

桥面过火后的预应力混凝土 T 梁分析与加固

张旭慧^{1,2}, 李斐然¹, 石磊³, 袁波¹

(1.河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450052; 2.河南省交院工程检测科技有限公司;
3.大连理工大学 土木工程学院)

摘要: 基于京港澳高速公路黄河大桥引桥 35 m 简支 T 梁的桥面火灾事故, 根据火灾后混凝土强度和钢筋强度等检测结果还原了梁体温度场分布状况, 通过模拟 T 梁受损混凝土的切割过程, 获得梁体应力和挠度变化规律, 并据此提出了先凿除受损混凝土, 然后对梁体施加强制位移, 最后通过释放强制位移恢复后浇混凝土压应力的加固方法。加固全过程采用桥梁专用有限元程序 Midas/Civil 进行分析, 形成了符合实际的两阶段加固方案, 即先期快速恢复交通需要的结构性加固, 后期保障桥梁长期健康运营需要的耐久性修复。结果表明: 随着梁体凿除深度的加大, 梁体将先出现上拱继而发生下挠; 在钢管立柱建立的临时支撑系统下, 对切割混凝土后的梁体施加顶升反力, 并在浇筑新混凝土后, 通过释放反力将顶板恢复到受压状态, 恢复整个受损 T 梁至设计理想状态。

关键词: 桥梁工程; T 梁桥; 有限元分析; 桥面过火; 挠度

随着中国交通基础设施的跨越式发展, 桥梁里程迅速增长, 运输易燃易爆货物的重型硬脂酸车、苯酚运输车、运油(气)卡车日益增多, 桥梁火灾事件频发, 引发的火灾、爆炸事故给桥梁带来严重威胁。经网络查询后统计, 2010—2017 年桥梁火灾事故共 28 起, 平均每年约 4 起, 其中中国省道高速公路与干线公路桥梁的起火点大部分位于桥面上, 火灾对桥梁造成的损伤导致路网中断, 研究桥面起火后桥梁的加固方案对于国省道的应急保障具有重要意义。

机抛洒等方式才得以将大火扑灭, 火源在桥面燃烧长达 27 h。

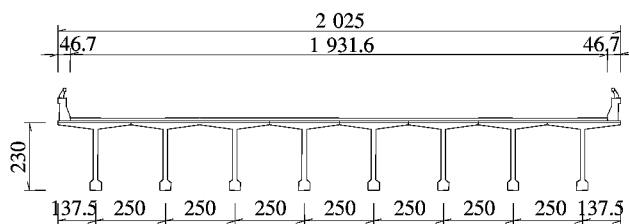


图 1 35 m T 梁桥一般横断面图(单位: cm)

1 工程概况

京港澳高速公路黄河大桥引桥上部结构为 35 m 跨预应力混凝土简支 T 梁, 中心梁高 2.3 m, 边梁宽度 2.61 m, 中梁宽度 2.47 m。桥梁横断面分左右两幅, 每幅由 8 片 T 梁组成, 单幅行车道宽度 19 m, 护栏宽度 0.467 m, 中央分隔带宽度 3 m, 单幅横断面如图 1 所示。

引桥上两辆大货车发生追尾事故, 引发其中一辆大货车着火, 因事故车辆装载的是镁铝粉(D 类火灾), 加之严重拥堵, 导致灭火难度大, 现场首先采用了砂土等进行覆盖, 表面上的火情受到控制, 但内部温度较高, 铝镁粉一旦暴露于空气将再次燃烧, 最终采取挖掘

2 火场对 T 梁的影响

过火区域面积近似 231.8 m², 现场检测到桥面沥青铺装层软化变形、局部铺装层混凝土松散破碎, 钢筋外露, T 梁翼缘板混凝土破损形成空洞; 受损桥面沥青混凝土清理完毕后, 通过混凝土过火后颜色的变化情况和材料检测成果推断过火区域的最高温度, 以确定火场对 T 梁的影响范围。

2.1 混凝土强度检测

在现场检测中, 实际取得有效芯样 24 个, 混凝土芯样磨平后发现, 过火位置混凝土芯样表面存在裂隙, 未受火部位混凝土芯样未发现表面裂隙。未过火区域

混凝土强度为 50.60~64.93 MPa,过火区域混凝土强度为 18.16~62.49 MPa,高温使混凝土强度降低明显。火源核心区混凝土外观为浅黄色,混凝土钻芯强度为 18.16 MPa,相比 C50 混凝土,强度损失约 74%,初步判断受火核心区最高温度为 1 000 ℃左右;次核心区混凝土外观为浅白与浅灰白色,表明受火次核心区温度达到 500~800 ℃。

2.2 过火后钢筋强度检测

在现场对梁体内钢筋进行取样后,送至室内试验室对未受火钢筋与受火钢筋进行抗拉强度对比试验,试验结果表明:未受火钢筋屈服强度为 290 MPa、极限抗拉强度为 410 MPa,受火钢筋屈服强度为 177 MPa、极限抗拉强度为 330 MPa,主要原因是钢筋过火温度较高且灭火过程中采用水冷进行了降温处置,导致钢筋强度损失明显,受火钢筋抗拉强度损失较大。

经各个区域的混凝土取芯、钢筋强度试验和混凝土回弹测试,推定桥面过火区域的平面范围如图 2 所示,影响深度为 30~40 cm,即桥面火灾引起混凝土受损的深度为 30~40 cm,由于预应力管道位于跨中下缘,经检测未受到火灾影响。

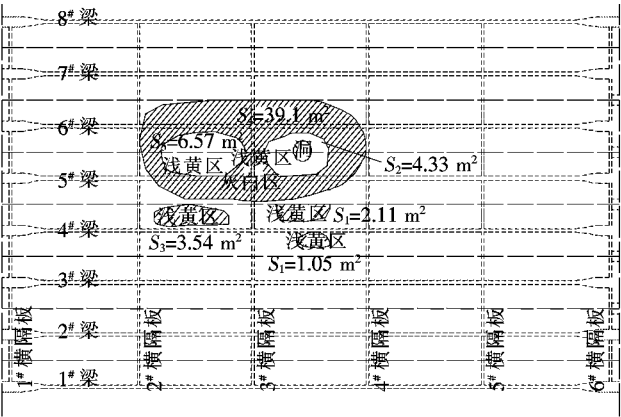


图 2 桥面过火区域示意图

3 凿除受损混凝土的结构分析

受损区域为钢筋混凝土结构,预应力钢束并未受到损伤,考虑到混凝土强度损失过多,加固设计方案考虑凿除顶板受损区域的混凝土,并采用施加反力的方法进行顶板混凝土的复浇,为了研究凿除施工过程中梁体的应力状况,采用 Ansys 建立三维实体模型对凿除面与梁体应力、挠度的关系进行分析。模型主要特性如下:

(1) 材料:混凝土弹性模量为 34 500 MPa,泊松

比为 0.2;钢束弹性模量为 195 000 MPa,泊松比为 0.3。

(2) 边界条件:主梁支承边界条件为简支;钢束与混凝土之间采用节点耦合约束。

(3) 荷载:结构自重与预应力。

凿除时按照先凿除翼缘,逐渐到腹板,然后由腹板向下进行凿除,凿除深度示意图 3,主要凿除过程 T 梁应力云图见图 4,凿除深度与挠度的关系以及凿除深度与应力的关系见表 1,为便于在单图中表示,定义负值表示凿除翼缘距离腹板中心的水平距离,正值表示凿除腹板深度距离梁顶的距离,凿除面压应力为凿除至相应位置时的压应力。

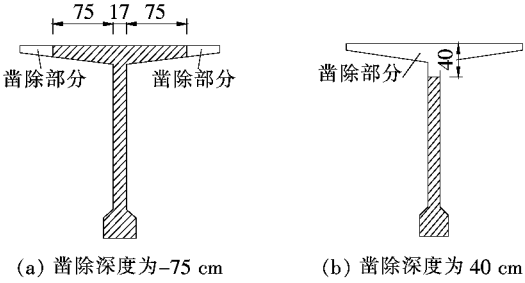


图 3 T 梁凿除深度示意图(单位:cm)

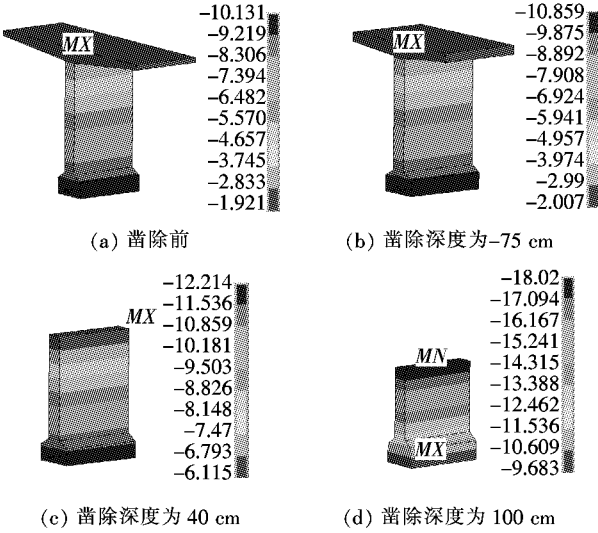


图 4 不同凿除深度下 T 梁应力云图(单位:MPa)

表 1 凿除面与梁体应力、挠度的关系

凿除深度/ cm	凿除面压 应力/MPa	底缘压应力/ MPa	位移/ mm
-100	0.03	0.47	0.5
-75	0.08	0.73	1.0
-50	0.20	1.23	1.8

续表 1

凿除深度/ cm	凿除面压 应力/MPa	底缘压应力/ MPa	位移/ mm
-35	0.33	1.56	2.0
-8.5	1.02	2.11	1.7
22	1.67	2.17	0.6
40	2.73	2.08	-1.6
60	4.56	1.77	-6.8
80	7.556	0.97	-17.4
100	12.47	-0.45	-39.1

由表 1 可知:随着凿除深度的加大,梁体自重与惯性矩均减小,凿除翼缘过程中自重减少幅度比惯性矩快,使得梁体上拱,之后惯性矩下降明显使得梁体下挠。根据计算结果,梁体将先轻微上拱(最大上拱 2 mm)后下挠;当凿除深度为 40 cm 时,梁体下挠 1.6 mm;当凿除深度大于 40 cm 后,梁体开始急剧下挠;

当凿除深度达 100 cm 时,梁体下挠 39.1 mm。随着凿除深度的加大,底缘压应力与挠度变化规律相似,表现为先增大后减小,凿除面的压应力则单调递增。当凿除深度为 40 cm 时,底缘压应力增大 2.08 MPa,凿除面压应力增加 2.73 MPa。

4 加固设计与荷载试验

依据桥梁病害检测状况分析和凿除受损混凝土的理论分析,为了前期尽快恢复交通及避免后期梁体出现次生病害,加固设计分为两阶段:第一阶段为结构性病害处置阶段,主要是恢复原桥的受力状态,快速恢复通行;第二阶段为一般性病害处置阶段,主要是恢复原桥的耐久性状态,恢复结构的设计使用年限。对火灾中受损的混凝土采用高一等级的混凝土进行处理,并采用预顶方案恢复原桥的混凝土应力状态;受损的梁体腹板采用粘贴钢板法进行加固,底板采用张拉预应力碳纤维板法进行加固,图 5 为桥梁加固整体布置图。

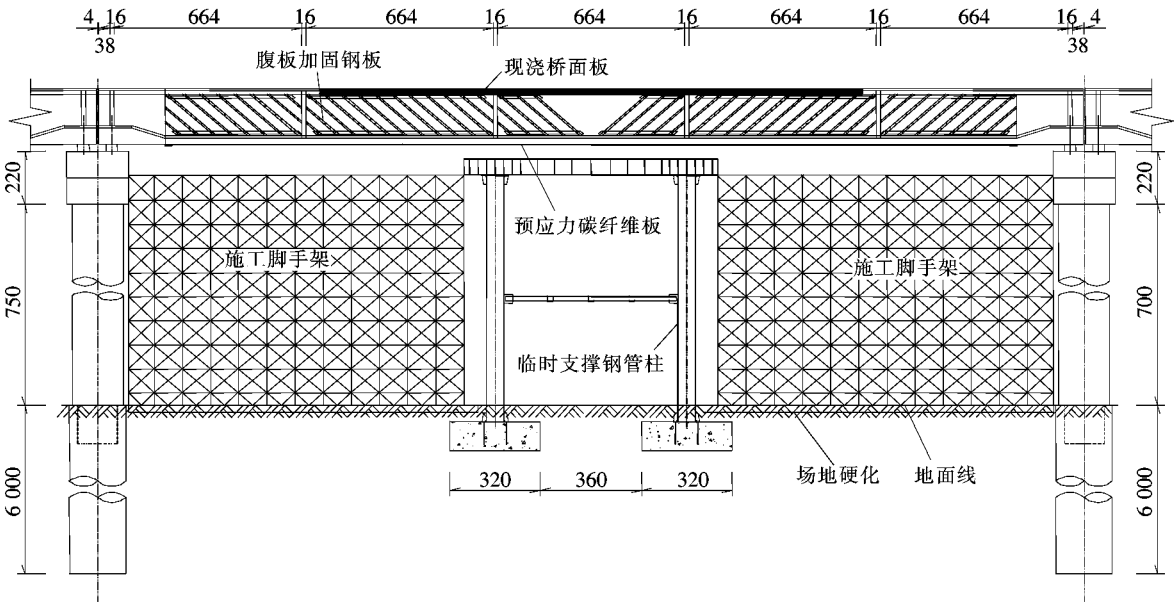


图 5 过火 T 梁桥整体加固布置图(单位:cm)

4.1 梁底支架系统设计

底板支架系统的设计有两个方面的作用:① 为了在抢险加固期,对 T 梁进行预顶,恢复顶板混凝土应力;② 为了在后期运营初期进行预防性加固。地基基础设计支架系统的底部可采用钻孔灌注桩、钢管桩或扩大基础,考虑到抢险的时间要求,设计采用条形扩大基础。条形扩大基础数量共两个,底纵桥向宽度为 3.2 m,横桥向宽度为 13.2 m,厚 1.2 m,两个基础的中心

间距为 6.8 m,施工时先对地基进行开挖,进行人工夯实,然后铺设碎石垫层,在垫层上方铺设 10 mm 厚钢板作为钢筋绑扎的底模,浇筑 C30 混凝土形成条形基础。立柱设计采用钢立柱,柱顶设置分配梁用于布设千斤顶或支座。

4.2 翼缘与腹板的混凝土切割设计

翼缘与腹板由于受到火灾影响,混凝土受到较大损伤,致使强度明显丧失,切割的目的主要是清除强度

不足的混凝土,目前常见的切割方式为:人工风镐凿除、墙锯切割、绳锯切割等机械切割方式,安全微声爆破拆除等化学切割方式,高压水无损切割方式等无损压力切割方式。机械式切割存在切割时间长,容易对混凝土和钢筋造成损伤,切割速度慢等问题;爆破切割存在风险大,振动大,同样会对钢筋造成损伤;超高压水切割是近年来引进的一种新型切割技术,主要利用超高压(特指从 100~280 MPa)水去除一定厚度的混凝土表面。

高压水切割比传统方法更加快速高效;提供粗糙、不规则的表面,使重新浇筑的材料具有更佳的附着力;可以按照需要去除指定的厚度;未损坏部分基本可以再次利用,节省资金;并不损坏钢筋;不会产生传统方法带来的表面裂纹;无震动带来的损害;为此选用高压水切割方案作为施工方案。

4.3 施工过程预顶的位置与反力设计

预顶是第一阶段加固的关键环节,必须现场完成反力系统的调试后才能进行混凝土的浇筑。完成支模和钢筋绑扎后,采用千斤顶对梁体进行第一次顶升,随着混凝土的浇筑,在不考虑地基沉降、临时支墩变形及其他变形的情况下,千斤顶的力将自动增至最终设计顶力,但由于地基沉降、临时支墩变形及其他变形的影响,千斤顶的力可能不会达到最终顶力,因此需要在混凝土浇筑完后、初凝前尽快将千斤顶的力调整至最终设计顶力。

预顶的位置与反力受切割混凝土范围和深度的影响,根据设计状态的混凝土切割设计范围,选择距离跨中两侧各 3.4 m 的位置作为千斤顶布置点。表 2 为各阶段跨中截面正应力与挠度的计算结果。

由表 2 可得到以下结论:

表 2 各阶段跨中截面正应力与挠度

阶段号	阶段名称	跨中底缘 应力/MPa	跨中凿面 应力/MPa	累积挠 度/mm	本阶段挠 度/mm
1	预制梁	-12.80	-3.45	28.7	28.7
2	存梁与架设	-10.90	-3.76	45.3	16.6
3	施加二期恒载	-6.95	-4.96	30.1	-15.2
4	火灾前主梁应力状态	-5.91	-4.68	33.9	3.9
5	火灾后清除二期恒载	-9.67	-3.56	44.0	10.0
6	凿除翼缘与部分腹板	-3.60	-18.80	4.8	-39.2
7	水切割混凝土腹板	-11.00	-7.51	34.4	29.6
8	施加顶升反力	-15.50	-0.61	52.8	18.4
9	复浇桥面板	-13.60	-3.28	52.9	0
10	桥面板达到强度	-13.60	-3.28	52.9	0
11	拆模板	-13.80	-3.18	52.9	0
12	去除顶升力	-8.45	-4.17	41.3	-11.6
13	张拉碳纤维板	-9.27	-4.23	43.0	1.7
14	铺设沥青层	-7.06	-5.36	35.0	-8.0
15	运营 10 年后	-4.64	-12.00	9.6	-25.4
使用荷载	温度梯度	-0.70	1.40	—	4.8
	车道最大	6.88	0.02	—	0.3
	车道最小	-0.11	-1.27	—	-13.6
应力验算	短期组合最大	-0.29	-10.88	—	—
	标准组合最小	-5.43	-13.92	—	—

(1) 火灾前主梁的应力状态与张拉碳纤维板阶段主梁的应力状态,两者基本相当,可以认为梁体应力恢

复至火灾前的水平。

(2) 施加顶升力对于改善主梁的应力状态具有明

显的作用,主梁的应力状态发生重分布,有助于减小跨中底板的应力状态,恢复跨中顶板的应力状态。

4.4 更换受损混凝土设计

为了方便混凝土的更换及保证更换混凝土的浇筑质量,新的混凝土相比原 C50 混凝土提高一个等级;为减小混凝土收缩徐变的影响,设计采用微膨胀型混凝土。综合上述因素,新浇筑的混凝土设计为 C55 型微膨胀混凝土。为不降低承载力,将原桥面铺装的混凝土调平层改造为结构层,并加强钢筋布置。

4.5 底板预应力加固设计

采用预顶的方式能消除大部分的不利影响,为了进一步恢复受损梁体的设计状态,需要在受损梁体的底板位置施加预应力荷载。施加预应力荷载的方式包括体外预应力和预应力碳纤维板,体外预应力需要设置混凝土锚块,构造复杂,施工周期长,而预应力碳纤维板有专用的夹具,施工便捷,且耐久性良好,因此选择预应力碳纤维板作为预应力补强措施。预应力碳纤维板的加载选择混凝土浇筑并且养生完成后,张拉完预应力可铺设沥青桥面层。

4.6 耐久性加固设计

由于腹板局部被可燃物灼伤,强度有所损失,后期存在开裂的可能,为此在腹板采用粘贴斜钢板的形式进行加固。在恢复通行 3 个月后,根据外观检测情况,针对可能出现的腹板斜裂缝和横隔板裂缝,采用粘贴钢板的形式进行耐久性加固。

4.7 荷载试验

基于荷载试验的评价方法是对桥梁加固成果的判断标准之一,由于相邻桥跨未受到火灾的影响,为此采用对比的方式进行荷载试验,即对受火灾影响的第 11 跨和未受火灾影响的第 12 跨分别进行对比加载,以对比抢修加固效果。荷载试验结果表明:第 11 跨各工况荷载作用下主要受力主梁实测挠度值均小于理论挠度值,挠度校验系数为 0.47~0.78,实测应变均未超出理论应变,应变的校验系数为 0.20~0.86,满足《公路桥梁承载能力检测评定规程》中校验系数小于 1 的规定,表明试验跨结构刚度和强度均满足规范要求;第 11 跨相比第 12 跨荷载作用下主梁实测挠度、实测应变基本

一致,说明已达到梁体承载力恢复目的。

5 结论

依据京港澳高速公路黄河大桥起火后检测结果,推定了温度场的分布,并依此进行了加固分析,主要结论如下:

(1) 对于桥面火灾后的混凝土 T 梁桥,清除受损混凝土顶板对剩余梁体的应力与承载力影响有限,清除腹板混凝土深度在 40 cm 范围内对梁体挠度变化影响不大,清除腹板混凝土深度达到 40 cm 以上时将出现明显下挠。

(2) 在钢管立柱建立的临时支撑系统下,采用先凿除受损混凝土,然后施加强制位移,最后通过释放对后浇混凝土施加压应力的加固方法,能较好地将受损桥梁恢复至设计理想状态。

(3) 桥面起火后混凝土强度损失严重,高压水切割工艺可精确剥离受损混凝土与正常混凝土,能避免传统机械凿除对未破损区域混凝土的影响,并且完整保留梁体钢筋。

(4) 抢修加固采用两阶段加固能较好地满足前期抢通及后期耐久性双方面的要求,具有在桥梁抢修工程中推广的价值。

该桥加固后进行了持续半年的观测,目前在加固后已经运营 3 年,经受了京港澳高速车流量的考验,至今未发生新增病害,加固方法和施工效果得到验证。

参考文献:

- [1] 中国公路学报编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2014[J].中国公路学报,2014(5).
- [2] CECS 252—2009 火灾后建筑结构鉴定标准[S].
- [3] GB/T 4968—2008 火灾分类[S].
- [4] 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].长安大学博士学位论文,2012.
- [5] 张岗,贺栓海,刘扬,等.火灾全程预应力混凝土 T 梁桥刚度衰变[J].长安大学学报:自然科学版,2016(1).
- [6] 朱慈祥,姜传刚.基于静力切割的混凝土箱梁桥拆除方法研究[J].公路,2013(1).