

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.179

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



预应力混凝土梁桥过火后的材料性能

郝朝伟¹, 刘康², 李洪印³, 王来永¹

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 山东省交通规划设计院, 济南 250031;

3. 齐鲁交通发展集团有限公司, 济南 250101)

摘要:火场最高温度、持续时间、扩散条件以及高温下混凝土爆裂等因素增加了利用温度获得材料性能的难度。针对火灾后评估预应力混凝土梁桥时需快速、准确、真实地获得其材料性能的需求,对在役高速公路预应力混凝土桥梁过火后拆除的 32 块空心板进行表观分类和材料试验,通过实测过火后材料性能,获得常用检测指标与材料性能的关系,并利用极限承载能力试验及有限元模拟验证其适用性。结果表明:混凝土高温爆裂剥落,致使空心板截面损失,并进一步降低该区域混凝土及预应力钢绞线强度,是导致该截面抗弯承载能力降低的主要原因;当过火后混凝土剥落深度超过 2/3 钢绞线净保护层时,混凝土抗压强度、预应力钢筋线拉伸强度折减系数达 0.7,将严重影响结构极限承载能力;火灾作用将改变空心板极限破坏形态,由延性转为脆性破坏;利用常规检测指标与材料性能的折减关系,并结合有限元模拟分析过火后预应力空心板梁的极限承载能力,满足工程精度。

关键词:桥梁工程;空心板;试验研究;保护层厚度;火灾

中图分类号:U444; U445.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)03-0106-09

Material properties of prestressed concrete girder bridge after exposed to fire

Hao Chaowei¹, Liu Kang², Li Hongyin³, Wang Laiyong¹

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, P. R. China;

2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Jinan 250031, P. R. China;

3. Qilu Transportation Development Group, Jinan 250101, P. R. China)

Abstract: The factors such as maximum temperature, duration, diffusion condition and concrete bursting at high temperature increase the difficulty of obtaining material properties by using temperature. In order to quickly obtain the real performance parameters of the materials of the pre-stressed concrete beam bridge in the post-disaster bridge evaluation, the appearance classification and material test of 32 hollow slabs demolished after the fire of the existing beam bridge in a highway were carried out. The relationship

收稿日期:2019-09-25

基金项目:国家自然科学基金(51608238);福建省交通运输科技项目(201733);齐鲁发展交通集团有限公司养护科技项目(2017YHKY-08)

作者简介:郝朝伟(1989-),男,主要从事桥梁加固及抗震研究,E-mail: budianerwen@sina.com。

Received:2019-09-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51608238); Transportation Science and Technology Project of Fujian Province (No. 201733); Maintenance Project of Qilu Development Transportation Group Co., Ltd. (No. 2017YHKY-08)

Author brief: Hao Chaowei (1989-), main research interests: strengthening and seismic prevention for bridge, E-mail: budianerwen@sina.com.

between the commonly used testing indexes and the properties of materials is obtained by measuring the properties of materials after fire. The applicability of these indexes is verified by the ultimate bearing capacity test and finite element simulation. The results show cracking and spalling of concrete at high temperature not only results in significant loss of section, but also significantly reduces the strength of concrete and prestressing steel strand in this area, which leads to the reduction of bearing capacity. When the spalling depth of concrete exceeds 2/3 of the net protective layer of steel strand after overfire, the reduction coefficient of compressive strength and tensile strength of pre-stressed steel wire reaches 0.7, which will seriously affect the ultimate bearing capacity. Fire action will change the ultimate failure form of hollow slab from ductility to brittleness. The ultimate bearing capacity of the prestressed hollow beam after fire is analyzed by using the reduction relationship between the conventional inspection indexes and the material properties, and the finite element simulation, so as to meet the engineering precision.

Keywords: bridge engineering; hollow slab beams; experimental research; cover thickness; fire

近年来,随着大交通体系的统筹发展,公路交通领域中桥梁迸发火灾的频数也在增加^[1-2]。桥梁受火不仅带来巨大经济损失,而且给桥梁安全带带来潜在隐患,影响其正常服役性能。根据交通运输部公路局的统计,在已建成桥梁中,预应力混凝土桥梁占很大比重,而空心板梁是中小跨度公路桥梁上部结构最常见的形式,因此,非常有必要系统地研究其抗火性能。

众多学者对火灾后结构性能损伤和抗火设计进行过不同深度的研究。目前,结构抗火相关研究已覆盖局部构件和结构整体,并将研究热点逐渐转向局部过火与系统抗火性能方面。另外,对抗火计算方法、灾后承载能力评估及防火新技术方面的研究也较多。Kodur等^[3-4]针对火灾对钢筋-混凝土之间黏结滑移性能的影响,提出温度场分布的计算与抗火验算数值方法,并揭露了结构抗火受混凝土强度、断面尺寸、混凝土骨料类别等因素影响的规律。Bailey等^[5]研究了后张无粘结预应力混凝土单向板抗火性能,并以主要影响参数:不同骨料类别(硅质、钙质)、板端不同边界约束(固定端、板端自由转动)等为敏感因素,研究其对结构综合抗火的影响,结果表明,在高温下,不同板端约束和骨料类型对预应力混凝土板的变形影响不可忽略。Majorana等^[6]基于对美国各州发生火灾的桥梁事故调查、统计及回归分析,提出一种可操作性非常强的桥梁过火后安全鉴定检测方法。Kim等^[7]通过具有高准确度的双冲孔试验,研究影响暴露于高温的钢纤维增强混凝土的机械拉伸性能的因素,结果表明,样品的残余抗压强度、DPT拉伸强度和断裂能随着加热的增加而降低。钢纤维混凝土暴露于高温后,在抗张强度的

相对损失比在抗压强较高,但断裂能量的相对损耗较低。暴露于高温后,样品的行为对纤维的体积分数和长径比比对纤维的类型更为敏感。张晓栋等^[8]对车致火灾下预应力混凝土T形截面梁桥进行抗火性能评估,研究火灾和结构自身参数的随机性问题,并基于中心复合试验设计对参数进行抽样,形成试验样本和检验样本,建立基于RSM-MCS的易损性分析方法,并以此开展预应力混凝土T形截面梁的易损性分析。郑雪松^[9]以大跨径预应力混凝土箱梁桥为研究对象,采用统计及数值模拟方法,归纳并提出了一套有限元模拟大跨径PC箱梁桥火损效应的分析方法。郑文忠等^[10]对超高性能混凝土(UHPC)的抗火性能进行初步研究,通过对UHPC各温度段热工系数实测并总结规律,结果表明,UHPC的导热系数高于普通混凝土,不同组成成分的UHPC热工参数差异也较大。以上研究中,材料性能与温度场的关系是大多数学者研究过火后桥梁材料性能的出发点。受火场最高温度、持续时间、扩散条件等影响,火灾后较难真实还原火场温度分布,进而增加通过确定火灾温度判断材料性能的难度。另外,利用数值模拟确定温度场分布时,不考虑混凝土开裂、爆裂等因素引起的温度场变化,认为温度分布与应力无关。然而,在真实的高温下,当混凝土开裂(爆裂)后,裂缝处的温度较未开裂处有所提高,不考虑此因素将影响该方法推测过火后材料性能的适用性。

笔者对一座运营中的预应力空心板梁过火后材料性能进行测试,通过统计分析,获得了常用检测指标与材料性能的关系,并通过有限元模拟及极限承载能力试验验证其适用性。

1 工程概况及火灾现场温度

某高速公路一座 $9\text{ m} \times 20\text{ m}$ 简支先张预应力混凝土预制板结构桥梁,分幅设计,单幅桥梁设置 16 片空心板梁,桥梁交角为 52.74° ,混凝土的强度等级为 C50,每片梁 14 根钢束(有效长度 $780 \sim 1\,996\text{ cm}$),每根预应力钢束由 $6 \times \Phi^{15.2}$ 组成,净保护层 37.4 mm ,采用直线布置。预应力钢束的屈服强度为 $1\,860\text{ MPa}$,张拉控制应力 $1\,395\text{ MPa}$,立面及中板配筋见图 1。某日凌晨 2 点 15 分,一辆油罐车在该桥下(右幅第 7 孔)发生侧翻,罐体破裂并燃烧,因第 8 孔地面较低,燃油随即顺路面流淌至第 8 孔,导致该桥相邻两孔梁板底面发生大面积燃烧,火源中心示意图见图 2。大火约凌晨 4 点 10 分左右扑灭,过火时间近 2 h。依据检测结果,该桥被评定为四类桥,桥梁受火后损伤情况见图 3,经专家评估后,右幅第 7、8 孔主梁拆除重建,为研究提供了样本。

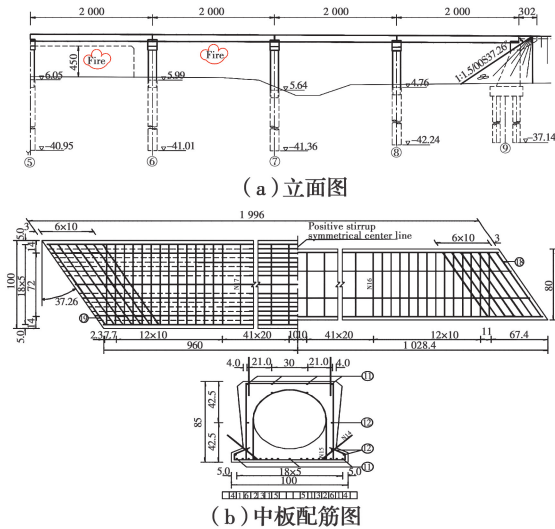


图 1 立面及中板配筋

Fig. 1 The bridge layout

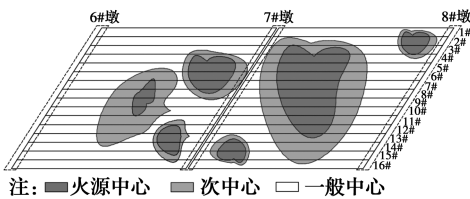


图 2 火源中心示意图

Fig. 2 The schematic diagram of fire source center

火灾现场的温度确定主要依据火灾后受损混凝土的颜色、烧疏厚度及燃料外焰温度等综合确定,判定依据见表 1、表 2。通过现场肉眼及触摸逐

一判断空心板火灾后混凝土颜色改变情况可知,多片梁过火后混凝土略显淡黄色或粉红色,局部烧疏厚度大于 6 mm 。另外,汽油燃烧的时最高温度可达到 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,确定火灾现场温度为 $900 \sim 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 。

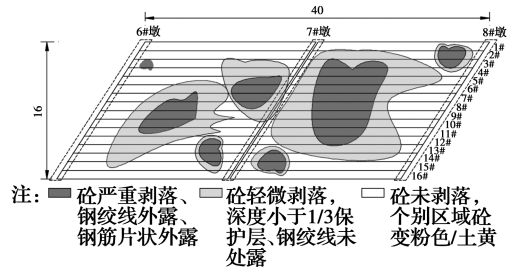


图 3 桥梁受火后的损伤情况

Fig. 3 The damage of bridge after fire

表 1 火灾温度与混凝土颜色对应关系

Table 1 Corresponding relationship between fire temperature and concrete color

外观颜色	现场温度/ $^\circ\text{C}$
正常	< 300
粉色	$300 \sim 500$
粉色略显灰白色	$800 \sim 850$
灰白色	$850 \sim 900$
灰白色略显土黄	$900 \sim 1\,000$
土黄色	> 900

表 2 火灾温度与混凝土烧疏层厚度对应关系

Table 2 Corresponding relationship between fire temperature and thickness of concrete sparse layer

烧疏层厚度/mm	现场温度/ $^\circ\text{C}$
1~2	< 700
2~3	$700 \sim 800$
3~4	$800 \sim 850$
4~5	$850 \sim 900$
5~6	$900 \sim 1\,000$
> 6	$> 1\,000$

2 样本分类

为了方便现场取样及满足样本分类,对空心板梁底进行划分并编号,纵桥向 0.5 m 一格,横桥向 0.5 m 一格。现场材料取样时,依据底板剥落深度、面积、爆裂裂缝及回弹值将样本分为 7 类,见表 3。测定每一区域内混凝土的强度及弹性模量、钢绞线的强度及弹性模量、普通钢筋强度及弹性模量。

表 3 样本分类依据及编号

Table 3 Basis and Number of Sample Classification

编号	测区	分类依据
1#	参考	未过火区域
2#	剥落 A	$0 < d < 1/3\delta_{\text{steel strand}}$ δ 钢绞线 $\& \cdot S > 0.2S$ 测区
3#	剥落 B	$1/3\delta_{\text{steel strand}} \leq d < 2/3\delta_{\text{steel strand}}$ $\& \cdot S > 0.2S_{\text{test}}$
4#	剥落 C	$d \geq 2/3\delta_{\text{steel strand}}$ $\& \cdot S > 0.2S_{\text{test}}$
5#	裂缝 A	出现轻微火灾裂缝网
6#	裂缝 B	出现火灾粗裂缝网
7#	回弹	未出现开裂和剥落区,其 $R < 0.9R_{\text{im}}$

表 3 中: $\delta_{\text{steel strand}}$ 为钢绞线净保护层厚度; δ 为混凝土剥落深度; S_{test} 为测区面积; S 为实测剥落面积; R_{im} 为对应碳化深度为 0 时的预应力混凝土梁所用混凝土标号对应测强曲线回弹值(考虑角度和测试面修正); R 为实测回弹值。

因过火剥落后底板呈凹凸不平,测量剥落厚度时,将底板分成 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的小区域,取该小区域剥落深度的最大值作为代表值,然后计算测区所有小区域的平均值作为该测区的平均深度,根据以上值区分剥落标度 A~C。典型的剥落情况见图 4。另外,有两片梁几乎未受火灾直接灼烧,可以作为基准梁。



图 4 典型底板剥落照片

Fig. 4 The peeling of base slab

对于出现火灾爆裂区域,通过肉眼及便携式裂缝宽度对比卡逐一检测测区内出现的裂缝,仅考虑由火灾导致的裂缝。混凝土爆裂的典型照片见图 5。未出现混凝土剥落及火灾爆裂裂纹区域,仅通过回弹值区分,考虑测试角度和测试面修正后的回弹值若小于 R_{im} ,认为材料受损不可忽略,对该区域的材料取样。现场回弹测定情况见图 6。

3 测试结果及分析

按照文献[11]的相关要求,开展该桥上部结构

过火后混凝土强度和弹性模量试件的现场取样工作,芯样尺寸采用直径 70 mm、高度 70 mm 的圆柱形试样,长径比 1.0,文献[12]研究表明,对于小直径芯样,试件的高径比不得超过 0.85~1.20 范围,否则试验结果误差较大。



图 5 典型底板混凝土爆裂照片

Fig. 5 The peeling of base slab

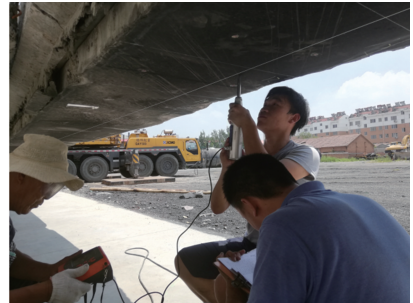


图 6 底板直接未剥落区域回弹测试

Fig. 6 The peeling of base slab

钢材的屈服强度、抗拉强度和弹性模量等性能都可以通过拉伸试验获得,拉伸试验按照中国国家标准[13]进行。测定钢材弹性模量时,试验的一般标距长度 l_0 为 20、50、100 mm,试验的总长度 l 应使试验机两夹头间距不小于 150 mm,试验现场取样长度 $l=400\text{ mm}$ 。

钢绞线力学性能试验按照文献[14]的有关规定进行,取样长度 $l=0.5\text{ m}$ 。试验在夹头内距钳口 2 倍钢绞线公称直径内断裂达不到标准要求时,试验无效,则重新增补芯样。

3.1 混凝土测试结果

混凝土抗压强度测试结果见表 4,表中立方体抗压强度值为剔除差异较大数据后的算术平均值。由表 4 可知,未过火前,底板混凝土立方体抗压强度为 58.5 MPa,过火后,当剥落深度小于 1/3 钢绞线净保护层时,强度折减系数为 0.85,当剥落深度大于 2/3 钢绞线净保护层时,强度折减系数为 0.68,即过火后强度折减系数与剥落深度成正相关。过火

后出现轻微裂缝网的区域和回弹值低于正常值的区域,其混凝土强度过火后折减较小。

表4 混凝土强度试验结果

Table 4 Test results of concrete strength

测区	f_{ck}/MPa	SD/MPa	折减系数	样本数量
参考	58.5	4.52	1.00	6
剥落 A	49.7	4.15	0.85	15
剥落 B	43.7	4.29	0.75	15
剥落 C	39.6	5.21	0.68	15
裂缝 A	54.2	4.64	0.93	15
回弹	54.8	4.82	0.94	15

高温灼烧底板混凝土时,将导致其材料内部组成成分物理、化学及力学性能的变化:混凝土内部水份蒸发,水化和未水化的水泥颗粒之间的结合力松弛,含水氢氧化钙脱水形成氧化钙,水化物分解使水泥石的组织破坏,水化物由高碱向低碱产物转化,水泥石内部裂纹增多且疏散多孔,岩石中石英的晶态由 $\alpha\beta$ 型,转化为 β 型造成体积增大,产生裂纹,高温中碳酸钙分解体积增大等,这些原因降低了混凝土的抗压强度。

3.2 钢绞线测试结果

预应力钢绞线中晶体缺陷较大,晶体的点缺陷使得材料强度增大,但高温时有恢复的趋势,火灾温度超过 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,强度降低很多。另外,由于高温下其他的物理化学作用,如原子间结合力降低(高温后部分能恢复)和脱碳现象,进一步降低其强度,增加其塑性^[15]。高温作用后,材料的不等性增大,试验数据离散较大,测试结果见表5。

表5 钢绞线屈服强度试验结果

Table 5 Test results of yield strength of steel strand

测区	屈服强度/MPa			SD/MPa	折减系数
	平均	最大	最小		
参考	1 888			9.71	1.00
剥落 A	1 816	1 842	1 876	46.32	0.96
剥落 B	1 687	1 341	1 819	73.62	0.89
剥落 C	1 441	983	1 732	99.53	0.76
裂缝 A	1 881	1 864	1 902	23.53	1.00
裂缝 B	1 718	1 440	1 858	35.88	0.91
回弹	1 780	1 685	1 874	52.42	0.94

由表5知,高温后脱落深度小于 $1/3$ 区域、出现

轻微裂缝网区域、回弹值低于正常值区域内钢绞线过火后强度折减系数不大,其原因主要为混凝土内部热传导性能差,随着离受火面(梁底)距离的增大,温度迅速下降,当离受火梁底 4 cm 左右时,最高温度下降非常明显^[13]。当过火后剥落深度大于 $1/3$ 钢绞线净保护层时,钢绞线过火后屈服强度降低明显;剥落深度大于 $2/3$ 钢绞线净保护层时,屈服强度平均折减系数约 0.75 ,个别钢绞线强度折减系数为 0.52 ,将严重危及桥梁结构安全。

3.3 普通钢筋测试结果

先张法预应力混凝土空心板底板区域仅配1根公称直径为 12 mm 的HRB400普通钢筋,热轧带肋钢筋强度测试结果见表6。由表6可知,7个区域内的热轧带肋钢筋高温后极限强度折减系数非常小,基本接近 1.00 ,仅个别区域钢筋屈服强度略有下降,相比钢绞线过火后强度折减系数可以忽略。主要原因是:混凝土内部热传导性能差,随着离受火面(梁底)距离的增大,温度迅速下降,HRB400普通钢筋实际净保护层略大于钢绞线,即火灾中实际过火温度低于钢绞线;钢材内部组织中晶体的点缺陷使得材料强度增大,但高温时有恢复的趋势,由于预应力钢筋晶体的缺陷大,所以预应力筋比普通钢筋在高温中强度降低得更多^[16]。

表6 热轧带肋钢筋拉伸强度试验结果

Table 6 Tensile strength test results of hot rolled ribbed steel bars

测区	拉伸强度/MPa		SD/MPa	折减系数	
	屈服	极限		屈服	极限
参考	401	540	<20	1.00	1.00
剥落 A	388	551	<20	0.97	1.02
剥落 B	384	553	<20	0.96	1.02
剥落 C	398	556	<20	0.99	1.03
裂缝 A	377	536	<20	0.94	0.99
裂缝 B	376	529	<20	0.94	0.98
回弹	368	525	<20	0.92	0.97

光圆钢筋拉伸强度试验结果见表7。由表7知,过火后其屈服强度和极限强度规律性不显著,个别区域强度略有提高,个别区域强度相对于完全区域略有降低。过火后性能评估时,光圆钢筋可以直接取设计值。

表 7 光圆钢筋拉伸强度试验结果

Table 7 Tensile strength test results of round bars

测区	拉伸强度/MPa		SD/ MPa
	屈服	极限	
参考	373	487	<20
剥落 A	382	507	<20
剥落 B	388	503	<20
剥落 C	360	487	<20
裂缝 A	359	486	<20
裂缝 B	362	484	<20
回弹	369	479	<20

4 实例验证

通过实测混凝土、钢绞线及钢筋过火后的材料强度,给出了常用检测指标与材料性能的关系,通过上述关系,可进一步评定此类桥梁过火后承载能力。现通过实例说明。选定的实例梁外观情况见表 8 及图 7。

表 8 试验梁外观

Table 8 Test Beam Appearance

编号	外观状况
R-8-6#	底板过火后混凝土呈现粉色、土黄色的测区占比 98%;混凝土锤击声较闷的测区占 96%;底板混凝土完全爆裂剥落,其特征深度 3.6 cm;25%的钢绞线外露,分布于 0~1/2l 区域。



图 7 试验梁底板外观

Fig. 7 The peeling of base slab

4.1 有限元模拟

通过数值模拟较真实地获得空心板梁的抗弯承载能力,需准确获得材料过火后的性能,根据材料物理性能与检测指标试验数据可知,实例梁 100% 区域混凝土脱落,剥落平均深度为 3.6 cm,已超过钢绞线净保护层厚度的 2/3。文献[16]表明,仅底板直接受火时,火灾最高温度控制在 800 °C,当混凝土

距离受火面大于 15 cm 后,火灾过程中混凝土最高温度已低于 50 °C,火灾温度作用可以忽略。故建模时,距梁底 15 cm 以上采用完好区域的材料参数,15 cm 以下区域采用脱落混凝土区域的材料参数。文献[17]对高温后 481 根预应力钢筋弹性模量进行实测,结果表明,高温后预应力钢筋弹性模量几乎不随所经历温度、初始应力水平的变化而发生明显变化。故高温后钢绞线弹性模量取材料常温时的弹性模量。

采用有限元软件 ANSYS 建模,混凝土应采用 SOLID65 单元,过火后混凝土应力-应变关系的准确模拟是利用数值模拟获得抗弯承载能力的重要环节。模拟时采用随动硬化模型,混凝土破坏准则中,张开裂缝的剪切传递系数根据相关经验并试算后取 0.7,闭合裂缝的剪切传递系数经多次调整后取 0.95。混凝土单轴应力-应变关系综合了 Hognestad 和 GB 50010—2002 的规定。钢筋和钢绞线采用 LINK8 单元模拟,不考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移,钢绞线采用考虑强化的双线性等向强化模型 BISO 模拟。将普通钢筋以定义实常数(纵向、横向钢筋和箍筋的配筋率)的方式弥散到混凝土单元中考虑其作用。为杜绝应力集中导致计算提前跳出,加载位置及支座处设置了弹性模量为混凝土 100 倍的单元。划分单元时,采用六面体映射网格,全桥单元数 5 918,节点数 8 266。模型见图 8。

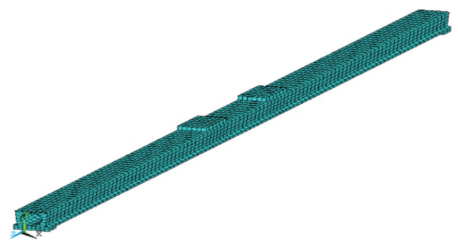


图 8 有限元模型

Fig. 8 The finite element model

4.2 承载能力试验

为了验证常用检测指标与材料性能的关系以及结合有限元模拟分析过火后空心板梁的适用性,对选定的实例梁进行极限承载能力对比试验。加载试验现场见图 9。

试验加载布置需同时考虑正截面最大弯矩及 1/3l~2/3l 处截面抗剪承载能力的要求,最终确定分配梁间距为 3 m,加载布置详见图 10。加载装置

采用反力架油压千斤顶加载,采用扩大混凝土块作为锚固基础,通过精轧螺纹钢和横向反力梁进行传力。试验加载流程和终止条件见有关规范。



图 9 极限承载能力试验

Fig. 9 The bearing capacity test

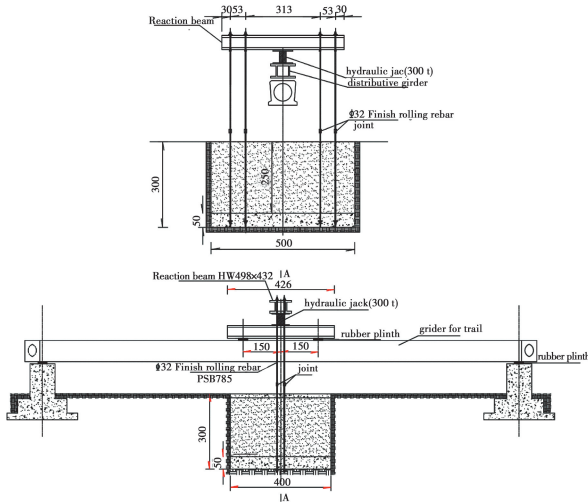


图 10 加载布置图(单位:cm)

Fig. 10 The loading layout (unit:cm)

试验梁加载分两个工况,第 1 个工况为加载到各测试截面均达到或接近设计承载能力极限状态,第 2 个工况为加载到实际极限破坏状态或加载到终止条件达到。加载流程见图 11。

由于照顾前期外观及无损检测的需要,试验台座净高 1.2 m,出于安全考虑及千斤顶行程原因,试验并未加载至空心板梁完全破坏,因而未出现混凝土压碎梁体断裂、梁板坍塌等结构彻底被摧毁的现象,试验过程中,结构的主要现象为:随着荷载增加,梁体挠度不断变大,变形从线性逐步向非线性发展;原有裂缝逐渐变宽,新裂缝首次出现区域为纵向距跨中 5 m 范围内,并随着加载的进行逐渐向支点方向延伸,裂缝平均间距随着加载量增大逐渐变小。当纵向距跨中 5.5 m 的受拉主筋处斜裂缝垂直首先超宽 1.5 mm 时,停止加载。

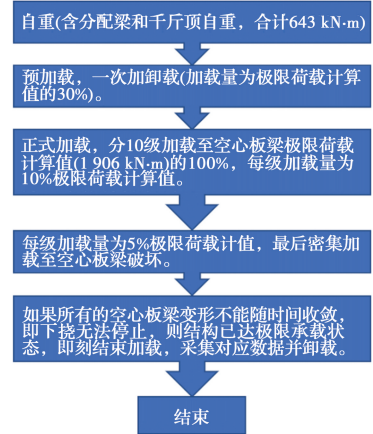


图 11 空心板梁加载程序

Fig. 11 The hollow plate beam loading program

4.3 结果对比

有限元模拟结果及试验结果对比见表 9(表中加载总重为双荷载之和)及图 12,图 13 为终止加载时跨中附近裂缝情况,图 14 为终止加载时实际裂缝(荷载试验)分布图,图 15 为对应钢绞线应力(有限元模拟)分布图。综合图 13~图 15 可知,破坏时钢绞线先屈服,而抗压区混凝土未出现压碎现象,顶缘最大压应变仅为 814 $\mu\epsilon$,即表现出少筋梁脆性破坏特点。经复核原设计,该梁为适筋梁,火灾作用后因底板钢绞线强度降低而成为少筋梁。综上,通过常用检测指标获得材料性能,进而通过有限元方法获得先张法预应力混凝土梁桥过火后极限承载能力是可行的,满足工程精度。

表 9 承载能力试验结果

Table 9 The results of finite prestress after fire

方法	加载总重/t (双肢和)	极限弯矩/ (kN·m)	最大挠度/cm
荷载试验	49.2	2 610	10.95
数值模拟	49.4	2 619	10.62

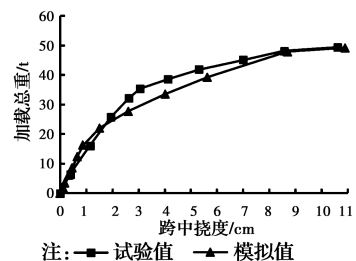


图 12 跨中挠度对比图(双荷载之和)

Fig. 12 Contrast of mid-span deflection



图 13 跨中附近裂缝照片

Fig. 13 The photos of cracks near the mid-span

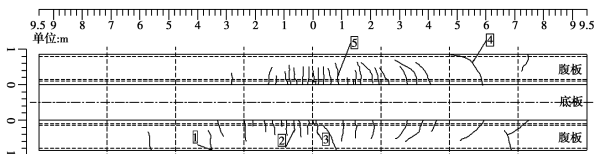


图 14 破坏时裂缝示意图

Fig. 14 Fracture diagram in case of failure

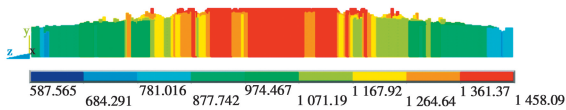


图 15 接近破坏时钢绞线应力(单位:MPa)

Fig. 15 Stress of strand near failure (unit:MPa)

5 结论

1) 混凝土高温爆裂剥落,致使空心板截面损失,并进一步降低该区域混凝土及预应力钢绞线强度,是导致该截面抗弯承载能力降低的主要原因。

2) 当过火后混凝土剥落深度超过 2/3 钢绞线净保护层时,混凝土抗压强度、预应力钢筋线拉伸强度折减系数达 0.7,将严重影响结构极限承载能力。

3) 火灾作用将改变空心板极限破坏形态,由延性转为脆性破坏。

4) 利用常规检测指标与材料性能的折减关系,并结合有限元模拟分析过火后预应力空心板梁的极限承载能力,满足工程精度。

5) 提出的常用检测指标与材料性能折减系数的关系,仅为小跨径预应力混凝土空心板梁底面直接受火,其他类型桥梁以及不同面受火情形需进一步研究。

参考文献:

[1] 张科. 混凝土梁桥火灾爆裂数值模拟分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.

ZHANG K. Numerical simulation analysis of fire cracking of concrete beam bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)

[2] 张岗, 贺拴海, 侯炜, 等. 预应力混凝土桥梁抗火研究综述[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 1-10.

ZHANG G, HE S H, HOU W, et al. Review on fire resistance of prestressed-concrete bridge [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(6): 1-10. (in Chinese)

[3] KODUR V, AZIZ E, DWAIKAT M. Evaluating fire resistance of steel girders in bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(7): 633-643.

[4] KODUR V. Properties of concrete at elevated temperatures [J]. ISRN Civil Engineering, 2014, 2014: 1-15.

[5] BAILEY C G, ELLOBODY E. Fire tests on bonded post-tensioned concrete slabs [J]. Engineering Structures, 2009, 31(3): 686-696.

[6] MAJORANA C E, SALOMONI V A, MAZZUCCO G, et al. An approach for modelling concrete spalling in finite strains [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 80(8): 1694-1712.

[7] KIM J, LEE G P, MOON D Y. Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test [J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 182-191.

[8] 张晓栋, 马如进, 陈艾荣. 车致火灾作用下预应力混凝土 T 梁易损性计算方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 12-19.

ZHANG X D, MA R J, CHEN A R. Vulnerability calculation method of prestressed concrete T-shaped girder exposed to vehicles-related fires [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(6): 12-19. (in Chinese)

[9] 郑学松. 桥面火灾对大跨径预应力混凝土箱梁桥力学性能影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.

ZHENG X S. Influence of fire of bridge deck on the mechanical properties of long-span prestressed concrete box girder bridge [D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese)

[10] 郑文忠, 吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 44-58.

ZHENG W Z, LV X Y. Literature review of reactive powder concrete [J]. Journal of Building Structures,

- 2015, 36(10): 44-58. (in Chinese)
- [11] 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG E30-2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Test methods of cement and concrete for highway engineering: JTG E30-2005 [S]. Beijing: China Communication Press, 2005. (in Chinese)
- [12] 杨兆民, 李乃平. 小直径芯样在检验结构砼抗压强度中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2002, 34(4): 407-409.
YANG Z M, LI N P. Application of small diameter core sample to the compressive strength identification of concrete structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2002, 34 (4): 407-409. (in Chinese)
- [13] 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [14] 预应力混凝土用钢材试验方法: GB/T 21839—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Steel for prestressed concrete test methods: GB/T 21839-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [15] 丁勇, 章伟, 萧寒, 等. 预应力混凝土梁板在桥下空间火灾时的温度场与预应力筋松弛研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(Sup1): 42-47.
DING Y, ZHANG W, XIAO H, et al. Study on the temperature field of prestressed concrete beam-plate in underbridge fire hazard and the prestress loss of tendon [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup1): 42-47. (in Chinese)
- [16] 郑文忠, 许名鑫, 王英. 钢筋混凝土及预应力混凝土材料抗火性能[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002(4): 6-10.
ZHENG W Z, XU M X, WANG Y. Fire resistance behavior of reinforced concrete and prestressed concrete materials [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002 (4): 6-10. (in Chinese)
- [17] 侯晓萌. 预应力混凝土梁板抗火性能与抗火设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
HOU X M. Research on fire resistance and fire safety design method of prestressed concrete beam and slab [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)

(编辑 胡玲)