

Test and Assessment of Prestressed Concrete Bridge after Fire

Zhaoxiang Feng^{1*}, Cheng Xian², Changqing Miao²

¹Jiangsu Provincial Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing Jiangsu

²School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Email: *fengry2001@sohu.com

Received: Sep. 3rd, 2015; accepted: Sep. 17th, 2015; published: Sep. 23rd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

Changshu Hupu Bridge was taken as an example to test and evaluate the prestressed concrete bridge after fire. On the fire crack, the concrete loss, and the reinforced exposure, the bridge fire disease was observed and analyzed. Taking the determination of concrete strength, static loading testing, and finite element analysis, the carrying capacity of the bridge after fire was analyzed and evaluated. The results showed that the simply-supported hollow slab mechanics performance in seriously fired area declines obviously.

Keywords

Reinforced Concrete Bridges, Fire, Concrete Strength, Static and Dynamic Load Test

火灾后混凝土预应力桥梁检测试验与评估

冯兆祥^{1*}, 鲜 铖², 缪长青²

¹江苏省交通工程建设局, 江苏 南京

²东南大学土木工程学院, 江苏 南京

Email: *fengry2001@sohu.com

收稿日期: 2015年9月3日; 录用日期: 2015年9月17日; 发布日期: 2015年9月23日

*通讯作者。

摘要

以常熟浒浦大桥为背景,对于火灾后预应力钢筋混凝土桥梁进行评估分析研究。从火灾裂缝、混凝土脱落、受力钢筋露筋等方面对于桥梁进行了火灾病害观测分析,通过混凝土强度测定、静力荷载试验和有限元分析,对于火灾后桥梁的承载能力进行了分析评估。结果表明受火区作用较严重的简支空心板力学性能下降明显。

关键词

钢筋混凝土桥梁, 火灾, 混凝土强度, 静动载试验

1. 前言

在众多灾种中,火灾的发生额度高居各灾种之首,国内外每年均有大量钢筋混凝土结构过火。近年来随着我国经济建设的快速发展,桥梁数量不断增多,在既有桥梁的病害报道中,有关桥梁火灾的报道越来越多,火灾已成为目前发生概率最大、损失最严重的桥梁灾害之一。2010年7月9日,沈阳工农桥桥下失火,造成经济损失近千万;2013年11月27日晚,有“亚洲第一廊桥”之称的重庆黔江濯水古镇风雨廊桥因火灾被烧毁,再一次向世人警示了火灾的危害性。

火灾发生后,会对桥梁结构的各类构件造成不同程度的损伤,从而影响桥梁结构的使用安全。因此,通过火灾后桥梁结构检测,研究火灾高温后钢筋混凝土桥梁结构的力学性能,全面正确地评价桥梁结构的损伤状况,进而制定科学合理的维修策略,具有重要的理论意义和实用价值 [1]-[8]。

本文以火灾后的预应力钢筋混凝土桥梁为背景,对于火灾后桥梁进行检测评估,提出维修养护建议。

2. 工程概况与火灾病害表现检测

常熟市经济技术开发区碧浒路工程浒浦大桥结构体系为:主桥上部结构采用变截面预应力连续箱梁,引桥上部结构采用简支预应力混凝土空心板梁,其跨径布置为 $5 \times 20 \text{ m} + (52 + 80 + 52) \text{ m} + 3 \times 20 \text{ m} + 4 \times 20 \text{ m}$,全长429.16 m。引桥上部结构采用20 m的简支预应力混凝土空心板梁,桥面连续。桥梁为左右幅布置,总宽32 m,单幅宽16 m。本桥设计荷载为城-A级。

2015年7月26日浒浦大桥东起引桥第二跨简支预应力混凝土空心板梁下部堆放的泡沫板、木板等建筑废材发生火灾,由于燃烧时间较长,第二跨混凝土空心板梁下部完全熏黑,北起靠近2号墩第9#至第15#空心板损坏相对较重,面积6米(横桥向) \times 5米(纵桥向)(如图1)。主要病害包括:

1) 空心板梁底板混凝土灼伤、爆裂,从外向内板梁依次编号,9#~15#板梁底部混凝土保护层灼伤爆裂、脱落(如图2)。

2) 11#~13#板严重,底部可见普通钢筋,12#板底可见普通钢筋和预应力钢绞线,部分区域有裂缝(如图3)。严重区域有混凝土炭化现象,轻轻接触就会出现脱落。

3) 其他板梁主要是烟熏的痕迹。桥台台帽混凝土灼伤、爆裂(如图2)。

综合火灾调查和表现缺损检查情况,可知9#~15#板局部有混凝土爆裂破损现象,损伤深度达到混凝土保护层,少量箍筋外露,但主筋未受损伤,可以评定为局部C级。

3. 检测试验与评估分析

按照《公路旧桥承载能力鉴定方法》的要求,对火灾后桥梁需重新进行荷载试验以确定其剩余的承



Figure 1. The fired span of bridge
图 1. 受火桥跨



Figure 2. The fired area in the bottom of slab
图 2. 桥梁底部受火区域

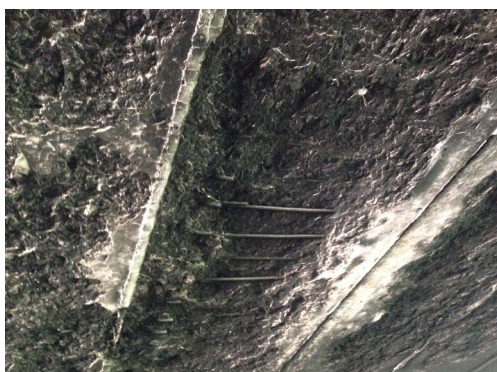


Figure 3. The spalling concrete cover and the exposed reinforcement
图 3. 混凝土保护层脱落露筋

载能力。该方法主要是通过模拟真实的车载运行情况对桥梁实施动载和静载试验，对桥梁中受损严重的跨孔与邻近跨孔跨中应力挠度进行检测，以此判断该结构的剩余承载能力和刚度火灾后是否继续满足桥梁原设计要求，若存在较大的衰减，必须对结构进行相应的加固维修以满足后期结构继续使用的安全。

浒浦大桥是常熟市经济技术开发区的一座重要桥梁，通车时间不长。为保证大桥的安全运营，对于该桥主要通过现场观测、回弹试验、静力荷载试验，并结合有限元计算分析，对于大桥火灾病害、剩余承载能力进行检测评估，为维修加固提供依据。

3.1. 有限元模型

浒浦大桥受火灾桥跨上部结构为简支预应力混凝土空心板梁，梁两端简支，板与板之间是依靠现浇层连接的，现浇层主要用来传递剪力，全桥一联。为此采用 MIDAS/CIVIL 2013 有限元软件进行建模分析。使用梁格法建模，模型中所有梁格均采用梁单元模拟，板与板之间采用刚性链杆模拟。空心板梁底部均采用弹性连接进行板式橡胶支座刚度的等效模拟，纵梁的横向联系采用虚拟梁模拟，并且释放虚拟横梁的梁端约束，形成铰接结构。所有模型工况中均采用 C50 混凝土，预应力筋采用 Strand1860。桥面横向分为 17 个单元，纵向分为 20 个单元，桥面单元总数为 340。部分模型如图 4 所示。

3.2. 静力荷载试验

挠度是衡量引桥实际刚度和力学性能的重要指标之一，静力荷载试验的主要目的是测量在试验车辆荷载作用下的控制截面挠度、应力。浒浦大桥设计荷载为城-A 级。试验时模拟相应截面处设计荷载产生的内力效应较大值的布载方式进行加载。因标准的荷载等级实际中很难模拟，桥上试验荷载一般采用汽车加载，根据静载试验荷载效率及控制断面的设计弯矩值，再考虑加载车辆的来源等因素，选用相当公路规范中汽车-20 级荷载中的重车(300 kN)作加载车辆。试验选用车辆的技术指标如表 1 所示。由于受火区域主要集中在北起靠近 2 号墩第 9#至第 15#空心板，面积约 7 米(横桥向)×5 米(纵桥向)。经计算，考虑横向分布的影响，确定在受火区域加载车辆为 3 辆(如图 5、图 6 所示)。试验采用分级加载模式，车辆加载过程中观察梁底裂缝变化。

根据以上试验车辆加载方案，在有限元模型基础上进行静力荷载试验计算分析，图 7、图 8 给出了车辆荷载作用下的应力云图和弯矩图。表 2 给出了静载试验挠度测量与计算分析结果。可以看出显然由于火灾造成 10#~13#板的力学性能明显低于周边未受火灾影响板梁。但是另外由于本桥设计裕度较大，通车运营时间不长，受火灾影响后桥面线形没有发生大的变化，火灾后桥梁承载能力仍可以满足设计荷载作用下的正常使用要求。

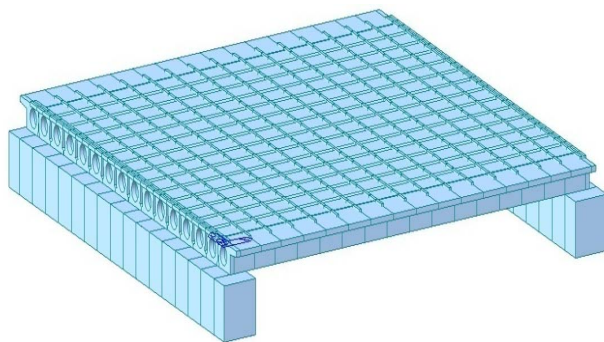


Figure 4. FEM model
图 4. 有限元分析模型

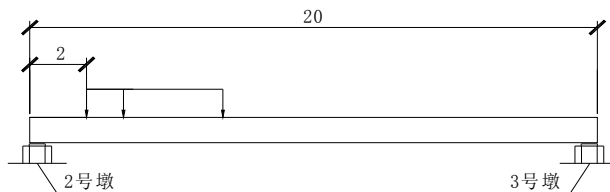


Figure 5. The lengthways position of cars (m)
图 5. 车辆纵向位置图(单位: m)

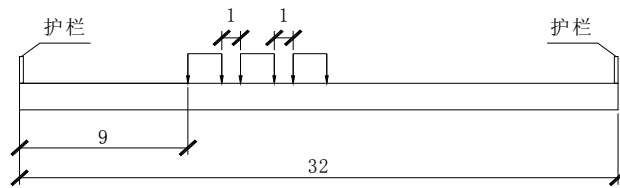


Figure 6. The transverse position of cars (m)
图 6. 车辆横向布置图(单位: m)

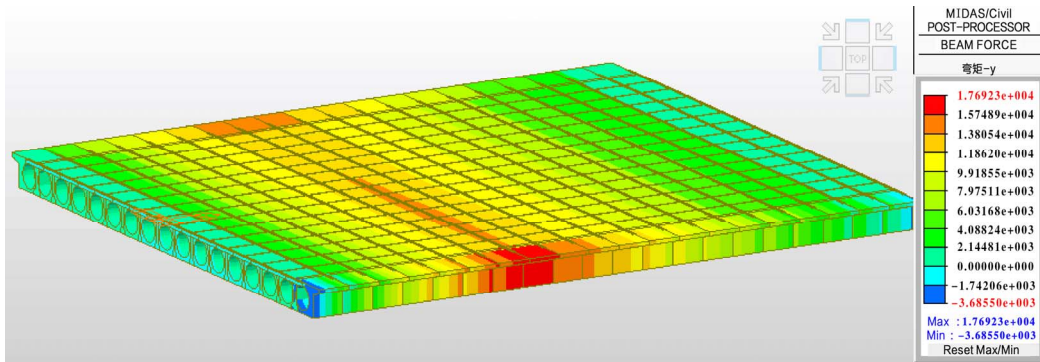


Figure 7. The total moment of structure
图 7. 总弯矩图

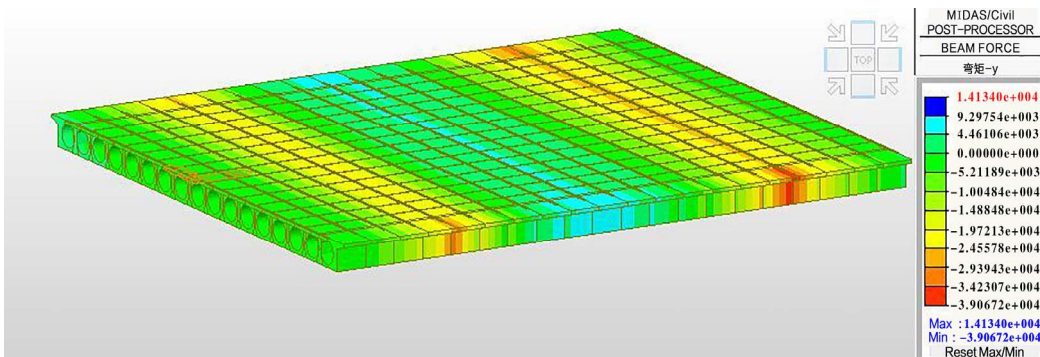


Figure 8. The moment from cars only
图 8. 车载作用下的弯矩图

Table 1. The index of the loading cars
表 1. 试验加载车的技术指标

| 车型 | 轴距(mm) | | 轮距(mm) | | 质量(kN) | |
|--------|--------|------|--------|------|--------|-----|
| | 中前轴 | 中后轴 | 前轮 | 后轮 | 前轴 | 中后轴 |
| 300 kN | 3500 | 1300 | 1800 | 1800 | 60 | 240 |

Table 2. The displacement result of the static load test (mm)
表 2. 静载试验挠度结果(单位: mm)

| 编号(北→南) | 9# | 10# | 11# | 12# | 13# | 14# | 15# | 完好区 |
|---------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|
| 火灾前理论值 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| 火灾后实测值 | 0.7 | 1.1 | 1.0 | 1.2 | 1.1 | 0.6 | 0.5 | 0.5 |
| 校验系数 | 0.7 | 1.0 | 0.90 | 1.1 | 1.1 | 0.67 | 0.55 | 0.55 |

3.3. 回弹法强度检测

钢筋混凝土桥梁遭受火灾过程中,混凝土直接受火灼烧或间接受到热影响,会发生诸如表面颜色变化、裂损剥落、开裂、露筋、锤击反应变化等表观缺损情况。根据表观缺损检查发现局部存在小面积破损露筋现象,且现场锤击时声音发闷,锤击时混凝土脱落,参照文献 [4]有关结论,可以推断浒浦大桥火灾最高温度在 500℃~700℃。

在火灾过程中,混凝土的弹性模量随温度的升高而逐渐降低。国内外学者对高温下混凝土的力学性能(包括抗压和抗拉强度、弹性模量、高温本构关系)进行了大量的研究,普遍认为高温下混凝土的抗压强度在 400℃以内变化不大,温度超过 400℃以后,降低幅度明显加大,温度超过 900℃后,强度不到常温的 1/10 [9]。为了全面评定火灾后桥梁的承载力,需对于火灾区混凝土强度进行检测。

混凝土强度一般采用回弹法、取芯法、或两者相结合的方法。回弹法检测规定不适用于表层与内部质量有明显差异的混凝土强度检测,但回弹法检测具有快速方便、高效的优点,同时目前对于火灾后混凝土强度还没有更方便简捷的方法,所以利用回弹法检测混凝土强度还是具有一定的工程实用性。取芯法属于半破损的检测方法,对构件存在一定的损伤。

考虑到本桥设计裕度较大,通车运营时间不长,静载试验表明桥梁承载能力仍满足设计要求,取芯法检测反而会增大底板损伤,因此回弹法检测混凝土强度。由于火灾过火面积相对较小,因此对于 9#至第 15#空心板梁都进行回弹强度检测,具体测区分布在距离 2 号墩 4 m 的 9#~15#空心板梁底板,共 7 个测区,同时选择未受火灾梁底板作为测区。检测时首先将被检测构件测区内烟熏表面清洗干净并将损伤表层用砂轮磨平,数据处理参照文献 [10]优先采用火灾专用曲线。各测区回弹测试数据如表 3 所示。

由表 3 中回弹法强度检测的数据可知,过火较严重区域板混凝土强度明显低于未受火灾板。在 12#板梁位置测区的混凝土强度最小,而 13#板梁位置测区的混凝土强度接近于未受火灾板。而实际上现场观察表明 12#、13#板梁是遭受火灾影响最为严重的。这是由于火灾高温影响后火灾温度场的传导不均匀,导致混凝土内外达到的温度不一致,混凝土材料的疏松程度不同,甚至有混凝土表层发生烧结硬化,使得回弹值出现偏高现象。因此在实际强度推算中应考虑此影响,或进一步可以采用钻芯法精确检测混凝土强度。

4. 检测试验结果分析与评价

由表 2、表 3 测试结果可得到以下结论:

- 1) 挠度实测值与理论值得比较表明,第二跨 10#~13#板(混凝土保护层脱落严重)的位移校验系数在 0.9~1.1 之间。显然由于火灾造成 10#~13#板的力学性能明显低于周边未受火灾影响板梁。
- 2) 相比 9#、14#、15#板的力学性能明显高于较严重的板梁,但是低于未受火灾影响的完好板梁。
- 3) 计算分析结果表明火灾后桥梁承载能力仍可以满足设计荷载作用下的使用要求。
- 4) 加载时无裂缝产生,车辆通过时,被烧区未出现明显的混凝土脱落。
- 5) 对于火灾高温后混凝土强度检测,可以采用回弹法检测作为参考,精确检测应该采用钻芯法。

综上,本跨结构的承载能力、结构刚度均能够满足设计荷载正常使用的要求。但是受火区作用较严重的简支空心板力学性能下降明显。由于空心板下侧部分混凝土保护层脱落,造成钢筋外露,长期暴露

Table 3. The concrete strength in measured areas (MPa)

表 3. 各个测区回弹仪混凝土强度(MPa)

| 编号(北→南) | 9# | 10# | 11# | 12# | 13# | 14# | 15# | 完好区 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 强度值 | 56.2 | 53.6 | 52.1 | 47.6 | 55.3 | 54.4 | 58.5 | 57.8 |

在潮湿环境下，暴露的钢筋将会发生腐蚀，造成力学性能的降低，影响桥梁的安全性。建议尽快对于过火的9#~15#板梁采取局部修补加固措施。

5. 结语

本文以常熟浒浦大桥为背景，对于火灾后预应力钢筋混凝土桥梁进行评估研究。从火灾裂缝、混凝土脱落、受力钢筋露筋等方面对于桥梁进行了观测分析，通过混凝土强度测定、静力荷载试验和有限元分析，对于火灾后桥梁的承载能力进行了分析评估。结果表明：

- 1) 受火作用较严重的简支空心板力学性能下降明显，但是桥梁承载能力仍可以满足设计荷载作用下的正常使用要求。
- 2) 对于火灾高温后混凝土强度检测，可以采用回弹法检测作为参考，精确检测应该采用钻芯法。
- 3) 建议尽快对于过火的9#~15#板梁采取局部修补加固措施。

基金项目

江苏省交通厅重大项目(2011Y03-6)，江苏省“333”高层次人才培养工程项目，江苏省自然科学基金项目(BK2012562)。

参考文献 (References)

- [1] 孙大松, 缪长青, 李枝军, 等 (2007) 预应力混凝土板桥火灾后的试验与评价. *市政技术*, **3**, 246-248.
- [2] 王国辉, 项凯 (2012) 某预应力混凝土桥梁火灾损伤评估. *消防理论研究*, **3**, 219-223.
- [3] 张宏, 邵永军 (2011) 火灾后混凝土桥梁损伤评估方法与应用. *四川建筑科学研究*, **3**, 95-99.
- [4] 熊伟, 李耀庄, 严加宝, 等 (2012) 火灾作用下钢筋混凝土梁温度场数值模拟及试验验证. *中南大学学报*, **7**, 2838-2843.
- [5] 宋瑞明 (2011) 超声回弹综合法检测火灾后混凝土强度计算方法的讨论. *混凝土*, **4**, 118-120.
- [6] 陆州导, 苏磊 (2010) 火灾后混凝土结构检测的方法与发展探讨. *结构工程师*, **1**, 131-136.
- [7] 奚勇 (2007) 火灾受损桥梁的检测与评估. *世界桥梁*, **4**, 62-65.
- [8] 刘其伟, 邓祖华, 赵佳军 (2009) 火灾下混凝土桥墩仿真分析. *桥梁建设*, **1**, 70-73.
- [9] 过镇海, 时旭东 (2003) 钢筋混凝土的高温性能及其计算. 清华大学出版社, 北京.
- [10] 火灾后混凝土构件评定标准 DBJ 08-219-96.