

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.053

混凝土梁桥过火后预应力损失

郝朝伟¹, 张悦杉¹, 王明法², 陈彦江³

(1.交通运输部公路科学研究所, 北京 100088; 2.山东高速集团有限公司建设管理分公司, 济南 250001;
3.北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要:火灾中产生的高温对预应力结构有较大影响, 因降低结构的有效预应力, 导致过火后受拉外缘压应力储备降低, 结构提前开裂, 影响结构使用性能和耐久性。为快速确定预应力混凝土梁过火后的有效预应力, 以某省过火后拆除的 32 片梁为样本, 通过实测过火后混凝土梁桥钢绞线永存应力, 获得剥落深度比与预应力损失比的回归公式, 选用极限承载能力试验及有限元数值分析验证该公式的适用性。结果表明, 火灾后梁板预应力钢束出现应力损失, 当混凝土剥落深度超过 1/3 钢绞线净保护层时, 预应力损失不可忽略; 先张法预应力混凝土结构, 抗火设计应适当提高钢绞线保护层厚度; 当混凝土剥落深度超过 2/3 钢绞线净保护层时, 预应力损失率达 10%, 严重影响结构刚度。

关键词:桥梁工程; 空心板; 预应力; 火灾

中图分类号: U442.5+5; U445.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2022)11-025-09

The prestressing loss of concrete beams after exposed to fire

HAO Chaowei¹, ZHANG Yueshan¹, WANG Mingfa², CHEN Yanjiang³

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, P. R. China;
2. Construction Management Branch of Shandong Expressway Group Co., Ltd., Jinan 250001, P. R. China;
3. Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: The high temperature produced in fire has a great influence on the pretensioned pre-stressed concrete beams. Due to the decrease of the effective prestressing force in the structure, the compressive stress spread over edge girth in tension is reduced, and structural cracks appear early, resulting in the decrease of service performance and durability. To detect the effective prestressing force of the pre-stressed concrete beams exposed to fire quickly, thirty-two pieces of beams exposed to fire were taken as samples. The regression formula of spalling depth ratio and prestress loss ratio was obtained by measuring the permanent stress of steel strand of concrete girder bridge after exposed to fire, and the applicability of the formula was verified by an experimental and finite element analysis on ultimate bearing capacity. The results show that the phenomenon of prestress loss of beam prestressed steel bundle exists. When the spalling depth of concrete exceeds 1/3 of the net protective layer of steel strand, the prestress loss cannot

收稿日期: 2020-11-25 网络出版日期: 2021-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608238); 山东省交通运输科技项目(2017B62)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51608238), Shandong Transportation Science and Technology Project (2017B62).

作者简介: 郝朝伟(1989—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事桥梁抗火及抗震研究, (E-mail) budianerwen@sina.com。

be ignored. The thickness of the steel strand protective layer should be increased appropriately for pretensioned prestressed concrete structures in fire resistance design. When the spalling depth of concrete exceeds 2/3 of the net protective layer of steel strand, the rate of prestressing loss due to high-temperature creep exceeds 10%, resulting in severe decrease of the girder stiffness.

Keywords: bridge engineering; hollow slab beams; prestressing-pretensioning; fire

火灾作为时空跨度最大的一种灾害,是 21 世纪多发性灾害中发生概率较高的一种灾害,火灾导致的桥梁坍塌事件为地震导致的桥梁坍塌事件的 3 倍^[1-2]。截至 2019 年 6 月,全国机动车总保有量已达 3.4 亿辆^[3],燃料及危险品运输日渐频繁;新能源汽车保有量达 344 万辆,占汽车总量的 1.37%,仅 2019 年前 8 个月,新能源汽车燃烧事故就发生了 40 余起。据不完全统计^[1],混凝土梁桥占国内桥梁火灾事故总数的 90% 以上,主要为预应力混凝土桥。因此,预应力混凝土梁桥过火后的有效预应力的研究具有重要工程意义。近年来,针对预应力混凝土结构的特点,国内外学者开展了不同程度的抗火研究。Kodur 等^[4-5]综合试验数据,分析了温度与应力路径耦合作用对预应力混凝土梁板抗火性能的影响,提出了考虑热-力耦合影响的数值方法。Bailey^[6]研究非粘结预应力混凝土单向板的抗火性能,以混凝土骨料类型、板端边界约束等为主参数,分析这些因素对桥梁抗火性能敏感性的影响。结果表明,这些因素对高温下预应力混凝土板的实时变形影响显著。Chhun 等^[7]研究预应力钢束在不同载荷和温度下的松弛,建立了松弛增量模型,该增量模型能够计算预应力钢束的应变滞后,考虑了温度和加载效应的非线性耦合。Shakya 等^[8]对低松弛预应力钢绞线力学性能进行试验,发现在 20 °C~800 °C 的温度范围内,预应力钢绞线的强度退化程度高于钢筋。Gales 等^[9]研究无粘结后张拉(UPT)平板混凝土板在标准火灾中各种温度条件下的潜在预应力松弛行为,通过改变初始预应力水平、混凝土覆盖层与预应力筋、加热长度与总筋长度的比值来研究预应力损失的潜在影响,分析了这些因素对抗弯和抗剪能力的影响,指出建造 UPT 板时需要特别注意,确保结构的防火安全有足够的混凝土覆盖层。张岗等^[10]以 ASTM119 温升曲线作为预应力混凝土桥梁火灾温度场强度计算标准,利用 ANSYS 有限元软件,研究高温下钢绞线有效预应力随时间的变化,提出了评估混凝土箱梁预应力时程损失公式。范进等^[11-13]分别对高温下及高温后 1 570、1 670、1 860 级预应力钢绞线(钢丝)进行拉伸试验,获得了钢绞线及钢丝弹性模量、抗拉强度和条件屈服强度随温度的变化规律。王俊等^[14]通过实验研究高强预应力筋高温中的蠕变效应,提出了对应的高温蠕变率力学模型及该效应导致的有效预应力损失估算公式,发现对火灾下的预应力混凝土结构须考虑预应力钢筋的高温蠕变作用。针对高温中(后)预应力混凝土有效预应力的研究多以标准升温曲线为出发点。受桥址处大地边界层内空气流动特性、通风因子、可燃物表面积、燃烧控制方式等因素影响,较难真实推测桥址温度分布,进而增加快速确定过火后有效预应力的难度。另外,预应力混凝土桥梁常采用水灰比较低的高标号混凝土,即低加热速率下也有高爆裂剥落的敏感性,当混凝土开裂(爆裂)后,裂缝处的温度较未开裂处有所提高,较难通过数值模拟准确计算。

笔者采用理论解析与试验研究相结合的方法,选取国内服役高速公路过火后拆除的实梁作为样本,利用频率法测试钢绞线永存预应力,并使用拉力试验机进行修正,获得了 15 根钢绞线过火后真实的有效预应力数据。通过回归分析,得到了混凝土剥落深度比与预应力损失比回归公式,通过极限承载能力试验及有限元模拟分析验证该公式的适用性。

1 工程概况

某省一座 9 m×20 m 简支桥面连续预应力混凝土空心板桥,斜交角 $\alpha=52.74^\circ$,混凝土设计强度等级为 50 MPa,其中边梁和中梁分别布置 15、14 根 $6\times\Phi^15.2$ 低松弛钢绞线,屈服强度设计值为 1 860 MPa,张拉控制应力 1 395 MPa,立面及边板配筋如图 1 所示。该火灾事故详细描述、受损情况分布、火源中心示意及中板配筋图见文献[15]。该桥经检测评估后,对过火的 30 多片梁拆除替换,为本研究提供了充实的样本。

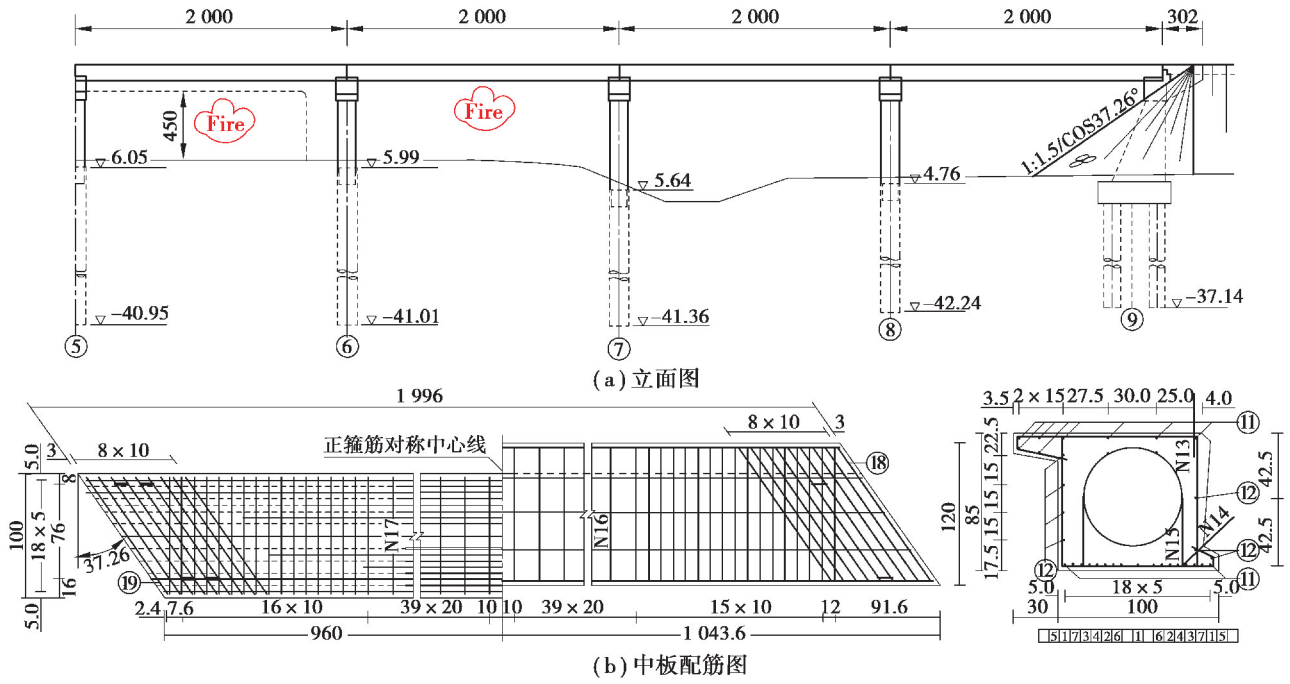


图 1 立面及中板配筋

Fig. 1 Elevation and middle plate reinforcement

因过火剥落后底板呈凹凸不平的状态,测量剥落厚度时,将底板分成 20 cm×20 cm 的测区,取该测区剥落深度的最大值作为代表值,计算所有测区的平均值作为该区域的平均深度,根据以上方法进行检测,测得空心板跨中附近底板剥落平均深度介于 0.9 cm~3.8 cm 之间。有 2 片梁基本未受火焰直接灼烧,可以作为基准梁。典型的剥落情况如图 2 所示。



图 2 典型底板剥落照片

Fig. 2 Typical floor spalling

2 测试方法

频率法测钢绞线有效预应力测定以弦振动理论作为理论基础。针对张紧的钢绞线,考虑其抗弯刚度,得到拉索微元的动力平衡方程:

$$\frac{\omega}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

式中, y 为横向坐标(垂直于索长度方向); x 为纵向坐标(沿索长度方向); ω 为单位索长的质量; g 为重力加速度; T 为索的张力; t 为时间; EI 为索的抗弯刚度。

若钢绞线两端是铰支,钢绞线作微幅自由振动时,经过分离变量等变换后得到其拉力与第 n 阶固有频率

间的关系为

$$T = \frac{4mL^2}{n^2} f_n^2 - EI \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2, \quad (2)$$

式中, T 为钢绞线的张力; L 为钢绞线的计算长度; EI 为钢绞线的抗弯刚度; m 为单位钢绞线长的质量; f_n 为钢绞线的第 n 阶固有频率。

上述频率法测钢绞线永存应力公式的基本假定为:

1) 钢绞线截面一致、材料均匀、应力应变关系符合胡克定律; 2) 钢绞线振动时没有外力且为微幅振动; 3) 钢绞线两端的拉力相等(忽略拉索自重); 4) 钢绞线两端铰接, 振动时不计阻尼影响; 5) 只考虑几何非线性, 不考虑其他非线性。

由假定条件可知, 频率法测钢绞线永存应力的主要影响因素是边界条件和抗弯刚度。为减少上述因素的影响, 对所选钢绞线频率分别进行 2 次现场测试。现场测试时, 钢绞线计算长度 L 取 1.1 m, 将其从梁板凿出后置于拉力试验机进行试验, 以便对现场测试结果进行修正。现场及室内测试如图 3 和图 4 所示。



图 3 室内试验室测试

Fig. 3 The laboratory test

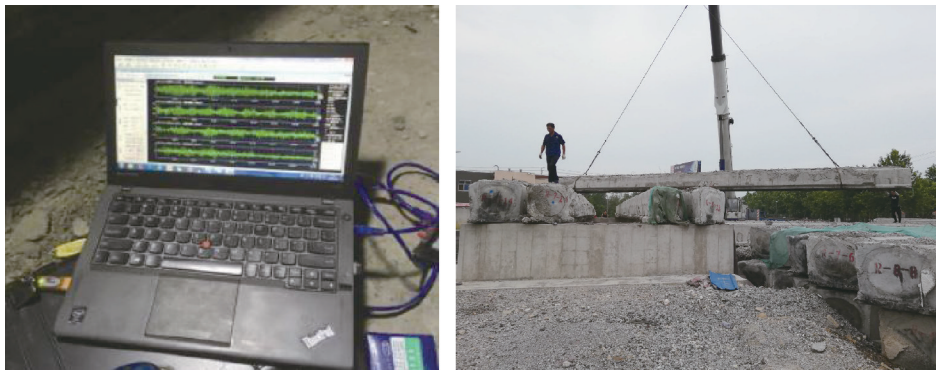


图 4 现场测试

Fig. 4 The field test

3 回归分析

通过振动法及室内试验修正, 对 8 片梁跨中附近共计 15 根钢绞线进行有效预应力测试, 典型的信号时程图, 如图 5 所示; 典型的自功率谱幅频曲线, 如图 6 所示。经回归分析得出预应力损失比与剥落深度与钢绞线净保护层厚度比的公式, 见式(3)。原桥 R-7-2# 梁仅个别区域混凝土被熏黑, 未见其他损伤, 该梁跨中

通过上述方法实测的跨中附近有效预应力均值为 1 093 MPa, 因该桥的所有梁预制时处于同一批次, 施工工艺和环境相同, 可将此值作为所有梁未过火前的永存预应力。

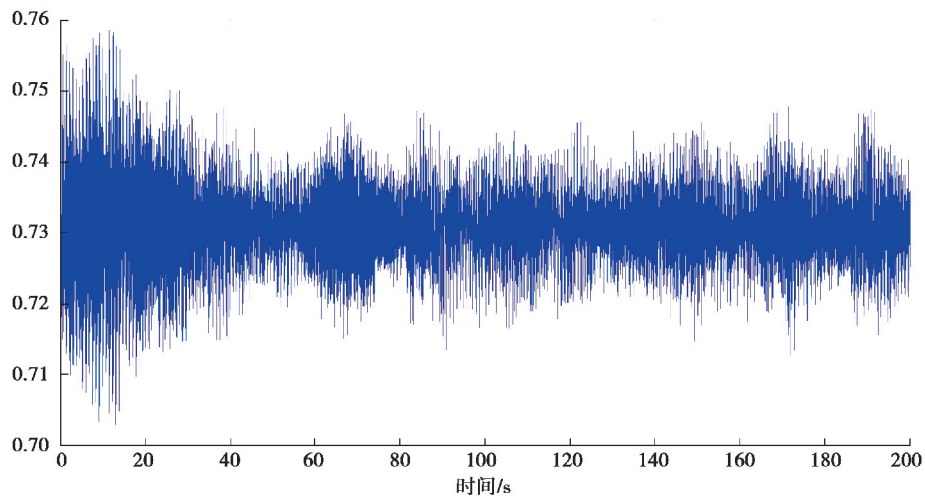


图 5 典型振动信号时程图

Fig. 5 The typical time history of typical vibration signals

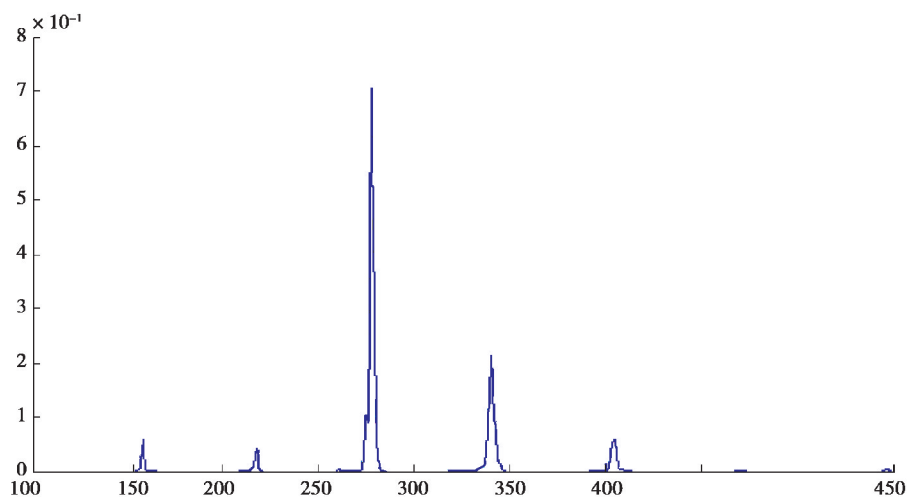


图 6 典型的自功率谱幅频曲线

Fig. 6 The typical amplitude-frequency curve of self-power spectrum

图 7 表明, 过火后混凝土剥落越深, 预应力损失越大; 当混凝土剥落深度不超过 1/3 保护层厚度时, 火灾造成的预应力损失小于 5%; 当剥落深度超过 2/3 保护层时, 预应力损失比大于 10%。预应力损失过大, 将严重影响结构正常使用, 降低结构刚度。

$$\Delta P_f = 0.3385 d_f^{1.2}, \quad (3)$$

式中: ΔP_f 为火灾后预应力损失比; d_f 为火灾后预应力钢绞线位置处, 因火灾造成的剥落平均深度与钢绞线净保护层厚度比。

钢绞线在火灾中应力损失主要原因如下:

1) 高温中材料弹性模量 E 下降, 导致应力损失, 通常在正常使用状态下, 钢束没有达到塑性状态, 该损失冷却后可恢复^[13]; 2) 钢束高温蠕变造成的预应力损失, 该损失冷却后无法恢复; 3) 混凝土在高温下塑性变形导致的预应力损失, 该损失冷却后也无法恢复。

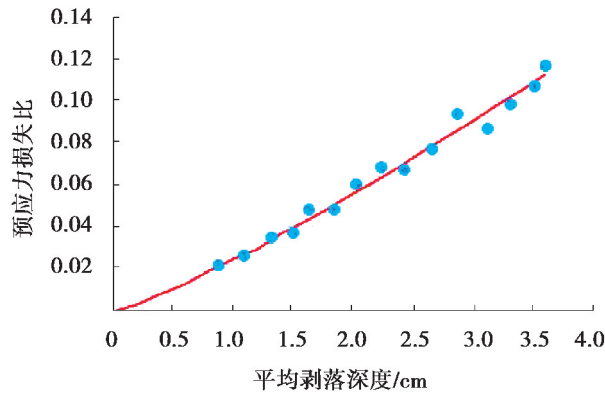


图 7 剥落深度与预应力损失比回归图

Fig. 7 The regression diagram of spalling depth and prestress loss ratio

4 实例验证

因样本数偏少,需通过其他方式验证该公式的适用性。根据文献[16-17]可知,预应力混凝土梁开裂荷载与预应力有效应力、截面抵抗矩塑性影响系数 γ 及混凝土抗拉强度有关。即当截面、配筋、材料已定,开裂荷载取决于有效预应力,通过实测预应力混凝土梁的开裂弯矩,验证回归公式的适用性。选取一片跨中平均剥落深度为 3.625 cm 的梁做极限抗弯承载能力试验及有限元模拟分析。

试验加载布置需同时考虑正截面最大弯矩及 $1/3l \sim 2/3l$ 处截面的抗剪承载能力,最终确定分配梁间距为 3 m,加载布置、流程和终止条件详见文献[15],现场试验如图 8 所示。



图 8 极限承载能力试验

Fig. 8 The bearing capacity test

根据有限元软件 ANSYS 建模,混凝土采用 SOLID65 单元,混凝土的应力-应变关系模型是对混凝土结构进行非线性分析的重要依据,模拟时采用随动硬化模型,混凝土破坏准则中,张开裂缝的剪切传递系数根据相关经验并试算后取 0.7,闭合裂缝的剪切传递系数经多次调整后取 0.95。混凝土单轴应力应变关系综合了 Hognestad 和 GB 50010—2002 的规定。根据文献[15],距梁底 15 cm 以内的混凝土立方体抗压强度 $f_{cu,下} = 39.6$ MPa,其他区域混凝土立方体抗压强度 $f_{cu,上} = 58.5$ MPa。钢绞线屈服强度取文献[15]中剥落 C 测区值,即 $f_{pk} = 1441$ MPa,高温后,钢绞线弹性模量几乎可恢复到常温时,故 $E_p = 1.95 \times 10^5$ MPa。混凝土和钢绞线本构如图 9~图 10 所示。建模细节见文献[15],模型单元数 5 918,节点数 8 266,如图 11 所示。

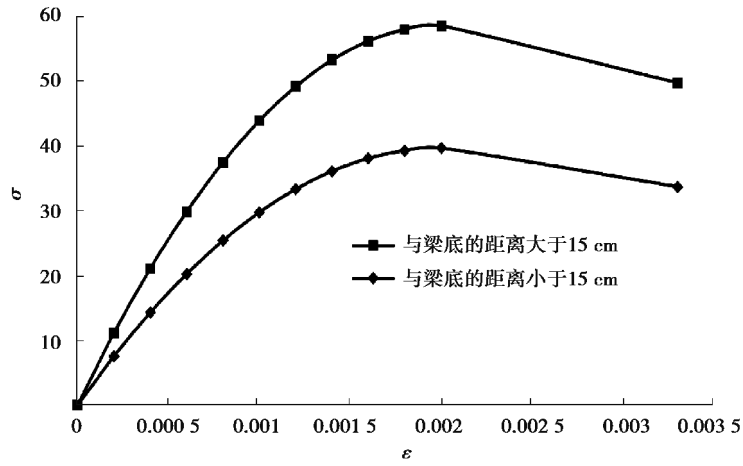


图 9 混凝土应力-应变关系曲线 (MPa)

Fig. 9 Stress-strain relationship curve of concrete (MPa)

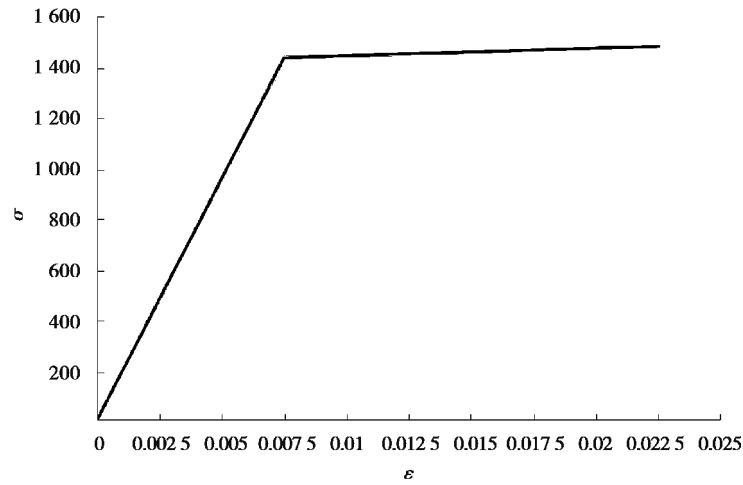


图 10 钢绞线本构 (MPa)

Fig. 10 The steel strand constitutions (MPa)

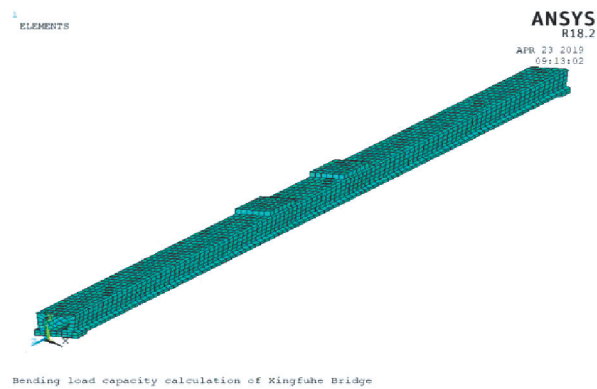


图 11 有限元模型

Fig. 11 The finite element model

根据文献[17]中的公式,由开裂弯矩反算钢绞线有效预应力的结果,如表 1 所示。由表 1 可知,回归公式与数值模拟结果基本一致,但与承载能力试验结果差距略大。究其原因,文献公式计算的关键是确定开裂弯矩,而实际加载中,梁开裂初期,裂缝宽度较小,肉眼很难发现,加之荷载分级较大,导致识别的真实加载吨位略大,计算的有效预应力偏大。试验过程中,跨中附近首次开裂裂缝形态如图 12 和图 13 所示。

表 1 过火后有限预应力结果

Table 1 The results of finite prestress after fire

数值模拟	开裂吨位/t	开裂弯矩/(kN·m)	有效预应力/MPa
数值模拟	19.41	1 417.8	971.1
承载试验	20.02	1 443.8	1 005.4
回归公式	—	—	968.9

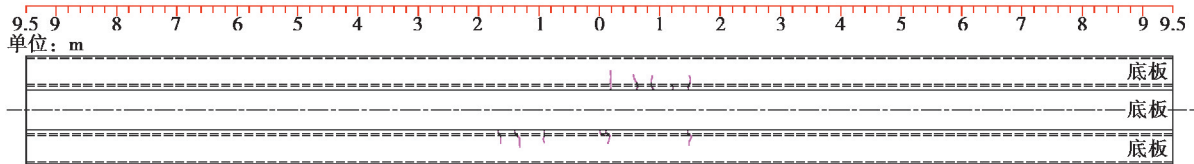
(a) 试验裂缝图 ($P=20.02\text{ t}$)(b) 数值模拟裂缝图 ($P=19.41\text{ t}$)

图 12 跨中附近首次开裂裂缝形态

Fig. 12 The fracture morphology of the first crack near the mid-span



图 13 跨中附近裂缝照片

Fig. 13 The photos of cracks near the mid-span

5 结 论

文中利用频率法对过火后空心板梁钢绞线永存预应力进行测试,使用试验机修正,获得了 15 根钢绞线过火后真实的有效预应力。通过实测过火后混凝土梁桥钢绞线永存预应力,获得了剥落深度比与预应力损失比回归公式,通过极限承载能力试验及有限元模拟分析验证该公式的适用性。

1)火灾后梁板预应力钢束将出现预应力损失,当混凝土剥落深度超过 1/3 钢绞线净保护层时,预应力损失不可忽略。

2)当混凝土剥落深度超过 2/3 钢绞线净保护层时,预应力损失达 10%,严重影响结构刚度。

3)对于先张法预应力混凝土空心板,底板厚度较薄,用于火灾易发区域时,应严格控制底板尺寸,适当提高钢绞线保护层厚度。

4)因缺少剥落深度小于 0.9 cm 的样本,回归公式在此区间的适用性有待深入研究。

参考文献:

- [1] 徐超. 晚清山东灾害研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2020.
Xu C. Research on Shandong disasters in late qing dynasty[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2020. (in Chinese)
- [2] 徐柏刚. 复合灾害应急避难政策及疏散受损评估研究: 以东京新小岩地区为例[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Xu B G. Research on emergency disaster evacuation policy and evacuation damage: based on shin-koiwa of Tokyo [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [3] 商讯. 2019 上半年全国机动车保有量达 3.4 亿辆[J]. 商用汽车, 2019(7): 7.
The number of motor vehicles in China will reach 340 million In the first half of 2019[J]. Commercial Vehicle, 2019(7): 7. (in Chinese)
- [4] Kodur V K R, Dwaikat M. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(5): 431-443.
- [5] Shi X D, Tan T H, Tan K H, et al. Effect of force-temperature paths on behaviors of reinforced concrete flexural members[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(3): 365-373.
- [6] Bailey C G, Ellobody E. Fire tests on bonded post-tensioned concrete slabs[J]. Engineering Structures, 2009, 31(3): 686-696.
- [7] Chhun P, Sellier A, Lacarriere L, et al. Incremental modeling of relaxation of prestressing wires under variable loading and temperature[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 337-342.
- [8] Shakya A M, Kodur V K R. Effect of temperature on the mechanical properties of low relaxation seven-wire prestressing strand[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 74-84.
- [9] Gales J, Bisby L A, MacDougall C, et al. Transient high-temperature stress relaxation of prestressing tendons in unbonded construction[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(4): 570-579.
- [10] 张岗, 刘天龙, 王翠娟, 等. 刚度高温衰变的混凝土箱梁预应力时程损失研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(6): 66-71.
Zhang G, Liu T L, Wang C J, et al. Prestress loss of concrete bridges with box girders based on decay of stiffness exposed to high temperature[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(6): 66-71. (in Chinese)
- [11] 范进, 吕志涛. 高温后预应力钢丝性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(9): 30-31, 68.
Fan J, Lyu Z T. Experimental study on materials' properties of prestressed steel wire post high temperatures [J]. Industrial Construction, 2002, 32(9): 30-31, 68. (in Chinese)
- [12] 范进, 吕志涛. 高温(火灾)下预应力钢丝性能的试验研究[J]. 建筑技术, 2001, 32(12): 833-834.
Fan J, Lyu Z T. Experimental research on performance of prestressed steel wire in high temperature environment (fire) [J]. Architecture Technology, 2001, 32(12): 833-834. (in Chinese)

- [13] 中华人民共和国建设部. 中华人民共和国建筑工程标准: 建筑抗震试验方法规程 JGJ 101—1996[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Specifying of testing methods for earthquake resistant building. JGJ 101—1996[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国建筑工程标准: 高层建筑混凝土结构技术规程 JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structures of tall building. JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [15] 蒋庆, 叶献国, 连星, 等. 叠合板式剪力墙的耗能分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 483-487.
Jiang Q, Ye X G, Lian X, et al. Analysis on energy dissipation of superimposed slab shear walls[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2010, 31(4): 483-487. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)

(上接第 33 页)

- [13] 范进. 高温后预应力钢绞线性能的试验研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 186-189.
Fan J. Experimental study on material properties of prestressed steel strand post high temperatures[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2004, 28(2): 186-189. (in Chinese)
- [14] 王俊, 蔡跃, 黄鼎业. 预应力钢筋高温蠕变试验研究及有限元分析应用[J]. 土木工程学报, 2004, 37(11): 1-5, 55.
Wang J, Cai Y, Huang D Y. Testing research on thermal creep strain model of prestressing tendons and application of fem analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(11): 1-5, 55. (in Chinese)
- [15] 郝朝伟, 刘康, 李洪印, 等. 预应力混凝土梁桥过火后的材料性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(3): 106-114.
Hao C W, Liu K, Li H Y, et al. Material properties of prestressed concrete girder bridge after exposed to fire[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3): 106-114. (in Chinese)
- [16] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
JTG 3362—2018, Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts[S]. Beijing: China communication press, 2018. (in Chinese)
- [17] 聂长勇, 王鹏. 考虑预应力筋增量的混凝土梁开裂弯矩计算公式研究[J]. 公路交通技术, 2017, 33(2): 26-30.
Nie C Y, Wang P. Study on calculation formula of cracking moment of concrete beam considering prestressed reinforcement increment[J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33(2): 26-30. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)