

文章编号:1671-8879(2017)03-0064-08

# CFRP 筋黏结型锚具受力性能分析及试验

梅葵花<sup>1</sup>, 邹晓鸿<sup>2</sup>, 孙胜江<sup>1</sup>, 孙亚民<sup>1</sup>, 晋国庆<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广州市市政工程设计研究总院, 广东 广州 510060)

**摘 要:**为了研究碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)筋黏结型锚具的受力特征, 设计了直筒式、内锥式和复合式 3 种锚具, 并采用有限元法分析 3 种锚具内部筋材和套筒自身的应力分布特征, 然后通过试验测试 CFRP 筋材在锚具内部的应力变化规律和滑移特征, 并测试锚具套筒自身的三向应力, 研究锚具形式、锚固长度等对锚固性能的影响以及锚固传力机理。研究表明: 锚具端堵的设置能使受荷端筋材应力峰值处于锚具当中, 复合式锚具的传力模式最合理, 可以防止内锥式锚具出现切口效应; 在加载前期, 黏结应力峰值靠近受荷端, 随着荷载的持续增加, 受荷端逐渐只剩下残余黏结强度, 在加载后期, 黏结应力峰值靠近锚具自由端; CFRP 筋材在自由段的应力-应变基本呈线性关系; 锚具的荷载-滑移曲线呈明显的非线性趋势, 在加载前期, CFRP 筋材的滑移量较小, 随着荷载的持续递增, 筋材的滑移量迅速增大, 当接近破坏时, 滑移量明显增加; 随着荷载的逐渐增加, 筋-胶界面上的黏结应力先增加到峰值, 然后其化学胶着力逐渐失效, 只剩下残余应力; 黏结应力峰值由受荷端逐渐向自由端转移, 表现为自由端附近套筒的正应力最大, 套筒上的应力分布可以间接反映出 CFRP 筋材的应力变化情况和滑移情况。

**关键词:**桥梁工程; CFRP 筋; 试验研究; 黏结型锚具; 锚固性能; 接触分析; 荷载-滑移

**中图分类号:** U448.27

**文献标志码:** A

## Analysis and experiment on mechanical performance of bond-type anchorage for CFRP tendons

MEI Kui-hua<sup>1</sup>, ZOU Xiao-hong<sup>2</sup>, SUN Sheng-jiang<sup>1</sup>, SUN Ya-min<sup>1</sup>, JIN Guo-qing<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical characteristics of bond-type anchorage for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons, straight-tube-type, inner-cone-type and composite-type anchorage were designed. In addition, stress distribution characteristics of inner tendon and sleeve itself of three kinds of anchorages were analyzed by using finite element method. Then, stress variation rules and slip features of CFRP tendons in anchorage were tested by experimental methods. Also, three directional stress of anchorage sleeve itself was tested. The effect of anchorage form and anchorage length on anchorage performance and the anchoring mechanism were studied. The results show that peak stress at loading end can be kept inside of anchorage by setting anchorage plug. Load transfer mode of composite anchorage is the most reasonable. The

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908016)

作者简介: 梅葵花(1974-), 女, 湖北黄梅人, 副教授, 工学博士, E-mail: meikuihua@163.com。

notch effect of inner-cone-type anchorage can be prevented in composite-type anchorage. In the early stage of loading, peak value of bonding stress is close to the loading end. With the increase of load, only the residual bond strength gradually exists at the loading end. In the later stage of loading, peak value of loading stress is near the free end of anchorage. The relationship between stress and strain of CFRP tendon at free part shows typical linearity. The bond-slip relationship obviously shows nonlinearity. In the early stage of loading, slippages of CFRP tendons are small. With the increase of load, slippages of CFRP tendons increase quickly. When closed to damage, slippages increase significantly. With the increase of load, bond stress between tendon and colloid firstly increases to a peak, then chemical adhesive force gradually failures, only residual stress exists at last. Peak point of bond stress gradually transfers from loading end to free end, which reflect that the phenomenon that normal stress of sleeve is the largest near the free end. Stress distribution in sleeve of anchorage can indirectly reflect the change of stress and slip of CFRP tendons. 1 tab, 13 figs, 24 refs.

**Key words:** bridge engineering; CFRP tendon; experimental study; bond-type anchorage; anchorage performance; contact analysis; load-slip

## 0 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有高强、轻质、耐腐蚀、耐疲劳等特点,目前在土木工程领域中得到了广泛的研究与应用<sup>[1-6]</sup>。虽然其纵向抗拉强度很高,但横向抗剪强度较低,当被用作预应力筋、斜拉索、悬索构件时,若采用传统锚固系统,会在锚具口处剪断 CFRP 筋材而使锚固提前失效。

当前,在 CFRP 筋锚具的开发研究方面已取得了一定的成果,部分锚具形式申请了专利并获得实际应用<sup>[7-9]</sup>。基于锚固的受力原理,CFRP 筋锚具可分为 2 类:机械夹持式锚具和黏结型锚具<sup>[7,10]</sup>。一些学者致力于机械夹持式锚具的开发研究,包括试验研究和有限元分析模拟。Al-Mayah 等提出了简化的楔形锚具,并采用有限元法分析 CFRP 筋表面的应力分布<sup>[11]</sup>;Campbell 等也设计了楔形锚具,并采用数值方法和试验方法评估其在静载和反复荷载作用下的受力性能<sup>[12]</sup>;Elrefai 等测试了一种新型楔形锚具的疲劳性能<sup>[13]</sup>。

黏结型锚具通过界面上的黏结应力来传递剪力,可防止出现过大的应力集中,因而更适用于锚固缆索承重桥中的缆索系统。黏结型锚具的灌注材料可采用树脂或微膨胀水泥。采用微膨胀水泥作为灌注材料主要应用于地锚中,采用树脂作为灌注材料主要应用于预应力混凝土结构或者缆索承重桥中。Zhang 等分析了黏结型锚具工作机理,并对灌注水泥砂浆的 FRP 筋地锚进行了拉拔试验研究,结果表明 FRP 筋地锚的抗拔性能受灌注材料的性能和筋

材表面状态的影响<sup>[14-15]</sup>;Sentry 等为了将 CFRP 筋用于永久性地锚中,进行了 CFRP 筋黏结型锚具足尺模型试验<sup>[16]</sup>;Noisternig 所在的德国 DSI 公司开发了 DYWIDAG 锚固体系,该锚固体系主要由内锥式钢套筒和树脂灌注材料构成,已完成多根 CFRP 筋锚固体系的静动力测试<sup>[17]</sup>;Puigvert 等采用有限元法预测了黏结型锚具的疲劳性能和蠕变性能,发现预测结果与试验测试数据吻合较好<sup>[18]</sup>;Sayed-Ahmed 等采用有限元法分析了机械夹持式锚具和黏结型锚具的受力性能,并进行了受拉测试和疲劳试验<sup>[19]</sup>。

在中国,一些学者对预应力 CFRP 筋锚具和 CFRP 拉索锚具进行了一系列研究。张继文等开发了杯口灌胶、套筒灌胶、黏砂夹片、带护套夹片等形式锚具并进行了单筋试验研究<sup>[20]</sup>;梅葵花等进行了大吨位 CFRP 拉索黏结型锚具的试验研究,并将 CFRP 拉索锚具应用于中国首座斜拉桥中<sup>[8,21-22]</sup>;Fang 等也进行了锚固单根和多根 CFRP 筋的黏结型锚具的试验研究<sup>[23-25]</sup>。

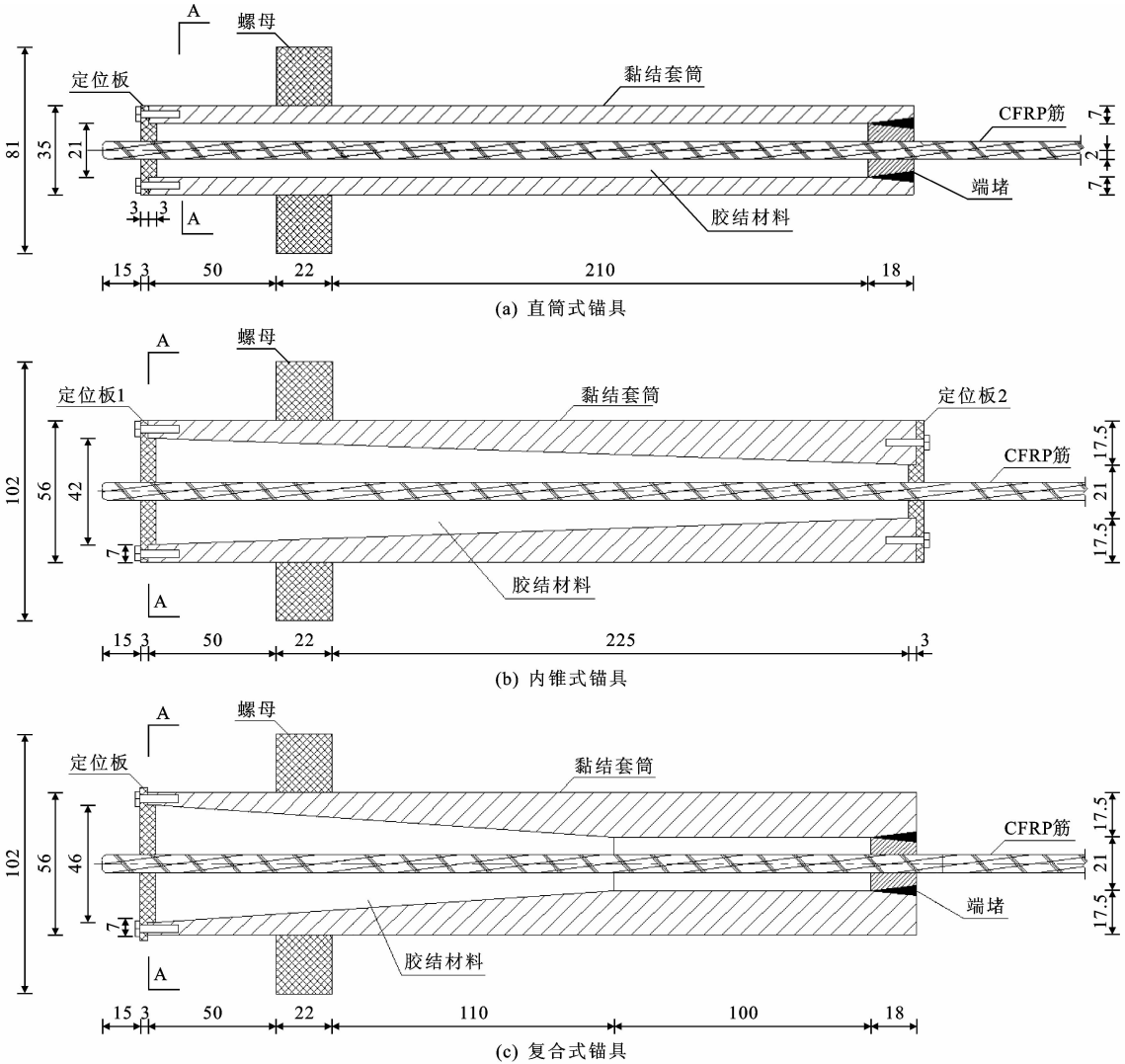
黏结型锚具试验研究的关键是测试荷载-滑移关系、黏结应力沿锚具长度方向的分布,实际上后者的测试相当困难,因此相关的报道也极少。本文通过试验测试 CFRP 筋材在锚具内部的应力分布,为 CFRP 筋锚具的黏结应力分布规律研究提供实测数据,同时分析 CFRP 筋材在加载过程中的滑移规律。由于锚具套筒在加载过程中的应力分布特征研究较少,因此本文试验中也对套筒的应力进行了测试。在试验之前,首先建立锚具的有限元模型,对黏结界面进行接

触分析,对比不同类型黏结型锚具的应力分布规律,以便与试验结果相互验证。

1 有限元分析

CFRP 筋黏结型锚具组装件由套筒、螺母、端堵、黏结材料和 CFRP 筋材组成。根据套筒截面形式的

不同,黏结型锚具可分为直筒式、内锥式、复合式锚具,其中复合式锚具结合了直筒式和内锥式锚具的结构特点,其套筒后部设有内锥段。锚具构造如图 1 所示,其中,CFRP 筋材采用国产带肋筋材,直径为7 mm,黏结材料采用国产 Lica300 结构胶,套筒采用 45 号钢,端堵采用 35 号钢,各部分的材料参数见表 1。



单位: mm

图 1 锚具构造

Fig. 1 Configuration of anchorages

表 1 CFRP 筋黏结型锚具组装件材料参数

Tab. 1 Material parameters of components of bond-type anchorage for CFRP tendon

材料名称	纵向弹性模量/GPa	径向弹性模量/GPa	重度/(10 <sup>4</sup> N·m <sup>-3</sup> )	泊松比
CFRP 筋材	147.00	10.30	1.60	0.27(纵向), 0.02(径向)
钢套筒	209.00	209.00	7.89	0.27
端堵	212.00	212.00	7.85	0.31
黏结材料	2.61	2.61	2.15	0.25

采用 ANSYS 软件对 3 种锚具分别进行有限元分析。由于 CFRP 筋黏结型锚具在受力过程中存在显著非线性特征,需要对黏结界面进行接触分析,接触单元和目标单元分别采用 Contal74 和 Target170 单元。模型中的 CFRP 筋材、胶体和套筒均选择 Solid45 单元进行模拟<sup>[12]</sup>。

按照每级增加 20% 的荷载进行分级加载,根据 CFRP 筋材的抗拉强度 2 000 MPa,确定最大加载等级为 76.9 kN。最大加载等级时 3 种黏结型锚具

的应力分布规律如图 2 和图 3 所示。

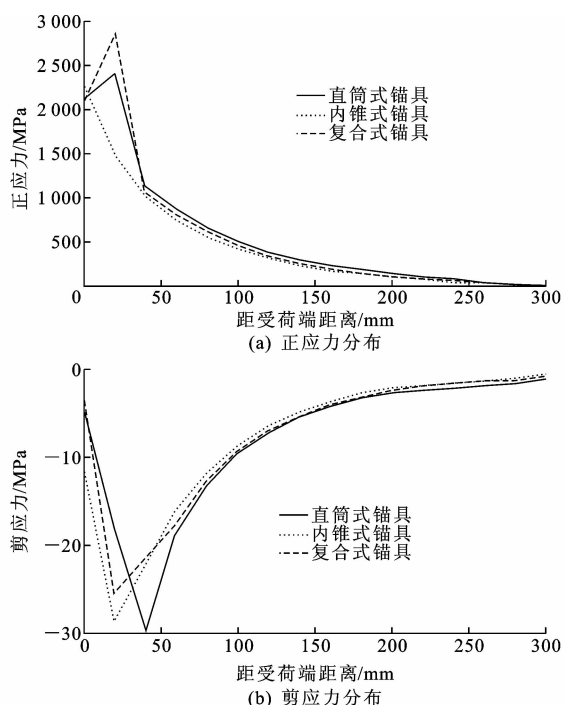


图 2 锚具长度为 300 mm 时筋材应力分布

Fig. 2 Stress distributions of tendon in anchorage with length of 300 mm

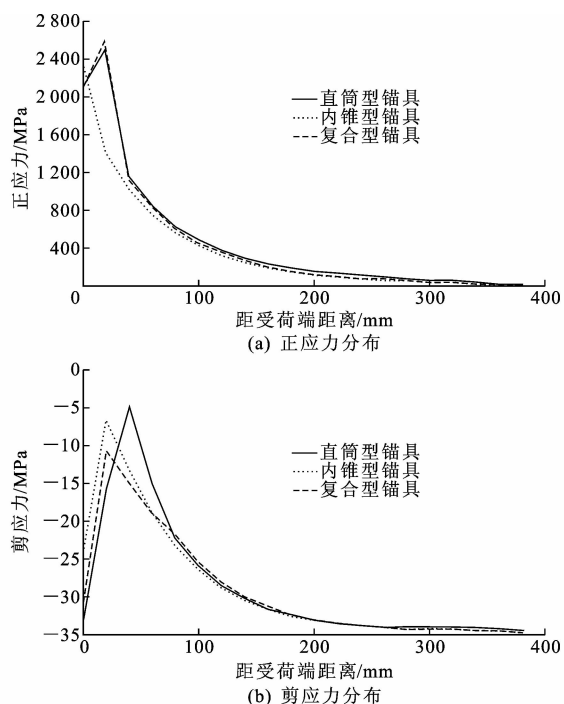


图 3 锚具长度为 380 mm 时筋材应力分布

Fig. 3 Stress distributions of tendon in anchorage with length of 380 mm

从图 2(a)和图 3(a)可以看出,加载过程中胶体向受荷端移动,由于直筒式锚具和复合式锚具存在端堵,其变形受到端堵的约束,从而使传递给 CFRP

筋材的挤压力比没有设置端堵的锚具大,在锚具受荷端筋材表现出明显的应力集中现象。然而,设置端堵可以使筋材在受荷端的应力峰值处于锚具当中,而非端口处,避免出现切口效应。

图 2(b)和图 3(b)表明,3 种锚具黏结界面的剪应力分布基本一致,主要区别在于端部的应力分布情况。直筒式锚具的剪应力峰值最大,其过大的剪应力容易超出黏结界面的黏结强度,使黏结失效提前发生;内锥式锚具黏结界面的剪应力峰值次之;复合式锚具黏结界面的剪应力最小,这表明复合式锚具的传力模式最合理,直筒段的设置能够明显削弱受荷端的应力峰值。

## 2 试验方案

### 2.1 试件制作

试验共分 2 个批次,每批均加工了直筒式、内锥式、复合式 3 种类型锚具,如图 4 所示。由于在锚具内部筋材上粘贴较多应变片并相应地引出较多接线,这对筋材的黏结强度有一定影响,故黏结长度较长。第 1 批锚具长度为 300 mm,3 种类型锚具分别标记为 ZT300、NZ300 和 FH300;第 2 批锚具长度为 380 mm,3 种类型锚具分别标记为 ZT380、NZ380 和 FH380。第 1 批试件采用人工搅拌倾倒法进行胶体灌注;为提高灌注质量,第 2 批采用注射式胶枪进行搅拌和灌注。



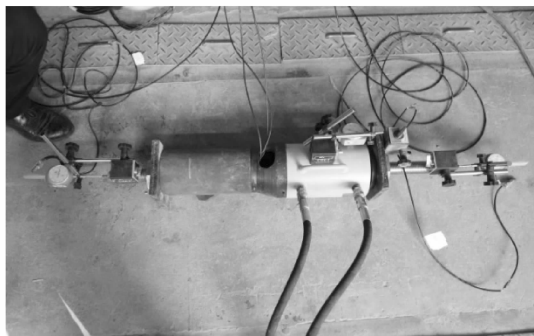
图 4 锚具实物

Fig. 4 Entities of anchorage

### 2.2 试验装置

锚具试验装置如下页图 5 所示,采用穿心式千斤顶施加荷载,每级加载过程中持荷 5~10 min。在 CFRP 筋材和锚具表面粘贴应变片,筋材自由段部分的测点编号为①~③,一端锚具内筋材上测点编号为④~⑧,对应的另一端锚具内筋材上测点编号为 4'~8',锚具表面测点编号为 1#~4#,如下页图 6 所示。采用静载数据采集系统 DH3816 采集应变,在锚具末端分别安装百分表以测量 CFRP 筋材

(a) 试验装置示意



单位: mm

Fig. 5 Test setup of anchorage

当 NZ300 锚具加载至 28 kN 时,某一侧锚具中筋材发生滑脱,粘贴在该锚具中 CFRP 筋材表面的应变片随之出现溢出现象,故提取其前一级加载值 20.1 kN 时的测试值进行分析,锚具内部筋材正应力的测试值和理论值如图 8 所示。

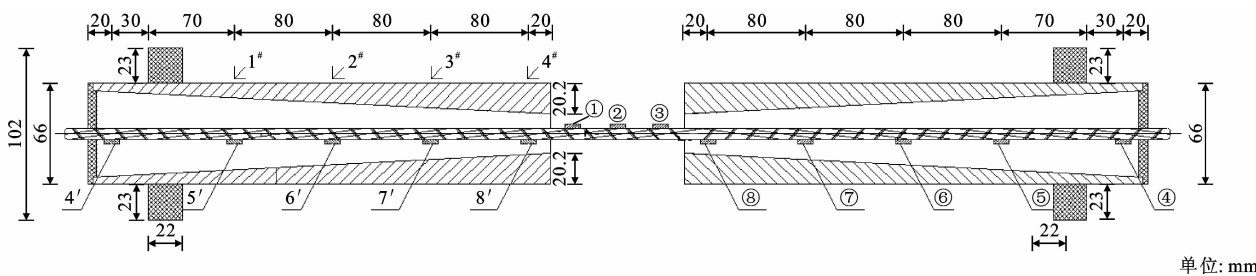
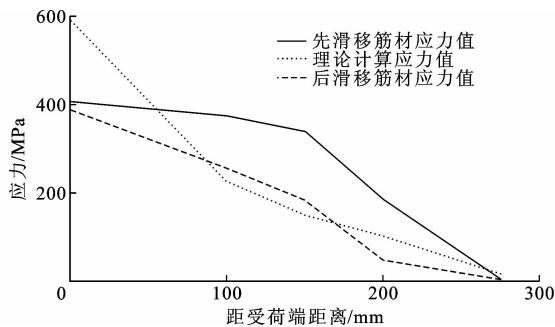


Fig. 6 Arrangement of strain measuring-points of anchorage

The diagram illustrates a unit element of a fiber-reinforced composite. It consists of three horizontal layers: a top layer labeled '胶体' (matrix), a middle layer labeled '筋材' (reinforcement), and a bottom layer labeled '胶体' (matrix). The total height of the unit element is denoted as  $h$ . The width of the element is  $dx$ . Shear stress  $\tau_x$  is shown acting on the top and bottom surfaces of the matrix layers. On the left side, a shear force  $T_x$  is applied, and on the right side, a shear force  $T_x + dT_x$  is applied. The diagram shows that the shear stress is not uniform across the height of the element, with higher stress concentrations at the interfaces between the matrix and the reinforcement.

出现一侧筋材先滑移的现象,可能是由于2个锚具的灌注有差异,先滑移一侧的锚具灌注密实性较差。因CFRP筋材提前出现滑脱现象,故调整加载值 $p$ 为每级增加2 kN,在各级载荷下,CFRP筋



由于只能测试 CFRP 筋材在锚具内部的正应力,受荷端口处的正应力无法测试,可以认为其与自由段上筋材的应力相同。图 8 显示,2 个锚具内筋

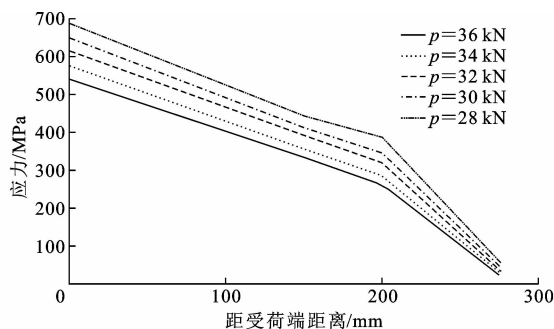


图 9 不同荷载下 NZ300 锚具内部筋材正应力分布  
Fig. 9 Normal stress distributions of tendon in NZ300 anchorage under different loads

材的正应力分布不同,先滑移一侧筋材在锚具中部的应力值明显大于后滑移的值。这是因为,先滑移一侧筋材和胶体之间的黏结强度较小,筋材上的应力向胶体传递的较慢。后滑移一侧筋材应力实测值与理论值比较接近,实测应力分布趋势与理论值的分布趋势基本一致。从锚具受荷端向自由端,CFRP 筋材的正应力由最大值逐渐减小并趋于 0,说明其应力通过界面的黏结力逐渐传递给胶体,而且在受荷端附近变化更快,表明在加载初期,锚具受荷端附近的黏结应力较大,当其超过界面的黏结强度时,该处黏结应力开始下降,同时黏结应力峰值向自由端转移。

由图 9 可以看出,在加载值大于或等于 28 kN 的各级荷载作用下,CFRP 筋材的正应力分布变化趋势基本一致。自锚具受荷端向自由端,CFRP 筋材的正应力并不是线性减小,而是在受荷端减小较慢,在自由端附近减小较快。由于曲线的斜率与筋材表面的剪应力成正比,表明在加载后期,锚具受荷端黏结应力较小,只剩下残余黏结强度,黏结应力峰值靠近锚具自由端。

CFRP 筋材在自由段区域的应力-应变关系如图 10 所示。从图 10 可以看出,试验过程中,CFRP 筋材的应力-应变基本成正比关系,这与 CFRP 筋材的材料特性相符。

### 3.2 CFRP 筋材荷载-滑移曲线

部分锚具的荷载-滑移曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出,CFRP 筋材的荷载-滑移曲线表现出明显的非线性,在加载初期和中期筋材的滑移量较小,在加载末期滑移量迅速递增,接近破坏时,滑移量明显增加。这是因为,在加载初期受荷端附近黏结应力最先达到黏结强度而使黏结界面积失效,筋材从胶体中滑脱,随着荷载的持续递增,失效长度从受荷端向自由端发展,导致滑移量递增,最后整个锚具长度

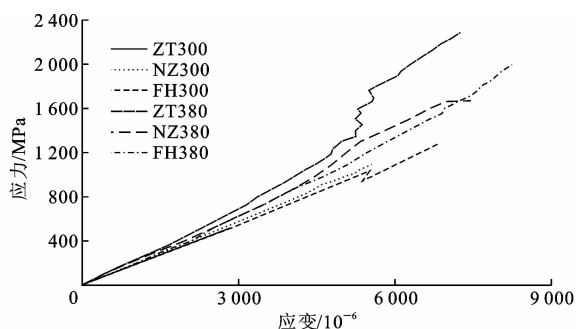


图 10 CFRP 筋材应力-应变曲线  
Fig. 10 Stress-strain curves of CFRP tendon

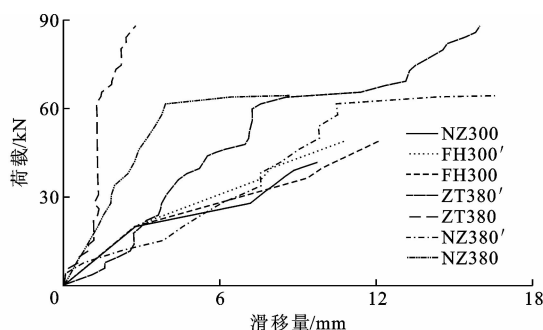


图 11 筋材在锚具末端的荷载-滑移曲线  
Fig. 11 Load-slip curves of tendon at ends of anchorage 范围的筋材发生滑动。

从图 11 还可看出,在千斤顶持荷(荷载有微量增加)期间,滑移量有较大的增加,这是因为,锚具中灌注的环氧树脂胶体和 CFRP 筋材中的树脂存在蠕变性能,导致滑移量在持荷期间继续增加。先滑移一侧的锚具(FH300'、ZT380'和 NZ380')最终滑移量比后滑移一侧的滑移量大。

### 3.3 钢套筒应力分析

钢套筒上的应力测点分布如图 6 所示。加载过程中,钢套筒上的剪应力和纵向正应力的变化见下页图 12、图 13。

由图 12 可以看出:当千斤顶施加给 NZ380 的荷载达到 34 kN 时,3# 测点实测剪应力开始减小,而 1#、2# 测点的剪应力仍随荷载的增加而增加,这是因为 3# 测点离锚具受荷端最近,该处筋-胶界面上黏结应力最先达到黏结强度,随后化学胶着力失效,黏结应力开始下降,表现为套筒表面剪应力也随之下降。同理可以预测,施加给 NZ380 的荷载值分别达到 42、54 kN 时,2# 和 1# 测点处的黏结应力相继开始下降。可见,随着荷载的逐渐增加,CFRP 筋材表面的黏结应力峰值逐渐由受荷端向自由端转移,而受荷端附近的黏结应力逐渐下降到残余应力,同时筋材上的轴向荷载逐渐转移给胶体。

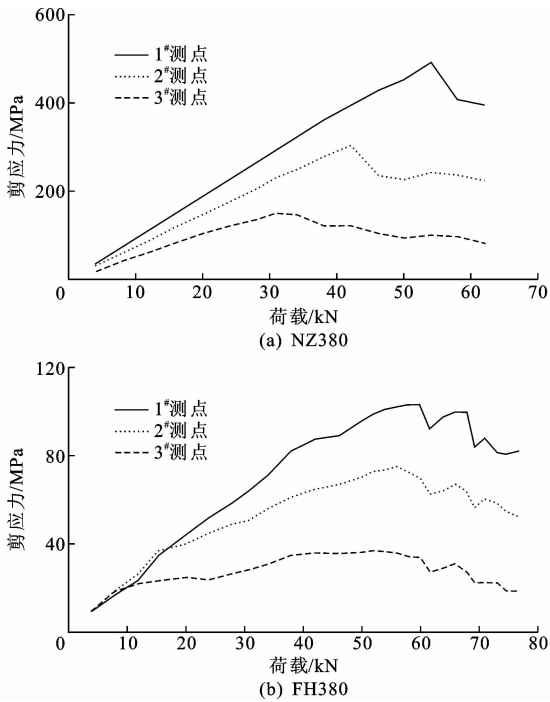


图 12 钢套筒上剪应力变化曲线

Fig. 12 Shear stress variation curves of steel sleeve

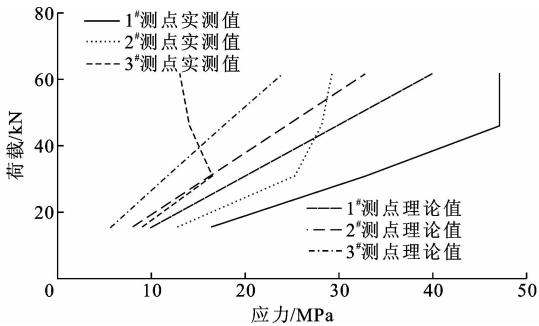


图 13 NZ380 钢套筒上纵向正应力变化曲线

Fig. 13 Normal stress variation curves at axial direction of NZ380 steel sleeve

由图 13 可以看出,理论计算的荷载和套筒纵向正应力成正比关系。实际加载过程中,仅加载值较小时,实测的荷载-纵向正应力值与理论值曲线变化趋势一致;当加载值较大时则有一定偏离。这是因为,加载值较大时接触界面逐渐发生滑脱失效而使界面产生应力重分布。此外,1# 测点的纵向正应力明显大于 2# 和 3# 测点,表明纵向正应力在锚具受荷端附近最小,往自由端方向其数值逐渐增大,这是因为,CFRP 筋材上的轴向荷载通过界面上的黏结力逐渐向锚具套筒转移,锚具自由端累计转移来的荷载最大。

## 4 结 语

(1)有限元分析表明,锚具端堵的设置能使受荷

端应力峰值处于锚具当中,复合式锚具的传力模式最合理,可以防止出现内锥式锚具的切口效应。

(2)在加载前期,黏结应力峰值靠近受荷端,随着荷载的持续增加,受荷端逐渐只剩下残余黏结强度,黏结应力峰值靠近锚具自由端;CFRP 筋材在自由段的应力-应变基本成正比关系。

(3)锚具的荷载-滑移曲线呈现出明显的非线性趋势,筋材在加载前期滑移量较小,随着荷载的持续递增,CFRP 筋材滑移量迅速增大,当接近破坏时,滑移量明显增加。

(4)随着荷载的逐渐增加,筋-胶界面上的黏结应力先增加到峰值,然后随着化学胶着力的失效,只剩下残余应力;黏结应力峰值由受荷端逐渐向自由端转移,在锚具自由端,累计转移来的荷载值最大,表现为自由端附近套筒的正应力最大。

(5)本文研究成果可为 CFRP 筋黏结型锚具的优化设计提供参考和指导;但本文仅研究了锚具短期受力性能,下一步将开展锚具的长期受力性能研究。

## 参考文献:

### References:

- [1] WANG X, WU Z S, WU G, et al. Enhancement of basalt FRP by hybridization for long-span cable-stayed bridge[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44 (1): 184-192.
- [2] WANG X, WU Z S. Integrated high-performance thousand-metre scale cable-stayed bridge with hybrid FRP cables[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41 (2): 166-175.
- [3] XIE X, LI X Z, SHEN Y G. Static and dynamic characteristics of a long-span cable-stayed bridge with CFRP cables[J]. Materials, 2014, 7(6): 4854-4877.
- [4] MEIER U. Carbon fiber reinforced polymer cables: Why? Why not? What if? [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2012, 37(2): 399-411.
- [5] XIONG W, CAI C S, XIAO R C, et al. Concept and analysis of stay cables with a CFRP and steel composite section[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(1): 107-117.
- [6] NAGAI M, FUJINO Y, YAMAGUCHI H, et al. Feasibility of a 1 400 m span steel cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9 (5): 444-452.
- [7] SCHMIDT J W, BENNITZ A, TÄLJSTEN B, et al. Mechanical anchorage of FRP tendons—A literature

- review[J]. Construction & Building Materials, 2012, 32:110-121.
- [8] MEI K H, LI Y J, LU Z T. Application study on the first cable-stayed bridge with CFRP cables in China [J]. Journal of Traffic & Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(4): 242-248.
- [9] BURGOYNE C J. Advanced composites in civil engineering in Europe[J]. Structural Engineering International, 1999, 9(4): 267-273.
- [10] JUNG W T, PARK J S, KANG J Y, et al. A fundamental study on the anchor performance of non-surface treated multi CFRP tendons[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 2013, 7(11): 872-876.
- [11] AL-MAYAH A, SOUDKI K, PLUMTREE A. Simplified anchor system for CFRP rods[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(5): 584-590.
- [12] CAMPBELL T I, SHRIVE N G, SOUDKI K, 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.
- [13] ELREFAI A, WEST J S, SOUDKI K. Performance of CFRP tendon-anchor assembly under fatigue loading [J]. Composite Structures, 2007, 80(3): 352-360.
- [14] ZHANG B, BENMOKRANE B, CHENNOUF A. Prediction of tensile capacity of bond anchorages for FRP tendons [J]. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(2): 39-47.
- [15] ZHANG B, BENMOKRANE B. Pullout bond properties of fiber-reinforced polymer tendons to grout[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 399-408.
- [16] SENTRY M, AL-MAHAIDI R, BOUAZZA A, et al. Bond type anchorage systems for permanent high strength CFRP ground anchors[M]//YE L P, FENG P, YUE Q R. Advances in FRP Composites in Civil Engineering. Berlin: Springer, 2011: 317-320.
- [17] NOISTERNIG J F. Carbon fibre composites as stay cables for bridges[J]. Applied Composite Materials, 2000, 7(2): 139-150.
- [18] PUIGVERT F, CROCOMBE A D, GIL L. Fatigue and creep analyses of adhesively bonded anchorages for CFRP tendons[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014, 54: 143-154.
- [19] SAYED-AHMED E Y, SHRIVE N G. A new steel anchorage system for post-tensioning applications using carbon fiber reinforced plastic tendons [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1998, 25(1): 113-127.
- [20] 张继文, 朱虹, 吕志涛, 等. 预应力 FRP 筋锚具的研发[J]. 工业建筑, 2004, 34(增1): 259-262.
- ZHANG Ji-wen, ZHU Hong, LU Zhi-tao, et al. Development of anchor devices of prestressed FRP tendon [J]. Industrial Construction, 2004, 34(S1): 259-262.
- [21] 梅葵花, 吕志涛. CFRP 斜拉索的静力特性分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 43-45.
- MEI Kui-hua, LU Zhi-tao. Static characteristic analysis of CFRP cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 43-45.
- [22] 梅葵花, 吕志涛, 张继文. CFRP 筋黏结型锚具试验研究及实桥应用分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1): 53-60.
- MEI Kui-hua, LU Zhi-tao, ZHANG Ji-wen. Experimental study and practical application of bond-type anchorages for CFRP tendons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 53-60.
- [23] FANG Z, ZHANG K Y, TU B. Experimental investigation of a bond-type anchorage system for multiple FRP tendons [J]. Engineering Structures, 2013, 57: 364-373.
- [24] 蒋田勇, 方志. CFRP 筋粘结式锚具锚固性能试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 68-76.
- JIANG Tian-yong, FANG Zhi. Experiment on anchorage performance of bond-type anchorage for CFRP tendon [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 68-76.
- [25] 梁夏莉, 慕玉坤, 孙磊. 基于 ANSYS 分析的装配式 PC 箱梁碳纤维布加固抗弯性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(4): 79-83.
- LIANG Xia-li, MU Yu-kun, SUN Lei. Research on bending resistance of assembled PC box girder reinforced with CFRP cloth based on ANSYS analysis [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(4): 79-83.