

文章编号:1673-2049(2006)03-0026-06

## 工程结构用 FRP 筋的力学性能

朱 虹<sup>1</sup>, 钱 洋<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 建筑设计研究院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**通过分析工程结构用纤维增强塑料(FRP)筋的组成和物理力学性能特点,对比 FRP 筋性能和钢筋性能的不同之处,指出了 FRP 筋在工程结构中的适用性和应用前景。通过试验研究,分析了局部弯折对芳纶纤维增强塑料(AFRP)筋极限抗拉强度、加载速率和加载历史对编织型芳纶纤维筋(FiBRA)型 AFRP 筋弹性模量,以及应力水平对 FiBRA 型 AFRP 筋松弛率的影响,建立了规格为 FA11 的 FiBRA 型 AFRP 筋的松弛率计算公式。结果表明,局部弯折可能导致 FRP 筋的极限抗拉强度下降,FiBRA 型 AFRP 筋编织状的成型特征造成其弹性模量在张拉过程中是渐趋稳定的,并且造成其总松弛量较大,工程应用时需充分考虑这些因素。

**关键词:**纤维增强塑料;芳纶纤维增强塑料;极限抗拉强度;弹性模量;松弛;改性

**中图分类号:**TU532.3 **文献标志码:**A

## Mechanics Performance of FRP Tendons Used in Engineering Structure

ZHU Hong<sup>1</sup>, QIAN Yang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. Institute of Architectural Design, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** Through analyzing the composition and physics mechanics performance characteristic of FRP tendons, the difference between FRP tendon and steel tendon was compared, the applicability and the future of FRP tendon in engineering structure were pointed out. Through experiments study, the effects of local bending to ultimate tensile strength, loading velocity rate and process to elastic modulus of FiBRA style AFRP tendons were analyzed, and stress levels to relaxation of FiBRA style FRP tendons were researched, and the formulas for calculating the relaxation rate of FA11, one spec of FiBRA tendon, were obtained. The results show that local bending may reduce the ultimate strength of FRP tendons, and the weave of FiBRA style AFRP tendon leads that the elastic modulus can only stabilize gradually and the total relaxation is more. These shortcomings should be noticed cautiously in practice.

**Key words:** FRP; AFRP; ultimate tensile strength; elastic modulus; relaxation; modification

## 0 引言

材料的变革对土木工程的发展起着至关重要的推动作用,而高性能纤维复合材料是加强和改善混凝土结构的一种新的优良材料,目前,FRP 片材在

工程结构维修加固中已得到了广泛的应用。

FRP 筋材用作大跨度桥梁的悬索和斜拉索,可以充分地发挥其自重小的优势,显著地提高桥梁的跨越能力。FRP 筋可以配置于混凝土结构体内或体外作为加强筋或预应力筋,或者用作土层锚杆、岩

收稿日期:2006-06-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50238030);国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2001AA336010)

作者简介:朱 虹(1975-),女,江苏兴化人,讲师,工学博士,E-mail:alice\_zhuhong@seu.edu.cn。

石锚杆,从而替代钢筋应用于恶劣环境中而不被腐蚀,在新建结构和既有结构加固改造中具有广阔的应用前景。

笔者通过分析工程结构用FRP筋的组成和物理力学性能特点,并将其性能和钢筋性能进行全面对比,指出了FRP筋的适用性及应用前景,并对其若干重要性能开展了试验研究。

## 1 FRP筋组成及种类

### 1.1 组成

FRP筋由纤维丝、树脂、添加剂及表面附着层等材料复合而成,其性能主要取决于纤维丝。纤维材料多种多样,有碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维,还有长链的聚乙烯纤维、聚丙烯纤维,以及不常用的聚缩醛纤维、聚酰亚胺纤维、硼纤维等。其中碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维是应用最广泛的3种纤维。

树脂和添加剂也是影响FRP筋物理、化学及力学性能的重要因素。树脂有热固性树脂和热塑性树脂两大类,目前,大部分的FRP筋中所使用的均为热固性树脂。树脂基体中会放入一些添加剂,主要是为了改善树脂的物理、化学性能。通过合理加入添加剂,可以改善复合材料的力学性能,如增加强度、减小收缩、增加韧性、缓解徐变断裂等。笔者认为,树脂的性能是影响FRP筋优越性能发挥的瓶颈,因此,改性树脂研究对于推动FRP健康发展具有重要意义。

### 1.2 种类

由碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维为原丝生产的碳纤维增强塑料(CFRP)筋、AFRP筋和玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋是土木工程中常用的3种FRP筋。纤维种类、纤维含量以及FRP筋的成型工艺是决定其物理力学性能的主要因素。FRP筋产品众多,本文中仅总结了几种工艺成熟的著名FRP筋产品的特点和力学性能<sup>[1]</sup>。

CFRP筋主要有棒形碳纤维(Leadline)和碳纤维绞线(CFCC)两种,均是在日本得到发展的。Leadline是由单向纤维拉挤而成的圆形棒材,其表面光滑或进行了勒痕、缠丝处理。虽然Leadline不柔软,但仍可盘圆运输,只是盘圆直径需超过2 m。常用的Leadline直径为5、8、10、12、15 mm,抗拉强度均在2 300 MPa左右,弹性模量在160 GPa左右,极限延伸率在1.5%左右。CFCC为绞线型纤维筋,一般由多股构成,其中直径很小的则由单股构成。每股的表面均缠绕有纤维覆盖层,造成细密的

变形,以增强粘结性能。CFCC的盘圆直径仅需1 m左右,抗拉强度在1 800 MPa左右,弹性模量在140 GPa左右,极限延伸率在1.3%左右。

AFRP筋主要有拉挤型芳纶纤维筋(Technora)、预应力芳纶纤维筋(Arapree)和FiBRA三种。Technora由日本研制开发,形式多样,有光圆筋、变形筋和绞线。变形筋的强度在2 000 MPa左右,弹性模量约为53 GPa,极限延伸率约3.7%;绞线的强度在1 800 MPa左右,弹性模量在41 GPa左右,极限延伸率显著高于CFRP筋以及其他AFRP筋,达到4.4%。Arapree是由荷兰首先研制开发的,在日本获得快速发展,有N型和D型两种,N型由日本生产,D型为其他国家所生产。N型Arapree的纤维体积分数高,为63%,因此抗拉强度和弹性模量也高,抗拉强度约1 500 MPa,弹性模量约60 GPa;D型Arapree的纤维体积分数低,约50%,因此抗拉强度和弹性模量也低,抗拉强度在1 100 MPa左右,弹性模量在48 GPa左右。Arapree的延伸率为2.0%~2.4%,截面形状有圆形和矩形两种,矩形截面的Arapree表面粗糙,而圆形截面的表面光滑,截面积相同时矩形截面的周长更大,因而矩形截面的粘结和锚固效果更佳,在示范性工程中应用较多。FiBRA型AFRP筋也是由日本研制开发的。FiBRA为编织状,有柔性筋和刚性筋两种,柔性筋可以方便地进行盘圆。FiBRA的抗拉强度在1 400 MPa左右,弹性模量在70 GPa左右,极限延伸率约2.0%。FiBRA编织状的成型方式使得其力学性能受到不利的影响,详见本文中的试验研究。

由于玻璃纤维丝的种类较多,采用不同的树脂进行复合后,GFRP产品相当丰富。GFRP筋的生产厂家也是数量众多,与CFRP筋和AFRP筋主要由几大公司生产的局面有所不同。

中国的GFRP工业起步较早,主要以生产GFRP板材为主。近年来,已具备生产GFRP筋和CFRP筋的能力,但目前还不能生产AFRP筋。

## 2 FRP筋性能特点及适用性

不同类型的FRP筋性能有所不同,但是作为新型复合材料用于土木工程中,它们之间存在较多的共性<sup>[2-3]</sup>。各种FRP筋与钢筋、钢绞线性能对比见表1。

### 2.1 优点

(1)顺纤维向抗拉强度高。远高于普通钢筋,与高强钢丝或钢绞线相近。CFRP筋的抗拉强度一般为1 500~2 400 MPa,有的可达3 700 MPa。

(2)密度小,质量轻。FRP 筋的密度一般仅为钢筋的  $1/6\sim 1/4$ ,这有利于减轻结构自重,方便施工。FRP 索用作大跨度桥梁的悬索或斜拉索,可以显著提高桥梁的跨越能力。

(3)耐锈蚀。FPR 筋不会像钢筋那样易锈蚀,因此非常适合在强腐蚀环境中工作,结构耐久性好,后期维修成本低。CFRP 筋耐久性最好,长期处于酸、碱、盐、潮湿、紫外线等环境中的性能很少降低,因此适合在恶劣环境中使用。

(4)疲劳性能优良。CFRP 筋与 AFRP 筋的疲

劳性能明显优于钢筋,CFRP 筋的疲劳性能最好。

(5)电磁绝缘性好。FRP 筋无磁感应,代替钢筋使用后可使结构满足特殊要求。

(6)减振性能好。复合材料自振频率高,可避免早期共振;同时,复合材料的内阻也很大,一旦激起振动,衰减也快。

(7)作为一种复合材料,FRP 筋具有可设计性,可以根据不同的需求加工成性能差异很大的产品。

(8)AFRP 筋和 GFRP 筋具有低传热性和低导电性,可用于对传热和导电有特殊要求的场合。

表 1 各种 FRP 筋与钢筋、钢绞线性能对比					
Tab. 1 Comparison of Performance Among All Kinds of FRP Tendons, Steel Tendons and Steel Strands					
材料种类	普通钢筋	钢绞线	GFRP 筋	AFRP 筋	CFRP 筋
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	7 850	7 850	1 250~2 100	1 250~1 400	1 500~1 600
抗拉极限强度/MPa	490~700	1 400~1 890	480~1 600	1 200~2 550	600~3 700
屈服强度/MPa	280~420	1 050~1 400			
受拉弹性模量/GPa	210	180~200	35~65	40~125	120~580
极限延伸率/%	$>10.0$	$>4.0$	1.2~3.1	1.9~4.4	0.5~1.7
轴向温度膨胀系数/( $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	11.7	11.7	8.0~10.0	-6.0~-2.0	0.6~1.0
横向温度膨胀系数/( $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	11.7	11.7	23.0	30.0	25.0
应力松弛率(20 $^{\circ}\text{C}$ 时)/%		3.0	1.8	7.0~20.0	1.0~3.0

注:表中数值主要选自文献[4],部分选自文献[5]和文献[6],是市场上几种主要产品的参数,不代表所有产品。

### 2.2 不足之处

(1)无塑性。FRP 筋的应力-应变关系曲线始终为线弹性。

(2)FRP 筋的极限延伸率低于钢丝和钢绞线,远低于钢筋。CFRP 筋的极限延伸率最小。

(3)FRP 筋的弹性模量比钢筋低。虽然 FRP 筋的弹性模量范围很宽,但常用 CFRP 筋、AFRP 筋和 GFRP 筋的弹性模量大致分别为钢筋弹性模量的 75%、35%和 20%。

(4)抗剪和抗压强度较低。FRP 筋是各向异性的,轴向抗压、横向抗压抗剪性能较差,横向抗剪强度仅为纵向抗拉强度的  $1/10$  左右,因此,设计中不考虑其抗压和抗剪强度。抗剪性能差导致其销栓力小、FRP 筋与混凝土之间的粘结性能变差、锚固比高强钢筋或钢绞线困难。另外,FRP 筋端部的弯钩及 FRP 箍筋的弯折必须在工厂中预制,且弯折处的抗拉强度显著降低。与 CFRP 筋和 GFRP 筋相比,AFRP 筋的一个最显著的特点是其横向抗剪强度相对最高,且冲击韧性最好,因此,AFRP 筋更易于转向,弯曲后的强度下降最少,适宜用作折线形体外预应力筋。

(5)温度膨胀系数与混凝土之间存在一定的差别。CFRP 筋的轴向温度膨胀系数较低,AFRP 筋的轴向温度膨胀系数甚至为负数,GFRP 筋的轴向

温度膨胀系数则与混凝土差不多。温度变化会引起 CFRP 筋预应力混凝土和 AFRP 筋预应力混凝土的预应力损失,而传统预应力混凝土结构则无此损失。FRP 筋横向温度膨胀系数均较大,温差作用有可能造成 FRP 筋与混凝土间粘结的破坏或混凝土的胀裂,影响结构的耐久性。

(6)存在徐变断裂现象。GFRP 筋最容易徐变断裂,CFRP 筋不易徐变断裂,AFRP 筋则介于 GFRP 筋和 CFRP 筋之间。

(7)热稳定性较差。当超过某一温度范围,FRP 筋的抗拉强度将有所下降,抗剪强度和粘结强度则显著下降,因此 FRP 筋不宜应用于  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的高温环境,此外,FRP 筋不耐火,其防火保护要求比钢筋更为严格。

(8)存在锈蚀之外的其他腐蚀问题,例如,AFRP 筋在潮湿环境中或紫外线直接照射下性能有所降低。GFRP 筋耐碱性能差,不宜在碱性环境和潮湿环境中使用。

### 2.3 适用性及应用前景

根据以上分析可知,FRP 筋作为以受拉为主的非金属材料,虽然不可能取代钢筋,但却是一种十分重要的补充材料<sup>[7]</sup>。

CFRP 筋可在各种腐蚀性的干湿环境中使用,

AFRP筋不宜在高湿度环境中使用,GFRP筋不宜在高湿度及碱性环境中使用,且不宜作预应力筋。CFRP筋性能最好,但在延性要求高的结构中应慎重使用。此外,不宜使用光圆FRP筋。

复合材料行业的发展日新月异,随着技术的进步,有可能生产出各项性能指标更好的材料,例如,通过纤维混杂来增加FRP筋的延性,通过纤维改性和树脂改性来增加FRP筋的耐久性,通过采用高弹纤维和增加纤维体积比等措施增大FRP筋的弹性模量等<sup>[8-11]</sup>。FRP筋性能的不断改进将带来设计方法和适用领域的新变化。

### 3 AFRP筋力学性能试验

#### 3.1 弯折对AFRP筋抗拉极限强度的影响

是否弯折以及弯折程度将影响FRP筋的强度。图1为套筒灌胶式锚具锚固的AFRP筋(FiBRA型,FA11)拉伸后的破坏形态。其中1根为AFRP筋从锚具中滑出破坏(筋锚固段表面未经打毛处理),5根为AFRP筋拉断破坏(筋锚固段表面经打毛处理),且均在锚口处断裂。

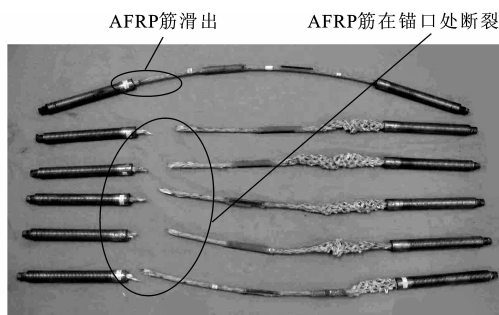


图1 AFRP筋在锚口处的滑移和断裂

Fig. 1 Slippage and Rupture of AFRP Tendon at Anchor

由于长时间的盘圆造成了AFRP筋中树脂出现塑性变形,盘条放松后,AFRP筋仍呈弯曲状,灌胶完毕张拉前如图2(a)所示,在结构胶凝固后张拉时拉直如图2(b)所示,因而锚口处出现了弯折,从而强度下降,最先断裂。

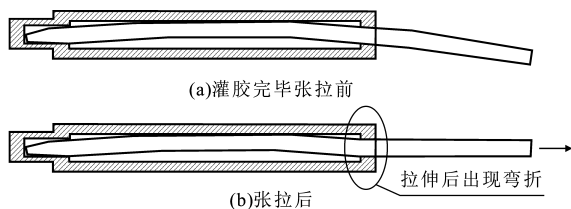


图2 锚口处AFRP筋张拉前后的状态

Fig. 2 State Before and After Stretching of FRP Tendon at Anchor

FRP筋不宜进行弯折,如需弯折或者已发生了弯折,应考虑弯折处FRP筋极限强度的下降。弯折处设计强度的计算公式应是FRP筋横截面高度、弯曲半径、纤维种类以及弯折角度的函数

$$f_{\text{ibd}} = F(r, h, k_f, \theta_b, \delta_{\text{fuk}}) \quad (1)$$

式中: $r$ 为弯曲半径; $h$ 为FRP筋的横截面高度; $k_f$ 为与纤维种类相关的系数; $\theta_b$ 为总弯折角; $\delta_{\text{fuk}}$ 为FRP筋的抗拉强度标准值。

#### 3.2 加载方式对AFRP筋弹性模量的影响

FRP筋拉伸应力-应变关系总体上呈线弹性,弹性模量基本上为定值,但FiBRA型AFRP筋的弹性模量却与加载方式有关,这主要是FiBRA型AFRP筋的芳纶纤维丝的几何非线性所致。本文中针对性地研究了加载速率和加载历史对FiBRA型AFRP筋弹性模量的影响。

##### 3.2.1 加载速率

分别按照  $117 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$  (A组) 和  $8 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$  (B组) 的速率完成了两组试验,如图3所示。

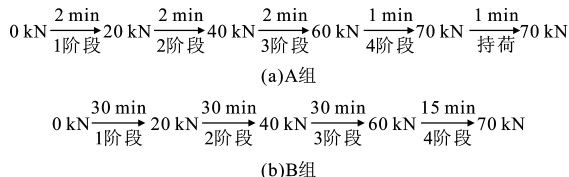


图3 A组、B组加载制度

Fig. 3 Loading System of Group A and B

从图4、5中可知,A组加载速率快,弹性模量变化小,应力-应变关系近似为直线;B组加载速率很慢,加载过程中弹性模量差异较大,在应力比值小于0.2时,弹性模量很小,随着应力比值的增加,弹性模量逐渐增大。

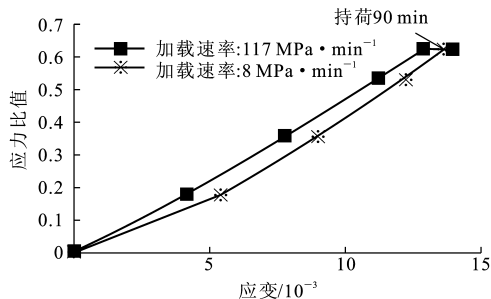


图4 不同加载速率下应变与应力比值的关系

Fig. 4 Relation Between Stress Ratio Value and Strain Under Different Loading Velocities

A组应变虽然在加载阶段较B组小,但持荷过程中应变不断增加,90 min后超出了B组。

试验结果表明,FiBRA型AFRP筋的应力-应变关系、弹性模量受到加载速率的影响,加载越慢,

应变发展越充分。

3.2.2 加载历史

共完成了 3 组加载试验,加载制度如图 6 所示。图 7 为 C、D、E 三组 AFRP 筋在 0.2~0.6 应力比值范围内割线弹性模量随着加载循环次数的变化。

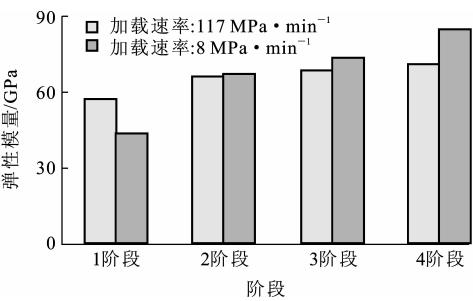


图 5 不同加载速率下的弹性模量  
Fig. 5 Elastic Modulus Under Different Loading Velocities

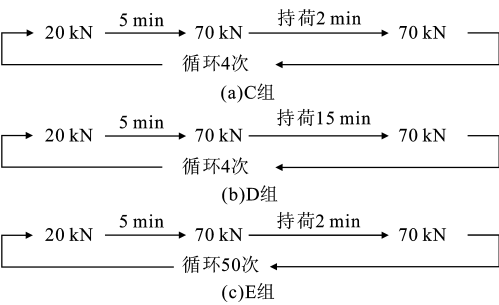


图 6 C 组、D 组及 E 组加载制度  
Fig. 6 Loading System of Group C, D and E

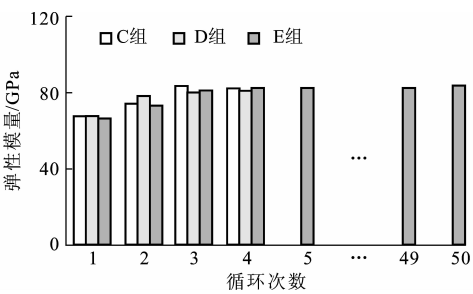


图 7 不同循环次数下的弹性模量  
Fig. 7 Elastic Modulus Under Different Circulation Times

试验表明,FiBRA 型 AFRP 筋的应力-应变关

表 2 不同松弛公式计算结果比较

数据来源	筋材型号	$\delta_{pe} \cdot \delta_{fuk}^{-1}$	松弛率理论计算公式	不同时间(a)的松弛率/%				松弛完成率/%
				0.114	5	50	100	
文献[4]	Technora, AR, $\Phi$ 6.0	0.58	$r_t=2.54+2.74 \lg t$	10.8	15.3	18.0	18.8	85
本文试验	FiBRA, FA11	0.62	$r_t=3.59+3.59 \lg t$	14.4	20.3	23.8	24.9	
		0.46	$r_t=2.74+2.74 \lg t$	11.0	15.5	18.2	19.0	

注: $\delta_{pe}$ 为有效预应力;松弛率完成率为 5 a 的松弛率与 50 a 的松弛率的比。

(2)对 FiBRA 型 AFRP 筋进行了力学性能试验。试验结果表明,FiBRA 型 AFRP 筋的弹性模量

系与加载历史有关,弹性模量随持荷时间及循环次数而变化。达到稳定状态后,弹性模量变化则很小。

3.3 应力水平对 AFRP 筋松弛率的影响

采用不同初始张拉力在钢梁上锚固定长的 AFRP 筋。具体试验方案及试验结果见文献[12]。扣除初期滑移影响后两根筋的初始拉应力比值为 1.35。将松弛率与时间用半对数关系表示,并对数据进行拟合(图 8)。AFRP 筋的松弛率与时间的对数关系及不同年限下的松弛率见表 2。

1# 筋与 2# 筋拟合直线的斜率比值为 1.3,扣除初期滑移影响后两根筋的初始拉应力比值为 1.35,与斜率比很接近。结果表明,规格为 FA11 的 AFRP 筋的松弛率与时间对数线性相关,其松弛率与张拉控制应力成正比,任一张拉控制应力下的松弛率可通过表 2 中的理论计算公式插值得到。

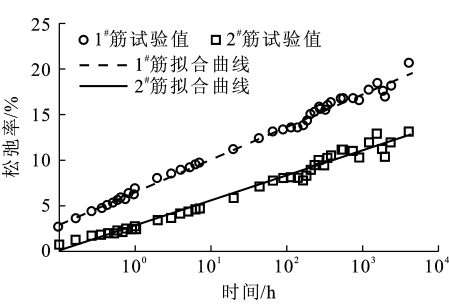


图 8 松弛率与时间的半对数关系  
Fig. 8 Half-Logarithms Relation Between Relaxation Rate and Time

从表 2 可知,AFRP 筋 5 a 可完成 50 a 松弛率的 85%,基本达到稳定状态。AFRP 筋的松弛率呈现出前期发展较快、后期发展较慢的规律,这与低松弛钢丝和钢绞线的松弛现象类似,但总松弛率比低松弛钢丝大得多。

4 结 语

(1)通过分析 FRP 筋的优缺点,阐述了 FRP 筋的适用性和应用前景。

存在波动性,且松弛率比一般 AFRP 筋的松弛率更高,因此在使用这种筋材时应充分考虑这些因素。

本文中的试验方法可为其他FRP筋力学性能试验研究提供参考。

(3)FRP筋具有许多优点,但同时也存在缺点,因此,笔者建议,在FRP筋的研究和应用中需融入更多理性,才能真正促进其健康发展。特别应加强产品开发力度,力争实现FRP的国产化,并加快改性树脂、改性纤维的研究步伐。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 朱虹. 新型FRP筋预应力混凝土结构的研究[D]. 南京:东南大学,2004.  
ZHU Hong. Study on Concrete Structure Prestressed with FRP Tendons[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [2] 钱洋. 预应力AFRP筋混凝土梁抗弯性能试验研究[D]. 南京:东南大学,2004.  
QIAN Yang. Experimental Study on Flexural Behavior of Concrete Beams Prestressed with AFRP Reinforcement[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [3] MALVAR L J. Durability of Composites in Reinforced Concrete [C]//CDCC. CDCC98-First International Conference on Durability of Composites for Construction, Quebec, Sherbrooke, 1998:1-12.
- [4] 吕志涛. 新世纪混凝土结构对新材料的挑战[C]//岳清瑞. 中国首届纤维增强塑料(FRP)混凝土结构学术交流论文集. 北京:科学出版社,2000:1-4.  
LU Zhi-tao. Challenge of Reinforcement Concrete Structure to New Materials in 21st Century [C]//YUE Qing-rui. Processing of the 1st National FRP Academic Exchanges Conference. Beijing: Science Press, 2000:1-4.
- [5] ATSHHIKO M. JSCE Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials[M]. Tokyo: Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, 1997.
- [6] ACI Committee 440. Guide for the Design and Con-

struction of Concrete Reinforced with FRP Bars[S].

- [7] 吕志涛. 高性能材料FRP应用与结构工程创新[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1):1-5.  
LU Zhi-tao. Application of High Performance FRP and Innovations of Structure Engineering[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1):1-5.
- [8] 贺拴海, 任伟. 纤维增强塑料加固混凝土结构研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3):20-24.  
HE Shuan-hai, REN Wei. Research on Reinforced Concrete with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3):20-24.
- [9] 胡芳芳, 刘伯权, 王步. FRP约束混凝土圆柱体轴心抗压强度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1):63-67.  
HU Fang-fang, LIU Bo-quan, WANG Bu. Study of Axial Compression for FRP Confined Concrete Circular Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):63-67.
- [10] 楼梦麟, 白建方. FRP加固梁模态分析的摄动解法[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2):21-24.  
LOU Meng-lin, BAI Jian-fang. Perturbation Solution for Modal Characteristics of Beam Strengthened by FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2):21-24.
- [11] 于清, 韩林海, 张铮. 长期荷载作用对FRP约束混凝土轴心受压构件力学性能的影响[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3):58-63.  
YU Qing, HAN Lin-hai, ZHANG Zheng. Long-Term Effect in FRP-Confined Concrete Stub Columns Under Sustained Loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3):58-63.
- [12] 朱虹, 吕志涛, 张继文, 等. AFRP筋松弛性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(7):62-64.  
ZHU Hong, LU Zhi-tao, ZHANG Ji-wen, et al. Experimental Study of Relaxation Performance of AFRP Tendons[J]. Industry Construction, 2006, 36(7):62-64.