

文章编号:1671-8879(2016)01-0051-07

# 火灾全程预应力混凝土 T 梁桥刚度衰变

张 岗<sup>1,2</sup>, 贺拴海<sup>1,2</sup>, 刘 扬<sup>1,3</sup>, 王翠娟<sup>4</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 贵州省交通运输厅, 贵州 贵阳 550000; 4. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**针对火灾下预应力混凝土 T 梁桥的整体刚度衰变问题,给出了结构挠变率与刚度衰变率关系方程,建立了刚度衰变与结构挠变率(挠度变化速率)耦合计算模型,利用热力耦合计算方法分析了火灾全程多梁式预应力混凝土 T 梁桥的结构挠变率,揭示了火灾全程多梁式预应力混凝土 T 梁桥刚度衰变规律。研究表明:T 梁桥下部整体受火时,温度峰值点出现在梁肋马蹄角点处,直角点温度高于钝角点温度;火灾全程中单肋受火 T 梁挠变率线性递增,两肋及两肋以上受火 T 梁挠变率呈二次抛物线趋势递增;单侧非间隔梁肋受火的挠变率稍大于同数间隔梁肋受火的挠变率;随着延火时间的增加,多肋受火的预应力混凝土 T 梁整体刚度损伤呈非线性增加。火灾全程预应力混凝土 T 梁桥的刚度衰变研究可为预应力混凝土梁桥的灾后评价提供依据。

**关键词:**桥梁工程;多梁式 T 梁桥;预应力混凝土;火灾;刚度;挠变

**中图分类号:**U448.21 **文献标志码:**A

## Decay of rigidity for prestressed concrete T-shaped girder bridge exposed to fire

ZHANG Gang<sup>1,2</sup>, HE Shuan-hai<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,3</sup>, WANG Cui-juan<sup>4</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Old Bridge Detection and Reinforcement Technique in Traffic Industry, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Guizhou Provincial Transportation Department, Guiyang 550000, Guizhou, China; 4. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To study the decay of rigidity for prestressed concrete (PC) bridge with T-shaped girder under fire hazard, the relation equation between variance rate of deflection and decay rate of rigidity was given out, the coupled calculation model between decay rate of rigidity and deflection variance ratio was proposed, and the thermo-dynamics coupled calculation method was adopted to analyze the variance rate of deflection for PC T-shaped girder exposed to fire. Thus, the decay law of rigidity for PC T-shaped girder exposed to fire was disclosed. The results show that the temperature peak value is located at the corner of horseshoe part and web floor. Temperature at direct corner is higher than that at obtuse corner. Deflection variance ratio of single girder has a linear increment during the entire fire process. The variance rates of deflection of two girders and multi-girders have a quadratic parabola increment during the entire fire

收稿日期:2015-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51308056);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G2210003,2013G2211004,2014G2213002);  
国家留学基金委资助项目(201406565013)

作者简介:张 岗(1980-),男,甘肃庆阳人,副教授,工学博士,E-mail:zhanggang@chd.edu.cn。

process. The variance rate of deflection for unilateral and continuous girder exposed to fire is greater than that for the same number and interval girder exposed to fire. With increment of fire time, the whole rigidity for PC T-shaped girder has a nonlinear increment when more girders are exposed to fire. The study is sensible to assessment for prestressed concrete bridge after fire hazard. 2 tabs, 7 figs, 20 refs.

**Key words:** bridge engineering; multi-beam T-shaped girder bridge; prestressed concrete; fire hazard; rigidity; deflection variance

## 0 引言

桥梁结构受火后材料性能劣化、刚度衰变,由此造成桥梁变形异常。目前,桥梁火灾频发,其对桥梁结构造成的破坏和对经济造成的损失不可估量<sup>[1-2]</sup>。火灾下桥梁结构性能的衰变已受到学者们的全面关注<sup>[3]</sup>。国外学者对材料和基本构件的高温性能进行了大量研究,形成了行业规范<sup>[4-6]</sup>;Capua等推导了高温场增量迭代方程,分析了异形截面梁的温度场与力学性能<sup>[7]</sup>;Kodur等致力于火灾下钢-混凝土叠合梁的力学性能研究,分析了多种火灾场景下具有不同影响参数的钢-混凝土叠合梁抗火性能<sup>[8-10]</sup>;Hou等研究了无粘结预应力混凝土连续梁的抗火性能<sup>[11]</sup>。中国学者对钢绞线的高温力学性能进行了试验,并拟合出力学参数计算公式<sup>[12-13]</sup>。朱大雷等对高温引起的钢筋混凝土连续梁的内力重分布进行了弹塑性分析<sup>[14]</sup>;朱建明等提出了火灾后混凝土构件剩余刚度估算方法<sup>[15]</sup>;张岗等采用理论推导和数值模拟相结合的方法分析了多梁式预应力混凝土T梁桥变形和剪力滞的高温变化规律<sup>[16-20]</sup>。

上述研究大多为对材料高温性能、高温场的计算方法、某种特殊结构的抗火性能及混凝土构件的剩余刚度进行的研究,或者对某种火焰效应下结构的热响应进行分析,而关于火灾全程预应力混凝土

土桥梁整体刚度变化规律方面的研究资料较为匮乏。鉴于此,本文通过挠变率与刚度之间的对应关系,研究了火灾高温状态中预应力混凝土T梁桥的挠变率时程变化状态,建立了预应力混凝土T梁桥的刚度衰变模型,采用热力耦合计算方法提出了挠变率与刚度变化之间的关系方程,探索了火灾下多肋预应力混凝土T梁桥的刚度衰变规律。

## 1 温度与边界

取如下修正的火灾温升曲线作为桥梁的温度场计算标准,即<sup>[6-10]</sup>

$$T_f = 1\,296 \times (1 - 0.325e^{-\frac{t}{60}} - 0.675e^{-2.5t}) + T_0 \quad (1)$$

式中: $T_f$ 为高温场温度; $t$ 为时间; $T_0$ 为初始温度。

温度场边界条件为

$$q = \beta(T_f - T) + \epsilon\delta(T_f^4 - T^4) \quad (2)$$

式中: $q$ 为热流量; $\beta = 11.56 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,为对流换热系数; $T$ 为混凝土表面温度; $\epsilon = 0.94$ ,为黑体发射率; $\delta = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,为 Stefan-Boltzmann 常数。

## 2 材料热力参数

根据相关研究文献<sup>[4-13,16-20]</sup>,混凝土和预应力钢束材料的热力参数见表1。

表1 材料热力参数

Tab. 1 Thermo-mechanics parameters of material

材料	温度/°C	导热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{C})^{-1})$	比热容/ $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{C})^{-1})$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比	热膨胀系数/ $10^{-6}$	强度折减	弹模折减
混凝土	20	1.60	900	2 500	0.15	6.2	1.000	1.000
	600	0.75	1 100	2 355	0.17	10.8	0.640	0.370
	1 200	0.55	1 100	2 297	0.20	15.6	0.000	0.000
预应力 钢束	20	53.30	530	7 850	0.30	7.6	1.000	1.000
	200	47.30	606	7 850	0.30	11.4	0.946	0.878
	400	40.70	760	7 850	0.30	15.6	0.633	0.471

## 3 刚度衰变模型

下图1为预应力混凝土T梁的刚度衰变模型,混凝土T梁下部整体受火,梁体所受总荷载由

两部分组成:一部分为梁体自重荷载;另一部分为温度荷载。合力模型可分为合力模型I和合力模型II,模型I中温度荷载与自重荷载方向相反,模型II中温度荷载与自重荷载方向相同, $t_1$ 为合力反弯时

间,  $G_0$  为结构未受火时的自重荷载,其表达式为

$$F_t = G_t - R_t \quad (3)$$

式中:  $F_t$  为总荷载;  $G_t$  为自重荷载;  $R_t$  为温度荷载。

式为

$$\mathbf{K}_t \boldsymbol{\delta}_t = \mathbf{F}_t \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{K}_t$  为梁体的结构刚度;  $\boldsymbol{\delta}_t$  为位移。

设延火时间增量为  $\Delta t$ , 则有

$$\frac{\partial \mathbf{K}_t}{\partial t} \boldsymbol{\delta}_t + \mathbf{K}_t \frac{\partial \boldsymbol{\delta}_t}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{F}_t}{\partial t} \quad (5)$$

式中:  $\dot{\mathbf{K}}_t = \frac{\partial \mathbf{K}_t}{\partial t}$ , 为刚度随时间的变化率;  $\dot{\boldsymbol{\delta}}_t = \frac{\partial \boldsymbol{\delta}_t}{\partial t}$ , 为挠度随时间的变化率。

在延火时间  $t_1$ , 则有

$$\frac{\partial \mathbf{K}_{t_1}}{\partial t} \boldsymbol{\delta}_{t_1} = -\mathbf{K}_{t_1} \frac{\partial \boldsymbol{\delta}_{t_1}}{\partial t} \quad (6)$$

由此模型可知刚度的衰变率与挠度的衰变率保持一致。

## 4 工程背景与火灾工况

### 4.1 工程背景

如图 2 所示, 选取某多梁式预应力混凝土 T 梁桥进行火灾下结构刚度衰变分析, 该桥横向由 4 片预应力混凝土 T 梁组成, 顺桥向平均 5 m 设置 1 道横隔板, 桥面总宽 9.6 m, 行车道宽 8.6 m, 两侧防撞墙宽 0.5 m; 预应力钢束分为上下 2 层布置, 跨中钢束中心与混凝土外表面的距离分别为 28.5、

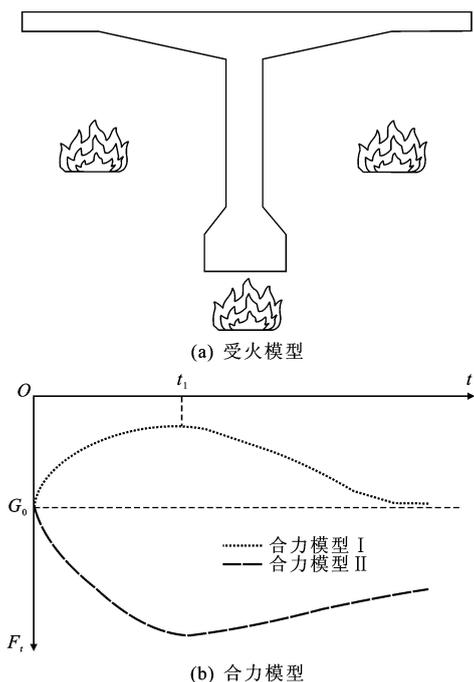


图 1 刚度衰变模型

Fig. 1 Rigidity decay model

梁的刚度与挠度随外荷载  $F_t$  变化的有限元表达

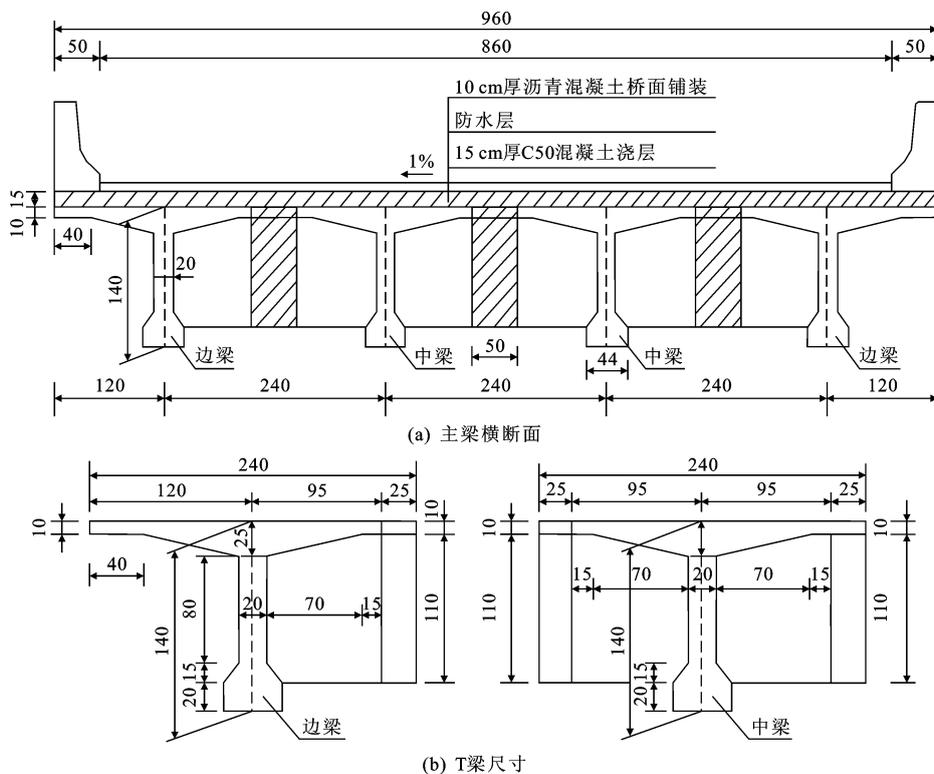


图 2 工程概况

Fig. 2 Project profile

单位: cm

12.5 cm,梁端钢束中心与混凝土外表面的距离分别为62.5、102.5 cm;主梁和横隔板的混凝土强度等级为C50;桥面构造见图2(a),梁肋尺寸见图2(b)。

#### 4.2 火灾场变形工况

桥下火灾全程的4片预应力混凝土T梁桥梁肋挠变函数关系为

$$\lambda_{k,t} = \dot{\delta}_t = f(T_t, F_t, t) \quad (7)$$

式中: $\lambda_{k,t}$ 为任意时刻梁肋的挠变率, $k=1, \dots, 9$ ,为火荷载工况号。

表2为火灾下4片预应力混凝土T梁桥挠变率分析工况设计。分析过程中,火源长度取整肋长度(20 m),受火面积为梁体下部(包含两侧翼缘板下部和整个梁肋),分析内容为挠变率峰值。T梁桥梁肋编号见图3(a)。

表2 火灾下T梁挠变率测试工况

Tab. 2 Test conditions of deflection variance ratio of T-shaped girder under fire hazard

工况编号	挠变符号	受火梁肋编号			
		a	b	c	d
工况 I	$\lambda_{1,t}$	✓			
工况 II	$\lambda_{2,t}$	✓	✓		
工况 III	$\lambda_{3,t}$	✓	✓	✓	
工况 IV	$\lambda_{4,t}$	✓	✓	✓	✓
工况 V	$\lambda_{5,t}$	✓		✓	
工况 VI	$\lambda_{6,t}$	✓		✓	✓
工况 VII	$\lambda_{7,t}$	✓			✓
工况 VIII	$\lambda_{8,t}$		✓		
工况 IX	$\lambda_{9,t}$		✓	✓	

注:“✓”表示该梁肋受火。

#### 4.3 测点设计

图3(b)为预应力混凝土T梁截面温度测点布置,测点 $T_1$ 位于梁肋马蹄角点处,测点 $T_2$ 位于马蹄底部中间,测点 $T_3$ 、 $T_4$ 分别位于第1、2层预应力钢束截面的中心位置,测点 $T_5$ 位于马蹄向上倒角处,测点 $T_6$ 位于梁肋与马蹄的结合处,测点 $T_7$ 位于腹板与梗腋的相交处,测点 $T_8$ 位于悬臂板二折线处,测点 $T_9$ 位于悬臂板端部。测点 $T_1$ 、 $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$ 、 $T_8$ 、 $T_9$ 旨在测试迎火面的温升曲线,测点 $T_3$ 、 $T_4$ 旨在测试钢绞线的温升曲线。

### 5 温度分析

#### 5.1 温度云

下页图4为预应力混凝土T梁梁肋与翼缘板下部受火时的温度分布状态。由图4可知,当T梁梁肋与翼缘板下部受火时,整个断面沿外层截面轮

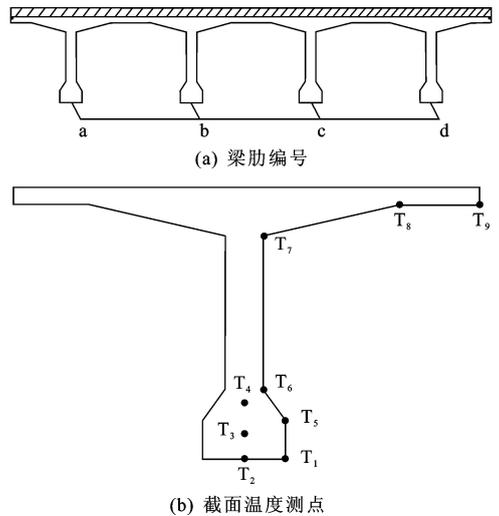


图3 梁肋编号与温度测点布置

廓线由外及内逐层分布,温度峰值点出现在梁肋马蹄角点处,温度效应集中类似于应力集中现象。火温延增20 min时,梁肋截面温度分布似倒放杯状,顶板温度似V状,随火温时间的延增,梁肋马蹄与顶板形成独立闭合的温度传递区,翼缘板边缘与马蹄角点的高温区扩展显著。

#### 5.2 温度时程

下页图5为预应力混凝土T梁温度测点时程曲线。由图5(a)可知,测点 $T_1$ 位于马蹄的最下部角点处,由于角点温度集中的原因,测点 $T_1$ 的温度升速快、峰值高。比较图5(a)与图5(b)可知,由于其余角部测点位于钝角处,测点 $T_1$ 的温度稍高于测点 $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$ 、 $T_8$ 、 $T_9$ 的温度;由于负温度流的存在,使得混凝土T梁翼缘板边缘温度高于梁肋与顶板交界处温度;测点 $T_3$ 、 $T_4$ 处于预应力钢绞线处,随着火温时间的延增,温度变化保持一致。

### 6 挠变率分析

下页图6(a)为火温全程中单梁的挠变率时程曲线。由图可知,火温全程中单梁挠变率呈二次抛物线变化,随火温时间的延增,单梁的挠变率逐渐增大,延火至300 min时,单梁的挠变率达到0.3 mm/min。由此说明,在火温逐渐延增的过程中,预应力混凝土T梁材料累积损伤随延火时间逐渐增大,导致刚度损伤累积效应延时显著。下页图6(b)为火温全程中多梁式T梁桥的整体挠变率时程曲线。由图可知,火温全程中,除单肋受火挠变率线性递增外,两肋及两肋以上受火单梁挠变率呈二次抛物线趋势递增;随着火温时间的延增,4片梁肋全部受火的挠变

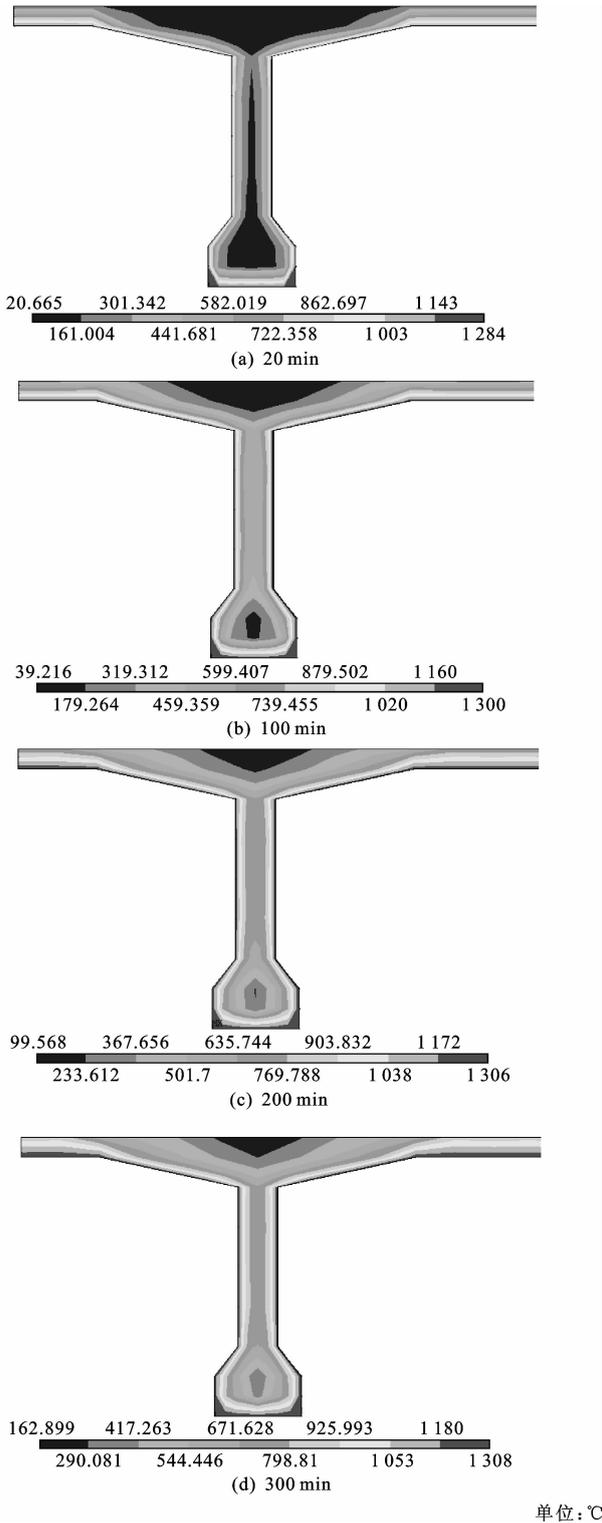
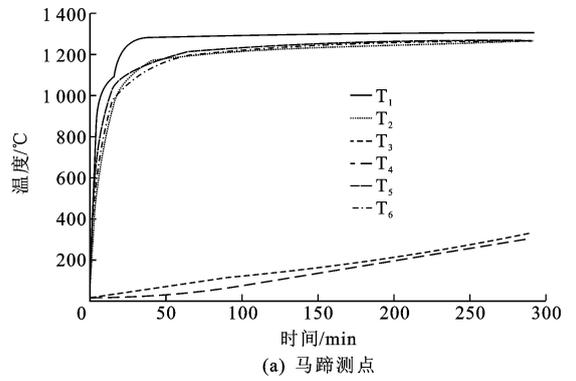


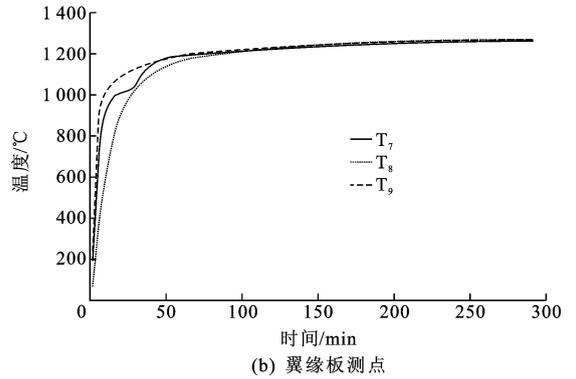
图 4 单片 T 梁温度云图

Fig. 4 Temperature cloud charts of single T-shaped girder

率与单梁延时挠变率基本相同,延火至 300 min,其挠变率达到 0.3 mm/min;2 片梁肋受火时,延火前期挠变率线性增大,延火后期挠变率非线性递增。由此说明,单侧非间隔梁肋受火的挠变率稍大于同数间隔梁肋受火的挠变率。



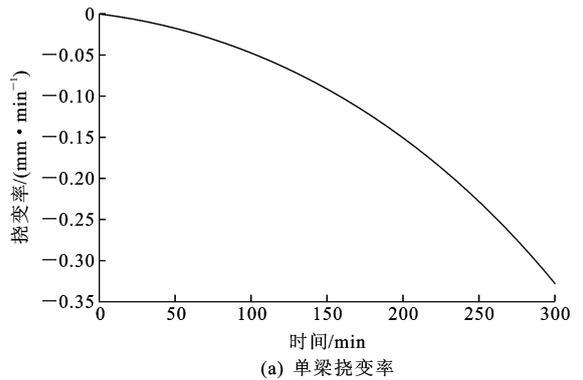
(a) 马蹄测点



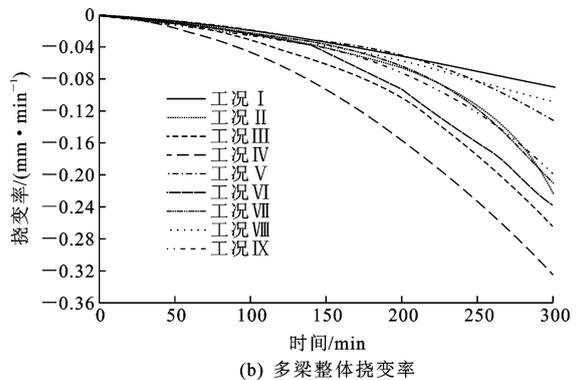
(b) 翼缘板测点

图 5 T 梁截面温度测点时程曲线

Fig. 5 Time-dependent curves of temperature measuring points for T-shaped girder



(a) 单梁挠变率



(b) 多梁整体挠变率

图 6 挠变率时程曲线

Fig. 6 Time-dependent curves of deflection variance ratio

下图 7(a)为工况 I ~ IV 单侧非间隔梁肋受火与单梁受火的挠变率差时程曲线。由图可知,单

梁受火时的挠变率与4片梁肋受火时的挠变率差保持全程零状态;单片边梁肋受火时的挠变率与单梁受火时的挠变率差值全程最大;3片单侧梁肋受火时挠变率与单梁受火时挠变率的差值全程保持线性增大;2片单侧梁肋受火时的挠变率差在延火后期比单梁受火时的挠变率差小。图7(b)为工况V~IX间隔梁肋及中肋受火时与单梁受火时的挠变率差时程曲线。由图可知,单片中梁肋受火时的挠变率与单梁受火时的挠变率差值全程最大,与单侧边梁肋受火状况一致。

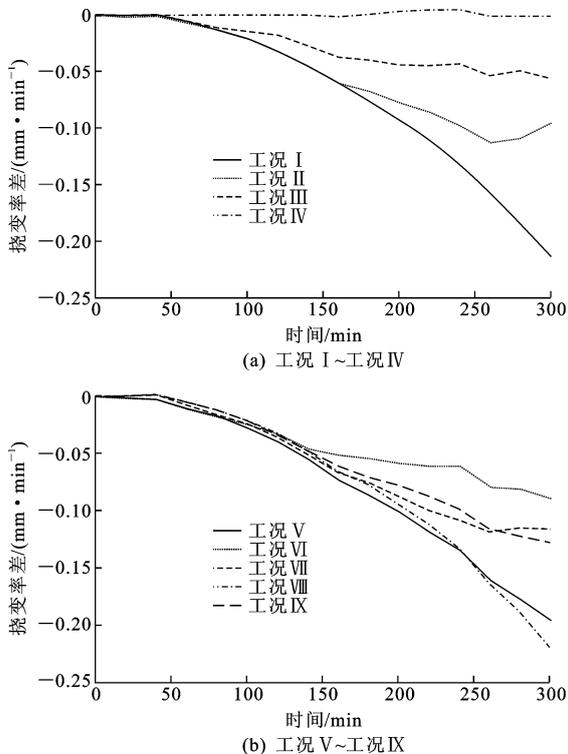


图7 挠变率差时程曲线

Fig. 7 Time-dependent curves of deflection variance ratio difference

综合图6和图7,由刚度与挠变率耦合关系可知,随着延火时间的增加,多肋受火的预应力混凝土T梁整体刚度损伤呈非线性增长,与挠变率的变化趋势一致。

## 7 结语

(1)基于梁桥受火性状建立了火温延增过程中的外荷载平衡方程和合力模型,推导得出了合力平衡转折点的挠变率与刚度衰变率关系方程,提出了刚度衰变与结构挠变率耦合计算模型。

(2)当T梁梁肋与翼缘板下部受火时,整个断面沿外层截面轮廓线由外及内逐层分布,温度峰值点出现在梁肋马蹄角点处;随火温时间的延增,梁肋

马蹄与顶板形成独立闭合的温度传递区,翼缘板边缘与马蹄角点的高温区扩展显著,直角点温度高于钝角点温度;由于负温度流的存在,混凝土T梁翼缘板边缘温度高于梁肋与顶板交界处温度;预应力钢绞线处的温度远小于迎火面温度。

(3)除单肋受火T梁挠变率线性递增外,火温全程中两肋及两肋以上受火单梁挠变率呈二次抛物线趋势递增;单侧非间隔梁肋受火T梁的挠变率稍大于同数间隔梁肋受火T梁的挠变率;随着延火时间的增加,多肋受火的预应力混凝土T梁整体刚度损伤呈非线性增长,与挠变率的变化趋势一致。

(4)火灾全程预应力混凝土T梁桥的刚度衰变研究可为预应力混凝土桥梁的灾后评价提供依据。

(5)火灾下预应力混凝土T梁桥可能会出现瞬间失稳,因此,下一步应开展火灾下预应力混凝土T梁桥的稳定性研究,以预测预应力混凝土T梁桥的垮塌时间。

## 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·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. (in Chinese)
- [2] GARLOCK M, PAYA-ZAFORTEZA I, KODUR V K R, et al. Fire hazard in bridges; review, assessment and repair strategies[J]. Engineering Structures, 2012, 35(1): 89-98.
- [3] 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)
- [4] DD ENV 1992-1-2: 1996, Eurocode 2: design of concrete structures-part 1. 2: general rules-structural fire design[S].
- [5] DD ENV 1993-1-2: 2001, Eurocode 3: design of steel structures-part 1. 2: general rules-structural fire design[S].
- [6] EN 1994-1-2: 2004, Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures-part 1-2: general rules-structural fire design[S].
- [7] CAPUA D D, MARI A R. Nonlinear analysis of rein-

- forced concrete cross-sections exposed to fire[J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(2):139-149.
- [ 8 ] KODUR V K R, DWAIKAT M. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams[J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(5):431-443.
- [ 9 ] KODUR V K R, AZIZ E, DWAIKAT M. Evaluating fire resistance of steel girders in bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(7):633-643.
- [10] AZIZ E, KODUR V K R. An approach for evaluating the residual strength of fire exposed bridge girders [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88(5):34-42.
- [11] HOU X M, KODUR V K R, ZHENG W Z. Factors governing the fire response of bonded prestressed concrete continuous beams[J]. Materials and Structures, 2014, 48(9):2885-2900.
- [12] 张昊宇, 郑文忠. 1860 级低松弛钢绞线高温下力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6):861-865. ZHANG Hao-yu, ZHENG Wen-zhong. Mechanical property of steel strand at high temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(6):861-865. (in Chinese)
- [13] 周焕廷, 李国强, 蒋首超. 高温下钢绞线材料力学性能的试验研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2008, 40(9):106-110. ZHOU Huan-ting, LI Guo-qiang, JIANG Shou-chao. Experimental studies on the properties of steel strand at elevated temperature[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(9):106-110. (in Chinese)
- [14] 朱大雷, 王振清, 乔 牧, 等. 高温下内力重分布引起的钢筋混凝土连续梁弹塑性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(2):165-172. ZHU Da-lei, WANG Zhen-qing, QIAO Mu, et al. Elastic-plastic analysis on continuous reinforced concrete beams at elevated temperatures caused by the redistribution of internal forces[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(2):165-172. (in Chinese)
- [15] 朱建明, 王晓纯, 魏 东, 等. 火灾后混凝土构件的剩余刚度估计[J]. 工程力学, 2011, 28(8):193-197. ZHU Jian-ming, WANG Xiao-chun, WEI Dong, et al. Estimation of the residual stiffnesses of fire-damaged concrete members[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8):193-197. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] 张 岗, 贺拴海. 焰流效应下混凝土空心薄壁墩热力耦合形变与层剥分析[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. (in Chinese)
- [18] 张 岗, 姜长安, 刘 扬, 等. 单侧火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构翘曲分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(2):52-57. ZHANG Gang, JIANG Chang-an, LIU Yang, et al. Analysis of buckling for pre-stressed concrete multi-beam T-shaped structure exposed to unilateral fire [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(2):52-57. (in Chinese)
- [19] 张柳煜, 邵晓光, 李启乾. 粘贴加固材料厚度与钢筋混凝土 T 梁极限承载力分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(7):67-69. ZHANG Liu-yu, WU Xiao-guang, LI Qi-qian. Analysis on thickness of reinforcement material and ultimate bearing capacity of RC T-section beams strengthened with steel plate and CFRP[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(7):67-69. (in Chinese)
- [20] 张 岗, 贺拴海, 刘 扬, 等. 爆燃火灾全程下多梁式 PC T 型梁桥剪力滞效应[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2014, 34(6):79-84. ZHANG Gang, HE Shuan-hai, LIU Yang, et al. Shear-lag effect of multi-beam prestressed concrete T-shaped girder bridge exposed to explosion fire[J]. Journal of Chang'an University: Nature Science Edition, 2014, 34(6):79-84. (in Chinese)