

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.03.018

先张法预应力空心板火损评定方法及处治对策

童浩¹, 季晓燕², 赵佳军¹, 李捷¹, 郭涛¹

(1. 江苏宁沪高速公路股份有限公司, 江苏 南京 210049; 2. 南通万达公路养护工程有限公司, 江苏 南通 226600)

摘要: 火灾对先张法预应力空心板的安全性、耐久性存在非常不利的影响, 详细阐述了火灾事故的处置思路 and 具体方法。研究提出综合采用颜色判别法、损伤程度判别法以及空心板内部温度场有限元分析法, 以便更准确地判别火灾后结构的内部损伤。研究结果表明, 火灾高温灼烧后混凝土强度严重下降, 结构工作性能降低甚至丧失。通过对火损后结构表观状况和各类重要指标劣化的检测、火灾时结构表面温度推算、结构内部温度场模拟分析, 研究得出判别内部损伤深度情况的方法, 对损伤程度不同的板梁分别提出了保留利用、加固或拆除等相应处置措施。

关键词: 桥梁工程; 先张法预应力空心板; 评定方法; 火损; 温度场; 处治对策

中图分类号: U448.35; U445.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 03-0098-06

Fire-damage Evaluation Method of Pretensioned Hollow Plates and Countermeasures

TONG Hao¹, JI Xiaoyan², ZHAO Jiajun¹, LI Jie¹, GUO Tao¹

(1. Jiangsu Nanjing-Shanghai Expressway Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210049, China;

2. Nantong Wanda Highway Maintenance Engineering Co., Ltd., Nantong Jiangsu 226600, China)

Abstract: There is a very negative impact of fire on safety and durability of the pretensioned hollow plates. Treatment ideas and specific methods of fire accidents were described in detail. A combination of color discriminant, damage degree discriminant and finite element analysis of internal temperature field discriminant was proposed to discriminate the internal damage of structures after fire more accurately. The results show that there is a serious decline in the strength of concrete after fire, and structural performance is reduced or even lost. Through detection of apparent situation and deterioration of some important indexes after fire, reckoning of surface temperature and simulation of internal temperature during fire, the way of distinguishing the depth of internal damages was obtained. For the plate girders with different damage degrees, the countermeasures of preserving, strengthening or demolishing method were proposed respectively.

Key words: bridge engineering; pretensioned hollow plate; evaluation method; fire damage; temperature field; countermeasure

0 引言

先张法预应力混凝土空心板梁具有优良的工作性能和耐久性, 20世纪80年代以来在我国高等级公路的桥梁上被广泛运用, 尤其是跨径在20 m以下的

桥梁。先张法预应力混凝土板梁通常会被作为大桥引桥或跨越不通航河道中、小桥的上部结构, 而这些桥梁往往桥下净空较小, 在桥梁养护中经常发现桥下堆积有人为倾倒的易燃垃圾。在高温、干燥季节, 这些易燃物极易在桥下引发火灾, 使得板梁直

收稿日期: 2011-08-08

基金项目: 江苏省交通科学计划项目

作者简介: 童浩 (1982-), 男, 江苏海安人, 硕士, 工程师. (niko886@163.com)

接受高温灼烧而损伤,如灭火不及时,甚至会引起底板混凝土剥落、开裂以及钢绞线外露、钢筋变形等严重病害。

先张法预应力空心板板内的预压应力是在混凝土与钢绞线之间有效粘结的条件下建立的,火灾发生后,底板直接受高温灼烧,混凝土、钢绞线材料力学性能以及两者之间的粘结性能降低。有关文献研究表明,当混凝土受火温度达到 $300\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,混凝土、钢绞线的强度、弹性模量开始大幅降低^[1],两者之间的粘结力逐渐丧失。因此,受火灾高温灼烧的空心板无论在结构工作性能、安全性还是耐久性方面都会有所降低,甚至会引起严重安全隐患。

在役先张法预应力板梁桥遭受火灾的事故屡见不鲜,而对于空心板火损后工作性能的评定以及火损病害处治的对策方面研究很少,桥梁养护工作中对于火损问题的处置还有很多值得深入探讨之处。本文以某先张法预应力板梁桥为对象,对灾后火损情况进行了详细的调查,并且进行了相关参数的检测与分析,采用合理方法对空心板火损后的工作性能进行了评定,并提出了病害处治对策。

1 火损情况调查

某桥建于2004年,为高速公路主线桥梁,跨径布置为 $3\times 16\text{ m}$,单幅桥面全宽 17 m ,净宽 15.5 m 。上部结构采用先张法预应力混凝土空心板梁,简支结构、连续桥面,横向设16片板梁;下部结构采用柱式墩、台,钻孔灌注桩基础。设计荷载为汽车-超20,挂-120。

2010年12月,边跨桥下突发火灾,导致该桥跨内半数以上的空心板底面严重烧伤,造成混凝土多处剥落以及钢绞线与钢筋外露。火灾发生后,及时封闭了严重受损板梁对应的桥面内侧车道,过往车辆限速通行,并且在桥下搭设了支架对严重受损板梁进行临时支撑,避免发生安全事故。

1.1 火场分析

在火损分析中,根据现场调查情况进行火场分析非常重要,是判断主要着火点、火灾时长以及结构受损分析的基础。现场调查后发现,火灾发生前,桥下曾堆积了大量易燃物,同时存在多处着火点。根据灾后废墟位置以及不同板梁的受损状况,推测较严重着火点共3处,如图1所示。

根据不同板梁的受损程度差异,3处严重着火点的起火时间、持续时长以及火灾温度有所区别。图2

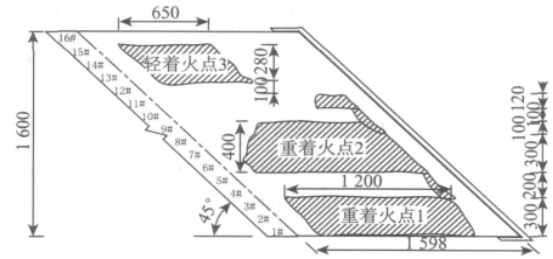


图1 桥下着火点分析(单位:cm)

Fig. 1 Analysis of fire position under damaged bridge (unit: cm)

中着火点1的火灾持续时间相对最长,着火点2其次,而着火点3处的火灾延续时间相对较短,火场温度也相对较低。

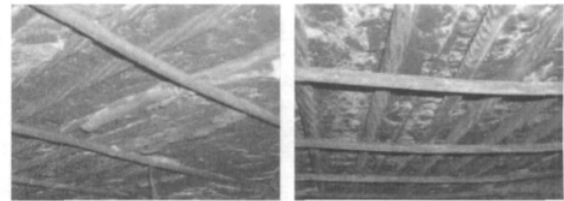


图2 3#板梁底钢绞线外露、钢筋弯曲变形

Fig. 2 Situation of exposed strands and steel bending of the 3rd hollow plate beam

1.2 板梁受损检测

火灾后对板梁进行受损检测,主要包括现场检查和检测2项工作内容。检查板梁底面的外观状况,如损伤性状、混凝土剥落面积和深度、混凝土硬度、颜色变化、钢绞线与钢筋变形等^[2-3];可进行底板混凝土强度、底板均匀性(密实性)、碳化等方面的检测。

1.2.1 现场检查

因本桥着火点较多,火损影响范围大且差异性较为明显,在进行检查时除了全面的外观检查外,还进行了混凝土剥落面积、剥落深度的测试,对表面损伤严重的部位采用锤击方式探查了表面硬度和疏松情况。在进行病害描述时,一般可按照损伤严重程度进行区域性的描述和记录,且病害现象应与着火点分布情况相一致,否则应考虑风向、桥下净空差异等影响因素,以便于火损影响分析。根据对本桥的现场检查情况,分为梁底混凝土严重剥落区域、梁底混凝土轻度剥落区域进行描述。

(1) 梁底混凝土严重剥落区域

位于重着火点1、2内的1#、3#、8#、9#板梁烧损严重,梁底混凝土剥落深度为 $4\sim 8\text{ cm}$,且表面疏松,硬度低甚至全无强度,手剥可落。经开凿、锤

击探测,底板实际疏松层厚度还要再向板梁内高度方向延伸2~3 cm,底板中间部位(内腔下缘)实际有效厚度已经不足3 cm。

3[#]梁内有8根钢绞线外露长度达4.5 m(基本位于 $L/4$ ~ $L/2$ 区域),部分钢绞线失效段的外包套管被烧熔,外露的其他纵向钢筋以及横向箍筋已经弯曲变形。

4[#]、5[#]板梁虽未发生混凝土脱落但大面积空鼓,混凝土表面已呈现淡红、黄色,且起皮现象严重,外观类似鱼鳞状,多处发生局部爆裂。

梁底混凝土剥落病害的平面分布情况如图3中阴影区域所示。

图3 梁底混凝土剥落病害平面分布图(单位:cm)

Fig. 3 Plane distribution of concrete spalling beneath the hollow plate beam (unit: cm)

高温灼烧使得梁底边角、翼板边角混凝土严重开裂、疏松。开裂、疏松层混凝土的深度达到7~10 cm,1[#]梁边角处箍筋外露。

(2) 梁底混凝土轻度剥落区域

10[#]、13[#]、15[#]板梁存在轻度剥落病害,剥落深度为1 cm左右,经锤击探查,未发现空鼓现象。

1.2.2 现场检测

针对底板混凝土强度、匀质性以及碳化深度这些影响结构安全性、耐久性的主要可测参数进行了检测,为火灾影响分析及结构安全性评定提供量化的直接依据。尤其混凝土强度检测非常重要,是分析结构承载力变化的主要依据^[4]。

(1) 混凝土强度检测

对于龄期大于1 000 d的结构、受火结构等,回弹检测所得混凝土强度值不能直接作为结构实际的强度等级,即使采用超声与回弹法综合检测法(适用于龄期在2 000 d之内的混凝土结构)也无法直接评定混凝土强度。因此,检验灾后混凝土强度状况的相对合理的方法是,对火损区域内(包括未损伤但被熏黑)混凝土强度与完好区域内混凝土强度进

行对比,以分析火烧对混凝土强度的影响程度。回弹法所测值实际为构件表面混凝土的强度值。检测结果表明:

①1[#]、3[#]、8[#]、9[#]板梁混凝土严重剥落区域内,混凝土疏松,强度丧失;

②4[#]、5[#]梁虽未发生大面积混凝土剥落,但混凝土强度相对于完好板梁降低近30%;

③10[#]、16[#]梁底面被熏黑,未破损区域以及轻微剥落区域(打磨后测试)的实测混凝土强度相对于完好板梁降低约6%,未产生空鼓现象。

(2) 底板匀质性检测

对轻度损伤的10[#]、16[#]梁的底板,在纵桥向和横桥向设多个测区,采用超声仪进行了声速测试,以检验板梁底板是否存在空鼓现象。按照下述方法测试:

- ①距混凝土剥落区域边缘5~10 cm处;
- ②经锤击探查对是否空鼓有怀疑处;
- ③板梁跨中区域处。

图4 声速检测区分布图(单位:cm)

Fig. 4 Plane distribution of velocity detection areas (unit: cm)

经检测分析,除13[#]、15[#]梁底混凝土剥落区域附近个别测区的实测声速存在离散性外,其他各测区实测声速基本处于4.26~4.57 km/s之间,总体上较为均匀,尤其板梁跨中区域未发现声速离散现象,表明火灾未对10[#]、16[#]梁的底板造成明显损伤。

(3) 混凝土碳化深度检测

轻度受损和严重受损板梁的底板(未剥落区域)混凝土碳化深度相对于完好板梁略有增加,但差异很小,为2.2~2.4 mm,碳化深度变异性小,且深度远小于混凝土保护层厚度。因此,火灾未明显加重混凝土碳化。

除了对受火桥跨的上部空心板进行检查、检测外,对支座以及墩台帽、立柱的受损状况也进行了外观检查,以使得火灾影响评价更为全面。经检查,边跨墩帽上的支座未受损,但台帽上1[#]、9[#]梁的原四氟滑板橡胶支座不同程度受损,支座顶面的四氟

板已部分烧化; 板梁与支座接触区域的混凝土存在剥落、起皮现象。

2 火损影响分析与结构安全评定

2.1 火损状况评定

(1) 评定方法

在现场检查、检测工作完成后, 实际上已经掌握了结构受损的性状、分布和严重程度, 基本能够直观地判别结构受火损后的工作状态, 但是对于结构工作性能、承载力的降低程度还无法进行客观、量化的判定。

目前已有一些文献提出采用颜色判别、损伤程度判别等方法来定性地评价结构受火后的损伤状况^[5]。但是从笔者处置桥梁火损事故的经验分析, 火灾引起的桥梁病害复杂多样, 采用单一的方法还难以准确地判别各类状况, 因此提出应同时采用多种方法进行定性分析, 并且利用有限元分析的量化结果加以验证, 以获得更符合实际情况的有力论据, 评价结构工作性能、承载力的损失情况。主要工作思路如下:

①综合采用表面颜色判定法、损伤程度判定法, 根据板梁损伤严重程度推算火灾温度, 得到空心板底面的最高直接受火温度。

②根据不同火损区域的火灾温度, 进一步推算高温灼烧时长, 以便进行板梁温度场分析。

③建立空心板有限元模型, 模拟实际受火条件, 进行空心板内部温度场分析, 对底板损伤深度状况做进一步评价。

④根据以上分析结论, 对不同受损程度的空心板进行安全性评定。

(2) 空心板底面受火温度分析

对存在混凝土剥落病害的区域采用损伤程度判定法推算表面受火温度; 对未出现明显剥落病害的区域采用颜色判定法推算表面受火温度。经分析后, 空心板底面受火最高温度的区域性分布情况如图 5 所示。

(3) 高温灼烧时长推算

在火灾作用下空心板截面内的温度分布是随时间变化的。火灾温度的确定一般参照国际标准化组织 (ISO) 提供的理论试验曲线 (图 6), 其表达式如下:

$$T = T_0 + 345 \times \lg(8t + 1), \quad (1)$$

式中, T 为火灾标准温度; T_0 为自然界温度; t 为火灾经历时间。

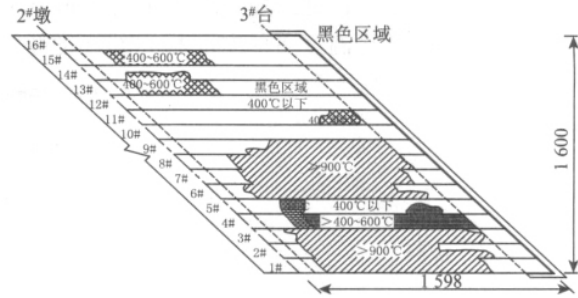


图 5 空心板梁底表面温度分布图 (单位: cm)

Fig. 5 Plane distribution of surface temperature beneath the hollow plate beam (unit: cm)

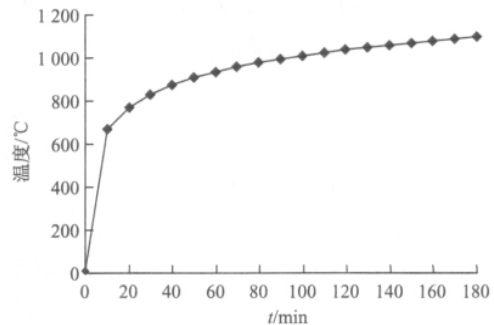


图 6 标准火灾升温曲线 (ISO)

Fig. 6 Standard temperature-time curve (ISO)

根据式 (1) 以及推算得到的空心板底面温度分布情况, 可以推算出火灾持续的时长为 1 h 左右, 当然根据火损状况的区域性差异, 各个着火点的火灾时长有所差异, 着火点 1、2 时长最长, 着火点 3 时长相对较短。

(4) 空心板内部温度场分析

火灾条件下, 空心板底面出于非稳态升温环境, 空心板自身与外界空气、内腔空气存在热辐射、传导、对流, 板梁内部温度场也处于不断变化之中^[5-7]。理论上可利用 ANSYS 建立空心板的空间有限元模型, 分析火灾温度不断升高过程中空心板内部的温度场变化情况。对于某一块板, 其底面受火情况下的四周边界条件可用图 7 来模拟。

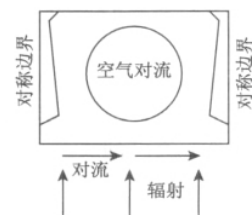


图 7 受火边界条件分析

Fig. 7 Analysis of boundary condition under fire

利用有限元方法,可按照标准火灾升温曲线对火灾升温过程中任意温度下的空心板内部温度场进行分析。本文仅针对严重损伤区域、轻度损伤区域,

对空心板底面温度为400℃、高于900℃的情况进行阐述。这2种温度条件下空心板内温度场如图8所示。

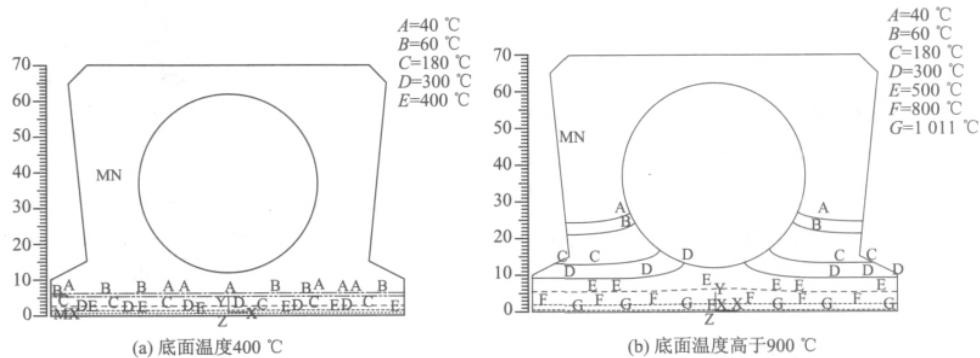


图8 理论分析空心板内部温度场

Fig. 8 Theoretical analysis of internal temperature field of the hollow plate

通过理论分析可以明确地反映表面温度达到400、900℃之后空心板的内部温度场,可以清楚地看到空心板底板从表面高温向内部低温的衰减过程,从而分析火灾对空心板内部混凝土、钢绞线的影响。当底面温度为400℃时,底板由下而上约1cm厚度范围内的混凝土温度为400℃,而再向上至2cm厚度时,温度已衰减至300℃以下,对混凝土强度等性能指标的影响已经很小;当底面温度超过900℃后,底板由下而上7~8cm厚度范围内的混凝土温度由1000℃逐渐衰减至400℃,而再向上至9cm厚度时,温度才能衰减至300℃以下。

根据损伤程度判定法,当混凝土温度达到400℃后,材料强度、弹性模量将明显加速衰减,并出现脱空、剥落现象。结合实际混凝土剥落病害与理论分析结论,对于1#~9#板梁,其底面温度应为900~1000℃,而且梁底(12cm厚)80%厚度的混凝土强度受到严重削弱甚至丧失,且钢绞线与混凝土之间的粘结力基本丧失;对于10#~16#板梁,其底面温度为400℃左右,一般钢绞线的净保护层厚度在3cm以上,因此理论上10#~16#板梁内部混凝土与钢绞线的力学性能及两者之间的粘结性能有一定影响但并不严重。

(5) 火灾高温对空心板工作性能的影响

火灾高温主要对板梁底板造成了损伤,结合先张法预应力板梁底板内预压应力的形成机理,火灾的不利影响主要体现在^[8]:

- ①当底板表面温度达到400℃以上后,直接造成预应力钢绞线与混凝土之间粘结性能下降甚至丧失,导致锚固失效,造成预压应力效应的降低甚至丧失。
- ②高温灼烧造成混凝土、钢绞线弹性模量减小,钢绞线发生松弛,导致预应力损失。
- ③当温度达到900℃后,混凝土、钢绞线和钢筋强度基本丧失,空心板承载力基本丧失。

因此,桥下发生火灾后,高温灼烧会引起先张法预应力板梁下缘预压应力减少,尤其在梁底混凝土剥落、截面受到削弱后,荷载作用下板梁底面的拉应力明显增加,刚度降低,而先张预应力混凝土板梁普通钢筋较少,灼烧后混凝土强度降低甚至丧失,在拉应力过大的情况下会发生突然的脆性破坏。

2.2 结构安全性、耐久性评定

对受火损边跨空心板的安全性、耐久性评定如表1所示。

表1 板梁火灾受损分类

Tab. 1 Damage classification of hollow plate beam after fire

| 项目 | 空心板编号 | 温度/℃ | 颜色 | 有无剥落 | 有无露筋 | 耐久性 | 承载力 | 工作性能 |
|------|---------|----------|------|------|------|------|------|------|
| 轻微损伤 | 10#~16# | 低于400 | 黑 | 轻微 | 无 | 降低 | 满足 | 下降 |
| 中度损伤 | 4#、5# | 400~700 | 淡红淡黄 | 中度 | 无 | 严重降低 | 基本丧失 | 基本丧失 |
| 严重损伤 | 1#~3# | 900~1000 | 黑、灰 | 严重 | 严重 | 严重降低 | 基本丧失 | 基本丧失 |
| | 6#~9# | 900~1000 | | 严重 | 中度 | 严重降低 | 基本丧失 | 基本丧失 |

此外,边跨3#台处1#~9#板梁的原橡胶支座已丧失工作性能且板梁支承区域混凝土破坏,评定为中度损伤构件。下部结构墩、台帽及桥墩立柱未发生明显病害,仅表面被熏黑。

依据《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)要求,从结构安全性角度考虑,受火边跨内的1#~9#板梁的工作性能不能满足正常使用的要求,桥梁存在严重安全隐患,整体评为4类桥。

3 处治对策

3.1 维修加固措施

根据对火灾影响的定性、定量分析以及安全性评定结论,考虑到桥梁处于高速公路主线上,又即将面临春运,该桥的维修加固工程被列为抢修工程。如对受火损桥跨的上部板梁全部拆除,因工期较长将会直接影响春运。为了保证维修加固后桥梁结构的安全性和耐久性,同时鉴于抢修工程的特殊性,保春运、保安全,加快进度、减少交通影响,消除隐患,总体采用了如下措施:

1) 基于10#~16#梁受火烧造成的结构强度和耐久性较小的前提,采用拆除、置换1#~9#梁、保留利用并加固10#~16#梁的总体方案,不中断桥面交通;

2) 10#~16#梁虽然受损较轻,但火灾已经造成了不利影响,为了解火烧后板梁在原设计荷载等级、满载工况下的工作性能,验证并确保方案可行,在1#~9#梁拆除后,对10#~16#梁进行荷载试验检测,以保证维修加固期间的临时通行安全,暂时性应对交通压力;

3) 从长期安全性和耐久性方面考虑,对10#~16#梁采用粘贴碳纤维法进行维修加固。

3.2 保留利用空心板的承载力检算与荷载试验评定

在维修加固期间,保留利用的10#~16#板梁将临时承担交通荷载,虽然火灾未对10#~16#板梁的承载力造成大的影响,但是由于协同受力的板梁数量由16片减少至7片,使得板梁分担的荷载效应增加,因此必须对板梁的承载力进行检算与试验,验证临时通行的安全性。

经理论分析,正常使用极限状态下,板梁处于最不利受力状态时其跨中截面下缘会出现0.17 MPa的拉应力,小于混凝土的抗拉强度,板梁极限状态下的承载力仍有一定富余;通过对剩余7片板梁的荷载试验检测,各块板梁的应力及挠度校验系数均在0.6~0.8之间,再加以限制单车道通行的管制措施,保留利用板梁的安全性可以得到有力保障。

4 结语

虽然已经有少数文献对火灾后空心板梁的工作性能进行了分析,但是考虑到火灾影响有一定的复杂性,为了使得评价的结果更为客观、符合实际,本文提出综合采用颜色判别法、损伤程度判别法以及空心板内部温度场有限元分析法以更准确地推算火灾后结构的内部损伤,尤其可更直观地判断火灾高温对底板内钢绞线的影响程度。

本文以某先张法预应力空心板梁桥为对象,详细阐述了火灾事故的处置思路和方法。在火灾发生后,可按照如下流程开展工作:(1)立即开展各项现场检查、检测工作,尽可能多地掌握火损后结构的表观状况和各类重要劣化指标;(2)模拟和推算火灾时结构的表面温度,理论上进一步分析结构内部温度场,判别内部损伤深度情况;(3)根据分析结论以及养护规范要求,对结构安全性、耐久性进行评定;(4)分清轻重缓急,制定合理、有效、经济的处治对策。希望本文的工作思路可以为今后同类桥梁火灾事故处置提供有益的参考。

桥梁火灾事故必须通过养护、路政等部门的日常检查与维护消除在萌芽阶段,尤其应经常检查桥下净空较小的桥梁,清理易燃堆积物,杜绝引火根源才是最好的措施。

参考文献:

References:

- [1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 113 - 122.
GUO Zhenhai, SHI Xudong. High Temperature Performance of Reinforced Concrete and Its Calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 113 - 122.
- [2] 陆洲导,朱伯龙. 混凝土结构火灾后的检测方法研究 [J]. 工业建筑, 1995, 25 (12): 37 - 41.
LU Zhoudao, ZHU Bolong. The Test Methods of Concrete Structure after Fire [J]. Industrial Construction, 1995, 25 (12): 37 - 41.
- [3] 刘其伟,王峰,徐开顺,等. 火灾受损桥梁检测评估与加固处理 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (2): 71 - 74.
LIU Qiwei, WANG Feng, XU Kaishun, et al. Detection Evaluation and Repairing of Fire Damaged Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (2): 71 - 74.

(下转第130页)

- Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2008, 32 (1): 43-46.
- [10] 康立山, 谢云. 非数值并行算法: 模拟退火算法 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
KANG Lisan, XIE Yun. Non-numerical Parallel Algorithm: Simulated Annealing [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [11] 陈淑燕, 王炜, 郑长江. 基于模拟退火求解的一种新的随机存储规划模型 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (4): 144-147.
- CHEN Shuyan, WANG Wei, ZHENG Changjiang. Apply Simulated Annealing to Solve a Novel Random Storage Programming Model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (4): 144-147.
- [12] 张跃, 邹寿平, 宿芬. 模糊数学方法及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
ZHANG Yue, ZHOU Shoupin, SU Fen. Fuzzy Mathematical Method and Its Application [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992.

(上接第103页)

- [4] 余江滔. 火灾后混凝土构件损伤评估的试验及理论研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007: 37-41.
YU Jiangtao. Experimental and Theoretical Research on Damage Assessment of Reinforced Concrete Member after Fire [D]. Shanghai: Tongji University, 2007: 37-41.
- [5] 俞博, 叶见曙, 温天宇. 火灾下混凝土空心板的温度场 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39 (3): 536-540.
YU Bo, YE Jianshu, WEN Tianyu. Temperature Field in Concrete Hollow-slab Exposed to Fire [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39 (3): 536-540.
- [6] 余志武, 唐国庆, 丁发兴. 三面受火钢筋混凝土梁温度场非线性分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22 (4): 11-14.
YU Zhiwu, TANG Guoqing, DING Faxing. Nonlinear Analysis of Temperature Field of Reinforced Concrete Beam with Three Surfaces Exposing to Fire [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22 (4): 11-14.
- [7] 任泽霖, 张立宁, 贾力. 封闭空间中自然对流与导热、辐射的复合换热 [J]. 工程热物理学报, 1988, 9 (3): 245-250.
- REN Zepei, ZHANG Lining, JIA Li. Natural Convection in Enclosure Combined with Conduction and Radiation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1988, 9 (3): 245-250.
- [8] 董毓利. 混凝土结构的火安全设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 55-57.
DONG Yuli. The Fire Safety Design of Concrete Structure [M]. Beijing: Science Press, 2001: 55-57.
- [9] LIE T T. Fire Resistance of Circular Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120 (5): 797-805.
- [10] BSIEN 1992-1-2, Eurocode 2, Design of Concrete Structures-General Rules-Structural Fire Design [S].
- [11] HUANG Zhaohui, PLATTEN A, ROBERTS J. Non-linear Finite Element Model to Predict Temperature Histories within Reinforced Concrete in Fires [J]. Building and Environment, 1996, 31 (2): 109-118.
- [12] 李国强, 蒋首超, 林桂祥. 钢结构抗火计算与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 49-51.
LI Guoqiang, JIANG Shouchao, LIN Guixiang. Fire Resistance Design and Calculation of Steel Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999: 49-51.

(上接第108页)

- [13] BASTIDAS-ARTEAGA E, CHATEAUNEUF A, SANCHEZ-SILVA M, et al. Influence of Weather and Global Warming in Chloride Ingress into Concrete: Astochastic Approach [J]. Structural Safety 2010, 32 (4): 238-249.
- [14] HASSAN J E, BRESSOLETTE P, CHATEAUNEUF A, et al. Reliability-based Assessment of the Effect of Climatic Conditions on the Corrosion of RC Structures Subject to Chloride Ingress [J]. Engineering Structure, 2010, 32 (10): 3279-3287.
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel in Climate Change [M]. UK: Cambridge University Press, 2007.
- [16] WIGLEY T M L, RICHELIS R, EDMONDS J A. Economic and Environmental Choices in the Stabilization of Atmospheric CO₂ Concentrations [J]. Nature, 1996, 379 (1): 240-243.