

激光与光电子学进展

水环境下碳纤维拉索锚固结构的疲劳性能研究

朱万旭^{1,2*}, 魏蔚^{1,2}, 杨龙³, 李梦果^{1,2}¹桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;²广西智慧结构材料工程研究中心, 广西 桂林 541004;³广西柳州钢铁集团, 广西 柳州 545000

摘要 碳纤维增强复合材料(CFRP)拉索强度高、重量轻且耐久性好,但长期处于潮湿服役环境下其锚固结构的可靠性存疑。为此对 CFRP 拉索进行了应力幅为 200 MPa、应力上限为 0.65 极限强度的 200 万次疲劳循环试验,并令较低端的锚具放置于水环境中,在拉索两端内嵌光纤光栅测量轴向应变变化。结果表明:在循环荷载作用下,CFRP 筋与锚固填料间产生微裂缝,锚具内部发生了应力重分布;水浸作用加快了锚具内的应力重分布,其规律分为两个阶段:第一阶段速率较大,主要集中在前 50 万次循环;第二阶段为 50 万次至 200 万次的循环,应力重分布逐渐平稳。研究的 CFRP 拉索安全通过了疲劳试验,但剩余强度降低了 17%,说明水环境对 CFRP 拉索锚固结构耐久性造成的影响不可忽视。

关键词 光纤光学与光通信;碳纤维拉索锚固结构;水环境;疲劳性能;应力重分布

中图分类号 U448

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2306001

Research on Fatigue Performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer Cable Anchor Structure in Water Environment

Zhu Wanxu^{1,2*}, Wei Wei^{1,2}, Yang Long³, Li Mengguo^{1,2}¹College of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;²Guangxi Intelligent Structural Materials Engineering Research Center, Guilin 541004, Guangxi, China;³Guangxi Liuzhou Iron and Steel Group, Liuzhou 545000, Guangxi, China

Abstract A carbon fiber reinforced polymer (CFRP) cable has the advantages of high strength, lightweight, and good durability. However, the durability of its anchoring structure in a long-term wet service environment is doubtful. In this study, a CFRP cable was subjected to a 2 million fatigue cycle test with 200-MPa stress amplitude and a stress upper limit of 0.65, the low-end anchor was placed in a water environment, and fiber gratings were attached at both ends of the CFRP tendons to measure changes in the axial strain. The test results show that under cyclic loading, microcracks are generated between the CFRP tendons and the anchoring filler, and the stress redistributes inside the anchor; water accelerates the internal stress of the anchor. The redistribution of stress aggravates the bond fatigue failure. The rule is divided into two stages: the first stage has a higher rate, which is mainly concentrated in the first 500 thousand cycles, and the second stage is from 500 thousand to 2 million cycles. The stress redistribution gradually stabilized. The CFRP cable under study safely passed the fatigue test, but the remaining strength was reduced by 17%, thereby indicating that the impact of the water environment on the durability of the CFRP cable anchoring structure cannot be ignored.

Key words optical fiber optics and optical communication; carbon fiber reinforced polymer cable anchor structure; water environment; fatigue performance; stress redistribution

1 引言

跨度桥梁拉索长期处于潮湿和海洋性气候的服

役环境^[1],雨水、大气水分渗透进入索体引起锈蚀,导致拉索实际使用寿命大大降低^[2]。碳纤维增强复合材料(CFRP)筋具有极佳的耐腐蚀性能^[3],可长期应

收稿日期: 2021-08-27; 修回日期: 2021-10-26; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(52068014)、广西创新驱动发展专项(桂科 AA20302006)、广西重大科技创新基地建设项目(2018-242-G02)

通信作者: *zhuwanxu@vip.163.com

用于海洋等恶劣环境,成为传统钢拉索的良好替代品^[4],但如何对 CFRP 筋进行可靠锚固一直是研究的难题,因为其横向抗剪性能与纵向抗拉性能相差较大。粘结型锚固体系因锚固损伤小、便于同时对多根 CFRP 筋进行整体锚固的优势,已逐渐成为 CFRP 拉索的首选锚固体系,但其完全依靠粘结力锚固 CFRP 拉索,在服役期间,筋材与粘结介质间界面粘结性能的劣化程度,将在很大程度上影响 CFRP 拉索的耐久性能。索锚结构在实际工程中面对的是环境水与往复荷载共同作用的服役环境,但已有研究大多局限于对 CFRP 拉索进行腐蚀^[5-6]或疲劳荷载^[7]等单一条件下的耐久性实验,并不能获得真实的 CFRP 拉索长期服役性能。目前,CFRP 索锚结构长期处于潮湿服役环境下的可靠性和内部性能退化规律已成为亟待研究的问题。

要研究 CFRP 拉索锚固结构的内部性能退化规律,如何监测锚具内部受力是一个难点,现有的方法分为直接法与间接法:直接法^[8]如开槽贴片法,在 CFRP 筋表面开一条槽,在槽内粘贴应变片的方法来监测筋材的应变,但会对筋的性能造成一定影响;间接法是在锚具外周贴应变片^[9-10],监测原理是假设锚具和筋材变形协调,筋材应变和锚具应变一致,但是实际应用时存在较大偏差,而且容易损坏。本文采用新的监测手段:光纤 Bragg 光栅 (FBG) 传感器,其体积小,在筋上开槽面积小于 1 mm^2 ,较传统贴片法对 CFRP 筋的力学性能影响小,近年来被广泛运用到结构监测领域中^[10-11]。朱万旭、覃荷瑛等^[12-13]将 FBG 传感器埋入钢绞线中间丝中,提高有效应变量程到 $9000 \mu\epsilon$ 以上,解决了体内索应力难以监测的问题,并成功将该技术应用于碳纤维板中。所以通过 FBG 传感器监测 CFRP 索锚内部应力状态具有可行性。因此,本文基于新型多级锥体 CFRP 拉索锚固结构^[14],开展水环境下的疲劳试验,并在试验过程中利用光纤光栅监测技术对锚固体系内部状态进行监测和评估,研究 CFRP 拉索长期处于潮湿服役环境下的可靠性和性能退化规律。

2 试验方案

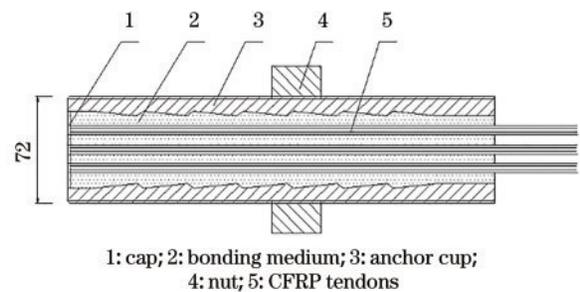
2.1 试件参数

本试验研究的筋材选用内嵌 5 根直径 2 mm 的 ϕ 8CFRP 筋,如图 1 所示,其延伸率为 1.5%,含纤维丝比率为 70%,弹性模量为 170 GPa,极限抗拉强度 f_{pk} 为 2400 MPa。锚具选用新型多级锥体锚具,其结构示意图如图 2 所示,内部锚固填料由环氧树脂、催化剂及不同粒径的铁砂组成。索体由 7 根 CFRP 筋组成,筋材在锚具内的排列方式及筋材编号如图 3 所示,索体公称抗拉力为 844 kN,试件的 CFRP 丝下料长度为 4.2 m,锚固完成后自由段长度为 3.6 m。



图 1 CFRP 筋材截面

Fig. 1 Section of CFRP tendons



1: cap; 2: bonding medium; 3: anchor cup;
4: nut; 5: CFRP tendons

图 2 锚具结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anchor structure

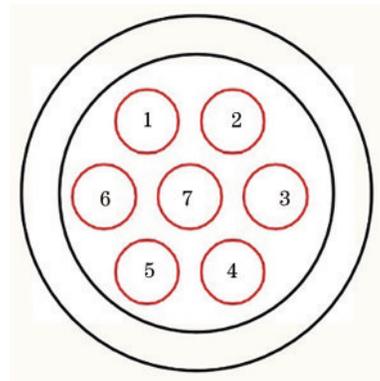


图 3 CFRP 筋材排列方式

Fig. 3 Arrangement of CFRP tendons

2.2 测点布置

为全面分析锚固体系的整体及细部力学行为,在两端锚具内筋材的相对位置布设 FBG 测点,当结构上的应力发生变化时会导致光栅的栅距 Δ 变化引起波长漂移,用广西汉西鸣科技股份有限公司生产的解调仪采集光纤光栅波长变化数据。

通过在锚具低端设置储液筒,往储液筒内加入蒸馏水,令试验过程中索锚结构一端只承受循环荷载作用,另一端承受循环荷载和水环境共同作用,光纤光栅测点位置及拉索试件如图 4 和图 5 所示。通过对比两端锚具内筋材光纤光栅测点数据,可以得出水环境下对索锚结构疲劳性能的影响规律。

为探究 7 根 CFRP 筋受力的均匀性,在 7 根筋材的

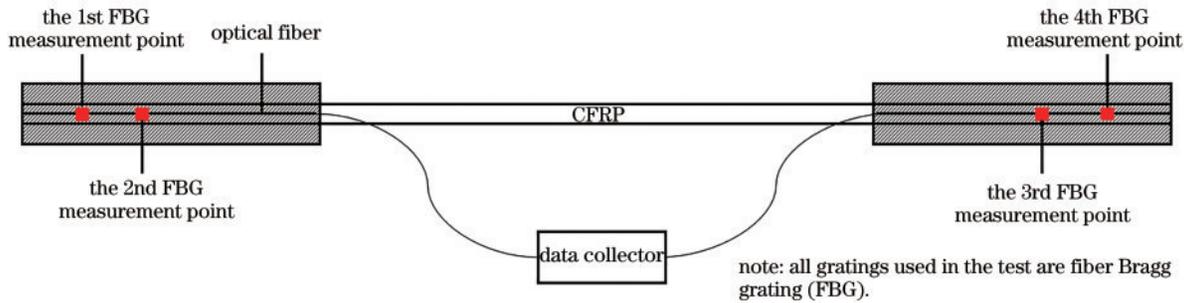


图 4 索体内筋材测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring point layout of reinforcement in cable



图 5 拉索试件

Fig. 5 Cable specimen

中间部分粘贴应变片,由于筋材为圆形,且进行疲劳试验时不能把筋材表面打磨平整以造成初始损伤,因此,选用基底尺寸较小的应变片,如图 6 所示。



图 6 索体中部应变片测点

Fig. 6 Strain gauges measuring point in middle of cable

2.3 试验索组装和测试

本次试验选用 1000 kN 电液式脉动疲劳试验机,如图 7 所示。

CFRP 在疲劳荷载作用下,当加载频率小于 4 Hz 或 5 Hz 时,温度的影响可以忽略不计^[15]。所以本次试验加载频率设置为 5 Hz,固定应力幅为 200 MPa,上限应力选用 $0.65f_{pk}$ 即 1560 MPa,疲劳试验循环到 200 万次时终止试验。

疲劳试验开始前,对试件进行预加载,检查疲劳试验机上的量测仪器是否工作正常。从 0 开始,每级增加 $10\%f_{pk}$,加载到疲劳试验最小应力,加载速度不超过 200 MPa/min,检查光纤光栅数据是否正常,记录应变片数据。

预加载后开始疲劳试验,以不大于 200 MPa/min 的速率加载到上限应力,待数值稳定后读取第一次读取光纤光栅波长数据,再到 10 万次、50 万次循环读取



图 7 疲劳试验装置

Fig. 7 Fatigue test device

一次数据,之后每隔 50 万次读取一次数据,试验循环 200 万次结束。为保证每次读数时测点处于相同的应力水平,读数时暂停疲劳试验,施加固定的荷载,再记录光纤光栅测点数据。

疲劳试验后检查试件无破坏,再进行剩余强度张拉试验。试件加载:从 0 开始按每级 $0.1f_{pk}$ 、200 MPa/min 的速度加载到 $0.8f_{pk}$;张拉至 $0.8f_{pk}$ 时,持荷 0.5 h,检测锚具持荷稳定性;再按 $0.85f_{pk}$ 、 $0.90f_{pk}$ 、 $0.95f_{pk}$ 、 $1.00f_{pk}$ 的顺序依次加载至试件破坏,试验结束。

3 试验结果与分析

3.1 试验现象

对由 7 根 CFRP 筋组成的平行索进行疲劳试验,试验过程中浸水端与未浸水端均未脱锚;筋材在试验前期无明显现象,随着疲劳试验循环次数的增加,筋材表面出现损伤,表现为部分筋材表面出现纵向裂缝,部分纤维原丝裂开掉出,如图 8(a)所示,其中 5、6 号筋材损伤较为严重;浸水端的锚固填料有少量铁砂屑,如图 8(b)所示。

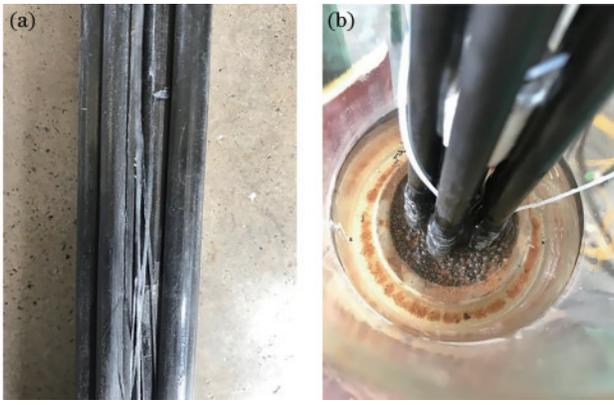


图 8 试验现象。(a)筋材开裂、脱层;(b)铁砂锈蚀

Fig. 8 Test phenomenon. (a) Cracking and delamination of reinforcement; (b) iron sand corrosion

3.2 数据分析

3.2.1 光纤光栅数据分析

筋材光纤光栅测点波长随循环次数变化曲线如图 9 所示,从图中可见光纤光栅传感器能对试验全过程的应力进行实时有效监测,对比两端相应测点波长变化量数据,未浸水端均小于浸水端。2号筋内部的 4

号测点由于粘贴工艺问题在疲劳试验中过早失效,故剔除数据。

波长变化规律分为两个阶段:第一阶段为前 50 万次循环,波长变化速率较大;第二阶段为 50 万次循环之后,波长变化速率较小,趋于平稳趋势。

第一阶段(0~50万次),光纤光栅测点波长变化速率较快。疲劳试验开始时,锚固区在荷载端出现粘结应力集中,荷载端 CFRP 筋在与锚固填料间产生微裂缝,当循环荷载次数增加,微裂缝沿纵向不断发展,导致 CFRP 筋与锚固填料的界面粘结性能劣化。粘结力峰值不断向自由端转移,锚具内部发生了应力重分布。同一测点处受到的粘结力降低,轴向正应力就会增大,波长数据相应升高。

浸水端测点波长增量大于相应的非浸水端测点,说明循环荷载开始时,两端都发生了疲劳损伤,但未浸水端只是在应力作用下发生损伤,测点应变增长较慢;而对于浸水锚固端,内部出现微裂缝后,环境水通过毛细管作用缓慢渗入微裂缝,对后续粘结疲劳失效起到一定加速作用,加剧了锚固区的应力重分布,导致浸水端测点波长变化量及变化速率均大于未浸水端。

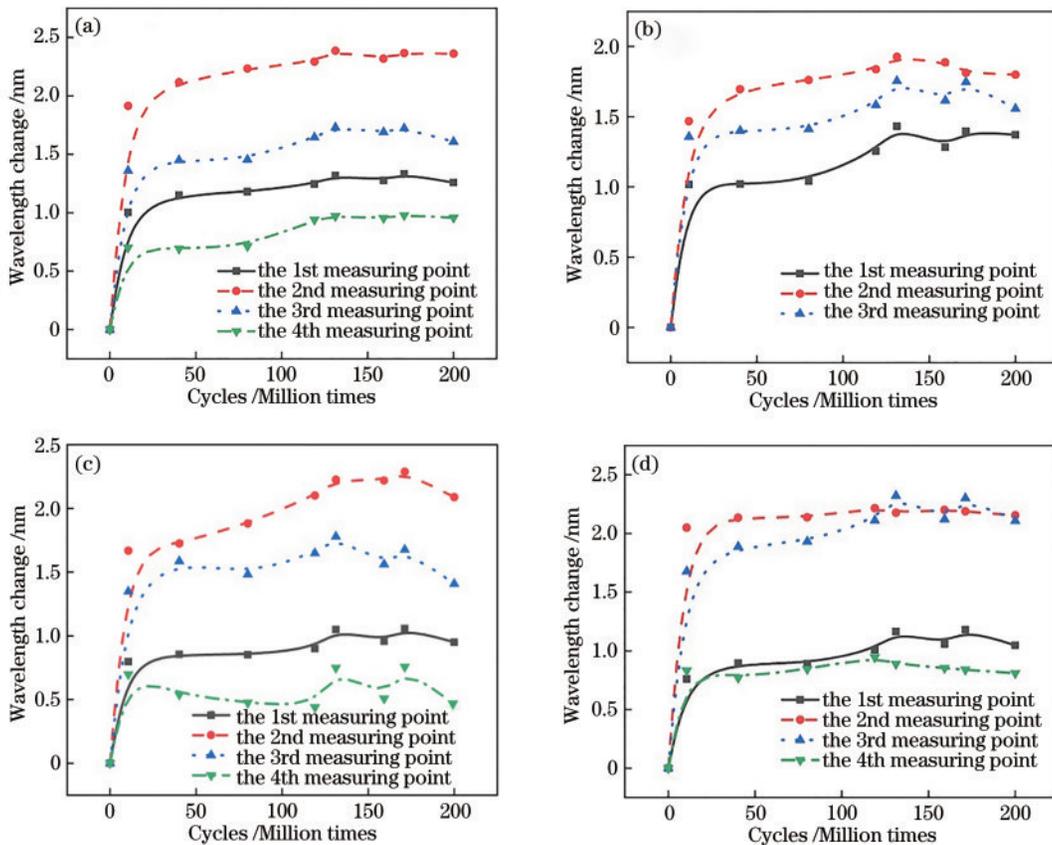


图 9 测点波长变化。(a)1号筋材;(b)2号筋材;(c)3号筋材;(d)4号筋材

Fig. 9 Wavelength changes of measuring points. (a) No. 1 reinforcement; (b) No. 2 reinforcement; (c) No. 3 reinforcement; (d) No. 4 reinforcement

第二阶段(50~200万次),光纤光栅测点波长变化趋于平稳,但仍缓慢上升,说明在循环荷载下微裂缝继续扩展,张拉端筋束与粘结剂不断发生剥离,但波长总

体变化很小,说明经历了一定循环后,锚固区的微裂缝扩展连通,循环荷载引起的粘结疲劳失效也越来越少,所以测点波长量逐渐稳定。

3.2.2 应变片数据分析

各根筋材在预加载试验的应变分布如图 10 所示,从图中可以看出,施加荷载初期筋材之间的应力差别

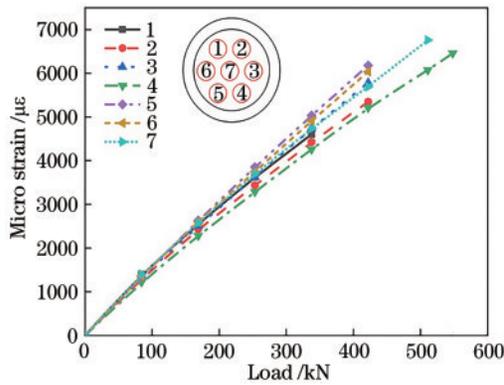


图 10 各根筋材应力分布

Fig. 10 Stress distribution of each reinforcement

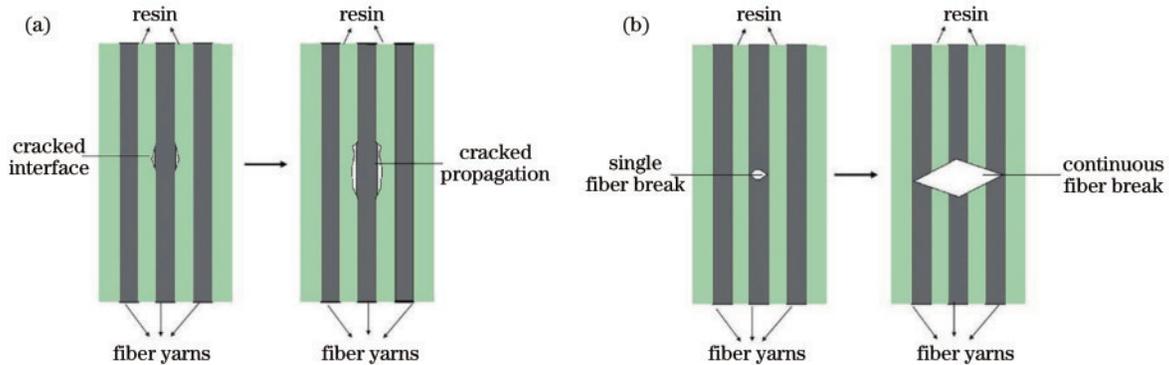


图 11 CFRP 内部界面疲劳破坏机理。(a) 界面破坏 ;(b) 纤维破坏

Fig. 11 Internal interface fatigue failure mechanism of CFRP. (a) Interface failure; (b) fiber failure

本次疲劳试验中筋材未发生破断,而是表现为纤维起垄、纤维磨损、局部脱层,说明主要原因就是树脂和纤维之间的弱界面导致的,树脂和纤维之间的裂缝增大,少了树脂的联结、传递应力,导致部分纤维应力集中,从而导致筋材局部脱层。但因为 CFRP 拉索各根筋材受力不均匀导致筋材之间的疲劳损伤程度不一致,说明使筋材发生疲劳破坏的主要因素仍是应力水平。

3.3 剩余承载力

进行 200 万次的疲劳循环加载后,测试拉索疲劳后剩余承载力。CFRP 拉索疲劳试验后的剩余承载力是检验拉索耐久性的重要指标,可量化耦合水环境的疲劳试验对 CFRP 拉索锚固体体系性能产生的影响,评估 CFRP 拉索锚固结构在潮湿环境下长期服役的可靠性。张拉台座如图 12 所示。

试件开始加载初期无明显现象,加载到 $0.8f_{pk}$ 时试件发生异响,持荷过程中也有断断续续的异响,加载到 $0.8f_{pk}$ 时千斤顶力值开始不稳定,继续加载至 $0.83f_{pk}$ 时发生异响,筋材发生发散式破断,破坏形态如图 13 所示,剩余承载力为 $0.83f_{pk}$ 。剩余强度试验破坏

较小,随着荷载增大筋材间的应力分布差异越来越大,其中 5、6 号筋材承受较大的应力。

疲劳试验结束后检查筋材的损伤情况,5、6 号筋材损伤确实较其他筋材严重,发生了纤维开裂、局部脱层的情况。可见在循环荷载和水环境共同作用下,筋材内部碳纤维/树脂粘结界面性能不断劣化,内部纤维丝发生断裂,力学性能下降。CFRP 索体内部破坏机理如图 11 所示。树脂传递不同 CFRP 筋之间的剪应力,当树脂和 CFRP 筋之间界面较弱时,如图 11(a) 所示,界面连接处首先出现微裂缝,而随着循环圈数的增加,界面处的裂缝逐渐扩展,最终形成宏观裂缝;当树脂和 CFRP 筋之间的界面较强时,如图 11(b) 所示,微裂缝首先出现在 CFRP 筋内部,随着循环圈数的增加,微裂缝扩展成为横向裂缝,部分纤维丝断裂,导致其他纤维丝承受荷载增大,横向裂缝扩展加快,更多纤维丝断裂,最终破坏形式为 CFRP 筋破断。



图 12 剩余强度张拉台座

Fig. 12 Tension stand for residual strength

方式为筋材自由段破坏,无筋材滑出或锚具变形破坏。

《GBT14370-2015 预应力筋用锚具、夹具和连接器》中规定 CFRP 索锚具在经历最大应力为 $\sigma_{max} = 0.5f_{pk}$, 应力幅为不小于 80 MPa, 循环 200 万次后不失效即满足要求,按照该规范,本文研究的锚具安全通过了疲劳试验。但现有规范还没有关于疲劳试验后筋材剩余强度的要求,而实际工程中,如果拉索在往复荷载作用下剩余强度下降太快,达到极限荷载会使拉索破断,这是非常危险的。说明 CFRP 索锚结构虽然安全

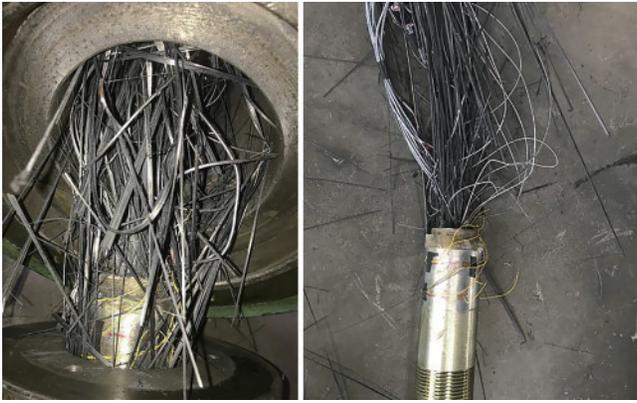


图 13 索体破坏形态

Fig.13 Destruction mode of cable

通过了疲劳试验,但水环境作用对其耐久性能造成了不容忽视的影响。

4 结 论

针对 CFRP 索锚固结构长期处于水环境下的可靠性问题,对多锥体锚具结构进行了水环境下的疲劳试验,分析了 CFRP 拉索的内部应力变化规律,试验结果为工程安全应用提供参考,得出以下结论。

1) 通过光纤光栅传感器监测试验全程的锚具内部应力变化,得到 CFRP 拉索锚固结构在耦合水环境下的疲劳实验的性能退化规律为:疲劳荷载使粘结介质产生微裂缝,粘结应力峰值由荷载端向自由端转移,发生了应力重分布;水作用加快了浸水端索锚结构的应力重分布,加剧了内部粘结疲劳失效,其变化规律分为两个阶段,前 50 万次循环损伤速率较大,50 万次循环后损伤速率减小,锚具内部状态基本稳定,测点应力变化不大。

2) 疲劳荷载和水环境共同作用降低了 CFRP 筋的纤维-环氧树脂基体界面性能,导致索体的 5、6 号筋材形成裂缝和局部脱层,但应力仍是引起疲劳破坏的主要因素。

3) 新型多级锥体粘结型锚具安全通过了 200 万次的疲劳试验,但索体剩余强度降低了 17%,说明水环境作用对 CFRP 索锚结构的耐久性能造成了不容忽视的影响。

参 考 文 献

- [1] 李扬. 大跨度 CFRP 缆索和钢缆索悬索桥经济性能对比研究[J]. 世界桥梁, 2014, 42(6): 55-60.
Li Y. Contrastive study of economic performance of long-span suspension bridges with CFRP and steel main cables [J]. World Bridges, 2014, 42(6): 55-60.
- [2] 于杰. 腐蚀环境下桥梁拉索疲劳可靠性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
Yu J. The research of the fatigue reliability of bridge cables under corrosive environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

- [3] Benmokrane B, Ali A H, Mohamed H M, et al. Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 114: 163-174.
- [4] Puigvert F, Gil L, Escrig C, et al. Stress relaxation analysis of adhesively bonded anchorages for CFRP tendons[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 313-322.
- [5] 杨文瑞, 何雄君, 代力. CFRP 锚杆与环氧树脂的耐久性试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(11): 93-96.
Yang W R, He X J, Dai L. Experimental study the durability of CFRP anchor and epoxy resin[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(11): 93-96.
- [6] 朱街禄, 杨文瑞. 酸性腐蚀环境下 CFRP 锚杆的耐久性试验研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(8): 58-61, 69.
Zhu J L, Yang W R. Experimental investigation on durability of CFRP anchor in acid corrosion environment [J]. New Building Materials, 2016, 43(8): 58-61, 69.
- [7] 朱元林, 刘礼华, 周佳琪, 等. CFRP 拉索研制及其力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(6): 80-84.
Zhu Y L, Liu L H, Zhou J Q, et al. Research on carbon fiber reinforced polymer stay-cable and its mechanical property[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019 (6): 80-84.
- [8] 侯苏伟, 强士中, 诸葛萍, 等. 碳纤维索胶粘型锚具疲劳试验研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 100-106.
Hou S W, Qiang S Z, Zhuge P, et al. Fatigue test of bond-type anchor for CFRP cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 100-106.
- [9] 李十泉, 刘荣桂, 陈蓓, 等. 改进型碳纤维复材筋用锚具静载测试及黏结应力分布[J]. 工业建筑, 2016, 46 (12): 157-162.
Li S Q, Liu R G, Chen B, et al. Static load test and bond stress distribution of improved anchor[J]. Industrial Construction, 2016, 46(12): 157-162.
- [10] 权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104004.
Quan Z Q, Fang X Q, Xue G Z, et al. Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (1): 0104004.
- [11] 孙丽, 王兴业, 李闯, 等. 基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406005.
Sun L, Wang X Y, Li C, et al. New double fiber Bragg grating static level based on equal strength beams[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406005.
- [12] 覃荷瑛, 沈全喜, 钟英杰. 基于光纤光栅传感器的大应变碳纤维板应力监测研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(4): 53-56.
Qin H Y, Shen Q X, Zhong Y J. Research on stress monitoring of large-strain carbon fiber plate using fiber Bragg grating sensor[J]. Railway Engineering, 2018, 58 (4): 53-56.
- [13] 朱万旭, 沈全喜, 覃荷瑛. 体内预应力钢绞线光纤光栅

- 监测技术及其应用[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 0206002.
 Zhu W X, Shen Q X, Qin H Y. Research and application of FBG monitoring technology in internal prestressed steel strand[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(2): 0206002.
- [14] 朱万旭, 杨龙, 朱世聪, 等. 碳纤维筋束多级锥体锚具的设计和试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(8): 177-181.
 Zhu W X, Yang L, Zhu S C, et al. Design and experimental study of multi-cone anchorages for carbon fiber tendons[J]. Industrial Construction, 2020, 50(8): 177-181.
- [15] Demers C E. Tension-tension axial fatigue of E-glass fiber-reinforced polymeric composites: fatigue life diagram [J]. Construction and Building Materials, 1998, 12(5): 303-310.