

文章编号: 1000-4750(2016)08-0058-08

火灾环境下钢-混凝土组合梁力学性能试验研究

姚伟发, 黄 侨, 张娟秀

(东南大学交通学院桥梁工程系, 江苏, 南京 210096)

摘 要: 该文为研究组合梁桥在火灾环境下的基本力学性能与特征, 制作具有代表性的3根缩尺梁模型: 简支T形梁、简支箱形梁及连续箱形梁, 利用火灾试验炉进行局部三面受火试验, 并给出详细的试验方法。在试验过程中, 分别观察组合梁常温下及火灾高温后的结构行为, 量测火灾高温下组合梁的温度场, 分析了结构的变形特点。通过对试验数据的深入分析与研究, 可以发现火灾下钢-混凝土组合梁中钢梁为主要升温构件, 且升温速度快, 温度分布不均匀; 混凝土顶板具有一定的吸热作用, 但不应忽略其对钢梁升温及温度分布的影响; 从实测变形看, 钢-混凝土组合连续梁体系的抗火性能要优于简支梁体系。研究成果可以为组合梁桥防火设计与分析提供试验依据与理论参考。

关键词: 桥梁; 火灾; 钢-混凝土组合梁; 力学性能; 试验

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.1000

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PERFORMANCE OF STEEL-CONCRETE GIRDERS UNDER FIRE LOADING

YAO Wei-fa, HUANG Qiao, ZHANG Juan-xiu

(Department of Bridge Engineering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The mechanical performance of steel-concrete girder structure under fire loading was investigated in the present study. Three typical scale models: a simply supported T-shape girder, a simply supported box girder and a continuous box girder, were manufactured. Fire loading was then applied on three sides of the girders in a fire experimental oven. The behavior of the these girders under normal condition and fire loading was observed. The thermal distribution and structural deformation of the three girders were also measured. Results show that thermal energy mainly concentrates in the steel girder in the composite structure, and the temperature rises fast in a non-homogeneous pattern. Concrete slabs absorb the heat energy to a certain extent, and their influence on temperature rising and thermal distribution of steel girders cannot be neglected. From deformation measurement, it is seen that continuous steel-concrete girders have a better anti-fire performance than simply-supported girders. Outcomes from the current study are expected to provide experimental guidance and theoretical reference for anti-fire design and analysis of steel-concrete girders.

Key words: bridges; fire; steel-concrete girder; mechanical performance; experiments

桥梁火灾事故通常缘于桥梁附近车辆发生碰撞及汽油的燃烧。由这类汽油燃烧引发的火灾, 较之

建筑火灾更严重, 其主要特征是燃烧速度快且能在短短数分钟产生很高的燃烧温度。在一些桥梁火灾

收稿日期: 2014-11-27; 修改日期: 2016-06-03

基金项目: 交通运输部西部建设科技项目(2011318812970)

通讯作者: 姚伟发(1973—), 男, 湖南人, 讲师, 博士, 从事桥梁防灾减灾研究(E-mail: ywfzjx@163.com).

作者简介: 黄 侨(1958—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 博导, 从事桥梁组合结构设计理论以及钢结构桥梁研究(E-mail: quanguhit@126.com);

张娟秀(1973—), 女, 江苏人, 讲师, 博士, 从事桥梁耐久性研究(E-mail: lzjx@163.com).

事故案例中,如此高强度的火灾往往给桥梁结构或构件带来非常严重的危害甚至导致桥梁倒塌^[1-3]。

不仅我国,包括发达国家在内的世界各国的工程设计规范中均未包含桥梁防火的设计条款,关于火灾的设计条款规定主要针对建筑设计的需要。随着桥梁火灾事故的不断发生,开展桥梁防火课题的研究显得日益重要。

由于钢-混凝土组合梁桥具有良好的静、动力性能和疲劳性能^[4],在我国的桥梁建设中,尤其是跨线桥中得到了广泛地使用。较之普通混凝土桥梁,由于钢材的防火性能差^[5],在火灾高温作用下,钢-混凝土组合桥梁将更易受到损坏或坍塌破坏^[6]。

本文为研究火灾高温下钢-混凝土组合梁桥的基本力学性能与特征,制作了3根缩尺试验梁模型进行局部受火试验,试验梁包括简支T形梁、简支箱形梁及连续箱形梁。在试验中,分别测量了火灾高温下试验梁的温度场分布及试验梁的变形,并依试验数据对梁的温度场分布及变形特征进行深入地分析与对比,得出了一些有益的结论,其研究成果可为组合梁桥防火设计提供基础性试验数据与参考。

1 桥梁火灾

桥梁火灾通常为油类所引发的火灾。当撒落在地面上的可燃液体一旦被点燃,火灾就形成了,可被称为烃类火灾或液池火灾^[1,7]。其特征为燃烧速率快、短时间内达到很高的燃烧温度。由于桥跨内火灾处于相对开放的环境里,氧气充分,火灾升至最高温度的时间较室内火灾快。

桥梁火灾的发生形式一般包括桥面失火及桥下失火两种情况。对于钢-混凝土组合桥梁,桥下失火将导致钢主梁直接受火,考虑现有桥梁未做钢梁防火设计,此种失火为该类桥梁的最不利火灾方式。同时,桥梁发生火灾时,整孔或多孔桥跨结构同时全部处于火灾(荷载)作用下的情况鲜有发生,一般为桥梁部分构件或构件的局部位置直接受到火灾高温的作用,桥梁火灾具有局部性。为使研究不失一般性,可设定桥梁局部受火来研究火灾高温下桥梁的防火性能。

在开放空间中,桥梁火灾类型较多且差别较大,现有的设计规范没有包括关于桥梁火灾作用的条款,因此,不同的研究人员或相关从业者根据他们所研究的实际案例采用不同的途径去进行相关

的研究^[1]。

本文在研究钢-混凝土梁桥时,采取类似于简支梁桥(T形梁及箱形梁)上部主梁设计的方法,选取简支梁桥中作用(火灾高温)最不利的梁(构件)为研究对象,且假定火灾下主梁受火区域对称分布于跨中,此时火灾高温对桥梁抗火是最不利的。

2 试验准备

2.1 试验梁设计

根据试验目的,制作了3根试验梁,分别标记为SL1、SL2及SL3。考虑试验用火灾试验炉尺寸条件,以某实际工程设计的简支钢-混凝土组合梁,按1:3的比例拟定简支T形试验梁SL1截面尺寸;按与相同跨径简支梁最不利跨中控制截面抗弯承载力相近的原则,拟定简支箱梁SL2截面尺寸;为分析简支和连续结构火灾高温下防火性能的异同,试验梁SL3采用与试验梁SL2相同的箱形截面形式与尺寸。

试验梁的详细设计参数见表1。试验梁用钢板采用Q235钢材,钢板厚度均为5mm。委托钢结构施工单位按施工图加工制作钢梁,在试验室人工拌制混凝土,浇筑组合梁混凝土板并养护至规定时间。

表1 试验梁设计参数

Table 1 Design parameters of specimen

| 参数 | 梁号 | | |
|----------|-----|-----|---------|
| | SL1 | SL2 | SL3 |
| 结构体系 | 简支 | 简支 | 连续 |
| 截面型式 | T形 | 箱形 | 箱形 |
| 跨径/m | 3.4 | 3.4 | 2.0+2.4 |
| 钢梁高/mm | 280 | 200 | 200 |
| 钢梁底板/mm | 160 | 320 | 320 |
| 钢梁腹板/mm | 275 | 195 | 195 |
| 钢梁翼板/mm | 160 | 75 | 75 |
| 钢筋直径/mm | 8 | 8 | 8 |
| 混凝土板宽/mm | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| 混凝土板厚度/m | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 混凝土强度等级 | C30 | C30 | C30 |

2.2 试验设备

本试验在东南大学火灾试验室的水平火灾试验炉^[8]上进行,试验需测定的参数主要包括温度、变形及静力荷载,相应的设备有温度与变形量测仪器及静力荷载施加设备。

1) 火灾试验炉

以天然气为燃料的试验炉炉体的空间尺寸为长4.0m、宽3.0m、高1.5m,炉体尺寸可满足最

大受火尺寸为 4 m×0.4 m×0.4 m(长×宽×高)单跨梁(顶面不受火)的火灾试验。

由表 1 试验梁的设计参数可知, 试验炉的尺寸可满足试验梁 SL1 及试验梁 SL2 火灾试验的需要。

为满足跨径为 2.0 m+2.4 m 连续箱形试验梁 SL3 单跨受火的试验需要, 可在试验炉内用分隔墙将炉体分隔成可单独使用也可同时使用的两部分炉体。

2) 温度测试

采用 K 型热电偶进行测量。热电偶的测温范围为 0~1300℃, 基本误差限为±0.75%*t* (*t* 为实测温度)。

3) 变形测试

采用拉线式位移传感器测量。传感器测量位移的有效范围为 0~500 mm, 测量精度为满量程的 0.1%。

4) 加载装置

采用水平试验炉炉顶垂直加载系统进行加载。加载系统由反力装置、千斤顶、液压系统及加载控制器组成, 可提供 500 kN 竖向荷载。其中, 反力装置由炉顶四周的钢梁与其上部可自由移动的 4 个反力架构成, 共同形成自平衡体系。

位移、温度均由采集系统自动采集, 每隔 20 s~60 s 采集一次, 数据自动输入火灾控制室电脑系统。

3 试验方案^[9-13]

3.1 受火场景

1) 隔热措施

为实现试验梁局部受火的试验工况, 3 根试验梁在受火时, 均采用耐火隔热棉对未受火梁段进行包裹隔热, 见图 1。在包裹梁段选取测试截面布置一定数量的温度测点, 以测点实测温度值验证隔热棉的隔热效果。

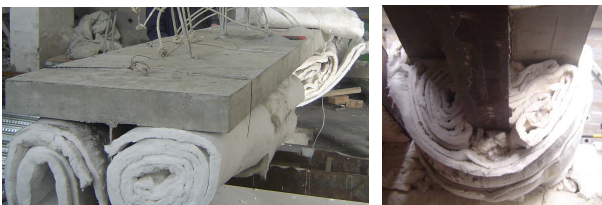


图 1 试验梁的隔热措施

Fig.1 Thermal shield design of test beams

2) SL1 梁

设定试验梁“三面”受火(混凝土板顶面、侧面不受火), 跨中长 1.4 m 梁段为受火区域。结构支座

采用滚动简支构造, 试验梁的受火场景见图 1。

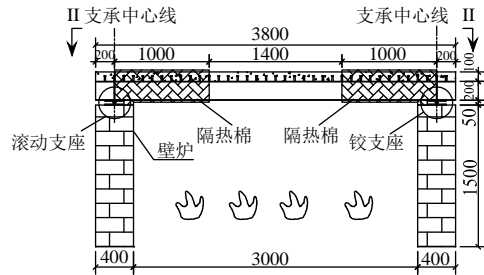


图 2 试验梁 SL1 的火灾场景图式 /mm

Fig.2 The fire scene schema of SL1 test beam

3) SL2 梁

SL2 梁为简支箱形钢-混凝土组合梁, 跨径同于 SL1 梁, 采用与试验梁 SL1 相同的受火场景, 见图 2。

4) SL3 梁

SL3 梁为连续箱形钢-混凝土组合梁, 试验梁单跨受火, 设定中支点负弯矩区长约 1/3 跨(0.9 m)梁段“三面”受火, 受火场景见图 3。

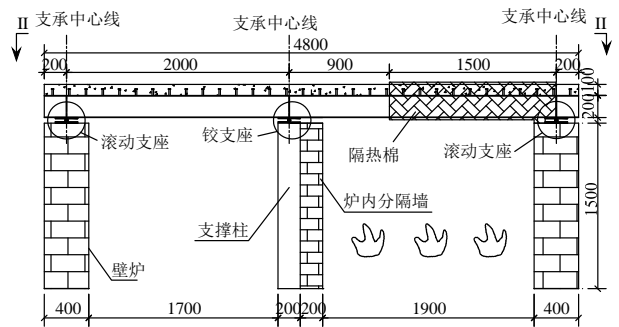


图 3 试验梁 SL3 的火灾场景图式 /mm

Fig.3 The fire scene schema of SL3 test beam

3.2 温度测点布置

1) SL1 梁

试验梁上设置 3 个温度场测试截面, 见图 4。试验梁的跨中截面为温度场主测试截面(I-I 截面), 共布置 7 个测点。混凝土板内埋设 4 个测点, 编号为 D1~D4, 沿钢梁高度方向布设 3 个编号为 F1~F4 的温度测点(图 4)。

图 4 中的 II-II 截面为受火梁段温度场测试截面, 距温度场主测试截面 0.5 m, 在截面上与温度场主测试截面相同位置处布设混凝土板测点(D1'~D4')及钢梁测点(F1'~F3'), 以该截面温度场的测试来确保主温度场测试截面数据的准确性。

在未受火梁段设置一温度场测试截面(III-III 截面), 分别布置 2 个混凝土板温度测点(D1''、D4'')及 2 个钢梁温度测点(F1''、F3'')。

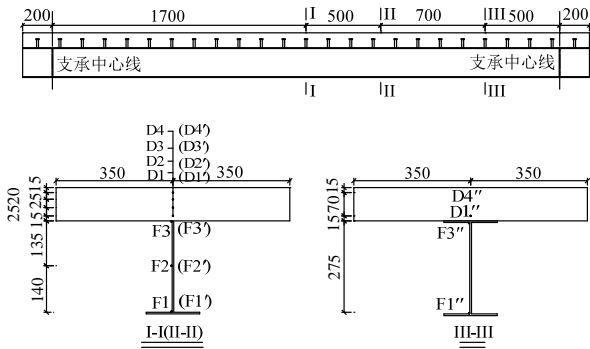


图4 SL1 梁温度测点布置及编号 /mm

Fig.4 Temperature measuring arrangement and numbers in SL1 beam

2) SL2 梁

SL2 梁的温度场测试截面的选取同于 SL1 梁, 见图 4。温度场测试截面的测点具体位置见图 5。

温度场主测试截面(I-I 截面)布置 10 个测点, 钢腹板内侧布置的 3 个测点编号为 F1-1~F3-1, 钢腹板外侧 3 个测点编号为 F1-2~F3-2, 混凝土板内埋设的 4 个测点编号为 D1~D4。

距温度场主测试截面 0.5 m 处温度场测试截面(II-II 截面, 图 4)在与主测试截面相同高度处的钢腹板内侧布置 F1'~F3'三个测点, D1'~D4'为混凝土板内埋设的 4 个测点。

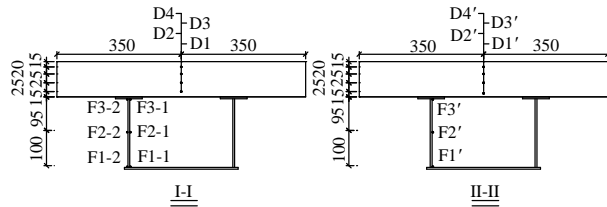


图5 SL2 梁温度测点布置及编号 /mm

Fig.5 Temperature measuring arrangement and numbers in SL2 beam

3) SL3 梁

SL3 梁的温度场测试截面立面布置见图 6, 其温度场测试截面温度测点的布置同于 SL2 梁, 见图 5。

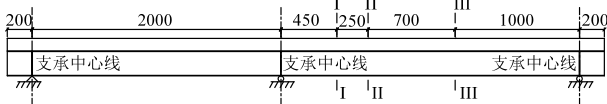


图6 SL3 梁温度测点立面布置 /mm

Fig.6 The temperature measuring of SL3 beam in elevation

3.3 变形测点及静力加载位置

1) SL1 梁

在梁跨中、1/4(3/4)跨处布置变形测点。集中力 P1、P2 加载位置设在距跨中 0.25 m 处。变形测点及静力加载位置见图 7。

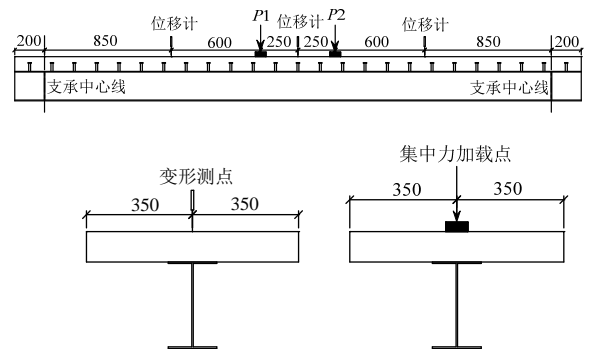


图7 SL1 梁变形测点及静力加载位置 /mm

Fig.7 Deformation measuring points and static loading position in SL1 beam

2) SL2 梁

变形测点及静力加载位置同于 SL1 梁, 见图 7。

3) SCB3 梁

变形测点及加载位置见图 8, 图中 P1、P2 为集中力。

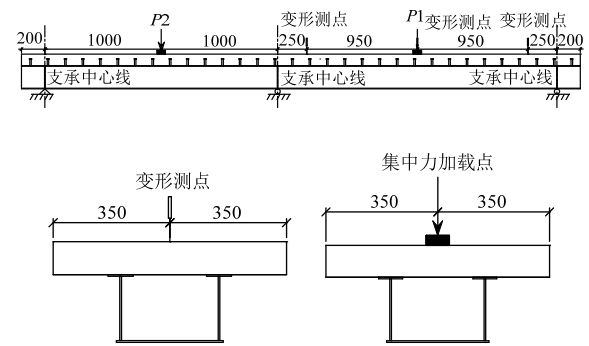


图8 SL3 梁变形测点及静力加载位置 /mm

Fig.8 Deformation measuring points and static loading position in SL3 beam

3.4 试验荷载

1) 升温曲线

桥梁火灾具有多样性、开放性、多因素影响性等特点, 使得确定设计用桥梁火灾温度-时间曲线变得非常复杂。对于不同形式的桥梁火灾, 可先建立起适用的桥梁火灾物理模型, 确定适用于桥梁火灾各工况燃烧热源的尺寸和单位面积释放率, 通过采用火灾动力学模拟软件 FDS、FLUENT 等进行计算机模拟, 得出空间温度场随高度及宽度变化的规律, 从而模拟出整个大气空间的温度场分布。

本试验火灾试验炉炉内温度按国际标准化组织制定的 ISO834 标准升温曲线来控制。相较于室内火灾, 尽管桥梁的火灾具有本文第 1 节所述特点, 但在室内试验时, 采用上述标准升温曲线来模拟桥梁火灾仍极具参考价值。

2) 静力荷载

为模拟火灾高温下的桥梁受力状态,对试验梁在受火时进行恒定静力加载,即采用恒载升温^[10-12](升温期间作用于梁上荷载不变)。

本试验加载水平控制在按照塑性方法计算的构件极限承载力的40%以下(含构件自重),以模拟桥梁的恒载及部分活载作用水平。常温下分级加载(每次以试验最大荷载的20%等差递增)至试验荷载。静力荷载取值见表2。

表2 静力荷载值 /kN
Table 2 Static load values

| 梁号 | 荷载 | |
|-----|----|----|
| | P1 | P2 |
| SL1 | 35 | 35 |
| SL2 | 40 | 40 |
| SL3 | 60 | 70 |

3.5 试验方法

1) 炉温控制

火灾试验炉设置有数个分区,每区都布置有控温热电偶。热电偶把采集的炉温传输给控制室,经计算机运算并与设定值进行比较后,依实测温度与目标温度的偏离情况,由计算机发出指令给燃烧控制系统,自动调节炉温大小。

图9给出了各试验梁试验时炉温实测情况。开始升温期间,炉温与标准升温曲线^[13]相差较大,但历时较短。此后,炉温与标准升温曲线吻合较好。

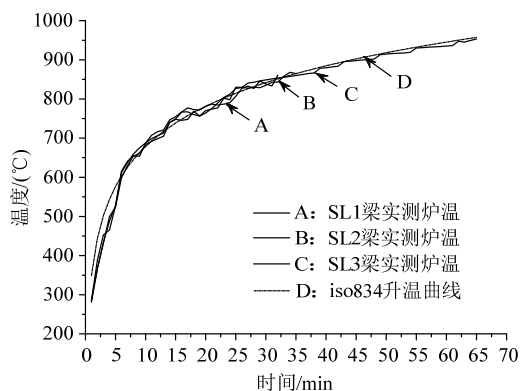


图9 实测试验炉炉温

Fig.9 The measured values of test furnace

2) 试验方法

在点火试验前,用千斤顶对各试验梁加载至试验荷载。待加载稳定后,肉眼检查各试验梁外观,未见可见裂缝,试验梁亦未见其他异常情况。开始点火试验前,再次确认测试仪器正常工作后,正式点火试验。

4 试验现象与数据分析

4.1 SL1 梁试验结果

1) 试验现象

SL1 梁试验受火时间为32 min。初期随着温度升高,混凝土板内残余水分不断蒸发,混凝土表面产生大量水汽,且呈润湿状态。随受火时间的增长,试验梁跨中变形增速加大,所加静力荷载数值下降速率较快,需持续加载才能保持加载稳定。受火至32 min,试验梁跨中变形达13.3 cm,超过该梁跨径的1/30。卸载降温后,试验梁跨中变形减小,常温下测得剩余挠度为8.8 cm。整个火灾试验过程中,试验梁混凝土板未见明显裂缝。

2) 温度数据分析

图10给出了SL1梁在不同的受火时间实测温度沿梁高方向的分布。图中可以看出,不同受火时刻的沿梁高方向温度分布曲线基本相似;混凝土板温度分布最大的特点是温度梯度较大,靠近钢腹板的测点即顶板测点D1温度最高,受火30 min后升温至360°C,而相同的受火时间,测点D4升温不到60°C;板内测点的位置距钢腹板距离越小,其温度越大,反之亦然。进一步分析可知,混凝土板中间厚度处的测点温度与板的最高及最低温度均值接近,若假定混凝土板温度均匀分布,则可取平均温度做其温度计算值。

从图10也可以看出,相同的受火时间内,SL1梁钢梁的温升速率较混凝土板迅速,受火10 min后,钢梁温度远高于混凝土板温度。钢梁测点F1及测点F2温度差小,钢梁温度分布较均匀,温度梯度小。由于受到混凝土板的影响,靠近混凝土板的测点F3温度较钢梁其他两测点低100°C左右。因此,不应忽略混凝土对钢梁升温及温度场分布的影响。

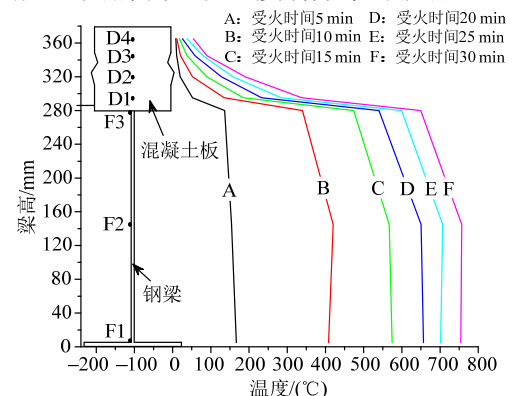


图10 SL1 梁实测温度沿梁高方向分布

Fig.10 The measured values of temperature along the high direction of SL1 beam

不同受火时间的温度分布曲线表明，桥下失火时，火灾对组合梁钢梁的影响远大于混凝土顶板，钢梁抗火性能是影响钢-混凝土组合梁抗火性能的主要因素。

采用耐火隔热棉进行包裹隔热的未受火梁段测点实测温度情况见图 11。从图 11 可以看出，测点在梁全程受火时段内温度升高缓慢，其实测值未超过 40℃，表明对未受火部位进行包裹隔热是可行的、有效的，达到了模拟试验梁局部受火的目的。

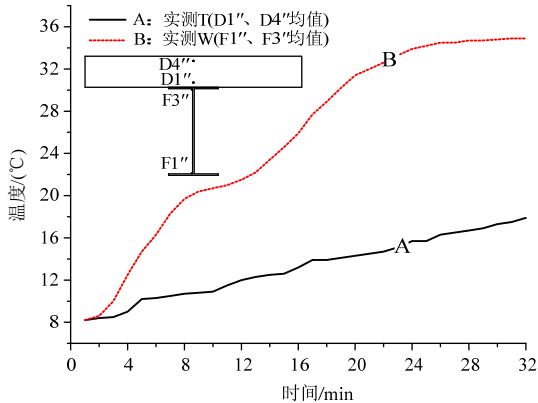


图 11 SL1 梁未受火梁段温度测点实测值

Fig.11 The measured values of temperature in unfired section of SL1 beam

3) 变形数据分析

试验梁在受火升温过程中的变形由两部分构成：静力荷载变形及温度作用变形。温度作用变形主要由梁高度方向的温度梯度引起。

变形测点的挠度实测值的变化如图 12 所示，其中负值表示变形向下。由图可知，跨中挠度从开始受火到挠度达到限值的过程总历时 32 min。初始升温的数分钟内，挠度变化很小，随着钢梁的快速升温，试验梁变形速率增大，导致梁在较短的时间内达到了挠度限值。可以知道，简支钢-混凝土组合梁桥的抗火性能主要由其变形所决定。

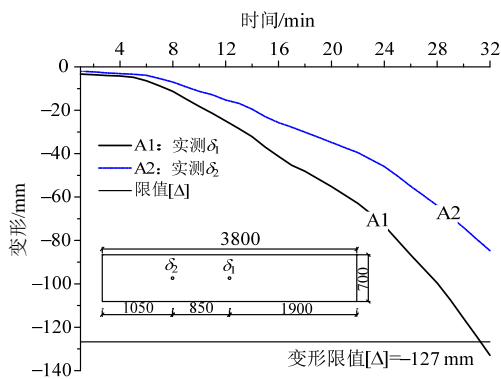


图 12 SL1 梁变形测点实测值

Fig.12 The measured values of deformation in SL1 beam

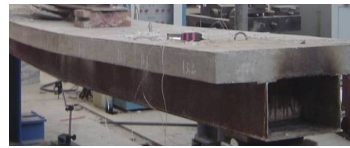
4.2 SL2 梁试验结果

1) 试验现象

SL2 梁试验现象基本与 SL1 梁相同(图 13)。受火至 34 min，SL2 梁跨中变形 12.7 cm，超过其跨度的 1/30。卸载降温后，梁跨中挠度减小，在常温下，测得其跨中残余变形为 7.1 cm。



(a) 混凝土表面水汽



(b) 跨中残余变形明显

图 13 SL2 梁试验现象

Fig.13 The experimental phenomena of SL2 team

2) 温度数据分析

图 14 给出了 SL2 梁在不同的受火时间实测温度沿着梁高方向的分布。图中看出，至试验梁受火试验结束，混凝土板温度较小，最大值未超过 170℃，与 SL1 梁相比，其值不足后者的一半，其温度梯度也较 SL1 梁小。

钢腹板温升规律及温度分布特点均与 SL1 梁钢梁相似。可以看出，两侧钢腹板之间的混凝土板受火灾影响较小，与 SL1 梁相似，箱形钢-混凝土组合梁的抗火性能同样由钢梁部分的抗火性能决定。

3) 变形数据分析

受火试验中，SL2 梁变形较 SL1 梁小，其变形趋势基本同于 SL1 梁，不再赘述，详见图 15。

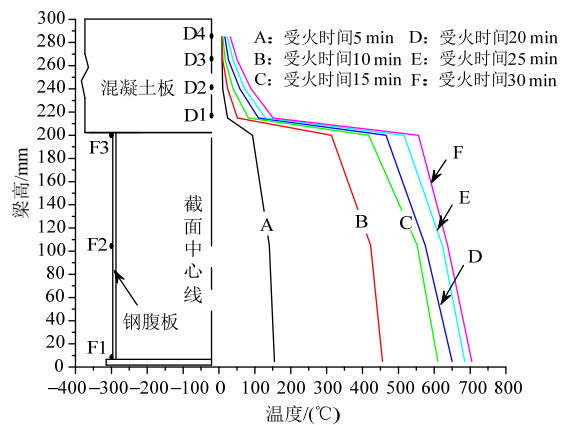


图 14 SL2 梁实测温度沿梁高方向分布

Fig.14 The measured values of temperature along the high direction of SL2 beam

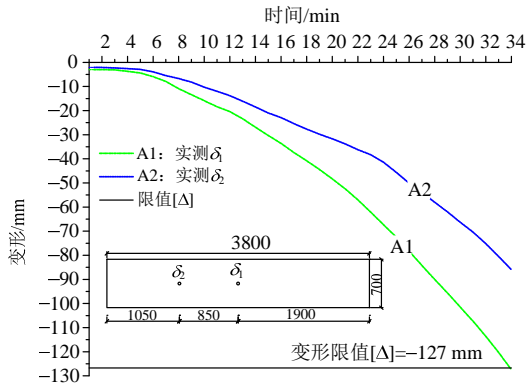


图 15 SL2 梁变形测点实测值

Fig.15 The measured values of deformation in SL2 beam

3.3 SL3 梁试验结果

1) 试验现象

与前两试验梁明显不同,连续梁体系的 SL3 梁点火升温至 10 min,中间支座负弯矩梁段箱梁顶板混凝土出现数条肉眼可见沿横向贯通的裂缝,裂缝宽度随梁受火时间的增长而增大,并在负弯矩区段其他位置有新的横向裂缝产生,混凝土裂缝处有明显的水渍。在数条裂缝中,墩顶横隔板处裂缝发展为主裂缝,其宽度增大的速度明显大于其他裂缝,并在裂缝处有较大的水汽冒出(图 16)。

梁受火时间至 45 min,主裂缝发展出其他裂缝,板顶混凝土被裂缝分成若干个块状体。梁受火 60 min,主裂缝宽度已超 1 cm(图 17),箱梁混凝土板被主裂缝分成二部分,梁在中横隔板处形成明显的折线状。卸载降温后,受火腹板及底板钢板呈青色。中支点负弯矩区箱梁中横隔板附近的底板及腹板发生明显的屈曲,未受火梁段未见钢板屈曲(图 18)。



(a) 横向裂缝 (b) 主裂缝

图 16 SL3 梁负弯矩区梁段顶板混凝土裂缝

Fig.16 The cracks in top slab of box girder in SL3 beam

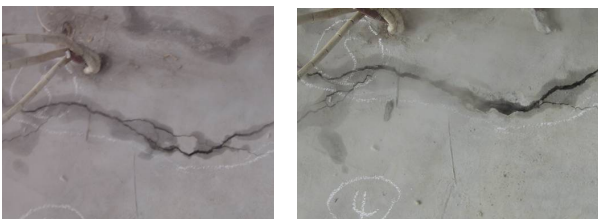


图 17 SL3 梁主裂缝的发展

Fig.17 The development of the main crack in SL3 beam



(a) 腹板屈曲 (b) 底板屈曲

图 18 SL3 连续梁中支点上缘受火时钢板局部屈曲

Fig18 Local buckling of top layer of steel plate in the middle position of SL3 beam

2) 温度数据分析

梁在整个受火过程中(总计 1 h),混凝土板最高温度未超过 280℃,较之钢腹板或底板均处于较低水平,试验梁受火 60 min,钢腹板最高温度已近 900℃,见图 19。火灾高温使得箱梁腹板钢板性能发生很大的变化,钢板的强度随温度的升高而较快地降低,导致构件的抗弯承载力降低。在静力荷载不变的情况下,负弯矩区段顶板混凝土裂缝开展的特征证实了这种情况。同时,负弯矩区段钢腹板及底板发生屈曲,进一步表明火灾高温下钢板的性能是影响组合梁抗火性能的主要因素。

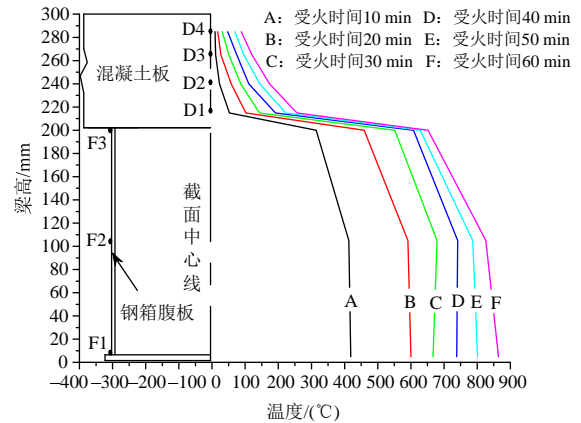


图 19 SL3 梁实测温度沿梁高方向分布

Fig19 The measured values of temperature along the high direction of SL3 beam

3) 变形数据分析

图 20 给出了 SL3 梁变形测点实测值。从图中看出,试验梁在接近失效状态之前,测点变形较平缓,受火梁段测点 δ_1 变形值小于未直接受火梁段的跨中测点 δ_2 变形。梁受火至 50 min, δ_1 测点变形速率迅速增大,其值远大于测点 δ_2 实测变形,且变得不甚稳定,此时试件基本进入失效状态。

此外,较之跨径相近、相同构造的 SL2 梁,同样试验条件下的 SL3 梁相同位置处的测点变形值很小,至试验结束时,SL3 试件变形测点 δ_2 实测最大变形值未超 2 cm。由此可知,连续梁的抗火性能要

优于相同条件的简支梁, SL3 梁在失效前的受火时段长于 SL2 梁较多的现象也给出了直观的证明。

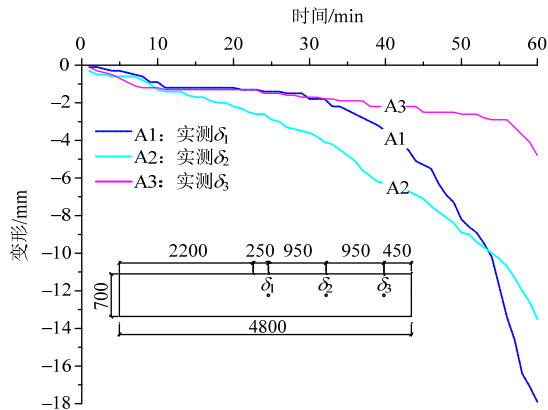


图 20 SL3 梁变形测点实测值

Fig.20 The measured values of deformation in SL3 beam

4 结论

本文针对火灾高温下钢-混凝土组合梁的结构行为进行了试验研究, 通过设计的测点获得了主要位置的温度和变形数据, 并对试验现象进行了详细地观察, 分析了组合梁火灾破坏的过程和机理。得到以下研究结论, 可为钢-混凝土组合桥梁的防火设计参考。

(1) 混凝土顶板具有一定的吸热作用, 不应忽略混凝土板对钢梁升温及温度场分布的影响。

(2) 桥下受火时, 组合梁中的混凝土板升温较慢, 而钢梁升温迅速, 在较短的时间内即能达到很高的温度, 梁温度分布表现出不均匀性。

(3) 连续梁桥下失火时, 短时间内中支点负弯矩区混凝土板将开裂, 并可能产生沿横桥向的贯通裂缝; 同样受火情形下, 简支组合梁桥变形大, 很快就会产生不适于继续承载的变形并进入失效状态。

(4) 在钢梁温度恢复常温后, 组合梁仍具有承载力, 但残余变形很大。从实测的火灾后变形来看, 钢-混凝土连续梁桥的防火性能要优于简支梁桥。

参考文献:

[1] Kodur V, Gu L, Garlock MEM. Review and assement of fire hazard in bridges [C]. Washington D C: Proceedings of the TRB Annual Meeting, 2010: 23-29.

[2] Garlock M E, Paya-Zaforteza I, Gu L, Kodur V. Fire hazard in bridges: review, assessment and repair strategies [J]. Engineering Structure, 2012, 35(1): 89-98.

[3] Neves I C, Branco F A., Valente J C. Effects of formwork fires in bridge construction [J]. Concrete International, 1997, 19(3): 41-46.

[4] 黄侨. 桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 7-10.
Huang Qiao. The design principle of steel-concrete composite bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 7-10. (in Chinese)

[5] 韩林海, 宋天诣, 谭清华. 钢-混凝土组合结构抗火设计原理研究[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊II): 54-66.
Han Linhai, Song Tianyi, Tan Qinghua. Fire resistance design of steel-concrete composite structures [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Suppl II): 54-66. (in Chinese)

[6] A Astaneh-Asl, Noble C R, Son J, Wemhoff A P, Thomas M P, McMichael L D. Fire protection of steel bridges and the case of the macarthur maze fire collapse [J]. Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, 2009(357): 1-12.

[7] Iqbal N, Salley MH, Weerakkody S. Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative fire hazard analysis methods for the US nuclear regulatory commission fire protection inspection program (NUREG-1805) [R]. Washington: GPO, 2004: 18-23.

[8] 徐明. 水平模拟火灾试验炉的研制[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(11): 49-51.
Xu Ming. Development of floor simulation test furnace [J]. Experimental Technology and Management, 2009, 26(11): 49-51. (in Chinese)

[9] 姚伟发, 黄侨, 张娟秀. 受火后钢-混凝土组合梁材料性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程(中文), 2015, 37(3): 1-10.
Yao Weifa, Huang Qiao, Zhang Juanxiu. Experimental analysis of the mechanical performance of steel-concrete girder under fire loading [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2015, 37(3): 1-10. (in Chinese)

[10] 吕俊利, 董毓利, 杨志年. 整体结构中两跨钢梁火灾变形性能的试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 110-114.
Lü Junli, Dong Yuli, Yang Zhinian. Experimental study on the deformation of a two-span steel beam in a structural system subjected to fire [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 110-114. (in Chinese)

[11] 董毓利. 两种组合钢框架火灾变形性能的试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 197-203, 208.
Dong Yuli. Deformation of 2-type of composite steel frames subjected to fire hazard [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 197-203, 208. (in Chinese)

[12] 李国强, 王银志, 崔大光. 约束组合梁抗火试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 177-183.
Li Guoqiang, Wang Yinzhi, Cui Daguang. Experimental investigation and theoretical analysis of restrained composite beam subjected to fire [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 177-183. (in Chinese)

[13] Franssen J M. A thermal/structural program for modeling structures under fire [J]. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc, 2005, 42(3): 143-158.