第46卷 第6期 哈尔滨工业大学学报 Vol. 46 No. 6
2014年6月 JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY Jun. 2014

光纤光栅缓粘结智能钢绞线的研制及应用

兰春光[1,2], 王天昊[3], 刘 航[2], 欧进萍[4]

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院, 100081 北京; 2.北京市建筑工程研究院有限责任公司, 100039 北京;
3. 北京理工大学 自动化学院, 100081 北京;4.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要: 针对缓粘结钢绞线应力监测用传感器和布设工艺的缺陷,本文基于光纤光栅传感技术特性,综合考虑缓粘结预应力钢绞线的结构,设计制作了一种可实现预应力状态自监测的光纤光栅缓粘结智能钢绞线.并将其应用于某礼堂改造工程缓粘结预应力混凝土单向楼板内,验证了新型光纤光栅缓粘结智能钢绞线的有效性和可靠性.结果表明:该缓粘结智能钢绞线结构简单、机理明确;与普通钢绞线相比其力学性能有所下降,极限抗拉强度约为普通钢绞线的88%;其主要传感性能指标,如迟滞、重复性、线性度、总精度等均小于3%.通过实际工程验证了该新型智能钢绞线施工工艺简单易行,鲁棒性能够满足实际工程预应力损失长期监测.

关键词: 光纤光栅;缓粘结钢绞线;预应力损失;监测评估

中图分类号: TU378 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)06-0100-05

Development and application of FBG retard-bonded smart steel strands

LAN Chunguang[1,2], WANG Tianhao[3], LIU Hang[2], OU Jinping[4]

(1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100081 Beijing, China; 2. Beijing Building Constucture Research Institute, 100039 Beijing, China; 3. School of Automation, Beijing Institute of Technology, 100081 Beijing, China;
4. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: In this paper, in order to solve the defects of sensors and distributed process for monitoring the stress of retard-bonded steel strand, according to characteristics of retard-bonded prestressed concrete and optical fiber sensing, novel self-monitoring retard-bonded smart steel strand was designed and manufactured. Then the FBG retard-bonded smart steel strand were applied to a retard-bonded prestressed one-way slab in a Hall, and the availability and reliability of the novel smart steel strands was verified. The results show that the retard-bonded smart steel strands have simple structure and definite mechanism. The mechanical properties of the smart steel strand are lower than ones of ordinary steel strand, and the smart strand has the ultimate tensile strength of about 88% of common strand, and the sensing properties (hysteresis, repeatability, linearity, and total accuracy) are less than 3%. It has been verified that the novel smart steel strand have the advantages of simple and easy construction process by the application in the practical project. And the robustness of the novel smart strand can meet the long-term monitoring for prestress losses in the practical engineering.

Keywords: optical fiber bragg grating; retard-bonded steel strand; loss of prestress; monitoring and evaluation

缓粘结技术沿用无粘结技术的生产工序、设备、施工工艺等,具有无粘结技术施工简单的特点,同时由于采用缓凝胶代替无粘结技术中的油脂,随着时间的推移,缓凝剂将会固化,从而将预应力钢绞线、聚乙烯外套、波纹管、混凝土结构紧密结合在一起,使其协同变形,达到类似有粘结技术的结构承载模式,与无粘结技术相比更加安全可靠.缓粘结技术综合了无粘结技术的加工工艺和有粘结技术的承载模式方面的优势,现阶段得到了广泛研究并在实际预应力工程中得以开展应用[2-3].

收稿日期: 2013-10-25.
基金项目: 国家博士后科学基金资助项目(2014M550020);
北京市博士后基金资助项目 (2013zz-95).
作者简介: 兰春光(1979—), 男, 博士后;
欧进萍(1959—), 男, 博士生导师,中国工程院院士.
通信作者: 兰春光, lcg98011210@163.com.

考虑缓粘结预应力技术的承力特点，预应力筋内预应力度为缓粘结预应力技术的关键问题，其直接关系到结构的安全和功能实现.然而现阶段国内外针对预应力筋实际预应力度的监测手段十分匮乏，对预应力筋的实际预应力度仍然主要依靠施工经验和实验室试验数据统计进行预估，很难保证其与实际结构较好吻合[4-9].如果过高估计预应力损失，将导致预应力筋的应力没有得到较好应用，相反地，如果过低估计了预应力损失将为结构安全埋下隐患.因此，研制满足缓粘结预应力监测的具有良好线性度和重复性、较高精度和灵敏度、抗疲劳、耐腐蚀等特性的传感器是亟待解决的问题[10-11].

本文基于光纤光栅传感技术特性[12]，针对缓粘结预应力钢绞线结构特点，设计制作了满足缓粘结钢绞线的预应力全寿命监测需要的光纤光栅缓粘结智能钢绞线，并将其应用于实际工程中验证了此新型缓粘结智能钢绞线的有效性和可靠性.

1　缓粘结智能钢绞线的研制

1.1　基本结构与原理

考虑缓粘结预应力钢绞线应力长期监测需要，光纤光栅缓粘结智能钢绞线应具备布设简便，可沿用现有预应力张拉锚固工具；耐久性强，满足预应力混凝土结构全寿命监测需要；长期稳定性好，可实现全寿命绝对测量.根据以上需求，本文研制的光纤光栅缓粘结智能钢绞线主要包括以下几个部分：1）封装有光纤光栅传感元件的增强纤维复合筋，2）提高增强纤维复合筋抗挤压能力的高延性铜箔片，3）与智能传感筋构成钢绞线主体的普通钢绞线外丝、缓粘结剂、外层 PE 等（图 1 为光纤光栅缓粘结智能钢绞线示意图）.

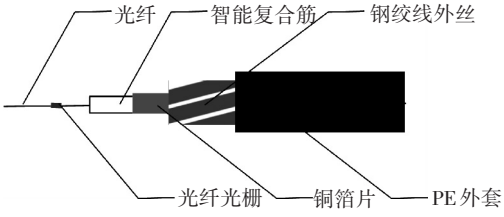

图 1　光纤光栅缓粘结智能钢绞线结构示意

当光纤光栅缓粘结智能钢绞线代替普通钢绞线应用于实际结构中后，借助端部锚具的锚固效应，智能钢绞线内智能传感筋将和普通钢绞线外丝协同变形.考虑智能传感筋为一根与整体钢绞线相协调的直筋，那么，智能传感筋的应变与整体钢绞线的应变是相等的.通过智能传感筋内的光纤光栅传感元件，可获得智能传感筋的应变（即钢绞线应变）.再根据胡克定律，智能钢绞线中传感器测试得预应力筋应力值为

$$\sigma = \frac{E_{\mathrm{IC}}}{\alpha_{\varepsilon}}\Delta\lambda_{B}, \tag{1}$$

式中：E_{IC}、$\Delta\lambda_{B}$、α_{ε} 分别为缓粘结智能钢绞线的弹性模量、光纤光栅中心波长变化值、轴向应变与中心波长变化系数.

1.2　制作过程

纤维增强复合传感筋（FRP）和缓粘结预应力钢绞线均有其成熟的制备工艺和加工设备，为了减少缓粘结智能钢绞线制作难度和加工成本，将现有的两种制备技术无损融合成为此处的研究重点.缓粘结智能钢绞线的制作步骤主要有：1）根据预应力监测需要确定光纤光栅传感元件位置，而后将光纤光栅传感元件在增强纤维复合传感筋拉制过程中布设于传感筋中部，制成满足实际工程监测需要的智能传感筋；2）采用制备好的智能传感筋代替钢绞线中丝，经由对普通钢绞线的拆分和再组装制成智能钢绞线；3）将智能钢绞线经由缓粘结钢绞线制备设备拉制成缓粘结智能钢绞线[13].缓粘结智能钢绞线成品见图 2.

图 2　光纤光栅缓粘结智能钢绞线成品

1.3　性能分析

1）力学性能.缓粘结智能钢绞线不仅仅作为传感器使用，为了减少对原结构的扰动和便于施工，力求将智能钢绞线代替普通缓粘结钢绞线使用，因此对其力学性能进行研究十分必要.为了考察智能钢绞线和普通钢绞线在力学性能方面的差异，做如下实验.试件选择为标距 700 mm 的 2 根智能钢绞线和 1 根普通钢绞线.为了尽可能还原钢绞线的实际工作环境，同时为了防止钢绞线与钳口滑移，先将试件两端采用单孔锚具（柳州欧维姆机械股份有限公司的 YM15 型锚具）锚固后放入试验机钳口中进行张拉.试验加载设备为 LYE-600A 拉伸试验机，加载速度为 3 mm/min.试验装置见图 3.

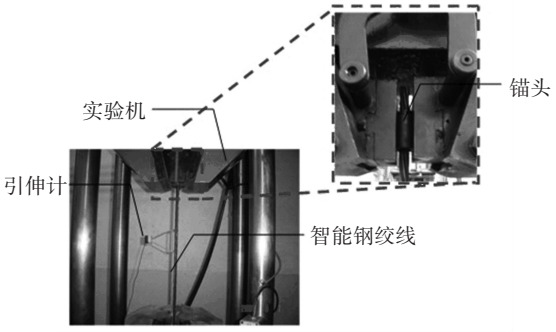

图 3　力学性能试验装置

采用试验获得的试验数据，按照 GB/T 5224—2003《预应力混凝土用钢绞线》计算光纤光栅智能钢绞线和普通钢绞线的力学性能指标. 由计算结果可知，试件中的智能钢绞线的极限抗拉强度均超过1 660 MPa，约为普通钢绞线极限抗拉强度（1 890 MPa）的 88%，远大于普通钢绞线的张拉控制力（约极限抗拉强度的 70%）. 从而能说明缓粘结智能钢绞线代替普通缓粘结钢绞线作为受力筋使用是可行的.

2）传感性能. 传感特性仍然是缓粘结智能钢绞线最主要的工作特性. 为了刻画缓粘结智能钢绞线的传感性能指标，做如下实验. 试件为含有一个光纤光栅传感器的 3 m 长智能钢绞线；试验荷载通过千斤顶和反力架逐级施加，每级为 10 kN，试验荷载最大值为 150 kN，加载到荷载最大值后以相同的级步卸载至无力状态，重复 5 个循环. 光纤光栅波长数据采用 Si720 解调仪进行采集，试验力采用安装于千斤顶和反力架之间的电阻应变式压力传感器获得，试验装置见图 4.

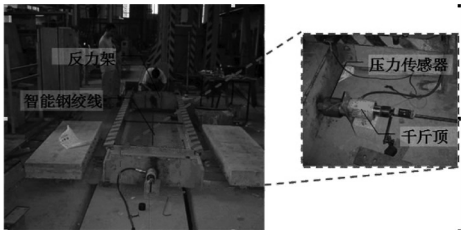

图 4　传感性能试验装置

图 5 为缓粘结智能钢绞线标定试验结果图. 智能钢绞线测试最大应变可达 8.4×10^{-3} 以上，已超过钢绞线的一般工作应变. 张拉力从无力状态达到最大控制力的整个过程中，测试得荷载-应变曲线具有良好的线性度和重复性，从而说明智能复合传感筋与外层钢丝是协同变形的. 采用标定数据，根据 GB/T 18459—2001《传感器主要静态性能指标计算方法》计算得该智能钢绞线的迟滞、重复性、线性度、总精度等均小于 3%，完全可以满足实际缓粘结钢绞线预应力状态监测需要.

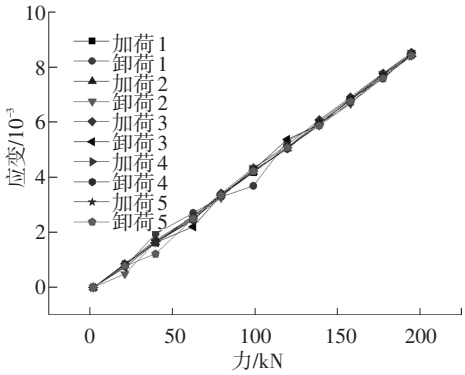

图 5　智能钢绞线荷载-应变曲线

2　工程应用

2.1　工程概况

本工程为甲类剧场建筑，地上三层，地下三层，总建筑面积55 623 m^2. 本工程采用现浇钢筋混凝土框架结构体系，楼层采用现浇钢筋混凝土梁、板结构. 为了满足结构承载力、变形和抗裂要求，部分大跨度顶板和舞台部分大跨度梁采用缓粘结预应力技术. 缓粘结预应力筋采用 F15.2 高强 1860 级国家标准低松弛预应力钢绞线，其标准强度 f_{ptk} = 1 860 N/mm^2，预应力筋张拉控制应力 σ_{con} = 1 302 N/mm^2（施工时超张拉 3%）. 工程中缓粘结钢绞线为单端张拉体系，固定端为挤压式锚具，张拉端为夹片式锚具.

2.2　监测方案的设计与实施

本工程中缓粘结预应力钢绞线为重要构件，对于结构构件安全起着重要作用；同时预应力损失是预应力混凝土结构无法避免的，也是重要的影响因素，因此准确及时掌握预应力混凝土空心楼板的预应力损失值及其变化特征至关重要. 考虑工程实际特点和预应力损失监测需要，在工程地下一层顶板的 21 根缓粘结钢绞线中选择 2 根布设智能钢绞线，以及三层顶板的 10 根缓粘结钢绞线中选择 5 根布设智能钢绞线. 其具体施工过程主要包括缓粘结智能钢绞线的安装、张拉和保护.

2.2.1　缓粘结智能钢绞线的安装

待空心楼板底面模板施工完毕，并经检查验收合格后进行力筋的绑扎和定位. 其中缓粘结智能钢绞线安装的施工步骤分为普通钢筋和普通钢绞线绑扎，缓粘结智能钢绞线入模和定位，以及引线保护三个步骤，各步骤注意事项如下：

1）普通钢筋和钢绞线的绑扎. 按设计图纸进行普通钢筋和钢绞线的绑扎，绑扎结束后对普通钢筋和钢绞线的直径、间距、束形和失高等进行认真检查，发现问题立即改正，并及时进行隐蔽工程验收；

2）缓粘结智能钢绞线入模和定位. 待板内普

通钢筋和普通缓粘结预应力钢绞线绑扎成型后，按设计位置将缓粘结智能钢绞线入模；过程中，应避免已绑扎完钢筋和预应力束上突出物划伤刮破缓粘结智能钢绞线，并小心保护智能钢绞线的引线，防止其因刮碰而至损坏；

3）智能钢绞线引线的保护.智能钢绞线的引线和跳线头是之后测试的必须条件，为了防止其在后续的混凝土浇筑和其他施工过程中损坏，应采取必要措施对其进行保护；并在明显位置粘贴警示标志.预应力空心楼板的钢筋绑扎固定和引线保护结束，并经隐蔽工程验收后即可浇筑混凝土.缓粘结智能钢绞线的安装流程见图 6.

（a）普通钢筋和缓粘结钢绞线绑扎　（b）智能钢绞线入模　（c）成型保护

图 6　缓粘结智能钢绞线的安装流程

2.2.2　缓粘结智能钢绞线的张拉

本工程空心楼板内缓粘结钢绞线为单端张拉，固定端锚具选用 JN15-1 型挤压锚，张拉端锚具选用 OM15-1 型单孔夹片锚，张拉设备为北京市建筑工程研究院生产的 YCJ26 型前置内卡式穿心千斤顶.待混凝土强度达到设计强度的 80% 时.按设计张拉顺序要求对缓粘结钢绞线张拉锚固；张拉顺序为 0→20 kN（10%张拉力）→120 kN（70%张拉力）→放张→重新施力至 180 kN（设计张拉力）→锚固；在张拉过程的每个荷载级别和受力阶段记录智能钢绞线内光纤光栅中心波长值、油压表值和油缸拉伸量；锚固完成后撤除千斤顶，初步检查智能钢绞线监测结果和钢绞线滑丝量是否在允许范围以内，如超出则需补张拉.为了抵抗施工阶段和服役阶段各因素引起的智能钢绞线引线的损坏，而致使监测系统无法正常工作，应对智能钢绞线的引出线部分进行必要保护.张拉施工照片见图 7.

图 7　缓粘结智能钢绞线张拉施工

2.3　预应力损失监测阶段性成果

2.3.1　施工阶段

利用智能钢绞线对预应力混凝土空心楼板张拉过程中预应力钢筋应力变化规律和张拉结束后的瞬时预应力损失进行监测.图 8 为预应力空心楼板张拉过程中钢绞线的应力演化规律.

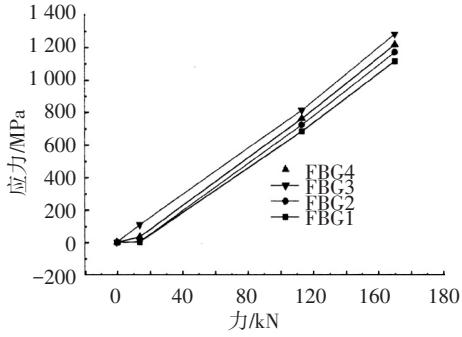

图 8　张拉过程中智能钢绞线应力变化曲线

智能钢绞线的张拉过程中，除了常规钢绞线的张拉和锚固设备外，并未增加额外设备，且张拉工艺流程与常规施工方法相同，简单易行.图 8 中 FBG1、FBG2、FBG3、FBG4 表示智能钢绞线内光纤光栅传感器，位置沿着梁长均匀分布，其排序依次为从固定端至张拉端.可以看到，位于张拉端的光纤光栅传感器测试得预应力钢绞线应力值随着张拉荷载的增大线性增加，线性相关性系数为 99.95%.从张拉端至固定端均匀分布的 4 个光纤光栅传感器达到张拉控制力时的测试应力值以从大到小的顺序排列，究其原因是本工程受到天气和人为因素影响，工期被推迟，早早制作完成的缓粘结钢绞线内缓粘结凝胶已经开始失去流动性，从而增大了钢绞线的摩擦效应.

表 2 为根据智能钢绞线内光纤光栅的测试结果，计算得空心楼板张拉阶段缓粘结智能钢绞线预应力瞬时损失值.考虑摩擦引起的预应力损失机理和特点可知，摩擦引起的预应力损失张拉端为零，从张拉端开始随着预应力筋长度和曲线线性的变化逐渐增大，表中光纤光栅传感器测试得各位置摩擦引起的预应力损失（σ_{l1}）测试值符合这一变化规律；相应地考虑锚具变形引起的预应

力损失机理和特性,这部分预应力损失受到反摩阻的影响,在张拉端最大(因张拉端反摩阻为零),而后沿着筋长逐渐减少,表中光纤光栅传感器测试得各位置锚具变形引起的预应力损失(σ_{l2})测试值符合这一变化规律,并且可以看到距离张拉端最远的光纤光栅传感器的测试结果为 0 MPa,说明此空心楼板的预应力筋锚固回缩影响范围小于梁长.钢绞线最大的瞬时损失发生在锚固端位置,其值为 167 MPa.

表 2 预应力瞬时损失计算过程与结果

光栅编号	摩擦应变/10^{-6}	摩擦损失/MPa	锚具应变/10^{-6}	锚具损失/MPa	瞬时损失/MPa
FBG1	-833	-167	-1	0	-167
FBG2	-563	-113	-31	-6	-119
FBG3	-332	-66	-328	-66	-132
FBG4	0	0	-810	-162	-162

2.3.2 无外力作用阶段

预应力钢筋张拉锚固后,虽然预应力空心楼板并未承力,但是伴随着混凝土的收缩徐变和预应力筋的松弛,预应力长期损失已开始发展,采用智能钢绞线中光纤光栅传感器数据分析预应力空心楼板无外力作用阶段预应力损失演化规律,见图 9.预应力空心楼板缓粘结预应力钢绞线的长期损失随着时间的增加而逐渐增大,且前期(约 2 d 左右)的变化率较大,2 d 后逐渐趋于平缓.10 d 后的最终预应力损失值为 23 MPa.

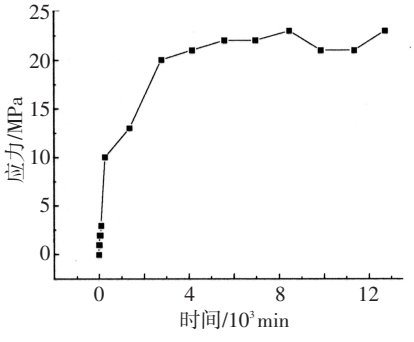

图 9 预应力长期损失演化规律

3 结 语

本文基于光纤光栅传感技术特性,综合考虑缓粘结预应力钢绞线的结构,设计制作了一种可实现预应力状态自监测的光纤光栅缓粘结智能钢绞线.并将其应用于某礼堂改造工程缓粘结预应力混凝土单向楼板内,验证了新型光纤光栅缓粘结智能钢绞线的有效性和可靠性.结果表明:该缓粘结智能钢绞线融合机理明确、技术可行,结构简单、施工方便;与普通钢绞线相比其力学性能有所下降,极限抗拉强度约为普通钢绞线的 88%;其主要传感性能指标,如迟滞、重复性、线性度、总精度等均小于 3%.通过实际工程验证了该新型智能钢绞线施工工艺简单易行,鲁棒性能够满足实际工程预应力损失长期监测.

参考文献

[1] 张建玲, 宋玉普, 刘毅. 缓粘结预应力混凝土梁抗裂和裂缝闭合性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009(12):128-132.

[2] 赵建昌, 王起才, 李永和. 超效缓凝砂浆与缓粘结预应力混凝土构件试验研究[J]. 土木工程学报,2003, 36(8):57-62.

[3] 吴转琴, 尚仁杰, 洪光, 等. 缓粘结预应力钢绞线与混凝土粘结性能试验研究[J]. 建筑结构,2013,(2):68-70.

[4] SCALEA F L, RIZZO P, SEIBLE F. Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves[J]. J Mater Civil Eng,2003, 15: 219-227.

[5] MAJI A K, NEGRET I. Smart prestressing with shape-memory alloy[J]. J Eng Mech,1998, 124: 1121-1128.

[6] ADEWUYI A P, WU Z S. Modal macro-strain flexibility methods for damage localization in flexural structures using long-gage FBG sensors [J]. J Struct Control Health Monit, 2011, 18: 341-360.

[7] LIN Y B, CHANG K C, CHERN J C,et al. The health monitoring of a prestressed concrete beam by using fiber Bragg grating sensors[J]. Smart Mater Struct,2004, 13: 712-718.

[8] GAO J, SHI B, ZHANG W, et al. Monitoring the stress of the post-tensioning cable using fiber optic distributed strain sensor[J]. J Int Meas Confed,2006, 39: 420-428.

[9] 邓年春, 欧进萍, 周智, 等. 光纤光栅在预应力钢绞线应力监测中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(10): 1550-1553.

[10] LAN C G, ZHOU Z, OU J P. Full-scale prestress loss monitoring of damaged RC structure using distributed optical fiber sensing technology[J]. Journal of Sensors, 2012, 12(5): 5380-5394

[11] 董海, 兰春光, 徐瑞龙, 等. 缓粘结智能钢绞线及其在预应力损失监测的应用[J]. 结构工程师,2013, 29(4): 159-165.

[12] 兰春光, 周智, 欧进萍. 内嵌钢丝 GFRP-FBG 智能复合筋的研制及其性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2012, 28(1): 72-78.

[13] 兰春光, 刘航. 新型自监测缓粘结智能钢绞线的研制[C]//第四届全国建筑结构技术交流会论文集(下). 成都:建筑结构杂志社, 2013: 1271-1274.

(编辑 赵丽莹)