

文章编号:1671-8879(2018)06-0001-10

预应力混凝土桥梁抗火研究综述

张 岗^{1,2}, 贺拴海^{1,2}, 侯 炜^{1,2}, KODUR V K³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 密歇根州立大学 土木与环境工程学院, 密歇根州 东兰辛 MI 48824)

摘 要: 为了促进中国桥梁工程抗火研究领域的全面发展, 加快预应力混凝土桥梁的抗火研究, 回顾了国内外桥梁火灾的典型事故以及发生特点, 强调了油罐车火灾对桥梁结构威胁的严重性, 总结了预应力混凝土桥梁的火灾特点, 对其抗火研究存在的问题进行了梳理, 包括其材料高温特性、高温爆裂现状, 火灾下桥梁预应力的存在状态及其试验与测试方法, 火灾全过程中预应力混凝土桥梁力学性能的数值模拟与仿真, 预应力混凝土桥梁的耐火极限, 火灾后预应力混凝土桥梁的损伤评估加固及桥梁抗火研究的工程应用。从性能退化机理与极限垮塌行为、复合单元的研发与计算机仿真技术、收敛点的获取、火灾试验方法与测试技术、损伤评估精准模型和抗火设计方法的提出, 五大方面给出了预应力混凝土桥梁抗火研究亟待解决的问题和更新目标, 以期对桥梁工程抗火方向的学术研究提供新的视角和基础资料。

关键词: 桥梁工程; 预应力混凝土桥梁; 火灾; 综述

中图分类号: U448.213

文献标志码: A

Review on fire resistance of prestressed-concrete bridge

ZHANG Gang^{1,2}, HE Shuan-hai^{1,2}, HOU Wei^{1,2}, KODUR V K³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Old Bridge Detection and Reinforcement Technology of Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. College of Civil and Environment Engineering, Michigan State University, East Lansing MI 48824, Michigan, USA)

Abstract: To promote the comprehensive development of fire resistance in bridge engineering in China, and accelerate the research on fire resistance of prestressed-concrete bridges, some typical fire incidents of bridges occurring at home and abroad, as well as fire characteristics, were reviewed. The severity of oil tankers as threats to bridge structures was emphasized, and the characteristics of prestressed-concrete bridges exposed to fire were summarized. Thereafter, the status of research on the fire resistance of prestressed-concrete bridges was examined. This included the high-temperature properties of materials used for prestressed-concrete bridges, the spalling feature of prestressed concrete at elevated temperatures, the service status of prestress in concrete bridges under fire exposure conditions, a test and measurement method of prestressed

收稿日期: 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878057; 51308056); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM5018);

国家留学基金项目(201406565013); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821172003);

广东省交通运输厅科技项目(科技-2016-02-016); 安徽交控集团科技项目(JKKJ-2018-14)

作者简介: 张 岗(1980-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: zhangg_2004@126.com。

concrete bridges exposed to fire, a numerical analysis and simulation method of the mechanics in prestressed-concrete bridges during fires, the fire resistance of prestressed-concrete bridges, damage evaluation and strengthening methods for prestressed-concrete bridges after fire, and engineering applications. Finally, problems based on five aspects were proposed that remain to be solved in fire-resistance research for prestressed-concrete bridges, such as performance degradation mechanism and ultimate collapse behavior, compound element development and computer simulation techniques, the point of convergence, testing techniques in fire tests and measurement methods, a precise model of damage evaluation, and a fire resistance design method. A new perspective and basic information for the academic research on the fire resistance of bridges are expected. 4 figs, 68 refs.

Key words: bridge engineering; PC bridge; fire; review

0 引言

桥梁作为道路的主要枢纽,是交通建设和发展中的关键节点。桥梁工程是社会发展和国家经济建设的重要基础设施,体现着一个国家和地区的经济实力、科学技术、生产力发展和文化水平等综合国力。截至目前,中国公路桥梁建设的数量已超过 80 万座,高铁桥梁建设的里程累积超过 1×10^4 km,在全世界已建成的主跨跨径最大的排名位于前 10 座的桥梁结构形式中,中国的斜拉桥占有量为 7 座、悬索桥占有量为 6 座、拱桥占有量为 6 座、梁式桥占有量为 5 座。中国在桥梁建设水平、建设规模等方面不仅跻身于世界一流行列,而且世界领先,中国桥梁建设已成为中国建造的靓丽名片^[1]。

国家中长期发展规划中仍将交通基础建设摆在重要位置,目前,随着交通量的增大,城市空间格局加密,交通基础设施风险日益增多,面临爆炸、地震、台风和火灾等极端荷载的威胁。如何确保大桥的全寿命服务周期,防灾减灾至关重要,火灾作为重要风险之一,时刻体现在国民经济生活中,威胁着桥梁结构的安全,可能导致局部构件破坏甚至桥梁整体坍塌,是桥梁结构在施工及运营中面临的巨大挑战。桥梁抗火作为桥梁防灾减灾的重要研究方向之一,若能对桥梁火灾进行全面的、及时的控制及预警,桥梁的安全和人民的生命能够得到保障,桥梁抗火与防灾的发展是从根本解决桥梁灾害的一大分支^[1-20]。

1 桥梁典型火灾事件的回顾

置于自然环境中的桥梁发生火灾的形式复杂,火源多样,有桥下堆积物发生火灾(木材、垃圾等),桥下作业空间发生火灾(如桥下停车厂、桥下建筑

等),另外威胁最为严重的就是油源类火灾(油罐车、油轮及其他油源)。

随着经济的快速增长,能源的需求量急剧增大,运输硬脂酸、燃气、燃油(主要成分为烃类)等易燃物的挂车(统称油罐车)越来越多,由油罐车燃烧而导致的交通类火灾频频发生,见图 1。桥梁作为交通要道,屡遭火灾,由于桥梁所处环境的开放性和监控的盲目性以及消防的滞后性等因素,火灾燃烧往往一发不可收拾。此外,油罐车火灾热量集中,燃烧剧烈,温度峰值很高,对桥梁结构的破坏相比其他火灾更为严重^[1-20]。



图 1 油罐车火灾

Fig. 1 Fire hazard of oil tanker

全世界范围内每年都有多起严重的桥梁火灾事故发生。文献[2]调查表明,美国平均每年有 37 600 起交通火灾事故,导致 570 人伤亡和 1.28 亿美元的财产损失。纽约运输署曾在 2008 年开展了 18 个州的桥梁火灾事故调查指出^[3],有 52 座桥梁因火灾垮塌,是地震垮塌的 2.7 倍。下文给出几起典型的美国桥梁因油罐车火灾而垮塌的事故案例。

2007 年 4 月 29 日,一辆满载 32 551 L 汽油的油罐车在美国洲际公路 I-80/880 桥上行驶至 I-580 桥(每跨横桥向由 6 片钢板梁组成)下时发生翻车事故,导致油料外泄并引发严重火灾。消防官兵

14 min内赶到火灾事故发生地进行灭火,但是事故现场的温度达到了 $1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$,钢结构桥梁已经无法承受如此高的温度,火灾发生22 min,I-580立交桥上2孔桥梁发生了垮塌,相邻桥跨及桥梁下部结构的重要构件受到了严重的损坏,桥梁修复的费用昂贵,联邦政府花费900多万美元修复,其中拆除费用^[4-5]430万美元,交通封闭期间,每天经济损失600万美元^[6],见图2。



图2 I-80/580立交桥梁垮塌

Fig. 2 Collapse of I-80/580 overpass

2009年7月15日,一辆装载49 205 L爆燃液体的油罐车与另外一辆卡车在Hazel Park附近的I-75高速公路15 km处立交桥(该立交桥的跨径24 m,横桥向由10片钢板梁组成)下方发生事故,造成油罐车爆燃,温度很快超过 $1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$,超过了钢结构桥梁的极限承受能力,火灾发生20 min后该桥发生垮塌,消防官兵灭火时长达105 min。双向交通均需要大量的时间修复和重建,封闭交通造成了严重的经济损失^[2-7,10]。

2013年5月,美国两油罐列车相撞,致使德克萨斯州科罗拉多河的高架桥起火连续倒塌,如多米诺骨牌效应。其他著名的大桥也发生过重大油罐车火灾,如:美国加利福尼亚州的I-20/I-59/I-65立交桥、康乃狄克州的I-95段高架桥、康乃狄克州的诺沃克河大桥、康阿肯色州的比尔·威廉姆斯河大桥等^[7-10]。

2017年3月30日晚上,美国乔治亚洲85号洲际公路(I-85)北行线,乔治亚州400号公路以南的一座大桥(该桥梁为预应力混凝土T梁)发生火灾,40 min后,桥梁垮塌,见图3^[8-9]。

2004年8月26日,一辆汽车和一辆载着32 000 L燃料的油罐车在德国WIEHLTAL大桥相撞起火,导致该桥坍塌^[10]。

中国地域辽阔,地形条件多样,交通状况相对比较复杂。据不完全统计,中国每年发生火灾的桥梁



图3 I-85公路桥梁垮塌

Fig. 3 Collapse of I-85 highway bridge

有几十座,以油罐车火灾最为严重。尤其近年来,中国每年均有多座桥梁发生不同程度的油罐车火灾,大部分拆除重建,影响了交通运输质量、造成经济损失,严重威胁人民的生命财产安全。为了深刻认识油罐车火灾对桥梁的危害,管理部门和学者已投入大量的精力研究桥梁火灾。发生火灾的桥梁型式多样,包括索桥和梁桥;发生桥梁火灾的道路复杂,从过江河大桥、沿江高速公路高架桥、立交高架、城市快速干道高架桥到普通的小型桥涵,均发生过不同程度的火灾;发生火灾的桥梁材质类型有混凝土桥梁、钢桥、木桥、组合材料桥梁及组合体系桥梁。中国内预应力混凝土桥梁遭遇的重大油罐车火灾事故案例如下^[1,11-18]:2007年,广州虎门大桥上发生多辆油罐车碰撞,燃料泄露至桥面形成大面积火灾、桥梁栏杆被烧成波浪形^[12];2010年,过坑高架桥位于沈海(沈阳—海口)高速公路主线,油罐车途经时翻车起火,大火造成过坑高架桥多跨梁体严重损伤,并导致沈海高速公路泉州段交通中断^[13];2011年,浙江丽水高架桥上运输硬脂酸的油罐车发生火灾,致使两跨80 m梁桥(8片预应力混凝土箱梁)因烧损严重无法评估剩余承载能力而拆除;同年,在G210国道陕西榆林城区过境线草沟大桥,一辆油罐车发生爆燃,事故导致草沟大桥梁体变形严重、腹板开裂、终被拆除^[1,11,14-15];2012年,广东沿江高速公路大沙东高架桥多跨预应力混凝土连续梁遭遇严重的油罐车火灾,损失惨重^[16];2017年,G80广昆(广州—昆明)高速公路发生油罐车火灾(燃烧物为柴油),桥梁损坏严重,部分需要更换^[17]。

各地桥梁油罐车火灾也频现,桥梁的耐火性能和破坏判定准则十分不明确,致使交通中断,部分桥梁被迫拆除。

2 油罐车火灾的危害

桥梁火灾大多由于油罐车碰撞、附近烃化聚燃

物爆炸所引发的二次燃烧等原因造成,所以其燃烧急速,峰值温度较高,升温曲线见式(1),呈复合指数分布^[1-20]

$$T = H_{\text{oil}} \times 1\,080 \left(1 - 0.325e^{-\frac{1}{6}} - 0.675e^{-2.5t} \right) + T_0 \quad (1)$$

式中: T_0 为环境温度; t 为延火时间; T 为延火时间为 t 时的温度; H_{oil} 为油源的种类。

根据试验测试,油罐车火灾与碳氢(Hydrocarbon fire, HC)火灾温度曲线形式相似(计算分析中可按 HC 曲线或修正的 HC 曲线取值)^[7,10-11,18]。在火灾后几分钟内温度可达上千度。由于消防盲点、距离和拥堵等因素,其燃烧时间长,混凝土大面积深度爆裂,预应力钢束完全暴露于高温中,损伤发生突变,承载性能大大降低,腹板通长开裂,结构失效而最终破坏,如图 4 所示。同时,由于预应力混凝土桥梁跨径较大,发生局部火灾的可能性也相对较大。文献[7]调查研究表明:由于大型油罐车或者油轮碰撞导致的桥梁火灾,垮塌发生在 1.5 h 之内,不会给消防留太长时间,即使没有垮塌,桥梁修复及绕道费用也很昂贵,桥梁研究人员很难判断火灾后桥梁的承载能力。另外,火灾下预应力混凝土桥梁的垮塌没有明显大变形,在垮塌时刻变形率突增(脆裂破坏),如图 2 所示,该桥为预应力混凝土多梁式 T 梁桥,燃烧时间仅 40 min,整跨梁体突然坍塌。

3 预应力混凝土桥梁火灾特点

预应力混凝土桥梁相对于普通钢筋混凝土桥梁,其混凝土强度高、结构跨径大、截面刚度小,预制的预应力混凝土桥梁应用更为广泛。预制预应力混凝土桥梁腹壁薄,由于体内预加应力的存在,其组成材料和结构的力学性能对油罐车火灾更为敏感。目前的防火研究对象主要集中在建筑用构件,其结构三维尺寸与预应力混凝土桥梁相比小很多,火灾场景和火荷载作用范围不同,边界条件、受力特点及结构的整体性能也大有差异,大部分研究成果无法在预应力混凝土桥梁防火研究中直接应用。

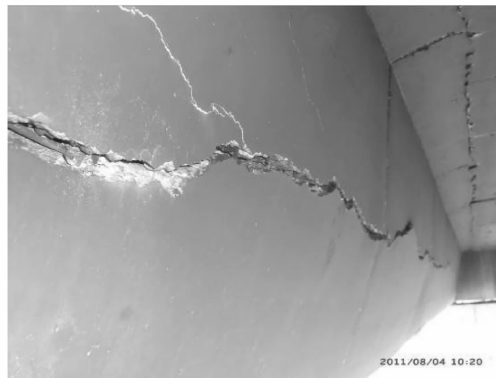
4 混凝土桥梁防火研究存在的问题

4.1 预应力混凝土桥梁的材料高温特性

材料的高温特性是研究火灾作用下预应力混凝土桥梁力学行为的关键,普通钢筋、混凝土和预应力钢束为组成预应力混凝土桥梁的主要材料,材料的高温热力学特性是热工特性和力学特性的总称^[21-37]。热工特性主要包括比热容、导热系数、容



(a) 混凝土深度爆裂(负弯矩区)



(b) 腹板破坏(整跨)

图 4 油罐车火灾对预应力混凝土箱梁的破坏

Fig. 4 Damage of PC box girder by oil tanker fire

重,含水量;力学特性主要包括强度、刚度、本构关系,热膨胀系数;另外,预应力钢束存有高温蠕变行为。欧洲规范认为混凝土的导热系数处于一个范围,不同成分混凝土的导热系数差异较大,导热系数直接影响混凝土的热传导速度,比热容和容重、含水量影响温度分布梯度的宽度和分布形态,所以温度场的分析是进行力学行为分析的基础,温度场差异性越大,力学行为分布差异性就越大。

材料在高温下的强度、刚度、本构关系、热膨胀系数对火灾下预应力混凝土桥梁的力学行为分析缺一不可,强度决定不同温度状态的应力分布极限,刚度影响不同温度下的结构变形,本构关系影响预应力混凝土桥梁的挠度随延火时间的变化轨迹,预应力钢束的高温蠕变影响其挠度轨迹的变化程度,热膨胀系数是结构热力耦合效应发生的力学本质。混凝土的强度和刚度随温度的升高较钢筋、预应力钢束衰减缓慢,欧洲规范认为混凝土本构下降段模型为直线或曲线均可^[28],过镇海等给出的混凝土在不同温度下的下降段模型为曲线^[27]。预应力钢束在 700 °C 时其强度和刚度损失殆尽,ASTM E119-E20 认为预应力钢束超过 400 °C,其相应的预加应力结构失效^[34],欧洲规范建议预应力钢丝的本构模型与

普通钢筋的本构模型一样,区别仅在于强度峰值^[30],实际上预应力钢丝与普通钢筋的制造工艺差距甚大,其本构模型在水平段有很大差异。

4.2 预应力混凝土的高温爆裂

国内外学者从混凝土内部存有压应力差的角度分析了混凝土爆裂规律^[38];对火灾下预应力板混凝土的爆裂规律进行了试验研究,提出了高温混凝土爆裂的临界温度^[39-40],用 ANSYS 成功模拟了火灾下预应力空心板的混凝土爆裂特征^[41],研究了 HC 火灾下不同板的爆裂机理;通过实例从微观结构分析了火损混凝土的结构特征^[42]。

低强度的混凝土在火灾高温下不易爆裂,高强度的混凝土在火灾高温下容易产生爆裂。混凝土的爆裂和其含水量密切相关,其含水量大易爆裂,养护龄期内的混凝土极易发生深度爆裂;混凝土的爆裂还和其存在应力状态密切相关,高应力状态下的混凝土易爆裂;混凝土的爆裂和其截面材料的组成结构密切相关,混凝土保护层厚度越小,爆裂的概率相对较大;混凝土的爆裂和其孔隙率密切相关,孔隙率越大,混凝土的爆裂几率较大;混凝土的爆裂跟外部火灾的剧烈程度密切相关,燃烧越剧烈,混凝土的爆裂程度越大;混凝土的爆裂与其所在截面的位置密切相关,预应力管道附近,混凝土梁的底板易爆裂。

对于高强混凝土桥梁,升温迅速的油罐车火灾极易导致混凝土发生爆裂,严重的混凝土爆裂使得受力钢筋直接受火,钢筋的失效会导致桥梁的突然垮塌。混凝土的高温爆裂导致内层混凝土的温度升高,加剧混凝土的劣化。混凝土的爆裂还可导致预应力钢束与普通钢筋的有效保护层厚度减少,温度迅速升高,预应力钢束与普通钢筋的力学性能出现显著的退化。

4.3 火灾下混凝土桥梁预应力存在状态

桥梁建设中预应力混凝土桥梁数量占比较大,预应力是混凝土桥梁增大跨径和增加承载性能的关键,预应力提供给混凝土桥梁的抗力占 80% 以上。火灾下混凝土桥梁的预应力损失可立即导致结构刚度和抗力的骤然下降,而预应力钢束性能对高温异常敏感,高温可导致钢束在高强应力作用下的松弛,有效预应力大幅衰减,虽然预应力钢束与预应力管道的黏结性能可使这种损失大大降低,然而预应力管道灌浆的饱满性严重影响高温下预应力的损失程度。另外,预应力钢束相对普通钢筋在高温状态延性较差,发生脆断的几率较大,可导致预应力混凝土桥梁的意外垮塌。混凝土的烧损程度也直接影响混

凝土桥梁的预应力损失。

混凝土桥梁有效预应力在桥梁工程领域是一个非常复杂的问题,仍需要深入的系统研究。火灾下混凝土桥梁有效预应力的研究需要知晓的信息量更大。有效预应力是影响预应力混凝土桥梁的耐火性能的关键因素之一,而高温下预应力钢束的力学性能与有效预应力直接相关。国内外对预应力钢束的高温力学性能进行了大量的试验研究和理论分析,主要集中在钢丝或钢绞线的泊松比、弹性模量、强度和应力-应变关系、高温蠕变模型及相关计算方法^{[21-26],[43-44]}。

张岗等考虑高温下混凝土、钢筋和预应力钢束的力学特性损失,结合大量的实桥有效预应力测试数据,通过数值模拟揭示了混凝土桥梁有效预应力衰变的基本规律及影响因素,提出了火灾全过程中有效预应力的预测方法^[45-46]。

4.4 火灾下预应力混凝土桥梁的试验测试方法

国内外学者对火灾下预应力混凝土结构进行了试验与分析,得到了结构的整体性能^[47-49]。然而,火灾下预应力混凝土模型梁的试验困难在于预应力的测试技术和方法,常温下有效预应力的测试是基于横张增量等方法实现的,此方法也可用于火灾后混凝土桥梁的有效预应力测试^[50],但无法用于高温中预应力混凝土桥梁的有效预应力测试。现阶段能够获取火灾下混凝土桥梁有效预应力的变化规律的方法是数值模拟,以锚下试验验证的方法建立正确的数值模型,旨在分析火灾全过程中混凝土桥梁的有效预应力衰变规律。另外,由于截面尺寸的影响,预应力混凝土梁式结构较板式结构的火灾试验时间较长。

侯炜完成了长时间火灾下(180 min)和火灾后(240 min)预应力混凝土模型箱梁的锚下应力试验与测试,获得了锚下应力以及模型梁的火损程度随火灾时间变化的规律,并对火灾下和火灾后预应力混凝土模型梁的跨中挠度进行了测试,获得了跨中挠度随火灾时间和模型梁的火损程度变化的规律^[11]。刘其伟等对火灾下(约 150 min)预应力混凝土空心板梁的爆裂进行了火灾试验,获得了其高温下的爆裂规律^[41]。

然而,试验条件的控制程度直接影响数据的可用性,例如测试人员对桥梁火灾的认知特征,炉温的均匀性,加载设备的恒定性,混凝土的养护龄期,模型梁的制作偏差,加载设备与模型梁之间的接触性,测试设备对温度的敏感性,这些因素均导致数据产

生较大的离散性,并影响对规律的判断。

4.5 火灾全过程预应力混凝土桥梁力学性能数值模拟与仿真

火灾下预应力混凝土桥梁的数值模拟难度远大于普通钢筋混凝土桥梁^[51-64],困难之一在于无法准确定位预应力钢束在体内的工作状态。另外,由于混凝土的拉压本构模型不一致,加之预应力集中应力的存在,预应力混凝土梁的火灾模拟收敛相对困难,一般采用多种方法并行计算,加密网格,增加荷载步和迭代次数,然而网格划分越密,荷载步越小,迭代次数越多,导致计算的规模和存储空间迅速增加,从而降低计算效率。所以亟需探索一种新型的计算方法,研发出一种新的复合单元,来解决预应力混凝土的防火分析问题。探索和研发的出发点就是要在计算效率、存储空间、精确度这 3 个方面要有所权衡,在满足求解精度的条件下,尽量使得计算效率高、存储空间小。笔者作者编制了大量的桥梁结构防火非线性分析程序,经研究发现:钢-混组合桥梁、普通钢筋混凝土桥梁的非线性迭代与收敛效果优于预应力混凝土桥梁,其收敛轨迹明显顺滑,预应力混凝土梁的收敛规律具有一定的阶跃性;收敛点难以捕捉,须采用多种方法获取收敛路径。

4.6 预应力混凝土桥梁耐火极限

国外学者开始预应力混凝土结构的耐火极限研究相对较早,20 世纪 60 年代,开始了预应力混凝土简支板的耐火极限研究;随后,分析了后张法预应力混凝土的耐火性能,对预制预应力混凝土的耐火性能提出了设计要求^[48-49];20 世纪 90 年代末,研究了施工过程中模板火灾对桥梁结构性能的破坏影响^[59]。21 世纪初,无损检测方法用于研究预制混凝土的火灾破坏特征^[58];数值模拟方法用于分析火灾事故中桥梁遭遇严重的局部火灾时的破坏过程和耐火性能,研究给出了结构热力耦合的非线性迭代计算方法^[51-52]。

由于 2007 年美国发生了重大的桥梁火灾垮塌事故,KODUR 院士等开始对桥梁火灾开展了系列研究,指出了欧洲规范^[28-31]中关于结构耐火设计的不足,调查了美国等多国桥梁火灾发生的原因,研究了决定桥梁耐火性能的几个主要内部参数和外部参数,提出了根据桥梁的分类进行火灾下安全预测的可靠性方法^[65-66],同时也提出了桥梁防火的相关设计方法。

中国学者在有黏结预应力混凝土单向简支板的耐火试验基础上,提出了合理考虑温度膨胀、高温蠕

变影响的荷载项对应的火灾下无黏结预应力筋应变及应力计算方法^[39,47],通过火损截面等效换算的方法,建立了等效截面模型,提出了能够预测火灾下预应力混凝土桥梁及受弯构件承载能力的计算方法^[57,63]。同时,考虑桥梁结构所处的环境特点,引入气流参数的影响,建立了桥梁环境火灾模型。大量的系列研究表明,数值仿真能够预测火灾下预应力混凝土桥梁的变形、承载能力及有效预应力的变化规律^[38,45,51]。

4.7 桥梁防火研究的工程应用

桥梁防火研究的目的在于火灾后预应力混凝土桥梁的损伤评估、加固及桥梁防火设计。

火灾后预应力混凝土桥梁将势必面临各方面及多样化评估。目前采用的多种评估方法可近似获取火灾后预应力混凝土桥梁的工作状态,例如材料测试法、荷载试验法、损伤反演法、场景复活法、损伤度区比法、经验法与综合评定法,这些方法的独立应用或者联合应用基本能够获取桥梁的火损状态^[1,11,50]。然而,如何使遭遇不同火灾后的预应力混凝土桥梁评估更精确并量化,就必须了解火灾全过程中预应力混凝土桥梁的力学行为和火灾后的性能静置演化过程。对于不同的火损程度,采用不同的修正评估方法,使得评估过程快速精准,经济合理,而盲目的或过度的评判,将导致后续的修复及加固行为升级,导致意外事故的发生、交通长时间封闭和大量的经济损失。

火灾后预应力混凝土桥梁的紧急处理措施包括临时保通和封闭道路维修加固。受火灾轻者则临时保通,重者必须封闭道路维修加固。临时保通的方法多样,而火灾后预应力混凝土桥梁的加固基本理念体现在 2 个方面:材料补强和结构补强。加固技术包括普通加固技术和复合加固技术;具体的加固方法包括粘贴加固、增强加固和补筋加固等,偶见体系加固,重者则拆除重新建造。无论采用何种方法,定损是关键。

提高桥梁结构防火能力,首先要从主动防火和被动耐火两方面着手^[67-68]。主动防火指智能预警和及时灭火;被动耐火主要是提高结构的耐火能力,延长耐火时间,通过研究结构的内部参数及外部火源位置,给出不同状况下的桥梁耐火极限。KODUR 等通过桥梁结构的重要性系数,研究给出了桥梁防火设计的内部参数和外部参数,指导了桥梁防火设计的发展^[65]。

5 亟待解决的问题

(1)深入研究火灾全过程中预应力混凝土桥梁的力学行为,明确其性能退化过程,揭示火灾全过程中预应力混凝土桥梁突然垮塌机理。

(2)精细化火灾下预应力混凝土桥梁的数值仿真过程,完善超高度的非线性迭代方法,进一步开发新型复合热力耦合单元,提出快速模拟火灾下预应力混凝土桥梁火灾全过程的动态仿真技术。

(3)更多获取火灾下有效预应力桥梁模型试验中的测试信息,提升测试手段和水平,完善预应力混凝土桥梁模型抗火性能试验与测试方法。

(4)提升并进一步完善火灾后预应力混凝土桥梁的精准评估方法,防止不恰当的火损评判所导致的经济损失和人员伤亡。

(5)进一步提升预应力混凝土桥梁的抗火设计理念,形成大数据,建立桥梁结构抗火设计标准、规程和规范。

(6)研发智慧桥梁结构与智能防控系统,以防桥梁突然垮塌事件的出现。

6 结 语

(1)总结了国内外桥梁典型火灾事故的发生过程,揭示了桥梁结构遭遇油罐车火灾的严重性,从火灾下材料高温特性,预应力混凝土桥梁力学行为,试验测试与工程应用等方面梳理了抗火研究现状,并给出了预应力混凝土桥梁抗火研究亟待解决问题。

(2)下一步需研发火灾后桥梁结构的智能检测设备,建立全面的智能评价方法,并形成智能评价体系。

参考文献:

References:

- [1] 贺拴海,张 岗,黄 侨.火灾下桥梁结构灾变机理及安全性评价与加固技术研究[R].西安:长安大学,2014.
HE Shuan-hai, ZHANG Gang, HUANG Qiao. Study on catastrophe mechanism and safety and strengthened technique on bridges structure exposed to fire [R]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [2] BATTELLE. Comparative risks of hazardous materials and non-hazardous materials truck shipment accidents/incidents[D]. Washington DC: Federal Motor Carrier Safety Administration, 2004.
- [3] GARLOCK M. Bridge fire incidents in New York

State[R]. New York: New York State Department of Transportation, 2008.

- [4] BULWA D, FIMRITE P. Tanker fire destroys part of MacArthur Maze[N/OL]. (2017-04-29) [2018-09-05]. <https://www.sfgate.com/bayarea/article/Tanker-fire-destroys-part-of-MacArthur-Maze-2-2575285.php>.
- [5] ASTANEH-ASL A, NOBLE C R, SON J, et al. Fire protection of steel bridges and the case of the MacArthur Maze fire collapse[C]//ASCE. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference, Reston: ASCE, 2009: 1-12.
- [6] CHUNG P, WOLFE R W, OSTROM T, et al. Accelerated bridge construction applications in California—A lessons learned report[R]. Los Angeles: California Department of Transportation, 2008.
- [7] GARLOCK M, PAYA-ZAFORTEZA I, KODUR V K, et al. Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies [J]. Engineering Structures, 2012, 35(1): 89-98.
- [8] 环球网.美国洲际公路乔治亚州一大桥起火坍塌[N/OL]. (2017-03-31) [2018-09-05]. https://m.huanqiu.com/r/MV8wXzI4NjYxMDBfMTI3XzE0OTA5MjU1NDA%3D?__from=cambrian.
Global Web. A bridge over US Interstate Highway in Georgia caught fire and collapsed[N/OL]. (2017-03-31) [2018-09-05]. https://m.huanqiu.com/r/MV8wXzI4NjYxMDBfMTI3XzE0OTA5MjU1NDA%3D?__from=cambrian.
- [9] 亚城热点.大火烧断 I85[N/OL]. (2017-03-31) [2018-09-05]. http://www.sohu.com/a131391599_206381.
Yacheng Hotspot. I85 broke in fire[N/OL]. (2017-03-31) [2018-09-05]. http://www.sohu.com/a131391599_206381.
- [10] GONG X. Behavior of bridges during fire[D]. New York: The City College of New York, 2015.
- [11] 侯 炜. 预应力混凝土箱梁结构抗火性能研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
HOU Wei. Study on the performance of concrete box girder of PSC structure in fire[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [12] 金羊网-羊城晚报(广州). 虎门大桥油罐车爆炸六死一伤(图)[N/OL]. (2007-10-06) [2018-09-05]. <http://news.163.com/07/1006/21/3Q5DT7O30001124J.html>.
Golden Sheep Net-Yangcheng Evening News (Guangzhou). Oil tankers exploded on Humen Bridge causing six deaths and one injury (Photos)[N/OL]. (2007-10-06) [2018-09-05]. <http://news.163.com/07/1006/21/3Q5DT7O30001124J.html>.

- [13] 东南新闻网. 福建泉州一辆油罐车侧翻大火烧坏高架桥(组图)[N/OL]. (2010-06-27)[2018-09-05]. http://news.sohu.com/20100627/n273111396_2.shtml. Southeast News Net. An overturned oil tanker caused fire and damaged the viaduct in Quanzhou, Fujian Province (Photos) [N/OL]. (2010-06-27)[2018-09-05]. http://news.sohu.com/20100627/n273111396_2.shtml.
- [14] 盛伟. 高速上一装载化学品货车爆炸烧伤高架桥(图)_新闻_腾讯网[N/OL]. (2011-08-18)[2018-09-05]. <https://news.qq.com/a/20110818/000791.htm>. SHEN Wei, A truck loading chemicals exploded on highway and damaged the viaduct_News_Tencent[N/OL]. (2011-08-18)[2018-09-05]. <https://news.qq.com/a/20110818/000791.htm>.
- [15] 李瑛. 陕西榆林油罐车被追尾漏油起火引燃9辆车烧裂桥梁[N/OL]. (2011-08-04)[2018-09-05]. <http://news.cri.cn/gb2782420110804782s3327969.htm>. LI Ying, An oil tanker, caught in rear-end collision, spilled the oil and ignited 9 cars and damaged the bridge in Yulin, Shaanxi Province[N/OL]. (2011-08-04)[2018-09-05]. <http://news.cri.cn/gb2782420110804782s3327969.htm>.
- [16] 中国新闻网. 广州油罐车爆炸现场:千米高架桥被大火熏得乌黑[N/OL]. (2012-06-29)[2018-09-05]. <http://www.chinanews.com/gn/2012/06-29/3997741.shtml>. China News Net. An exploded oil tanker caught fire and smoked the kilometers of viaducts in Guangzhou [N/OL]. (2012-06-29)[2018-09-05]. <http://www.chinanews.com/gn/2012/06-29/3997741.shtml>.
- [17] 养护在线. G80 广昆高速平陆段桥梁火灾扑救和应急处治纪实[N/OL]. (2017-08-01)[2018-09-5]. http://www.sohu.com/a/161425875_99915349. Maintenance Online. Documentary of bridge firefighting and emergency treatment over Pingsuo of G80 Highway [N/OL]. (2017-08-01)[2018-09-05]. http://www.sohu.com/a/161425875_99915349.
- [18] 李国强, 许炎彬, ASIF U. 油罐车火灾下钢-混凝土组合梁桥结构响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(3):444-452. LI Guo-qiang, XU Yan-bin, ASIF U. Study on structures responses of steel-concrete composite highway bridge under fuel tanker fire[J]. Journal of Disaster Prevention Mitigation Engineering, 2016, 36(3):444-452.
- [19] 郑文忠, 侯晓萌, 王英. 混凝土及预应力混凝土结构抗火研究现状与展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12):1-18. ZHENG Wen-zhong, HOU Xiao-meng, WANG Yin. Progress and prospect of fire resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12):1-18.
- [20] 吴波, 唐贵和. 近年来混凝土结构抗火研究进展[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6):110-121. WU Bo, TANG Gui-he. State-of-the-art of fire-resistance study on concrete structures in recent years[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6):110-121.
- [21] UTTING W S, JONES N. The response of wire rope strands to axial tensile loads—Part II: Comparison of experimental results and theoretical predictions[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1987, 29(9):605-619.
- [22] WEI Y, ZHANG L, AU F T K, et al. Thermal creep and relaxation of prestressing steel[J]. Construction and Building Materials, 2016, 128:118-127.
- [23] 张昊宇, 郑文忠. 1 860 级低松弛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.
- [24] 宗钟凌, 张晋, 蒋德稳, 等. 高温下 1 860 级钢绞线钢丝力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(1):43-47. ZONG Zhong-ling, ZHANG Jin, JIANG De-wen, et al. Experimental research on the mechanical properties of steel strand ($f_{ptk}=1\ 860\ \text{N/mm}^2$) wire at elevated temperature[J]. Building Science, 2016, 32(1):43-47.
- [25] 周焕廷, 聂河斌, 李国强, 等. 高温作用下 1 860 级预应力钢绞线蠕变性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6):123-129. ZHOU Huan-ting, NIE He-bin, LI Guo-qiang, et al. Experimental research on creep properties of prestressed steel strand in 1 860 MPa at high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(6):123-129.
- [26] 王俊, 蔡跃, 黄鼎业. 预应力钢筋高温蠕变试验研究及有限元分析应用[J]. 土木工程学报, 2004, 37(11):1-5. WANG Jun, CAI Yue, HUANG Ding-ye. Testing research on thermal creep strain model of prestressing tendons and application of FEM analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(11):1-5.

- [27] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Principle and analysis of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [28] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures — Part 1. 2: General action — Action on structures exposed to fire[S].
- [29] EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1. 2: General rules — Structural fire design [S].
- [30] EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1. 2: General rules — Structural fire design[S].
- [31] EN 1994-1-2, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures — Part 1. 2: General rules — Structural fire design[S].
- [32] ASTM E1529-14a, Standard test methods for determining effects of large hydrocarbon pool fires in structural members and assemblies[S].
- [33] KODU V K, SHAKYA A M. Modeling the response of precast, prestressed concrete hollow-core slabs exposed to fire[J]. PCI Journal, 2014, 59(3): 78-94.
- [34] ASTM E119-E201, Standard methods of fire test of building construction and materials (test method) [S].
- [35] ASCE7-05, Minimum design loads for building construction[S].
- [36] BS 476-20, Fire tests on building materials and structures — Part 20: Method from determination of the fire resistance of elements of construction (general principles)[S].
- [37] SHAKYA A M, KODUR V K. Response of precast prestressed concrete hollow-core slabs under fire conditions[J]. Engineering Structures, 2015, 87: 126-138.
- [38] 张 岗, 贺拴海. 焰流效应下混凝土空心薄壁墩热力耦合形差与层剥分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(11): 46-54.
ZHANG Gang, HE Shuan-hai. Thermo-dynamic coupled deformation difference and layering stripping analysis for concrete hollow thin-walled pier affected by flame fluid [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11): 46-54.
- [39] 郑文忠, 许名鑫, 石东升, 等. 火灾下预应力板混凝土爆裂规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 48-53.
ZHENG Wen-zhong, XU Ming-xin, SHI Dong-sheng, et al. Experimental study on spalling of concrete of prestressed slabs in fire[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 48-53.
- [40] 陈明阳, 侯晓萌, 郑文忠, 等. 混凝土高温爆裂临界温度和防爆裂纤维掺量研究综述与分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1): 161-170.
CHEN Ming-yang, HOU Xiao-meng, ZHENG Wen-zhong, et al. Review and analysis on spalling critical temperature of concrete and fibers dosage to prevent spalling at elevated temperatures[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 161-170.
- [41] 刘其伟, 夏 凌, 王成明. 预应力混凝土空心板梁火灾中行为特点的试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(1): 67-75.
LIU Qi-wei, XIA Ling, WANG Cheng-ming. Experimental study of behavior characteristics of PC hollow slab beam exposed to fire[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(1): 67-75.
- [42] GUERRIERI M, FRAGOMENI S. Mechanisms of spalling of concrete panels of different geometry in hydrocarbon fire[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(12): 164-176.
- [43] 杜 咏, 陆亚珍. 钢索在火灾升温历程中瞬态张力的解析计算方法[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 159-165.
DU Yong, LU Ya-zhen. Mathematical calculation of instantaneous tension for steel cables in fire temperature history[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 159-165.
- [44] 丁 勇, 章 伟, 萧 寒, 等. 预应力混凝土梁板在桥下空间火灾时的温度场与预应力筋松弛研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增1): 42-47.
DING Yong, ZHANG Wei, XIAO Han, et al. Study on the temperature field of prestressed concrete beam-plate in underbridge fire hazard and the prestress loss of tendon[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 42-47.
- [45] 张 岗, 刘天龙, 王翠娟, 等. 强度减损下混凝土箱梁预应力高温损失分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2015, 16(4): 345-352.
ZHANG Gang, LIU Tian-long, WANG Cui-juan, et al. Prestress loss of concrete bridge with box girder based on strength reduction exposed to fire[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 345-352.
- [46] 张 岗, 施 颖, 宣纪明, 等. 混凝土连续箱梁支点处钢束预应力高温衰变研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 76-80.
ZHANG Gang, SHI Ying, XUAN Ji-ming, et al. Study of prestress decay of steel strands in PC contin-

- uous box beam at support under high temperature[J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 76-80.
- [47] 郑文忠, 许名鑫, 杨杰, 等. 预应力混凝土简支板抗火性能试验与分析[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(6): 48-59.
- ZHENG Wen-zhong, XU Ming-xin, YANG Jie, et al. Experimental analysis of anti-fire capacity of simply supported prestressed concrete slabs[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(6): 48-59.
- [48] GUSTAFERRO A H, SELVAGGIO S L. Fire endurance of simply supported prestressed concrete slabs[J]. Journal of the Prestressed Concrete Institute, 1967, 12(1): 37-52.
- [49] GUSTAFERRO A H. Fire resistance of post-tensioned structures[J]. Journal of Prestressed Concrete Institute, 1973, 18(2): 39-63.
- [50] 李世安. 火灾过程预应力混凝土梁桥力学性能分析及灾后评价方法[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- LI Shi-an. Mechanical performance analysis of fire process and post-disaster evaluation method of prestressed concrete girder bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [51] FRANSSEN J M. SAFIR; A thermal/structural program for modeling structures under fire[J]. Engineering Journal, 2005, 42(3): 143-150.
- [52] CAPUA D D, MARI A R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire[J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(2): 139-149.
- [53] DWAIKAT M B, KODUR V K. A numerical approach for modeling the fire induced restraint effects in reinforced concrete beams[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(4): 291-307.
- [54] KODUR V K, DWAIKAT M. A numerical model for predicting the fire resistance of concrete beams[J]. Cement Concrete Composites, 2008, 30(5): 431-443.
- [55] ZHANG G, KODUR V K, XIE J C, et al. Behavior of prestressed concrete box bridge girders under hydrocarbon fire condition[J]. Procedia Engineering, 2017, 210: 449-455.
- [56] ZHANG G, KODUR V K, HOU W, et al. Evaluating fire resistance of prestressed concrete bridge girders[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 62(6): 663-674.
- [57] 张岗, 朱美春, 贺拴海, 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 T girder exposed to fire[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 77-85.
- [58] DILEK U. Evaluation of fire damage to a precast concrete structure nondestructive, laboratory, and load testing[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(1): 42-48.
- [59] NEVES I C, BRANCO F A, VALENTE J C. Effects of formwork fires in bridge construction[J]. Concrete International, 1997, 19(3): 41-46.
- [60] DOTREPPE J C, MAJKUT S, FRANSSEN J M. Failure of a tied-arch bridge submitted to a severe localized fire, structures and extreme events[C]//IABSE. IABSE Symposium Report 2005, Zurich: IABSE, 2005, 15-22.
- [61] KODUR V K, DWAIKAT M. Performance-based fire safety design of reinforced concrete beams[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2007, 17(4): 293-320.
- [62] KODUR V K, DWAIKAT M. Fire performance of reinforced concrete beams under design fire exposure[C]//ASCE. Structures Congress 2008, Reston: ASCE, 2008: 1-10.
- [63] 董毓利, 房圆圆. 火灾作用下混凝土双向简支板的挠度计算[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 63-68.
- DONG Yu-li, FANG Yuan-yuan. Determination of deflection of two-way simply supported reinforced concrete slabs in fire[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 63-68.
- [64] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG Xin-min. Engineering structure numerical analysis in ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [65] KODUR V K, NASER M Z. Importance factor for design of bridges against fire hazard[J]. Engineering Structures, 2013, 54(3): 207-220.
- [66] NASER M Z, KODUR V K. A probabilistic assessment for classification of bridges against fire hazard[J]. Fire Safety Journal, 2015, 76: 65-73.
- [67] GUSTAFERRO A H, MARTIN L D. Design for fire resistance of precast prestressed concrete[M]. Chicago: Prestressed Concrete Institute, 1988.
- [68] NAGARAJAN P. Reliability studies on RC beams exposed to fire based on IS 456: 2000 design methods[J]. Structures Engineering and Mechanics, 2016, 59(5): 853-866.