

预应力刚接空心板梁桥火灾后检测与鉴定

夏宇轩

(上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200032)

摘要: 火灾对桥梁结构的损伤可能严重影响桥梁的安全性和稳定性,及时地进行损伤鉴定是至关重要的。准确评估损伤程度和范围有助于为后续的加固和修复工作提供准确的数据支持,从而确保桥梁能够尽快恢复正常使用。通过实际刚接空心板梁桥火灾工程案例,系统实施现场检测、损伤等级评定、技术状况评定及承载能力验算。据此提出针对性维修加固建议,所形成的案例经验与方法可为后续类似桥梁火灾后的灾后应急抢险工作提供参考依据。

关键词: 刚接空心板;火灾鉴定;损伤鉴定;维修加固

中图分类号: U445.7⁵;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0131-06

Post-fire Inspection and Appraisal of Prestressed Rigid-connected Hollow Slab Beam Bridge

XIA Yuxuan

(Shanghai Institute of Building Research Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Fire-induced damage to bridge structures may seriously affect the safety and stability of the bridge. It is very important to carry out the damage appraisal in time. The accurate evaluation of the extent and scope of damage helps provide precise data support for subsequent reinforcement and repair work, thereby ensuring that the bridge can be restored to normal use as soon as possible. Through actual fire engineering cases of rigidly connected hollow slab beam bridges, the on-site inspection, damage level rating, technical condition assessment and load-bearing capacity checking calculation are systematically implemented. According to this, the targeted maintenance and reinforcement recommendations are proposed. The achieved case experience and methods can provide the reference basis for the post-fire emergency rescue of the similar bridges.

Keywords: rigid-connected hollow slab; fire identification; damage appraisal; maintenance and reinforcement

0 引言

桥梁火灾事故原因有多种,通常交通事故、人为因素、自然因素以及桥梁管理等。经过火灾的桥梁可能不再安全使用,检测鉴定能够识别潜在的安全隐患,对桥梁管理单位而言,迅速判定桥梁结构安全性是否满足要求至关重要。同时根据检测结果,可以制定出更合理的修复方案,确保修复后的桥梁满足设计要求,并且在未来的使用中能承受预期的交通荷载。

1 工程简介

1.1 桥梁概况

该桥为偏南北走向的三跨简支预应力刚接空心

板梁桥,桥梁全长为36.94 m,跨径组合为10.0 m+16.0 m+10.0 m,桥梁墩台与桥梁轴线顺交27°。上部结构边跨采用10 m、中跨采用16 m的预应力混凝土刚接空心板梁,每跨均由30榀板梁组成,梁底宽1.1 m,梁高分别为0.55、0.85 m,板梁采用C50混凝土,As 15.2 mm的高强低松弛钢绞线,强度标准值 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ 。桥墩为墩柱盖梁形式,桥台为直壁式桥台,基础采用D80 cm钻孔灌注桩,台后接道路挡墙,其中墩台帽采用C35混凝土,立柱、系梁采用C40混凝土。桥梁设计荷载为公路—I级。

1.2 事故背景

本次火灾发生在桥梁北边跨,着火源为桥梁北岸一条东西向的农用管道。由于此跨桥梁净高较小,受火后梁底出现大面积明显烟熏痕迹,并蔓延至邻近跨,在受火集中区域(北边跨),梁底混凝土呈现土黄色或灰白色,多数梁底混凝土已出现大面积剥落。火灾现场见图1。

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 上海市住房和城乡建设管理委员会科研项目(沪建科2023-002-029)

作者简介: 夏宇轩(1993—),男,硕士,工程师,从事桥梁检测工作。



图1 火灾现场

2 外观检测

为了解火灾现场的燃烧情况、火灾的温度和燃烧时间,对火灾现场进行勘察,对现场残留的燃烧物进行调查。结果表明,着火源为桥梁北岸一条东西向的农用管道,管道内直径 73.5 cm,管道顶面距第 1 跨梁底 0.73 m,管道侧面距 0#桥台 0.75 m,距 1#桥墩 5 m。管道燃烧长度约 40.5 m。管道布置及火灾影响区域示意图见图 2。

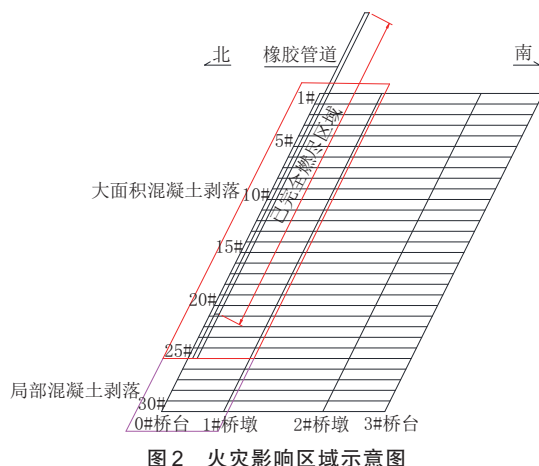


图2 火灾影响区域示意图

2.1 上部结构

(1)起火区域净空较低(净空为 1.83 m),火烧范围内板梁、湿接缝混凝土颜色呈灰白色,橡胶锤敲击声音发闷、混凝土粉碎及脱落,根据《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)规定混凝土构件表面特征与温度的关系,推断板梁混凝土表面最高温度达 700 °C 以上^[1]。

(2)1-1#~25#板梁底面、腹板、湿接缝表面大面积混凝土剥落,钢筋外露,总面积约为 410.54 m²,现场照片见图 3。

(3)1-1#~25#梁底、腹板、湿接缝混凝土剥落深度最大分别约为 5、13 cm,剥落深度已超过主筋保护层(3 cm),且腹板全高度范围(腹板高 35 cm)混凝土开裂、剥落。因梁体截面混凝土面积损失较大,且张紧的预应力钢筋受火灾高温影响会产生松弛现象,



图3 梁底及梁间湿接缝大面积剥落露筋

综合现场检测结果,判断板梁承载能力已大幅削弱,现场照片见图 4。



图4 湿接缝剥落最大深度 13.0 cm

(4)1-26#~29#板梁表面局部混凝土剥落,1-29#、1-30#板梁梁底纵向裂缝、渗水。

(5)0#桥台上方大部分板式橡胶支座已因高温烘烤开裂,现场照片见图 5。



图5 0#台支座开裂

(6)2#跨、3#跨板梁梁底、湿接缝整体熏黑,现场照片见图 6。

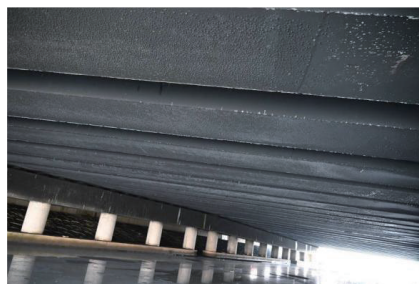


图6 2#跨梁底熏黑

2.2 下部结构

(1)起火区域距离 0#台较近(约 50 cm),火烧范围内桥台台帽混凝土颜色呈灰白色,橡胶锤敲击声音发闷、混凝土粉碎及脱落,根据《火灾后工程结构

鉴定标准》(T/CECS 252—2019)规定混凝土构件表面特征与温度的关系,推断台帽混凝土表面最高温度达 700 ℃以上。

(2)0#桥台台帽(1#~6#板梁下、11#~15#板梁下、16#~21#板梁下)上表面及侧面大面积混凝土剥落,钢筋外露,总面积约为 46.4 m²,桥台主要为受压构件,因此桥台承载能力未明显下降,现场照片见图 7。

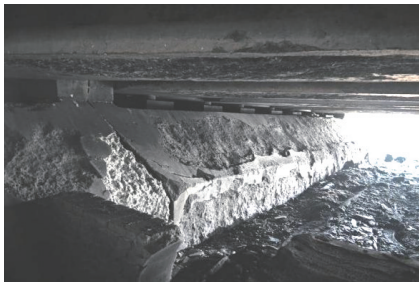


图 7 0#台台帽混凝土大面积剥落、露筋

(3)1#桥墩盖梁北侧面 16#~19#板梁下混凝土出现剥落,面积较大,总面积约为 6.5 m²,剥落深度未超过保护层厚度,未见钢筋露出,故桥墩承载能力未明显下降。现场照片见图 8。



图 8 1#桥墩盖梁北侧面混凝土局部剥落

(4)2#桥墩盖梁、3#桥台台帽整体熏黑,现场照片见图 9。



图 9 3#台熏黑

2.3 桥面系

火灾产生大量烟雾,延 0#台伸缩缝、东西两侧边梁外侧向上蔓延,造成 0#台伸缩缝位置、两侧栏杆大面积熏黑,栏杆油漆剥落,现场照片见图 10、图 11。

3 损伤等级评定

在火灾发生后,对桥梁结构的各个构件进行初



图 10 桥面栏杆熏黑



图 11 栏杆熏黑、油漆脱落

步的检测和评估时,需要根据构件的烧伤程度、变形情况以及是否出现开裂或断裂,依据以下标准来划分其等级^[4]。

根据《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)表 3.2.1(见表 1)中的构件的初步鉴定评级标准,混凝土和砌体结构在火灾后遭受了严重的损害,结构承载能力大部分丧失,危及结构安全。因此,构件初步鉴定等级应评为Ⅳ级,通常需要采取拆除或更换的措施。

表 1 构件的初步鉴定评级标准^[1]

级别	烧灼损伤程度	应对措施
I	未遭受烧灼作用,未发现火灾及高温造成的损伤,构件材料、性能及安全状况未受到火灾影响	不必采取措施
Ⅱ _a	轻微烧灼,未发现火灾及高温造成的损伤,构件材料、性能及安全状况受火灾影响不大	可不采取措施或仅采取提高耐久性的措施
Ⅱ _b	轻度烧灼,构件材料及性能受到轻度影响,火灾尚不明显影响构件安全	应采取提高耐久性 or 局部处理和外观修复措施
Ⅲ	中度烧灼,构件材料及性能受到明显影响,火灾明显影响构件安全	应采取加周 or 局部更换措施
Ⅳ	严重烧灼或破坏,结构倒塌或构件塌落,结构构件承载能力丧失或大部分丧失,危及结构安全	应立即进行安全防护,并采取彻底加固、更换 or 拆除的措施

根据《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)表 3.2.2(见表 2)中构件的详细鉴定评定标准,结合现场检测和分析情况,详细鉴定应直接评为 d 级,应立即加固、更换或拆除^[1]。

表2 构件的详细鉴定评级标准^[1]

级别	烧灼损伤程度	应对措施
a	未受到火灾影响且符合国家现行标准安全性要求,安全,可正常使用	不必采取措施
b	受火灾影响,或略低于国家现行标准安全性要求,不影响安全,可正常使用	宜采取适当措施
c	不符合国家现行标准安全性要求,影响安全和正常使用	应采取的措施
d	极不符合国家现行标准安全性要求,严重影响安全	应立即加固、更换或拆除

4 桥梁技术状况等级评定

根据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)第4.1.8条的规定,“在进行全桥总体技术状况等级评定时,若主要部件的评分达到4类或5类,并且对桥梁安全构成影响,则应依据桥梁主要部件中最严重的缺损状况来进行评定”^[2]。

该桥梁的上部结构被评定为4类,因此,其整体技术状况也相应地被评定为4类,即“主要构件存在重大损伤,严重影响了桥梁的使用功能;或者已经影响到桥梁的承载能力,无法保证其正常使用”^[2]。

5 承载能力验算

根据火灾现场对桥梁结构的检测,通过有限元软件建立该桥上部结构的单梁计算模型,依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)对该桥上部结构承载力进行检算。

5.1 计算参数取值

(1)本桥主要受力结构形式为边跨10 m预应力混凝土简支空心板梁(计算跨径9.5 m)和中跨16 m预应力混凝土简支空心板梁(计算跨径15.5 m),其主梁内力控制设计主要是跨中的最大正弯矩和支点附近截面的最大剪力。

根据设计图纸,两种空心板梁混凝土设计强度均为C50;10 m空心板梁采用11根A_s15.2高强度低松弛预应力钢筋+5根R20的HRB400钢筋,16 m空心板梁采用15根A_s15.2高强度低松弛预应力钢筋+5根R22的HRB400钢筋。

根据《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019),在现场进行初步调查后,根据混凝土表面颜色、敲击声音、剥落情况等因素确定混凝土表面灼烧温度,按照规范中附录G火灾后钢筋混凝土的力学性能中的强度折减系数确定火灾后混凝土构件的实际强度和钢筋、预应力钢绞线高温冷却后的强度

折减系数^[1]。

根据现场调查结果:

a. 过火的第一跨1-1#~1-25#板梁,受下方明火直接燃烧,板梁混凝土颜色呈灰白色,橡胶锤敲击声音发闷、混凝土粉碎及脱落,因此按700℃取值,混凝土强度折减系数为0.2,钢筋的强度折减系数为0.87。

b. 第一跨1-26#~1-30#板梁梁下方无明火直接燃烧,有轻微混凝土剥落,表面熏黑,经打磨后混凝土表面呈灰青色,按300℃取值,混凝土强度折减系数为0.75,钢筋的强度折减系数为0.93。

c. 第二、三跨梁底表面熏黑,表面无混凝土剥落,经打磨后混凝土表面呈灰青色,按300℃取值,混凝土强度折减系数为0.75,钢筋的强度折减系数为0.93。

(2)在结构分析中,恒定载荷包括自身的重量以及后续添加的固定载荷。对于移动载荷,我们按照公路—I级标准来计算汽车荷载,同时,人群荷载则以每平方米3.5 kN作为计算依据。若不满足,则采用低一级的荷载水平进行检算,依次往下。

(3)横向分布系数计算

检算受力最不利板梁跨中截面和支点截面横向分布系数详细结果见表3。

表3 简支板梁荷载最大横向分布系数表

检算对象	跨中横向分布系数	支点横向分布系数
	汽车荷载	汽车荷载
10 m边梁	0.469	0.442
10 m中梁	0.482	0.609
16 m边梁	0.474	0.442
16 m中梁	0.467	0.609

5.2 基于检测结果各评定系数取值

5.2.1 承载验算系数Z₁的确定

依据桥梁结构病害的检测 results 和混凝土强度的测试结果,未直接过火的上部结构主梁结构表观缺损状况评定为2,混凝土强度评定标度值为1。主梁均属于受弯构件,承载能力检算系数取Z₁=1.12。

5.2.2 承载能力恶化系数ξ_e的确定

承载能力恶化系数是反映桥梁结构质量状况衰退恶化产生的不利影响对结构抗力效应的降低。未直接过火的上部结构主梁,本桥的承载能力恶化系数ξ_e取0.03。

5.2.3 截面折减系数ξ_c的确定

(1)混凝土截面折减系数

依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》,本桥未直接过火的上部结构主梁混凝土,评定标度为1;材料风化和物理与化学损伤评定标度均为2,混凝土截面折减系数 $\xi_c=0.95$ 。

(2)钢筋截面折减系数

未直接过火的上部结构主梁,检查中局部混凝土剥落,评定标度为2,钢筋截面的折减系数为0.98。

各项系数取值见表4。

表4 承载能力评定各系数取值

评定对象	Z_1	ξ_e	ξ_c	ξ_s	ξ_q
空心板	1.12	0.03	0.99	0.98	1.00

5.3 承载能力极限状态验算

5.3.1 抗弯承载能力

根据规定对荷载组合I进行了细致的核算,荷载组合和荷载安全系数均遵循了规定的取值。利用有限元分析模型,获得了相应的内力计算结果^[5]。计算结果见表5。

表5 抗弯承载能力检算结果

检算对象	工况	最不利组合弯矩/ (kN·m)	计算极限承载力 R/ (kN·m)	折减后承载力 R/ (kN·m)	作用与抗力 效应比值	是否 满足
第一跨(1-1#~1-25#)10 m边梁	公路—I级	941	337	354	2.66	否
第一跨(1-1#~1-25#)10 m中梁	公路—I级	943	276	289	3.26	否
第一跨(1-26#~1-30#)10 m边梁	公路—I级	941	1 046	1 098	0.86	是
第一跨(1-26#~1-30#)10 m中梁	公路—I级	943	1 023	1 074	0.88	是
第二跨16 m边梁	公路—I级	2 062	2 225	2 336	0.88	是
第二跨16 m中梁	公路—I级	1 925	2 092	2 197	0.88	是
第三跨10 m边梁	公路—I级	941	1 046	1 098	0.86	是
第三跨10 m中梁	公路—I级	943	1 023	1 074	0.88	是

由计算结果可知:

(1)该桥第一跨(1-26#~1-30#板梁)、第二、三跨上部结构主梁跨中截面的抗弯承载能力可以满足公路—I级的荷载要求;

(2)第一跨(1-1#~1-25#板梁)主梁跨中截面的抗弯承载能力不能满足公路—I级的荷载要求。

5.3.2 抗剪承载能力

依据简支梁桥主梁内力主要受支点附近斜截面最大剪力控制的设计原则,通过构建有限元计算模型,我们能够得出其内力的计算结果^[5]。计算结果见表6。

由计算结果可知:

(1)该桥第一跨(1-26#~1-30#板梁)、第二、三跨上部结构主梁跨中截面的抗剪承载能力可以满足公路—I级的荷载要求;

(2)第一跨(1-1#~1-25#板梁)主梁跨中截面的抗剪承载能力不能满足公路—I级的荷载要求。

5.4 检算结论

综合上述检算结果可知:

(1)该桥第一跨(1-26#~1-30#板梁)、第二、三跨上部结构主梁跨中截面的承载能力可以满足公路—I级的荷载要求;

(2)第一跨(1-1#~1-25#板梁)主梁跨中截面的承载能力不能满足公路—I级的荷载要求。

表6 抗剪承载能力检算结果

检算对象	工况	最不利 组合剪 力/kN	计算极 限承载 力 R/kN	折减后 承载力 R/kN	作用与 抗力效 应比值	是否 满足
第一跨(1-1#~1-25#)10 m边梁	公路—I级	396	116	121	3.26	否
第一跨(1-1#~1-25#)10 m中梁	公路—I级	452	101	107	4.24	否
第一跨(1-26#~1-30#)10 m边梁	公路—I级	396	594	624	0.63	是
第一跨(1-26#~1-30#)10 m中梁	公路—I级	452	597	627	0.72	是
第二跨16 m边梁	公路—I级	534	869	913	0.59	是
第二跨16 m中梁	公路—I级	579	869	913	0.63	是
第三跨10 m边梁	公路—I级	396	594	624	0.63	是
第三跨10 m中梁	公路—I级	452	597	627	0.72	是

6 结 语

(1)该桥受火灾影响,损伤等级初步鉴定等级为Ⅳ级,详细鉴定评为d级;总体技术状况等级评定为4类;1-1#~1-25#板梁承载能力已不满足安全使用要求。

(2)建议立即进行临时交通管制,禁止车辆通行。

(3)北边跨(1#跨)1-1#~1-25#板梁,建议拆除更换,同时更换0#台、1#墩上支座。

(4)其余板梁及下部结构与构件建议对现有病害进行维修加固处理,修复后建议加强观测,可布置在线监测系统对板梁应力、挠度等参数进行实时监测。

(5)本文结合实际工程案例,以火灾现场桥梁外观检测为基础,开展损伤等级评定以及桥梁技术状况等级评估,同时根据结构损伤情况进行了火灾后桥梁上部结构承载能力验算。为桥梁管理单位迅速做出交通管制措施以及后续维修方案提供数据支撑和依据,同时也为此类结构桥梁火灾后检测评定和损伤鉴定提供方法与流程,希望能为桥梁设施管理、养护、检测等相关单位提供参考。

参考文献:

- [1] T/CECS 252—2019,火灾后工程结构鉴定标准[S].
- [2] JTG/T H21—2011,公路桥梁技术状况评定标准[S].
- [3] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- [4] 邵永军,张宏.混凝土桥梁火灾损伤检测评估方法与应用[J].公路交通技术,2010(2):91-96.
- [5] 陈盛全,单一舰.基于有限元方法对旧铁路桥梁承载力评估分析[J].城市道桥与防洪,2024(7):178-181.
- [6] 李清,靳红涛.高速公路隧道火灾后损伤检测及结构安全评价[J].广东公路交通,2021(5):57-66.
- [7] 武建,李波,张立志.预应力混凝土空心板梁桥火损后检测评定[J].中外公路,2015(4):209-214.
- [8] 张赞鹏,文冲,贺献崇.火灾后预应力混凝土简支梁桥损伤程度及剩余承载能力鉴定分析[J].公路交通技术,2019(6):65-72.
- [9] 黄清.钢筋混凝土桥梁火灾后检测评估[J].世界桥梁,2014(5):78-81.
- [10] 程海潜,王佳宇,张健,等.火灾后桥梁的检测评估及维修加固技术[J].城市道桥与防洪,2016(10):75-79.

(上接第114页)

振动与冲击,2017,36(12):55-60.

[8] 周兴宇.无背索斜拉桥静力性能及地震响应分析[D].武汉:武汉理工大学,2017.

[9] 李德旭.无背索斜拉桥索力优化研究[D].西安:西安工业大学,2020.

[10] 王楨,张劲泉,周建庭,等.基于影响矩阵的斜拉桥合理成桥状态索力优化[J].公路工程,2021,46(4):31-38.

[11] 戴杰,秦凤江,狄谨,等.斜拉桥成桥索力优化方法研究综述[J].中国公路学报,2019,32(5):17-37.

[12] 周勇军,田瑞欣,吴领领.异形人行景观斜拉桥力学分析[J].科学技术与工程,2020,20(12):4909-4915.

[13] 顾安邦,向中富.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2017.

[14] 王妍.装饰无背索斜拉桥设计关键问题的探讨[J].北方交通,2013(2):83-87.