

# 多丝碳纤维拉索静载试验研究

蒋业东<sup>1</sup> 邓年春<sup>2</sup> 龙跃<sup>1</sup> 朱万旭<sup>1</sup> 周智<sup>2</sup> 欧进萍<sup>2</sup>

(1. 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨 150090)

**摘要:**碳纤维增强复合(CFRP)筋具有轻质、高强、耐腐蚀、耐疲劳等优异性能,非常适合制作桥梁拉索用于恶劣的工作环境中。由于CFRP筋的横向强度和抗剪强度较低,用其制作拉索面临的一个关键问题是开发合适的锚固系统。文中针对直径为7mm的光圆CFRP筋研制了7丝CFRP筋粘结锚具。对研制成功的7丝CFRP拉索,进行了静载试验,研究结果表明,研制成功的多丝CFRP拉索应力强度达2200MPa,锚具锚固效率达95%以上。

**关键词:**碳纤维增强塑料(CFRP) 环氧树脂 锚具 静载试验

## 1. 引言

桥梁钢拉索的耐久性不足,正成为人们深切的课题。为解决钢拉索锈蚀、疲劳等问题,提高拉索的耐久性,复合材料与结构的研究受到了重视。纤维增强塑料(Fiber Reinforced Polymer, 简称FRP)筋是以纤维为增强材料,以树脂为基体材料,并掺加辅助剂,经拉拔成型和必要的表面处理所形成的一种新型复合材料。它具有轻质、高强、不锈蚀、耐腐蚀、耐疲劳、减震性能好等优异性能。将FRP筋制成桥梁拉索,可以充分发挥它的抗拉性能、抗疲劳和抗腐蚀性能,大幅度提高结构的耐久性,降低结构运营期的维护费用。另一方面,可极大地增大缆承桥梁的跨越能力。可以说,FRP筋是新型拉索体系的理想材料,可望从根本上解决拉索耐久性不足的问题。FRP筋也有自身的特点,它的抗剪和抗挤压强度很低、延伸率小,是一种脆性材料。将FRP筋用作拉索,传统的钢拉索锚具不再适用,需要研究新的锚固系统。本文针对直径7mm的光圆CFRP筋,研制相应的多丝粘结式锚具,并进行静载试验研究。

## 2. FRP筋力学性能

哈尔滨工业大学研制的 $\Phi 7\text{mm}$ CFRP光圆筋如图1所示<sup>[1]</sup>。CFRP筋中,碳纤维采用的是日本东丽(Torayca)公司生产的T700 12K碳纤维,纤维体积含量为65%。树脂采用的是环氧树脂。除了树脂之外,还含固化剂、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 填料、促进剂等外加剂。根据GB/T 13096.1-91《拉挤玻璃纤维增强塑料杆力学性能试验方法》制作CFRP筋标准试件见图2,在材料试验机上进行拉伸试验。试验后的统计分析结果见表1。从表1中可以看出,CFRP筋的强度为2230MPa。

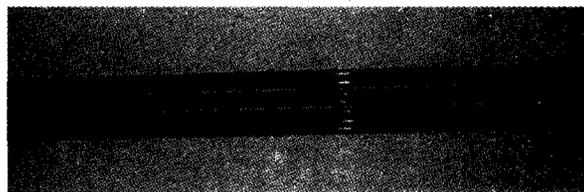


图1  $\Phi 7\text{mm}$ CFRP光圆筋



图2 CFRP筋拉伸试件

表1 CFRP筋拉伸力学性能

试件种类	拉伸极限强度		弹性模量		泊松比	
	试件数	均值(MPa)	试件数	均值(GPa)	试件数	均值
CFRP-65	10	2232.3 ± 185.0	10	142.0 ± 7.38	10	0.29 ± 0.022

## 3. 7丝CFRP筋拉索结构

研制的7丝CFRP筋粘结锚具结构示意图如图3所示。锚具结构主要包括环氧树脂砂浆、内带锥度的锚杯和螺母。CFRP筋在索体整个长度上都是平行丝。为了保护CFRP筋免受紫外线和风的腐蚀,索体的自由长度段内还可以采用PE或PP覆盖防护。研制的挤PE防护的7丝CFRP筋拉索如图4所示。

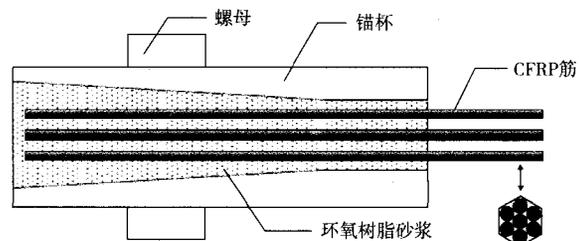


图3 锚具结构示意图

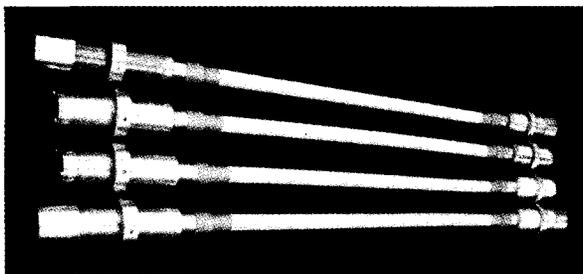


图4 CFRP拉索

#### 4. 7丝CFRP拉索静载试验研究

##### 4.1 第1次灌注7丝CFRP拉索试验研究

###### 1) 试验过程

在1根7丝CFRP索静载试验之后，正式灌注了1根7丝CFRP索，索体无PE层保护。CFRP的下料长度为4.300m，灌浆后CFRP拉索自由段长度为3.650m。试验室室温养护14天后，进行静载试验。试验仪器设备包括：600T拉索试验台架、电动油泵、YCW-500型千斤顶、CL-YB-M4MN型锚固力传感器、游标卡尺等。试验加载过程为：初始加载3kN，调整拉索、千斤顶、传感器等使拉索两端都对中；由3kN预加载到180kN，然后卸载至20kN；由20kN开始，每级20kN，逐级加载至180kN；从180kN开始，每级10kN，逐级加载至250kN；从250kN开始，每级5kN，持荷5分钟，逐级加载至拉索破断。试验结果如表2所示。试验过程中，用游标卡尺测量千斤顶行程，忽略锚具变形，可认为它是拉索的变形量，将其除以拉索长度得到应变，将锚固力传感器测量荷载除以面积得到应力，将计算出的应力应变绘制成曲线见图5。从图中可以看出，CFRP拉索应力应变直到破坏都是线性关系。

###### 2) 破坏形式

拉索静载试验破断后的现场如图6所示，从图中可以看出索体断裂成许多碎片。下面分别从试验过程中的张拉端、自由段和固定端来描述CFRP索试验后的破坏形式：固定端的破坏形式见图7，边上6丝滑出，其中4丝全部滑出28cm，2丝滑出19cm并在锚具内断裂；中间丝滑出9.5cm，并在离锚具8.5cm处断裂；自由段破坏形式见图8，拉索脆断成无数小段，并有很多粉成小丝片，接近固定端，脆成小段更多。张拉端破坏形式见图9，中间丝滑出15cm；边丝在离锚具1cm处炸开成纤维散状。从上述可认为，拉

表2 第1次灌注7丝CFRP拉索试验结果

项目	破断荷载(kN)	极限应力(MPa)	极限应变(%)	弹性模量(GPa)	锚固效率系数(%)
试验值	576	2138	1.7	125	92.9
备注	锚固效率系数 $\eta = \frac{\text{实测破断索力 } P_{e,b}}{\text{公称破断索力 } P_{k,x}}$				

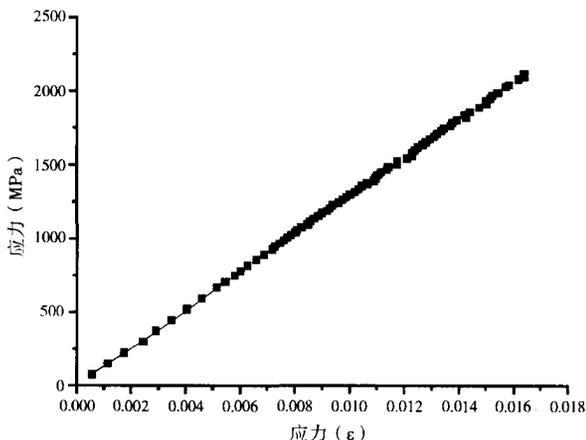


图5 CFRP索应力应变曲线

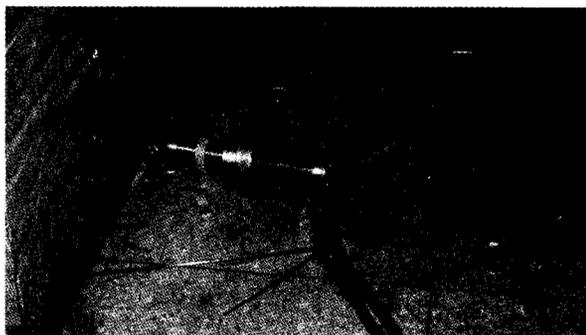


图6 CFRP静载试验破断后现场



图7 固定端破坏形式

索的破坏形式是，筋产生滑移后破坏，主要原因是环氧砂浆粘结强度不够。

##### 4.2 第2次灌注CFRP拉索试验研究

在前1次试验的基础上，第2次灌注了CFRP索3根，每根索体外都挤了一层PE。为了增强粘结强度，其中的2根的进行了另外的处理，1根索体的锚固段进行了套丝，1根锚具的内锥表面涂一种特种涂料，目的是发挥锚具内锥度作用，使拉索受荷载作用时锚具内砂浆产生挤

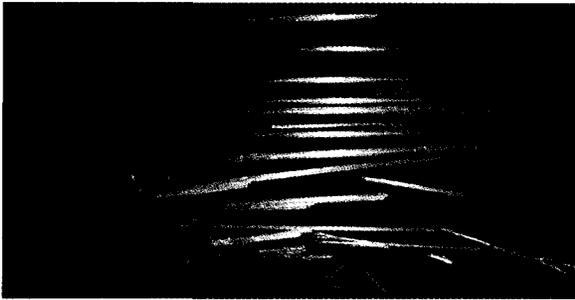


图8 自由段破坏形式

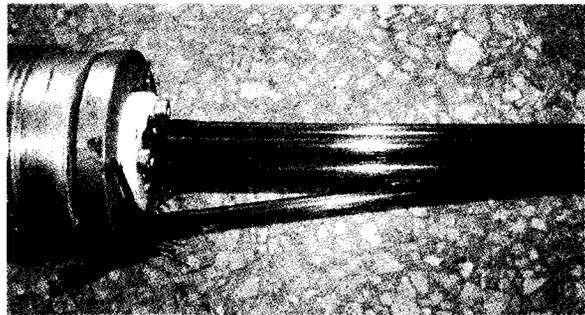


图10 套丝CFRP索破坏形式



图9 张拉端破坏形式

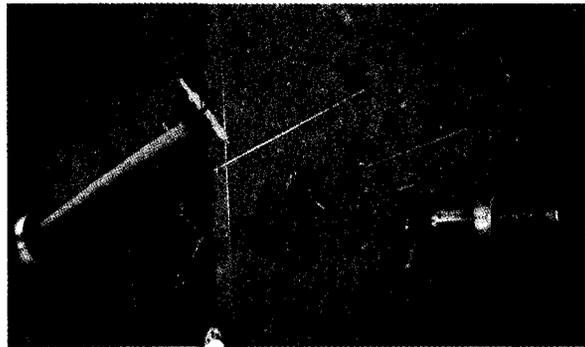


图11 油漆CFRP索破坏形式

压, 增强粘结效果。CFRP索试验设备和加载方式同第1次灌注FRP索试验, 都采用YCW150B型千斤顶和CL-YB-M4MN锚固力传感器。第2次灌注FRP索试验结果见表3, 其典型破坏形式见图10和图11。研究结果表明挤PE对锚固性能有所提高, 可能原因是解决了各筋长短不一、受力不均的问题; 由于CFRP套丝, 螺纹容易变成粉末, 容易剥离, 所以套丝对CFRP索强度有所降低; 锚具内锥度表面涂上特种涂料是一种较好的处理措施, 能大大地提高拉索极限承载能力。

#### 4.3 第3次灌注CFRP拉索试验研究

从前2次灌注的CFRP拉索的试验结果可以看出, 锚具内锥表面涂上涂料可以发挥锥度作用, 使拉索受荷载作用时锚具内砂浆受挤压, 从而大幅度地提高CFRP拉索的锚固效率和承载能力。为了进一步验证上述试验结果, 本次灌注了2根锚具内涂上特种涂料的CFRP索进行静载张拉试验。试验设备和加载方式同前2次灌注的CFRP试验索一样, 加载步长为20kN。2根CFRP索在静载试验过程中都是突然发出“砰”的一声破坏, CFRP筋断成若干段, 明显为脆性破坏, 拉索破坏形式见图12, 静载试验结果见表4。从试验结果可以看出, 内锥表面涂特种涂料的锚具锚固效果较好且性能稳定, 锚固效率系数达98%。

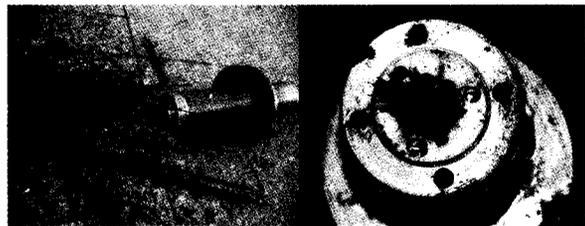


图12 第3次灌注 CFRP索破坏形式

表3 第2次灌注CFRP索静载试验结果

FRP拉索	破断荷载(kN)	极限应力(MPa)	锚固效率系数(%)	破坏形式
PE-CFRP索	612	2271.8	98.4	突然脆断成若干段
套丝CFRP索	505	1874.6	81.2	单筋滑移
涂料CFRP索	733	2720.9	117.9	突然脆断成许多段

表4 第3次灌注CFRP索静载试验结果

项目	破断荷载(kN)	极限应力(MPa)	锚固效率系数(%)	破坏形式
CFRP索1	610.0	2265.51	98.4	突然脆断成若干段
CFRP索2	609.2	2262.54	98.2	突然脆断成若干段

## 5. 结论

针对直径为7mm的CFRP光圆筋, 经过2年多的研究, 研制成功了7丝CFRP筋粘结锚具。除尝试索外, 3次灌注了7丝CFRP索进行了试验研究。总结多筋锚具的研究结果, 可得出如下结论:

1) CFRP筋表面粗糙程度对锚固性能影响明显, 在CFRP光圆筋粘接之前锚固段表面最好进行适当的粗糙化处理。

(下转第24页)

好的配套锚固及张拉体系等；但是，它特有的耐腐蚀、强度高、重量轻、安装速度快等优点，已在现场应用中得到了充分体现，因而具有极大的市场潜力。我们相信，随着研究的不断深入，无锈蚀锚索在我国将会得到越来越多的应用，成本也将逐步降低，成为特殊锚固环境中中和特殊锚固工程中，比钢锚索更有效、更

可靠的锚固体系。

#### 参考文献

- [1] R帕卡尔尼斯, DA彼得森. 一种新型锚杆—玻璃纤维锚索[J]. 国外金属矿山, 1994, (8): 41—45.
- [2] 曹虹. 采用合成树脂纤维的锚固系统[J]. 岩土锚固工程, 1994, (3): 25—30.
- [3] 德丸昌敬. 聚酰亚胺纤维钢化塑料锚杆的试验施工[J]. 探矿工程译丛, 1997, (2): 8—12.

(上接第12页)

2) CFRP索锚固段进行了套丝, 结果因螺纹强度不够而易剥离, 反而降低了CFRP索的强度。因此CFRP筋表面粗糙处理措施要得当。

3) 锚具内锥度表面涂上特种涂料是较好的处理措施, 能够发挥锚具内锥度作用, 使拉索受荷载作用时锚具内砂浆产生挤压, 提高锚固效率, 大大地提高拉索极限承载能力。

4) 本文研发的CFRP多丝粘结锚具, 锚固效果较好且性能稳定, 锚固效率达95%以上, 基本能用于实际工程。

#### 参考文献

- [1] 于明伟. 单一纤维FRP筋基本力学性能与混杂FRP筋的研

制. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2005

- [2] Brahim Benmokrane U, Adil Chennouf Burong Zhang. Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications. Construction and Building Materials 2000, 14: 157—170

- [3] Johannes Fritz Noisternig. Carbon Fibre Composites as Stay Cables for Bridges. Applied Composite Material. 2000, 7: 139—150

- [4] Burong Zhang, Brahim Benmokrane. Design and evaluation of a new bond-type anchorage system for fiber reinforced polymer tendons. Canadian Journal of Civil Engineering. 2004, 31(1): 14—26

- [5] 何政, 欧进萍. FRP筋及其配筋混凝土构件的力学性能与智能特性. 第二届全国土木建筑工程纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会学术论文集. 昆明, 2002

- [6] 刘效尧, 朱新实. 公路桥涵设计手册—预应力技术及材料设备(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004

#### · 简讯 ·

## 欧维姆公司三项成果通过专家鉴定

7月28日、29日, 经广西壮族自治区科技厅组织的院士、专家鉴定, 柳州欧维姆机械股份有限公司有三项科研成果被确认属国内首创、达到国际先进水平。这三项成果是: OVMAT矮塔斜拉桥拉索体系、即时监测可换式悬索桥锚碇预应力锚固体系、ZH型砂浆料。

“OVMAT矮塔斜拉桥拉索体系”是针对矮塔斜拉桥的特点, 结合成熟的OVM拉索体系的锚固机理而研制成功的体系。该体系具有如下突出特点: 一、首次创新采用分丝技术设计的索鞍, 结构新颖, 不仅克服了内外管索鞍在设计、施工中的不足, 还很好地起到了分散、均匀传递荷载作用, 解决了内外管索鞍下部应力集中及在施工时不能单根调索以及后期换索的问题; 二、采取可靠的抗滑措施, 使填充的浆体和每根钢绞线充分握裹, 能有效克服施工及运营期间拉索两侧的不平衡力; 三、索体具有多层防护结构, 密封防水结构合理, 采用环氧树脂涂层预应力钢绞线, 具有良好的防腐性能。该体系已成功应用于兰州小西湖大桥、珠海荷麻溪桥等十多个工程, 取得了显著的社会效益和经济效益。

“即时监测可换式悬索桥锚碇预应力锚固体系”是针对目前悬索桥重力式锚碇有粘结不可更换、压浆质量和防护效果无

法检查、砂浆泌水后的空洞难彻底处理等弊端而研制成功的。其主要特点就是“可监测”、“可更换”: 可监测即对防腐油脂可随时取样检测, 同时通过压力传感器对锚固系统受力进行监测; 可更换指通过检测油脂的变化和钢绞线的变化, 在有必要更换时, 对防腐油脂和钢绞线进行更换, 更换时不影响大桥的正常运营, 大大提高了悬索桥锚碇预应力锚固系统的耐久性。该体系已成功应用于武汉阳逻长江大桥。

“ZH型砂浆料”是借鉴国外先进经验后自主研发成功的砂浆料, 具有良好的流动性、耐久性、抗疲劳性和抗冻性。其性能指标达到国际上同类产品先进水平, 而价格不到其一半。该成果已成功应用于广州轨道交通四号线工程。

三个项目的鉴定委员会各自认真听取了有关项目的研究、试制、试验以及应用等报告, 仔细审阅了研究报告、试验检验报告、查新报告、产品标准、用户报告等鉴定资料, 并进行了充分的讨论和质疑后认为: “OVMAT矮塔斜拉桥拉索体系”、“即时监测可换式悬索桥锚碇预应力锚固体系”均为国内首创, 是拉索技术和主缆锚固技术的重大进步; “ZH型砂浆料”填补了国内空白, 形成自主产业, 为国家节约大量外汇。这三项成果均达到了国际先进水平。

(编辑部)