

火灾后预应力砼梁桥承载能力评定方法研究<sup>\*</sup>侯攀<sup>1</sup>, 彭放枚<sup>2</sup>, 罗志佳<sup>1</sup>

(1.广西建筑工程质量检测中心, 广西南宁 530005; 2.广西建设职业技术学院, 广西南宁 530072)

**摘要:** 目前尚无火灾后桥梁专用评定规范, 火灾后桥梁结构检测评估和承载能力评定亟待规范。文中在相关研究成果的基础上, 以实际工程为依托, 提出通过“五步工作大纲法”(初步调查、详勘、确定检算系数、判定、建议)进行火灾后预应力砼梁桥的承载能力评定; 采用分层综合评定法评定受灾后桥梁结构技术状况, 依次得出各部件、构件及结构总体技术状况; 提出火灾后结构参数确定方法, 如采用超声一回弹法确定砼强度, 采用模态法确定结构刚度损伤程度; 最后从验算参数确定、结构模型建立及验算结果判断等方面阐述承载能力验算方法。

**关键词:** 桥梁; 预应力砼桥梁; 火灾后承载能力评定; 分层综合评定法; 损伤评估

中图分类号: U446.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)01-0133-06

相比其他桥梁事故, 火灾具有突发性、小概率、破坏性大等特点, 一旦发生, 过高的温度会导致砼、钢筋的材料特性及钢筋与砼之间的协同变形关系发生改变, 导致桥梁承载能力降低。桥梁火灾后损伤识别及承载能力评估是管养部门面对的新问题, 然而目前对桥梁火灾后承载能力评估的指导性文件较少, 建筑结构类评估办法《火灾后建筑结构鉴定标准》应用于桥梁存在一定的局限。因此, 通过分析火灾对桥梁结构的损伤机理, 结合先进的检测技术对受灾后桥梁进行损伤识别和承载力评估成为当前亟待解决的问题。钮宏等对 30 个砼 T 形截面柱体和 40 根钢筋试件在 100~800 °C 下进行试验, 研究了高温和荷载共同作用下钢筋与砼的本构关系; 刘其伟等结合实例介绍了火灾受损桥梁检测评估与加固处理方法; 王福敏等就火灾后钢筋砼桥梁结构的实际承载能力进行了分析; 张宏等结合具体案例研究了火灾后砼桥梁损伤评估方法; 张赞鹏等结合具体案例进行了火灾后预应力砼简支梁桥损伤程度及剩余承载能力鉴定。但目前对火灾后桥梁损伤鉴定和承载能力的研究并未形成系统的标准, 不同检测人员和检测机构的评估标准不一致。该文以某城市桥梁火灾后损伤识别和承载能力鉴定为例, 研究桥梁火灾后损伤检测和承载能力评定方法和流程。

## 1 火灾后桥梁检测评估流程

根据文献[2]和文献[5], 结合某城市桥梁对火

灾后桥梁承载能力评估流程进行总结, 提出“五步工作大纲法”(见图 1)。

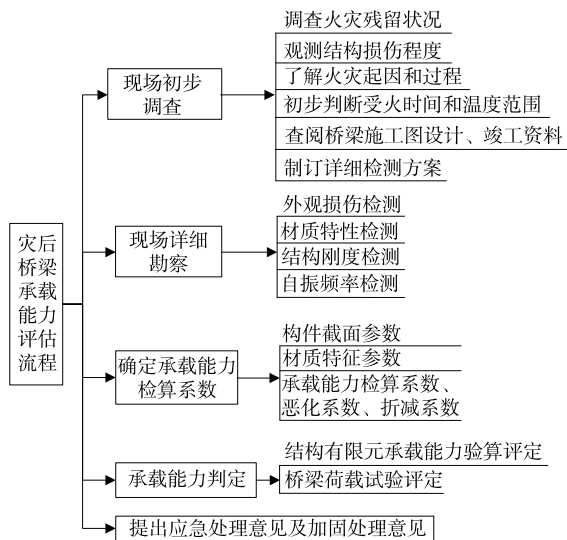


图 1 火灾后桥梁检测评估流程

## 2 火灾后桥梁损伤检测方法

### 2.1 外观损伤检查方法

对结构表面状况、火堆现场残留物状况及可燃物特征、灭火过程等进行综合分析推断, 方法如下:

(1) 对直接过火及高温烟熏的结构物表面进行全面检测, 记录材料的颜色、损坏破碎状态、锤击反应等参数。

(2) 对火堆现场残留物进行取样, 分析木材、金属制品、玻璃制品、建筑塑料制品、棉布纤维制品等

<sup>\*</sup> 基金项目: 2018 年度广西职业教育教学改革研究项目(GXGZJG2018B047)

物品的残留状态和熔化、变形、燃烧程度,然后参考CECS 252—2009 附录 A 推断结构的受火温度。

## 2.2 砼强度检测

当主梁无法按照规范要求取芯进行抗压强度试验时,可通过超声一回弹综合法进行强度检测。由于超声波对砼的疏松程度较敏感,根据经验公式可较准确地推定火灾后砼的强度。砼强度  $q$  与声速  $v$  之间具有较好的相关性,砼强度越高,砼声速  $v$  越快。确定  $q-v$  关系曲线后,测出结构物砼的声速即可推算结构物砼的强度。 $v$  一般为  $4\sim 5$  km/s。根据文献[7],砼结构的受火温度与回弹值  $R$ 、超声速度  $v$  之间存在以下关系:

$$t_r = 1\,566 - 1\,205 \frac{R_t}{R_0} \quad (S_r = 42.5\text{ }^\circ\text{C})$$

$$t_v = 789 - 649 \frac{v_t}{v_0} \quad (S_r = 23.2\text{ }^\circ\text{C})$$

式中: $t_r$  为回弹法所测受火砼的受火温度; $R_t$  为受火砼回弹值; $R_0$  为未受火完好砼回弹值; $S_r$  为剩余标准差; $t_v$  为超声法所测受火砼的受火温度; $v_t$ 、 $v_0$  分别为受火砼和未受火完好砼的超声速度。

按平面回归分析,受火温度为:

$$t_f = 993 - 506.5 \frac{v_t}{v_0} - 303.5 \frac{R_t}{R_0} \quad (S_r = 21.4\text{ }^\circ\text{C})$$

砼的极限抗压强度随温度的升高而降低,降低程度为:

$$\Phi_c = \frac{f_{cu,t}}{f_{cu,0}}$$

式中: $f_{cu,t}$  为温度为  $t$  时砼极限抗压强度; $f_{cu,0}$  为普通环境温度下砼极限抗压强度。

砼结构强度与受火温度的相关关系为:

$$\Phi_c = 1.535\,79 - 0.001\,465\,8t$$

## 2.3 桥梁固有频率测试

自振频率  $f$  是桥梁结构的重要动力特性参数,其与结构刚度和质量有关,与刚度  $K$  成正比,与质量  $M$  成反比。受灾部位砼剥落后结构刚度削弱,质量降低,故灾后结构的自振频率呈降低趋势。可通过测试火灾桥梁的自振频率,并与受火前的自振频率或相同结构形式桥梁的自振频率进行对比,分析受灾桥梁结构刚度的削减程度。

## 2.4 桥梁承载能力评定

火灾对结构力学性能的影响包括强度降低和刚度削减两方面。由于材质劣化导致砼强度降低,钢筋有效面积和强度削减,而砼的大面积剥落造成结

构面积和截面抗弯惯性矩减小,从而导致结构的正截面抗弯承载力、斜截面抗剪承载力降低。

对火灾后桥梁承载能力的评定采用基于检测结果的有限元分析法。依据 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》,根据外观质量检查、无损检测、自振特性测试及技术状况评定结果对桥梁承载能力检算系数、承载能力恶化系数、砼结构截面折减系数及钢筋截面折减系数、支座刚度削弱等参数进行计算。若要精确分析结构内部的受火温度,还可建立局部温度分析模型,计算高温作用下钢筋和砼的弹性模量,为结构承载能力评定提供材质的物理力学性能指标,更可靠地对结构极限承载能力状态和正常使用承载能力极限状态进行验算,为结构的加固处理提供依据。

## 2.5 结构耐久性影响评估

在高温作用下,水泥中的水化物脱水分解,导致水泥内部裂缝增多,结构变得疏松多孔。由于水泥石与粗骨料的热变形不相容,形成大量界面裂缝,会削弱骨料之间的黏结力。温度超过  $400\text{ }^\circ\text{C}$  时,黏结力的降低逐渐加剧,砼的碳化程度也加剧,导致钢筋失去碱性砼环境的保护,易发生锈蚀。

在高温作用下,钢筋的内部结构发生相变,钢筋的屈服强度、弹性模量、应力—应变曲线均发生变化,冷却方式不同也影响其相变和物理力学性能。温度超过  $600\text{ }^\circ\text{C}$  时,钢筋表面形成脱碳层,含碳量下降,珠光体减少导致钢筋强度降低。

## 3 某灾后桥梁结构承载能力评估

以某火灾桥梁为背景,根据以上评估流程,分析该桥受火灾后的承载能力。该桥由于桥台处堆积的杂物起火,火焰直接灼烧桥台和主梁约  $90\text{ min}$  后自然熄灭。火灾幅桥梁为辅助车道,上部结构为装配式预应力砼先简支后连续小箱梁,桥面宽  $11\text{ m}$ ,桥面设置分隔带、非机动车道和人行道,设计荷载等级为城—A 级。

### 3.1 外观检查

根据现场主梁外观、火堆残留物调查取样分析结果,现场情况描述如下:1) 受灾概况。由于桥下堆积物人为烧毁,导致右幅外侧桥 6# 跨 1#~4# 箱梁靠近前台处的主梁表面、6# 桥台台身、支座、伸缩缝受损。2) 燃烧物为生活用品及生活垃圾;火灾时间  $60\sim 90\text{ min}$ ;灭火方式为自然熄灭。3) 主燃点有 2 处,位于 6# 桥台锥坡处 1#~2#、3#~4# 主梁。

4) 损伤区域为 6# 跨主梁、6# 桥台、支座、伸缩缝。主梁损伤区域见图 1。5) 燃烧温度推定。根据现场调查燃烧物形态、玻璃酒瓶存脆裂状及铝合金制品存在滴状的情况,推定现场火堆燃烧温度为 600~700 ℃。6) 桥台砼表面呈粉红显灰白色,表面砼严重脱落,钢筋外露,根据 CECS 25—2009 附录 B 推定最大受火温度为 500~600 ℃。7) 箱梁砼表面微显粉红色,表面砼严重脱落,钢筋外露,根据 CECS 25—2009 附录 B 推定最大受火温度为 300~500 ℃。8) 根据过火温度推断,主梁 50 mm 以上范围砼为正常。受火处的钢绞线距离砼表面 90~120 mm,且采用圆形金属波纹管,推断波纹管内钢绞线未受火灾影响,钢绞线预应力未受到损失。

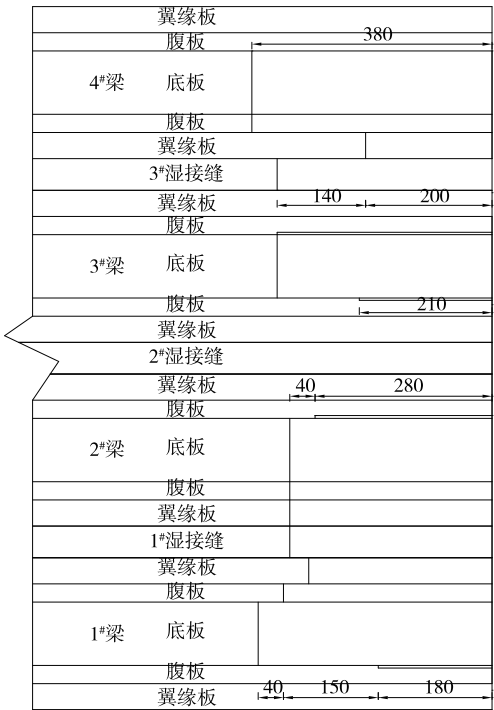


图 2 主梁受火区域示意图(单位:cm)

根据结构的受火温度及 CECS 25—2009 得出如下结论:1) 距离桥台台帽表面 50 mm 以下的砼温度降至 300 ℃以下,距离主梁表面 50 mm 范围内的砼温度降至 300 ℃以下。2) 高温砼自然冷却后抗压强度折减系数,距离桥台台帽表面 50 mm 范围内的未剥落砼为 0.80,距离主梁表面 50 mm 范围内未剥落砼为 0.80,剥落砼则按截面折减考虑。3) 高温冷却后钢筋屈服强度折减系数为 0.95,极限抗拉强度折减系数为 0.95。4) 高温自然冷却后砼弹性模量折减系数为 0.75,砼与钢筋的黏结强度为 0.90 MPa。

3.2 技术状况评定

仅根据当前外观检测结果进行受灾桥梁技术状况评定,该桥养护类别为Ⅱ类。依据 CJJ 99—2017《城市桥梁养护技术标准》,Ⅱ~Ⅴ类养护的城市桥梁技术状况评估包括桥面系、上部结构、下部结构和全桥评估,采用先分部位再综合的评估方法。该桥评估结果如下:

(1) 桥面系完好状况指数为 90,完好状况等级为 A 级。

(2) 桥梁上部结构主梁露筋锈蚀扣 80 分,按照 CJJ 99—2017,该类桥构件损坏程度达到该破坏程度时,评定等级不应高于 D 级,故该桥上部结构完好状况等级为 D 级。

(3) 下部结构完好状况指数为 97.4,完好状况等级为 A 级。

(4) 全桥技术状况指数 BCI 按 CJJ 99—2017 中公式计算,BCI=92.81。

(5) 主梁露筋锈蚀扣 80 分,按照 CJJ 99—2017,该类桥构件损坏程度达到该破坏程度时,评定等级不应高于 D 级,故右幅桥梁完好状况评估等级为 D 级。根据 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》,结构缺损状况评定标度为 4。

3.3 砼材质强度检测

为全面测试火灾后主梁的强度状况,除对火灾区域的砼进行超声一回弹综合法检测外,还对未受损主梁进行超声一回弹综合法检测,分析受灾区域砼强度的降低程度。测试结果见表 1。

表 1 超声一回弹综合法测试结果 MPa		
构件	推定值	设计值
受灾构件	1# 梁	48.2
	2# 梁	48.4
	3# 梁	48.0
	4# 梁	48.8
	6# 梁	35.5
未受灾构件	桥台	37.0
	主梁	52.3

由表 1 可知:1) 受灾区箱梁砼强度推定值为 48.0~48.8 MPa,受火箱梁表面砼强度略低于设计强度,较未受灾主梁强度降低约 10%。2) 6# 桥台受灾区砼强度推定值为 35.5 MPa,较未受灾主梁强度降低约 5%。3) 按 JTG/T J21—2011 进行评定,砼强度评定标度为 1。

3.4 砼碳化检测

按照 JGJ/T 23—2011,在已测砼回弹值的测区

中选取3个具有代表性的测区,采用浓度为1%~2%的酚酞酒精溶液测试砼碳化深度,每个测区测3点,取平均值作为检测结果。

检测结果如下:1)主梁碳化深度30 mm左右,主梁主筋净保护层厚度设计值为40 mm。2)桥台碳化深度40 mm左右,桥台主筋净保护层厚度设计值为40 mm。检测结果表明主筋内的砼未发生碳化,碳化深度平均值小于保护层厚度,按JTG/T J21—2011进行评定,碳化深度评定标度为2。

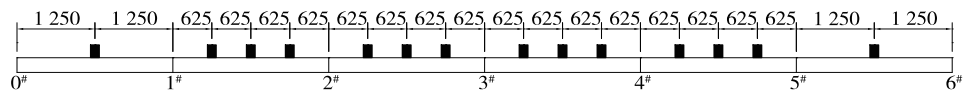


图3 自振频率测点布置(单位:cm)

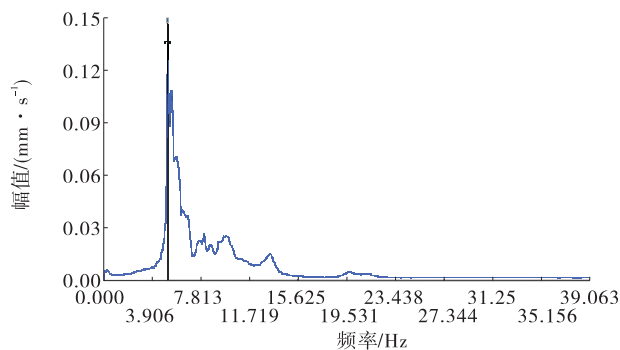


图4 受灾桥梁频谱图( $f_1=5.176$  Hz)

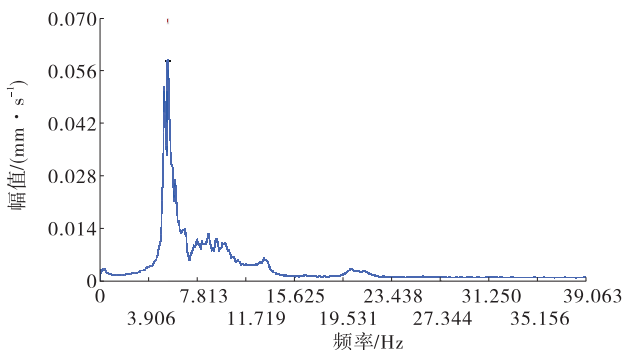


图5 未受灾桥梁频谱图( $f_1=5.469$  Hz)

通过对实测振动信号进行分析,得到主梁振动

### 3.5 自振频率检测

由于火灾桥梁属于非机动车道,未进行成桥荷载试验,自振频率试验采用比对方法,对相同结构的未受灾的左幅桥梁进行自振频率测试,测量由外界因素引起的桥梁微小且不规则的振动,然后进行谱分析,得到桥梁结构的动力特性值(自振频率、振型和阻尼比)。对比两幅桥的基频,判断受灾桥梁的刚度是否发生变化。测点布置见图3,检测结果见图4、图5。

频率和阻尼比等模态参数。理论值采用MIDAS/Civil进行计算,按JTG/T J21—2011进行评定。评定结果见表2。

表2 主梁自振频率、阻尼比对比结果

振型 阶次	桥幅	自振频率/Hz			阻尼 比	评定 标度
		实测 值	理论 值	实测值/ 理论值		
竖向	右幅	5.176	4.0	1.294	0.011	1
1阶	左幅	5.469	4.0	1.367	0.029	1

由表2可知:1)右幅受灾桥梁实测1阶频率大于理论1阶频率,实测阻尼比为0.011;2)右幅受灾桥梁实测1阶频率小于左幅1阶实测频率,右幅桥梁主梁和桥台支座刚度均有所降低。

### 3.6 承载能力验算

#### 3.6.1 分项检算系数确定

根据JTG/T J21—2011的相关规定确定分项检算系数,结果见表3。

#### 3.6.2 计算参数确定

综合外观检测、超声一回弹综合法检测结果及规范相关要求,确定火灾区域梁段砼和钢筋的材料特性值(见表4)。

表3 分项检算系数的取值

分项检算系数	取值	说明
承载能力检算系数评定标度 $D$	2.200 0	根据JTG/T J21—2011, $D \geq 3$ 时,应进行正常使用极限状态评定计算
承载能力检算系数 $Z_1$	1.080 0	按照JTG/T J21—2011中表7.7.1—2内插取值
承载能力恶化系数 $\xi_s$	0.059 2	根据JTG/T J21—2011中表7.7.4计算得到
钢筋截面折减系数 $\xi_s$	0.950 0	根据CECS 25—2009和JTG/T J21—2011综合考虑,取最不利值
构件截面折减系数 $\xi_s$	0.998 0	根据JTG/T J21—2011中表7.7.5计算得到,结合外观检测,截面计算时削弱底缘5 cm 砼

表 4 受灾主梁材料特性值

主梁特性	取值	说明
受灾区域	距梁端 3.8 m	取受灾区域最大值
砼强度/MPa	48.000	超声一回弹综合法检测结果最小值
纵向主筋折减系数	0.950	根据 CECS 25—2009 和 JTG/T J21—2011 综合考虑,取最不利值
箍筋折减系数	0.950	根据 CECS 25—2009 和 JTG/T J21—2011 综合考虑,取最不利值
预应力筋折减系数	1.000	根据检测结果,预应力未受影响
横向分布系数	汽车,0.551;人群,0.971	采用横向刚接板法计算,取汽车横向分布系数和人群横向分布系数组合最大的 2 <sup>#</sup> 主梁进行验算
其他参数	按原设计取值	设计荷载:城—A 级;人群荷载:按 CJJ 11—2011 取值;温度荷载:整体升温 14 ℃,整体降温 20 ℃;温度梯度:按 JTG D60—2004 施加;其他未列参数均按原设计取值

3.6.3 结构计算有限元模型

采用平面杆系结构模型,边界条件按实际模拟。以 CJJ 11—2011《城市桥梁设计规范》和 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》为标准,按照设计说明,该桥预制小箱梁按 A 类预应力钢筋砼构件设计,按规范要求,承载能力极限状态验算采用基本组合。图 6 为箱梁结构离散图。

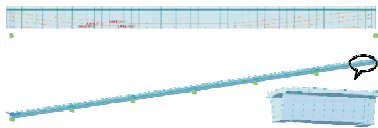


图 6 2<sup>#</sup> 箱梁结构离散图

3.6.4 上部结构极限承载能力验算

根据 JTG D62—2004,桥梁构件的承载能力极限状态计算应满足:

$$\gamma_0 S \leq R$$

式中: $\gamma_0$ 为结构构件重要性系数; $S$ 为承载能力极限状态的荷载效应组合设计值; $R$ 为结构构件承载力设计值。

按 JTG D62—2004 进行正截面抗弯承载能力计算,主梁正截面抗弯承载能力验算结果见图 7。按 JTG D62—2004 进行斜截面抗剪承载能力计算,主梁斜截面抗剪承载能力验算结果见图 8、表 5。

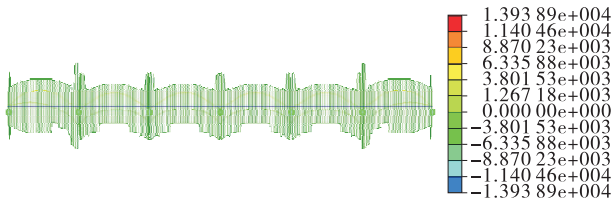


图 7 正截面抗弯承载能力验算结果(单位:kN·m)

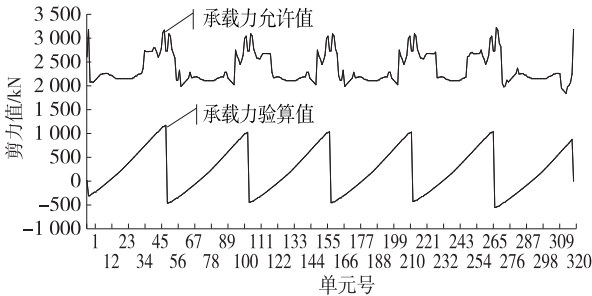


图 8 斜截面抗剪承载能力验算结果

表 5 极限承载力组合值验算结果

位置	承载能力	最大内力	承载能力/内力	评价结果
第 6 跨跨中附近最大	8 727 kN·m	5 964 kN·m	1.46	满足
第 5 跨跨中最大	7 391 kN·m	4 758 kN·m	1.55	满足
第 4 跨跨中最大	7 391 kN·m	4 884 kN·m	1.51	满足
第 6 跨距支座 1/2 处截面	2 222 kN	694 kN	3.20	满足

由图 7、图 8、表 5 可知:2<sup>#</sup> 箱梁火灾后的正截面抗弯抗力值均大于荷载效应值,斜截面抗剪抗力值大于荷载效应值,说明该桥能满足城—A 级荷载标准要求。

3.6.5 下部结构极限承载能力验算

根据设计文件,6<sup>#</sup> 桥台下部结构为肋板式桥台,根据 JTG D62—2004,桥台盖梁可按连续梁计

算。6<sup>#</sup> 桥台跨高比为 4.12( $L/h=6.591/1.6$ ),按照 JTG D62—2004 进行承载能力验算,桥台最不利组合内力采用 MIDAS/Civil 计算,图 9 为结构离散图。验算结果见表 6、表 7。

由表 6、表 7 可知:右幅桥火灾后,6<sup>#</sup> 桥台的正截面抗弯承载能力及斜截面抗剪承载能力值均大于荷载效应值,该桥台能满足城—A 级荷载标准要求。

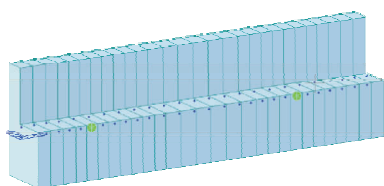


图 9 桥台有限元计算离散图

表 6 桥台正截面抗弯承载力极限状态验算结果

验算截面	最大内力/ (kN·m)	承载力/ (kN·m)	承载力/ 最大内力	评价 结果
墩顶截面	1 205.93	5 781	4.794	满足
跨中截面	1 240.03	5 713	4.607	满足

表 7 桥台斜截面抗剪承载力极限状态验算结果

验算截面	最大内 力/kN	承载力 力/kN	承载力/ 最大内力	评价 结果
墩顶截面	1 102.86	6 529	5.920	满足

#### 4 结语

根据检测结果和计算结果,该桥火灾区域的正截面抗弯能力和斜截面抗剪承载力虽较原设计均有所降低,但仍能满足设计规范荷载要求。考虑到主筋保护层失效,主筋易发生锈蚀,桥梁的耐久性受到较大影响,应尽快进行加固处理。

桥梁发生火灾后,按照“五步工作大纲法”检测流程进行检测评定,可大大提高检测效率和参数的准确性,为准确评定其承载力提供可靠依据。

桥梁投资巨大,对于结构的“生死”判定应谨慎对待。结构破坏须防范,但过度维修会带来巨额经济损失,浪费大量社会资源。编制火灾后桥梁结构

检测评估和承载力评定规范,对于火灾后桥梁的科学评定和处理、快速恢复交通意义重大。

#### 参考文献:

- [1] 钮宏,陆洲导,陈磊.高温下钢筋与混凝土本构关系的试验研究[J].同济大学学报,1990,18(3):287-297.
- [2] 中冶建筑研究总院有限公司,上海市建筑科学研究院.火灾后建筑结构鉴定标准:CECS 252—2009[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [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.
- [4] 王福敏,黄中立.火灾后混凝土桥梁结构残余强度分析与加固措施[J].公路交通技术,2004(2):64-66.
- [5] 张宏,邵永军.火灾后混凝土桥梁损伤评估方法与应用[J].四川建筑科学研究,2011,37(3):95-99.
- [6] 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力鉴定分析[J].公路交通技术,2019(12):65-71.
- [7] 陈治平.超声一回弹综合法在受火灾砼结构检测中的应用[J].华侨大学学报(自然科学版),1996,17(1):35-39.
- [8] 杜红秀,张雄,韩继红.混凝土构筑物的火灾危害与损伤检测评估[J].建筑材料学报,1998,1(2):175-181.
- [9] 陈红奎,冯志强.火灾后预应力混凝土小箱梁桥承载力评估[J].河南科学,2020,38(3):464-469.
- [10] 唐鹏,宫赛.火灾发生后小型桥梁的快速检测评估与加固研究[J].公路,2019(10):93-98.

收稿日期:2021-03-22

## 《中外公路》2022 年征订通知

《中外公路》(原《国外公路》)创刊于 1980 年,双月刊,由长沙理工大学主管、主办。邮局公开发行至全国公路、市政、铁路、水利、建筑等系统和相关行业,发行量大,影响面广。属 RCCSE 中国核心学术期刊、首届(2006 年)中国高校特色科技期刊、中国高校技术类优秀期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊,由中国科学技术信息研究所组织评选)、湖南省十佳科技期刊、中国期刊全文数据库及中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,“桥梁工程与隧道工程”栏目荣获首届(2008 年)湖南省优秀栏目,2009 年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖,多次被评为交通部、湖南省优秀期刊。

2022 年《中外公路》为大 16 开,页码 256 页以上,每册定价 15.00 元,全年 6 期共 90.00 元。

邮发代号:42-63。读者也可通过邮局或银行汇款至杂志社直接订阅。

地址:长沙理工大学云塘校区 58 号信箱

邮编:410114

收款单位:《中外公路》编辑部

户名:长沙理工大学

帐号:18051401040000158

开户行:长沙市农行高云支行

电话:0731-85258033(带传真)

联系人:白雪

E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com