

钢绞线预应力损失的监测方法



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

预应力混凝土技术已从原来主要用于房屋和桥梁的相对小跨的构件发展到了主要(或较重要)的结构,比如:海上结构、核反应堆容器、大的商业和工业建筑以及其他一些特殊功能的结构等。在使用期间,由于荷载、疲劳、腐蚀、老化及环境等不利条件和因素的影响,预应力混凝土结构将不可避免地产生损伤积累、抗力衰减,甚至导致突发性事故。然而,由于预应力损失受材料性能、施工工艺、环境条件等多方面的影响以及部分损失之间的相互影响,要准确计算预应力损失是极其复杂甚至是不可能的。因此,对预应力损失进行监测已成为工程人员和学者所关心的问题。从预应力损失的监测方法来看,目前的手段无外乎:粘贴应变片和振弦应变计测试钢绞线应变;在相应预应力混凝土中埋入钢筋计和振弦传感器测量混凝土应变,再反算钢绞线应力;采用压力环测试整体张力;液压千斤顶通过油表测试其整体外张力等,但由于传感器自身缺陷和布设工艺方面存在的不足严重限制了传感器在实际结构中的应用。增强纤维光纤布里渊和光纤光栅传感的出现为解决这一难题提供了必要手段。增强纤维光纤布里渊和光纤光栅传感充分结合光纤布里渊的全尺度分布式测试和光纤光栅的准分布式、高精度、采样频率高等优点,并采用FRP材料对传感元件进行封装,使得智能复合筋兼具受力与传感特性、集结构材料和功能材料于一体,适应大型土木工程结构的体积大、分布面积广、使用期限长、服役环境恶劣等特点。

基于增强纤维光纤布里渊与光纤光栅智能复合筋的特点,考虑钢绞线的工作环境,开发出一种新型的光纤布里渊与光纤光栅智能钢绞线结构,并将其与传统传感器一起布设于单束无黏结预应力混凝土试验梁和多束有黏结预应力混凝土试验梁内,对预应力筋的预应力损失进行监测。分析了智能钢绞线监测结果,并与由规范计算值和传统传感器的监测结果进行对比。

1 智能钢绞线简介

1.1 基本原理

根据构件中预应力筋的监测需要,设计制作增强纤维光纤布里渊和光纤光栅智能复合筋,然后将智能复合筋替代常规7丝智能钢绞线的中芯丝(如图1所示),组装成新型智能钢绞线。

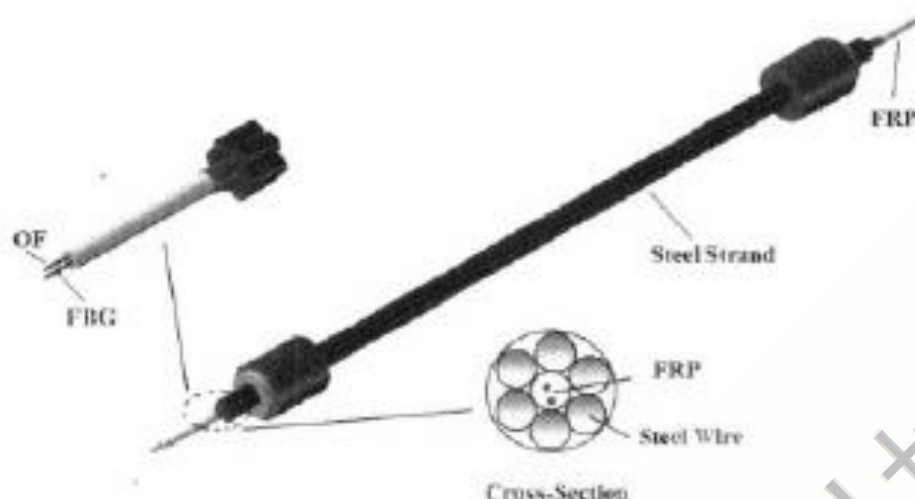


图1 智能钢绞线结构示意图

为了保证智能复合筋与普通钢绞线外丝协同变形，在智能复合筋表面包裹一层或几层高延性的金属薄片（本研究选用0.02mm 的铜箔），通过增加智能复合筋直径的方法增加智能复合筋与普通钢绞线外丝的层间摩擦力。借助钢绞线受力状态下的端部的锚固和扭转效应，智能复合筋会被自然握裹，达到协同变形的效果。智能复合筋与普通钢绞线的6 根外层钢丝是协同变形的，智能复合筋所测应变即为整根智能钢绞线的应变。考虑光纤Bragg 光栅应变传感器特性和光纤布里渊应变传感特性，通过传感器测试得到的钢绞线有效应力值分别为：

$$\sigma = \frac{E_{IC}}{\alpha_\epsilon} \Delta \lambda_B \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{E_{IC}}{k_\epsilon} \Delta \nu_B \quad (2)$$

式中： $\Delta \lambda_B$ 为光纤Bragg 光栅中心波长变化值； α_ϵ 为光纤光栅轴向应变与中心波长变化关系的灵敏度系数； $\Delta \nu_B$ 为光纤发生应变前后布里渊散射光频率的漂移量； k_ϵ 为光纤轴向应变与光频率漂移量变化关系的灵敏度系数。

1.2 标定试验

为验证智能钢绞线的传感性能，特做如下智能钢绞线标定试验。试验对象为长3m 的智能钢绞线；试验加载设备为千斤顶和反力架；光纤光栅传感器中心波长解调采用4通道光纤光栅解调仪；加荷方式为逐级加载，以10kN 为一个级别，加载到50kN 后，再以同样的级数卸至无力状态，重复4 个循环。试验装置和试验结果如图2 和图3 所示：

标定试验结果表明：智能钢绞线可以采用传统的预应力筋张拉和锚固工具；其测试结果的线性度和重复性均较好，线性拟合系数达 $n = 99.993\%$ 。



图2 智能钢绞线标定装置照片

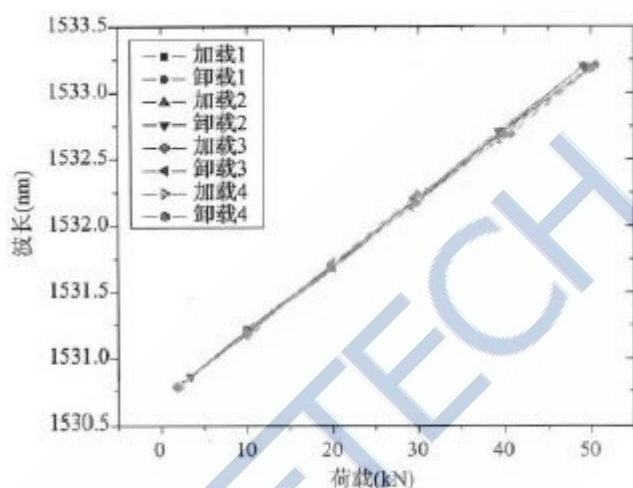


图3 智能钢绞线的标定试验结果

2 预应力损失理论计算方法

后张法预应力混凝土梁，且未配置螺旋式预应力钢筋，其预应力损失主要包括：

- ② 张拉端锚具变形和钢筋内缩引起的预应力损失 σ_{11} ；
- ② 预应力钢筋与孔道壁之间摩擦引起的预应力损失 σ_{12} ；
- ③ 预应力钢筋的应力松弛引起的预应力损失 σ_{14} ；
- ④ 混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{15} ；其中 σ_{11} 和 σ_{12} 属于瞬时损失， σ_{14} 和 σ_{15} 属于长期损失。依照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 的规定，后张法预应力混凝土梁的各项预应力损失理论计算方法如下：

(1) 由锚具变形和预应力筋在锚具内的滑移使预应力筋内缩而引起预应力损失 σ

11:

$$\sigma_n = \frac{\alpha}{l} E_s \quad (3)$$

(2) 由预应力筋与孔道壁之间摩擦引起的预应力损失 σ_{l2} :

$$\sigma_{l2} = [1 - e^{-(kx + \mu\theta)}] \sigma_{con} \quad (4)$$

(3) 由预应力钢筋的应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4} :

$$\sigma_{l4} = 0.4\psi \left(\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.5 \right) \sigma_{con} \quad (5)$$

(4) 由混凝土收缩徐变引起的预应力损失 σ_{l5} :

$$\sigma_{l5} = \frac{35 + 280 \frac{\sigma_{pc}}{f_{cu}'}}{1 + 15\rho} \quad (6)$$

3 预应力损失监测试验

3.1 低张拉力 (50% f_{ptk}) 单筋无黏结预应力梁试验

3.1.1 试验描述

试验梁为后张预应力混凝土梁，无黏结预应力系统，梁截面尺寸为100mm × 200mm，跨度为2m；预留直径为30mm 的直线孔道；预应力筋配置单根智能钢绞线，强度标准值为1660MPa，公称直径为15.24mm；混凝土强度为C30；非预应力钢筋选用HRB335 级螺纹钢筋，在试验梁的受拉区和受压区分别布置2Φ12；箍筋选用HPB235 级Φ6@200mm。张拉端和锚固端预埋钢垫板和螺旋筋以承受局部压力，钢垫板厚10mm，螺旋筋直径4mm，内径为50mm，5 匝。考虑直线配筋无黏结预应力混凝土梁的预应力损失特点及与传统压力传感器对比效果，智能筋内除通长布置光纤传感器外，选择在张拉端和跨中位置布设光纤光栅传感器。传感器布设位置如图4 所示。



图4 智能钢绞线内传感器布置示意图

预应力钢筋采用一端张拉，张拉时混凝土龄期超过28d。锚具采用XM 系列单孔夹片锚。张拉设备采用标准单孔顶锚预应力张拉机，张拉控制应力为 $\sigma_{con} = 0.5f_{ptk}$ ，最大张拉荷载为120kN。张拉力分6 级施加，加至每级荷载后，均放

张锚固，直到达到控制应力为止。预应力的施加主要通过安置在锚头与锚垫板之间的电阻应变式压力传感器控制(如图5 所示)。



图5 低张拉力单筋预应力混凝土梁试验照片

张拉结束后，记录锚固后3min、8min、15min、25min、40min、1h、2h、4h、8h、12h、24h 等时间点上电阻应变式压力传感器数值、光纤光栅中心波长值和光纤布里渊传感器测试数据，而后每天选择适当时间采集2 ~ 3 次数据，直到1000h(约41d)。电阻应变式压力传感器测试采用YE2537 静态电阻应变仪；光纤光栅传感器采用美国Micron Optics 公司生产的Si720 型光纤光栅解调仪；光纤布里渊传感器采用分布式光纤应变温度监测系统(BOTDA)采集。

3.1.2 试验结果与分析

选取荷载为120kN 放张前后，智能钢绞线中光纤布里渊传感器测试数据和光纤光栅传感器测试数据绘制图6。

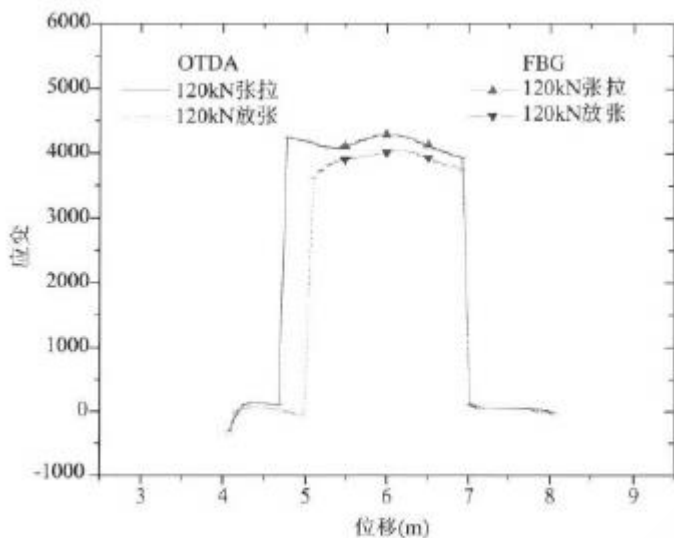


图6 智能钢绞线测试预应力损失结果图

从图6 可以清晰分辨出光纤分布式传感器的测试段(图中5m ~ 7m 范围), 且左侧的预应力损失要略大于右侧, 这均与光纤光栅传感器的测试结果相吻合, 图中两种传感器对应点测试误差分别为0.14%, 0.21%, 0.24%, 0.13%, 0.2%, 0.15%。选取试验梁预应力钢绞线张拉锚固后智能钢绞线内光纤光栅传感器和力传感器的测试数据, 以时间为横轴, 绘制基于两种传感器测试监测结果对比图, 如图7 所示。

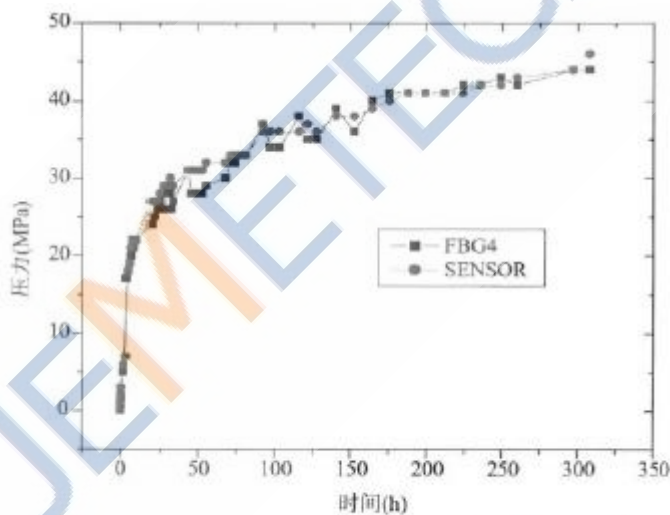


图7 智能钢绞线与压力传感器测试数据对比图

本试验梁采用的张拉控制力为 $\sigma_{con} = 0.5f_{ptk}$, 由式(5)可知由钢绞线应力松弛产生的预应力损失可以忽略不计, 因此本试验智能钢绞线和压力传感器的测试结果中都仅含有由混凝土收缩徐变引起的预应力长期损失。从图7 中可以看到, 智能钢绞线可以正确反

映预应力损失的开展趋势，并且与压力传感器测试数据吻合很好，证明了智能钢绞线用于钢绞线预应力长期损失监测的可行性和准确性。

3.2 普通张拉力(75% f_{ptk})多筋有黏结预应力梁试验

3.2.1 试验描述

为验证智能钢绞线在多筋有黏结预应力混凝土梁预应力筋应力损失监测的有效性，做如下试验。试验梁采用后张预应力混凝土梁，有黏结预应力系统，梁截面尺寸为200mm × 400mm，跨度为4m；混凝土强度为C40；预应力筋配置单束5 根智能钢绞线，强度标准值为1660MPa，公称直径为15.24mm；非预应力钢筋采用HRB335 级螺纹钢筋，在试验梁的受拉区和受压区分别布置3 Φ 12mm；张拉端和锚固端预埋钢垫板和螺旋筋以承受局部压力，钢垫板厚10mm，螺旋筋直径6mm，内径为100mm，8 匝。

试验用智能钢绞线分别采用光纤布里渊与光纤光栅测试技术，其中光纤布里渊传感器沿预应力筋全长布置；光纤光栅传感器设5 个测点，分别为张拉端、左侧1/4跨、跨中、右侧1/4跨和固定端位置。考虑智能筋在张拉时最大应变约为7000 $\mu\epsilon \sim 8000 \mu\epsilon$ ，为防止张拉过程中光纤光栅传感器中心波长相互重叠影响测试，同一根智能筋内的光纤光栅中心波长差值约为5nm，本试验中分别采用1525nm、1530nm、1535nm、1540nm 和1545nm。为更好的保护光纤光栅传感器，5 个传感器直接制作成光纤光栅串，各光纤光栅应满足反射率> 90%。为放大由钢绞线应力松弛引起的预应力损失的作用，减少由混凝土收缩徐变引起的预应力损失，特在混凝土梁浇注养护结束后3 个月后进行张拉。试验张拉过程和数据采集系统与试验1 类似，不再赘述。试验照片如图8 所示。



图8 多筋有黏结预应力混凝土梁试验装置照片

3.2.2 试验结果与分析

在试验梁预应力筋最后两级控制荷载 (140kN 和160kN) 放张前后分别记录智能钢绞线内光纤光栅传感器测试数据和电阻应变式压力传感器测试数据，然后根据各传感器原理计算出基于相应传感器的瞬时损失，并将光纤光栅传感器测试结果与系统压力传感

器和理论计算结果进行对比，相关数据计入表1。

表1 预应力瞬时损失测试结果对比表

Table 1 Instantaneous prestress loss measured by smart strand and force sensor

工况	钢绞线 1 (MPa)	钢绞线 2 (MPa)	钢绞线 3 (MPa)	压力传感器 (MPa)	误差 (%)	计算值 (MPa)
钢绞线 1-140kN	203	-4	0	215	5.9	255
钢绞线 2-140kN	-2	169	3	177	4.7	255
钢绞线 3-140kN	1	4	209	223	6.7	255
钢绞线 2-160kN	-1	242	3	250	3.3	255

表1 的瞬时损失测试结果显示，智能钢绞线能够正确反映预应力瞬时损失随着张拉控制应力增大而增大的趋势，且与传统的电阻应变式压力传感器测试结果相吻合，相对误差均小于7%。当张拉控制为140kN 时，智能钢绞线中光纤光栅传感器和电阻应变式压力传感器测试的预应力瞬时损失均比理论计算值小，但当张拉控制力为75% 破断极限力(160kN)

时，测试结果与理论值较接近。单孔内含有束钢绞线，当采用分级张拉，且每级别控制力时均放张锚固，可有效降低混凝土弹性压缩引起的先张拉钢绞线预应力损失。为了考察预应力筋预应力长期损失的空间分布情况，采用本试验梁预应力钢绞线张拉锚固后特定时间

点时采集的同一智能钢绞线内的5 个光纤光栅传感器的测试数据，时间轴以小时为单位，以锚固结束为0点，绘制同一智能钢绞线中5 个光纤光栅传感器测试的预应力长期损失监测结果对比图，如图9 所示。

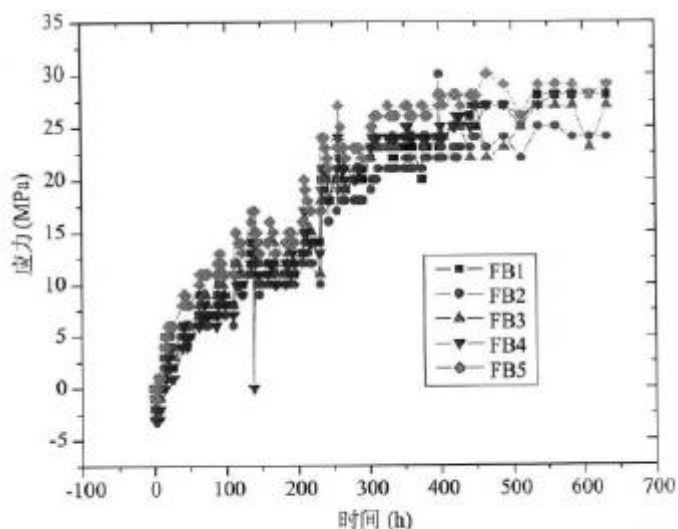


图9 同一钢绞线内光纤光栅传感器测试结果对比图

从图9 可知，智能钢绞线内的5 个光纤光栅传感器测试结果反映出相同的变化规律（预应力长期损失随着时间的增加而逐渐增大，且前期的变化比率较大，而后逐渐趋于平缓），这与预应力长期损失与空间位置无关的特性相吻合。为了进一步考察预应力长期损失的空间分布变化情况，绘制光纤布里渊传感器测试数据沿着梁长方向的分布情况及梁中点位置光纤布里渊传感器和光纤光栅传感器预应力长期损失对比图，如图10、图11所示。

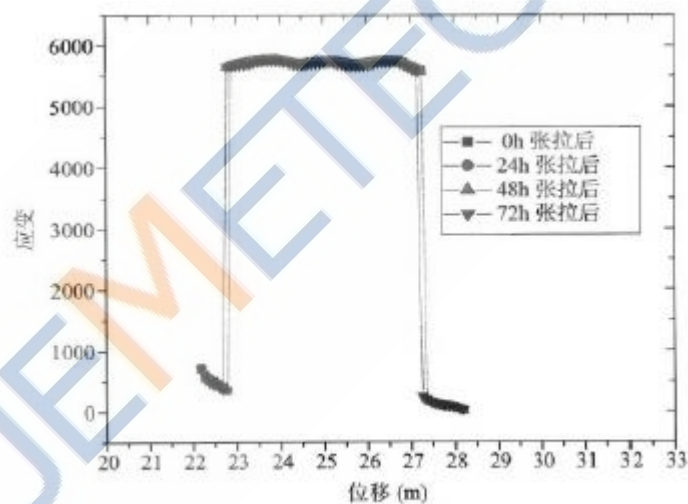


图10 光纤布里渊传感器测试结果图

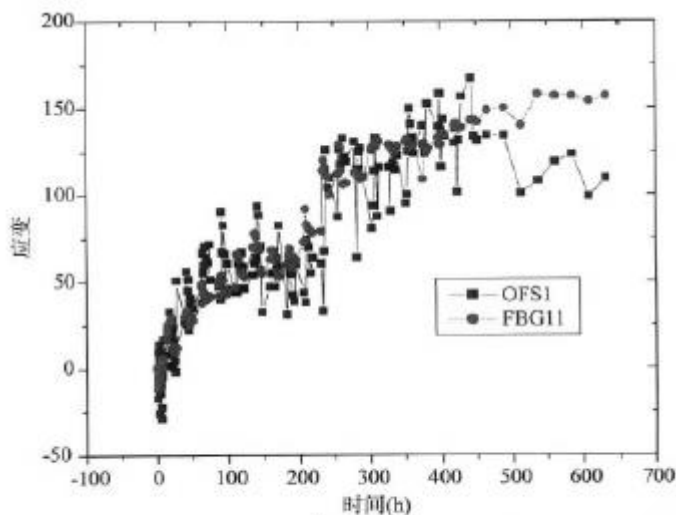


图 11 A 点位置光纤布里渊和光纤光栅测试结果对比图

图10 为张拉锚固后前3d 的光纤布里渊传感器测试数据，从图中可以明显分辨出梁的测试段为4m(横轴23m 至27m 位置)，且沿着梁长方向的预应力长期损失均相同。图11 为梁中点位置30d 时间的预应力长期损失测试数据，图中显示两种测试手段的测试结果变化规律和数值基本吻合，只是光纤布里渊传感器测试数据较光纤光栅传感器测试结果相比稳定性不足，这是由于光纤布里渊测试技术的测试精度约为 $20\mu\epsilon$ ，较光纤光栅测试技术的精度($1-2\mu\epsilon$)低所致。以张拉锚固后30d 的光纤光栅传感器测试数据和电阻应变式压力传感器测试数据作为纵轴，时间以小时为单位作为横轴绘制两种测试手段的预应力长期损失对比图(如图12 所示)。由智能钢绞线和电阻应变式压力传感器的测试原理可知，智能钢绞线是基于预应力筋的应变测试数据后计算得预应力损失，而电阻应变式压力传感器是通过预应力筋的整体受力大小计算得预应力损失，因此电阻应变式压力传感器可测试得到的预应力长期损失数据包括由预应力筋应力松弛引起的预应力损失及由混凝土收缩徐变引起的预应力损失两项，而智能钢绞线测试数据中仅包括由混凝土收缩徐变引起的预应力损失。本试验为了放大应力松弛引起的预应力损失对测试结果的影响，特在混凝土浇筑后3 个月后才进行张拉，使得智能钢绞线测试结果与电阻应变式压力传感器测试结果有较大差值(如图12 所示)。

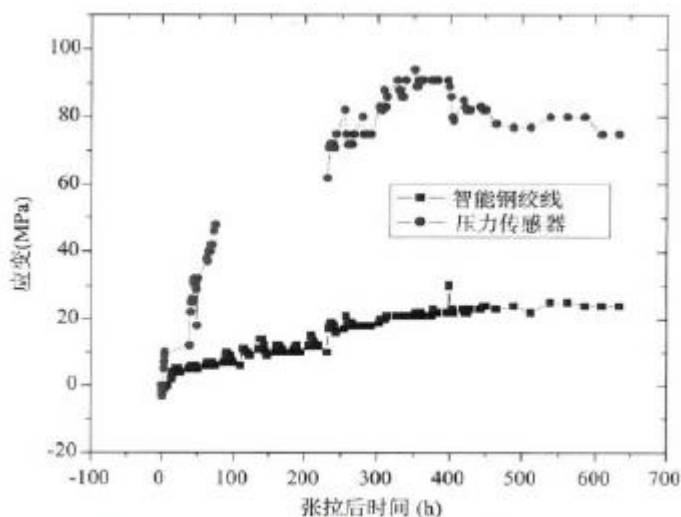


图12 预应力长期损失测试结果对比图

由图12 可知，为了仅通过智能钢绞线的测试结果得到预应力混凝土梁预应力长期损失，需要对智能钢绞线的测试结果进行修正。本文在智能钢绞线测试结果基础上加入根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)计算的由预应力筋松弛引起的预应力损失理论值，修正前后的结果计入表2。

表2 智能钢绞线测试数据修正前后对比情况表

Table 2 Results measured by the smart strand and the force sensor

智能钢绞线			压力传感器 (MPa)	误差 (%)
光纤光栅 (MPa)	计算修正值 (MPa)	修正后值 (MPa)		
39	34	73	75	2.67

由表2 可知，采用规范计算预应力筋应力松弛引起的预应力长期损失的理论值对光纤光栅智能钢绞线测试数据进行修正与电阻应变式压力传感器测试结果相吻合，误差仅为2.7%，说明通过理论计算预应力筋应力松弛引起的预应力损失修正智能钢绞线测试数据的测试方法是可行的和准确的。考虑本试验为了放大由于应力松弛产生预应力损失，张拉时间为浇筑养护后3 个月后进行，而实际结构张拉锚固时间远远短于本试验时间，因此预应力筋应力松弛产生的预应力损失影响更小。

4 结论

基于增强纤维光纤布里渊与光纤光栅智能筋的特点，考虑钢绞线的工作环境，设计制作了一种新型的光纤布里渊与光纤光栅智能钢绞线结构，并将其与传统预应力损失监测用传感器一起布设于预应力混凝土梁内，对预应力筋的预应力损失进行监测。分析了智能钢绞线监测结果，并与规范计算值和传统传感器的监测结果

进行对比。基于试验结果，我们得到如下结论：

(1) 此新型智能钢绞线可以采用传统钢绞线的张拉和锚固工具进行施工，并未增加施工工艺，方便易行。

(2) 光纤布里渊传感器测试结果可以正确反映智能钢绞线应变空间分布情况，其值与对应位置的光纤光栅传感器测试结果相吻合，各点误差分别为0.14%，0.21%，0.24%，0.13%，0.2%，0.15%。

(3) 智能钢绞线内光纤光栅传感器和光纤布里渊传感器测试结果均能正确反映预应力损失变化趋势，由于测试精度的差异，光纤布里渊传感器测试结果稳定性较光纤光栅传感器测试结果差。智能钢绞线测试结果与传统传感器测试结果和规范计算结果相吻合，证明了智能钢绞线监测预应力损失的可行性和准确性。

(4) 当选择较低的张拉控制应力时 ($\sigma_{con} = 0.5f_{ptk}$)，由预应力筋应力松弛引起的预应力损失可忽略。这时预应力筋的长期损失仅采用智能钢绞线进行监测即可。

(5) 当选择普通的张拉控制力时 ($\sigma_{con} = 0.75f_{ptk}$)，根据智能钢绞线中光纤光栅传感器和光纤布里渊传感器测试原理可知，智能钢绞线的监测结果尚需添加由智能筋松弛引起的预应力损失项。通过采用计算得到预应力筋松弛引起的预应力损失项对智能钢绞线进行修改后，与传统力传感器测试结果吻合，误差为2.67%。