

考虑主梁刚度折减的火损桥梁荷载横向分布研究

鞠森森, 钱若霖

(陕西工业职业技术大学 数智城市学院, 咸阳 712000)

摘要: 为了准确评估火损后桥梁的实际承载能力, 根据火灾温度值推定混凝土材料的刚度损伤程度, 引入刚度折减系数对其弹性模量参数进行修正, 推导出适用于火损桥梁的计算方法; 结合有限元仿真模拟和实桥荷载试验结果, 分别绘制横向分布影响线并计算横向分布系数, 结果表明: 针对试验桥梁, 传统刚性横梁法横向分布系数为 0.583, 有限元法计算结果为 0.631, 实桥荷载试验反算结果为 0.77, 而考虑刚度折减效应后的刚度折减系数内插法和高温后混凝土弹性模量公式法的计算结果分别为 0.622 和 0.598, 更接近于有限元仿真和实桥荷载试验结果。采用考虑刚度折减效应的计算理论值可以更加准确地评估受火损桥梁的承载能力, 更好地反映桥梁的实际受力情况, 为有效修复和保养提供科学依据。

关键词: 火损桥梁; 刚度折减; 荷载试验; 横向分布

中图分类号: U443.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 05-0115-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.017

Study on Lateral Load Distribution of Fire-damaged Bridge Considering Stiffness Reduction of Main Girder

JU Sensen, QIAN Ruolin

(Digital Intelligence City College, Shaanxi Polytechnic University, Xianyang 712000, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the actual bearing capacity of the bridge after fire damage, it is necessary to estimate the degree of stiffness damage of the concrete material based on the fire temperature value, introduce stiffness reduction factors to correct their elastic modulus parameters, and derive a calculation method applicable to fire damaged bridges; Based on the results of finite element simulation and real bridge load test, draw the lateral distribution influence lines and calculate the lateral distribution coefficient. The results showed that for the test bridge, the traditional rigid beam method had a lateral distribution coefficient of 0.583, the finite element method had a calculation result of 0.631, and the back calculation result of the real bridge load test was 0.77. However, the calculation results of the stiffness reduction coefficient interpolation method considering the stiffness reduction effect and the formula method for the elastic modulus of concrete after high temperature were 0.622 and 0.598, respectively, which were closer to the results of finite element simulation and real bridge load test. The use of theoretical values that consider the stiffness reduction effect can more accurately evaluate the bearing capacity of bridges damaged by fire, better reflect the actual stress situation of the bridge, and provide scientific basis for effective repair and maintenance.

Key words: fire damaged bridge; stiffness reduction; load test; lateral distribution

项目来源: 陕西省教育厅一般专项科学研究计划项目 (23JK0044)。

作者简介: 鞠森森 (1985—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 防灾减灾工程与防护工程。

收稿日期: 2024-01-09

研究与应用

0 引言

近年来,我国有关桥梁火灾的新闻报道时有发生,火焰和高温不仅威胁人民生命财产安全,也会对桥梁结构造成不可逆损伤^[1-2]。钢筋混凝土材料在高温作用下力学性能指标大幅下降,导致承载能力降低,引发安全隐患^[3-4]。高温作用下,混凝土微裂缝扩展、钢筋力学性能会发生衰减,进而影响混凝土强度、弹性模量,影响桥梁结构的正常使用,降低其承载能力^[5-7]。因此,深入研究火灾对桥梁结构的影响并采取有效防控措施,对保障桥梁使用寿命和社会公共安全具有重大意义。

王保群等^[8]针对公路桥梁建立了一套与材质、表观状况、截面损伤及模态有关的火灾评价标准,为特殊火损桥梁的损伤状况评定提供科学依据;陈红奎等^[9]针对一座发生火灾的预应力混凝土小箱梁桥,利用检测设备仪器判断损伤特征,并基于这些参数提出了一种便捷的计算推导公式;田宇等^[10]依托某火损公路桥梁,根据表观特征推定受火温度值,并推算混凝土及钢筋力学性能的退化情况,对桥梁性能进行损伤评定;戴传超^[11]采用软件建立热-力耦合有限元模型,模拟火灾作用下梁体温度场,得出火灾条件下简支梁的内力挠度变化规律;郭亚文等^[12]以某预应力混凝土T梁桥火灾事故加固工程为例,采用数值模拟方法对其剩余承载力进行评估,并结合实桥现状,提出HTRCS加固火灾结构的快速维修处治技术;王渭锋等^[13]对桥梁火损后的主梁混凝土回弹强度值、主梁混凝土碳化深度、主梁温度场及钢筋损伤程度、预应力束内压浆密实度等进行了评估,依据规范对桥梁结构进行了技术状况评估,对火损后的材料性能及结构承载能力进行了研究;郭靖等^[14]基于AHP层次分析法和TOPSIS理想逼近法,以混凝土表观特征为指标参数,对其进行标准化处理,通过建立数学模型,引入贴近度的概念,作为火损桥梁损伤评估等级的判定依据;李平^[15]以四川某在役高速高架桥为例,主要介绍了该桥梁的结构检测评估及加固处置措施,为同类型桥梁火灾后加固处置提供借鉴。

现有的研究基本均已涉及到根据火损桥梁的表观特征并给出初步判定,但大都依据现有的技术规

程,给出对应的评估等级和加固策略,关于桥梁的空间受力状况和横向分布的理论推导却少有讨论,这关系到受损桥梁承载力准确评估和受损桥梁加固作业的开展。综上,桥梁火灾发生后,根据外观检测结果,推定火损桥梁的材料损伤程度,基于损伤折减情况计算桥梁横向分布系数,利用荷载试验计算并分析其真实承载能力,这对于火损桥梁承载力准确评估和桥梁加固与维修具有重要的工程意义。

1 高温后混凝土刚度确定

1.1 火灾桥梁损伤特点及受火区域温度推定

钢筋混凝土桥梁结构若发生火灾,在高温作用下,混凝土材料会发生复杂的变化。初期,混凝土中游离的水分子会在高温作用下蒸发,使混凝土发生脱水反应,进而造成混凝土结构体积收缩、骨料膨胀,由于两者无法做到变形相协调而产生次内力,引发裂缝。随着温度的上升,混凝土中的氢氧化钙等开始分解反应,桥梁结构破坏愈发严重,导致材料强度、刚度等力学性能退化,力学性能发生巨大改变,桥梁承载能力丧失。

桥梁主梁受火区域温度一般采用混凝土外观表象推定的方法。受火温度与混凝土外观关系见表1^[16]。

表1 受火温度与混凝土外观关系 Table 1 The relationship between fire temperature and concrete appearance		
受火温度区间/℃	外观描述	擦洗后外观描述
0<T≤300	与常温下混凝土构件表观无差异	青灰色或无差异
300<T≤500		微显粉红色
500<T≤600		粉红色显灰白
600<T≤800	混凝土剥落和裂缝	浅灰白色
800<T≤900	贯穿裂缝、烧疏层	灰白色偏浅黄色
900<T≤1 000	较多裂缝、表面片状剥落、钢筋外露	浅黄色
1 000<T	裂缝多,钢筋裸露,烧疏层、大块剥落	浅黄色并出现白色

1.2 刚度折减

桥梁各主梁的刚度直接影响桥梁横向分布系数,该参数与混凝土的弹性模量 E (单位为Pa)密切相关。高温作用下混凝土开裂加快水分蒸发,结构内部材料松散,更易发生变形。

不同温度下混凝土弹性模量折减系数 K 的取值,

研究与应用

见表 2^[17]，根据梁体受火温度内插法查表，后文统一称为方法 1，得到各梁截面刚度折减系数 K_i ，截面刚度折减值计算式为：

$$EI_i = K_i \cdot EI_0 \quad (1)$$

式中： EI_0 为主梁常温下截面刚度； EI_i 为高温后主梁截面刚度。

表 2 混凝土弹性模量折减系数
Table 2 Reduction coefficient of elastic modulus of concrete

温度/℃	折减系数 K
100	0.75
200	0.53
300	0.40
400	0.30
500	0.20
600	0.10
700	0.05
800	0.05

吴波^[18] 同样给出了和温度 T (单位为 ℃) 相关的高温后混凝土弹性模量的计算公式。

$$E_i/E_0 = 1.027 - 1.335 \times (T/1\,000) \quad (T \leq 200) \quad (2)$$

$$E_i/E_0 = 1.335 - 3.371 \times (T/1\,000) + 2.382 \times (T/1\,000)^2 \quad (200 < T \leq 600) \quad (3)$$

式中： E_i 为火损后某片梁弹性模量； E_0 为常温下原始设计弹性模量。使用式 (2)、式 (3) 计算所得折减系数的方法，后文统一称为方法 2。

实际火损桥梁结构，由于各梁的受火程度不一，纵横向火损后截面刚度均有差异，因此应将各梁沿纵向划分成不同刚度的节段，如图 1 所示。

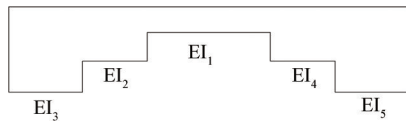


图 1 火损主梁纵向刚度分布

Fig. 1 Longitudinal stiffness distribution of fire-damaged girder

2 考虑刚度折减的刚性横梁法

刚性横梁法的前提是假设主梁之间横向连接刚度无穷大，在荷载作用下，主梁的变形为一条直线，总变形由单位竖向力引起的挠度与单位扭矩下的变

形值组成^[19-20]。传统刚性横梁法计算各梁的影响线指荷载在各梁上横向移动时在某片梁处引起的变形，竖标值计算式为：

$$\eta_{ij} = I_i / \left(\sum_{i=1}^n I_i \right) \pm \beta \cdot \left(a_k a_i I_i / \sum_{i=1}^n a_i^2 I_i \right) \quad (4)$$

式中： η_{ij} 为荷载作用在第 j 片梁处第 i 片梁的竖标值，无量纲； I_i 为第 i 片主梁的截面抗弯惯矩， m^4 ； a_k 为第 i 片主梁形心到桥梁截面扭转中心的水平距离， m ； a_i 为外荷载的偏心距， m ； β 为抗扭修正系数，无量纲，计算式为：

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{Gl^2}{12E} \cdot \frac{\sum I_{Ti}}{\sum a_i^2 I_i}} < 1 \quad (5)$$

式中： G 代表剪切模量， Pa ； I_{Ti} 为第 i 片主梁的截面抗扭惯矩， m^4 ； E 为弹性模量， Pa ； l 为桥梁跨径， m 。

由于火损桥梁纵横向的主梁混凝土弹性模量也发生不同程度的变化，因此提出一种针对火损桥梁的改进刚性横梁法，考虑主梁的刚度折减。

参考文献 [17] 和 [18]，引入刚度折减系数 K_i ，折减系数采用查表法或公式计算确定。影响线竖标值计算公式如式 (6) 所示。

$$\eta_{ij} = \frac{K_i E_0 I_i}{\sum_{i=1}^n K_i E_0 I_i} \pm \beta \frac{K_i a_k a_i E_0 I_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 K_i E_0 I_i} \quad (6)$$

式中： I_i 为第 i 片主梁的设计截面抗弯惯矩， m^4 ； K_i 为不同火损主梁的刚度折减系数； E_0 为原始梁体混凝土弹性模量， Pa 。

求得各梁影响线竖标值后，绘制影响线并将车辆荷载按最不利情况布置于影响线上，计算得到各车轮荷载处竖标值 η_i ，则汽车荷载作用下各梁横向分布系数 m 计算式为：

$$m = \frac{1}{2} \sum \eta_i \quad (7)$$

3 实桥荷载试验分析

3.1 火损桥梁有限元建模

试验桥梁上部结构采用 10 m×20 m 预应力钢筋混凝土小箱梁，先简支后桥面连续，主梁跨中截面如图 2 所示。

研究与应用

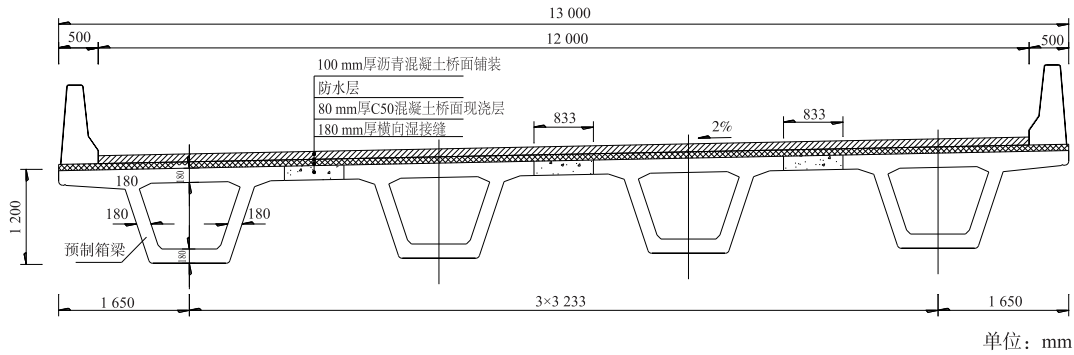


图2 跨中横断面

Fig. 2 Mid-span cross section

由于桥下所堆放的易燃物起火,大桥局部受灼烧损坏。经现场火灾初步调查报告及现场勘查情况,根据过火区域部分主梁局部混凝土的外观检测结果,按温度区间平均值进行温度推定,确定跨中部位各主梁的刚度折减状况。其中2#和3#主梁受火温度较高,推定值为200℃,1#和4#主梁跨中部位为150℃。因此,参考文献[17],1#~4#梁的刚度折减系数分别取0.64、0.53、0.53、0.64,参考文献[18]弹性模量值分别取:0.83、0.76、0.76、0.83。

利用有限元分析软件根据实桥尺寸参数建立模型,根据混凝土弹性模量的折减情况赋予材料特征值,偏安全保守采用文献[17]的折减系数进行计算。桥面铺装为10 cm厚C50混凝土现浇层和10 cm厚沥青混凝土,以面荷载施加于模型上。有限元模型如图3所示。

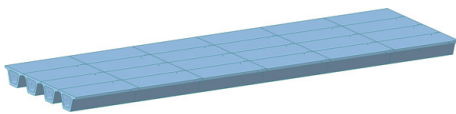


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

建立跨中集中力荷载下四种不同工况,提取不同工况下各梁的挠度值,反算各梁影响线竖标值为:

$$\eta_i = f_i / \sum_{i=1}^n f_i \quad (8)$$

式中: η_i 代表反算竖标值; f_i 代表第 i 片梁挠度值, mm。

3.2 荷载试验

在对火损桥梁实际承载能力不确定的情况下,在制定荷载试验方案时,应考虑实际桥梁结构的损伤计算不同荷载工况下的应力及挠度值,优化荷载试验方案,准确评估桥梁承载能力。

试验采用标准车,每车道试验车辆荷载按三级递增,每级稳定持荷时间为5~10 min,待数据稳定后进行读数并记录。车辆卸载后等待5~10 min以恢复弹性变形,再进行重复加载,尽可能减小塑性残余变形对试验数据精度的影响。为与理论计算值和有限元仿真计算值进行对比,实桥试验采用棱镜和全站仪测量挠度,棱镜位于测试截面位置。为简化分析,选取横桥向三列车中载工况下中梁跨中截面最不利位置挠度值进行对比分析,绘制横向分布影响线如图4所示,计算结果见表3。

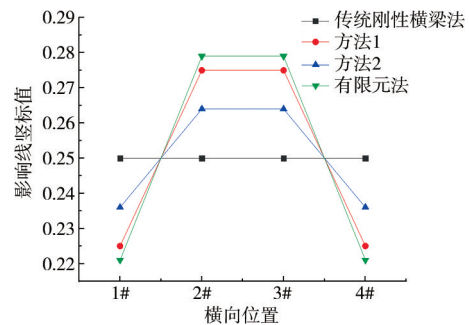


图4 横向分布影响线

Fig. 4 Horizontal distribution of influence lines

荷载横向分布系数 m 计算式为:

$$m_i = n \cdot f_i / \sum_{i=1}^n f_i \quad (9)$$

式中: n 为车道数。

研究与应用

表 3 中梁影响线竖标值
Table 3 The vertical scale value of the influence line of the middle beam

梁号	传统刚性横梁法	方法 1	方法 2	有限元法	荷载试验实测挠度值/mm
1#	0.250	0.225	0.236	0.221	6.6
2#	0.250	0.275	0.264	0.279	6.8
3#	0.250	0.275	0.264	0.279	6.8
4#	0.250	0.225	0.236	0.221	6.7

根据表 3 中不同方法竖标值绘制中梁影响线，并按照实际车辆布载，求得各车轮处竖标值，利用式 (7) 计算中梁横向分布系数。传统刚性横梁法横向分布系数为 0.583，方法 1 和方法 2 计算所得横向分布系数分别为 0.622 和 0.598，有限元法计算结果为 0.631，实桥荷载试验反算结果为 0.77。由结果可知：考虑了火损桥梁主梁刚度损伤的方法 1 和方法 2 结果较传统理论方法偏大，这是因为 2 号梁和 3 号梁受火温度高，刚度损伤较边梁程度严重，中载工况下更多的荷载会由中梁承担，传递给边梁的荷载会削减；方法 1 和方法 2 的计算结果存在出入，这是由于两种方法采用的刚度折减系数不同，方法 1 考虑刚度损伤程度大于方法 2，因此采用方法 1 的计算结果制定荷载试验方案和后续的承载力评定结果会更偏安全；有限元法由于是基于方法 1 定义材料特征，因此与方法 1 结果更接近，验证了理论的正确性；荷载试验结果较所有值均偏大，这可能是因为火损桥梁受火温度定性推定本身就具有人为因素的影响，刚性横梁理论是将主梁之间的连接视为刚度无穷大，各主梁间荷载的传递本来就更趋于均匀，而实桥由于服役时间和火灾等原因，横向连接刚度不可能是无穷大的，再加之中梁受火程度本就高于边梁，因此中梁的荷载横向分布系数均高于理论计算结果。

在实际的桥梁承载能力评估时，建议考虑刚度折减效应通过有限元软件计算理论值，通过改变混凝土参数特征和横向连接约束以真实反应火损桥梁的受力结构，以期精确内力计算和校验系数区间，准确评估受损桥梁的承载能力。

4 结论

针对火灾损伤的桥梁，通过受火温度推定混凝土刚度损伤情况，采用考虑刚度折减效应的计算方法来准确评估其承载能力。对已有的刚性横梁法进

行修正，提出一种适用于火损桥梁的横向分布计算方法，得到了有限元仿真模拟和实桥荷载试验结果有效验证。主要得出以下结论：

(1) 对于火损桥梁承载力评估，采用定性和定量相结合的方法能够及时推定受火主梁的刚度损伤程度，计算简便，为理论值的精确计算和建模的参数优化提供了基础。

(2) 针对试验桥梁，传统刚性横梁法计算所得横向分布系数为 0.583，与考虑损伤情况下的有限元仿真结果 0.631 和实桥结果 0.770 误差分别达到 8.2% 和 32%。而修正的刚性横梁法计算结果更接近有限元仿真和实桥荷载试验结果，结果更加精确，符合实桥结构特征，真实反应受力状况，应用简便，能够精确火损桥梁横向分布计算并准确评估其承载能力。

(3) 在进行火损桥梁承载能力评估时，考虑主梁刚度折减效应，通过改变混凝土参数特征和横向连接约束建模并计算理论值，更贴近实桥真实内力和变形，精确校验系数区间的取值，对于实际桥梁承载力的评估和加固具有重要工程意义。

(4) 提供了一种科学的评估方法，可用于评估火灾后桥梁结构的横向分布情况及其承载能力，为有效修复和保养提供科学依据，具有重要的现实意义。

参 考 文 献

- [1] 多飞, 杨青天, 侯立群, 等. 基于截面索温度等效的悬索桥耐火性能分析 [J]. 消防科学与技术, 2023, 42 (9): 1233-1240.
- [2] 潘自强. 预应力小箱梁桥抗弯承载力的火灾损伤研究 [J]. 现代交通技术, 2025, 22 (3): 46-49.
- [3] 李昌霖, 王中强. 钢筋混凝土梁桥火灾后结构剩余承载能力分析 [J]. 工程建设, 2018, 50 (8): 5-10.
- [4] 王晨. 火灾后钢筋混凝土框架结构损伤检测与修复加固效果评价 [J]. 实验室检测, 2025, 3 (21): 87-89.
- [5] 燕兵. PC 箱梁火灾损伤机器学习模型构建与耐火性能预测 [D]. 西安: 长安大学, 2024.
- [6] 王环宇, 欧阳男, 胡从骄, 等. 过火温度对 RC 结构特性的影响及力学性能研究 [J]. 公路, 2026, 71 (6): 377-387.
- [7] 陈珊珊. 火灾-病害耦合作用下钢-混组合桥梁结构致灾机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2025.

(下转第 124 页)

研究与应用

- [4] 郑佳瑞, 杨丽平, 崔临风, 等. 超低能耗居住建筑预制混凝土夹心保温墙体桁架式连接件热桥效应研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (10): 20-29.
- [5] 康熙, 郭倩, 付士峰, 等. 超低能耗建筑现浇混凝土内置和钢丝网架复合板保温体系热工分析与测试研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (10): 30-39, 51.
- [6] 彭罗文, 陈威威, 石永, 等. 保温装饰一体化板外墙外保温系统抗风性能研究与探讨 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (9): 135-142.
- [7] Pihelo P, Kalamees T. Hygrothermal performance of AAC exterior wall after additional insulation with prefabricated elements in estonia [J]. AIP Conference Proceedings, 2023, 2918 (1): 1-9.
- [8] Ouyang Dihua, Yan Haoyu, Song Jiaying, et al. Combustion characteristics and fire hazard of polystyrene exterior wall thermal insulation materials [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140 (8): 53503.
- [9] 孟超. 保温装饰一体板施工技术在房屋建筑外墙施工中的应用 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025 (3): 175-177.
- [10] 王澄瑜, 谭渊文, 王华丽. 保温节能施工技术在土建建筑外墙施工中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024 (23): 260-262.
- [11] 杨斐. 建筑外墙保温节能技术在建筑施工中的有效应用 [J]. 四川建材, 2024, 50 (10): 39-40, 43.
- [12] 陈东鹏. 建筑外墙保温节能技术在建筑施工中的应用 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (19): 130-132.
- [13] 刘涛. 固废聚氨酯发泡颗粒复合外墙外保温系统性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [14] 赵全斌, 胡浩南, 张凌宇, 等. 加气混凝土复合保温外墙板连接节点试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (2): 87-91.
- [15] 高永健. 高层建筑工程项目中的外墙保温施工技术 [J]. 中国高新科技, 2022 (23): 149-150.
- [16] 程虎兵. 刍议房屋建筑工程外墙保温装饰工程施工技术 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11 (21): 140-142.
- [17] 王珥玲. 建筑工程施工中的外墙保温技术 [J]. 大众标准化, 2023 (1): 86-88.

(上接第 119 页)

- [8] 王保群, 辛公锋, 陶莉莉, 等. 公路混凝土梁板桥火灾损伤状况评定 [J]. 公路, 2020, 65 (4): 180-183.
- [9] 陈红奎, 冯志强. 火灾后预应力混凝土小箱梁桥承载能力评估 [J]. 河南科学, 2020, 38 (3): 464-469.
- [10] 田宇, 卢文良, 方继伟, 等. 某混凝土公路桥火灾后损伤评定 [J]. 中外公路, 2018, 38 (3): 119-124.
- [11] 戴传超. 不同保护层厚度下钢筋混凝土梁抗火性能数值模拟研究 [J]. 今日消防, 2026, 11 (3): 5-8, 20.
- [12] 郭亚文, 张雪松, 彭俊文, 等. 预应力混凝土 T 梁桥火灾后结构损伤评定与 HTRCS 快速加固技术研究 [J]. 四川水泥, 2025 (4): 203-205.
- [13] 王渭锋, 熊仁. 桥梁火灾后损伤检测评估研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5 (22): 138-140.
- [14] 郭靖, 钱若霖. 基于 AHP-TOPSIS 的桥梁火灾损伤评估与加固 [J]. 粘接, 2024, 51 (10): 169-172.
- [15] 李平. 桥梁火灾后的检测评估及加固处置分析 [J]. 江西建材, 2024 (6): 93-96.
- [16] 赵二朋. 火灾损伤后板桥数值分析及承载力评定 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- [17] 路春森. 建筑结构耐火设计 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
- [18] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 钱若霖, 苏佩. 基于裂缝参数的在役桥梁横向分布计算 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2022, 35 (2): 10-14.
- [20] 王渠, 刘俊杰, 吴庆雄, 等. 横梁非对称拼接的拼宽梁桥简化计算方法研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2026, 53 (5): 164-177.