

文章编号:1673-2049(2016)03-0065-07

火灾条件下混凝土箱梁梁端预应力衰变规律

张 岗^{1,2}, 刘天龙^{1,2}, 施 颖³, 宣纪明⁴

(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. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 4. 浙江工业大学工程设计集团有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对火灾下混凝土梁桥截面损伤所导致的梁端预应力损失问题,研究了火灾高温传导模式和热传导混合边界条件,设定了预应力混凝土箱梁的火灾场景,给出了混凝土高温强度与刚度的衰减模型和烧损层计算方法;采用热力耦合计算方法和子模型分析方法计算了不同火灾场景中混凝土箱梁梁端区域钢束预应力时程变化曲线;通过工程实例分析了混凝土箱梁梁端截面不同钢束预应力的时变状态,揭示了火灾条件下混凝土箱梁梁端预应力衰变规律;通过曲线的最优与最差拟合及比较分析,提出了混凝土箱梁梁端预应力衰变计算公式。结果表明:处于箱梁梁端腹板上部的钢束预应力变化趋势受梁底部火灾面积的影响,梁底部受火面积较小时,随延火时间的增加逐渐增大,增加趋势平缓,梁底部受火面积增大时,随延火时间的增加平缓衰减;处于箱梁梁端腹板中部的钢束预应力随延火时间的增加始终呈减小趋势,处于腹板下部的钢束预应力随延火时间的增加下降幅度较大,延火至120 min时梁端钢束预应力的衰减终值介于常温下初值的94%~96%;提出的混凝土箱梁梁端预应力衰变计算公式简洁,可为类似预应力混凝土箱梁端部结构的抗火设计提供基础数据。

关键词:桥梁工程;混凝土箱梁;有限元法;预应力;火灾条件;高温

中图分类号:U448.213

文献标志码:A

Decay Law of Prestress at Concrete Box Girder End Under Fire Condition

ZHANG Gang^{1,2}, LIU Tian-long^{1,2}, SHI Ying³, XUAN Ji-ming⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Bridge Detection Reinforcement Technology of Ministry of Communications, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Zhejiang University of Technology Engineering Design Group Co., Ltd, Hangzhou 310014, Zhejiang, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: In view of the problem of prestress loss at girder end caused by section damage of concrete beam bridge under fire, the conduction mode of high temperature in fire and the mixed boundary conditions of heat conduction were studied. The fire scene in prestressed concrete box girder was set, and the decay model for strength and stiffness of concrete in high temperature and calculation method of burning damage layer were proposed. The time-history variation curves of steel strands prestress at concrete box girder end in different fire scenes were calculated by means of thermo-mechanical coupled method and sub-model analysis method. The time varying state of

收稿日期:2015-11-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51308056);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(2014G2210003,2013G2211004,2014G2213002,310821161009)

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。

different steel strands prestress of concrete box girder end section was analyzed through engineering example. The decay law of prestress at concrete box girder end under fire condition was revealed. The calculation formula of prestress decay at concrete box girder end was put forward through comparison and analysis of the best and worst fitting curves. The results show that the variation trend of steel strands prestress in the upper part of web at box girder end is affected by fire area. The prestress increases with the increase of fire time when the fire area is smaller at the bottom of beam, and the increase trend is gentle. The prestress gradually decays with fire time extension when fire area enlarges at the bottom of beam. The steel strands prestress in the middle of web at box girder end always decreases with the increase of fire time. The steel strands prestress in the lower part of web decreases obviously with the increase of fire time. The final decay value of steel strand prestress at girder end is 94%-96% of initial value at normal temperature when fire time is 120 min. The proposed calculation formula of prestress decay at concrete box girder end is simple, and can provide basic data for fire resistance design of similar end structure of prestressed concrete box girder.

Key words: bridge engineering; concrete box girder; finite element method; prestress; fire condition; high temperature

0 引言

预应力混凝土桥梁遭遇火灾受损后导致截面不同部位钢束中有效预应力变异,严重影响结构应力的正常分布,威胁预应力混凝土桥梁的安全性能,因此预应力混凝土桥梁的防火性能受到学者的重点关注,尤其是火灾高温下混凝土桥梁的预应力衰变需要进一步研究^[1]。混凝土箱梁墩顶反弯处的预应力储备值对整座桥梁抗力性能至关重要,相关调研资料显示,预应力桥梁下部受火后,由于结构性能的变化致使梁端墩顶处预应力管道附近的混凝土易爆裂,周围混凝土大面积剥落,所以有必要对火灾下混凝土箱梁梁端墩顶反弯处钢束预应力变化趋势进行深入研究。目前,各国学者的研究大都集中在预应力混凝土梁桥的防火性能,实现其准确的灾后评价及防火设计。Garlock 等^[2]总结了近年来美国桥梁火灾的特点,分析了桥梁火灾的特性,并通过实例给出了桥梁火灾后安全性能的评价方法和策略;Franssen 等^[3-4]均采用数值分析方法对结构的防火性能进行了分析,给出了较好的非线性迭代计算方法;在钢结构和混凝土结构的防火设计方面,国外已有多部规范给出了丰富的材料高温特性,并提出了预制预应力混凝土的防火设计方法^[5-6];Kodur 等^[7-8]总结了先前规范中有关桥梁防火设计方面的严重不足,调查了美国等国家桥梁火灾发生的原因,研究了决定桥梁耐火性能的几个主要内部参数,给出了不同重要性的桥梁安全评价方法。张昊宇等^[9]

通过对 1860 级低松弛钢绞线高温下的试验研究,提出了高温下 1860 级钢绞线中钢丝的多种力学性能计算公式;周焕廷等^[10]通过试验得到了钢绞线高温下的应力-应变关系、屈服强度、抗拉强度及弹性模量计算数据;侯炜^[11]通过几组试验测试了火灾高温下预应力模型梁的锚下应力变化。张岗等^[12-16]分析了混凝土高温传导及层剥机理,提出了火灾高温下预应力混凝土桥梁结构的非线性分析方法,研究了火灾下预应力混凝土薄腹梁的刚度衰变和支点钢束的预应力衰变速率,朱建明等^[17]给出了单面受火时构件等效刚度估算方法。虽然各国学者对预应力混凝土桥梁的材料高温力学性能及结构力学性能进行了许多研究工作,但对火灾高温下预应力混凝土桥梁的预应力损失未做深入研究,其火灾高温下有效预应力目前尚不明确。本文考虑混凝土材料强度和刚度损失分层折减,在箱梁支点钢束模拟方法和预应力衰变率等^[15-16]相关研究基础上分析火灾条件下箱梁梁端预应力的衰变规律,可为预应力桥梁防火实用设计方法提供依据。

1 温度场计算

考虑交通火灾的发生类型^[2-5],以及梁端附近桥墩对于温度场的影响,则梁端支座附近的火灾升温曲线计算取如下公式

$$T_i = T_0 + 750[1 - \exp(-3.795\ 53\sqrt{t_m})] + 170.41\sqrt{t_m} \quad (1)$$

式中: T_f 为火场温度; T_0 为初始温度; t_m 为火灾发生持续的时间。

热传导计算公式如下^[2-5]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \tag{2}$$

式中: T 为受热体表面温度; ρ 为密度; c 为比热容; t 为时间; k 为导热系数; ∇^2 为拉普拉斯算子; Q 为火源内部发热量。

图 1 为截面热交换边界条件。由图 1 可知,火灾温度场与受火体之间的热交换由对流换热和热辐射组成,计算公式如下

$$q = \alpha_c (T - T_f) + \epsilon \delta (T^4 - T_f^4) \tag{3}$$

式中: q 为热流量; α_c 为对流换热系数,取值为 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; ϵ 为热辐射系数,取值为 0.95; δ 为 Stefan-Botamann 常量,其值为 $5.667 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$ 。

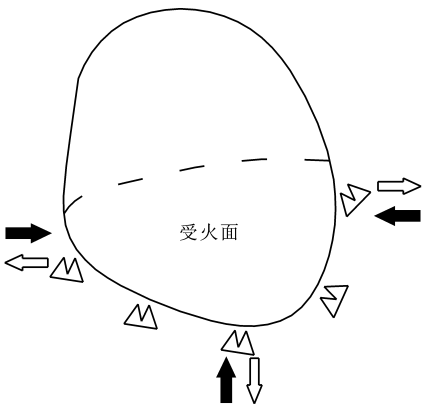


图 1 截面热交换边界条件

Fig. 1 Boundary Condition of Heat Transfer for Section

2 工程实例与模型建立

2.1 工程实例

为研究预应力混凝土连续梁桥墩顶处钢束在火灾高温下的预应力变化状况,以某工程实例为背景,选任意跨设置火灾场景进行分析。图 2 为箱梁构造和钢束布置(其中,N1,N2,N3 均为钢束编号),跨径布置为 $16 \text{ m} + 20 \text{ m} + 16 \text{ m}$,桥面宽度为 7.5 m ,底板宽度为 3.6 m ,截面为单箱单室。截面高度为 1.15 m ,顶板厚度为 0.2 m ,悬臂板端部厚度为 0.15 m ,根部厚度为 0.3 m ,腹板厚度为 0.3 m ,底板中间厚度为 0.2 m ,底板与腹板交合部位厚度为 0.4 m ,箱室内部上梗腋尺寸为 $750 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,下梗腋尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。混凝土强度为 C50,钢绞线为 1860 级,锚下控制应力为 1395 MPa ,对称张拉,钢筋为 $\phi 16$ 的 HRB335 I 级钢。

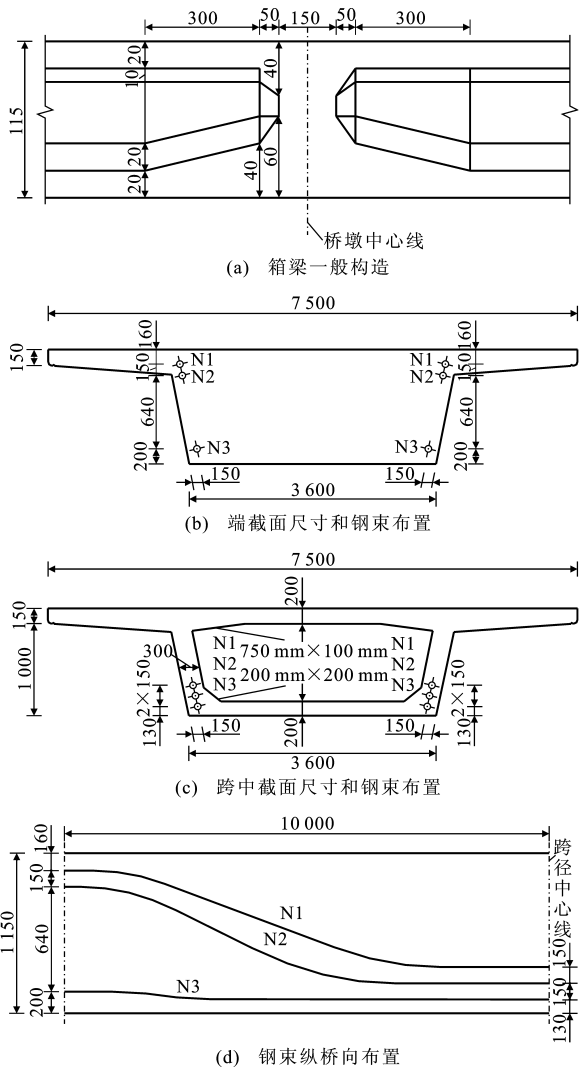


图 2 箱梁构造和钢束布置(单位:mm)

Fig. 2 Construction of Box Girder and Steel Strands Arrangement (Unit:mm)

2.2 模型建立

采用大型结构有限元软件 ANSYS 建立混凝土箱梁有限元模型,先对预应力混凝土箱梁截面的温度场进行分析。为了保证截面温度计算的准确性,并提高整体模型的计算效率,将子模型技术应用于关心区域的计算分析中,关心区域采用精细网格划分,其余区域采用粗略网格划分。图 3 为预应力混凝土箱梁有限元模型。选择其半跨进行剖析,关心区域采用扫掠网格进行划分,网格尺寸为 $0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$,如此便可得到预应力钢束和普通钢筋处的温度值;跨中区域也采用扫掠网格划分,其网格尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,中间部分采用自由网格过渡,然后根据截面温度分布特征对截面进行烧损层计算,为强度分析提供数据。为细化热传导方向的温度分布,温度梯度方向采用精细网格,其余采用粗略网格。

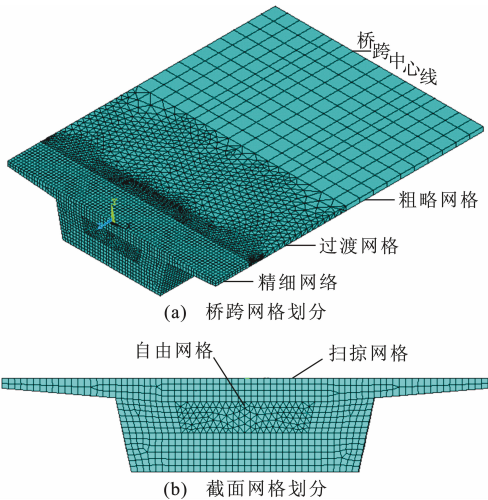


图 3 预应力混凝土箱梁有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model of Prestressed Concrete Girder

3 材料高温特性与计算条件

3.1 材料高温特性

分析火灾下预应力混凝土箱梁的高温效应首先要明确混凝土、普通钢筋和 1860 级预应力钢束的材料高温特性,根据欧洲火灾后材料高温特性^[4-6,11]可得到混凝土和普通钢筋的热力参数,根据文献[9],[10]可得到预应力钢筋的高温热力参数,见表 1。

3.2 火灾场景

针对不同火灾场景下的混凝土箱梁梁端预应力变化状况,设定桥梁受火相应场景(表 2),从而得到火灾计算工况。根据桥梁火灾的发生规律,基于刚度折减和强度折减,拟定 4 个计算工况对混凝土箱梁梁端预应力进行火灾场景计算分析,并比较其高

表 1 材料热力参数

Tab. 1 Thermo-dynamics Parameters of Materials

材料	温度/℃	导热系数/ [W·(m·℃) ⁻¹]	比热容/ [J·(kg·℃) ⁻¹]	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	热膨胀系数/ 10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	强度折减 系数	弹性模量 折减系数
混凝土	20	1.58	867	2 400	0.15	6.350	1.000	1.000
	500	0.92	1 131	2 190	0.15	14.750	0.778	0.386
	1 000	0.58	1 194	1 997	0.15	16.500	0.032	0.280
普通钢筋	20	53.33	440	7 850	0.30	11.115	1.000	1.000
	500	37.35	1 091	7 850	0.30	13.875	0.597	0.600
	1 000	20.70	616	7 850	0.30	16.750	0.009	0.045
1860 级 预应力 钢束	20	53.30	440	7 850	0.30	7.600	1.000	1.000
	200	47.30	530	7 850	0.30	11.400	0.739	0.878
	400	40.70	606	7 850	0.30	15.600	0.346	0.471
	600	34.00	760	7 850	0.30	19.800	0.058	0.079

表 2 火灾场景设置

Tab. 2 Setting of Fire Scene

场景编号	工况代码	计算部位	计算内容代码		受火位置					火源长度/m
			强度	刚度	BF	OSW	ODW	OSFP	ODFP	
1	PDF1	梁端	PDF1-S	PDF1-E	◎					20
2	PDF2	梁端	PDF2-S	PDF2-E	◎	◎				20
3	PDF3	梁端	PDF3-S	PDF3-E	◎	◎		◎		20
4	PDF4	梁端	PDF4-S	PDF4-E	◎		◎		◎	20

注:◎表示该位置受火。

温变化形式。表 2 中混凝土箱梁的受火面为底板下部(BF)、单侧腹板外部(OSW)、双侧腹板外部(ODW)、单侧翼缘板底部(OSFP)和双侧翼缘板底部(ODFP),受火面积由设定的火灾场景 1 至火灾场景 4 逐渐增加。

图 4 为预应力混凝土箱梁温度场计算曲线。由图 4 可知,在前 5 min 内温度可达到 600 ℃,5 min 后升温相对比较平缓。将此温度施加于预应力混凝

土箱梁受火面的有限元模型节点上,与公式(1)的温度计算相吻合,设置相应的热交换边界条件,输入热交换系数和热辐射系数,通过公式(2)的传导方式进行相应时间点的温度分布分析。

3.3 烧损层计算

根据预应力混凝土箱梁的截面温度分析结果,按照截面温度分布特征,将温度按不同延火时间进行分层,以不同温度层下截面材料的弹性模量和强

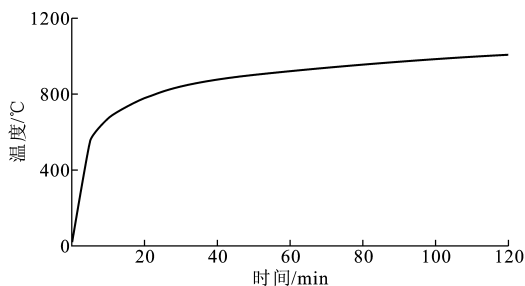


图 4 预应力混凝土箱梁温度场计算曲线

Fig. 4 Calculation Curve of Temperature Field of Prestressed Concrete Box Girder

度为计算要求得到每层材料对整体截面的贡献情况。图 5 为烧损层换算模型,基于常温下材料等效强度和等效刚度换算可得烧损层计算公式为

$$\left. \begin{aligned} E_0 A_0 &= \sum_{i=1}^N E_i A_i \\ E_0 I_0 &= \sum_{i=1}^N E_i A_i d_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_0 A_0 = \sum_{i=1}^N \sigma_i A_i \quad (5)$$

式中: E_0 为常温下材料弹性模量; A_0 为常温下截面有效面积; N 为截面上按温度梯度划分的层数; E_i 为截面第 i 层相对应温度的材料弹性模量; A_i 为截面第 i 层相对应温度的面积; I_0 为常温下截面有效惯性矩; d_i 为截面第 i 层至中性轴的距离; σ_0 为常温下材料强度; σ_i 为截面第 i 层相对应温度的材料强度。

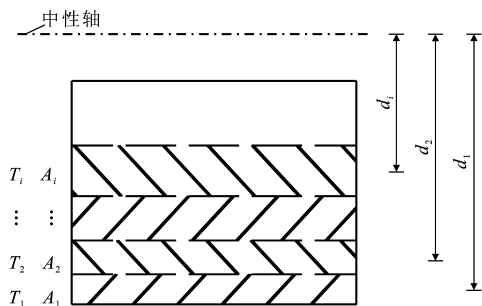


图 5 烧损层换算模型

Fig. 5 Conversion Model of Burning Damage Layer

4 预应力计算

图 6 为各计算工况下预应力时程曲线。由图 6 可知:当混凝土箱梁底板下部受火时,处于梁端腹板上部的钢束预应力随延火时间的增加逐渐增大,但增大幅度较小,考虑强度减损情况下,预应力由延火初时的 1 030 MPa 增加到延火 120 min 的 1 032 MPa,考虑刚度减损情况下,预应力由延火初时的

1 030 MPa 增加到延火 120 min 的 1 033 MPa;处于梁端腹板中部的钢束预应力随延火时间的增加逐渐减小,但衰变趋势较缓,考虑强度和刚度减损情况下,预应力由延火初时的 1 017 MPa 分别衰减到延火 120 min 的 1 014,1 013 MPa;处于梁端腹板下部的钢束预应力随延火时间的增加急速减小,由延火初始的 1 038 MPa 衰减到延火 120 min 的 999 MPa,大约为初值的 96%。

由图 6 还可知,不同火灾模式下,基于强度减损和刚度减损的梁端部钢束预应力变化趋势大致相同,当截面下部受火面积增大时,处于腹板上部的梁端预应力从增加趋势逐渐变为衰减趋势,变化幅度较小,腹板和底板受火对有效预应力的影响明显,延火 120 min 时其可衰减至常温值的 94%。

5 拟合公式

图 7 为梁端预应力拟合曲线对比。由图 7 可知,二次多项式在设定的延火区间内完全逼近预应力的变化趋势,线性函数拟合效果相对较差,则拟设梁端墩顶处预应力与延火时间之间的变化关系呈二次曲线变化,可得如下计算公式

$$P_a = n_1 + n_2 t_m + n_3 t_m^2 \quad t_m \leq 120 \text{ min} \quad (6)$$

式中: P_a 为梁端部墩顶处预应力; n_1, n_2, n_3 均为相关系数。

表 3 为相关系数取值。由表 3 可知,相关系数包括强度折减和刚度折减 2 种工况,采用 ORIGIN-LAB 拟合的各参数下公式的判定系数 $R^2 \geq 0.997$ 。

6 结 语

(1)针对火灾情况下混凝土箱梁端部钢束预应力损失所导致的高温连续破坏效应,设定了梁体下部发生火灾的 4 种火灾场景,给出了温度场计算的混凝土边界模型和热力耦合全过程分析方法,提出了混凝土高温下强度与刚度累积换算计算公式,同时基于火灾混凝土强度和刚度减损计算了混凝土箱梁梁端钢束预应力全过程变化。

(2)梁底部受火面积较小时,处于箱梁梁端腹板上部的钢束预应力随延火时间的增加逐渐增大,增加趋势平缓,梁底部受火面积增大时,处于箱梁梁端腹板上部的钢束预应力随延火时间的增加逐渐减小,衰减趋势平缓;所有火灾模式下,处于箱梁梁端腹板中部的钢束预应力随延火时间的增加逐渐减小,趋势平缓,处于腹板下部的钢束预应力随延火时间的增加下降幅度较大,延火至 120 min 时钢束预

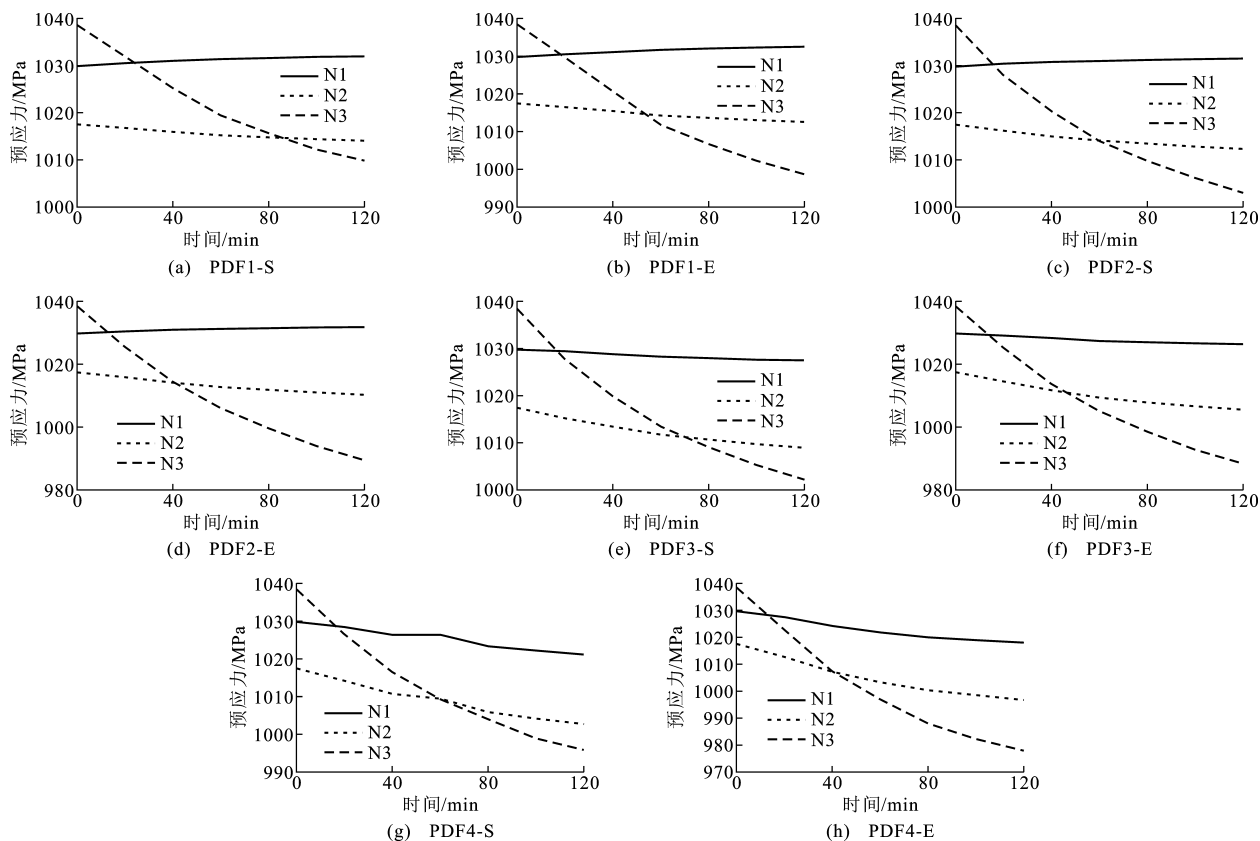


图 6 各计算工况下预应力时程曲线

Fig. 6 Time-history Curves of Prestress at Each Calculation Condition

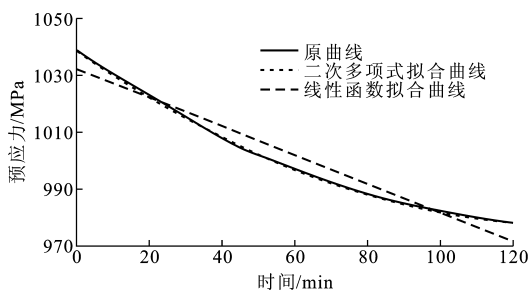


图 7 梁端预应力拟合曲线比较

Fig. 7 Comparison of Fitting Curves of Prestress at Girder End

应力的衰减终值为常温下初值的 94%~96%。

(3)通过拟合曲线比较,提出了混凝土箱梁梁端锚部钢束预应力时程衰变计算公式,揭示了基于强度和刚度减损下的混凝土箱梁梁端预应力衰变规律;本文提出的公式简洁,计算方便,可为类似预应力混凝土箱梁结构的墩顶反弯处抗火设计提供数据。

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.

[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: 89-98.

[3] FRANSEN J M. SAFIR: A Thermal/Structural Program for Modeling Structures Under Fire [J]. *Engineering Journal*, 2005, 42(3): 143-158.

[4] CAPUA D D, MARY A R. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Cross-sections Exposed to Fire [J]. *Fire Safety Journal*, 2007, 42(2): 139-149.

[5] EN 1991-1-2: 2002, Eurocode 1: Actions on Structures. Part 1. 2: General Action — Action on Structures Exposed to Fire [S].

[6] EN 1992-1-2: 2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1. 2: General Rules — Structural Fire Design [S].

[7] KODUR V K R, NASER M Z. Importance Factor for Design of Bridges Against Fire Hazard [J]. *Engineering Structure*, 2013, 54: 207-220.

[8] AZIZ E, KODUR V K R. An Approach for Evaluating the Residual Strength of Fire Exposed Bridge

表 3 相关系数取值
Tab. 3 Relative Coefficient Values

工况代码	钢束编号	强度折减			刚度折减		
		n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3
PDF1	N1	1 029.80	0.03	-1.16×10^{-4}	1 029.77	0.04	-1.40×10^{-4}
	N2	1 017.54	-0.05	1.39×10^{-4}	1 017.59	-0.06	1.79×10^{-4}
	N3	1 038.67	-0.39	1.24×10^{-3}	1 038.97	-0.54	1.68×10^{-3}
PDF2	N1	1 029.83	0.03	-1.08×10^{-4}	1 029.85	0.03	-1.26×10^{-4}
	N2	1 017.46	-0.07	2.21×10^{-4}	1 017.51	-0.09	2.89×10^{-4}
	N3	1 037.92	-0.50	1.81×10^{-3}	1 038.09	-0.66	2.19×10^{-3}
PDF3	N1	1 029.86	-0.03	7.92×10^{-5}	1 029.87	-0.05	1.82×10^{-4}
	N2	1 017.45	-0.12	3.93×10^{-4}	1 017.54	-0.17	5.61×10^{-4}
	N3	1 037.92	-0.52	1.87×10^{-3}	1 038.13	-0.68	2.27×10^{-3}
PDF4	N1	1 029.81	-0.07	1.79×10^{-6}	1 030.05	-0.17	5.74×10^{-4}
	N2	1 017.46	-0.17	3.90×10^{-4}	1 017.73	-0.30	1.05×10^{-3}
	N3	1 038.05	-0.61	2.17×10^{-3}	1 038.59	-0.89	3.21×10^{-3}

Girders[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013,88:34-42.

[9] 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.

[10] 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 (5):106-110.
ZHOU Huan-ting, LI Guo-qiang, JIANG Shou-chao. Experimental Studies on the Properties of Steel Strand at Elevated Temperatures[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2008,40(5):106-110.

[11] 侯 炜. 预应力混凝土箱梁结构抗火性能研究[D]. 西安:长安大学,2014.
HOU Wei. Study on the Performance of Concrete Box Girder of PSC Structure in Fire[D]. Xi'an:Chang'an University,2014.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 张 岗,刘天龙,王翠娟,等. 强度减损下混凝土箱梁 预应力火灾高温损失分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版,2015,16(4):345-352.
ZHANG Gang, LIU Tian-long, WANG Cui-juan, et al. Prestress Loss of Concrete Bridge with Box Girder Based on Strength Reduction Exposed to Fire [J]. Journal of PLA University of Science and Technology:Natural Science Edition,2015,16(4):345-352.

[16] 张 岗,施 颖,宣纪明,等. 混凝土连续箱梁支点处 钢束预应力高温衰变研究[J]. 桥梁建设,2016,46 (1):76-80.
ZHANG Gang, SHI Ying, XUAN Ji-ming, et al. Study of Prestress Decay of Steel Strands in PC Continuous Box Beam at Support Under High Temperature[J]. Bridge Construction,2016,46(1):76-80.

[17] 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):193-197,207.
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):193-197,207.