

碳纤维增强复合材料黏结型锚固体系 弯拉性能试验研究

贾丽君, 张文超, 徐利平

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了研究碳纤维增强复合材料(CFRP)黏结型锚固体系的弯拉性能,对设计的锚固体系试件进行了10组轴向拉伸试验与12组弯拉试验。在锚固体系优化基础上研究了CFRP筋直径、弯曲半径改变下试件的极限承载力、破坏模式、锚固效率及CFRP筋荷载-应变关系。结果表明,锚固体系的弯拉承载力折减量系数随CFRP筋弯曲半径的增大而减小,CFRP筋直径越大试件承载力折减量系数越大,并且CFRP筋横向约束有利于弯拉极限承载力的提高。此外,CFRP筋荷载-应变曲线的非线性变化是试件失效前的典型特征。弯曲半径和CFRP筋直径的比值与锚固效率系数为线性关系,比值在2.4%以下时试件的弯拉锚固效率系数小于80%,试件呈不均匀断裂和剪切的破坏形式。

关键词: 碳纤维增强复合材料(CFRP)黏结型锚固体系;弯拉试验;承载力折减量系数;横向约束;锚固效率;破坏形式

中图分类号: TU599

文献标志码: A

Experimental Study on CFRP Bonded Anchorage Systems Under Combined Tension and Bending

JIA Lijun, ZHANG Wenchao, XU Liping

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ten axial tensile tests and twelve combined tension and bending tests were conducted on the designed anchorage system specimens to investigate the mechanical properties of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bonded anchorage system under combined tension and bending. Based on the optimization of the anchorage system, the ultimate bearing capacity, failure modes, anchorage efficiency, and CFRP tendon load-strain relationship of the specimens were studied with CFRP diameter and bending radius changes. The

results indicate that the tensile strength reduction coefficient of the anchorage system decreases with the increase of CFRP tendon bending radius, and the larger the CFRP tendon diameter, the greater the reduction coefficient of specimen bearing capacity. The transverse constraint of CFRP tendons contributes to the improvement of tensile strength with bending. Additionally, the nonlinear variation of the load-strain curve of CFRP tendons is a typical characteristic before specimen failure; the ratio of bending radius to CFRP tendon diameter shows a linear relationship with the anchorage efficiency coefficient, and when the ratio is below 2.4‰, the anchorage efficiency coefficient of the specimen is less than 80%, exhibiting failure modes of non-uniform fracture and shear.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer(CFRP) bonded anchorage system; combined tension and bending test; tensile strength reduction coefficient; transverse constraint; anchorage efficiency; failure modes

碳纤维增强复合材料(CFRP)因其轻质、高强、耐腐蚀等特性而备受关注,是大跨度桥梁等领域替代传统缆索的极佳材料^[1-2]。然而,CFRP筋是各向异性材料,其抗剪性能较差,难以直接使用传统的锚固体系进行锚固^[3-4]。此外,由于CFRP横向受力性能差,因此在CFRP应用于缆索结构时锚固体系承载力在弯曲状态下存在折减。

目前,对于CFRP筋横向受力差难以锚固的问题,许多学者开发了多种锚具以提高锚固体系在轴向张拉作用下的锚固效率^[5-7]。其中,黏结型锚具因能避免CFRP筋横向受力过大导致的过早失效问题

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51878488)

第一作者: 贾丽君,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁结构理论和结构体系以及CFRP桥梁关键技术及特性。E-mail: jialj@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

而得到国内外学者的关注。Mei等^[8]提出了3种黏结型锚固体系,对比结果表明直筒+内锥型锚具能够缓解加载端应力集中问题。贾丽君等^[9]采用有限元方法研究了锚具参数改变对直筒+内锥黏结型锚具径向应力分布的影响规律,给出了合理的锚具参数取值。Feng等^[10]开发了一种变刚度黏结型锚具,分段黏结介质的设置能使锚固区CFRP筋的径向应力分布更加均匀。Zhang等^[11]开发了一种三段式黏结型锚具,改善了CFRP筋在锚固区的应力集中问题,提高了锚固体系的锚固性能。以上研究表明,减小锚具内部CFRP筋的应力集中是提高CFRP黏结型锚固体系锚固效率的关键。

对于纤维增强复合材料(FRP)因横向受力性能较差、在弯曲状态下抗拉强度存在折减的问题,一些学者也进行了相关研究。Zhang等^[12]针对多种直径的FRP筋设计了四点加载弯折试验,研究了FRP筋外层纤维应变与荷载的关系,结果表明弯曲状态下的抗拉强度有所折减。美国规范ACI 440-1R-06也指出^[13],FRP在弯曲状态下的承载能力受弯曲半径、FRP筋直径以及FRP种类等因素的影响。在CFRP筋弯拉性能方面,EI-Sayed等^[14]的研究表明,CFRP筋在弯曲状态下的抗拉强度较轴向张拉下有较大折减,Phan-Vu等^[15]也得到了相同的结论。侯苏伟等^[16]、诸葛萍等^[17]采用理论与试验方法研究了CFRP筋在悬索桥鞍座及索夹处的强度折减问题。Jia等^[18]采用有限元方法对CFRP筋与鞍座接触进行了有限元模拟,研究了CFRP主缆在弯曲状态下的抗拉性能及摩擦系数对CFRP筋弯拉性能的影响。诸葛萍等^[19]利用模型试验的方式研究了不同弯折角度下CFRP筋的拉伸强度,折角为 3° 时CFRP筋抗拉强度降低了18.9%,弯折状态下产生的剪力是导致CFRP筋承载力降低的主要因素。

综上所述,CFRP锚固体系的轴向张拉承载力可以通过优化锚具构造来满足使用要求,但锚固体系在弯曲状态下承载力存在折减,目前缺少针对多种CFRP筋直径、弯曲半径改变下锚固体系承载力折减规律以及破坏形式的系统研究。由于CFRP筋的横向受力较差,因此明确CFRP锚固体系在弯曲状态下的弯拉性能对推动CFRP筋应用于缆索承重体系具有重要意义。为此,首先对设计的黏结型锚固体系试件进行轴向张拉试验,研究锚具长度、黏胶厚度以及CFRP筋直径改变对试件锚固性能的影响规律,明确保证试件锚固性能的参数范围;然后,设计锚固体系弯拉试验台座,选取优化的锚固体系试

件进行弯拉模型试验,建立不同CFRP筋直径试件随弯曲半径变化的弯拉承载力折减量系数公式,得到破坏模式随CFRP筋直径和试件弯曲半径变化的规律,并提出保证试件锚固效率的弯曲半径与CFRP筋直径的比值关系;最后,分析锚固体系试件的CFRP筋荷载-应变曲线变化规律。

1 试验概况

研究CFRP黏结型锚固体系在弯曲状态下的抗拉强度折减规律,首先需要设计锚固效率较高的锚固体系试件,明确轴向和弯曲状态张拉下分别对应的极限承载力。因此,CFRP锚固体系静载试验分为2个部分,首先进行静载轴向张拉试验以明确锚固体系锚固性能,然后选取锚固效率较高的试件进行弯曲状态下的拉伸试验。

1.1 黏结型锚固体系设计

设计了一种直筒式黏结型锚固体系,锚固体系两端均为钢套筒内灌注环氧树脂的黏结型锚具,锚具由套筒、限位螺母及端堵组成。端堵上有相应的定位孔使CFRP筋对中穿过并固定其位置,套筒侧壁设有灌胶孔,如图1所示。锚固体系筋材选用带肋CFRP筋,黏结材料选用喜利得RE500植筋胶,钢套筒采用45号钢,CFRP筋材料参数如表1所示。



图1 黏结型锚具截面示意图

Fig.1 Schematic diagram of bonded anchorage section

表1 CFRP筋材料性能

Tab.1 Material properties of CFRP tendon

材料	表面形状	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
CFRP筋	带肋螺纹	2 300	150

1.2 黏结型锚固体系制作

锚固体系的制作是先确定锚具与CFRP筋对应的锚固位置,并进行标记。CFRP筋定位后,用端堵封口,从套筒侧壁灌注环氧树脂,灌注过程中不断振荡锚具保证黏结介质密实性,发生满溢时停止灌注。CFRP筋从一端穿入,到标记处停止。CFRP筋安装到固定位置后进行黏结介质固化养护,制作完毕的锚固体系试件如图2所示。锚固体系试件制作完成后分别在CFRP筋自由段位置1/3、1/2、2/3处粘贴

应变片并对试件进行编号。



图2 锚固体系组装试件

Fig.2 Anchorage system assembly specimens

1.3 加载和测量

轴向拉伸试验和弯拉试验采用千斤顶进行张拉。在静载张拉试验开始后,先对试件施加5%的极限承载力以消除张拉装置与锚固体系之间的缝隙,使锚固体系达到预定位置,接着开始张拉。加载方案按照标准《预应力纤维增强复合材料用锚具和夹具》(T/CECS 10112—2020)进行,加载速率为 $100 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1[20]}$ 。加载方式为逐级加载,第1级荷载按20%的极限荷载加载,此后按10%的极限荷载逐级增加直至极限荷载。若在达到极限荷载时试件仍未破坏,则继续按10%的极限荷载逐级增加,直至破坏。每一级加载持荷30 s,数据稳定后记录。

表2 轴向张拉试件设计参数

Tab.2 Design parameters of axially tensioned specimens

试件编号	CFRP筋直径/mm	锚具长度/mm	黏胶厚度/mm	试件编号	CFRP筋直径/mm	锚具长度/mm	黏胶厚度/mm
ZL1	5	800	12.5	ZL6	5	600	12.5
ZL2	8	800	20.0	ZL7	5	700	12.5
ZL3	10	800	25.0	ZL8	5	800	7.5
ZL4	14	800	35.0	ZL9	5	800	10.0
ZL5	5	500	12.5	ZL10	5	800	15.0

2.3 锚固体系优化

2.3.1 锚具长度对极限承载力的影响

图4为直径5 mm的CFRP筋锚固体系试件在锚具长度为500、600、700、800 mm时试件极限承载力与CFRP筋名义极限承载力的对比,其中名义极限承载力由出厂测定的CFRP抗拉强度值计算得到。可以看出,当锚具长度为500 mm时,试件的极限承载力为名义极限承载力的93.33%;当锚具长度从600 mm增大至800 mm时,试件的极限承载力均达到了名义极限承载力的96%以上,这表明锚具长度的增大有助于CFRP筋的锚固。在实际工程中,为兼顾锚固空间和经济效益,结合本文试验结果,锚具总长度取 $100D \sim 120D$ (D 为CFRP筋直径)较为

2 锚固体系轴向张拉试验

2.1 试验方案

首先进行轴向张拉试验,张拉装置如图3所示,千斤顶最大量程为800 kN,最大张拉行程为200 mm。试件一端锚具通过限位装置固定在刚支撑架上,另一端锚具固定在与千斤顶相连的可移动支撑架上。试件的位移测量采用型号为NS-WY06的拉线磁吸式位移计,应变测量采用型号为DH3820的静态应变测试采集仪。

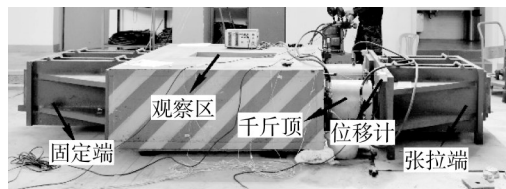


图3 锚固体系张拉装置

Fig.3 Anchorage system tensioning device

2.2 试件设计参数

锚具长度、CFRP筋直径、黏胶厚度为影响锚固体系锚固性能的关键参数,为此设计了10组试件测试锚固体系参数改变对锚固性能的影响。为了避免试验误差,每组试件包含2个相同试件,设计参数如表2所示。

合理。

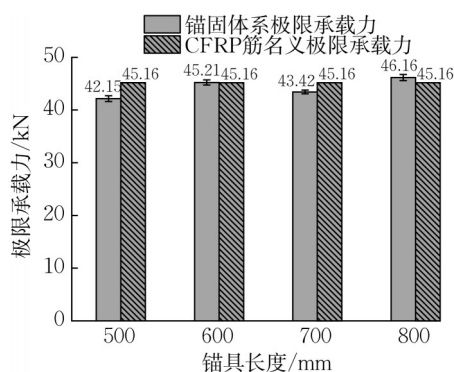


图4 不同锚具长度下极限承载力对比

Fig.4 Comparison of ultimate force between different anchorage lengths

2.3.2 黏胶厚度对极限承载力的影响

图5为直径5 mm的CFRP筋锚固体系试件在黏胶厚度为1.5D、2.0D、2.5D、3.0D时试件极限承载力与CFRP筋名义极限承载力的对比。可以看出,黏胶厚度为1.5D和2.0D时,试件的极限承载力仅为名义极限承载力的72.67%和68.40%,而当黏胶厚度增加到2.5D和3.0D时,试件的极限承载力达到了名义极限承载力的102.21%和87.80%,这表明增大黏胶厚度有利于提高锚固体系的极限承载力。当黏胶厚度从2.5D增加至3.0D时,锚固体系的极限承载力反而下降,这也表明黏胶厚度不宜过大。结合本文试验结果,黏胶厚度选用2.5D较为合理。

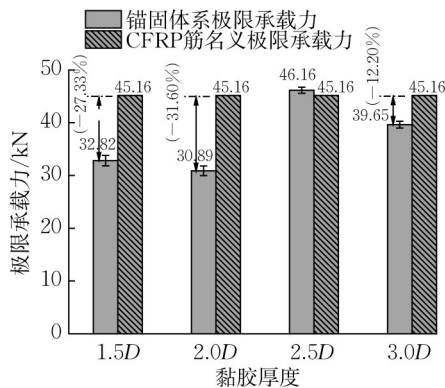


图5 不同黏胶厚度下极限承载力对比

Fig.5 Comparison of ultimate force between different adhesive thicknesses

2.3.3 CFRP筋直径对极限承载力的影响

图6为CFRP筋直径5、8、10、14 mm的锚固体系试件在保证各试件锚具长度和黏胶比例相同条件下试件极限承载力与CFRP筋名义极限承载力的对比。可以看出,CFRP筋直径为5 mm和8 mm时,试件的极限承载力达到了名义极限承载力的102.21%和97.41%,而当CFRP筋直径增加到10 mm和14 mm时,试件的极限承载力仅为名义极限承载力的85.63%和64.12%。随着CFRP筋直径的增加,锚固体系的极限承载力下降幅度增大,这表明CFRP筋直径对锚固性能的影响较大。结合本文试验结果,选用5~8 mm直径的CFRP筋能够保证锚固体系的可靠锚固。

由上述锚固体系参数分析可知,以锚具长度为参数,锚具长度取600~800 mm时,锚固体系的极限承载力都达到了CFRP筋名义极限承载力的96%以上;以黏胶厚度为参数,黏结介质取2.5D时,锚固体系的极限承载力达到了CFRP筋名义极限承载力的102.21%。规范《预应力筋用锚具、夹具和连接器》

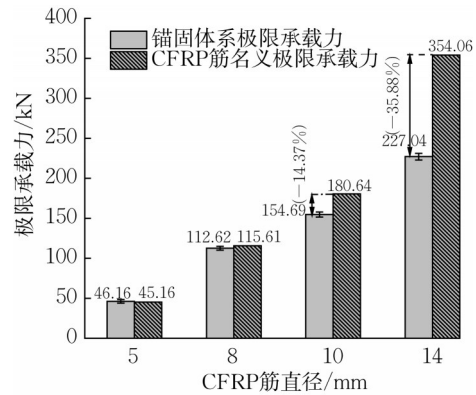


图6 不同CFRP筋直径下极限承载力对比

Fig.6 Comparison of ultimate force between different CFRP tendon diameters

(GB/T14370—2015)规定,“纤维增强复合材料筋用锚具锚固效率系数不小于90%”。因此,考虑锚固体系的锚固效果,选取锚具长度为800 mm、黏胶厚度为2.5D作为弯拉试验锚固体系的锚具参数。

此外,弯拉试验的目的在于研究锚固体系在弯曲状态下的抗拉性能,为了更直观地表现锚固体系的锚固效果,引入弯拉锚固效率系数 η 来评估弯拉状态下锚固体系试件的弯拉性能。 η 的计算式为

$$\eta = \frac{F_{av}}{F_{cu}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: F_{av} 为CFRP锚固体系试验平均极限承载力; F_{cu} 为CFRP筋名义极限承载力。

3 锚固体系弯拉试验

3.1 试验方案

设计了弯拉台座以模拟CFRP黏结型锚固体系在弯曲状态下的受力性能。弯拉台座包括两部分,分别为外保护混凝土框架和弧形台座,如图7所示。为了模拟大跨度悬索桥塔顶鞍座的弯曲半径,在台座的两侧各开了3道槽孔,制造了3个弧形台座,台座的弯曲半径分别为3、8、12 m。此外,弯拉试验与轴向张拉试验不同,存在弯曲角度,需要在弧形平面上布置筋材,从两端伸出的筋材角度不在同一条水平线上。因此,每个不同的弯曲半径台座需要相应倾角的楔块来保证千斤顶的拉伸方向与CFRP筋伸出台座的角度完全重合。楔子上需要相应的开孔,使得包裹住CFRP筋的直筒锚具可以顺利穿过保护框架和楔子。同时,为了保证加载时CFRP筋不受局部应力集中影响,3个台座的边角处均需进行倒角处理,保证边缘光滑。弯拉试验采用穿心式千斤顶进行张拉,千斤顶选

用量程 600 kN、张拉行程 150 mm。

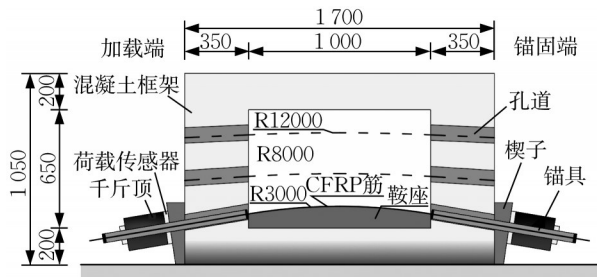


图 7 弯拉台座拼装示意图(单位:mm)

Fig.7 Saddle assembly diagram (unit:mm)

3.2 试件设计参数

考虑锚固体系的锚固效率,依据前述优化的锚具试件,选取 4 种 CFRP 筋直径、3 种弯曲半径的 CFRP 黏结型锚固体系试件进行弯拉试验。此外,CFRP 筋是一种脆性材料,在发生破坏时 CFRP 筋丝股会呈现出炸裂状,因此探讨了横向约束对锚固体系弯拉性能的影响。在弯曲半径为 3、12 m 时对直径分别为 8、10 mm 的 CFRP 筋试件进行横向约束的弯拉试验,CFRP 筋横向约束如图 8 所示。试件编号为 RXDY,RX 表示张拉台座的弯曲半径,DY 表示 CFRP 筋直径。此外,编号为 HRXDY 的试件表示

横向约束的试件。



图 8 CFRP 筋横向约束

Fig.8 Transverse constraint of CFRP tendon

4 试验结果与分析

4.1 锚固体系弯拉极限承载力与承载力折减量系数分析

通过锚固体系弯拉试验采集各组试件的弯拉极限承载力,为了避免试验误差每组制作 3 个相同试件,进行相同工况下张拉,最终加载得到的极限荷载数据如表 3 所示。除了试件 R3D5-2 的极限承载力相比同参数下另 2 个试件偏差大于 20%,其余编号试件的极限承载力偏差范围均在 10% 以内。CFRP 筋直径 5 mm 试件偏差大的原因可能是由于弯曲角度过大,试件的极限承载力具有离散性,因此取偏差范围在 10% 以内的试件进行弯拉性能分析。

表 3 各试件极限承载力

Tab.3 Ultimate force of each specimen

试件编号	CFRP 筋直径/mm	弯曲半径/m	F_{av}/kN	试件编号	CFRP 筋直径/mm	弯曲半径/m	F_{av}/kN
R3D5	5	3	29.77	R12D5	5	12	36.13
R3D8	8	3	69.76	R12D8	8	12	82.72
R3D10	10	3	104.79	R12D10	10	12	118.76
R3D14	14	3	184.03	R12D14	14	12	192.03
R8D5	5	8	33.12	HR3D8	8	3	72.31
R8D8	8	8	75.74	HR3D10	10	3	107.21
R8D10	10	8	111.78	HR12D8	8	12	86.46
R8D14	14	8	187.03	HR12D10	10	12	128.69

为了分析弯曲状态下 CFRP 筋试件的弯拉性能,引入弯拉承载力折减量系数 ζ 评估 CFRP 筋试件在弯曲状态下的弯拉性能, $\zeta=1-F_{av}/F_{cu}$ 。根据试验结果,对不同直径的 CFRP 筋试件进行弯曲半径 R 与弯拉承载力折减量系数 ζ 的拟合,拟合结果如图 9 所示。可以看出,不同直径 CFRP 筋试件的弯拉承载力折减量系数与弯曲半径为线性相关,相关系数接近 99%。此外,弯拉承载力折减量系数不仅与 CFRP 筋试件弯曲半径相关,也与 CFRP 筋直径相关。相同直径 CFRP 筋试件随着弯曲半径的增加,其弯拉承载力折减量系数逐渐减小;相同弯曲半径下,直径越小的 CFRP 筋试件弯拉承载力折减量系数越小,这表明小直径的 CFRP 筋试件在弯曲状态

下更能发挥拉伸强度。

4.2 横向约束对锚固体系弯拉极限承载力的影响

图 10 为有无横向约束下锚固体系试件的弯拉极限承载力对比。在弯曲半径为 3 m 的工况下,8、10 mm 直径的 CFRP 筋试件极限承载力分别提高了 3.53%、2.26%;当弯曲半径增加为 12 m 时,试件极限承载力分别提高了 4.33%、7.72%,这表明横向约束可以提高试件的极限承载力。结合试件破坏形式可以看出,横向约束的设置限制了 CFRP 筋纵向裂纹的开展,使 CFRP 筋丝股的拉伸强度得到了更好的利用。

4.3 锚固体系破坏形式分析

图 11 为典型 CFRP 筋锚固体系试件的破坏形

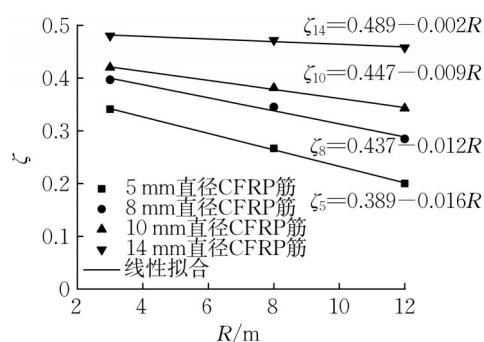


图9 弯拉承载力折减量系数与弯曲半径的关系

Fig.9 Relationship between reduction coefficient under combined tension and bending and bending radius

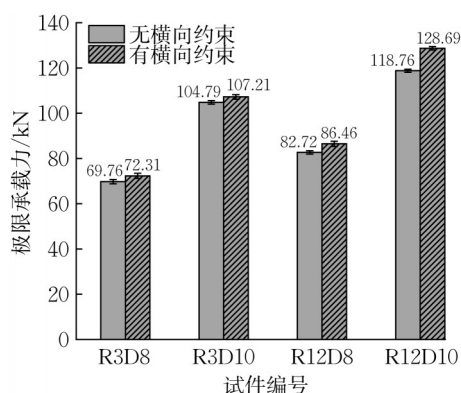


图10 横向约束对极限承载力的影响

Fig.10 Effect of transverse constraint on ultimate force

式。在轴向静载拉伸试验中,CFRP筋直径5、8 mm的试件,破坏形式为CFRP筋丝股炸裂,表明CFRP筋的拉伸强度得到了充分发挥;CFRP筋直径10 mm试件的破坏形式表现为锚具端口纤维丝剥离;CFRP筋直径14 mm试件的破坏形式表现为黏胶和套筒之间的滑移,滑移的原因是黏结介质与锚具内

壁摩擦力不足,这也表明该参数下CFRP筋的拉伸强度没有得到充分利用。在锚固体系的弯拉试验中,弯曲半径为3 m的工况下,CFRP筋直径为5、8 mm的试件破坏形式表现为锚具张拉端CFRP筋的不均匀断裂,原因是在弯拉状态下CFRP筋表面应力分布不均,其外侧纤维受到的拉伸应力大于内侧纤维,导致纤维出现不均匀断裂;试件HR3D8的破坏形式表现为筋材的不均匀劈裂,这表明横向约束限制了CFRP筋的断裂;CFRP筋直径10 mm试件的破坏形式表现为锚具端部CFRP筋剪切破坏,这是由于CFRP筋的抗剪能力较低,在弯曲半径较小的工况下剪力导致了试件的最终破坏;CFRP筋直径14 mm试件表现为锚具端部CFRP筋的不均匀劈裂,裂缝长度为4~10 cm。此外,在弯曲半径为12 m的试件中,CFRP筋直径14 mm试件发生了CFRP筋与黏结介质之间的滑移破坏。一方面,CFRP筋直径较大,穿筋时流出的黏胶量较多,导致黏结力降低;另一方面,在弯曲半径较大的工况下,CFRP筋的拉伸状态十分接近水平拉伸状态,试件的锚固性能成为了试验中破坏的控制因素。可以看出,锚固体系弯拉破坏形式与轴向张拉破坏形式有很大不同。与轴向张拉状态相比,弯拉状态CFRP筋在锚具端部摩擦力分布不均匀,同时CFRP筋受到黏结介质的径向挤压,而当CFRP筋伸出锚具后,径向挤压约束突然消失,原本在锚具内承受的径向挤压突然释放,导致CFRP筋在锚具端部附近受到较大的剪力作用,最终CFRP筋在锚具端部附近呈现不同的失效形式。

4.4 锚固体系锚固效率分析

为了进一步研究CFRP筋直径与弯曲半径的改变对锚固体系弯拉性能的影响,根据式(1)得到各组

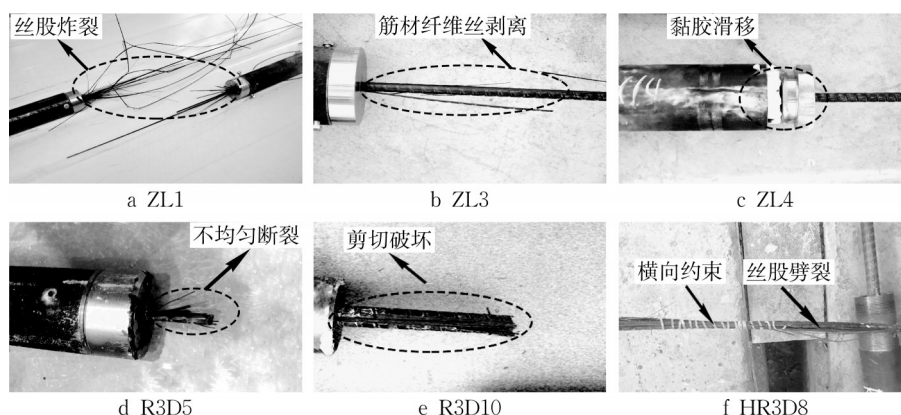


图11 典型试件破坏模式

Fig. 11 Failure modes of typical specimens

试件的弯拉锚固效率系数。图12展示了各组试件在不同弯拉状态下的锚固效率系数变化。随着CFRP筋直径的增加,相同弯曲半径试件的锚固效率系数不断降低。相反,随着弯曲半径的增加,相同CFRP筋直径试件的锚固效率系数不断增加。这表明CFRP筋直径的增加会降低试件的锚固效率,而弯曲半径的增加能提高试件的锚固效率。此外,随着试件弯曲半径的增加,不同CFRP筋直径试件的锚固效率系数增加幅度不同。当弯曲半径从3 m增加到12 m时,直径8 mm的CFRP筋试件锚固效率系数从60.34%增至71.55%,增幅为11.21%,直径10 mm的CFRP筋试件锚固效率系数增幅为7.73%,直径14 mm的CFRP筋试件锚固效率系数增幅却仅有2.26%。这是因为随着CFRP筋直径的增加,CFRP筋表面和台座摩擦接触面增加,导致试件的承载能力降低,同时由于大直径CFRP筋锚固效果差,因此进一步降低了试件的承载能力,表明增加弯曲半径更有利于提高直径较小CFRP筋试件的锚固效率。另一方面,随着CFRP筋直径的增加,不同弯曲半径试件锚固效率系数之间的差距逐渐增大。当弯曲半径为3 m、试件的CFRP筋直径从5 mm增加到14 mm时,锚固效率系数降低了13.94%;当弯曲半径为8 m时,锚固效率系数降低了20.52%;当弯曲半径为12 m时,锚固效率系数降低了25.76%。这表明CFRP筋直径和弯曲半径的改变对锚固体系的锚固效率影响较大。因此,实际工程中在弯曲半径较大的状态下搭配小直径的CFRP筋,更能保证较高的锚固效率系数,充分发挥CFRP筋的优势。

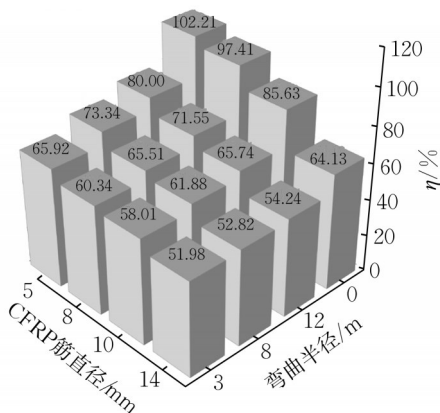


图12 锚固体系试件锚固效率系数对比

Fig.12 Comparison of anchorage efficiency coefficient between anchorage system specimens

为了更直观地评价CFRP筋直径与弯曲半径对试件锚固效率的影响,提出了弯曲半径与CFRP筋直径之比 γ 来衡量试件在弯拉状态下的锚固效率,即 $\gamma=R/D$ 。图13为5、8、10 mm直径CFRP筋试件的锚固效率系数与 γ 之间的关系。试件的锚固效率系数随着 γ 增加而增加。锚固效率系数和 γ 拟合结果为线性关系,并且相关系数达到了98%。结合试件的破坏模式,观察到 γ 在2.4‰以下,试件的锚固效率系数小于80%,试件的破坏多发生在锚具端部,呈不均匀断裂和剪切的破坏形式。因此,工程实践中建议弯曲半径与CFRP筋直径的比值 γ 应大于2.4‰。

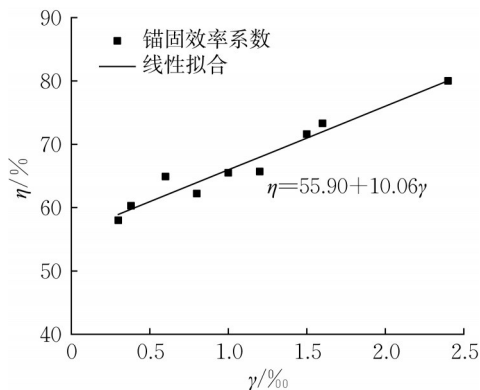


图13 弯曲半径和CFRP筋直径之比与试件锚固效率系数之间的关系

Fig.13 Relationship between the ratio of bending radius and CFRP tendon diameter and the anchorage efficiency coefficient of the specimen

4.5 锚固体系CFRP筋荷载-应变分析

图14给出了典型锚固体系试件的CFRP筋荷载-应变曲线。加载前期荷载-应变曲线近似于线性变化,这与CFRP筋为弹性材料的特征相符。由图14a可见,在加载后期试件的荷载-应变曲线末端出现了明显的非线性变化,结合试件的破坏形式可知,随着荷载的增加CFRP筋表面出现了裂缝,导致应变片的方向偏离了CFRP筋的纵向方向,这表明CFRP筋应变曲线的非线性变化是其失效前的特征。此外,锚固体系试件的极限承载力未达到CFRP筋的名义极限承载力,这是因为试件存在弯曲角度,弯拉过程中CFRP筋外缘纤维丝应力大于内缘纤维丝应力,应力不均使CFRP筋提前破坏。同时还可以观察到,试件CFRP筋中点位置MS2的应变数值在试件破坏前始终大于测点LS1和RS3的应变数值,这也表明弯曲状态下CFRP筋表面存在

应力分布不均现象。由图14b可见,试件的荷载在上升过程中突然出现下降,这表明该试件的CFRP筋与荷载传递介质发生了滑移。

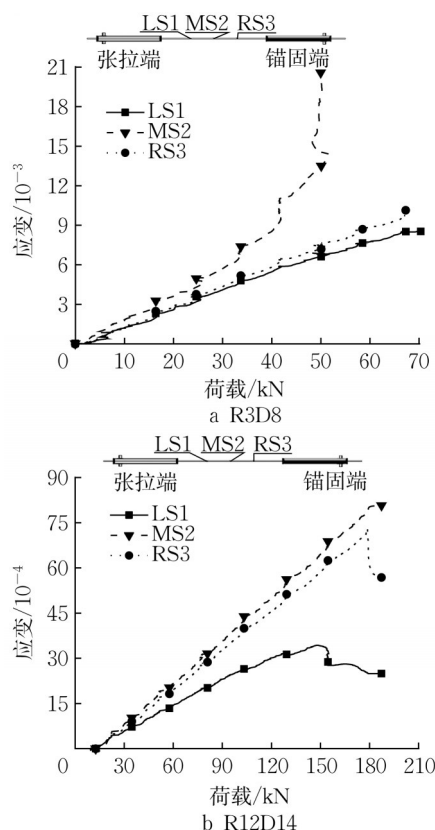


图14 典型试件CFRP筋荷载-应变曲线

Fig.14 Load-strain curve of CFRP tendons of typical specimens

5 结论

(1)对于本文设计的CFRP黏结型锚固体系试件,当锚具长度取 $100D\sim 120D$ 、黏胶厚度取 $2.5D$ 、CFRP筋直径取 $5\sim 8\text{ mm}$ 时,在轴向张拉下的极限承载力达到了CFRP筋名义极限承载力的96%以上,具有较好的锚固性能。

(2)不同直径CFRP筋锚固体系试件的弯拉承载力折减量系数与弯曲半径为线性相关,锚固体系CFRP筋弯曲半径越大试件弯拉承载力折减量系数越小。相同弯曲半径下CFRP筋直径越大试件弯拉承载力折减量系数越大,当弯曲半径为3 m时,CFRP筋的直径从5 mm增加到14 mm,弯拉承载力折减量系数增加了40.91%。此外,CFRP筋横向约束有利于试件极限承载力的提高。

(3)锚固体系弯曲半径增加时,小直径CFRP筋试件的锚固效率系数增幅更大。当弯曲半径从3 m

增加到12 m时,直径8 mm的CFRP筋试件锚固效率系数增幅为11.21%,直径10 mm的CFRP筋试件锚固效率系数增幅为7.73%,而直径14 mm的CFRP筋试件锚固效率系数增幅仅有2.26%。实际工程中锚固体系在弯曲状态下使用小直径CFRP筋能获得较高的锚固效率系数,可经济且充分地发挥材料的优势。

(4)锚固体系试件在达到极限承载力前CFRP筋荷载-应变曲线近似线性变化,在加载后期CFRP筋荷载-应变曲线末端出现了明显的非线性变化,非线性变化是试件失效前的典型特征。此外,弯曲半径与CFRP筋直径的比值与锚固效率系数为线性关系,弯曲半径与CFRP筋直径的比值在2.4%以下,试件的弯拉锚固效率系数小于80%,试件的破坏多发生在锚具端部,呈不均匀断裂和剪切的破坏形式。

作者贡献声明:

贾丽君:课题负责人,研究方案制订,试验设计,论文审定。

张文超:试验设计,数据分析,论文初稿撰写与修改。

徐利平:研究方案制定,试验设计,论文框架设计。

参考文献:

- [1] XIONG W, CAI C S, ZHANG Y, *et al.* Study of super long span cable-stayed bridges with CFRP components [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(2): 330.
- [2] LIU Y, ZWINGMANN B, SCHLAICH M. Carbon fiber reinforced polymer for cable structures: a review [J]. *Polymers*, 2015, 7(10): 2078.
- [3] AL-MAYAH A, SOUDKI K, PLUMTREE A. Mechanical behavior of CFRP rod anchors under tensile loading [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2001, 5(2): 128.
- [4] SUN Y M, MEI K H, SUN S J, *et al.* Optimal design of a novel composite anchorage for carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) tendons [J]. *Polymers*, 2022, 14(10): 2048.
- [5] FANG Z, ZHANG K, TU B. Experimental investigation of a bond-type anchorage system for multiple FRP tendons [J]. *Engineering Structures*, 2013, 57: 364.
- [6] CAI D S, YIN J, LIU R G. Experimental and analytical investigation into the stress performance of composite anchors for CFRP tendons [J]. *Composites, Part B: Engineering*, 2015, 79: 530.
- [7] ZHUGE P, YU Y, CAI C S, *et al.* Mechanical behavior and optimal design method for innovative CFRP cable anchor [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(1): 04018067.
- [8] MEI K H, SUN S J, LI B, *et al.* Experimental investigation on the mechanical properties of a bond-type anchor for carbon

- fiber reinforced polymer tendons [J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 193.
- [9] 贾丽君, 张川, 丛霄. CFRP索股单孔直筒+内锥粘结型锚具的受力性能分析 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(9): 98.
- JIA Lijun, ZHANG Chuan, CONG Xiao. Mechanical performance analysis of one tube composite bonding-type anchorage of CFRP tendons [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2019, 47(9): 98.
- [10] FENG B, WANG X, WU Z S. Evaluation and prediction of carbon fiber-reinforced polymer cable anchorage for large capacity [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(8): 1952.
- [11] ZHANG W C, JIA L J, LUO K D, et al. A novel anchor method for large tonnage CFRP cable: anchorage design and full-scale experiment [J]. *Composite Structures*, 2024, 336: 118004.
- [12] ZHANG B, MASMOUDI R, BENMOKRANE B. New method for testing fiber-reinforced polymer rods under flexure [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2007, 35(2): 171.
- [13] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars: ACI 440-1R-06 [S]. Detroit: American Concrete Institute, 2006.
- [14] EL-SAYED A K, EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B. Mechanical and structural characterization of new carbon FRP stirrups for concrete members [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(4): 352.
- [15] PHAN-VU P, TRAN D T, PHAM T M, et al. Distinguished bond behaviour of CFRP sheets in unbonded post-tensioned reinforced concrete beams versus single-lap shear tests [J]. *Engineering Structures*, 2021, 234: 111794.
- [16] 侯苏伟, 叶华文, 强士中, 等. CFRP主缆在鞍座及索夹处的抗弯折性能研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(5): 128.
- HOU Suwei, YE Huawen, QIANG Shizhong, et al. Study on bending resistance of CFRP main cable at saddle and cable clamp [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(5): 128.
- [17] 诸葛萍, 强士中, 侯苏伟, 等. 悬索桥鞍座处CFRP主缆抗弯性能研究 [J]. *中国公路学报*, 2011, 24(4): 57.
- ZHUGE Ping, QIANG Shizhong, HOU Suwei, et al. Research on bending performance of CFRP main cable in saddle of suspension bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(4): 57.
- [18] JIA L J, ZHANG W C, XU J W, et al. Experimental investigation of the tensile properties with bending of CFRP tendons in suspension bridges [J]. *Buildings*, 2023, 13(4): 988.
- [19] 诸葛萍, 章子华, 丁勇, 等. 土木工程用CFRP筋弯折抗拉性能 [J]. *复合材料学报*, 2014, 31(5): 1300.
- ZHUGE Ping, ZHANG Zihua, DING Yong, et al. Flexural tensile properties of CFRP bars for civil engineering [J]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 31(5): 1300.
- [20] 中国工程建设标准化协会. 预应力纤维增强复合材料用锚具和夹具: T/CECS 10112—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Anchorage and grip for prestressing fiber-reinforced polymer: T/CECS 10112—2020 [S]. Beijing: China Standard Press, 2020.