学特性和热工性能造成不同程度的损害, 从而影响结构的安全性[5]。

### 3.2.1. 火灾高温对混凝土强度影响

在高温的影响下混凝土的强度也会遭到破坏, 混凝土抗拉强度、抗压强度也会有一定的衰减, 混凝土的抗拉强度、抗压强度、弹性模量随温度升高的降低系数如下表 2 所示。

**Table 2.** Reduction coefficient of concrete strength and elastic modulus at high temperature

**表 2.** 高温下混凝土强度、弹性模量降低系数

温度/°C	降低系数		
	抗拉强度	抗压强度	弹性模量
20	1.00	1.00	1.00
100	0.95	0.70	0.89
300	1.10	0.45	0.57
500	0.85	0.30	0.26
700	0.40	0.20	0.09
900	0.10	0.00	0.07

### 3.2.2. 火灾高温对钢筋强度影响

在火灾的影响下, 钢筋的抗拉强度将会根据温度存在不同程度的衰减[6], 其在不同温度下的抗拉强度如下表 3 所示。

**Table 3.** Tensile strength table of ordinary steel bar after fire

**表 3.** 受火后普通钢筋抗拉强度表

温度/°C	普通低碳钢筋	普通低合金钢筋	冷加工钢筋	高强钢丝
100	1.00	1.00	1.00	1.00
200	1.00	1.00	0.84	0.80

Continued

300	1.00	0.85	0.67	0.60
400	0.67	0.75	0.52	0.40
500	0.52	0.60	0.36	0.20
600	0.30	0.40	0.20	-
700	0.05	0.20	0.05	-

在高温条件下, 钢筋材料的弹性模量会随着温度的升高而有下降的趋势[7]。通过以往学者对各类钢筋在高温条件下的试验表明, 在温度升高的情况下, 钢筋的弹性模量存在以下变化规律:

$$E_s(t) = \frac{E_s}{1.03 + 7 \times (t - 20)^6 \times 10^{-17}} \quad (1)$$

(1)式中  $E_s(t)$  为  $t$  温度时钢筋的弹性模量,  $E_s$  为常温下钢筋的弹性模量。

## 4. 基于有限元模型的热 - 力耦合分析

### 4.1. 热 - 力耦合分析过程

本次建模依据软件中提供的间接耦合法进行建模分析, 考虑到温度场对材料非线性的影响, 在分析中需要不断迭代, 并将温度荷载与静力荷载分别作为两个荷载步进行分步施加。

在分析过程中, 由于温度场而引起的结构变形十分微小, 在实际建模中这种材料变形对于温度分布的耦合作用不会对建模的精度产生影响, 所以在本次建模中不考虑瞬态热与静力结构的双向耦合过程[8]。

### 4.2. 有限元模型的建立

本工程实例中, 混凝土标号为 C50, 钢筋标号采用 HRB335, 有限元模型网格划分情况如下图 4 所示。其中材料参数使用本文在第三章所示的数值, 热 - 力耦合分析边界条件设置如图 5 所示。

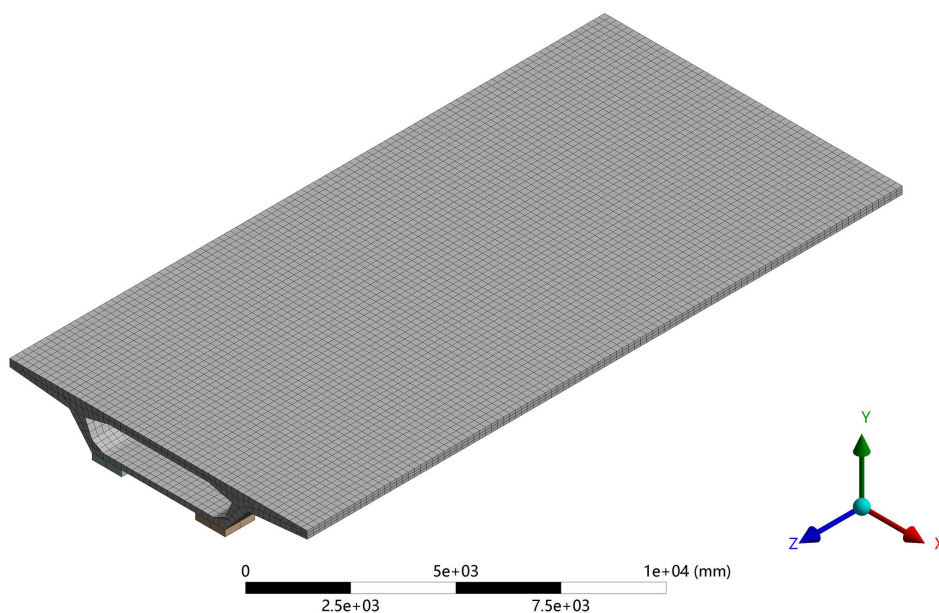


Figure 4. Mesh division of finite element model

图 4. 有限元模型网格划分

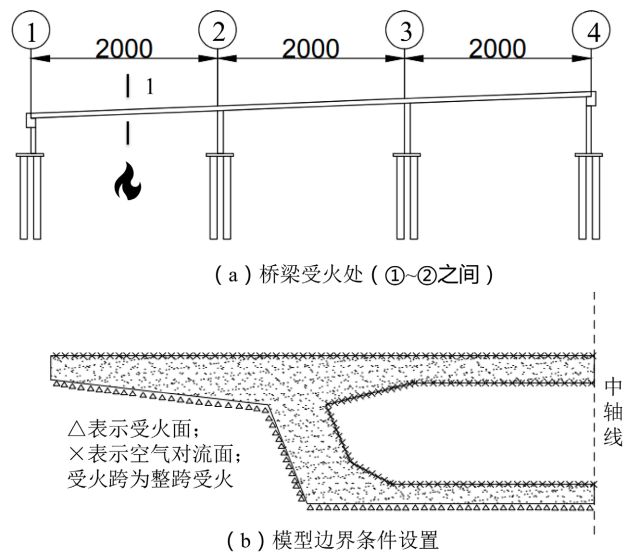


Figure 5. Boundary conditions of model temperature field  
图 5. 模型温度场边界条件

### 4.3. 有限元模型温度场分析

本次受火桥温度场模拟依据火灾现场调查报告设定为 40 min，控制截面选取受火跨跨中截面，研究对象选取跨中顶板中点与跨中底板中点，分析结果如图 6 所示。

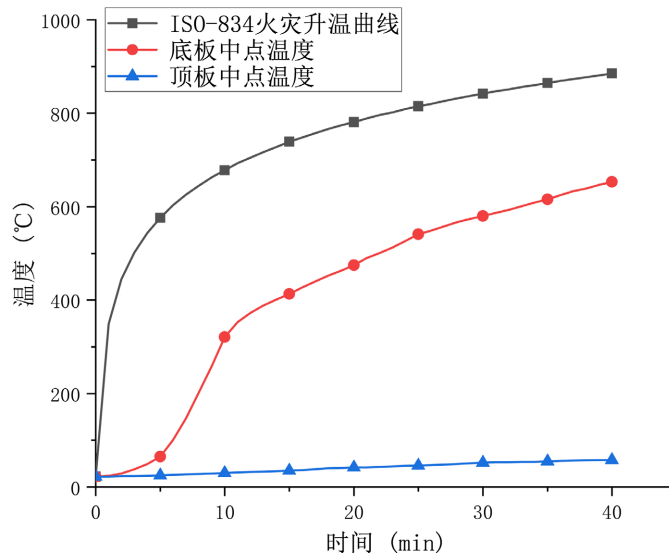
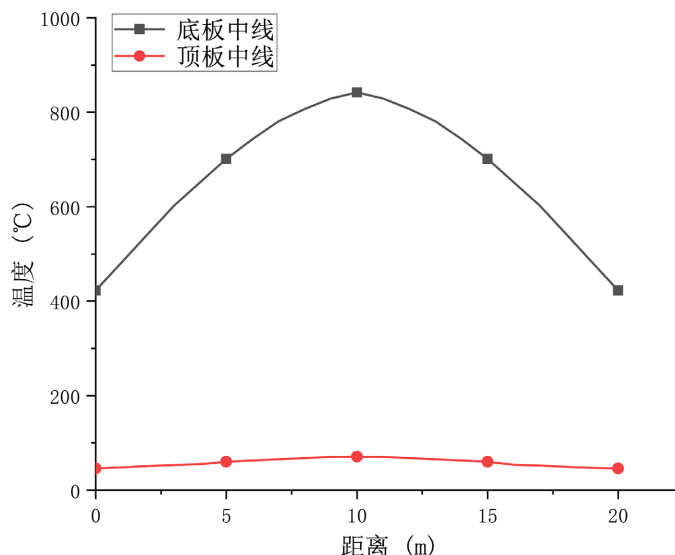


Figure 6. The temperature change curve of measuring point with time  
图 6. 测点温度随时间变化曲线

由图中不难看出，三个测点的升温曲线均是非线性变化，且距离火源均有一定的距离，所以升温曲线相对于 ISO-834 标准火灾升温曲线较为滞后，但与升温曲线趋势相同。底板中点处因最靠近火源，温度最高，而顶板中点因为距离较远，升温最缓慢。

以受火跨顶板轴线与底板轴线受火 40 min 时为研究对象，将受火面设置在跨中位置，其温度随空间变化的温度场如图 7 所示。



**Figure 7.** The temperature variation curve of the measuring point with space  
**图 7.** 测点温度随空间变化曲线

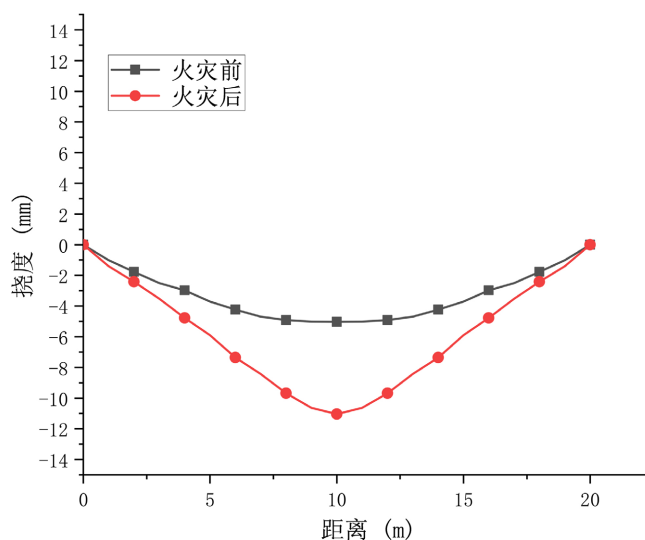
由图中易知, 该桥梁受火跨的跨中截面在仅底板受火的情况下, 底板由于更靠近火源, 温度最高值达到了 885°C, 而顶板由于距离火源较远以及空气的自然对流等因素导致温度仅有 71°C。

#### 4.4. 力学性能影响分析

本研究拟以该模型底板中线为研究对象, 考虑施加温度场荷载以及未施加温度场荷载的桥梁模型分别在自重状态下以及自重作用 + 车道荷载作用下的挠度与应力的前后变化, 从而得出火灾作用下钢筋混凝土箱梁桥的力学特性退化规律。

##### 4.4.1. 挠度对比分析

据《JTGD60—2015 公路桥涵设计通用规范》中标示, 取自重系数为 1.0, 车道荷载系数为 0.7, 模拟火灾 40 min 后的挠度分析结果如图 8 所示。



**Figure 8.** Comparative analysis of deflection before and after fire  
**图 8.** 火灾前后挠度对比分析

由图 8 中可以看出, 在车道荷载作用下并考虑自重作用影响, 受火跨底板挠度最大值由火灾前的 5.03 mm 增加到火灾后的 11.04 mm, 增长幅度高达 119.4%。

#### 4.4.2. 应力对比分析

取火灾前与火灾后 40 min 为研究对象, 底板处应力如下图 9 所示。

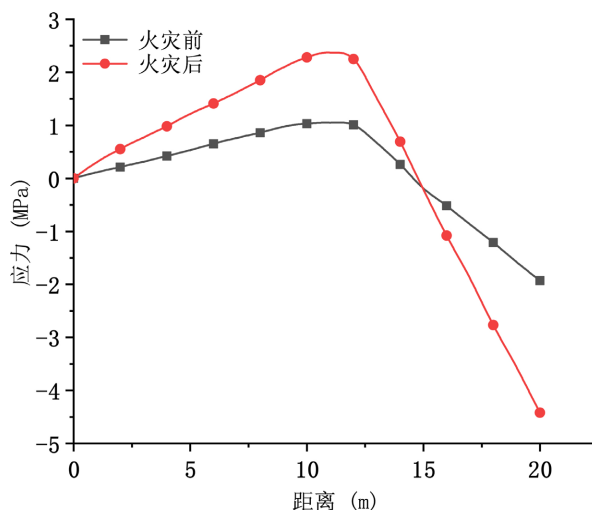


Figure 9. Stress before and after fire  
图 9. 火灾前后应力对比分析

由图 9 可知, 在自重与设计荷载的作用下, C50 混凝土的抗拉强度在火灾后退化严重。底板处拉应力最大值由 1.05 MPa 变为 2.37 MPa, 涨幅为 125.7%。支点截面的压应力最大值由 1.93 MPa 变为 4.42 MPa, 涨幅达到了 129.0%。由《混凝土结构设计规范》GB50010-2010 可知, C50 混凝土的轴心抗拉强度设计值为 1.89 MPa, 故此时桥梁在极限状态下的承载力已不符合规范要求。

#### 4.4.3. 各材料力学性能变化分析

基于第二节中温度场分析结果, 研究火灾后底板处各材料在不同深度下其力学性能的变化, 并分析各材料随深度变化在不同温度下的性能退化规律。由《火灾后建筑结构鉴定标准》可知, 底板处混凝土与钢筋的强度折减系数如表 4 所示[9]。

Table 4. The reduction coefficient of mechanical properties of each material at the bottom plate  
表 4. 底板处各材料力学性能折减系数

距离表面深度/mm	所达到最高温度/℃	混凝土抗压强度折减系数	钢筋极限强度折减系数
20	775.3	0.187	0.132
40	660.3	0.360	0.280
60	548.2	0.528	0.424
80	436.1	0.696	0.568
100	323.2	0.865	0.713
120	211.9	0.982	0.856

如上表所示, 温度随混凝土深度逐渐降低, 越靠近底板位置温度越高, 温度对混凝土抗压强度的影响越明显。火灾高温对于底板处钢筋的极限强度影响同样较大, 且随着温度升高, 钢筋的极限强度呈下降趋势。经现场检测, 该桥底板处混凝土保护层约为 30~40 mm, 此时底板处钢筋受损同样严重。



## 5. 静载试验结果分析及验证

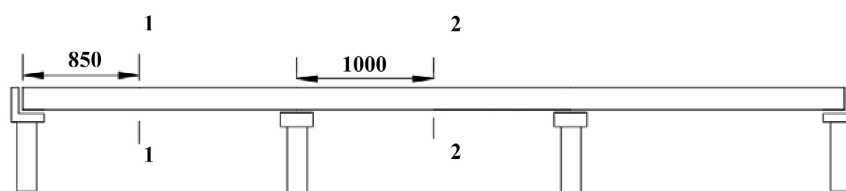
### 5.1. 静载试验工况

本次静载试验选取边跨最大正弯矩工况、跨中最大正弯矩工况以及支点最大负弯矩工况三个工况进行静载试验, 并通过受火边跨以及未受火中跨的静载试验数据来评价分析验证桥梁的力学性能变化规律 [10]。控制截面及测试内容如表 5 所示。各控制截面以及测点位置如图 10 所示。

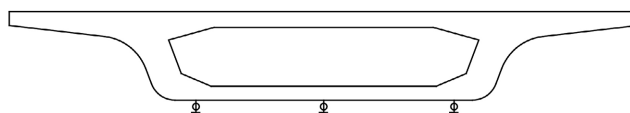
Table 5. Control section and test content

表 5. 控制截面及测试内容

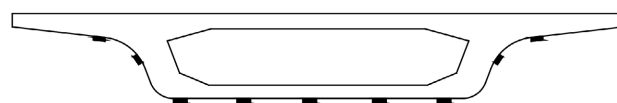
编号	加载工况	加载位置	测试内容	加载方式
工况 1	边跨最大正弯矩	1-1 截面	测试断面应变和位移	中载
工况 2	中跨最大正弯矩	2-2 截面	测试断面应变和位移	中载



(a) 静载试验位移测试断面布置图



(b) 主梁静载试验位移测点布置图



(c) 主梁静载试验应变测点布置图

Figure 10. Position layout of load test points

图 10. 荷载试验测点位置布置图

### 5.2. 应变结果分析

主桥 2 个荷载工况的应变结果如表 6~表 7 所示。

Table 6. Condition 1 strain test results

表 6. 工况 1 应变检测结果

测点编号	控制值/ $\mu\epsilon$	加载总应变/ $\mu\epsilon$	残余应变/ $\mu\epsilon$	弹性应变/ $\mu\epsilon$	校验系数	相对残余/%
1-1	-58.8	-16	-1	-15	0.27	6.3
1-2	-57.7	-28	-2	-26	0.49	7.1
1-3	101.3	53	8	45	0.52	15.1

Continued

1-4	102.1	69	10	59	0.68	14.5
1-5	103.4	63	14	49	0.61	22.2
1-6	102.1	55	9	46	0.54	16.4
1-7	101.3	46	4	42	0.45	8.7
1-8	-57.7	-25	-1	-24	0.43	4.0
1-9	-58.8	-14	-1	-13	0.24	7.1

Table 7. Condition 2 strain test results

表 7. 工况 2 应变检测结果

测点编号	控制值/ $\mu\epsilon$	加载总应变/ $\mu\epsilon$	残余应变/ $\mu\epsilon$	弹性应变/ $\mu\epsilon$	校验系数	相对残余/%
2-1	-47.1	-17	-1	-16	0.36	5.9
2-2	-46.6	-23	-1	-22	0.49	4.3
2-3	81.6	47	1	46	0.58	2.1
2-4	82.8	42	4	38	0.51	9.5
2-5	84.6	51	4	47	0.60	7.8
2-6	82.8	39	3	36	0.47	7.7
2-7	81.6	49	2	47	0.60	4.1
2-8	-46.6	-21	-2	-19	0.45	9.5
2-9	-47.1	-17	-1	-16	0.36	5.9

由应变数据可知, 工况 1 中校验系数在 0.24~0.68 之间, 小于规范要求的最大限值 1.0, 且校验系数离散型相对于中跨更大, 残余应变最大值为 22.2% 已超过规范中要求的最大限值 20%, 证明该桥梁部分边跨结构已无法维持弹性工作状态。工况 2 中校验系数在 0.36~0.60 之间, 小于规范要求的最大限值 1.0, 残余应变最大值为 11.1%, 小于规范中所规定的 20%。横向比较受火跨与未受火跨数据, 可以看出受火跨应变相对残余明显大于未受火跨, 表明受火灾影响桥梁力学性能及承载能力已出现明显下降趋势。

### 5.3. 挠度结果分析

主桥 2 个工况的挠度结果如表 8 所示。

Table 8. Deflection test results

表 8. 挠度检测结果

工况	测点编号	控制值/mm	加载总挠度/mm	残余挠度/mm	弹性挠度/mm	校验系数	相对残余/%
工况 1	1-1	-4.8	-3.9	-0.3	-3.6	0.81	7.7
	1-2	-4.9	-3.9	-0.6	-3.3	0.80	15.4
	1-3	-4.8	-3.8	-0.5	-3.3	0.79	13.2
工况 2	2-1	-3.4	-2.2	-0.1	-2.1	0.65	4.5
	2-2	-3.5	-2.3	-0.1	-2.2	0.66	4.3
	2-3	-3.4	-2.2	-0.1	-2.1	0.65	4.5

由挠度数据可知, 该桥工况 1 主桥边跨的位移测点挠度校验系数在 0.79~0.81 之间, 小于规范要求的最大限值 1.0, 相对挠度残余在 7.7%~15.4% 之间, 小于规范要求的最大限值 20%。工况 2 主桥中跨的位移测点挠度校验系数在 0.65~0.66 之间, 小于规范要求的最大限值 1.0, 相对挠度残余在 4.3%~4.5% 之间, 小于规范要求的最大限值 20%, 结构总体处于弹性工作状态。横向对比两组工况数据, 不难看出受火跨相对残余挠度明显大于未受火中跨。

## 6. 结论

本文以湖北省内某火灾后混凝土箱梁桥为原型, 基于有限元分析软件对该桥受火过程进行模拟, 并通过荷载试验对受火后桥梁力学特性变化规律进行验证, 验证仿真模型可靠性的同时得出以下结论:

1) 跨中底面受火时该箱梁桥的温度场呈单峰状分布, 且直接受火处温度最高, 达到 852℃, 并向两边递减。由于箱梁桥室内空气对流和混凝土导热性能差等原因, 顶板处最高温只有 71℃。

2) 由于高温的影响, 混凝土与钢筋强度损失均比较严重。在实际工程中, 由于混凝土保护层的存在, 当火灾时间较短或者火势较小时, 火灾对钢筋的影响很小。

3) 底板直接受火时, 钢筋距离底板越远, 钢筋强度损失越少, 故在实际工程中, 在满足设计规范的情况下, 保护层厚度应越大越好。

4) 由静载试验结果可以看出, 受火灾影响, 其各材料力学性能发生退化, 对应的各材料强度有所降低, 该桥梁受火跨已无法维持较好的弹性工作状态, 受火跨跨中抗弯承载能力的安全储备量明显降低, 应对其进行维修加固。

## 参考文献

- [1] 白光亮, 柯鹏, 南林. 预应力混凝土简支小箱梁火烧后的检测评估[J]. 中国高新科技, 2022(18): 22-25.
- [2] 郭钊, 张新. 火灾后的损伤桥梁检测与有限元仿真分析[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(6): 82-84.
- [3] 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.
- [4] 皇星星. 某预应力混凝土空心板桥火损后检测与加固[J]. 工程建设, 2021, 53(4): 73-78.
- [5] 蔡正东, 叶敏. 某钢结构桥梁火灾后检测评估和安全鉴定[J]. 桥梁建设, 2019, 49(S1): 62-67.
- [6] 吕长荣, 邹宗民, 王阳春. 火损预应力混凝土 T 梁承载能力性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(7): 250-253.
- [7] 邵文军, 宋雨. 火灾作用下预应力连续梁桥的力学性能分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(4): 611-616.
- [8] 钟元, 王磊. 混凝土桥梁火灾后损伤检测与技术状况评估[J]. 公路, 2023, 68(3): 228-232.
- [9] 杨正祥, 崔闯, 胡文哲, 等. 铁路钢桥抗火性能和极限承载力研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(3): 70-79.
- [10] 李亚利, 魏建华. 基于静载试验的火灾后桥梁承载能力评定[J]. 四川建材, 2016, 42(3): 169-170+173.