

文章编号:1673-2049(2015)02-0052-06

# 单侧火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构翘曲分析

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

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075;  
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:**为研究火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构翘曲形态,建立了梁肋单侧火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构的火灾模型,给出了翘曲计算方法,采用 ANSYS 分析了梁肋单侧火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构翘曲规律。研究结果表明:边肋外侧受火时,边肋在四分点的横桥向凸翘显著,沿纵桥向翘曲呈 W 型,桥面板呈单侧翼缘板翘曲或双侧翼缘板翘曲形态;边中肋间受火时,梁肋横桥向翘曲呈 V 型,翘曲值大;中肋间受火时,梁肋横桥向翘曲呈倒 W 型,桥面板形成受火区鼓包形态;所得结论可为预应力混凝土多梁肋 T 型结构火灾后评估提供科学依据。

**关键词:**结构工程;预应力混凝土;多梁肋 T 型结构;单侧火灾;翘曲;翼缘板

**中图分类号:**U443.35 **文献标志码:**A

## Analysis of Buckling for Pre-stressed Concrete Multi-beam T-shaped Structure Exposed to Unilateral Fire

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

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, 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:** In order to study the shape of buckling for pre-stressed concrete multi-beam T-shaped structure exposed to fire, the fire model for pre-stressed concrete multi-beam T-shaped structure exposed to unilateral fire was proposed, and the buckling calculation method was put forward. Moreover, the buckling law for pre-stressed concrete multi-beam T-shaped structure exposed to unilateral fire of girder was analyzed by ANSYS. The study results indicate that when bias girder is exposed to unilateral fire, transverse buckling of girder at quartile is obvious, it presents W-shape along longitudinal bridge span, deck presents a shape of buckling for single flange plate or double flange plates. Transverse buckling of girder presents V-shape when girder exposed to fire between bias and middle girders, its buckling value is high. Transverse buckling of girder presents a reversed W-shape when girder exposed to fire between middle girders, deck presents a convex shape. The obtained conclusion can provide scientific reference for estimating the pre-stressed concrete multi-beam T-shaped structure after fire.

**Key words:** structure engineering; pre-stressed concrete; multi-beam T-shaped structure; unilateral fire; buckling; flange plate

收稿日期:2014-07-21

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);  
国家留学基金项目(201406565013)

作者简介:张 岗(1980-),男,甘肃庆阳人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:zhangg\_2004@126.com。

0 引 言

桥梁火灾是概率事件,从概率上讲,桥梁火灾又是一必然事件。T 型梁桥在中国桥梁建设中以其结构优势占有绝对数量<sup>[1-4]</sup>,因此 T 型梁桥发生火灾的概率相对较高,轻则维修,重则拆除,造成了资源的严重浪费,若要对桥梁火灾很好地把控,必须了解火灾下桥梁结构的力学效应,方可形成整套预测与评价技术。目前对桥梁结构火灾仍还停留在认识层面,未做太多透彻分析与深入研究,致使桥梁结构火灾体系形成缓慢<sup>[5]</sup>。各国关于钢筋混凝土梁和板的研究相当丰富,Kodur 等<sup>[6-7]</sup>分析了钢筋混凝土梁的力学行为,提出了预测钢筋混凝土梁耐火时间的数值模型;董毓利<sup>[8]</sup>通过考虑薄膜效应提出了钢筋混凝土板的极限承载力计算方法;傅传国等<sup>[9]</sup>基于截面单元法提出了火灾高温下预应力型钢混凝土抗弯承载力的简化计算公式。各国关于预应力混凝土梁式结构的研究资料匮乏,张昊宇等<sup>[10]</sup>研究了适用于预应力桥梁结构的 1860 级钢绞线的力学性能,李世安<sup>[11]</sup>对火灾过程预应力混凝土梁桥力学性能进行了研究,李刚等<sup>[12]</sup>研究了无粘结预应力框架在火灾下的高温反应状况;高立堂等<sup>[13]</sup>对火灾后三跨无粘结预应力混凝土连续板进行了性能试验研究;张岗等<sup>[14-18]</sup>针对桥梁结构的环境火灾特性,建立了适用于桥梁结构开放空间的环境火灾模型,研究了环境火灾下混凝土空心薄壁墩的温度时程分布及桥面火灾全程中钢筋混凝土多肋 T 型梁桥的温度分布状况和跨中梁体的空间变形规律,采用数值模拟的方法分析了整肋火灾下预应力混凝土多肋 T 型梁桥的桥面平整度,揭示了多种火灾过程中多梁桥的整体力学特性。以上研究涉及钢筋混凝土梁和板、预应力混凝土梁和板的高温力学性能以及预应力桥梁

材料的高温力学特性,或涉及桥面和整肋火灾下混凝土梁桥的高温力学行为,但未涉及畸形火灾下多肋预应力混凝土梁桥的力学效应,未给出其空间翘曲形态。本文综合混凝土和预应力钢束材料特性<sup>[10-11]</sup>,在相关研究基础上<sup>[16-19]</sup>,研究梁肋单侧火灾下预应力混凝土 T 型结构翘曲规律,研究结果可为预应力混凝土多梁肋 T 型结构抗火设计和灾后评估提供依据。

1 温升曲线与边界条件

燃烧曲线的表达式<sup>[6-7]</sup>如下  
$$T_t=1\,296\times(1-0.325e^{-\frac{t}{6}}-0.675e^{-2.5t})+T_0$$
 (1)  
式中: $t$  为时间; $T_t$  为受火温度; $T_0$  为初始温度。

复合边界条件为  
$$q=\beta(T_s-T_a)+\nu\delta(\alpha e_aT_a^4-e_sT_s^4)$$
 (2)  
式中: $q$  为热流量; $\beta$  为对流换热系数<sup>[14]</sup>; $T_s$  为混凝土表面温度; $T_a$  为环境平均温度; $\nu$  为混凝土表面黑度系数, $\nu=0.94$ ; $\delta$  为辐射系数, $\delta=5.667\times10^{-8}\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)^{-1}$ ; $\alpha$  为表面吸热系数, $\alpha=0.95$ ; $e_a$  为火表面发热系数, $e_a=1.0$ ; $e_s$  为混凝土表面散热系数, $e_s=0.95$ 。

2 材料特性与工程特点

2.1 材料特性  
根据相关研究文献[9]~[15],混凝土和预应力钢筋的热力参数如表 1 所示。

2.2 工程特点  
某预应力混凝土多肋 T 型梁桥的横断面如图 1 所示。该桥横桥向为由 4 片预应力混凝土 T 型梁组成的多梁肋 T 型结构,单片梁宽度为 2.4 m,桥面总宽度为 9.6 m,等跨简支体系,计算跨径长度为 20.0 m,单跨在跨中和四分点处各设置横隔板 1

表 1 材料热力参数

Tab.1 Thermal Mechanics Parameters for Material								
材料类型	温度/℃	导热系数/ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	比热容/ [J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	热膨胀系数/ 10 <sup>-6</sup>	强度折减 系数	弹性模量 折减系数
混凝土	20	1.6	850	2 489	0.15	6.000	1.000	1.000
	200	1.5	939	2 388	0.15	8.000	1.000	0.700
	600	1.2	1 136	2 164	0.15	11.000	0.584	0.370
	1 000	0.9	1 334	1 940	0.15	14.000	0.192	0.280
预应力 钢筋	20	53.3	440	7 850	0.30	6.160	1.000	1.000
	200	47.3	530	7 850	0.30	7.600	1.000	0.870
	600	34.0	760	7 850	0.30	10.800	0.400	0.240
	1 000	27.3	650	7 850	0.30	14.000	0.050	0.030

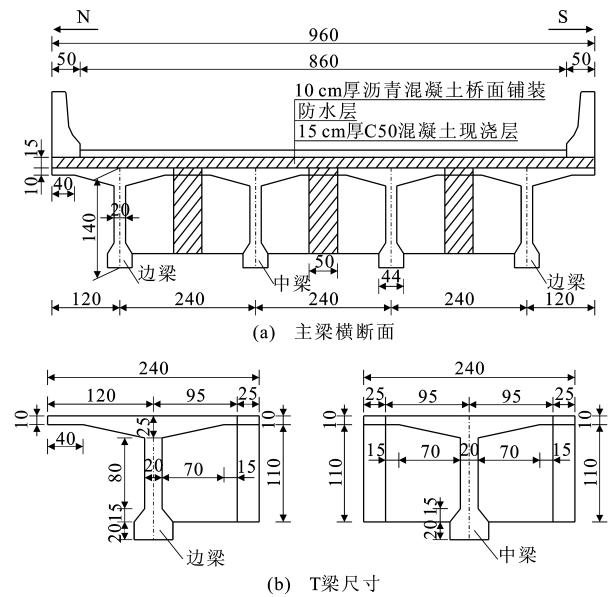


图 1 横断面 (单位: cm)

Fig. 1 Cross Section (Unit: cm)

道,混凝土桥面铺装层视为自重荷载。由相关资料可知<sup>[16]</sup>:单片 T 型结构梁肋厚度为 20 cm,梁肋高度为 140 cm,翼缘板根部高度为 25 cm,端部高度为 10 cm;混凝土保护层厚度为 5.0 cm;预应力钢束管道中心至混凝土边缘的距离为 10 cm;主梁的混凝土标号为 C50。

对于多梁肋结构,主要分析其各片梁肋在某种

表 2 预应力混凝土多梁肋 T 型结构翘曲变形工况

Tab. 2 Buckling Deformation Conditions for Pre-stressed Concrete Multi-beam T-shaped Structure

荷载工况编号	梁肋受火面				火源长度	受火位置	计算内容	自重荷载	受火温度
	R1	R2	R3	R4					
WD1	N				整跨梁肋	结构下部	面板翘曲/梁肋翘曲	G	T <sub>i</sub>
WD2	N			N	整跨梁肋	结构下部	面板翘曲/梁肋翘曲	G	T <sub>i</sub>
WD3		S	N		整跨梁肋	结构下部	面板翘曲/梁肋翘曲	G	T <sub>i</sub>
WD4			S	N	整跨梁肋	结构下部	面板翘曲/梁肋翘曲	G	T <sub>i</sub>

3.2 火灾模型

图 2 为梁肋单侧火灾模型。所谓单侧火灾模型即梁肋的一侧受到火场作用,另一侧处于背火面,图 2 中的火灾模型与工况 WD1 类似。由图 2 可知,在采用有限元软件 ANSYS 进行翘曲时程曲线分析时,梁肋桥跨方向时程捕捉 Path1 和 Path2,在跨中桥面横桥向时程捕捉 Path3,在桥跨方向时程捕捉 Path4。

4 翘曲分析

4.1 桥面板翘曲

图 3 为火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构桥面翘曲情况。

荷载下的相互影响的力学性能。假设该 T 型梁桥跨为东西走向,横桥向为南北走向,图 1 中的 N 和 S 分别表示梁桥横桥向的北、南 2 个方向,以便于梁肋受火面的标注。

3 工况算法与火灾模型

3.1 工况算法

预应力混凝土多肋 T 型结构桥面和梁肋翘曲变形时程函数关系为

$$\left. \begin{aligned} D_{\max,t} &= \max(D_{i,k}) = f(T_t, G, t) \\ D_{\min,t} &= \min(D_{i,k}) = f(T_t, G, t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\max,t} &= \max(R_{i,k}) = f(T_t, G, t) \\ R_{\min,t} &= \min(R_{i,k}) = f(T_t, G, t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $D_{\max,t}$ 为任意时刻桥面板的最大变形值; $D_{\min,t}$ 为任意时刻桥面板的最小变形值; $R_{\max,t}$ 为任意时刻梁肋的横桥向最大变形值; $R_{\min,t}$ 为任意时刻梁肋的横桥向最小变形值; $D_{i,k}$ 为任意时刻顶板竖向变形值; $R_{i,k}$ 为任意时刻梁肋横桥向变形值; $i$ 表示桥面板的单元节点; $k$ 表示火荷载工况,用 WD1~WD5 表示; $G$ 为自重荷载。

表 2 为预应力混凝土多梁肋 T 型结构翘曲变形工况,其中 R1,R2,R3,R4 均为梁肋的编号,各梁肋在 N 或 S 方向侧向受火。

由图 3 可知:单边肋和两边肋外侧受火时,边 T 梁外侧翼缘板属于开口结构,在火灾高温作用下,外侧纤维增长,外 T 口有张开的趋势,所以边 T 梁外侧翼缘板向上翘曲,桥面板形成单侧翘曲或双侧翘曲形态,单侧翘曲分别为-3.7,3.9 cm,双侧翘曲峰值分别约为-3.0,6.0 cm,翼缘板的翘曲会导致翼缘板边缘产生裂缝;中间梁肋单侧受火时,中 T 梁翼缘板属于闭口结构,在火灾高温作用下,受火区域内侧膨胀,桥面板形成受火区鼓包形态,产生薄膜效应,导致鼓包区域开裂,WD3 工况下翘曲峰值分别约为-3.6,3.4 cm;WD4 工况下翘曲峰值分别约为-5.9,3.5 cm。由此可知,两边肋外侧受火时,桥面板两侧凸翘显著,桥面板呈 U 型,桥面板的翘曲会

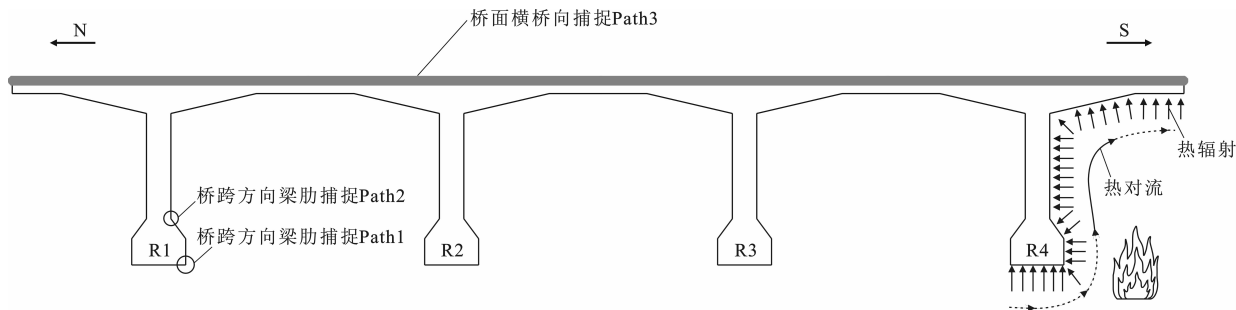


图 2 梁肋单侧火灾模型

Fig. 2 Unilateral Fire Model of Girder

导致沿桥翘曲点开裂,形成开裂面。

#### 4.2 梁肋翘曲

图 4 为火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构梁肋翘曲形态。由图 4 可知:选择梁肋马蹄处的上下 2 条桥跨方向路径计算其在延火期间沿横桥向的变化状况,WD1 和 WD2 工况下 4 片预应力混凝土多梁肋 T 型结构边肋在四分点处的横桥向凸翘显著,端横隔板处梁肋横桥向不翘曲,中横隔板处梁肋相对四分点处翘曲较小,桥跨方向的梁肋沿横桥向的翘曲呈 W 型;由于梁肋数与受火位置的影响,WD3 工况下受火边肋的横桥向翘曲呈 V 型,其翘曲值较其他工况大,可达 5.5 cm;WD4 工况下受火中肋的横桥向翘曲呈倒 W 型。根据火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构梁肋翘曲状况,可以推测结构作用火荷载的时间,从而对火灾高温场进行评判,实现梁体灾后评估。

### 5 结 语

(1)基于火灾温升曲线,建立了梁肋单侧火灾模型,给出了梁肋与面板的空间翘曲变形计算方法,采用数值模拟的方法分析了梁肋单侧火荷载下预应力混凝土 T 型梁式结构的空间翘曲形态,揭示了梁肋单侧火荷载下预应力混凝土 T 型梁式结构的空间翘曲形态分布规律。

(2)边肋外侧受火时,外侧翼缘板向上翘曲,桥面板形成单侧翘曲或双侧翘曲形态;中间梁肋单侧受火时,受火区域内侧膨胀,桥面板形成受火区鼓包形态。

(3)边肋外侧受火时 4 片预应力混凝土多梁肋 T 型结构边肋在四分点处的横桥向凸翘显著,端横隔板处梁肋横桥向不翘曲,中横隔板处梁肋翘曲较四分点处小,整个梁肋纵桥向的翘曲呈 W 型;边中肋之间受火时横桥向翘曲呈 V 型,其翘曲值大;中肋间受火时横桥向翘曲呈倒 W 型。

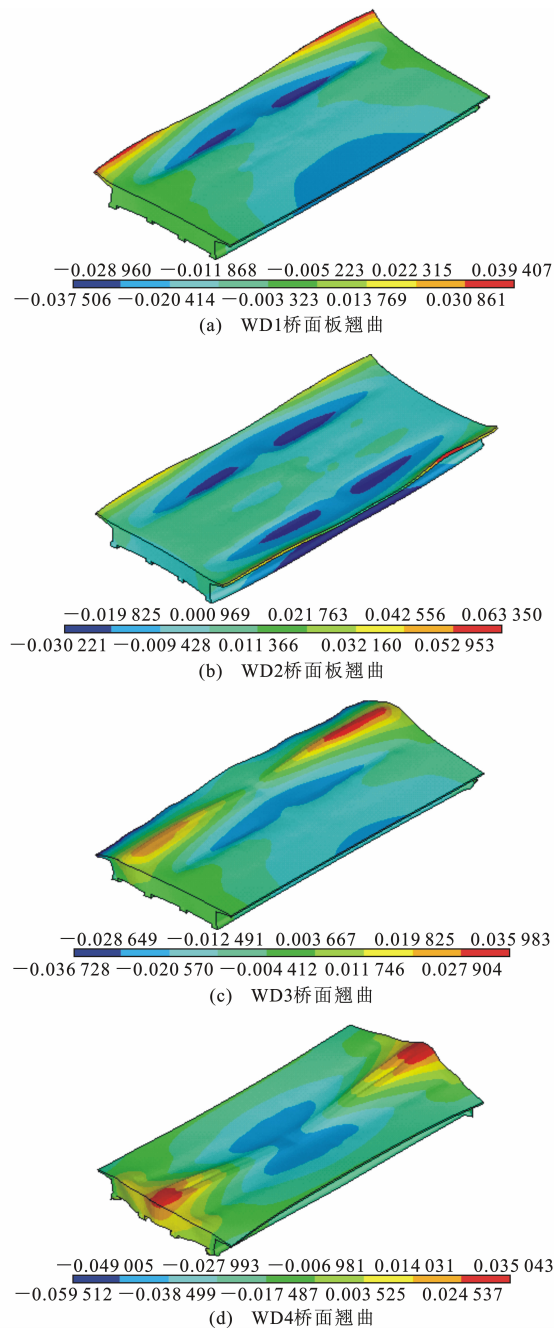


图 3 各工况下桥面翘曲情况 (单位:m)

Fig. 3 Buckling of Deck at Each Condition (Unit:m)

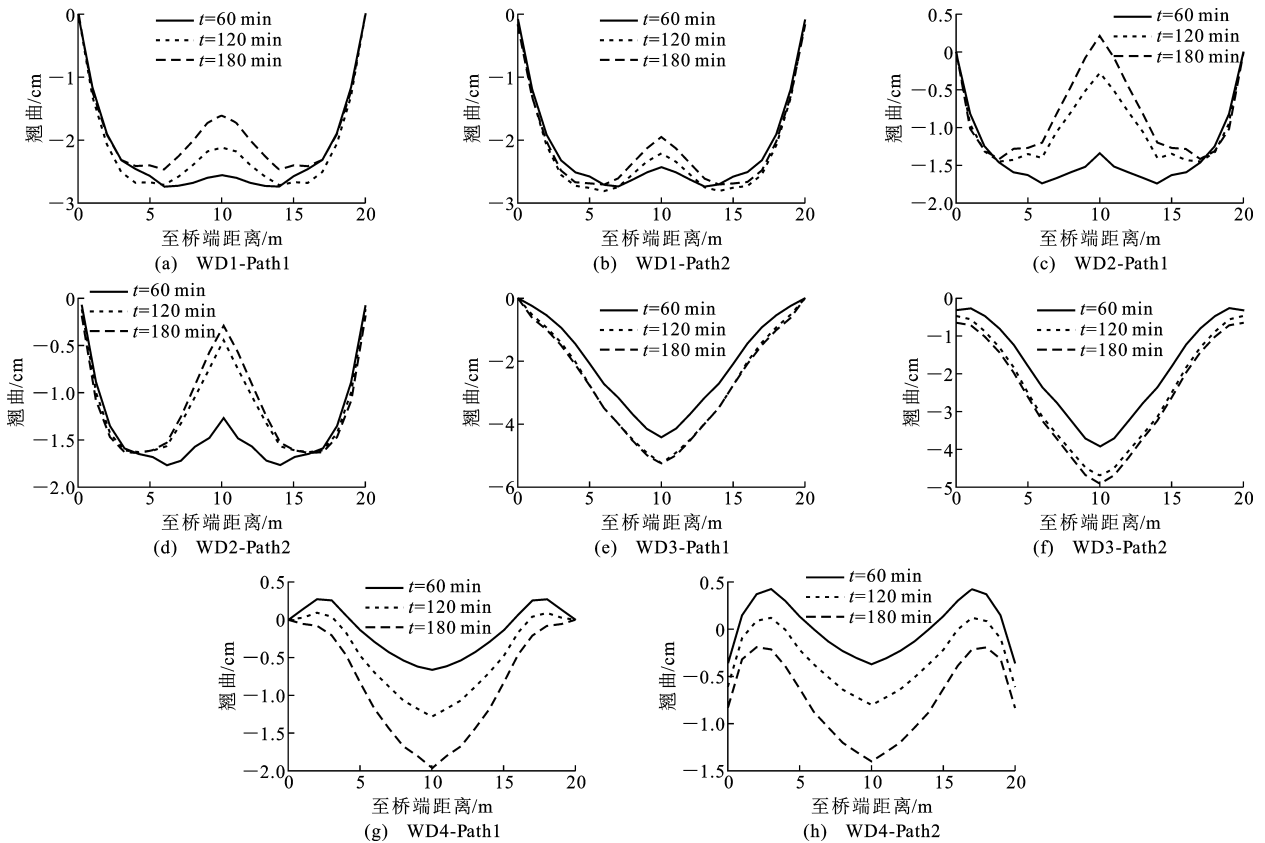


图 4 各工况下梁肋翘曲形态

Fig. 4 Shape of Buckling of Girder at Each Condition

(4)根据火灾下预应力混凝土多梁肋 T 型结构梁肋翘曲状况,可以推测结构受火荷载的时间,从而对火灾高温场进行评判,实现梁体灾后评估。

参考文献:

References:

[1] 陈小英,李唐宁,黄 音,等. CFRP 体外预应力加固钢筋混凝土 T 型梁试验[J]. 中国公路学报,2010,23(2):56-63.  
CHEN Xiao-ying,LI Tang-ning,HUANG Yin,et al. Experiment on Reinforced Concrete T-beams Strengthened with External Prestressed CFRP Sheets[J]. China Journal of Highway and Transport,2010,23(2):56-63.

[2] 罗晓瑜,陈艾荣,吴怀义,等. 山区高墩 T 梁桥桥墩价值工程研究[J]. 中国公路学报,2013,26(5):115-120.  
LUO Xiao-yu,CHEN Ai-rong,WU Huai-yi,et al. Value Engineering Study on High Piers of T-beam Bridges in Mountain Areas [J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(5):115-120.

[3] 李海青,杨万里,高 璇. 预应力混凝土薄壁高墩刚构桥梁极限承载力分析[J]. 中国公路学报,2013,26

(6):128-134.

LI Hai-qing,YANG Wan-li,GAO Xuan. Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Pre-stressed Concrete Frame Bridge with High Piers[J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(6):128-134.

[4] 管俊峰,赵顺波,李晓克,等. 钢筋混凝土梁裂缝宽度试验与计算方法[J]. 中国公路学报,2011,24(5):74-81.  
GUAN Jun-feng,ZHAO Shun-bo,LI Xiao-ke,et al. Experiment and Calculation Method of Crack Width of Reinforced Concrete Beams[J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(5):74-81.

[5] 《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.

[6] KODUR V K R,DWAIKAT M T. Fire Performance of Reinforced Concrete Beams Under Design Fire Exposure[C]//ASCE. Structure Congress 2008:Crossing Borders. Vancouver:ASCE,2008:1-10.

[7] KODUR V,DWAIKAT M. A Numerical Model for

- Predicting the Fire Resistance of Reinforced Concrete Beams[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(5): 431-443.
- [8] 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.
- [9] 傅传国, 商圣强, 王玉镯, 等. 火灾下预应力型钢混凝土梁抗弯承载力计算[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(4): 625-631, 658.  
FU Chuan-guo, SHANG Sheng-qiang, WANG Yu-zhuo, et al. Bending Bearing Capacity Calculation of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beam Under Fire[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(4): 625-631, 658.
- [10] 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.
- [11] 李世安. 火灾过程预应力混凝土梁桥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.
- [12] 李 刚, 陆洲导, 许立新. 无粘结预应力混凝土框架火灾下的温度反应分析[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(1): 4-6.  
LI Gang, LU Zhou-dao, XU Li-xin. Temperature Response Analysis of Unbonded Prestressed Reinforced Concrete Frame Structure Subjected to Fire [J]. Sichuan Building Science, 2004, 30(1): 4-6.
- [13] 高立堂, 李晓东, 陈礼刚, 等. 无黏结预应力混凝土连续板火灾后的试验研究[J]. 混凝土, 2008(2): 25-27, 53.  
GAO Li-tang, LI Xiao-dong, CHEN Li-gang, et al. Experimental Investigation of the Behaviors of Unbonded Prestressed Concrete Continuous Slabs After Fire[J]. Concrete, 2008(2): 25-27, 53.
- [14] 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.
- [15] 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-shaped Girder Bridge Exposed to Deck Fire [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(5): 52-56.
- [16] 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.
- [17] 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, 36(7): 96-101.  
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, LIU Yang, et al. Analysis of Deck Roughness for Pre-stressed Concrete Multi-beam T-shaped Girder Bridge Exposed to Fire [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(7): 96-101.
- [18] 张 岗, 贺拴海, 刘 扬, 等. 爆燃火灾全程下多梁式PCT型梁桥剪力滞效应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(6): 52-56.  
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: Natural Science Edition, 2014, 34(6): 52-56.
- [19] 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.