

文章编号:1671-8879(2018)06-0109-08

运营期桥梁火灾后结构检测成套技术

杨超斌,吴华勇,吴 涛

(上海市建筑科学研究院,上海 200032)

摘 要:为了对桥梁结构火灾后的状态进行检测评定,在传统检测方法的基础上,结合火灾事故特点,对结构进行针对性检测与评估,并第一时间评定桥梁承载能力的受损程度,评判其是否影响行车安全。依托典型的实际工程案例进行了较为系统的阐述,具体包括检测方法、监测手段、成果分析、管养建议等。在常规外观检查方法的基础上,采用 3D 扫描技术对受损结构进行实体建模分析,定量分析病害开展部位及损伤程度,并对混凝土、钢筋等主要材料的劣化部位进行了取样分析,分别在现场和实验室对桥梁受损状况进行了综合性评价;从结构整体姿态角度对桥梁进行跟踪监测,预警火灾损伤对结构安全可能带来的不利影响,进一步保证桥梁后续运营安全;依据现场检测数据及理论分析,对桥梁受损结构温度场、材料退化程度、损伤等级、承载能力等方面进行了分项评定;并从病害维修及后续管养等角度分别提出了较为合理和针对性的处治意见。最后,根据此类项目特点,总结相关技术经验,研究形成了运营期桥梁火灾后结构检测成套技术。研究结果表明:火灾后混凝土强度和钢筋性能的实际劣化程度比规范推定结果要小,应依据实际情况对桥梁承载能力现状进行折减和准确评价;提出的成套技术的有效运用,可在一定程度上提高火灾后结构检测评定的效率和准确性,是现有检测技术和规范的有效补充,该研究为类似事故桥梁的运营管理决策提供了一定的理论依据。

关键词:桥梁工程;火灾;检测评定;运营期;结构检测

中图分类号:U447

文献标志码:A

Complete structure detection technology of bridge after fire in operation period

YANG Chao-bin, WU Hua-yong, WU Tao

(Shanghai Research Institute of Building Sciences Group, Shanghai 200032, China)

Abstract: To detect and assess the state of bridge structures after a fire, based on traditional detection methods combined with the characteristics of fire accidents, a structure was targeted for testing and evaluation. The damage degree of bridge bearing capacity was evaluated at the first time, and the effects of judgment on driving safety were evaluated. Based on typical practical engineering cases, a systematic exposition on these topics was presented including detection methods, monitoring methods, results analysis, and management advice. Based on conventional appearance inspection methods, 3D scanning technology was used to analyze the damaged

收稿日期:2018-06-19

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(17DZ1204203)

作者简介:杨超斌(1988-),男,江西万年人,工程师,E-mail:yangchaobin@sribs.com.cn。

通讯作者:吴华勇(1980-),男,浙江新昌人,高级工程师,E-mail:wuhuayong@sribs.com.cn。

structure. Disease location and damage degree were analyzed quantitatively, sampling and analysis of the deteriorated parts of main materials (such as concrete and steel bars) were conducted. A comprehensive evaluation of bridge damage was performed in the field and laboratory. Tracking and monitoring of bridges from the perspective of structural overall attitude and the adverse effects of early-warning fire damage on structural safety were studied, to ensure the subsequent operation safety of bridges. Based on field test data and theoretical analysis, the temperature field, material degradation degree, damage grade, and bearing capacity of the damaged bridge structure were evaluated separately, leading to general conclusions. From the perspective of maintenance and subsequent management after fire, more reasonable and targeted treatment ideas were suggested. Finally, according to the characteristics of such projects, relevant technical experience was summarized. Research has resulted in a complete set of technologies for structural inspection of bridges after fires, and the effective application of the technologies. The results show that the deterioration degree of concrete strength and reinforcement performance after fires is smaller than those of standard approaches. According to the situation, the bridge's carrying capacity can be reduced and accurately evaluated. To a certain extent, the efficiency and accuracy of structural inspection and assessment after fires are improved. This is an effective complement to existing testing technology and specifications. It provides a theoretical basis for the operation and management of bridges with similar accidents. 5 tabs, 12 figs, 25 refs.

Key words: bridge engineering; fire disaster; detection and evaluation; operation period; structure detection

0 引言

随着国民经济快速发展,中国交通基础设施建设不断扩大,桥梁数量不断增多,火灾事故造成的桥梁结构损伤事件越来越多。火灾对桥梁结构的影响最新研究成果不断涌现^[1],如何科学准确地对火损后桥梁结构进行检测评定,是关系到交通安全运营的重大课题^[2]。

随着行业管理者对桥梁结构安全运营重视度的不断提高,国内外学者针对桥梁火灾问题开展了一系列研究,但近几年针对运营桥梁火灾事故及其受损结构的实践性检测评定研究较少。张岗等对混凝土梁式桥在火灾下的变形及其抗火性能进行了理论分析,并进行了试验验证^[3-4]。王莹等对钢结构桥梁在火灾下的性能进行了研究,具体包括拉索等局部构件及整体安全分析等^[5-6]。Gu 等分析了火灾影响下钢结构表面涂装的绝缘材料的作用^[7]。Aziz 等针对钢混组合梁的耐火性能进行了试验,并通过试验计算分析了主梁结构的材料剩余强度^[8]。刘华等基于既有桥梁遭遇的火灾事故进行了检测评定,并进行了总结性的理论分析^[9-14]。

近 3 年上海地区桥梁火灾事故有:2015 年 2

月,黄浦江某大桥北引桥第 15 跨桥下杂物起火致使 8 榀主梁底面混凝土剥落、露筋;2015 年 4 月,某高速公路大桥第 42 跨位置桥面发生货车事故并自燃导致桥面受火 45 min;2016 年 1 月,轻轨 3 号线宝山路站商业建筑起火,致使轻轨主梁混凝土大面积开裂、剥落;2017 年 5 月,中山西路三号人行天桥桥下堆放物起火致使部分钢横梁受火后发生断裂、变形;2017 年 12 月,浏港某大桥箱室内电焊作业导致未及时拆除的模板起火,使主梁表面大面积混凝土剥落、露筋。上述事故起火原因包括桥下堆放的木质家具、生活垃圾等易燃物以及桥下现有建筑物、箱室内木质模板、汽车事故等各种火灾隐患;受损交通设施包括高速公路桥梁、高架桥、人行天桥、轻轨等各类桥梁结构。事故发生后需要针对桥梁受损结构开展抢险性检测与评定。

运营期桥梁火灾事故种类繁多、隐患较大,事故发生后对结构损伤较大、其承载能力明显降低,并影响日常运营,后续检测工作要求高、时间紧,需第一时间针对桥梁结构安全技术状况提出准确的检测评定结果,为行业管理者提供可靠的决策依据。目前,桥梁火损结构的检测评定无针对性规范依据,暂可参考《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:

2009)^[15] 相关条文进行评定。本文在上述火损结构相关理论分析的基础上,总结相关实践经验,进一步针对运营期桥梁火灾后检测项目特点进行探索分析,研究形成了一整套技术流程,并依托典型的实际工程案例进行了较为系统的阐述,研究成果可为后续开展此类检测项目提供一定的参考。

1 工程概况

2016 年 8 月 29 日 20:46,上海市中环高架桥桥下堆积的泡沫包装箱发生火灾事故,起火点位于高架桥编号 HZ028 桥墩附近,对应上部结构形式为预应力混凝土鱼腹式连续箱梁,跨径均为 30 m。桥梁受火区域集中在 HZ028 桥墩及两侧 K028、K029 跨箱梁,火灾持续约 20 min,受火后 K028、K029 箱梁底面及 HZ028 桥墩立柱北侧面出现大面积混凝土剥落、内部钢筋外露。火灾前、后桥梁照片见图 1、图 2。



图 1 高架桥 HZ028 桥墩附近火灾前照片

Fig.1 Photo of viaduct pier HZ028 before fire

事故发生后,课题组第一时间赶赴现场开展抢险性检测工作,后续工作内容具体包括桥梁结构形式确认、事故原因分析、桥梁缺损状况全面检查、受火结构温度场及材料折减系数推定、结构损伤等级评定、总体结论及维修加固建议等,并出具检测成果报告,为桥梁后续制定通行限载措施和维修加固方案提供依据。

2 现场检测方法

2.1 事故原因分析

首先通过现场调查及走访等手段确定事故现场燃烧物品的种类及位置,初步判断火灾影响区域及其温度场分布特点。

高架桥 HZ028 桥墩位置的易燃物为附近水产市场集中堆放的泡沫箱,堆放区域纵桥向为紧挨 HZ028 桥墩立柱及延伸至 K026 的 1/2 跨径处和 K027 的 1/4 跨径处,横桥向为南半幅桥下。

2.2 缺损状况检查

现场桥梁各构件缺损状况的检查,是在传统检测手段的基础上,采用了徕卡 C10 型 3D 扫描仪对桥梁火损区域进行了扫描,得到的点云图可精确测量受火结构混凝土缺损面积及剥落深度,弥补了传统检测手段不足,提高了检测效率。现场三维点云扫描结果见图 2、图 3,结构受损区域示意图见图 4。



图 2 利用 3D 扫描仪扫描火灾后现场

Fig.2 Scanning using 3D scanner after fire

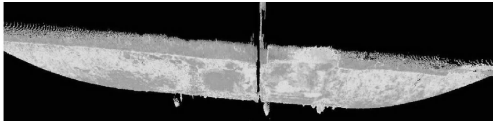


图 3 3D 扫描仪三维扫描点云图

Fig.3 3D scanning point cloud picture

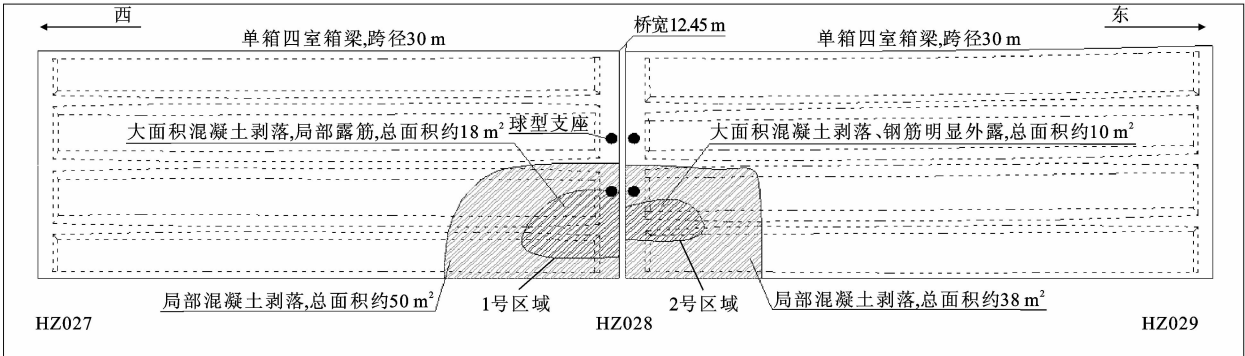


图 4 箱梁底板底面受火区域外观病害示意

Fig.4 Sketch of appearance disease of exposed to fire area at bottom surface of box girder

桥梁火灾后缺损状况具体检查结果如下。

(1)主梁火损最严重部位为图 4 中 K028 及 K029 腹板的 1 号区域,1 号区域表面出现大面积混凝土剥落,剥落面积达到 28 m²,最大剥落深度达到 30 mm。使用锤子对混凝土剥落表面敲击,回声较闷;并且梁底总计 13 根纵向钢筋和 13 根横向钢筋外露,其中有 3 根纵向钢筋因高温弯曲变形。

(2)图 4 中 2 号区域为主梁表面受火后导致混凝土呈现灰白色,面积约 88 m²,局部位置混凝土块状剥落,最大剥落深度达到 20 mm。使用锤子对混凝土剥落表面敲击回声发闷。主梁其余部位均存在烟熏痕迹。

(3)HZ028 桥墩立柱北侧出现大面积混凝土剥落,剥落面积达到 3.5 m²,最大剥落深度 18 mm;桥墩立柱顶部混凝土表面呈现粉红色。用锤子对混凝土剥落表面敲击回声较闷。

(4)HZ028 墩顶球形钢支座表面出现明显的烟熏痕迹,支座上垫石边角混凝土出现不同程度的剥落,存在着支撑能力不足的隐患。

2.3 混凝土强度检测

桥梁遭受火灾后对混凝土强度的影响是必然的,其影响程度须进行检测评定^[16]。桥梁结构现场混凝土强度的检测方法有回弹法、超声法、超声回弹法、钻芯法,但对于遭受火损的混凝土结构只适用于钻芯法,回弹法等其他方法检测结果误差较大。钻芯法检测混凝土强度的具体方法可依据《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(JGJ/T 384—2016)^[17]中的相关要求实施。

现场应先清除构件表面已空鼓、起壳的面层,然后采用取芯机,分别在 K028 和 K029 主梁上选取代表性的火损部位各钻取了 3 个芯样进行混凝土强度检测,并与主梁完好部位芯样强度检测结果进行对比,所取芯样直径均为 100 mm。取样及混凝土强度测试如图 5 所示,检测结果如表 1 所示。

与主梁外观良好部位混凝土强度代表值对比可知,K028 主梁 10~22 mm 深度火损部位强度代表值下降 8.4%,K029 主梁 9~21 mm 深度火损部位强度代表值下降 11.9%。

2.4 普通钢筋、钢绞线力学性能检测

火灾高温后结构内部钢筋力学性能的损伤检测也同样重要^[18]。钢筋取样位置选取 K028 和 K029 主梁火损最严重的部位,清除空鼓的剥落层后,截取内部普通钢筋和钢绞线,HRB400 螺纹钢 16 mm 直径 4 组、20 mm 直径 4 组,15.2 mm 直径钢绞线 6

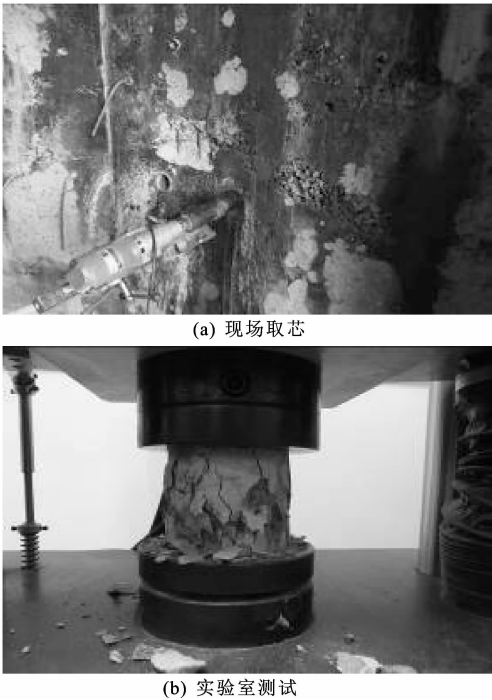


图 5 钻芯法检测主梁混凝土强度
Fig. 5 Main girder concrete strength test by core drilling method

表 1 钻芯法混凝土强度检测结果

Tab. 1 Test results of main girder concrete strength test			
芯样编号	芯样位置	剥落层厚度/mm	抗压强度/MPa
1	K028 主梁 火损部位	10~20	54.0
2		10~20	45.6
3		12~22	50.7
4	K029 主梁 火损部位	11~21	49.6
5		9~19	43.9
6		10~20	51.2
7	主梁外观 良好部位	0	56.5
8		0	53.7
9		0	54.0

组。普通钢筋进行拉伸、冷弯试验,钢绞线进行最大力、屈服力、伸长率及弹性模量试验,取样及钢筋试样测试如图 6 所示,试验结果分别见表 2、表 3。

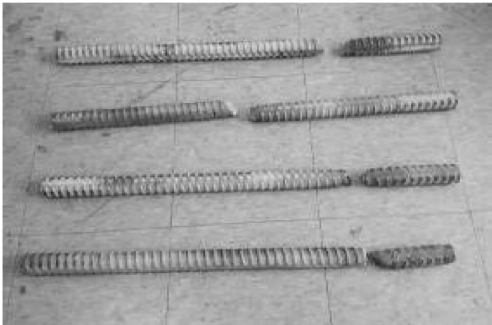
2.5 后续监测手段

现场检测工作完成后,后续应跟踪监测桥梁各构件有无进一步病害开展,混凝土破损、露筋病害有无进一步恶化趋势,主梁及墩柱是否有新增受力裂缝。并布置测点监测桥梁整体姿态的变形,关注主梁是否下挠、墩柱是否倾斜、支座是否沉降等。

根据本次事故桥梁特点,布置了小棱镜测点监测主梁火损结构位置竖向和横向变形趋势,具体位置为贴近 4 个支座旁,在 HZ028 墩顶主梁腹板共设置了 4 个棱镜观测点,基准控制点 BM1、BM2 设置在临近的其他桥梁墩柱上。采用 TS 30 型全站仪监



(a) 现场取样



(b) 实验室测试

图 6 内部钢筋力学性能测试取样

Fig. 6 Sampling for mechanical properties tests of internal reinforcement

表 2 钢筋拉伸、冷弯试验检测结果

Tab. 2 Test results of tensile and cold bending of reinforcing bars				
序号	样品位置	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	冷弯试验
1	K028 主梁	510	640	无裂纹
2	16 mm 钢筋	525	650	无裂纹
3	K029 主梁	485	585	无裂纹
4	16 mm 钢筋	515	610	无裂纹
5	K028 主梁	420	600	无裂纹
6	20 mm 钢筋	425	600	无裂纹
7	K029 主梁	415	590	无裂纹
8	20 mm 钢筋	415	595	无裂纹
判定标准 ^[19]		≥400	≥540	无裂纹

表 3 K028、K029 主梁 15.2 mm 钢绞线性能

Tab. 3 Performances of 15.2 mm steel strands of main girders K028 and K029

序号	样品位置	最大力/MPa	屈服力/MPa	最大力总伸长率/%	弹性模量/GPa
1	K028 主梁	276.7	250.8	6.0	199
2		273.9	247.4	5.4	199
3		274.0	245.1	5.2	203
4	K029 主梁	274.3	245.9	5.3	200
5		271.9	243.9	5.0	201
6		273.0	245.0	5.6	202
标准要求 ^[20]		≥260	≥229	≥3.5	195±10

测测点三维坐标,监测频率为每周 2 次,直至桥梁结

构完成维修加固。
测点布置见图 7、图 8,采用全站仪进行现场监测,如图 9 所示。监测结果表明,后续主梁结构未发现明显异常变形,整体姿态无异常。

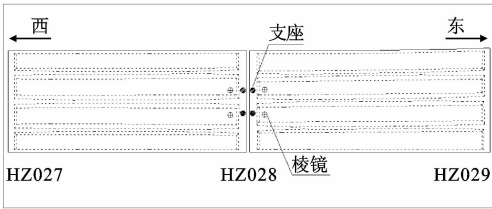


图 7 主梁变形监测小棱镜测点位置

Fig. 7 Positions of small prism measurement in main beam deformation monitoring



图 8 小棱镜安装实景

Fig. 8 Scene of small prism installation



图 9 全站仪进行主梁变形监测

Fig. 9 Deformation monitoring of main girders by total station

3 检测结果分析

3.1 火损结构温度场推定

参照熊伟等对火灾下钢筋混凝土梁温度场的相关研究^[21-22],现场对混凝土结构的表观损伤、混凝土表面颜色、锤子的敲击声进行了检查确认,综合分析混凝土技术状况和燃烧物调查结果,从而可以推测火场温度在 500℃~800℃。墩柱结构表面外观状况如图 10 所示,具体推算结果见表 4。



图 10 墩柱结构混凝土表面灰白色、显浅黄
Fig. 10 Pier column structure concrete surface
gray white and light yellow

表 4 火损结构温度场推测

Tab. 4 Estimation of temperature field for fire damage structures

检测区域	表面颜色	表面裂缝	锤击回响	混凝土剥落	推测温度/℃
1号区域	灰白色	无	较闷	大面积剥落	700~800
2号区域	浅灰白	网裂	发闷	局部剥落	500~700
HZ028桥墩	灰白色	无	较闷	大面积剥落	700~800

3.2 材料性能折减系数

在火损结构温度场推测结果的基础上,按照《火灾后建筑结构鉴定标准》(CDCS 252:2009)^[15]附录 E 温度场实用曲线,进一步推算结构内部普通钢筋及钢绞线受火温度,再根据附录 G,可初步判定冷却后钢材强度折减程度,具体见表 5。

表 5 依据规范^[15]推定钢筋强度折减系数

Tab. 5 Strength reduction factors of reinforcement based on code^[15]

位置	钢筋或钢束	保护层厚度/mm	推定温度/℃	强度折减系数
主梁 1 号区域	20 mm 钢筋	25	450	0.90
	16 mm 钢筋	15	550	0.85
	钢绞线	50	250	0.95
主梁 2 号区域	20 mm 钢筋	25	290	0.95
	16 mm 钢筋	15	400	0.90
	钢绞线	50	150	0.95

3.3 结构损伤等级分析

火灾后桥梁结构的检测评级可根据其烧灼损伤、变形、开裂(或断裂)程度等现象进行损伤等级评定。

本文中高架桥火灾事故导致混凝土表面存在较大面积剥落、局部钢筋外露,混凝土敲击声音发闷,已经显著影响了结构材料及性能,对结构正常使用

产生了明显不利影响,应采取加固措施。高架桥火损结构评定为中度损伤,级别为Ⅲ级。

3.4 承载能力现状评定

承载能力评定可在桥梁现状检查的基础上,依据桥梁结构材质状况的检测 results、结构固有模态参数测定以及荷载的调查分析等,确定引入检算系数、折减系数、恶化系数以及活载修正折减系数,并将其反映在结构抗力的表达式中;然后借助桥梁检测情况和竣工资料检算分析,通过荷载效应和抗力效应的比较,对桥梁的承载能力作出评定^[23],有限元计算模型见图 11。

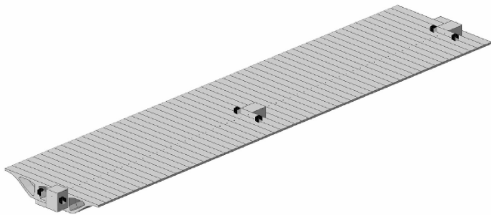


图 11 结构承载能力检算有限元模型

Fig. 11 Finite element model for structural bearing capacity check

检算结果表明,在汽-15 级荷载组合作用下,现阶段事故桥梁修正后的荷载效应均小于修正后的抗力效应,桥梁承载能力可以满足汽-15 级荷载的要求。

3.5 管养建议

(1)建议在修复完成前对桥梁实施限载措施,即禁止重型运输车辆通行,中小型社会车辆可正常通行。对桥梁受损结构监测有无受力裂缝开展、整体变形有无异常等情况,保障桥梁正常安全运营。

(2)混凝土开裂剥落、露筋区域,应对出露的钢筋进行表面处理和机械固定,施工时可种植锚固钢筋、加设钢筋网片,然后用环氧砂浆或其他可靠修补材料进行截面恢复,截面恢复后可在结构表面进一步粘贴钢或碳纤维布以提高结构耐久性。具体加固方法见相关火损结构加固设计研究^[24-25]。

(3)其他过火烟熏区域,可用高压水枪将混凝土表面冲洗干净,并进一步检查,如未发现其他病害,可在表面涂抹赛柏斯或其他水泥基渗透结晶性耐久材料进行简易修复即可。

(4)后续应加强全线桥梁的日常巡查,定期清理易燃物,消除火灾隐患。

3.6 成套技术

通过上述各章节的分析研究,归纳总结桥梁现场检测技术手段以及结构损伤评定方法,结合类似火灾事故检测项目管理方法,形成一整套“桥梁突发

火灾事故-成立应急小组-制定检测方案-现场检测-出具初步简报-正式报告-制定维修方案-实施维修加固-桥梁恢复正常运营”的流程,并依据各类似项目实际情况,对流程细节进行简化或微调,合理制定方案并开展实施,可高效完成运营期桥梁火灾后结构检测与评定,具体流程见图 12。

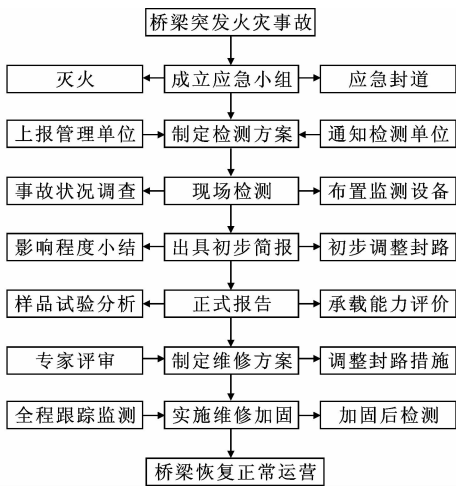


图 12 运营期桥梁火灾后结构检测成套技术流程
Fig. 12 Technical process of structural inspection for bridge in operation period after fire

4 结 语

(1)火灾受损结构的外观缺损状况检查,可采用 3D 扫描仪等新技术手段,扫描得到的点云结果可精确测量并记录结构缺损区域面积及剥落深度,弥补了传统检测手段的不足,提高了检测效率。

(2)桥梁火损结构的检测评定无针对性规范参考,暂可参考《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)^[15]中相关条文进行级别评定。结合现场采集的钢筋、混凝土试样试验结果对比分析可知,实测材料性能折减退化程度比规范推定结果要小。火损后混凝土结构强度下降 8.4%~11.9%;钢材强度略有损伤,但满足原有性能要求。在桥梁外观缺损状况检查和材质技术状况检测的基础上,对桥梁承载能力现状进行了折减、检算评定。

(3)运营期桥梁火灾隐患较大,事故时有发生,后续检测工作要求高、时间紧,需及时对桥梁结构安全技术状况进行准确检测评定,并应针对桥梁通行限载措施、维修加固方案等提出管养建议。后续火灾事故桥梁可参考本文方法及成套技术流程进行检测评定,为行业管理者提供较为可靠的决策依据。

参考文献:

References:

[1] 张 岗,朱美春,贺栓海,等. 火灾下预应力混凝土 T 形截面梁破坏模式研究[J]. 中国公路学报,2017,30(2):77-85.
ZHANG Gang, ZHU Mei-chun, HE Shuan-hai, et al. Failure model analysis of prestressed concrete girder exposed to fire[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 77-85.

[2] 武 建,李 波,张力志. 预应力混凝土空心板梁桥火损后检测评定[J]. 中外公路,2015,35(4):209-214.
WU Jian, LI Bo, ZHANG Li-zhi. Detection and evaluation of prestressed concrete hollow slab beam bridge after fire damage[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(4): 209-214.

[3] 张 岗,贺栓海,王翠娟. 整跨火荷载下 PC 薄壁多室变宽箱梁桥的变形[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011,31(2):42-46.
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, WANG Cui-juan. Deformation analysis of pre-stressed concrete multi-cell thin-wall variable width box girders bridge exposed to co-action of fire and load[J]. Journal of Chang'an University: Nature Science Edition, 2011, 31(2): 42-46.

[4] 张 岗,王翠娟,贺栓海,等. 桥面火灾下多梁式混凝土 T 型梁桥抗火性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2013,33(5):52-56.
ZHANG Gang, WANG Cui-juan, HE Shuan-hai, et al. Fire-resistant performance of multi-beam concrete T-shaped girder bridge exposed to deck fire[J]. Journal of Chang'an University: Nature Science Edition, 2013, 33(5): 52-56.

[5] 王 莹,刘沐宇. 大跨径悬索桥缆索抗火模拟方法[J]. 中南大学学报:自然科学版,2016,47(6):2091-2099.
WANG Ying, LIU Mu-yu. Fire resistance simulation of main cable and sling for long-span suspension bridge[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(6): 2091-2099.

[6] 计 琳, TAN Kang-hai, 赵均海. 薄壁槽钢柱的抗火计算方法及参数分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(6):55-60.
JI Lin, TAN Kang-hai, ZHAO Jun-hai. Fire resistance of thin-walled steel channel column and parameter analysis[J]. Journal of Chang'an University: Nature Science Edition, 2006, 26(6): 55-60.

[7] GU L, KOUDUR V K. Role of insulation effective-

- ness on fire resistance of steel structures under extreme loading events[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011(25):277-286.
- [8] AZIZ E M, KODUR V K, GLASSMAN J, et al. Behavior of steel bridge girders under fire conditions[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 106:11-22.
- [9] 刘 华, 高宗余, 刘其伟, 等. 某预应力混凝土连续梁桥火损评估与加固[J]. 桥梁建设, 2015, 45(4): 81-87.
LIU Hua, GAO Zong-yu, LIU Qi-wei, et al. Assessment and strengthening of a fire damaged prestressed concrete continuous girder bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 45(6):81-87.
- [10] 董晓兵, 王永亮. 某钢筋混凝土连续梁桥火损后评估与仿真分析[J]. 交通科技, 2016(6):42-45.
DONG Xiao-bing, WANG Yong-liang. Assessment and simulation analysis of a fire damaged reinforced concrete continuous bridge[J]. Transportation Science & Technology, 2016(6):42-45.
- [11] MARIA G, IGNACIO P Z, VENKATESH K, et al. Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies[J]. Engineering Structures, 2012, 35(1): 89-98.
- [12] 张 岗, 贺拴海, 王翠娟. 焰流效应下混凝土空心薄壁墩火温时变分布[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1):26-34.
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, WANG Cui-juan. Time-dependent variation distribution of fire temperature for concrete hollow thin-walled pier affected by flame fluid[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1):26-34.
- [13] KODUR V K, NASER M Z. Importance factor design of bridges against fire hazard[J]. Engineering Structures, 2013, 54(3):207-220.
- [14] 张 岗, 刘天龙, 施 颖, 等. 火灾条件下混凝土箱梁梁端预应力衰变规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3):65-71.
ZHANG Gang, LIU Tian-long, SHI Ying, et al. Decay low of prestress at concrete box girder end under fire condition[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3):65-71.
- [15] CECS 252:2009, 火灾后建筑结构鉴定标准[S].
CECS 252:2009, Standard for building structural assessment after fire[S].
- [16] 蔡 跃, 黄鼎业, 熊学玉. 预应力混凝土结构材料高温下的力学性能及模型[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(4):82-84.
CAI Yue, HUANG Ding-ye, XIONG Xue-yu. Material behaviors and mechanical model of pre-stressed concrete structure at high temperature[J]. Building Science Research of Sichuan, 2003, 29(4):82-84.
- [17] JGJ/T 384—2016, 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S].
JGJ/T 384—2016, Technical specification for testing concrete strength with drilled core[S].
- [18] 张昊宇, 郑文忠. 1 860 级低松驰钢绞线高温下力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6):861-865.
ZHANG Hao-yu, ZHENG Wen-zhong. Mechanical property of steel strand at high temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(6): 861-865.
- [19] GB/T 20065—2006, 预应力混凝土用螺纹钢筋[S].
GB/T 20065—2006, Screw-thread steel bars for the prestressing of concrete[S].
- [20] GB/T 5224—2014, 预应力混凝土用钢绞线[S].
GB/T 5224—2014, Steel strand for prestressed concrete[S].
- [21] 熊 伟, 李耀庄, 严加宝. 火灾作用下钢筋混凝土梁温度场数值模拟及试验验证[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(7):2839-2843.
XIONG Wei, LI Yao-zhuang, YAN Jia-bao. Numerical modeling and experimental verification on heat transfer of RC beams under elevated temperature[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(7):2839-2843.
- [22] 俞 博, 叶见曙, 温天宇. 火灾下混凝土空心板梁的温度场[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(3): 536-540.
YU Bo, YE Jian-shu, WEN Tian-yu. Temperature field in concrete hollow slab exposed to fire[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(3):536-540.
- [23] JGJ/T J21—2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
JGJ/T J21—2011, Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges[S].
- [24] 刘世忠, 马朝旭, 李丽园, 等. 火灾下 PC 箱梁的损伤评估与加固设计[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6):94-100.
LIU Shi-zhong, MA Chao-xu, LI Li-yuan, et al. Assessment and strengthening design of PC box girder subjected to fire damage[J]. Bridge Construction, 2014, 44(6):94-100.
- [25] 陈 淮, 邹旭岩, 朱俊涛, 等. 碳纤维布加固预应力混凝土空心板桥极限承载力全过程分析[J]. 世界桥梁, 2011(1):75-78.
CHEN Huai, ZOU Xu-yan, ZHU Jun-tao, et al. Full range analysis of ultimate bearing capacity of PC hollow slab bridge strengthened by CFRP texture[J]. World Bridges, 2011(1):75-78.