

碳纤维拉索锚头上紧固螺栓预紧力损失研究

陈柏宏, 罗德康, 鲁 鹏

重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2022年10月7日; 录用日期: 2022年10月27日; 发布日期: 2022年11月9日

摘 要

碳纤维复合材料(CFRP)片材具有质量轻, 高强度特性, 在预应力碳纤维板加固技术中, 锚夹具的可靠性是该技术成败的关键。通过实验来探究螺栓预紧力的损失量与不同初始预紧力的关系, 用Origin软件进行分析, 并拟合出螺栓预紧力与时间的幂函数关系式, 为波形锚具在实际工程中的应用和对锚具的性能优化提供合理的数据。

关键词

CFRP片材, 碳纤维加固, 螺栓预紧力, 波形锚具

Study on Pretightening Force Loss of Fastening Bolts on Anchor Head of Carbon Fiber Cable

Baihong Chen, Dekang Luo, Peng Lu

College of Architectural Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Oct. 7th, 2022; accepted: Oct. 27th, 2022; published: Nov. 9th, 2022

Abstract

CFRP sheet has the characteristics of light weight and high strength. In the prestressed CFRP strengthening technology, the reliability of anchor fixture is the key to the success or failure of the technical performance. Through experiments, the relationship between the loss of bolt preload and different initial preloads is explored and analyzed with Origin software, and the power function relationship between bolt preload and time is fitted, which provides reasonable data for the application of waveform anchorage in practical engineering and the performance optimization of anchorage.

Keywords

Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheet, Carbon Fiber Reinforcement, Bolt Pretightening Force, Wave Anchor

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济的不断发展,对交通的需求与日俱增,大跨度斜拉桥的修建成为了主流之一。但是斜拉桥的腐蚀现象在海洋等恶劣环境下表现得尤为严重,从而拉索的强度就会有一定程度的降低,因此会威胁桥梁的运营安全,并且钢拉索的自重大,自身的垂度效应限制了桥梁的极限跨度。为了规避上述所遇到的问题,运用具有自重轻,强度高并且抗腐蚀能力强的碳纤维复合材料(CFRP)便能够有效解决。

可靠的端部锚固是碳纤维拉索得以运用的前提条件,碳纤维板材专用的波形锚具是由卓静团队所研发[1] [2],在大吨位的情况也能进行有效夹持和锚固,并在海南三亚体育馆的工程项目中已经成功运用。波形锚具主要通过粘结效应、摩擦效应、弯曲效应3种作用有效夹持和锚固片材[3],使得在大吨位的情况下不产生相对滑移。波形锚具的锚固效果与高强螺栓的预紧力有着直接的关系,并且螺栓的预紧力也会因为其他因素而随时间的变化而损失。

目前,对夹持12层CFRP板的波形锚在碳纤维拉索锚头上对紧固螺栓预紧力损失的研究还鲜有报道。因此本试验主要是研究波形锚在碳纤维拉索锚头上给螺栓施拧初始预紧力对螺栓预紧力损失量的影响,为实际工程提供可靠的数据从而优化锚具性能。

2. 实验模型

2.1. 实验器材

本实验主要仪器由团队自主研发的波形齿夹具锚如图1所示。该种波形齿夹具锚由上波形齿板、下波形齿板、加劲波形齿板以及螺栓螺帽、垫片锁定装置组成,在上下波形齿板和加劲波形齿板预留16个螺栓孔。虽然CFRP片材有着良好的抗拉性能,但是CFRP片材的抗剪能力不足,因此在试验中将波形锚具的前端(如图1左端)设计得较平缓,以防止CFRP片材在张拉时因受剪而破坏[4] [5] [6]。

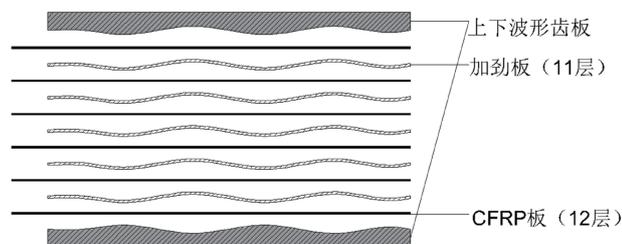


Figure 1. Schematic diagram of wave tooth clamp anchor

图1. 波形齿夹具锚示意图

2.2. 构件基本情况

锁定装置采用配套的16个高强度螺栓、螺母和弹簧垫片。试验所采用的碳纤维板用12片。实验采

用穿心式压力传感器，传感器的量程为 500 kN，精度为 0.3% FS，尺寸如图 2 所示。螺栓型号，以及碳纤维板的尺寸及参数见表 1、表 2 和表 3。

Table 1. CFRP material dimensions

表 1. CFRP 材料尺寸

构件	每层厚度/mm	宽度/mm	层数	碳纤截维面积/mm ²
碳纤维片材	1.2	50	12	60

Table 2. Bolt model

表 2. 螺栓型号

构件	直径/mm	螺纹牙距/mm	强度
螺栓	24	3	10.9 级

Table 3. CFRP sheet performance parameters

表 3. CFRP 片材性能参数

物理参数	数值
抗拉强度(MPa)	≥2400
伸长率(%)	≥1.6
受拉弹性模量(MPa)	≥1.6*10 ⁵
层间剪切强度(MPa)	≥50



Figure 2. Installation diagram of through center pressure sensor

图 2. 穿心式压力传感器安装示意图

2.3. 实验器材的组装以及实验步骤

在工程实际中，螺栓的损失与震动引起的松动和材料变形引起的松动有关，但是本次试验是在无张拉无震动的情况下进行，因此不考虑冲击、震动和动态负载作用。由于要考虑螺栓施拧时，需要用到电动扳手，因此相邻两个螺栓间的最小间距保证在 20 mm。同时，也要保证压力传感器有足够的量程，要求必须满足最小的设计尺寸，所以在布置贯穿式压力传感器的时候不能在相邻两个纵向孔位放置两个传感器，故此次试验开始前要将第二行与第七行的螺栓去掉，将压力传感器放置在第一行和第八行进行螺栓预紧力的监测。由于压力传感器放置在上下波形板中容易被破坏，为了防止此情况，因此这次试验将贯穿式压力传感器都放放置

于下波形齿板的下端。在安装过程中, CFRP 片材上下两面均需要涂抹胶水, 并且在涂抹胶水至装置安装完成的过程不能超过两个小时, 因为时间过长会导致在 CFRP 片材与夹片之间的胶水凝固, 以至于螺栓的初始预紧力达不到要求, 从而使得 CFRP 片材不能够得到有效夹持。试验的装置安装示意图如图 3 所示。

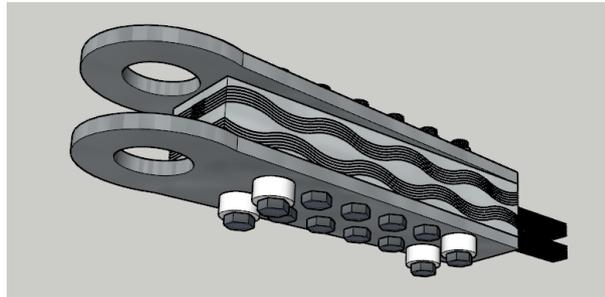


Figure 3. Installation diagram of experimental device

图 3. 实验装置安装示意图

通过研究试验表明: 温度、湿度等因素对螺栓预紧力的损失速率有一定的影响, 因此实验室的温度以及湿度必须保持在一个稳定的区间。在锚具安装的过程中以及完成后, 必须保证装置不被他人触碰和外界因素干扰[7]。

试验中, 在施拧过程时先使用电动扳手将螺栓拧紧, 然后使用扭矩扳手将数值调至 120 kN 后再次施拧, 每个过程重复 3 次。

本次试验中螺栓施拧的顺序采用螺栓群的施拧原则[8][9], 由中间先施拧再往两边施拧, 根据王贤强等人对节点板高强螺栓预紧力松弛实验研究[10], 通过钢桁架节点足尺模拟试验中表明: 第一, 螺栓施拧的顺序由内部向外部交叉施拧, 这样可以有效降低预紧力的损失量。第二, 在螺栓施拧完成的后的 4 个小时内, 高强螺栓预紧力下降速度较快, 随后损失速率将逐渐减小趋近于平稳状态。因此, 试验时采取数据时的时间间隔由初始阶段密集到中后期阶段逐渐稀疏, 随后每周记录两次数据, 一直监测至螺栓预紧力趋于稳态为止。

3. 试验结果

3.1. 螺栓预紧力的损失量

Table 4. Loss of pre tightening force of No. 2 bolt over time
表 4. 2 号螺栓预紧力随时间的损失量

物理参数	数值						
时间(h)	0	0.0167	0.3083	0.1833	0.31667	0.5667	1.0667
预紧力(kN)	126.2	125.9	125.3	124.7	123.8	122.7	121.2
时间(h)	2.0667	4.0447	8.0667	14.0667	24.0667	48.0667	80.417
预紧力(kN)	119.7	118.3	117.1	116.2	115.6	114.6	113.7
时间(h)	94.3497	104.9667	120.3667	150.7967	168.6667	192.78	218.74
预紧力(kN)	113.4	113.3	113.1	112.8	112.5	112.3	112.1
时间(h)	239.9	292.67	314.89	338.84	357.32	425.54	549.25
预紧力(kN)	112.0	111.6	111.4	111.3	111.1	110.9	110.6
时间(h)	594.25	819.07	836.65	864.12			
预紧力(kN)	110.4	110.2	110.1	110.1			

Table 5. Loss of bolts
表 5. 螺栓损失的情况

螺栓编号	初始预紧力	稳定后的预紧力	预紧力损失百分比	稳定所需时间
2 号螺栓	126.2	110.1	12.76%	819.07
2 号螺栓	125.8	110.3	12.32%	824.21

根据试验数据表 4, 表 5 可得, 经过连续的监测记录, 得到在钢结构与 CFRP 片材的组合构件中, 两组实验数据中虽然初始预紧力不同, 但是达到稳定的时间以及螺栓预紧力损失量基本相同。2 号螺栓预紧力由施拧时到预紧力稳定的时候的损失量在 12%到 13%, 相比于钢结构中的螺栓预紧力损失量略微偏大。

$$\mu = \frac{F_{in} - F_{st}}{F_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: μ 为螺栓预紧力的损失量; F_{in} 为初始施加的预紧力; F_{st} 为螺栓预紧力损失达到稳定状态后的预紧力。

$$\alpha = \frac{F_{in} - F_{st}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: α 为螺栓预紧力的损失速率; F_{in} 为初始施加的预紧力; F_{st} 为螺栓预紧力损失达到稳定状态后的预紧力; Δt 为时间的变化量。

3.2. 螺栓预紧力损失的结果分析

经过 36 天左右的观测记录, 将试验所得到的数据进行拟合分析, 绘制出螺栓预紧力损失的曲线图, 图像如图 4 所示:

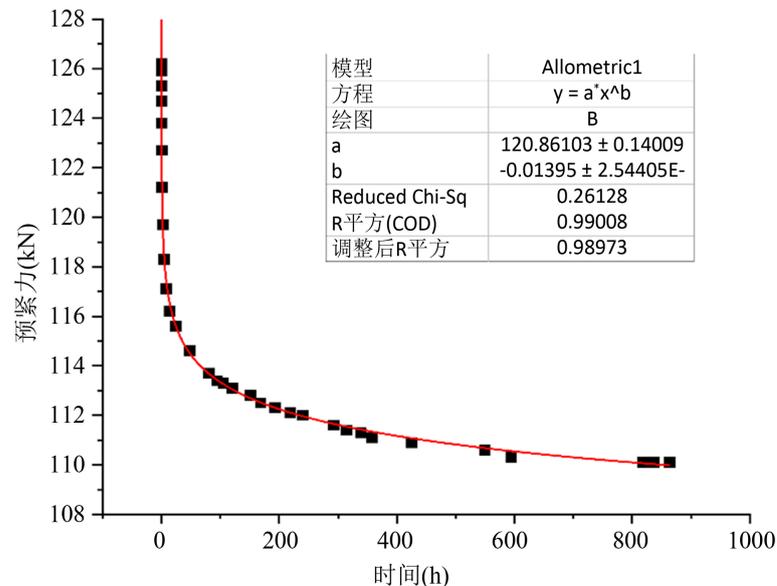


Figure 4. Curve of bolt pre tightening force loss
图 4. 螺栓预紧力损失量曲线图

用 Origin 将数据进行分析拟合, 得到螺栓预紧力随时间的幂函数关系式:

$$F = 120.86t^{-0.014}$$

式中： F 为螺栓预紧力， t 为时间。

由预紧力损失量曲线图可知，螺栓预紧力的损失曲线大致可分为三个区域，分别为快速衰减区、缓慢衰减区和稳定区。在施加预紧力起的4个小时内，为快速衰减区，损失量达到6.3%；施加预紧力后的第4小时到292小时内，为一般衰减区，损失量仅为5.7%；在施加预紧力后的第292小时之后直至稳定状态为稳定区。试验结果表明，螺栓在施拧完成的4小时内的损失量为7.9 kN，损失速率由第一小时的4.69 kN/h降低至第四小时的0.71 kN/h，而在四小时后，进入缓慢衰减区，损失速率趋近于零。

4. 结论

- 1) 通过试验可得，螺栓预紧力的损失量与时间的衰减模型基本为幂函数下降趋势。
- 2) 碳纤维拉索锚头上紧固螺栓预紧力在损失量大于钢结构中螺栓预紧力的损失量，但是损失量仍然在合理范围之内。损失后的预紧力能够将CFRP片材有效夹持。
- 3) 经过试验表明，紧固螺栓的损失量的区间为12%~13%，螺栓从施拧完成时到螺栓预紧力损失达到稳定状态的时间大约为819小时。

基金项目

重庆科技学院硕士研究生创新计划项目(项目批准编号：YKJCX2120612)。

参考文献

- [1] 卓静, 李唐宁. FRP片材波形齿夹具锚的原理[J]. 土木工程学报, 2005(10): 53-57+75.
- [2] 黄音, 罗中良, 李唐宁. CFRP波形齿锚具紧固螺栓轴力的试验[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2009, 23(8): 36-40.
- [3] 卓静. 高强度复合材料FRP片材波形齿夹具锚固系统及应用研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [4] 罗中良. 波形齿锚具对大吨位CFRP片材的锚固性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [5] 许颢迈. CFRP板新型夹持式锚固系统性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- [6] 梅葵花, 孙亚民, 孙晨然, 孙胜江, 任翔. CFRP筋新型机械夹持-黏结型复合式锚具短期静力性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 66-78. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.007>
- [7] 洪绍正, 孔正义. 高强螺栓预紧力损失的试验研究[C]//2020第七届海洋材料与腐蚀防护大会暨2020第一届钢筋混凝土耐久性与设施服役安全大会摘要集. 2020: 7-10.
- [8] 李应华. 螺栓预紧力确定[J]. 机械工程师, 2013(6): 206-207.
- [9] 黄山, 高仲学, 陈彦军, 陈文斌. 高强螺栓预紧力松弛对组合节点影响的研究分析[J]. 江苏建筑, 2021(2): 39-42.
- [10] 王贤强, 杨羿, 刘朵, 张建东. 节点板高强螺栓预紧力松弛试验研究[J]. 钢结构(中英文), 2019, 34(11): 40-44. <https://doi.org/10.13206/j.gjg201911006>