

文章编号:1673-2049(2013)02-0009-06

CFRP 筋复合型锚具锚固性能研究

刘荣桂,刘德鑫,延永东

(江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013)

摘要:为解决碳纤维增强复合材料(CFRP)筋的锚固问题,研制了由粘结材料、金属筒、夹片和锚环组成的 CFRP 筋复合型锚具,并进行了夹片长度、金属筒长度、夹片夹持位置以及粘结材料对 CFRP 筋复合型锚具的锚固性能影响试验。结果表明:粘结材料、金属筒长度和夹片夹持位置均对锚固性能有较大影响;夹片的夹持位置应避免在金属筒两端,且宜使金属筒受压区长度小于受拉区长度;Lica-B 型粘结材料锚固性能优于 Lica-A 型粘结材料;复合型锚具各组件协同工作性能良好,夹片与金属筒间无滑移产生;参数合理的该类复合型锚具可有效锚固直径为 8 mm 的 CFRP 筋。

关键词:桥梁工程;碳纤维增强复合材料筋;复合型锚具;锚固性能

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Research on Anchorage Performance of Wedge-bond Anchorage for CFRP Tendons

LIU Rong-gui, LIU De-xin, YAN Yong-dong

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

Abstract: In order to solve the anchorage problems for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons, a wedge-bond anchorage for CFRP tendons was developed. This anchorage consisted of bonding material, metal sleeve, clip and conical barrel. Influence factors of anchorage performance, such as length of clip, length of metal sleeve, clip clamping position and bonding material were illustrated. Results show that bonding material, length of metal sleeve, and clip clamping position will have significant influence on anchorage performance. The clip clamping position should be avoided at both ends of the metal sleeve, and should make compression zone metal sleeve length be less than that of the tension zone length. Meanwhile, the anchorage performance of bonding material Lica-B is better than that of bonding material Lica-A. The each component of wedge-bond anchorage has good cooperative work performance, and there is no relative slip between clip and metal sleeve. The wedge-bond anchorage with reasonable parameters can anchor CFRP tendons with diameter of 8 mm effectively.

Key words: bridge engineering; carbon fiber reinforced polymer tendon; wedge-bond anchorage; anchorage performance

0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced

Polymer, CFRP)具有抗拉强度高、密度小、抗疲劳、耐腐蚀、低松弛及电磁绝缘性能好等优点,应用于大跨空间结构与缆索桥梁体系中,可有效解决传统钢

收稿日期:2013-01-10

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:liurg@ujs.edu.cn。

制预应力拉索的锈蚀与承载效率低的问题,具有广阔的应用前景^[1-9]。然而 CFRP 是典型的各向异性材料,其抗剪强度较低,传统的夹片式锚具不再适用于 CFRP 筋,否则将会由于其横向强度过低导致锚具组装件在锚固区过早失效。因此,可靠的锚固系统是 CFRP 筋能进行广泛应用的前提。目前,各国学者提出的 CFRP 筋锚具主要有粘结型锚具^[10-11]、夹片型锚具^[12-13]、复合型锚具^[14-15]。各国学者对粘结型锚具与夹片型锚具已经进行了大量研究,这 2 种锚具各有优点:粘结型锚具对 CFRP 筋的环向压力小,避免了 CFRP 筋的夹伤破坏,锚固效率高;夹片型锚具结构简单,组装方便,便于工程现场安装。但这 2 种锚具也具有一定的局限性:粘结型锚具因锚固性能的要求往往需要较大的锚固体积,且群锚中不能进行单根换筋;夹片型锚具滑移量大且容易对 CFRP 筋造成损伤,在夹片切口处易发生疲劳破坏。复合型锚具的研究可有效解决现有 CFRP 筋粘结型锚具与夹片型锚具的不足。文献[14]中研究的串联式复合型锚具大大提高了锚具的锚固性能,但其结构形式不适合于多根 CFRP 筋的锚固。文献[15]中对并联式复合型锚具进行了初步研究,测试了各锚具试件的极限破断力,缺乏对锚具张拉过程中锚固区应力的测试分析。文献[16]中研究的 CFRP 筋都发生了粘结滑移,其筋材未能拉断。为了解及提高并联式复合型锚具的锚固性能,并进一步将其应用于多根 CFRP 筋的锚固,笔者对 11 个锚具试件的静力锚固性能及不同参数下锚固区应力进行了试验与分析。

本文中的复合型锚具是一种将套筒粘结型锚具与传统夹片型锚具相结合的锚固形式,这种锚具由粘结材料、金属筒、夹片、锚环组成,其锚固效率高且可直接与传统夹片锚固系统进行对接。因复合型锚具为并联式结构,可方便扩展并应用于多根 CFRP 筋的锚固。

1 试验内容

1.1 试验试件

图 1 为 CFRP 筋复合型锚具。试件筋材采用由江苏南京诺尔泰复合材料设备制造有限公司提供的表面缠肋 CFRP 筋,直径 8 mm,拉伸弹性模量 147 GPa,极限破断力平均值 145.4 kN,极限抗拉强度平均值 2 894 MPa。

粘结材料采用 Lica 植筋胶,分 A 型、B 型 2 种,Lica-A 型胶为普通桶装双组分结构植筋胶,钢-钢粘

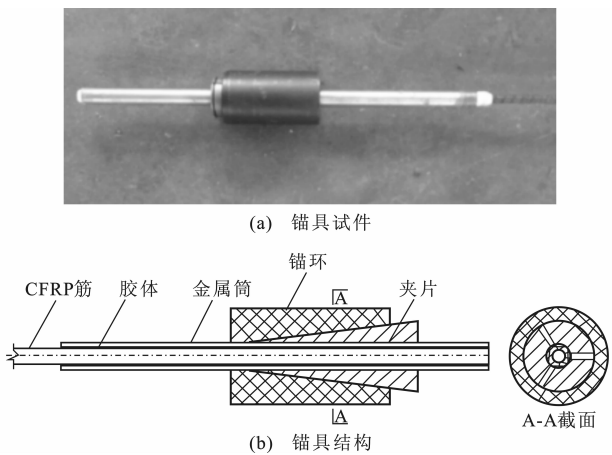


图 1 CFRP 筋复合型锚具

Fig. 1 Wedge-bond Anchorage for CFRP Tendons

结抗拉强度为 25 MPa;Lica-B 型胶为管式植筋胶,钢-钢粘结抗拉强度为 33 MPa,其与 Lica-A 型胶相比,有以下优点:时效性好,灌胶与胶体混合同时进行,可以在胶体初凝前完成灌胶;密实性好,胶体中无气泡混入。

金属筒为 20[#] 无缝钢管,屈服强度为 245 MPa,抗拉强度为 410 MPa。

夹片采用经渗碳处理的 20CrMnTi 合金钢;锚环采用经调质处理的 40Cr 合金钢。

锚具试件胶体厚度为 2 mm,金属筒厚度取 2, 3, 4 mm 三种,金属筒长度取 350, 400, 450, 500 mm 四种,夹片长度取 55, 65, 80, 90, 100 mm 五种,夹片夹持位置分为受荷端、中间区域、自由端。CFRP 筋复合型锚具试件参数如表 1 所示。

表 1 复合型锚具试件参数

Tab. 1 Parameters of Wedge-bond Anchorage Specimens

试件 编号	胶体厚 度/mm	金属筒厚 度/mm	金属筒长 度/mm	夹片长 度/mm	夹片夹持 位置	胶体类型
FM-1	2	3	400	55	中间区域	Lica-B
FM-2	2	3	400	80	中间区域	Lica-B
FM-3	2	3	400	90	中间区域	Lica-B
FM-4	2	3	400	100	中间区域	Lica-B
FM-5	2	3	450	55	受荷端	Lica-B
FM-6	2	3	350	55	自由端	Lica-B
FM-7	2	3	450	55	中间区域	Lica-B
FM-8	2	4	400	65	中间区域	Lica-A
FM-9	2	2	400	55	中间区域	Lica-A
FM-10	2	2	450	55	中间区域	Lica-A
FM-11	2	2	500	55	中间区域	Lica-A

1.2 试验设备及加载程序

张拉设备采用穿心式千斤顶,试验加载装置如图 2 所示。试件筋材与金属筒表面粘贴应变片,试

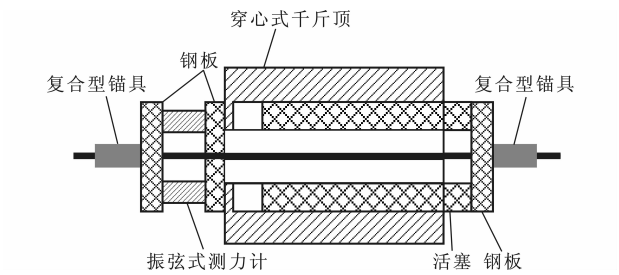


图 2 加载装置

Fig. 2 Loading Setup

验中用 YE2538A 程控静态应变仪记录各应变片读数,采用 JMZX300 振弦检测仪控制静载张拉力。荷载分级加载,加载速率约 $100\text{ MPa}\cdot\text{min}^{-1}$ [17]。试验中记录极限拉力、各级荷载下应变片的读数及锚具试件的破坏形式。

粘结组装件受力分析如图 3 所示。图 3 中, T 为拉力, F_r 为夹片对金属筒的径向夹持力, F_t 为夹片对金属筒的轴向锚固力, l_1, l_2, l_3 分别为金属筒受拉区、夹持区、受压区长度。金属筒分为 3 个受力区,中间为夹持区,靠近受荷端为受拉区,金属筒承受拉力,靠近自由端为受压区,金属筒承受压力。金属筒受力情况可反映粘结组装件受力状态,在金属筒受拉区、受压区分别粘贴应变片,从受荷端至自由端依次记为 Y-1, Y-2, Y-3, Y-4, Y-5, Y-6。

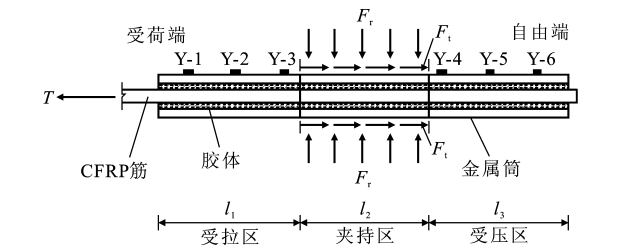


图 3 粘结组装件受力分析

Fig. 3 Force Analysis for Bond-assembly Parts

2 试验结果及分析

2.1 极限拉力及破坏形式

CFRP 筋复合型锚具静载锚固性能试验结果如表 2 所示。试件 FM-1 的极限拉力最大,为 151.5 kN,其筋材拉伸强度达到 3 015 MPa。试验过程中发现,试件拉力达到 120 kN 时,CFRP 筋会断断续续发出微小清脆的响声,随着拉力的继续增大,试件最后发生破坏。复合型锚具粘结组装件与夹片组装件协同工作性能良好,夹片与金属筒间无滑移产生。试验结果表明,Lica-B 型胶胶体厚度为 2 mm,金属筒厚度为 3 mm,长度为 400 mm,夹片长度不小于 55 mm,夹片夹持位置为中间区域且金属筒受拉区

表 2 复合型锚具试件试验结果

Tab. 2 Experiment Results of Wedge-bond Anchorage Specimens

试件编号	极限拉力/kN	破坏时筋材受拉应力/MPa	破坏形式
FM-1	151.5	3 015	筋材破断
FM-2	145.6	2 898	筋材破断
FM-3	147.1	2 928	筋材破断
FM-4	143.5	2 856	筋材破断
FM-5	105.4	2 098	金属筒弯曲
FM-6	121.3	2 414	金属筒破断
FM-7	139.4	2 775	筋材破断
FM-8	133.2	2 651	粘结滑移
FM-9	123.1	2 450	粘结滑移
FM-10	128.9	2 566	粘结滑移
FM-11	135.9	2 705	粘结滑移

长度 l_1 大于受压区长度 l_3 的复合型锚具,可以有效地锚固直径为 8 mm、抗拉强度为 3 015 MPa 的 CFRP 筋。

试件破坏形式主要有 2 种:筋材破断、锚固区破坏。试件破坏形式如图 4 所示。筋材破断包括筋材炸散式破坏、筋材脆断,如图 4(a),(b)所示。试件其他破坏形式包括 CFRP 筋粘结滑移、金属筒弯曲,如图 4(c),(d)所示。炸散式破坏为较理想破坏形式,筋材破断试件的极限拉力较大,试件 FM-1, FM-2, FM-3, FM-4, FM-7 筋材发生破断,平均极限拉力为 145.4 kN,筋材发生破断时伴随着一声巨响。试件 FM-8, FM-9, FM-10, FM-11 发生 CFRP 筋粘结滑移破坏,平均极限拉力为 130.3 kN。发生 CFRP 筋粘结滑移的试件均采用 Lica-A 型胶,粘结材料为 Lica-B 型胶的试件未有粘结滑移产生,这表明 Lica-B 型胶锚固性能较好。试件 FM-5 发生金属筒弯曲破坏,该试件特点为夹片夹持位置在受荷端,金属筒受拉区长度 l_1 为 0,张拉时金属筒承受轴向压力,当拉力较大时,金属筒易发生受压弯曲破坏。试件 FM-6 金属筒发生破断,该试件金属筒长度为 350 mm,较其他试件短,且其夹片夹持位置为自由端,金属筒受压区长度为 0。

2.2 锚固应力

试件 FM-5 的 CFRP 筋应力-应变关系如图 5 所示。CFRP 筋材受拉应力小于 1 000 MPa 时,应变片实测值与计算值较接近;受拉应力大于 1 000 MPa 时,应变片实测值明显大于计算值。

复合型锚具锚固应力由粘结组装件及夹片组装件传递至固定端,为研究复合型锚具应力分布,对金

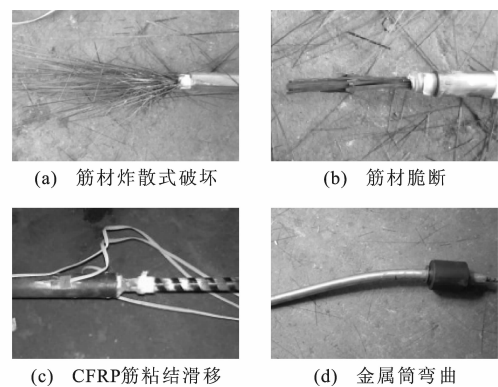


图 4 试件破坏形式

Fig. 4 Failure Modes of Specimens

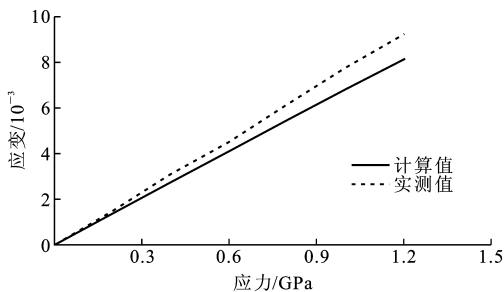
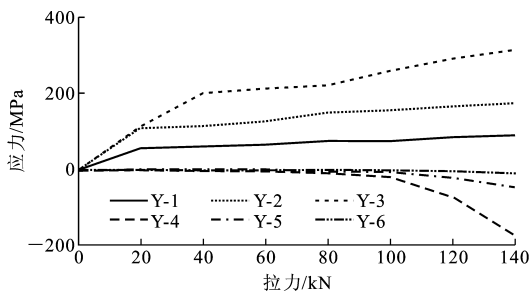


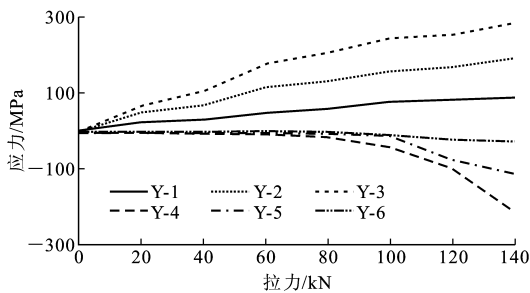
图 5 CFRP 筋应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain Relations of CFRP Tendons

属筒表面应力进行测试。试件 FM-1,FM-2,FM-3, FM-9 应变片粘贴位置见图 3,应变片(测点)Y-1, Y-2, Y-3, Y-4, Y-5, Y-6 距受荷端距离分别为 40, 90, 140, 260, 310, 360 mm。试件 FM-2, FM-3 各测点应力曲线如图 6 所示,其应力分布曲线如图 7 所示。



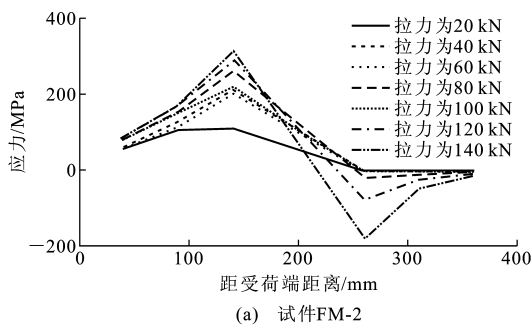
(a) 试件FM-2



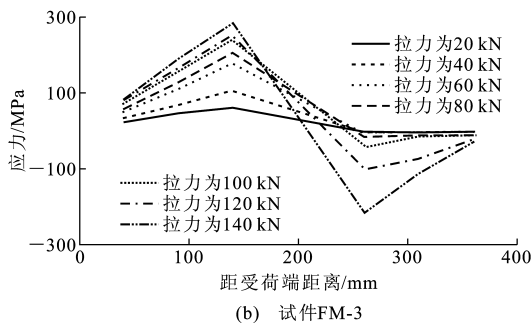
(b) 试件FM-3

图 6 试件各测点应力曲线

Fig. 6 Stress Curves of Measuring Points of Specimens



(a) 试件FM-2



(b) 试件FM-3

图 7 试件应力分布曲线

Fig. 7 Stress Distribution Curves of Specimens

对图 6,7 中应力曲线进行分析可得:①随着拉力的增大,各测点轴向应力逐渐增大;②当拉力小于 100 kN 时,金属筒受压区测点应力较小,受拉区应力较大,该阶段锚具应力的传递主要由受拉区、夹持区承担;③当拉力大于 100 kN 时,随着拉力的增大,受压区测点应力出现显著变化,这主要是因为金属筒局部应力较大,达到屈服强度后,应力快速向受压区传递,受拉区测点应力则继续增大,该阶段锚具应力的传递由受拉区、夹持区和受压区共同承担;④离夹持区较近的测点应力较大,夹片长度的增大可减小测点应力峰值。

2.3 夹片夹持位置的影响

夹片夹持位置有 3 种情况,分别为金属筒的受荷端、自由端及中间区域,不同的夹片夹持位置对锚具锚固性能有重要影响。

夹片夹持位置为受荷端时,金属筒主要承受压力,压力较大时,金属筒易发生弯曲变形[图 4(d)],从而使锚具提前破坏,为避免此破坏发生,宜使受拉区长度大于受压区长度。夹片夹持位置为自由端时,金属筒受压区长度为 0,锚具应力传递由受拉区承担,拉力较大时,靠近夹持区域处拉应力达到较大峰值,金属筒易发生受拉破坏,如表 2 中的试件 FM-6,金属筒在离夹持区域 1 cm 处发生破断。因此,夹片夹持位置应避免在金属筒两端,且宜使其受拉区长度 l_1 大于受压区长度 l_3 。

2.4 粘结材料的影响

粘结材料性能对锚具锚固性能有重要影响。图 8 为不同粘结材料试件各测点应力曲线,图 9 为不同粘结材料试件应力分布曲线。

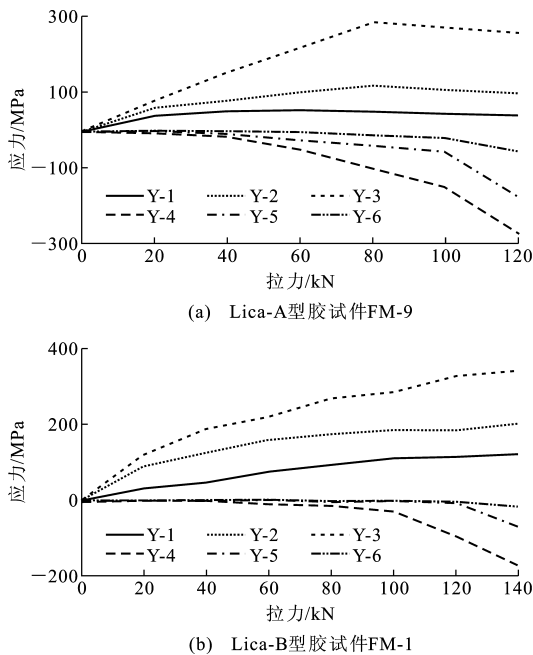


图 8 不同粘结材料试件各测点应力曲线
Fig. 8 Stress Curves of Measuring Points of Specimens with Different Bonding Materials

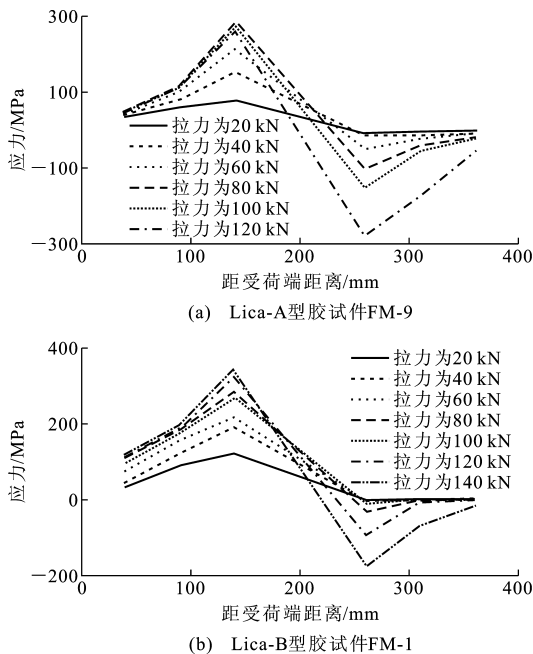


图 9 不同粘结材料试件应力分布曲线
Fig. 9 Stress Distribution Curves of Specimens with Different Bonding Materials

由图 8,9 可以看出:①Lica-A 型胶试件受拉区测点轴向应力增大至峰值后缓慢下降,这表明 Lica-

A 型胶试件随着拉力的增大,受拉区逐渐发生粘结滑移破坏;Lica-B 型胶试件随着拉力的增大,各测点轴向应力逐渐增大,且无下降趋势;②当拉力小于 100 kN 时,Lica-A 型胶试件受压区应力增长较早,而 Lica-B 型胶试件受压区应力无显著增长;③当拉力达到 120 kN 时,Lica-A 型胶试件受压区测点应力快速增长,逐渐发生整体粘结滑移破坏,从而锚固失效;④Lica-B 型胶试件锚具未发生 CFRP 筋粘结滑移破坏,粘结组装件安全系数较高。

3 结 语

(1)试验结果表明,复合型锚具粘结组装件与夹片组装件协同工作性能良好,夹片与金属筒间无滑移产生。Lica-B 型胶胶体厚度为 2 mm,金属筒厚度为 3 mm、长度为 400 mm,夹片长度不小于 55 mm,夹片夹持位置合理的复合型锚具,可有效锚固直径为 8 mm、抗拉强度为 3 015 MPa 的 CFRP 筋。

(2)夹片夹持位置不可在金属筒两端。复合型锚具金属筒受压区长度过长时,锚具易发生金属筒受压弯曲破坏,因此,夹片的夹持位置宜使金属筒受拉区长度 l_1 大于受压区长度 l_3 。

(3)复合型锚具粘结材料及其灌注效果对锚具锚固性能至关重要。Lica-B 型粘结材料的复合型锚具锚固性能优于 Lica-A 型粘结材料的锚具。

参考文献:
References:

[1] 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): 2419-2445.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

- [5] 于 峰,牛荻涛,贺拴海. 纤维复合材料约束混凝土柱的统一强度模型[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010,30(2):70-74.
YU Feng, NIU Di-tao, HE Shuan-hai. Unified Compressive Strength Model of FRP-confined Concrete Column[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010,30(2):70-74.
- [6] 李炳宏,江世永,飞 渭,等. 纤维增强塑料筋混凝土梁抗弯设计数值分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011,31(5):50-56.
LI Bing-hong, JIANG Shi-yong, FEI Wei, et al. Numerical Analysis of Flexural Design of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(5):50-56.
- [7] 卓 静,李唐宁. 波形齿夹具锚和 U 型箍锚固作用的力学机理[J]. 中国公路学报, 2007,20(3):48-53.
ZHUO Jing, LI Tang-ning. Mechanical Mechanism of Anchorage Effect on Wave-shape-gear-grip Anchor and U-ferrule[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007,20(3):48-53.
- [8] 周士金,刘荣桂,蔡东升,等. CFRP 索大跨斜拉桥的非线性地震响应控制分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3):64-71.
ZHOU Shi-jin, LIU Rong-gui, CAI Dong-sheng, et al. Nonlinear Seismic Response Control Analysis of Long-span Cable-stayed Bridge with CFRP Cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3):64-71.
- [9] 刘荣桂,李明君,蔡东升,等. CFRP 筋锚固体体系研究与应用现状[J]. 建筑科学与工程学报, 2012,29(2): 14-20.
LIU Rong-gui, LI Ming-jun, CAI Dong-sheng, et al. Research and Application Situation of CFRP Tendon Anchorage System[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012,29(2):14-20.
- [10] ZHANG B, BENMKORANE B. Design and Evaluation of a New Bond-type Anchorage System for Fiber Reinforced Polymer Tendons[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004,31:16-24.
- [11] 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.
- [12] ELREFAI A, WEST J S, SOUDKI K. Performance of CFRP Tendon-anchor Assembly Under Fatigue Loading[J]. Composite Structures, 2007,80(3):352-360.
- [13] 诸葛萍,强士中. 新型 CFRP 筋夹片式锚具理论与试验研发[J]. 土木工程学报, 2011,44(10):67-72.
ZHUGE Ping, QIANG Shi-zhong. Theoretical and Experimental Investigation of a New CFRP Tendon Wedge-anchor[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(10):67-72.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王 军,李明君,蔡东升,等. CFRP 筋复合型锚具的受力性能试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2012, 33(6):726-729.
WANG Jun, LI Ming-jun, CAI Dong-sheng, et al. Mechanical Behavior Experiment of Wedge-bond Anchorage for CFRP-tendons[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012,33(6):726-729.
- [17] 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].