

# 预张拉纤维布约束混凝土圆柱预应力损失试验

周长东<sup>1,2</sup>, 李季<sup>3</sup>, 吕西林<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;  
3. 中国建筑建筑设计研究院, 北京 100044)

**摘要:** 为了对混凝土墩柱有效施加环向预应力, 研制了一种自锁式锚具用来环向张拉纤维布, 从而对核心混凝土提供主动约束应力, 提高混凝土墩柱的强度和延性. 根据自锁式锚具的施工工艺, 分析了引起预应力损失的主要原因, 针对摩擦损失、碳纤维布应力松弛损失、混凝土收缩徐变损失等各种影响因素进行了试验研究和理论分析, 得到了各项预应力损失的发展规律及其与相关影响因素的关系, 提出了减少预应力损失的措施.

**关键词:** 预应力损失; 预张拉纤维布; 混凝土墩柱; 自锁式锚具; 主动约束

**中图分类号:** TU375.3; TU502.6

**文献标识码:** A

## Experimental Research on Pre-stress Loss of Concrete Circular Columns Confined with Post-tensioned FRP

ZHOU Changdong<sup>1,2</sup>, LI Ji<sup>3</sup>, LU Xilin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A new self-locking anchor (SLA) is proposed in order to apply the lateral pre-stress to the concrete columns. By using this device, the lateral fiber reinforced polymer (FRP) sheets can be post-tensioned effectively so that the core concrete can be actively confined. Then the strength and ductility of concrete columns can be highly enhanced and strengthened with lateral pre-stressed FRP sheets, and the strength of FRP can be fully used. According to the construction process of SLA, the major reason for the lateral pre-stress loss is analyzed. Based on the experimental research and theory analysis, including the friction loss, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) relaxation loss, concrete creep loss and other factors, various discipline and

related relationship are found. Finally, proposals to reduce the lateral pre-stress loss are put forward.

**Key words:** pre-stress loss; pre-tensioned fiber reinforced polymer; concrete column; self-locking anchor system (SLA); active confinement

采用环向预应力纤维布 (fiber reinforced polymer, FRP) 加固混凝土墩柱, 可以避免 FRP 材料的应力滞后效应, 充分发挥 FRP 材料的高强特性, 从而有效提高被加固墩柱的承载力、延性和抗震性能<sup>[1-6]</sup>. 但是, 如何对环向纤维布施加预应力是一项技术难题, 而作者开发的一种自锁式锚具可以用于对 FRP 片材有效施加和保持环向预应力, 从而对混凝土墩柱施加主动约束应力, 显著增强加固效果.

当采用环向预应力 FRP 片材加固混凝土墩柱时, FRP 中预应力的损失是不可避免的, 而预应力损失将会削弱 FRP 片材对核心混凝土的主动约束, 影响混凝土墩柱的加固效果. 因此, 针对自锁式锚具的工作原理和施工工艺, 分析了引起预应力损失的主要原因, 通过试验研究和理论分析给出了各项预应力损失的发展规律和相互关系, 在此基础上提出了采用自锁式锚具张拉和固定环向纤维布时减少预应力损失的工程措施.

## 1 自锁式锚具简介

### 1.1 锚具构成及工作原理

自锁式锚具由 2 支锚头、2 根螺栓和高强纤维布组成<sup>[7]</sup> (图 1), 旋紧连接 2 个锚头的上下螺栓, 对环向纤维布实施张拉; 张拉结束后, 通过锚头自身的受力平衡, 对纤维布进行锁定, 从而长期保持预应力.

收稿日期: 2011-07-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (50978021); 同济大学土木工程防灾国家重点实验室开放基金 (SLDRCE08-MB-01); 中央高校基本科研业务费专项基金 (2011JBM080)

第一作者: 周长东 (1971—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为工程结构鉴定与加固. E-mail: zhouchangdong@163.com

螺栓上施加的扭矩与其预拉力之间的关系已经通过试验给出<sup>[7]</sup>,实际工程中采用这种锚具对纤维布施加预应力时可以通过扭力扳手来控制预应力大小。

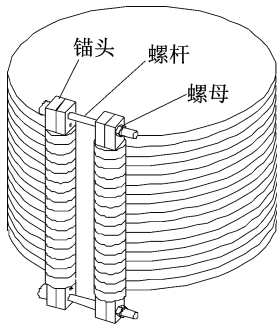


图 1 自锁式锚具结构示意图

Fig.1 Schematic of SLA anchor

当混凝土墩柱直径较大时,可以通过多个图 1 所示的自锁式锚具相互串联,并对多个锚具进行逐级加载,达到多次张拉、多向锁定的功能,可以控制张拉装置之间的距离,从而有效施加预应力,减少摩擦带来的预应力损失。

## 1.2 引起预应力损失的主要原因

根据图 1 所示的预应力 FRP 片材所用的锚具结构与施工工艺,预应力损失主要有锚具变形损失、螺杆应力松弛损失、张拉过程中纤维布与被加固柱表面摩擦损失、张拉完毕后碳纤维布的应力松弛和混凝土墩柱的径向收缩徐变引起的损失等 5 个主要部分。

自锁式锚具设计时已经从尺寸和强度方面来控制其变形;根据既有研究成果<sup>[8]</sup>进行计算和分析,图 1 锚具中张拉螺杆的应力松弛导致的预应力损失大约为  $10^{-5}$  左右,可以忽略。因此本文只针对摩擦损失、碳纤维布的应力松弛损失以及混凝土墩柱的径向收缩徐变引起的损失等 3 个主要因素进行试验研究。

## 2 试验设计

采用南京曼卡特有限公司生产的 MTK300 g 碳纤维布,单层厚度为 0.167 mm、受拉弹性模量为  $2.41 \times 10^5$  MPa、理论抗拉强度为 3 400 MPa。

试验中墩柱的材料共有 2 种:素混凝土实心圆柱与圆形实心钢柱,分别用 HZ- $x$  和 GZ- $x$  表示;为了研究尺寸效应对预应力损失的影响,采用了 195、240 和 300 mm 等 3 种直径的圆形混凝土柱和钢柱;因为钢的弹性模量比混凝土高 1 个数量级,所以采用相同直径钢柱与混凝土柱进行对比可以消除温

度、湿度等环境因素的影响,研究混凝土的收缩徐变引起的预应力损失。试件见图 2 所示。



a HZ- $x$

b GZ- $x$

图 2 试件详图

Fig.2 Details of specimens

## 2.1 张拉纤维布时产生的摩擦损失

摩擦损失是在施加预应力的过程中由于混凝土表面和纤维布表面发生相对滑动而产生摩擦力阻碍纤维布中预应力的传递,导致距离锚头越远的纤维布的预应力越小。试验通过测量摩擦造成的预应力损失大小研究预应力度、被加固柱直径大小、表面粗糙程度对预应力损失的影响。试验中的设计参数见表 1。表中的预应力度是指预应力大小与碳纤维布抗拉强度的比值;表面处理情况中的打磨是以磨去浮浆、露出混凝土粗骨料为标准。

表 1 摩擦损失试验中试件参数

Tab.1 Parameters of specimens in prestress loss tests

试件编号	柱直径/mm	预应力度	表面处理情况
HZ-1	300	0.1	未打磨
HZ-2	300	0.2	未打磨
HZ-3	300	0.2	打磨
HZ-4	240	0.2	未打磨
HZ-5	195	0.2	未打磨

试验通过布置在碳纤维布上的应变片监测预应力损失情况。为了保证数据的稳定性,试验所用应变片在粘贴完毕后用 714 胶进行了防水和防潮处理,试验室温差为  $\pm 5$  °C,可以忽略湿度和温度给应变片造成的影响;读数期间为了减少长时间通电导致应变片发热的情况,每次读数完毕后都切断电源,并在下次读数之前先开机预热 20 min 再读数。根据碳纤维布长度的不同有图 3 中的 3 种布置方式。

## 2.2 持载过程中的长期损失

### 2.2.1 碳纤维布应力松弛损失

在长期荷载作用下,碳纤维自身的应力松弛产生的预应力损失会降低对核心混凝土的约束作用。试验目的是测量应力松弛造成的损失大小,研究预应力度和被加固柱直径大小对预应力损失的影响。

由于实心圆钢柱的弹性模量较大,且自身刚度很大,钢柱变形引起的碳纤维布应力损失可忽略不计,所以本试验中选择实心圆钢柱作为加固对象。

案同 2.1 节。

表 3 混凝土徐变试验中试件参数

试件编号	混凝土等级	预应力度	柱直径/mm
HZ-6	C40	0.3	300
HZ-7	C40	0.2	300
HZ-8	C30	0.2	300
HZ-9	C20	0.2	240

### 3 预应力损失机理及试验结果分析

#### 3.1 摩擦损失

##### 3.1.1 摩擦损失公式

图 4 是碳纤维布在施加环向预应力过程中的受力简图,其中  $l$  为长度;  $F_x$  是受到来自圆柱切向摩擦力在水平方向上的合力;  $F_y$  是受到来自圆柱径向支撑力在竖直方向上的合力;  $F$  为锚具端部的张拉力;  $f$  为摩擦导致的预应力损失;  $\theta$  为距离张拉端的圆心角;  $R$  为圆柱半径。

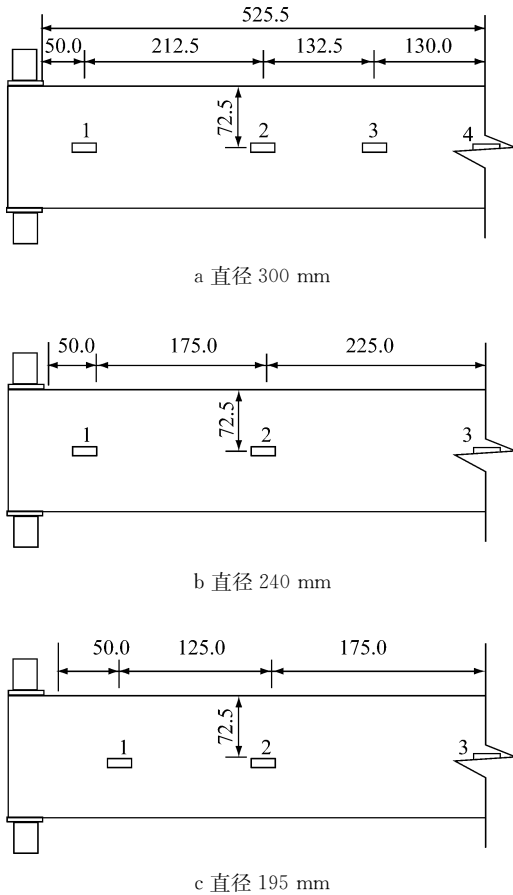


图 3 应变片布置示意

Fig.3 Schematic of strain gauge arrangement

试验中的设计参数见表 2. 试验的测试时间根据纤维布松弛的发展情况来定,当纤维布松弛稳定后再持续一定时间即停止试验. 试验测量方案同 2.1 节。

表 2 松弛损失试验中试件参数

试件	柱直径/mm	预应力度	试件	柱直径/mm	预应力度
GZ-1	300	0.3	GZ-4	240	0.2
GZ-2	300	0.2	GZ-5	195	0.2
GZ-3	300	0.1			

#### 2.2.2 混凝土收缩徐变损失

在对混凝土柱进行环向预应力加固时,碳纤维布给混凝土柱提供了一个主动的围压,打破了原有受力状态,使混凝土柱产生径向的收缩徐变,导致碳纤维布松弛,预应力降低. 试验目的是测量混凝土徐变损失的大小,研究预应力度、混凝土强度对预应力损失的影响. 试验设计参数如表 3 所示. 数据测量方

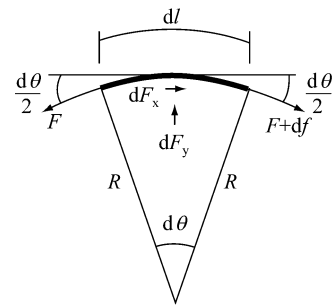


图 4 碳纤维布受力

Fig.4 Diagram of friction analysis of CFRP belts

根据水平、竖直方向力学方程联立,有

$$df = -2\mu F \tan \frac{d\theta}{2} = -\mu F d\theta \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为摩擦系数,与材料有关. 式(1)的物理意义是,经过了长度为  $dl = R d\theta$  的摩擦后碳纤维布的预应力损失了  $df$ ,所以在距张拉端弧长  $x$  的位置因为摩擦导致的预应力损失  $f$  为

$$f = \int_0^x \frac{\mu F}{R} dl = \frac{\mu F}{R} x \quad (2)$$

式(2)中摩擦损失与 4 个因素有关:接触面的粗糙程度;张拉端拉力的大小;圆柱体的半径大小;与张拉端的距离远近。

#### 3.1.2 摩擦损失试验数据分析

摩擦损失试验的数据如表 4. 根据自锁式锚具施加预应力的原理,距离张拉端越远处的碳纤维布摩擦损失越大,远端应变与张拉端应变的差值即为张

拉应力的摩擦损失值,损失值与张拉端应变之比是应变损失比.从表 4 数据可见不同影响因素控制下的摩擦损失不相同,当预应力度为 0.2 时,直径 300 mm 的圆柱摩擦损失的范围为 29.08%~32.44%.

表 4 摩擦损失试验结果

Tab.4 Test results of prestress loss

试件	张拉端应变/ $10^{-6}$	远端应变/ $10^{-6}$	应变损失比/%
HZ-1	1 629	1 270	22.04
HZ-2	3 312	2 349	29.08
HZ-3	3 560	2 405	32.44
HZ-4	3 541	2 059	41.85
HZ-5	3 043	1 482	51.30

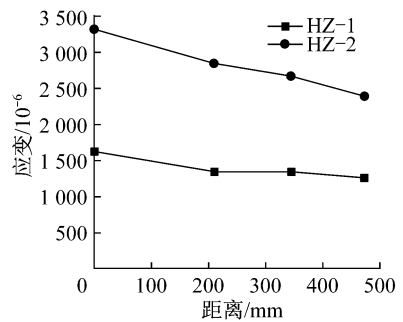
(1) 预应力度影响.由图 5a 可见应变与距离关系曲线近似为直线,且均呈递减趋势,其中 HZ-2 曲线的斜率大于 HZ-1 曲线,近似为 2 倍关系.这说明由于摩擦力的影响,预应力在碳纤维布中的传递受到了阻碍,距张拉端越远,应变损失就越大;20% 预应力度 HZ-2 在单位距离内应变损失大于 10% 预应力度 HZ-1.由表 4 数据可见,预应力越大试件的摩擦损失越大.

(2) 构件尺寸的影响.由图 5b 可见,在距离张拉端 0~150 mm 范围内,HZ-5 的斜率最大,HZ-4 次之,HZ-2 最小.斜率为摩擦损失率,代表单位长度内的摩擦损失值,斜率越大即摩擦损失率越大,所以在这个范围内 HZ-5 的摩擦损失率最大.而在距离张拉端 150~400 mm 范围内,HZ-4 和 HZ-5 的斜率小于 HZ-2,这是因为经过了前半段巨大的摩擦损失 HZ-4 和 HZ-5 中的预应力已经变小,根据预应力度对摩擦损失影响的结论,HZ-4 和 HZ-5 摩擦损失率变小.通过表 4 中数据可以看出,虽然后半段 HZ-5 和 HZ-4 摩擦损失率有所下降,但总损失量还是大于 HZ-2,所以尺寸越小的柱子加载时的摩擦损失值越大.

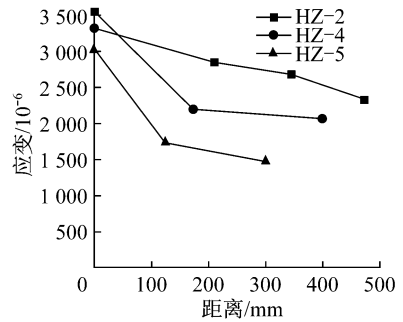
(3) 表面粗糙度的影响.由图 5c 可见,在距离张拉端 0~200 mm 范围内 HZ-3 的斜率大于 HZ-2,而在距离张拉端 200~480 mm 范围内 HZ-3 的斜率变小.结合表 4 中数据可以看出,虽然 HZ-3 在后半段摩擦损失有所下降,但总的损失量还是大于 HZ-2,所以表面越粗糙的混凝土柱产生的摩擦损失越大.

### 3.2 碳纤维布应力松弛损失

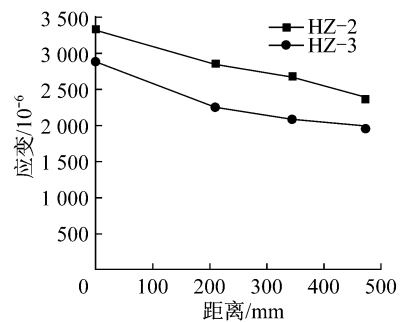
由于自锁式锚具适用于对混凝土墩柱震后应急加固,所以在使用中一般不将碳纤维布浸渍粘结胶体.不同于之前他人对刷胶后的碳纤维布的应力松弛研究,本试验中不刷胶的碳纤维布的应力松弛主



a 张拉应力的影响



b 构件尺寸的影响



c 试件表面粗糙度的影响

图 5 应变分布曲线

Fig.5 Strain distribution

要来自 2 个部分:①碳纤维片材在加工时并不能保证各根纤维等长,施加预应力时,稍短的纤维先受力;随着持荷时间的增长,稍短纤维所承担的荷载通过碳纤维布的编织经线传递给稍长纤维,导致了应力松弛.②碳纤维本身发生的松弛.

图 6 为试件 GZ-1~GZ-5 中预应力碳纤维布随时间的变化曲线,可以看出:靠近锚头端的碳纤维布发生的应力松弛最大,而与锚头呈 180°处最小,且在试件 GZ-2 中出现了逆损失的情况.这是因为加载完成后碳纤维布内部还有一个协调变形的过程,一部分预应力逐渐由锚头端向远处传递.由于这部分传递力相对于损失力来说很小,所以总体还是处于下降趋势,只是下降幅度减小了;应力松弛在碳纤维布加载完毕后的 24 h 内发展很快,占总松弛量的 50%以上;400 h 左右基本稳定,松弛值达到了最终松弛值的 95%以上.

(1) 预应力度影响. 对比图 6a~6c 中试件 GZ-1, GZ-2 和 GZ-3 的松弛数据可以看出, 碳纤维布相同位置处的松弛量 GZ-1 最大、GZ-2 次之、GZ-3 最小, 这表明预应力越大的情况下松弛量越大. 但从松弛比例来看则刚好相反. 这是因为碳纤维布在松弛变形时仍然受到摩擦力的阻碍. 根据摩擦公式可知, 预应力越大的试件所受到的摩擦力越大, 相应

的松弛损失就较自由变形时变小, 导致松弛比例减小.

(2) 尺寸大小的影响. 由于 GZ-4, GZ-5 直径较小, 在施加预应力时所受的摩擦力过大, 导致碳纤维布应力分布严重不均, 试验结果表明在本试验范围内试件尺寸大小对纤维布的应力松弛影响并不明显.

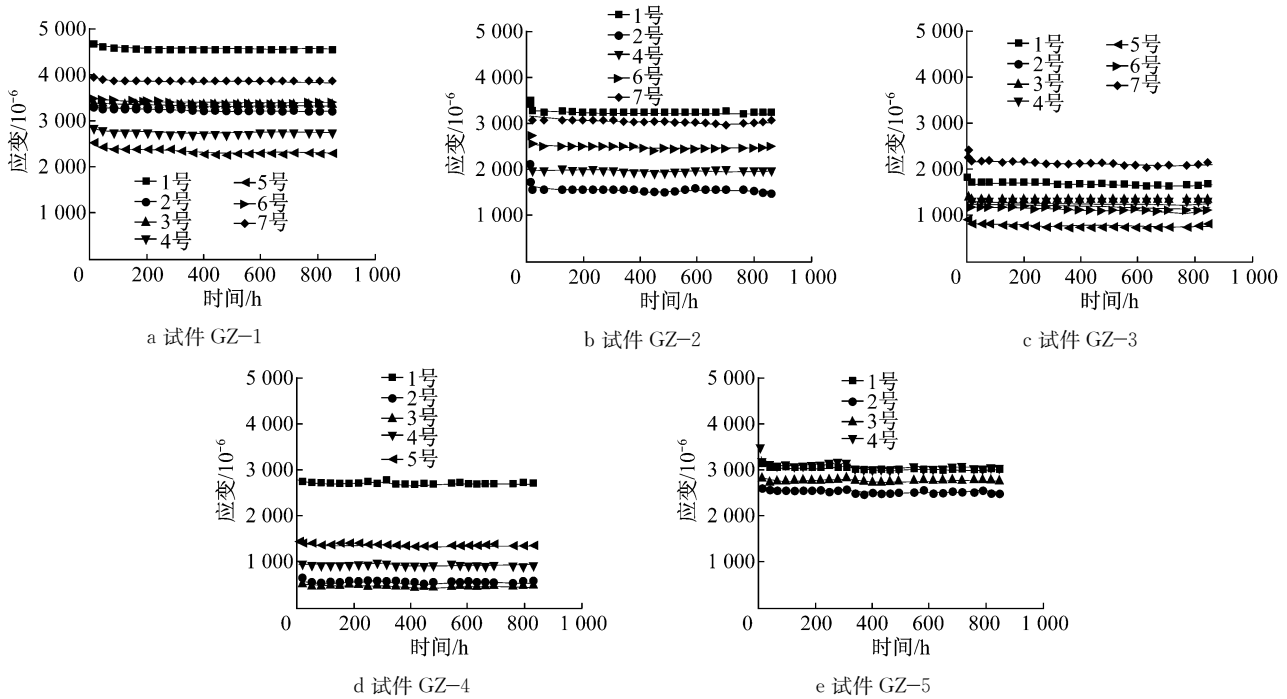


图 6 试件的应变-时间关系

Fig. 6 Strain-time curves of specimens

### 3.3 混凝土收缩徐变造成的预应力损失

#### 3.3.1 混凝土收缩徐变理论值计算

根据 Bazant 等<sup>[9]</sup>提出的混凝土 B3 徐变模型, 本试验中的徐变应变  $\epsilon_c$  由式(3)计算:

$$\epsilon_c = \sigma_c \cdot C(t, t', t_0) \quad (3)$$

式中:  $C(t, t', t_0)$  为徐变柔量, 其中  $t$  为持续时间,  $t'$  为加载龄期,  $t_0$  为试件养护时间;  $\sigma_c$  为混凝土柱受到的围压力, 根据弹性力学中受压薄壁筒力学模型有

$$\sigma_c = t_f \sigma_{f0} / R \quad (4)$$

式中:  $t_f$  为碳纤维布的厚度;  $\sigma_{f0}$  为纤维布中的应力.

表 5 中给出了试验中所选混凝土圆柱在 30% 的预应力碳纤维布的约束时的理论徐变计算值. 环向徐变比值是指环向徐变值与混凝土柱截面周长之比. 可以看出, 徐变量最大的 C20 混凝土柱其环向徐变值仅为截面周长的  $1.6 \times 10^{-5}$ . 这个值对纤维布产生的预应力损失影响很小, 所以在本试验中混凝土徐变所造成的环向预应力损失均可忽略.

实际工程中适用于环向预应力纤维布加固的混

凝土圆型墩柱的直径大都在 1 m 以上, 混凝土龄期一般都在几年以上. 通过式(4)可以看出, 在 30% 环向预应力碳纤维布的约束作用下, 混凝土表面受到的围压仅为试验中所用圆柱的 1/3; 再加上高龄期混凝土徐变柔度大于本试验所用混凝土柱的徐变柔度, 由式(3)得出, 在实际工程中可以忽略混凝土收缩徐变造成的碳纤维布的预应力损失.

表 5 试验柱的理论徐变值

Tab. 5 Theoretical creep value of specimens

混凝土等级	徐变柔量	环向徐变值/mm	环向徐变比值
C20	0.819	0.139	$1.6 \times 10^{-4}$
C30	0.700	0.118	$1.3 \times 10^{-4}$
C40	0.591	0.100	$1.1 \times 10^{-4}$

#### 3.3.2 混凝土徐变造成的预应力损失试验数据分析

试验中各试件的预应力损失包括 2 种: 碳纤维布应力松弛损失、混凝土收缩徐变引起的预应力损失. 表 6 给出经历了 850 h 后相同预应力度碳纤维

布约束钢柱和混凝土柱的应变测试结果.从预应力损失的平均值可以看出,4个试件的损失差距很小,均在应变片的测量误差范围内,可以认为混凝土的收缩徐变并未对试验中碳纤维布的预应力损失产生很大影响,可以忽略.

表 6 混凝土柱和钢柱松弛损失对比

Tab.6 Relaxation of CFRP on concrete and steel column

试件 编号	损失比例/%					应变损失 平均值/%
	1	2	4	6	7	
HZ-7	10	11	10	7	18	11.2
HZ-8	16	15	2	10	6	9.8
HZ-9	6	12	3	7	8	7.2
GZ-2	10	21	-1	11	13	10.8

## 4 结论

(1) 试验研究和理论分析表明,环向预张拉纤维布加固混凝土墩柱的预应力损失主要来自 3 个部分:摩擦损失、纤维布应力松弛损失和混凝土收缩徐变损失,而混凝土收缩徐变造成的预应力可忽略.

(2) 摩擦损失的主要影响因素为表面粗糙程度、被加固墩柱直径、预应力大小和距离张拉端的远近.

(3) 未刷胶的碳纤维应力松弛主要来自 2 个部分:碳纤维之间相互协调变形导致应力重分布、碳纤维本身的应力松弛.

(4) 纤维布的应力松弛在锚头端最大,距离锚头越远处应力松弛越小;应力松弛在碳纤维布加载完毕后的 24 h 内发展很快,占总松弛量的 50% 以上;400 h 左右基本稳定,松弛值达到了最终松弛值的 95% 以上;由于摩擦力的影响,预应力度大的试件松弛比例小,但松弛量仍然最大.

(5) 混凝土收缩徐变试验证明了混凝土徐变对预应力损失影响很小,而随着被加固墩柱直径的增大,相同预应力度纤维布所提供的有效约束减小,且实际工程的混凝土墩柱龄期大都在几年以上,可以忽略混凝土收缩徐变引起的预应力损失.

## 参考文献:

- [1] Saatcioglu M, Yalcin C. External prestressing concrete columns for improved seismic shear resistance [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(8): 1057.
- [2] 周长东,赵锋,张艾荣,等.预应力 FRP 布加固混凝土桥墩的力学性能研究[J]. *工业建筑*, 2009, 39(4): 124.  
ZHOU Changdong, ZHAO Feng, ZHANG Airong, et al. The mechanical behavior of concrete pier strengthening with lateral pre-stressing FRP sheets[J]. *Industrial Construction*, 2009, 39(4): 124.
- [3] Yamakawa T, Nasrollahzadeh N K, Satoh H. Seismic or emergency retrofit of RC short columns by use of prestressed aramid fiber belts as external hoops [J]. *AIJ Journal of Structural and Construction Engineering*, 2001, 550: 135.
- [4] Yamakawa T, Banazadeh M, Fujikawa S. Emergency retrofit of shear damaged extremely short RC columns using pre-tensioned aramid fiber belts [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2005, 3(1): 95.
- [5] Nesheli K N, Yamakawa T, Satoh H, et al. Experimental study on retrofitting of shear critical RC columns using pre-tensioned aramid fiber belts [C] // *Proceeding of the 1st Conference on Application of FRP Composites in Construction and Rehabilitation of Structures*. Tehran: Building and Housing Research Center, 2004:95-104.
- [6] Taleie S M, Moghaddam H. Experimental and analytical investigation of square RC columns retrofitted with pre-stressed FRP strips [C/CD] // *8th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*, Greece, Patras: University of Patras, 2007.
- [7] 李季. 纤维复合材料自锁式锚具设计及其性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
LI Ji. Design and behavior research on self-locking anchor system of FRP [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [8] 施刚,金建钢,傅爱华. 钢结构大六角头高强度螺栓应变松弛分析[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2010, 50(3): 342.  
SHI Gang, JIN Jiangang, FU Aihua. Strain relaxation analysis of steel-structure heavy-hex high strength bolts[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2010, 50(3): 342.
- [9] Bazant Z P, Baweja S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures model B3 [J]. *Materials and Structures*, 1995, 123(28): 357.