

文章编号:1671-8879(2018)06-0031-09

油罐车火灾致简支钢-混组合箱梁 抗弯承载力衰变机理

张 岗¹,宗如欢^{1,2},黄 侨³,姚伟发³,程华才⁴

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 宁夏公路勘察设计院有限责任公司,宁夏 银川 750011;

3. 东南大学 交通学院,江苏 南京 210096; 4. 安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司,安徽 合肥 230601)

摘 要:针对油罐车火灾导致的简支钢-混组合箱梁的极限破坏问题,选取某简支钢-混组合箱梁为研究对象,给出桥梁火灾与建筑火灾的区别及热-力耦合的火灾全过程数值计算方法和强度分区的等效计算方法,分析碳氢(HC)火灾下简支钢-混组合箱梁的截面温度分布特征,研究各构件强度衰变过程,揭示不同延火时间下正截面抗弯承载力的衰变机理,建立简支体系钢-混组合箱梁抗弯承载力与 HC 火灾的时程衰变阶段关系,通过截面抗弯承载力与荷载效应的对比得到简支钢-混组合箱梁在 HC 火灾下的破坏时间。研究表明:所提方法能够预测 HC 火灾下钢-混组合箱梁的温度响应和结构响应;截面测点温度平均值受各构件厚度的影响;有横隔板的断面温度峰值低于无横隔板的断面;HC 火灾下简支钢-混组合箱梁跨中截面抗弯承载力随延火时间呈四阶段下降;前 8 min 内跨中截面抗弯承载力保持初始状态,8~16 min 跨中截面抗弯承载力衰变率增大,16~48 min 截面中性轴特征逐渐发生改变,48 min 后结构破坏;简支钢-混组合箱梁在 HC 火灾下的灭火时间应该控制在 8 min 之内;拟合建立的 HC 火灾下简支钢-混组合箱梁正截面抗弯承载力时程衰变四阶段计算公式,进一步明确了油罐车火灾下其抗弯承载力的衰变机理,该公式简单实用,可为桥梁抗火设计及智能评估提供依据。

关键词:桥梁工程;钢-混组合箱梁;有限元;抗弯承载力;火灾;衰变机理

中图分类号:U448.213 **文献标志码:**A

Degradation mechanism of simply supported steel-concrete composite box girder under tanker fire condition

ZHANG Gang¹, ZONG Ru-huan^{1,2}, HUANG Qiao³, YAO Wei-fa³, CHENG Hua-cai⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Ningxia Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Yinchuan 750011, Ningxia, China; 3. School of Transportation,

Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 4. Anhui Highway Test and Research Center Co. Ltd., Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: Aimed at ultimate failure of simply supported steel-concrete composite box girder

收稿日期:2018-07-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51878057,51308056);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM5018);

国家留学基金项目(201406565013);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821172003);

广东省交通运输厅科技项目(科技-2016-02-016);安徽交控集团科技项目(JKKJ-2018-14)

作者简介:张 岗(1980-),男,甘肃庆阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhangg_2004@126.com。

caused by the oil tanker fire, the difference between bridge fire and building fire was given, the numerical calculation method of the whole fire process of thermo-mechanical coupled and the equivalent calculation method of strength division was provided, according to the fire resistance of simply supported steel-concrete composite box girders. The temperature distributed within the girder section under HC fire was analyzed, and the degradation process of the strength in each component was studied. Further, the time-dependent variation relationship between the cross-sectional flexural capacity and fire exposure time of a simply supported steel-concrete composite box girder was analyzed. A formula predicting the flexural capacity with time of HC fire was derived. The failure time of a composite box bridge girder under a HC fire condition was obtained by comparing the flexural capacity and load effect. The results show that the provided method can predict the temperature and structural responses of a composite box bridge girder under HC fire conditions. The average temperature can be highly influenced by the thickness of each component. The peak temperature in the girder section without a transverse diaphragm is higher than that in girder section with a transverse diaphragm. The flexural capacity of the mid-span section of simply supported steel and concrete composite box girder can be grouped into four stages with HC fire. The flexural capacity remains in the initial state for up to 8 min, the rate of degradation becomes larger between 8 to 16 min, the neutral axis feature of section changed from 16 to 48 min, then it steps into faster degradation and fails after 48 min. The extinguishing time is suggested to be limited to 8 min. The time-dependent decay formula proposed to solve the flexural capacity of the cross section of a simply supported steel-concrete composite box girder is simple, The decay mechanism of the flexural capacity of simply supported steel-concrete composite box girder is further clarified, and it can provide data to guide fire resistance design and intelligent assessment after fires. 2 tabs, 11 figs, 27 refs.

Key words: bridge engineering; steel-concrete composite box girder; FEM; flexural capacity; fire; degradation mechanism

0 引言

钢-混凝土组合桥梁(简称钢-混组合梁)以其优良的性能占据桥梁建设市场。然而,钢-混组合梁的抗灾性能,尤其抗火性能引起研究者重点关注。一旦遭遇油罐车火灾,1 h之内必然垮塌^[1-4],垮塌时间最短为16 min。因此,油罐车火灾下钢-混组合桥梁的抗弯承载力是当前研究的焦点。

美国近十年的火灾下钢-混组合桥梁垮塌事故较多,美国学者对钢-混组合桥梁的抗火性能研究起步较早。Celauro等梳理了美国桥梁火灾发生的特征及原因^[4]。Kodur等根据桥梁的重要性及荷载等级提出了桥梁抗火设计的重要系数^[5]。Aziz等对I形钢板组合梁进行了大量的火灾试验,测试了其挠度随时间的变化和耐火性能,分析了多种参数影响下的I形钢-混组合梁的抗火性能,给出了影响其抗火性能的因素,提出了不同火灾下有保护和未保护钢构件截面温度梯度的预测方法,分析了影响钢-

混组合梁受火后腹板发生屈曲的关键因素^[6-9]。Glassman等分析了大量的钢桥火灾事故,通过试验研究了翼板的边界条件、截面温度变化及钢板与混凝土板间的连接方式等因素对钢-混组合梁腹板屈曲强度的影响,揭示了混凝土板影响组合结构抗剪性能的关键性^[10]。Zhou等对预应力组合梁的抗火试验进行研究,提出了预应力比参数的意义^[11]。

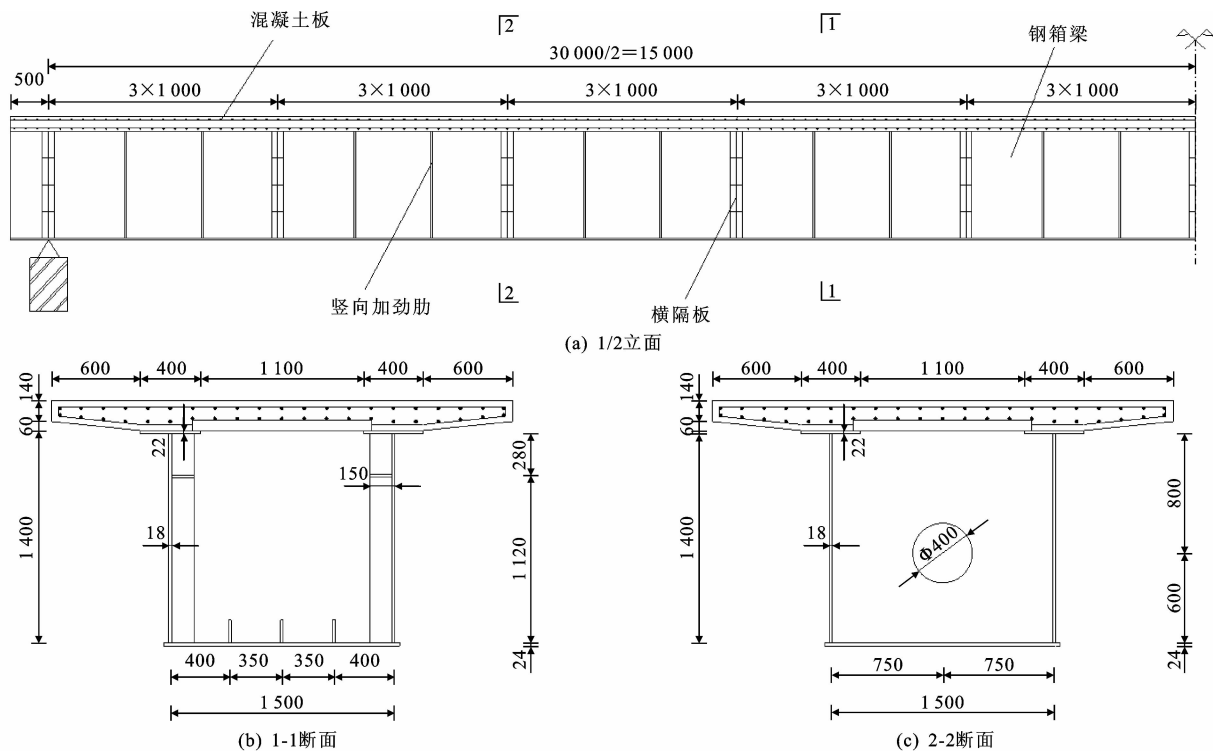
中国学者也对钢-混组合梁的高温力学性能展开了研究。李国强等通过2种不同压型钢板肋设计的组合梁抗火试验,揭示了火灾下组合梁的传热规律及热力耦合效应下的结构响应,获取了火灾后组合梁的破坏机理,并建议了耐火极限判定准则^[12]。韩林海等采用试验和仿真计算的方法对型钢和钢管混凝土构件、组合框架结构和节点进行了火灾全过程作用的分析,揭示了组合结构温度-荷载全过程的结构响应^[13]。陈玲珠等基于火灾温度及混凝土与钢的连接形式,分析了抗剪栓钉的受力破坏形式^[14-16]。张岗等研究了预应力混凝土梁的刚度退

化过程,揭示了其有效预应力衰变过程及标准火灾下钢-混组合箱梁的耐火行为^[17-21]。

综上所述,当前的研究主要集中在建筑用组合梁及预应力混凝土桥梁的耐火性能等,对剧烈的油罐车火灾下大跨径公路钢-混组合桥梁的抗弯承载能力衰变机理研究欠缺。为此,本文以公路用简支钢-混组合箱梁为研究对象,在相关研究基础上^[22-26]明确了桥梁火灾与建筑火灾的区别,给出了测点平均温度的综合计算方法,深入剖析了油罐车火灾下大跨径简支钢-混组合桥梁的抗弯承载能力衰变机理,细化了其衰变过程,建立了更为精确的抗弯承载能力衰变过程计算方法,可为公路钢结构桥梁的抗火实用设计方法的提出及灾后评估提供依据。

1 研究对象的选取

如图 1 所示,选取某简支体系钢-混组合箱梁为研究对象。钢箱部分高度为 1.6 m,钢筋混凝土顶板和翼缘板边缘的平均厚度分别为 0.2、0.14 m,混凝土顶板和翼缘板宽度分别为 3.1、0.6 m;钢筋的直径和间距分别为 0.12、1.5 m。钢箱梁底板宽度和翼板厚度分别为 1.5、0.22 m;钢筋选取 HPB300,钢箱腹板和底板厚度分别为 0.18、0.24 m;横隔板和竖向加劲肋的间距分别为 3、1 m,钢箱腹板及底板的加劲肋均设置成一字形;钢箱梁采用 Q345 钢材,混凝土强度等级采用 C50。表 1 为简支体系钢-混组合箱梁的结构参数。



单位: mm

图 1 简支梁示意

Fig.1 Sketch of simply supported beam

表 1 钢-混组合箱梁各构件参数

Tab.1 Structural member parameters of steel-concrete composite girder

参数	跨径/m	钢梁高/mm	钢梁底板/mm	钢梁腹板/mm	钢梁翼板/mm	横隔板厚度/mm	加劲肋/mm	钢筋直径/mm	顶板宽/m	砼板厚度/m
参数值	30	1 446	1 500×24	1 400×18	400×22	18	200×18	12	3.1	0.14~0.2

2 桥梁火灾与建筑火灾的区别

桥梁遭遇油罐车火灾的频率较高,其火源处于开放空间,具有燃烧充分、火势猛、持续时间长等特点。建筑火灾的温度相对桥梁火灾温度低很多。以往研究主要采用 ISO 834 标准火灾或与此相近的火灾场景,其特点是升温缓慢、峰值低,而油罐车火灾燃烧剧

烈,短时间内温度可达到甚至超过 1 100 °C,其升温过程与碳氢火灾(HC)升温曲线相似。图 3 给出了 HC 火灾曲线与 ISO 834 标准火灾曲线,可见 2 种曲线下的结构性能差异性较大^[21]。因桥梁的跨径一般较建筑用构件长,其遭遇的是局部火灾。图 3 为拟定的简支钢-混组合梁的受火位置与范围, X 为受火区间左端至桥梁支撑中心的距离, L' 为有效跨径, L 为受火长度。

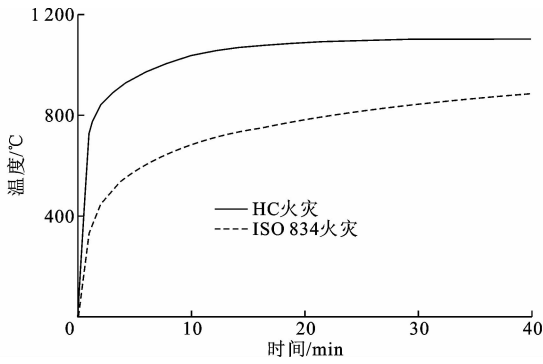


图2 升温曲线

Fig. 2 Temperature-rise curves

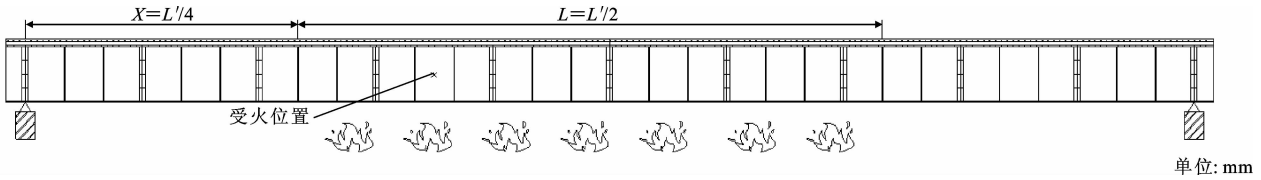


图3 受火位置

Fig. 3 Fire exposure locations of steel-concrete composite girder

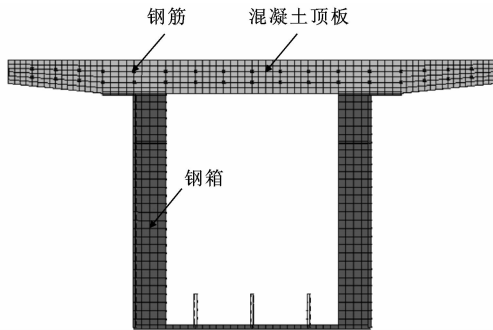


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

3.2 测点布置

图5(a)为钢-混组合箱梁横截面火灾模型及测点布置。在混凝土顶板中对称并均匀水平设置9个温度测点,在沿截面中心对称位置的钢翼缘板、钢腹板、钢底板及加劲肋中水平均匀布置3个温度测点,对各水平层的测点取其平均值。 T_c 、 T_f 、 T_w 、 T_b 、 T_s 分别对应其位置温度的平均值。 T_{c1} 、 T_{f1} 、 T_{w1} 、 T_{b1} 分别为混凝土桥面板、钢梁翼板、腹板、底板上布置的测点编号; T_{c1}' 、 T_{f1}' 、 T_{w1}' 、 T_{b1}' 分别为其关于截面对称测点编号。选取测点1~测点8测试混凝土板下、上层普通钢筋的温度。测点平均温度 T_{comp} 的综合计算式为

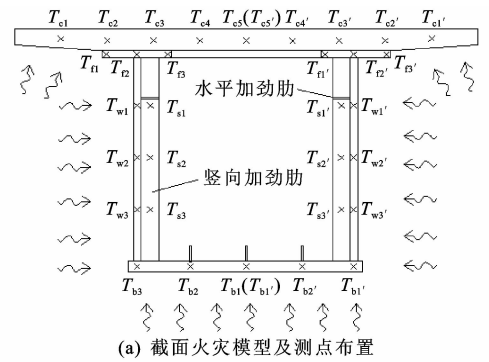
$$T_{comp} = \frac{1}{n} \sum_{I=1}^n T_{comp,I} \quad (1)$$

式中: $T_{comp,I}$ 分别为 T_c 、 T_f 、 T_w 、 T_b 、 T_s ; n 为测点个数。

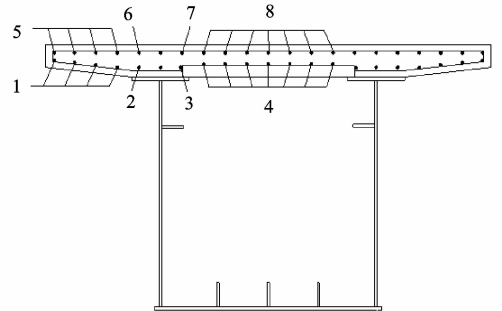
3 有限元分析方法

3.1 分析模型

采用大型空间通用有限元程序 ANSYS,对 HC 火灾作用下钢-混组合箱梁的温度与结构响应进行模拟分析。温度场计算中,混凝土单元采用 Solid70,钢箱单元采用 Shell57,钢筋单元采用 Link33;结构分析中,混凝土单元采用 Solid65,钢箱单元采用 Shell181,钢筋单元采用 Link8。温度场计算中考虑热对流及热辐射,有限元模型见图4。



(a) 截面火灾模型及测点布置



(b) 普通钢筋温度测点选取

图5 温度测点的选取

Fig. 5 Selection of temperature measurement points

4 试验验证

为验证本文热力耦合计算方法的正确性,对 Kodur 等^[27]进行的 3.66 m 跨径的钢混组合箱梁进行数值模拟,计算同类火灾场景下的温度响应和结构响应,若趋势一致,则说明本文的热力耦合计算过程可以准确预测火灾下简支钢混组合箱梁的温度与

结构响应,验证结果见图 6。

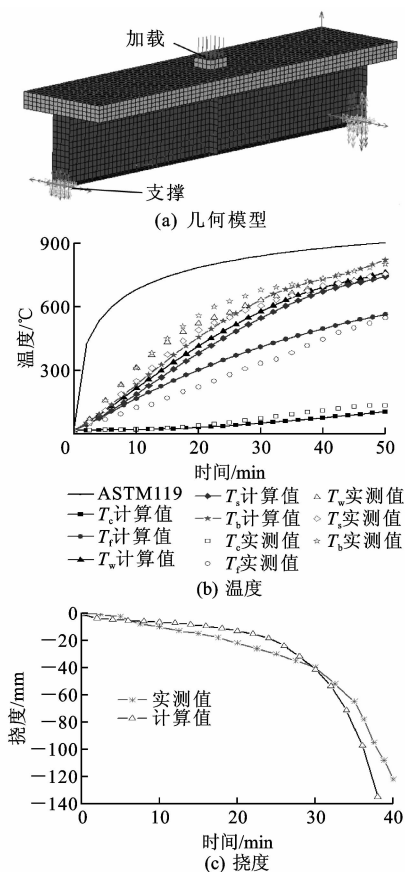


图 6 模型验证
Fig. 6 Model validation

5 温度响应

5.1 截面温度分布

图 7 为 HC 火灾下钢-混组合箱梁在延火 60 min 时的 1-1 断面及 2-2 断面温度场分布。由图 7 可知:延火 60 min 时,钢-混组合箱梁 1-1 断面的温度峰值近 1 100 °C; 2-2 断面的温度峰值近 1 000 °C,由于混凝土材料的热惰性和横隔板对外层腹板角点的吸热作用,导致 2-2 断面温度相对 1-1 断面温度较低。箱梁截面温度分布呈层状,随延火时间增加,由外至内其宽度递增,延火 60 min 时横隔板未受火区域的温度分布呈椭圆形。

5.2 截面温度时程

图 8 给出了钢-混组合箱梁混凝土顶板、钢翼缘板、钢腹板、钢底板及加劲肋受 HC 火灾作用时的各测点温度平均值的时程趋势。由图 8(a)可知:由于钢腹板较钢底板厚度小,钢腹板沿厚度方向温度平均值高于底板;钢翼缘板受到混凝土顶板的吸热作用,其温度低于底板;加劲肋受到外层钢腹板的保护,加劲肋的平均温度低于钢翼缘板;由于混凝土的热惰性和钢箱对混凝土顶板的热传导方式的改变,混凝土顶板的温度平均值最低。

由图 8(b)可知:随延火时间的增加,测点 1~测点 8 代表的钢筋平均温度呈增长趋势;延火

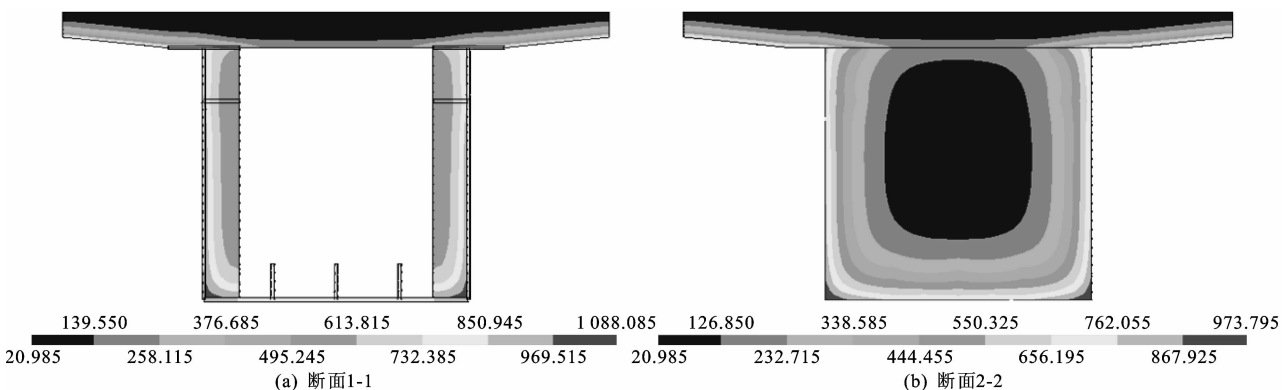


图 7 截面温度云图(60 min)

Fig. 7 Temperature distributions of different sections (60 min)

60 min,混凝土顶板下部迎火面的钢筋测点 1~测点 4 温度处于 216 °C~362 °C 之间,背火面的钢筋测点 5~测点 8 温度在 100 °C 以内,迎火面的钢筋温度较背火面的温度平均值高出 200 °C 左右。

6 抗弯承载性能衰变机理分析

6.1 强度分区衰减计算方法

图 9 为钢-混组合箱梁截面强度分区衰减计算

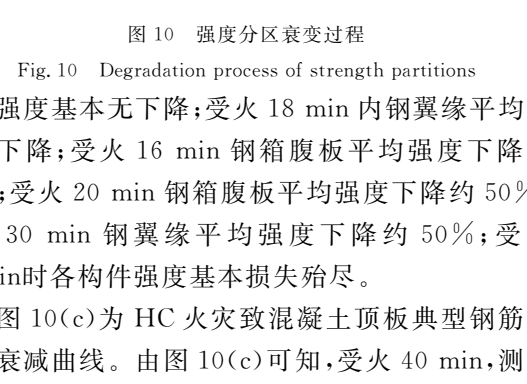
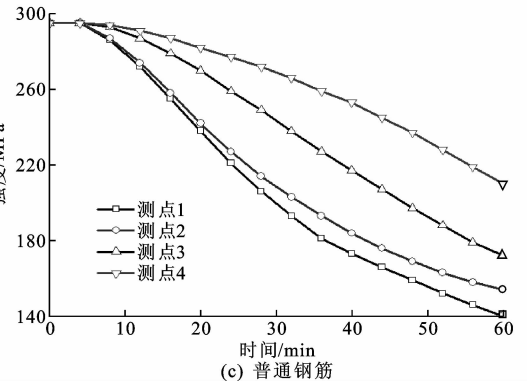
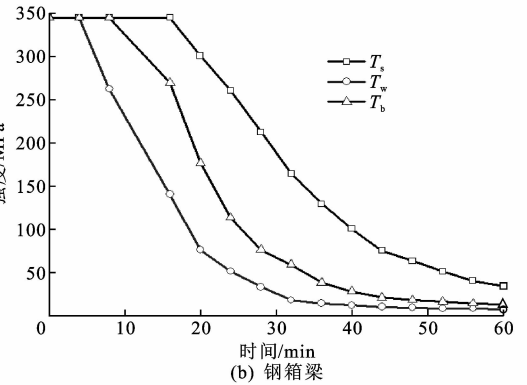
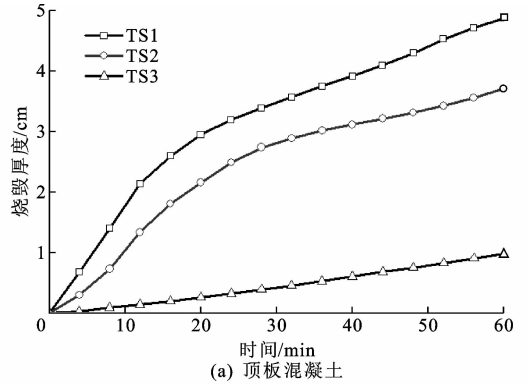
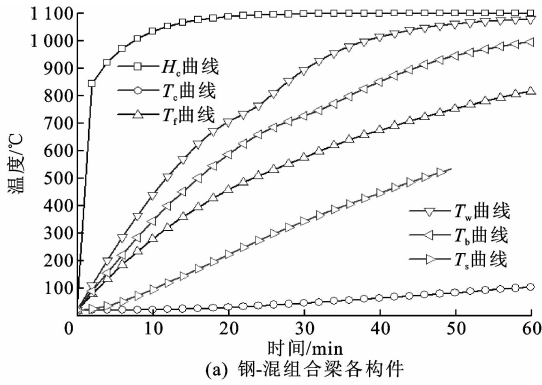
模型。由图 9 可知,在对称火灾作用下,为保持截面高度不变,将混凝土顶板按横向强度衰减共分为 3 个区,直接受火的混凝土翼缘板(TS1)、外侧钢翼缘板(TS2)和箱内顶板(TS3)。

强度分区衰减后的有效面积计算式为

$$A_t = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i}{\sigma_0} A_i t \quad (2)$$

式中: A_t 为延火 t 时刻的截面有效面积; N 为分区

单位: °C



(a) 钢-混组合梁各构件

(a) 顶板混凝土

(b) 普通钢筋

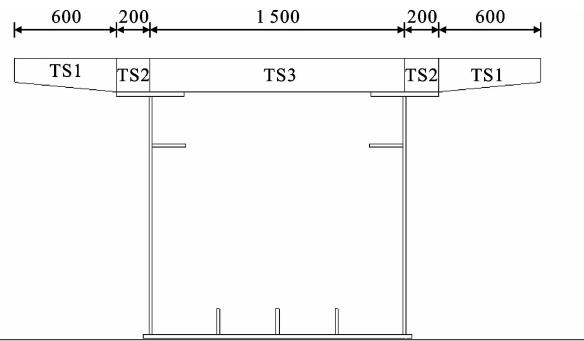
(b) 钢箱梁

(c) 普通钢筋

图 10 强度分区衰变过程

图 8 钢-混组合箱梁测点温度-时间曲线

Fig. 8 Time-temperature curves of steel-concrete composite girder of measurement points



单位: mm

图 9 强度分区衰减计算模型

Fig. 9 Calculation model of degradation strength partitions

总数; σ_t 为延火 t 时刻的材料强度; σ_0 为延火初始时刻的材料强度; A_i 为第 i 个分区截面面积。

图 10(a)为 HC 火灾致顶板混凝土的烧毁厚度时程变化曲线。由图 10(a)可知: TS1 区混凝土直接受火,延火 60 min 时,烧毁厚度达到 5 cm; TS2 区混凝土吸收钢翼缘的热量,未直接受火,延火 60 min 时烧毁厚度达到 4 cm; TS3 区混凝土位于钢箱内部,未直接受火,延火 60 min 时烧毁深度达到 1 cm。

图 10(b)为 HC 火灾致钢箱各构件强度的衰减曲线。由图 10(b)可知:受火 8 min 内,钢箱各构件

平均强度基本无下降;受火 18 min 内钢翼缘平均强度无下降;受火 16 min 钢箱腹板平均强度下降约 50%;受火 20 min 钢箱腹板平均强度下降约 50%;受火 30 min 钢翼缘平均强度下降约 50%;受火 60 min 时各构件强度基本损失殆尽。

图 10(c)为 HC 火灾致混凝土顶板典型钢筋强度的衰减曲线。由图 10(c)可知,受火 40 min,测点 1 处的普通钢筋的强度下降约 45%,测点 2 处的普通钢筋的强度下降约 40%,测点 3 处的普通钢筋的强度下降约 28%,测点 4 处的普通钢筋的强度下降约 16%。

6.2 抗弯承载力衰变分析

图 11 为 HC 火灾下简支钢-混组合箱梁跨中截面抗弯承载力的时程衰变曲线。由图 8、图 11

可知:钢-混组合箱梁在受火前 8 min 内平均温度低于 350 °C,钢材的力学特性变化微小,抗弯承载能力基本无变化;受火时间 8~16 min,钢腹板的平均温度超过 400 °C,强度开始下降,所以抗弯承载能力呈现大幅下降的趋势,受火 16 min 时抗弯承载力下降近 30%;受火时间 16~26 min,钢箱的平均温度超过 400 °C,抗弯承载能力继续保持大幅下降的趋势,由于中性轴逐渐上移至混凝土顶板,其下降速率逐渐减缓,受火 16 min 时抗弯承载力下降近 70%;受火 26 min 以后中性轴继续上移至混凝土顶板中间,钢箱内的混凝土未受火,钢筋参与受拉区力学作用,中性轴上下区域的材料特性发生明显变化,所以其下降速率相对比较平缓,逐渐接近结构临近破坏状态;受火 48 min 以后,结构因不能抵抗外荷载而破坏。因此,钢箱梁发生 HC 火灾时,最佳阻火时间应控制在 8 min 内,以防止钢箱梁力学性能发生明显衰变。

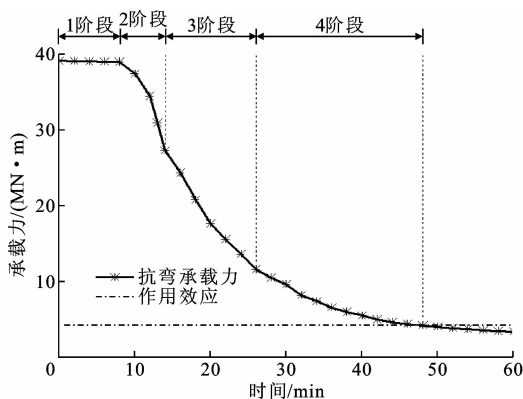


图 11 抗弯承载力时程衰变曲线

Fig. 11 Degradation curve of bearing capacity-time

7 四阶段衰变函数的建立

采用 OriginLab 对简支钢-混组合箱梁跨中截面抗弯承载力受 HC 火灾作用的时程衰变规律进行拟合。由图 11 可知,HC 火灾下简支体系钢-混组合箱梁跨中截面抗弯承载力退化曲线呈多阶段,故其拟合为四阶段函数。当延火时间 $t \leq 8$ min 时,采用一次函数拟合;当延火时间 $t > 8$ min,直至构件破坏时,采用二次抛物线进行简化拟合,四阶段函数的共用表达式为

$$M_{u,t} = at^2 + bt + c \quad (3)$$

式中: $M_{u,t}$ 为截面抗弯承载力(MN·m); a 、 b 、 c 为相关参数。

各分项系数如表 2 所示, R^2 为判定系数。

表 2 衰变系数

Tab. 2 Degradation coefficients

受火时间/min	a	b	c	R^2
[0,8]	0.00	-0.164	39.006	0.97
(8,16]	-0.113	0.746	40.616	0.95
(16,28]	0.054	-3.532	66.738	0.99
(28,60]	0.009	-0.997	31.007	0.99

8 结 语

(1)本文方法计算结果与试验测试结果一致,可用于预测钢-混组合箱梁的温度响应和结构响应。

(2)给出了截面测点平均温度的综合计算公式,截面测点温度平均值受各构件厚度的影响,各构件平均温度由高至低依次为钢腹板、钢底板、钢翼板、加劲肋及混凝土顶板;钢-混组合箱梁的钢板较混凝土板升温快,混凝土对钢箱翼缘板有吸热作用;横隔板对断面温度峰值有削减作用;混凝土顶板中的普通钢筋温度相对变化幅度小,在延火 60 min 内始终低于 100 °C。

(3)给出了钢-混组合箱梁截面的强度分区等效的实用简化计算方法,明确了 HC 火灾下其截面整体强度随延火时间衰变的过程,深入揭示了简支钢-混组合箱梁跨中正截面抗弯承载力的衰变机理。

(4)HC 火灾下简支钢-混组合箱梁跨中截面抗弯承载力随延火时间呈四阶段下降;前 8 min 内跨中截面抗弯承载力保持初始状态,8 min 后跨中截面抗弯承载力迅速下降,26 min 后中性轴上移,48 min 后结构彻底破坏;简支钢-混组合箱梁在 HC 火灾下的阻火时间应该控制在 8 min 之内。拟合的分段二次抛物线函数能够较好预测钢-混组合箱梁截面极限抗弯承载力随延火时间变化规律,也可反映钢-混组合梁截面中性轴的变化特征。

(5)建议对简支钢-混组合箱梁抗剪承载力进一步开展深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 王卫永,李国强. 钢-混凝土组合梁抗火性能研究综述[J]. 建筑钢结构进展,2014,16(5):1-8,28.
WANG Wei-yong, LI Guo-qiang. A state-of-the-art review on fire resistance of steel-concrete composite beams[J]. Progress in Steel Building Structures, 2014,16(5):1-8,28.
- [2] 李国强,许炎彬,USMANI A. 油罐车火灾下钢-混凝土组合梁桥结构响应研究[J]. 防灾减灾工程学报,

- 2016,36(3):444-452.
- LI Guo-qiang, XU Yan-bin, USMANI A. Study on structures responses of steel-concrete composite highway bridge under fuel tanker fire[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(3):444-452.
- [3] 《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, 27(5):1-96. Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's bridge engineering research; 2014 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(5):1-96.
- [4] CELAURO B, CELAURO C, PRESTI D L, et al. Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37:562-572.
- [5] KODUR V K, NASER M Z. Importance factor for design of bridges against fire hazard[J]. *Engineering Structures*, 2013, 54:207-220.
- [6] AZIZ E, KODUR V K. An approach for evaluating the residual strength of fire exposed bridge girders[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 88:34-42.
- [7] AZIZ E M, KODUR V K, GLASSMAN J D, et al. Behavior of steel bridge girders under fire conditions[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 106:11-22.
- [8] DWAIKAT M M S, KODUR V K. A simplified approach for predicting temperatures in fire exposed steel members[J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 55:87-96.
- [9] NASER M Z, KODUR V K. Factors governing onset of local instabilities in fire exposed steel beams[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 98:48-57.
- [10] GLASSMAN J D, GARLOCK M E M, AZIZ E M, et al. Modeling parameters for predicting the post-buckling shear strength of steel plate girders[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 121:136-143.
- [11] ZHOU H, LI S, CHEN L, et al. Fire tests on composite steel-concrete beams prestressed with external tendons[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 143:62-71.
- [12] 李国强, 周宏宇. 钢-混凝土组合梁抗火性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(10):19-26. LI Guo-qiang, ZHOU Hong-yu. Experimental study on the fire-resistance of steel-concrete composite beams[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(10):19-26.
- [13] 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[C]//中国力学学会. 第20届全国结构工程学术会议. 北京:中国力学学会, 2011:54-66. HAN Lin-hai, SONG Tian-yi, TAN Qing-hua. Fire resistance design of steel-concrete composite structures[C]//The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Proceedings of the 20th Structural Engineering Academic Meeting. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2011:54-66.
- [14] 陈玲珠, 蒋首超, 李国强. 高温下栓钉剪力链接件的结构性能数值模拟研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(1):77-83. CHEN Ling-zhu, JIANG Shou-chao, LI Guo-qiang. Numerical simulation of the structural performance of a stud shear link under high temperature[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(1):77-83.
- [15] 陈玲珠, 李国强, 蒋首超, 等. 高温下栓钉剪力连接件抗剪性能试验[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2013, 41(8):1151-1157. CHEN Ling-zhu, LI Guo-qiang, JIANG Shou-chao, et al. Experimental studies on behavior of headed stud shear connectors at elevated temperatures[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2013, 41(8):1151-1157.
- [16] 陈玲珠, 蒋首超, 李国强, 等. 不同规范组合梁抗火设计方法的比较和分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(1):69-78. CHEN Ling-zhu, JIANG Shou-chao, LI Guo-qiang, et al. Comparison and analysis of different standard combination resistance beams design methods[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(1):69-78.
- [17] 张岗, 贺拴海, 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, 36(1):51-57. ZHANG Gang, HE Shuan-hai, LIU Yang, et al. Decay of rigidity for prestressed concrete T-shaped girder bridge exposed to fire[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2016, 36(1):51-57.
- [18] 张岗, 贺拴海. 焰流效应下混凝土空心薄壁墩热力耦合形差与层剥分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(11):46-54. ZHANG Gang, HE Shuan-hai. Thermo-dynamic coupled deformation difference and layering stripping analysis for concrete hollow thin-walled pier affected

- by flame fluid[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11): 46-54.
- [19] 张 岗,贺拴海,王翠娟. 焰流效应下混凝土空心薄壁墩火温时变分布[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 26-34.
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, WANG Cui-juan. Time-dependent variation distribution of fire temperature for concrete hollow thin-walled pier affected by flame fluid[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 26-34.
- [20] 张 岗,刘天龙,施 颖,等. 火灾条件下混凝土箱梁梁端预应力衰变规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 65-71.
ZHANG Gang, LIU Tian-long, SHI Ying, et al. Decay law of prestress at concrete box girder end under fire conditions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 65-71.
- [21] 张 岗,宗如欢,施 颖,等. 钢-混组合简支箱梁耐火性能研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 41-46.
ZHANG Gang, ZONG Ru-huan, SHI Ying, et al. Study on fire resistance performance of simply-supported steel concrete composite box girder[J]. Bridge Construction, 2017, 47(3): 41-46.
- [22] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures—Part 1. 2: General action—Action on structures exposed to fire[S].
- [23] EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1. 2: General rules—Structural fire design [S].
- [24] EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1. 2: General rules—Structural fire design[S].
- [25] 姚伟发,黄 侨,张娟秀. 火灾环境下钢-混凝土组合梁力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 58-65.
YAO Wei-fa, HUANG Qiao, ZHANG Juan-xiu. Experimental study on mechanical performance of steel-concrete girders under fire loading [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 58-65.
- [26] 宗如欢. 简支钢-混凝土组合箱梁桥抗火性能研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
ZONG Ru-huan. Study on fire resistance of simply supported steel-concrete composite box girder bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [27] KODUR V K, AZIZ E, DWAIKAT M. Evaluating fire resistance of steel girders in bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18: 633-643.
- ~~~~~
- (上接第 30 页)
- [46] MOLKENS T, VAN COILE R, GERNAY T. Assessment of damage and residual load bearing capacity of a concrete slab after fire: Applied reliability-based methodology [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 969-985.
- [47] 高 超,杨鼎宜,俞君宝,等. 纤维混凝土高温后力学性能的研究[J]. 混凝土, 2013, 9(1): 33-36.
GAO Chao, YANG Ding-yi, YU Jun-bao, et al. Mechanical properties of fiber reinforced concrete after high temperature[J]. Concrete, 2013, 9(1): 33-36.
- [48] VARONA F B, BAEZA F J, BRU D, et al. Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 73-82.
- [49] 郑文忠,朱 晶. 无机胶凝材料粘贴碳纤维布加固混凝土结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 1-12.
ZHENG Wen-zhong, ZHU Jing. Progress of research on concrete structures strengthened with CFRP sheets bonded with inorganic cementitious materials [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 1-12.
- [50] 侯 炜,贺拴海,张 岗. 防火涂层对高温后混凝土抗压强度的影响[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2014, 46(2): 241-246.
HOU Wei, HE Shuan-hai, ZHANG Gang. Effects of fire protection layer on compressive strength of concrete after high temperature[J]. Journal of Xian University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2014, 46(2): 241-246.