

文章编号:1673-2049(2012)02-0014-07

# CFRP 筋锚固体体系研究与应用现状

刘荣桂,李明君,蔡东升,刘德鑫

(江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013)

**摘要:**为促进碳纤维增强复合材料(CFRP)这一具有密度小、抗拉强度高、抗疲劳、耐腐蚀等特性材料的研究工作与在土木工程结构中的实际应用,主要介绍了各国有关 CFRP 筋及其锚具研究和应用的最新进展,分别对粘结型、夹片型、复合型 3 类现有的主要类型锚具的锚固机理、代表性试验研究和数值分析等方面做了整理和归纳,并提出了锚具开发和应用的一些关键问题和建议。

**关键词:**CFRP;锚固体体系;锚固机理;静载;径向应力

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## Research and Application Situation of CFRP Tendon Anchorage System

LIU Rong-gui, LI Ming-jun, CAI Dong-sheng, LIU De-xin

(School of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to promote the future research and application of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) for civil engineering structures, with the characteristics of low specific gravity, high tensile strength, high fatigue resistance and corrosion resistance, an introduction was given on the latest research and application progress of CFRP tendon and anchors for all countries. The anchorage mechanism, typical experiment investigations and numerical analysis of exist main types of anchors, including bond-type anchor, wedge-type anchor and wedge-bond anchor, were also classified and summarized. Finally, some critical problems and advices in anchor development and utilization were provided.

**Key words:** CFRP; anchorage system; anchorage mechanism; static load; radial stress

## 0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)作为一种高性能新型材料,自 20 世纪 40 年代问世以来,随着研发、生产等相关技术的逐渐成熟,在土木工程领域的研究和应用已逐渐成为学科研究的热点。CFRP 筋因其密度小、抗拉强度高、抗疲劳、耐腐蚀等特点,应用于预应力和大跨空间结构中,可彻底解决传统钢材受力筋的锈蚀问题,并有效提高大跨结构的承载和跨越能力,应用前景广阔<sup>[1-4]</sup>。各国已有一些将 CFRP 筋作为受力

筋或受拉索应用于预应力和桥梁结构的工程实例,为 CFRP 筋及其锚具性能的研究提供了最直接的参考资料<sup>[5]</sup>。

由于 CFRP 筋的横向抗剪强度较低,常因受剪而发生提前破坏,传统锚固方式无法对其进行有效的锚固。因此,CFRP 筋锚固体体系的研究是将 CFRP 材料应用于实际工程的关键步骤之一。目前,各国学者对各种 CFRP 筋锚具已进行了大量的试验研究工作,并形成了一定的成果<sup>[6-8]</sup>。本文中笔者主要介绍 CFRP 筋及其锚具的研究和工程应用的最新进展,对现有主要类型锚具的锚固机理、代表

收稿日期:2012-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51078170)

作者简介:刘荣桂(1957-),男,江苏江都人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:liurong@ujs.edu.cn。

性试验研究和数值分析等做了整理和归纳,并提出了锚具开发和应用的一些关键问题和建议。

## 1 CFRP 材料特性与锚固要求

CFRP 筋是由多股连续碳纤维与树脂基体材料混合后,经特制模具挤压、拉拔和必要的表面处理所形成。与传统结构材料相比,CFRP 材料主要具有如下优点:①密度小,可以有效减轻结构自重,提高结构的极限跨度;②抗拉强度高,可超过高强钢绞线;③耐腐蚀性好,可在酸碱盐和潮湿环境中长期使用;④抗疲劳性好,约为钢材的 3 倍。同时,CFRP 材料也存在抗拉弹性模量低、热稳定性差、抗剪强度低等不足。由于 CFRP 筋过低的横向抗剪强度,导致锚固困难,这是制约 CFRP 筋应用于结构工程的主要障碍之一。

目前,针对 CFRP 筋锚固系统性能要求,各国还没有设立技术规程或规范。参照相关预应力锚具及组装件的规范要求<sup>[9-10]</sup>,CFRP 筋锚具的锚固性能要求主要包括 3 个方面:①静载锚固性能,锚具效率系数和锚具变形量应满足要求;②动载锚固性能,锚具在规定疲劳荷载和周期荷载作用下锚固区不应发生破断;③耐久性,锚具各部分应能够抵抗环境因素的影响,结构使用年限内不发生破坏。

## 2 CFRP 筋及锚固体系应用现状

基于 CFRP 材料的优良特性,自 20 世纪 90 年代,日本和欧洲一些发达国家率先开始将 CFRP 筋及其锚具应用于实际工程结构的尝试。目前,CFRP 筋主要在小跨径斜拉桥、预应力混凝土结构和结构加固工程中有所应用<sup>[11-12]</sup>。

1990 年,日本建成了 1 座全 FRP 结构试验桥,为双塔双索面斜拉体系,桥柱、梁、桥板和扶手为 GFRP 拉挤型材,采用 CFRP 斜拉索,混凝土基础<sup>[13]</sup>。1991 年,德国 1 座后张预应力混凝土高速公路跨线桥部分力筋采用了 CFRP 绞线,4 束 CFRP 绞线组成大型预应力束,用楔形锚固系统锚固在梁上。2002 年,法国 Laroin 市建成 CFRP 索斜拉桥(图 1),跨度 110 m,斜拉索由 CFRP 合成材料做成,拉索外面包以高密度聚乙烯(PEHD)护套<sup>[14]</sup>。

2005 年,中国首座 CFRP 索人行斜拉桥在江苏大学建成(图 2)。该桥总长度 51.5 m,最大跨径 30 m,为独塔双索面钢筋混凝土斜拉桥。索塔两侧各布置 4 对拉索,斜拉索全部采用 Leadline 型 CFRP 筋材,有 6-D8,11-D8,16-D8 三种索型,拉索锚固系



图 1 法国 Laroin 市 CFRP 索斜拉桥

Fig. 1 Cable-stayed Bridge with CFRP Cables in Laroin, France



图 2 江苏大学 CFRP 索斜拉试验桥

Fig. 2 Testing Cable-stayed Bridge with CFRP Cables in Jiangsu University

统采用了吕志涛等<sup>[15-16]</sup>研制的套筒粘结型锚具,并在固定端锚下设置了永久性应力传感器,用以长期监控。2007 年对该 CFRP 索斜拉桥的静载及动载测试结果表明,锚固系统工作性能良好<sup>[17]</sup>。锚固系统的长期锚固性能研究尚在进行中。

## 3 CFRP 筋锚具研究现状

对 CFRP 筋锚具的研究主要基于减小 CFRP 筋的径向剪切应力峰值和增大锚固区化学胶着力、摩擦力、机械咬合力等锚固力的思想。目前,CFRP 筋锚具根据其锚固机理,主要可分为粘结型锚具、夹片型锚具、复合型锚具。

### 3.1 粘结型锚具

#### 3.1.1 锚固机理

粘结型锚具主要由套筒、粘结介质、端堵等组成,主要依靠粘结介质与 CFRP 筋的化学胶着力、摩擦力和粗糙接触界面产生的机械咬合力对 CFRP 筋进行锚固。根据套筒内表面是否存在锥角,可分为直筒粘结型、直筒+内锥粘结型(图 3)。粘结介质主要有环氧类树脂结构胶、高性能混凝土等。

粘结型锚具的优点是对 CFRP 筋的环向压力小,避免了 CFRP 筋的夹伤破坏,锚固效率较高。

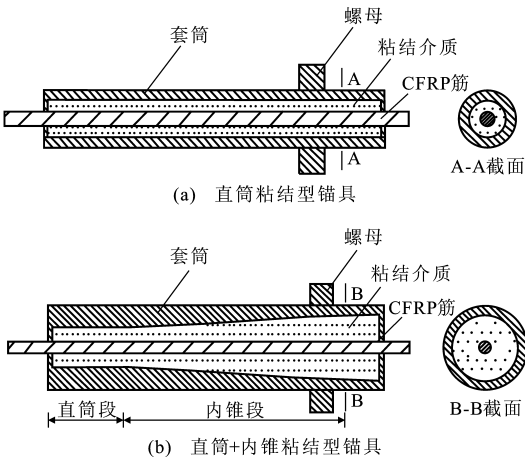


图 3 CFRP 筋粘结型锚具

Fig. 3 Bond-type Anchor for CFRP Tendon

缺点是锚固长度大,压力灌胶工艺复杂,对粘结介质的性能要求较高。

3.1.2 试验研究

对于粘结型锚具的试验研究工作开始较早,限于篇幅,这里仅给出各国典型的试验研究工作。

瑞士联邦材料测试与研究所开发的CFRP索

内锥粘结型锚具采用了变刚度粘结介质<sup>[18]</sup>,静载与疲劳试验表明,锚具的锚固性能可靠,并在 Stork 桥上得到成功应用。Benmokrane 等<sup>[19]</sup>对以水泥砂浆为粘结介质的粘结型锚具的锚固性能进行了研究,重点测定了不同表面形状、粘结介质、粘结长度下的锚固性能。Khin 等<sup>[20]</sup>和 Zhang 等<sup>[21]</sup>测得了加载过程中,锚具区 CFRP 筋与粘结介质间的粘结应力分布变化,得出了直筒粘结型锚具中化学胶着力、摩擦力、机械咬合力等锚固力的作用过程和传递机理。

方志等<sup>[22-23]</sup>通过静载正交试验,对 CFRP 筋表面形状、粘结锚固长度、粘结介质、套筒内壁倾角等影响参数进行不同组合,得到了各设计参数对锚固性能的影响。梅葵花<sup>[24]</sup>对直筒粘结型、直筒+内锥粘结型锚具的锚固性能和受力进行了对比试验。刘荣桂等<sup>[25]</sup>对直筒+内锥粘结型锚具中 CFRP 筋的轴力进行了实测,结果表明,转角处存在环向应力峰值,直筒段与内锥段的组合有利于增强锚固效果。

笔者对现有代表性试验中各影响因素对锚固效应作用的试验结果进行了整理和归纳,结果见表 1。

表 1 粘结型锚具影响因素

Tab. 1 Influence Factors to Bond-type Anchor

影响因素	研究范围	试验结果
CFRP 筋表面	光圆筋、压纹筋	对粘结锚固性能有决定性影响,压纹筋明显优于光圆筋
锚固长度/mm	200~450	随锚固长度增大,平均粘结强度越大,粘结应力分布越不均匀
内锥段倾角/(°)	1~3	极限拉力值随倾角的增大而增加
粘结介质	高性能混凝土、环氧铁砂、环氧石英砂、普通混凝土	高性能混凝土中极限拉力值较大,滑移曲线较为稳定
内锥表面处理	特种涂料、聚氯乙烯薄膜	内表面的光滑处理可增强锚具内锥作用,增大极限拉力值
套筒设置平直段	内锥、直筒+内锥、直筒+内锥+直筒	锚固端与自由端设置增设平直段,有利于极限拉力值增加

3.1.3 数值分析

Zhang 等建立了极限状态下的粘结应力分布模型——BBA 模型,将锚固区分为 3 个区段,并分别推导出了相应区段的粘结应力计算公式。

蒋田勇等通过界面粘结受力分析,得出了粘结应力、CFRP 筋轴向应力、滑移量等沿锚固长度分布的计算公式,并通过实测值验证了公式的可行性。在 BBA 模型的基础上,提出了极限承载力状态下的光滑曲线模型(图 4),该模型与实际情况吻合较好。梅葵花通过有限元软件对直筒+内锥粘结型锚具的内部受力进行模拟计算,重点分析了增设直筒段对 CFRP 筋径向压力的影响。图 4 中, $\tau_p$  为粘结介质与 CFRP 筋的接触面在  $x$  处的粘结应力, $\tau_m$  为粘结介质与 CFRP 筋的接触面之间的最大粘结应力, $\tau_{res}$  为残余粘结应力。

由于化学胶着力的存在,使得粘结破坏具有突

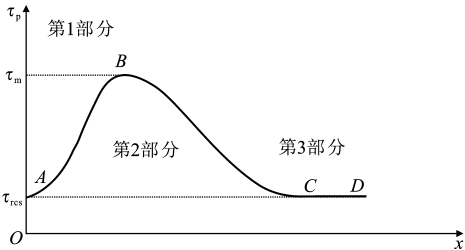


图 4 光滑曲线模型

Fig. 4 Smooth Curve Model

变性,数值模拟也较为困难。对化学胶着力、摩擦力、机械咬合力综合作用下的锚固机理分析仍将是粘结型锚具研究的重点。

3.2 夹片型锚具

3.2.1 锚固机理

夹片型锚具由传统钢绞线锚具发展而来,主要由锚环、夹片、软金属管、CFRP 筋等部分组成(图 5),在夹片的内锥作用下,由摩擦力和机械咬合力对

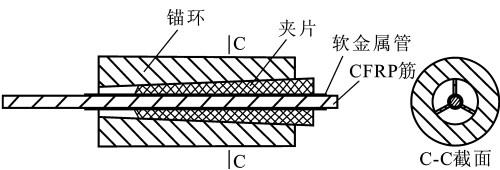


图 5 CFRP 筋夹片型锚具

Fig. 5 Wedge-type Anchor for CFRP Tendon

CFRP 筋进行锚固。

由于 CFRP 筋的抗剪性能差,传统夹片型锚具“切口效应”明显,在受荷端易发生夹断破坏。各国学者对原有夹片式锚具主要做了如下改进:

(1)夹片与筋材间增设软金属管。软金属层在环向挤压力作用下变形,与夹片、CFRP 筋材紧密贴合,使环向压力趋于均匀,避免了牙纹对 CFRP 筋的夹伤。

(2)夹片与锚环间设置角度差。适当的锥角差可有效缓解锚具尖端效应。

(3)减小夹片倾角。CFRP 筋的材料特性不同于钢绞线,夹片倾角一般取  $2^{\circ}\sim3^{\circ}$ 。

夹片型锚具结构相对简单、组装方便,便于工程现场安装。但滑移量较大,易产生应力集中,锚固效率较低。

表 2 夹片型锚具影响因素

Tab. 2 Influence Factors to Wedge-type Anchor

影响因素	研究范围	试验结果
锚固长度/mm	70,100,120	锚固长度越大,筋材与夹片的滑移越小
夹片倾角/( $^{\circ}$ )	1.5~3.0	随倾角增大,极限荷载增大,滑移量减小
锥角差/( $^{\circ}$ )	0.0~0.2	设置锥角差可有效改善尖端效应,一定范围内,随锥角差的增大,极限拉力增加
套筒材质	铝、铜	采用铝套筒时,锚固性能更好
软金属层厚度/mm	0.4~1.0	随软金属层厚度增加,极限荷载与滑移量增大
预紧力/kN	40,50,60,65,80,100	可有效减小筋材与夹片滑移量,增大极限荷载
牙纹形状	牙纹深度、间距	随牙纹深度、间距的增加,极限荷载增大

3.2.3 数值分析

对夹片型锚具锚固的数值分析主要采用静力受力和有限元模拟的方法。通过有限元分析,可以模拟夹片倾角、锥角差、预紧力等因素对锚具内部受力的影响,其中筋材在锚固区的径向应力是一个重要指标。

Elrefai 等和 Braimah 等分别采用有限元软件,模拟计算了不同的夹片-锚环间摩擦因数、锥角差和预紧力对 CFRP 筋的轴向和径向应力分布的影响。

林伟伟等<sup>[32]</sup>与蒋田勇等结合锚具张拉过程中的接触受力关系和自锁条件,通过静力分析,推导出了夹片倾角等设计几何参数的取值范围。林伟伟等利用 ANSYS 有限元软件,计算分析了锚固区

3.2.2 试验研究

Campbell 等<sup>[26]</sup>和 Braimah 等<sup>[27]</sup>设计了以不锈钢和超高性能混凝土作为夹片的夹片型锚具,并在锚固区增设软金属套管,设置  $0.1^{\circ}$  锥角差,以减小应力集中。Al-Mayak 等<sup>[28]</sup>和 Elrefai 等<sup>[29]</sup>研究了 CFRP 筋-金属层(铝、铜)接触对在不同 CFRP 筋表面处理和接触压力下的界面接触性能,并对其在不同应力水平疲劳荷载下的性能进行试验,得到了推荐的疲劳界限。

蒋田勇等<sup>[30]</sup>和诸葛萍等<sup>[31]</sup>通过试验分析了锚固长度、夹片倾角、预紧力、牙纹形状、软金属管等因素对锚固性能影响,得出了较合适的参数组合。梁栋对机械夹持型锚具分别做了静载锚固试验、200 万次疲劳试验和 50 次周期荷载试验,试验中锚具静载锚固效率系数可以达到 97.1%,周期荷载和疲劳荷载试验后组装件性能良好,适当的周期荷载有利于提高该类锚具的锚固性能。

各参数对锚固性能的影响往往是相互制约、相互影响的,更优的参数组合还有待于进行更深入的研究与分析。夹片型锚具试验中各影响因素对锚固效应的作用见表 2。

CFRP 筋轴向和径向应力分布情况。在有限元模拟时,做了如下的简化假设:①CFRP 筋与夹片间的摩擦因数为线性增长;②夹片为高硬度,设置为线弹性材料,锚环设置为双线性弹塑性材料。但有限元模拟与实际受力过程还存在一定差别,有待于建立更为合理的模拟分析方法。

3.3 复合型锚具

3.3.1 锚固机理

复合型锚具(也有文献中称夹片-粘结型锚具)是在粘结型和夹片型锚具基础上,结合两者的锚固特点,协同工作而成。目前,国外有关 CFRP 筋复合型锚具试验研究的文献还较少,中国复合型锚具主要有 2 类,本文中分别称为 CFRP 筋串式-复合型

锚具和 CFRP 筋并式-复合型锚具。

CFRP 筋串式-复合型锚具(图 6)由楔紧锚固段和粘结锚固段组成,2 个锚固段发挥类似串联式的锚固作用。该类锚具的优点是分段充分发挥锚固段的锚固作用,锚固长度小、锚固效率系数较高。缺点是结构较为复杂,会出现锚固段先后失效的情况,2 个锚固段的工作协同性还有待进一步研究。

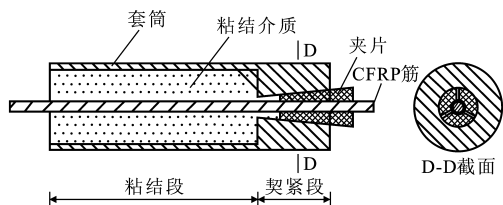


图 6 CFRP 筋串式-复合型锚具

Fig. 6 Tandem Wedge-bond Anchor for CFRP Tendon

CFRP 筋并式-复合型锚具(图 7)是由 CFRP 筋先穿过注入粘结介质的金属筒,形成粘结组装件后,再由夹片式锚具夹持锚固。并式-复合型锚具中,夹片的内锥作用延迟了受荷端粘结介质与筋材的粘结破坏,锚固长度内粘结应力趋于均匀,提高了整体锚固效果。同时,金属筒有效弱化了应力集中现象,可避免夹伤 CFRP 筋。CFRP 筋并式-复合型锚具粘结与夹持部分协同工作性能良好,应用前景广阔,但工艺较为复杂,对胶体和金属筒材料性能要求较高,夹片倾角、锚固长度、金属筒厚度等参数还有待于进一步优化。

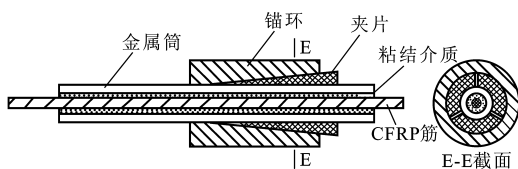


图 7 CFRP 筋并式-复合型锚具

Fig. 7 Parallel Wedge-bond Anchor for CFRP Tendon

### 3.3.2 试验研究

蒋田勇等<sup>[33]</sup>对串式-复合型锚具进行了静载试验,主要分析了粘结段和夹持段的合理组合长度,夹片预紧力、预张拉等因素对锚固性能的影响。一定范围内,锚具极限荷载随预紧力增加而增大。筋材预张拉可使夹持段接触面紧密贴合,有利于滑移量减小。

并式-复合型锚具的静载锚固试验和周期、疲劳荷载试验<sup>[34-35]</sup>结果表明,试验中锚具的静载锚固效率系数均达到了现行相关规范要求,动载锚固性能良好。

### 3.3.3 数值分析

文献[34]中,通过对锚固区实测应变数据进行拟合,得到了串式-复合型锚具的极限荷载计算公式,适用性较好。

笔者根据已有并式-复合型锚具试验,建立了锚具的有限元模型,接触算法为面-面接触,采用 Target170 与 Conta174 接触单元和修正的牛顿-拉普森算法。限于篇幅,仅给出不同锥角差和夹片倾角的计算结果,见图 8,9。结果表明:夹片倾角为  $6^\circ$ ,锥角差为  $0.1^\circ$  时,锚具内部径向压应力分布较为均匀。

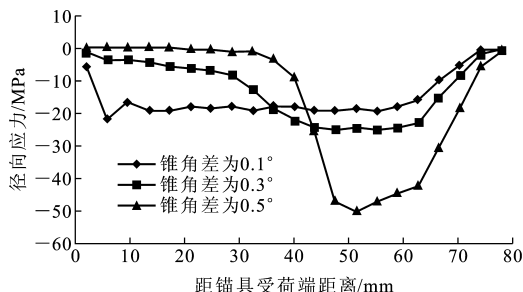


图 8 不同锥角差时金属筒表面径向应力分布

Fig. 8 Distributions of Radial Stresses at Metal Sleeve Surface with Different Angular Differentials

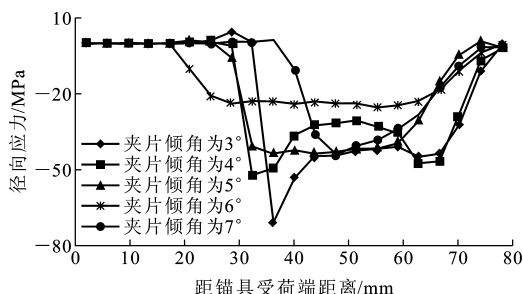


图 9 不同夹片倾角时金属筒表面径向应力分布

Fig. 9 Distributions of Radial Stresses at Metal Sleeve Surface with Different Angles

## 4 结 语

CFRP 材料以其密度小、抗拉强度高、抗疲劳、耐腐蚀等优良特性,必将成为传统结构材料的必要补充,而有效、实用的锚固系统开发是实现 CFRP 材料应用的的关键步骤之一。结合目前各国 CFRP 筋及其锚固系统的研究和应用现状,为将 CFRP 筋在实际工程中得以应用和推广还有以下 4 个问题需要深入研究:

- (1) 锚固系统的锚固机理与内部荷载传递机制。
- (2) 锚固系统的疲劳性能、长期锚固性能以及耐

火性能等。

(3)适用于CFRP筋锚固系统的静载、动载试验技术规程、规范。

(4)CFRP筋锚固系统的制作工艺、施工技术以及质量控制体系。

## 参考文献:

## References:

- [1] 叶列平,冯 鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3):24-36.  
YE Lie-ping, FENG Peng. Applications and Development of Fiber-reinforced Polymer in Engineering Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3):24-36.
- [2] 杨庆生. 复合材料细观结构力学与设计[M]. 北京:中国铁道出版社,2000.  
YANG Qing-sheng. Microstructural Mechanics and Design of Composite Materials[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000.
- [3] HOLLAWAY L C. A Review of the Present and Future Utilisation of FRP Composites in the Civil Infrastructure with Reference to Their Important In-service Properties[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12):2419-2455.
- [4] MUFTI A A. FRPs and FOSs Lead to Innovation in Canadian Civil Engineering Structures[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7):379-387.
- [5] KELLER T. Recent All-composite and Hybrid Fiber-reinforced Polymer Bridges and Buildings[J]. Progress in Structural Engineering and Material, 2001, 3(2):132-140.
- [6] NANNI A, BAKIS C E, O'NEIL E F, et al. Performance of FRP Tendon-anchor Systems for Prestressed Concrete Structures[J]. PCI Journal, 1996, 41(1):34-43.
- [7] 詹界东,杜修力,邓宗才. 预应力FRP筋锚具的研究与发展[J]. 工业建筑,2006,36(12):65-68.  
ZHAN Jie-dong, DU Xiu-li, DENG Zong-cai. Studies and Application on Anchorages of Prestressed FRP Tendons[J]. Industrial Construction, 2006, 36(12):65-68.
- [9] JGJ 85—2002, 预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程[S].  
JGJ 85—2002, Technical Specification for Application of Anchorage, Grip and Coupler for Prestressing Tendons[S].
- [10] GB/T 14370—2000, 预应力筋用锚具、夹具和连接器[S].  
GB/T 14370—2000, Anchorage, Grip and Coupler for Prestressing Tendons[S].
- [11] MICELLI F, NANNI A. Durability of FRP Rods for Concrete Structures[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(7):491-503.
- [12] DELORENZIS L, TENG J G. Near-surface Mounted FRP Reinforcement: an Emerging Technique for Strengthening Structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2):119-143.
- [13] 韦达洁. 碳纤维拉索斜拉桥非线性分析[D]. 长沙:湖南大学,2005.  
WEI Da-jie. Nonlinear Analysis of Cable-stayed Bridge with Cables[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [14] 邹晓文. 法国拉胡安市一座合成材料缆索斜拉桥[J]. 中国三峡建设,2003(12):47.  
ZOU Xiao-wen. A Bridge with Synthetic Material Cable in Laroin, France[J]. China Three Gorges Construction, 2003(12):47.
- [15] 吕志涛,梅葵花. 国内首座CFRP索斜拉桥的研究[J]. 土木工程学报,2007,40(1):54-59.  
LU Zhi-tao, MEI Kui-hua. First Application of CFRP Cables for a Cable-stayed Bridge in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1):54-59.
- [16] 梅葵花,吕志涛,张继文,等. CFRP斜拉索锚具的静载试验研究[J]. 桥梁建设,2005(4):20-23.  
MEI Kui-hua, LU Zhi-tao, ZHANG Ji-wen, et al. Study of Static Load Tests of CFRP Stay Cable Anchors[J]. Bridge Construction, 2005(4):20-23.
- [17] 刘荣桂,许 飞,蔡东升,等. CFRP拉索斜拉桥静载试验分析[J]. 中国公路学报,2009,22(2):48-52.  
LIU Rong-gui, XU Fei, CAI Dong-sheng, et al. Analysis of Static Load Test for Cable-stayed Bridge with CFRP Cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2):48-52.
- [18] 乌尔斯·梅尔,李双荣. 瑞士温特图尔镇斯托克桥上碳纤维(CFRP)斜拉索的介绍[J]. 预应力技术,2009(1):35-38.  
URS M, LI Shuang-rong. Introduction of the Stoker Bridge with CFRP Stayed Cables in Winterthur, Switzerland[J]. Prestress Technology, 2009(1):35-38.
- [19] BENMOKRANE B, ZHANG B, CHENNOUF A. Tensile Properties and Pullout Behaviour of AFRP and CFRP Rods for Grouted Anchor Applications[J]. Construction and Building Materials, 2000, 14(3):157-170.
- [20] KHIN M, HARADA T, TOKUMITSU S. The An-

- chorage Mechanism for FRP Tendons Using Highly Expansive Materials for Anchoring[C]//EL-BADRY M. Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. Montreal:CSSE,1996:959-964.
- [21] ZHANG B,BENMOKRANE B. Prediction of Tensile Capacity of Bond Anchorages for FRP Tensions [J]. Journal of Composites for Construction,2000,4(2):39-47.
- [22] 方 志,梁 栋.单根碳纤维(CFRP)预应力筋粘结式锚具的试验研究[J].南华大学学报:理工版,2004,18(1):35-37.  
FANG Zhi,LIANG Dong. A Research into Bond-type Anchorage of CFRP Tendon [J]. Journal of Nanhua University: Science & Engineering Edition,2004,18(1):35-37.
- [23] 方 志,梁 栋,蒋田勇.不同粘结介质中 CFRP 筋锚固性能的试验研究[J].土木工程学报,2006,39(6):47-51.  
FANG Zhi,LIANG Dong,JIANG Tian-yong. Experimental Investigation on the Anchorage Performance of CFRP Tendon in Different Bond Mediums[J]. China Civil Engineering Journal,2006,39(6):47-51.
- [24] 梅葵花. CFRP 筋粘结型锚具的受力性能分析[J].桥梁建设,2007(3):80-83.  
MEI Kui-hua. Analysis of Mechanical Behavior of CFRP Cable Bonding Anchors[J]. Bridge Construction,2007(3):80-83.
- [25] 刘荣桂,李十泉,李明君,等. CFRP 筋新型锚具静载试验及有限元分析[J].工业建筑,2011,41(增1):624-627.  
LIU Rong-gui,LI Shi-quan,LI Ming-jun,et al. Static Test and Finite Element Analysis of New Kind of Anchorage for CFRP Tendon[J]. Industrial Construction,2011,41(S1):624-627.
- [26] CAMPBELL T I,SHRIVE N G,SOUDKI K A,et al. Design and Evaluation of a Wedge-type Anchor for Fibre Reinforced Polymer Tendons [J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2000,27(5):985-992.
- [27] BRAIMAH A,GREEN M F,CAMPBELL T I. Fatigue Behavior of Concrete Beams Post-tensioned with Unbonded Carbon Fibre Reinforced Polymer Tendons [J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2006,33(9):1140-1155.
- [28] AL-MAYAK A,SOUDKI K,PLUMTREE A. Effect of Rod Profile and Strength on the Contact Behavior of CFRP-metal Couples [J]. Composite Structures,2008,82(1):19-27.
- [29] ELREFAI A,WEST J S,SOUDKI K. Performance of CFRP Tendon-anchor Assembly Under Fatigue Loading[J]. Composite Structures,2007,80(3):352-360.
- [30] 蒋田勇,方 志. CFRP 预应力筋夹片式锚具的试验研究[J].土木工程学报,2008,41(2):60-69.  
JIANG Tian-yong,FANG Zhi. Experimental Investigation of Wedge-type Anchors for CFRP Tendons [J]. China Civil Engineering Journal,2008,41(2):60-69.
- [31] 诸葛萍,强士中,侯苏伟.碳纤维筋夹片式锚具参数试验研究[J].西南交通大学学报,2010,45(4):514-520.  
ZHUGE Ping,QIANG Shi-zhong,HOU Su-wei. Experimental Investigation of Wedge-anchor Parameters for CFRP Tendons[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2010,45(4):514-520.
- [32] 林伟伟,任大龙,郭范波,等. CFRP 预应力筋夹片式锚具设计[J].特种结构,2009,26(1):30-34.  
LIN Wei-wei,REN Da-long,GUO Fan-bo,et al. Design of Wedge-type Anchors for CFRP Tendons[J]. Special Structures,2009,26(1):30-34.
- [33] 蒋田勇,方 志. CFRP 筋复合式锚具锚固性能的试验研究[J].土木工程学报,2010,43(2):79-87.  
JIANG Tian-yong,FANG Zhi. Experimental Investigation on the Performance of Wedge-bond Anchors for CFRP Tendons[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(2):79-87.
- [34] 詹界东,杜修力,王作虎. CFRP 筋夹片-黏结型锚具的研制[J].北京工业大学学报,2011,37(3):418-424.  
ZHAN Jie-dong,DU Xiu-li,WANG Zuo-hu. Wedge-bond Anchorage of CFRP Tendons[J]. Journal of Beijing University of Technology,2011,37(3):418-424.
- [35] 詹界东,杜修力,王作虎. 预应力 CFRP 筋夹片-粘结型锚具的试验[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2010,26(1):31-35.  
ZHAN Jie-dong,DU Xiu-li,WANG Zuo-hu. Experimental Study on the Wedge-bond Anchorage of CFRP Tendons[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science,2010,26(1):31-35.