

某特大桥过火桥墩有限元模拟分析

徐文豪¹, 陈 锋²

(1.武汉二航路桥特种工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000; 2.武汉二航路桥特种工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000)

摘 要:以某特大桥墩身火灾为案例,介绍此类工程现场调查内容,然后基于通用有限元软件 ABAQUS 对火灾时墩身温度场进行模拟分析,与现场调查实况进行对比后确定墩身大致火损情况,在此基础上再用 ABAQUS 对其进行简化建模并进行静力及频率分析,总结分析结果后提出对应加固建议,可为后续相关工程案例提供研究及加固的思路与参考。

关键词:有限元;过火桥墩;温度场;静力分析;加固

中图分类号:U443.22

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)05-0089-04

0 引 言

随着改革开放以来国民经济的不断发展及城市化的加速,公路交通量已经越来越多,频繁的易燃易爆品的运输事故以及桥梁下方废弃物、干柴及其他易燃物品的随意堆放带来的桥梁火灾事故已越发成为桥梁结构的主要灾害之一。

2010年11月哈尔滨松花江大桥桥墩由于焊接不当导致发生火灾,2011年9月宝鸡南关桥由于木料堆积物发生火灾,2012年10月西安东二环立交桥由于堆放的果皮箱及木头花架发生火灾,2013年02连霍高速义昌大桥由于爆竹车辆爆炸发生火灾,2017年4月绵阳市108国道桥由于废品堆积发生火灾,2018年10月黄梅大道铁路桥由于车辆撞击发生火灾等等^[1],火灾的发生不仅对国民经济造成严重损失,而且对桥梁的后续运营也带来了严重的隐患。

综上,随着近年来越来越多的桥墩失火事件的发生,对过火桥墩的分析及对应的加固需求已越来越迫切。本文正是基于此类需求在前人的研究基础上,以某特大桥过火桥墩为例,利用 ABAQUS 进行有限元分析,并结合分析结果提出相应加固建议以供后续相似案例提供借鉴。

1 工程概况

某公路特大桥上构采用 $2 \times (4 \times 30 \text{ m}) + 8 \times (5 \times 30 \text{ m}) + 4 \times 30 \text{ m}$ 先简支后连续 T 梁,设计荷载为汽-超 20 级,挂 -120。结构横断面见图 1,桥墩墩身高

度为 2.5 m,桥墩为实心圆柱墩,直径为 1.4 m,墩身结构混凝土设计强度等级为 C30,其上部结构为 6 片 30 m 长的 C50 预应力混凝土 T 梁,桥墩螺旋箍筋为 HPB235 钢筋,直径为 $\phi 8$,屈服强度为 235 MPa,桥墩纵筋为 HRB335 钢筋,直径为 $\phi 22$,屈服强度为 335 MPa。

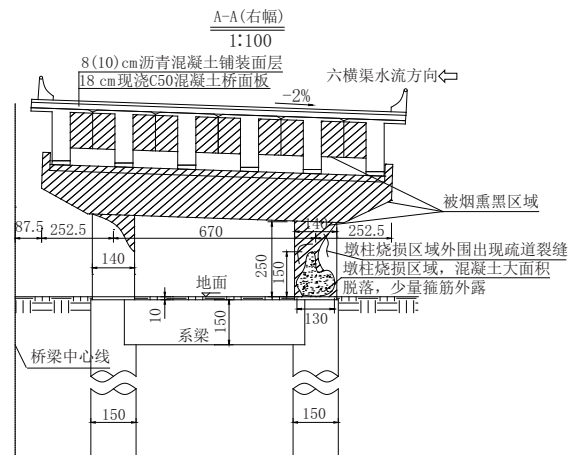


图1 过火桥横断面图(单位:cm)

2021年2月9日上午11点该特大桥桥墩墩身发生火灾,初步调查显示原因为堆放在墩身周边的废弃物(包含废弃的橡胶轮胎及其他塑料废弃物)经野火点燃发生火灾,燃烧一段时间后被消防人员用高压水枪扑灭,火灾现场见图2,墩身迎火面被高温烟气灼黑,墩身靠近地面部分出现大面积混凝土脱落,局部墩身螺旋筋外露,墩身混凝土火损深度大概在 10~60 mm,导致墩身产生一定程度的损伤。

2 现场检测

2.1 火损区域

经现场测量,主要脱落区域为墩身迎火面,尺寸范围如图3所示的大致高 1.5 m、宽 1.3 m 的“凸”型

收稿日期:2022-08-23

作者简介:徐文豪(1994—),男,硕士,助理工程师,从事桥梁设计工作。



图2 过火桥墩现场灾害图

区域,脱落深度呈现由中心向四周逐渐变浅的现象。

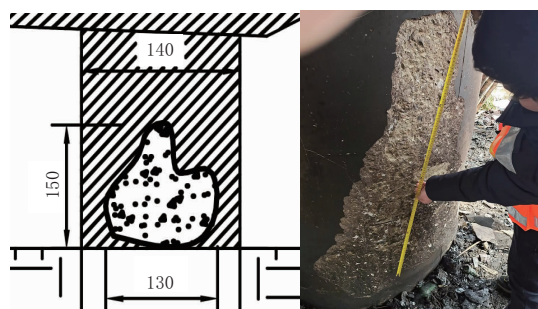


图3 过火桥墩火损区域示意图(单位:cm)

2.2 火场温度

根据文献[2,3]相关规定,对现场通过肉眼观察依据混凝土表面颜色(浅黄色)、锤击混凝土表面产生的声音(发哑)以及墩身的开裂情况(大面积剥落及较多裂缝),大致可判断当时火场温度最高在900℃左右。

3 有限元模拟

3.1 模型及边界条件

为便于有限元分析,本次模型选取高1.5 m,宽1.3 m的规则“凸”型区域替代现场的不规则火灾损伤面,有限元模型见图4。



图4 有限元模型示意图

模型选取如图4所示红色区域为火灾作用区域,模型中钢筋按照实际图纸钢筋进行建模,墩柱底部采用固定约束,模型单元尺寸按照50 mm进行网格划分。

鉴于墩身火灾燃烧物主要为橡胶及塑料制品,根据相关材料燃烧特性,其燃烧所产生的温度能近似接近ISO-834标准升温曲线,故本次模拟按照ISO-834标准升温曲线对模型指定单面受火区域进行温度场模拟分析,模型所需的热工参数参考文献[4]取值,标准升温曲线及热工参数如下所示:

ISO-834标准升温曲线:

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

其中 T 为火灾标准温度(℃), T_0 为自然界温度取20℃(℃), t 为火灾经历时间(min),本次根据现场推测温度将升温时间取为60 min。

混凝土导热系数 λ_c :

$$\lambda_c = 1.6 - 0.16(T/120) + 0.008(T/120)^2$$

$$(W/m \cdot K)(20^\circ C \leq T \leq 1200^\circ C)$$

混凝土比热容 C_c :

$$C_c = 900 + 80(T/120) - 4(T/120)^2$$

$$(20^\circ C \leq T \leq 1200^\circ C)$$

混凝土的密度 ρ_c : 2400 kg/m³。

3.2 结果分析

3.2.1 温度场结果分析

如图5所示温度场分析混凝土节点温度图可知,对于单面受火的混凝土墩柱而言,火灾影响区域会沿受火面往外部延伸50 mm左右,受火面的温度将由外到内依次递减,最外侧温度将会达到最高温度900℃,当往内部延伸至80 mm左右,温度会递减至200℃,变化趋势与文献[5]结论一致,同时根据文献[2]相关规定可知混凝土在温度200℃左右,冷却后抗压强度折减为原来的0.9倍左右,在静力分析时偏安全考虑不考虑该区域混凝土的作用。

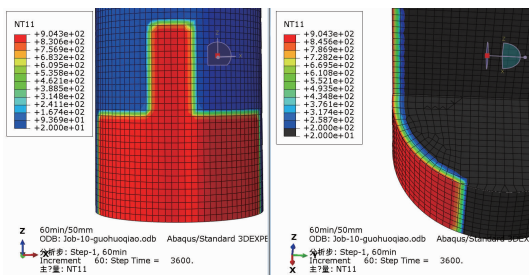


图5 混凝土节点温度图(单位:℃)

如图6所示温度场分析钢筋节点温度图可知,对于单面受火的混凝土墩柱而言,墩柱钢筋部分在火场作用下影响区域同样基本上都位于受火面加载

区域范围内,受火灾影响钢筋温度在 44℃~311℃ 之间,根据文献[2,6]相关规定可知 HBR335 钢筋在 300℃ 冷却后其屈服及极限抗拉强度会折减为原来的 0.95 倍,由于强度衰减低,在静力分析时可不考虑该区域钢筋强度的折减。

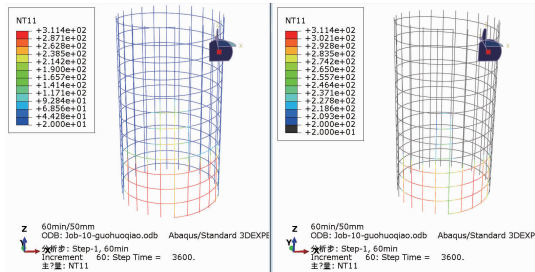


图 6 钢筋节点温度图(单位:℃)

3.2.2 静力及频率结果分析

经计算单墩汽车制动力为 165 kN,墩柱顶部集中力为 4 365.2 kN,重力加速度为 9.8 m/s²,静力分析模型见图 7,模型底部采用固结,网格尺寸为 50 mm,模型考虑将受火面往内侧延伸 80 mm 深度的混凝土部分扣除以模拟火灾后真实的墩柱受力,汽车制动力用参考点耦合圆柱面进行加载,墩顶集中力用参考点耦合墩顶面进行加载,自重通过赋予重力加速度加载。

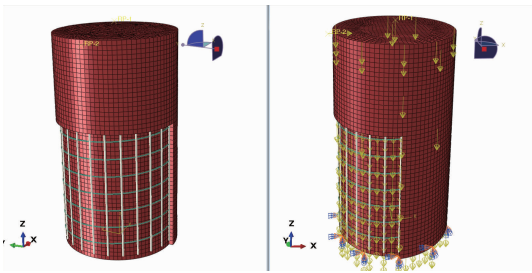


图 7 静力分析模型图

如图 8 所示模型分析结果应力云图可知,火损墩柱在荷载作用下,墩柱混凝土部分最大拉应力为 1.118 MPa,出现在墩柱上部,最大压应力为 5.769 MPa,出现在柱脚部位,均小于文献[7]中 C30 混凝土强度设计值 $f_c = 14.3 \text{ MPa}$, $f_t = 1.43 \text{ MPa}$ 。火损墩柱钢筋部分最大 Mises 应力出现在无混凝土与有混凝土交界区域及对侧下方区域,且最大值为 27.01 MPa,远小于墩柱钢筋的屈服强度值 235 MPa 与 335 MPa。分析可知火损墩柱在静力荷载作用下混凝土以及钢筋均未达到设计强度,虽仍然能满足结构的正常使用,但如果不进行处治,受损区域在长期荷载作用下会在破损区域产生应力集中,严重情况会导致结构发生破坏。如图 9 所示不同状态下墩柱的基频图可知,火损后的墩柱基频为 92.738 Hz 小于原墩柱的 99.483 Hz,

经增大截面加固后墩柱的基频变为 118.2 Hz,可见增大截面加固可明显提高墩柱刚度(抗震性能)。

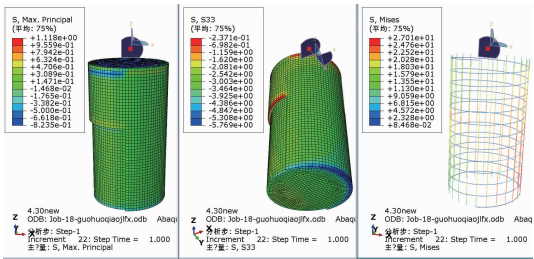


图 8 混凝土及钢筋应力云图(单位:MPa)

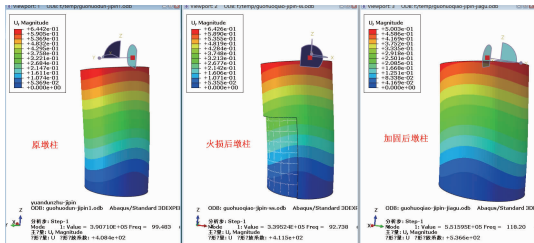


图 9 不同状态下墩柱的基频图(单位:Hz)

4 加固方案及结论

4.1 加固方案

综上分析,本次主体加固方案见图 10,采用植筋增大截面加固,植筋钻孔时应注意避免损伤原结构主要钢筋及普通钢筋,①号植筋植筋前应清除墩柱外环环宽 20 cm、深 10 cm 的环形区域内的土壤直至系梁顶部,清理系梁表面污垢后完成系梁植筋。缺陷处凿除为火损区域以及墩身裂缝区域的凿除,凿除部分待后续与增大截面部分一同灌注高强灌浆料。墩身加固区域浇筑高强灌浆料前先凿除破损(或鼓胀)混凝土至离表面 8 cm 处,同时凿除墩柱裂缝区域混凝土,清除表面粉尘,对外露钢筋采用钢丝刷进行除锈处理后涂刷阻锈剂,对未破损(或鼓胀)区域进行凿毛清除烟渍,再植筋、涂刷界面胶,以提高新旧混凝土界面结合效果,绑扎钢筋骨架,立模后浇筑高强灌浆料,加固效果见图 11。

4.2 结论

(1)基于 ABAQUS 的过火桥墩温度场分析结果与现场实际检测结果较为接近,可为后续类似案例提供模拟分析思路与参考。

(2)基于现场检测以及温度场模拟分析结果可知,火损区域最外层至内层 80 mm 范围内混凝土温度可能由 900℃ 递减至 200℃,说明混凝土保护层能很好的阻断温度的传导,同时该区域混凝土强度衰减较大,加固时建议将该区域混凝土凿除至距最外层 80~100 mm 深度。

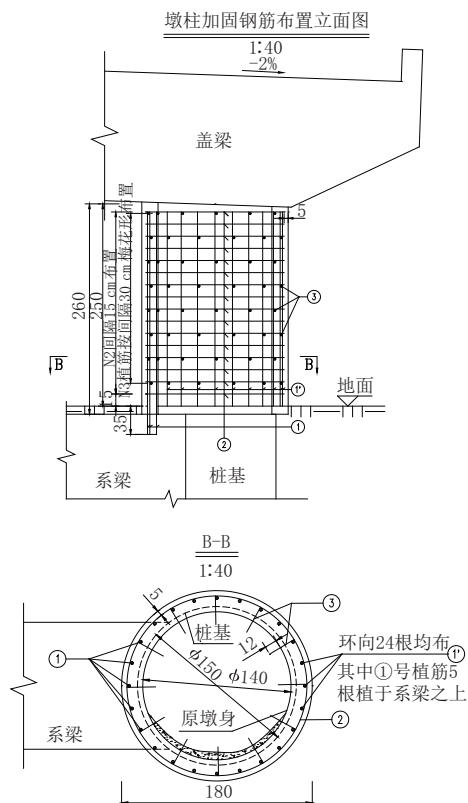


图 10 墩柱加固方案图(单位:cm)

(3)基于静力分析结果可知,受损墩柱在荷载作用下,墩柱主体结构各部份强度仍满足要求,基于频率分析结果可知增大截面加固可显著提高墩柱刚度,故综合分析采用加固措施为凿除火损区域混凝土,



图 11 墩柱加固现状图

土,全表面凿毛后再采用植筋增大截面 20 cm 进行加固处理。

参考文献:

- [1] 王富强.火灾后考虑混凝土爆裂的 RC 柱式桥墩剩余承载能力研究[D].西安:长安大学,2020.
- [2] TCECS252-2019,火灾后工程结构鉴定标准[S].
- [3] 奚勇.火灾受损桥梁的检测与评估[J].世界桥梁,2007(4):62-65.
- [4] 罗旋,田军,吴伟国.某特大桥桥墩墩身火灾后安全性评定及修复[J].公路工程,2013,38(1):158-162.
- [5] 张秋实,周川胜,孙春平,等.高温环境下钢筋混凝土结构温度传播规律研究[J].现代隧道技术,2021,58(4):185-193.
- [6] 吴波.火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M].北京:科学出版社,2013.
- [7] GB 50010-2010,混凝土结构设计规范[S].

(上接第 84 页)

参考文献:

- [1] 范立础.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997.
- [3] 王亚勇.汶川地震建筑震害启示——抗震概念设计[J].建筑结构学报,2008,29(4):20-25.
- [4] 王克海,孙永红,韦韩,等.汶川地震后对我国结构工程抗震的几点思考[J].公路交通科技,2008,25(11):54-59.
- [5] 徐强,万水.波形钢腹板 PC 组合箱梁桥设计与应用[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [6] 郑涛.波形钢腹板 PC 组合连续梁桥动力特性与地震响应研究[D].南京:东南大学,2019.
- [7] 张长青,安永日,安里鹏.波形钢腹板连续刚构桥的地震响应分析[J].桥梁建设,2011(3):17-21.
- [8] 万水,汤意,王劲松.波形钢腹板 PC 组合箱梁结构特点分析与试验研究[J].南京理工大学学报,2004,28(5):498-501.
- [9] JTG/T B02-011—2008,公路桥梁抗震设计细则[S].