

文章编号:1671-8879(2014)06-0079-06

爆燃火灾全程下多梁式 PCT 型梁桥剪力滞效应

张 岗¹, 贺拴海¹, 刘 扬^{1,2}, 赵 煜¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 贵州省交通运输厅, 贵州 贵阳 550000)

摘 要:针对火灾下预应力混凝土 T(PCT)型梁桥顶板的开裂,利用热力耦合方法分析了爆燃火灾下 4 片预应力混凝土 T 梁桥的温度场和剪力滞时程演变规律。研究表明:火温全程 T 型梁翼缘板连接部位温度值高于翼缘板根部,呈现出以腹板与顶板交合部位为中心逐渐向翼缘板边缘部位呈稀疏温度带间隔梯度过渡的“V”状分布云;火温初时,恒载作用下顶板最大压应力位于两边肋顶部,最小压应力位于两边梁外侧悬臂板端部,单片梁体顶板呈负剪力滞状态,4 片梁体顶板剪力滞呈“W”状,其峰值之比接近 1.0;随火温时间延增,两中肋的应力峰值点出现在半悬臂板宽度处,应力变化幅值大于两边肋与四肋同时受火的顶板应力变化幅值,顶板部分出现拉应力;随火温时间延增,各片 T 梁顶板处于负剪力滞状态;研究可为预应力桥梁实用抗火设计提供依据。

关键词:桥梁工程;多梁式 T 梁桥;预应力混凝土;火灾;剪力滞

中图分类号:U441

文献标志码:A

Shear-lag effect of multi-beam prestressed concrete t-shaped girder bridge exposed to explosion fire

ZHANG Gang¹, HE Shuan-hai¹, LIU Yang^{1,2}, ZHAO Yu¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Guizhou Province Transportation Hall, Guiyang 550000, Guizhou, China)

Abstract: Aimed at the crack of upper floor for multi-beam pre-stressed concrete(PCT) T-shaped girder bridge, thermo-mechanics coupled method was adopted to analyze time-dependent law for temperature distribution of sections and space shear lag of girder. The results indicate that in the whole process of fire time, temperature in brim of the cantilever plate is higher than that in root of the cantilever plate, which has a sparse and interval temperature cloud presenting a V-shaped distribution from the combination location of web floor and upper floor to the rim of cantilever plate; at initial time of fire temperature, in the condition of bridge acted by dead load, the maximum compression stress is located in upper part of bias girder, the minimum compression stress is located in the end of outer cantilever plate, upper floor of each girder has an even negative shear lags condition, shear lags of 4 piece of girders presents a W shape, and the ratio of the peak stress is close to 1.0; with increment of fire time, the peak value of stress is located in a half part of cantilever width, the variation amplitude of stress is more obvious than that in the condition that two bias girder and two middle girder are both exposed to fire, and a tensile stress appears in part of upper floor; with in-

收稿日期:2014-07-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51308056);交通运输部西部交通建设科技项目(2011 812 318 970);中央高校基本科研业务费专项资助项目(CHD2011ZY003;CHD2011TD010;CHD2012JC001);新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0250)

作者简介:张 岗(1980-),男,甘肃庆阳人,副教授,工学博士,E-mail:zhangg_2004@126.com。

crement of fire time, each T-shaped girder presents a negative shear lags condition. The research can provide basis for fire-resistant design of pre-stressed bridge. 2 tabs, 3 figs, 17 refs.

Key words: bridge engineering; multi—beam girder bridge; prestress; concrete; fire hazard; shear lag

0 引言

桥梁火灾频现,由于在火灾全过程中桥梁结构材料性能的衰变与力学行为的演变耦合效应,使得桥梁火灾全过程的结构力学性能发展机理复杂,尤其对于多梁式梁桥的剪力滞效应所导致的结构局部开裂或破坏行为已引起交通管理部门及学者的高度关注^[1]。国外学者对公路交通火灾事故进行了全方位调查,发现火灾可导致大量的财产损失,桥梁火灾后的修复费用昂贵、时间长、难度大,因此研究人员分析了多种火灾温升曲线,利用试验及数值模拟的方法研究了钢筋混凝土梁的防火性能,提出了高温场计算方法^[2-5]。中国学者对钢构件进行了全面的试验与研究,逐步涉足预应力混凝土桥梁的防火性能研究^[6-8];楼国彪对钢结构高强螺栓外伸连接端板进行了试验与分析^[6];李世安对预应力混凝土箱梁的火灾高温效应进行了分析与灾后评价^[7];李国强等调研并总结了工程结构的防火研究进展状况,强调了桥梁结构防火性能的研究发展空间^[8]。目前,虽然有关箱梁剪力滞的研究内容与计算方法颇多,然而关于火灾全过程中梁桥结构的剪力滞效应报道相对较少^[9],张岗等研究了火延全程中 5 片混凝土 T 梁桥的防火性能和剪力滞效应,建立了焰域温度计算模型,提出了预应力混凝土 T 梁桥的数值模拟方法^[10-14],并在此基础上,综合混凝土和预应

力钢筋材料高温特性^[7],继续研究了在爆燃火灾全程中多梁式预应力混凝土 T 型梁桥的温度场和实体剪力滞的空间分布状况,可为预应力桥梁抗火实用设计方法提供依据^[5-6,14]。

1 火灾高温热传导模型

考虑高温场混凝土结晶水的传导作用,火灾高温热传导方程如下^[3-8,14-17]。

$$\frac{\partial H_t}{\partial t}=k_t\left(\frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2}\right)+\frac{\partial L_{w,t}}{\partial t}$$
 (1)

$$T_t=1\,296(1-0.325e^{-\frac{t}{\tau}}-0.675e^{-2.5t})+T_0$$
 (2)

式中: H_t 为热焐; t 为时间; k_t 为热传导系数; T_t 为温度; $L_{w,t}$ 为潜热函数; T_0 为初始温度。

边界条件为

$$q=\beta(T_s-T_a)+v\delta(\alpha e_f T_f^4-e_s T_s^4)$$
 (3)

式中: q 为热流量; β 为对流换热系数; T_s 为混凝土表面温度; T_a 为环境平均温度; T_f 为火场温度; v 为混凝土表面黑度系数,其值为 0.94; δ 值为 $5.667\times 10^{-8}\text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$; α 为表面吸热系数,取值 0.95; e_f 为火表面发热系数,取值 1.0; e_s 为混凝土表面散热系数,取值 0.95。

2 材料特性

根据相关研究文献^[2-13],混凝土和预应力钢筋的热力参数如表 1 所示。

表 1 材料热力参数
Tab. 1 Thermo-mechanics parameters of material

材料	温度/℃	导热系数 W/(m·℃)	比热容/(kg·℃)	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	热膨胀系数	强度折减	弹模折减
混凝土	20	1.6	850	2 489	0.15	6.000×10^{-6}	1.000	1.000
	200	1.5	939	2 388	0.15	8.000×10^{-6}	1.000	0.700
	600	1.2	1 136	2 164	0.15	11.000×10^{-6}	0.584	0.370
	1 000	0.9	1 334	1 940	0.15	14.000×10^{-6}	0.192	0.280
预应力 钢筋	20	53.3	440	7 850	0.30	6.160×10^{-6}	1.000	1.000
	200	47.3	530	7 850	0.30	7.600×10^{-6}	1.000	0.870
	600	34.0	760	7 850	0.30	10.800×10^{-6}	0.400	0.240
	1 000	27.3	650	7 850	0.30	14.000×10^{-6}	0.050	0.030

3 工程背景与火灾剪力滞工况

3.1 工程背景

某预应力混凝土简支 T 梁桥如下页图 1 所示,跨径布置为 4 m×20 m,横桥向布置为净 8.6 m(行车道)+2×0.5 m(护栏),每片 T 梁宽 2.4 m、腹板

厚度 20 cm、腹板高度 140 cm、悬臂板根部高度为 25 cm、悬臂板端部为 10 cm,每跨由 3 道横隔板连接 4 片 T 梁组成,桥面铺装为混凝土材料,计算过程可将其视为均布荷载。预应力钢束管道中心至混凝土边缘的距离为 10 cm,T 型梁的混凝土标号为 C50。预应力布置及计算见文献[13]。

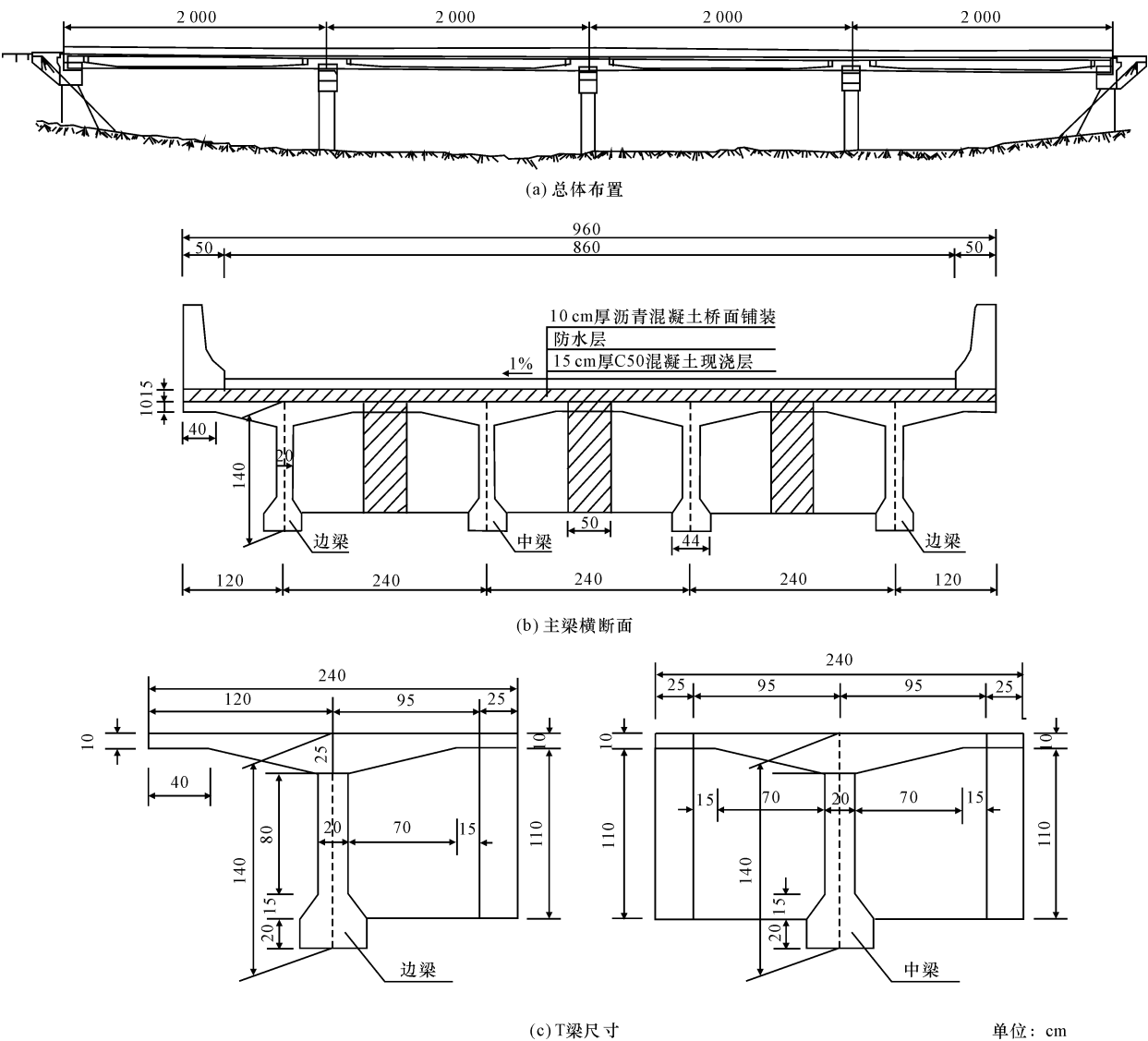


图 1 工程概况

Fig. 1 General view of engineering

3.2 正对称火荷载工况

爆燃火灾全程的 4 片预应力混凝土 T 梁桥顶板空间时程剪力滞函数关系为

$$S_{k,t}=F(T_t,G,t)$$
 (4)

式中: $S_{k,t}$ 为任意时刻顶板面层横桥向正应力, k 为火荷载工况,分别为 GK1、GK2、GK3, t 为延火时间; G 为自重荷载值。

表 2 为 4 片预应力混凝土 T 型梁桥爆燃火灾

与剪力滞工况设计。

3.3 测点布置与有限元模拟

下页图 2 为预应力混凝土桥下火灾全过程中的 4 片 T 梁桥截面挠度及应力测点布置。4 片梁肋分别用肋 a、肋 b、肋 c、肋 d 表示第 1 片梁肋、第 2 片梁肋、第 3 片梁肋和第 4 片梁肋;上缘用 1~9 标示,翼缘板设置 1 个测点,梁肋与翼缘板交合处设置 1 个测点,如此在热力耦合场分析中,可采用路径应力处

表 2 PCT 型梁桥火荷载工况

Tab. 2 Work condition of fire load for prestressed concrete girder bridge

工况序号	应力符号	受火梁肋				火源长度	计算内容	火荷载性质	计算荷载	火强
		肋 a	肋 b	肋 c	肋 d					
GK1	$S_{1,t}$	√	√	√	√	整跨	剪力滞	正对称	自重	HCM
GK2	$S_{2,t}$	√			√	整跨	剪力滞	正对称	自重	HCM
GK3	$S_{3,t}$		√	√		整跨	剪力滞	正对称	自重	HCM

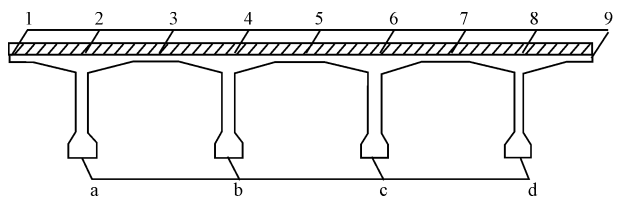


图 2 火灾模型截面测点布置

Fig. 2 Measuring point distribution of fire model sections

理方法(ppath, plpath)获取正对称火荷载下 4 片预应力混凝土 T 型梁桥顶板的剪力滞状况。

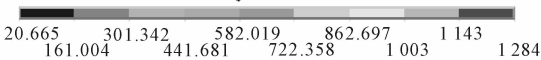
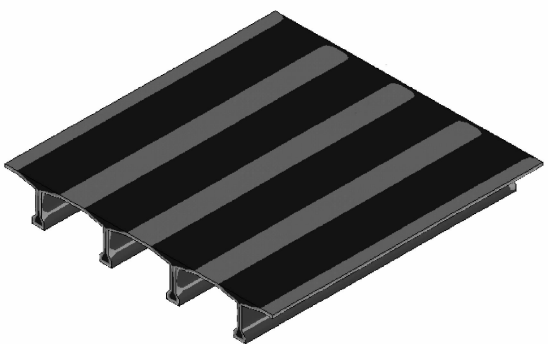
4 温度场与火灾全程剪力滞分析

4.1 温度场

图 3 为预应力混凝土 T 梁桥的温度云图,图 3(a)为延火 20 min 的温度场分布状态,图 3(b)为延火为 180 min 的温度场分布状态。由图 3 可知,延火 20 min,由于混凝土 T 型梁翼缘板厚度根宽端薄,所以 T 型梁翼缘板连接部分温度值高于翼缘板根部,形成了以腹板与顶板交合部分为中心逐渐向连接部分呈稀疏温度带间隔梯度过渡的“V”状分布云,高低温差值约为 140 ℃;混凝土导热不良,随火温时间的延增,高温区逐渐扩展至多温度梯度状态,延火 180 min 时,梁体高低温差值约为 760 ℃。

4.2 火灾全程剪力滞

下页图 4 为火灾全程中预应力混凝土 T 型梁桥不同梁肋下部受对称火荷载时跨中顶板剪力滞效应状况。图 4(a)为预应力混凝土 T 型梁桥非火荷载状态中的恒载作用下剪力滞效应,由图 4(a)可知,火温初时,梁体结构在恒载作用下,不同受火梁肋的 3 种工况的顶板剪力滞曲线吻合,相互印证了不同受火梁肋的有限元模型的初始状态同步性,处于均匀受压状态的顶板最大压应力为-4.25 MPa,位置位于两边肋顶部,最小压应力为-3.75 MPa,位置位于两边肋外侧悬臂板端部,每片梁体顶板呈较均匀的负剪力滞状态,最大压应力与最小压应力比值为 1.13,4 片梁的顶板剪力滞呈“W”状。图 4(b)为预应力混凝土 T 型梁桥恒载作用下火温 60 min 时的剪力滞状况,由图 4(b)可知,桥下 4 片梁肋同时受火时,顶板正应力分布均匀;两中肋受火时,两中肋顶板正应力变化幅度剧烈,最大压应力值为-7.0 MPa,由于中肋扭曲效应,两中肋翼缘板结合处与两边肋翼缘板外侧边缘出现约 1.0 MPa 的拉应力;两边肋受火时,两边肋顶板正应力变化幅度介于 4 片梁肋同时受火与两中肋受火时的应力变化幅度中间。图 4(c)为预应力混凝土 T 型梁桥恒载



(a) 20 min 温度均分布

(b) 180 min 温度均分布

单位: ℃

图 3 混凝土 T 梁桥温度云

Fig. 3 Temperature distribution of 4 piece of T-shaped girders

作用下火温 120 min 时的剪力滞状况,图 4(d)为预应力混凝土 T 型梁桥恒载作用下火温 180 min 时的剪力滞状况,由图 4(c)和图 4(d)可知,随着火温时间的延增,两中肋受火时,顶板压应力峰值点个数逐渐增加,其余梁肋受火时的顶板应力分布状态与火温 40 min 时的状态保持一致。图 4(e)为预应力混凝土 T 型梁桥恒载作用下火温 240 min 时的剪力滞状况,图 4(f)为预应力混凝土 T 型梁桥恒载作用下火温 300 min 时的剪力滞状况,由图 4(e)可知,两中肋受火时,两中肋顶板正应力变化幅度剧烈,最大压应力值为-12.0 MPa,两边肋顶板正应力分布均匀,其值介于-1.0 MPa 与 1.0 MPa 之间,4 片梁肋同时受火时的顶板正应力变化幅度明显于两边肋受火时顶板正应力变化幅度;比较图 4(e)和图 4(f)可知,各工况的顶板正应力变化趋势类似。

5 结 语

(1)研究了多梁肋组合的预应力混凝土 T 型梁正对称火荷载工况模式,对 T 梁桥顶部和下缘进行了计算测点设计,提出了空间剪力滞计算方法,利用

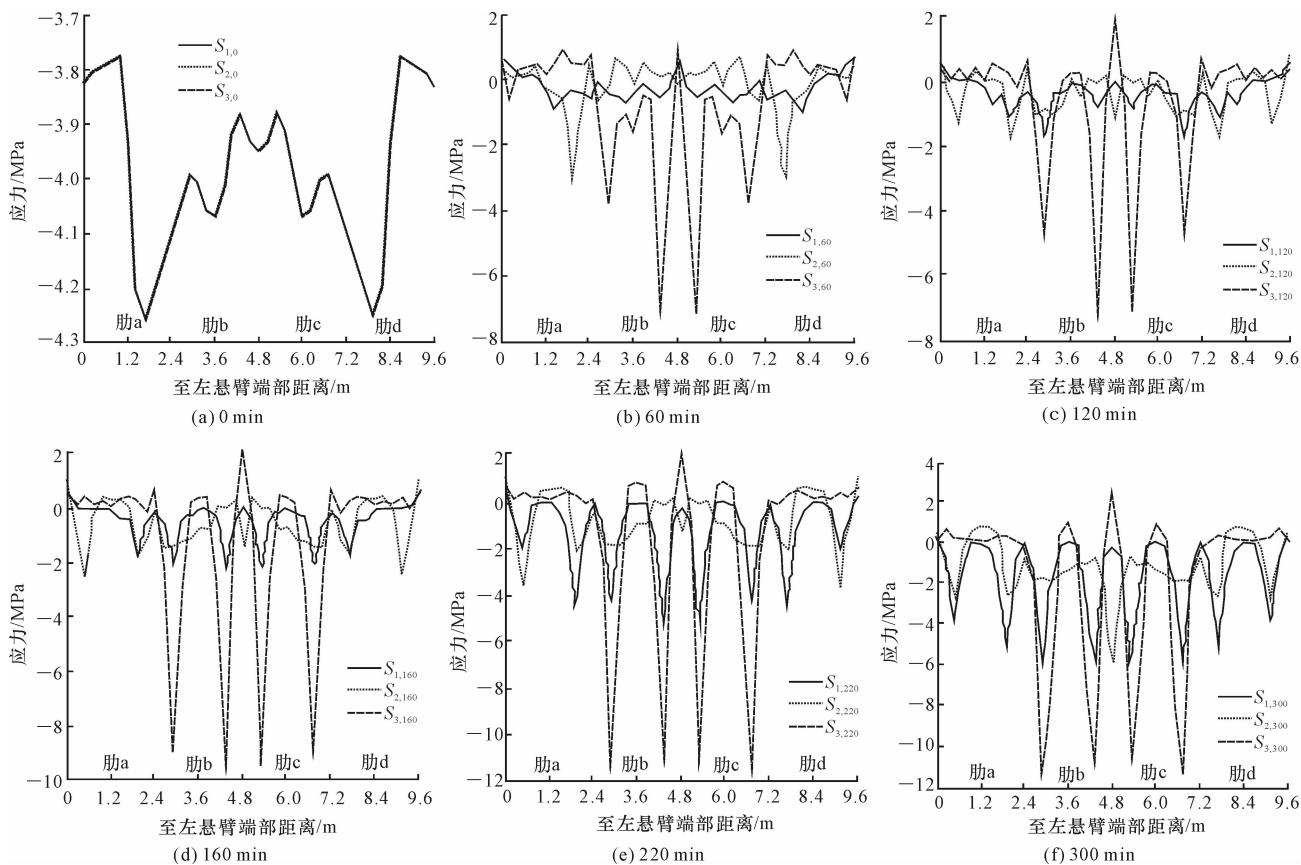


图 4 火灾全程剪力滞

Fig. 4 Shearing lags of fire process

热力耦合计算方法对 4 片预应力混凝土 T 型梁桥进行了火灾全程温度场演变和剪力滞时程分析,揭示了正对称火荷载作用下预应力混凝土 T 梁桥剪力滞时程分布规律。

(2)火温初时,由于混凝土 T 型梁翼缘板厚度根宽薄, T 型梁翼缘板连接部分温度值高于翼缘板根部,形成了以腹板与顶板交合部分为中心逐渐向连接部分呈稀疏温度带间隔梯度过渡的“V”状分布云;混凝土导热不良,随火温时间的延增,高温区逐渐扩展至多温度梯度状态,温差逐渐增大。

(3)火温初时,梁体结构在恒载作用下,不同受火梁肋的 3 种工况的顶板剪力滞曲线吻合,相互印证了不同受火梁肋的有限元模型的初始状态同步性,处于均匀受压状态的顶板最大压应力位置位于两边肋顶部,最小压应力位于两边肋外侧悬臂板端部,每片梁体顶板呈较均匀的负剪力滞状态,最大压应力与最小压应力比值为 1.13, 4 片梁的顶板剪力滞呈“W”状。随着火温时间的延增,各片 T 梁顶板呈现负剪力滞效应趋势,两中肋受火时的压应力峰值点个数逐渐增加,其峰值点出现的位置位于悬臂板宽度的一半处,应力变化幅度显著,似于峰波分

布,部分顶板出现拉应力区域,两边肋与四肋同时受火的顶板剪力滞效应弱于两中肋受火的顶板剪力滞效应。

(4)预应力 T 梁实体剪力滞的研究能够预测预应力梁桥的抗火性能,可为预应力桥梁抗火实用设计及灾后评价提供依据,后续可研究火灾下预应力梁桥的刚度退化机理。

参考文献:

References:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2012[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. An academic research summary on china highway and transport; 2012[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 1-96. (in Chinese)
- [2] Maria G, Ignacio P Z, Kodur V K R, et al. Fire hazard in bridges: review, assessment and repair strategies [J]. Engineering Structures, 2012, 35(1): 89-98.
- [3] Capua D D, Mary A R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire [J].

- Journal of Fire Safety, 2007, 42(2): 139-149.
- [4] Kodur V, Dwaikat M. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams [J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30 (5): 431-443.
- [5] Kodur V K R, Dwaikat M T. Fire performance of reinforced concrete beams under design fire exposure [C]//ASCE. Structure Congress. Vancouver ASCE, 2008: 1-10.
- [6] 楼国彪. 钢结构高强度螺栓外伸式端板连接抗火性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
LOU Guo-biao. Research on fire-resistance performance of high-strength bolted extended endplate connections for steel structure[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese)
- [7] 李世安. 火灾过程预应力混凝土梁桥高温力学性能分析及灾后评价方法[D]. 西安: 长安大学, 2012.
LI Shi-an. Mechanical performance analysis of fire process and post-disaster evaluation method of prestressed concrete girder bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [8] 李国强, 吴波, 蒋首超. 工程结构抗火研究进展与建议[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(5): 13-18.
LI Guo-qiang, WU Bo, JIANG Shou-chao. State-of-the-art and suggestions of research on fire-resistance of structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2010, 12(5): 13-18. (in Chinese)
- [9] 蔺鹏臻, 杨子江, 冀伟, 等. 考虑剪力滞效应影响的箱梁变形修正计算方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 93-97.
LIN Peng-zhen, YANG Zi-jiang, JI Wei, et al. Modified calculation method of deflection for box girders with consideration of shear lag effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 93-97. (in Chinese)
- [10] 张岗, 王翠娟, 贺拴海, 等. 桥面火灾下多梁式混凝土 T 型梁桥抗火性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(5): 52-56.
ZHANG Gang, WANG Cui-juan, HE Shuan-hai, et al. Fire-resistant performance of multi-beam concrete t-shape girder bridge exposed to deck fire [J]. Journal of Chang'an University: Nature Science Edition, 2013, 33(5): 52-56. (in Chinese)
- [11] 张岗, 王翠娟, 宣纪明, 等. 多肋火灾下混凝土 T 形梁桥实体剪力滞比研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(5): 75-80.
ZHANG Gang, WANG Cui-juan, XUAN Ji-ming, et al. Study of solid shear lag ratios of concrete t-girder bridge with its multiple girder ribs exposed to fire [J]. Bridge Construction, 2014, 44(5): 75-80. (in Chinese)
- [12] 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 for high pier of concrete affected by flame and fluid [J]. Journal of Traffic and Transportation on Engineering, 2014, 14(1): 77-84. (in Chinese)
- [13] 张岗, 贺拴海, 刘扬, 等. 火灾下 PC 多肋 T 型梁桥面平整度分析[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 35(7): 97-102.
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, LIU Yang. Analysis of deck toughness for pre-stressed concrete multi-beam-shaped girder bridge exposed to fire [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 35(7): 97-102. (in Chinese)
- [14] 乔文文, 胡传顺, 潘晓丽. 氧生物柴油火焰温度计算及火焰切割分析[J]. 电焊机, 2012, 42(1): 31-34.
QIAO Wen-wen, HU Chuan-shun, PAN Xiao-li. Calculation of the flame temperature of oxygen biodiesel and analysis of flame cutting [J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(1): 31-34. (in Chinese)
- [15] 董毓利. 火灾时钢筋混凝土板的承载力计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 14-23.
DONG Yu-li. Calculation of bearing capacity of RC concrete slabs in fire [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 14-23. (in Chinese)
- [16] 熊焱, 屈文俊, 张翔. 火灾受损混凝土再碱化修复过程中的导电原理分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 55-59.
XIONG Yan, QU Wen-jun, ZHANG Xiang. Analysis of conductivity mechanism of realkalization repair on fire damaged concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 55-59. (in Chinese)
- [17] 刘文燕, 黄鼎业, 华毅杰. 混凝土表面对流换热系数测试方法探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(4): 87-89.
LIU Wen-yan, HUANG Ding-ye, HUA Yi-jie. Probe into test method of heat convection coefficient of concrete [J]. Sichuan Building Science, 2004, 30(4): 87-89. (in Chinese)