

CFRP板环向张拉摩擦预应力损失试验研究

石 杨¹, 刘世龙¹, 方 草², 杨 港¹

¹重庆科技大学建筑工程学院, 重庆

²重庆科技大学化学化工学院, 重庆

收稿日期: 2024年5月28日; 录用日期: 2024年6月17日; 发布日期: 2024年6月25日

摘要

预应力加固技术凭借其主动约束、发挥材料高强性能的特点得以广泛应用, 现有的加固技术主要有预应力钢绞线加固、预应力碳纤维复合材料(Carbon Fibre Reinforced Plastics, CFRP)布加固等, 但钢绞线易锈蚀且在高应力状态下疲劳性能差, 会导致突然断裂, 难以修复, CFRP布易出现张拉受力不均匀现象, 且制作时树脂浸渍困难等问题。所以CFRP板凭借均匀性强、比强度远超钢材、耐腐蚀性能极佳、抗疲劳性能优异等性能更适合用于预应力加固技术。为了研究预应力CFRP板环向加固时的摩擦预应力损失情况, 作者团队设计了一种新型环向张拉装置, 对6组CFRP板环向张拉进行了预应力损失试验研究, 试验的影响因素主要包括了单/双端张拉、不同的摩擦介质。试验得出了不同工况下预应力CFRP板的摩擦损失量, 计算出不同摩擦介质的摩擦系数值, 得出了预应力的损失规律, 并提出了减少预应力损失的措施。试验结果表明, 无摩擦介质工况下的摩擦预应力损失最大, 双端张拉可有效降低CFRP板的摩擦预应力损失。在表面涂黄油为代表的润滑材料可有效降低CFRP板的摩擦预应力损失。试验结果对预应力CFRP板环向加固有重要意义。

关键词

CFRP板, 摩擦预应力损失, 环向张拉, 试验研究

Experimental Study on Loss of Prestressing by Friction in Annular Tension of CFRP Plates

Yang Shi¹, Shilong Liu¹, Cao Fang², Gang Yang¹

¹School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 28th, 2024; accepted: Jun. 17th, 2024; published: Jun. 25th, 2024

文章引用: 石杨, 刘世龙, 方草, 杨港. CFRP 板环向张拉摩擦预应力损失试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(6): 940-951.
DOI: 10.12677/hjce.2024.136102

Abstract

Prestressed reinforcement technology is widely used because of its active restraint and high strength performance of materials. Existing reinforcement technologies mainly include prestressed steel strand reinforcement and prestressed carbon fiber composite material reinforcement, etc. However, steel strand is easy to rust and has poor fatigue performance under high stress, which will lead to sudden fracture and difficult to repair. CFRP cloth is prone to uneven tensile force. Moreover, resin impregnation is difficult during production. Therefore, CFRP plate is more suitable for prestressed reinforcement technology by virtue of its strong uniformity, specific strength far exceeding steel, excellent corrosion resistance and excellent fatigue resistance. In order to study the frictional prestress loss of prestressed CFRP plates during the toroidal reinforcement, the author's team designed a new type of toroidal tensioning device, and carried out an experimental study on the prestress loss of 6 groups of CFRP plates. The influence factors of the test mainly include single/double end tensioning and different friction media. The friction loss of prestressed CFRP plate under different working conditions is obtained, the friction coefficient of different friction media is calculated, the loss law of prestressed is obtained, and the measures to reduce the loss of prestressed are put forward. The test results show that the frictional prestressing loss of CFRP plates is the largest under the condition of frictional medium, and the double-end tension can effectively reduce the frictional prestressing loss of CFRP plates. The friction prestress loss of CFRP plate can be effectively reduced by applying the lubricating material represented by butter on the surface. The test results are of great significance for the circumferential reinforcement of prestressed CFRP plates.

Keywords

CFRP Plate, Friction Prestress Loss, Circumferential Tension, Experimental Study

Copyright © 2024 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

随着近些年交通运输流量的增长，斜拉桥 U 形塔柱所设计的承载力慢慢低于交通荷载，这就导致了塔柱水平承载力欠缺直至开裂，甚至永久丧失承载力的情况，所以塔柱加固成为了各国学者密切关注的问题。CFRP 有着抗疲劳、耐腐蚀、质量轻、比强度高等优越的性能，其中因为 CFRP 布的张拉受力不均匀，导致断丝、脱丝，容易造成应力集中丧失预应力，所以我们选用均匀性较强的 CFRP 板进行预应力加固。

但是 CFRP 板在加固过程中会出现预应力损失的情况，卢毅等[1]通过预应力玄武岩纤维布加固钢管发现预应力施加过程中纤维布与试件表面发生相对滑移产生了摩擦力损失；周长东等[2]用 CFRP 布加固混凝土圆柱，发现摩擦损失为张拉过程中的主要应力损失；Costa 等[3]对 NSM-CFRP 层合板加固钢筋混凝土梁进行了预应力损失试验，研究发现应变损失主要位于粘合长度的末端，而在张拉中心区域，大部分初始应变随时间保持良好。卢春玲等[4]用 CFRP 布加固有倒角的混凝土方柱，发现随着张拉端距离的增加，在倒角处的 CFRP 布的摩擦损失越大，随着控制预应力增大、柱表面粗糙、倒角半径变小，摩擦力的损失值就越大；Saadatmanesh 等[5]对 CFRP 筋进行预应力张拉，认为预应力施加后的初始阶段应力损失主要由 1 h 内的锚具端滑移变形与树脂基体的滑移造成的。王文炜等[6]通过对后张法 CFRP 布加固混凝土梁进行预应

力损失试验，研究认为预应力损失主要是放张后 CFRP 布滑移引起的摩擦力损失造成的。

国内外对于研究 CFRP 材料的预应力损失大多数都是来源于摩擦损失，但都是研究的 CFRP 布的损失情况，对 CFRP 板的研究比较少，本试验研究设计了 12 组试验来验证 CFRP 板的摩擦预应力损失情况，并进行分析，提出减少摩擦预应力损失的方法，为今后预应力加固提供参考价值。

2. 试验概况

2.1. 试验材料性能及参数

本次试验采用了 2 片同高强度 I 级 CFRP 板，分别用于单端张拉和双端张拉，抗拉强度标准值为 2425 MPa，弹性模量为 1.65×10^5 MPa。单端张拉的 CFRP 板全长 6410 mm，净长 6010；双端张拉的 CFRP 板全长 3205 mm，净长 2805 mm。截面尺寸均为 50 mm × 1.2 mm。

2.2. 锚具构造及拼装

如图 1 所示，本次试验中采用到的锚具为笔者团队所设计并应用的绞式波形锚具，锚具分为上锚具和下锚具，锚具由该锚具优越的锚固性能可以充分发挥出 CFRP 板的优势。CFRP 板与锚具的连接方法如下：将 CFRP 板放入波形锚下锚具上，涂上环氧树脂胶，盖上波形锚上锚具，再用螺栓拧紧，静置一天即可。

2.3. 环向张拉装置设计

为了实现 CFRP 板的环向张拉，设计的环向张拉台座如图 1 所示，由两个直径为 100 mm 的半圆转向块(外包铁皮内浇混凝土)和一个由槽钢对拼的格构式构件组合而成。



Figure 1. Circumferential tensioning platform seat

图 1. 环向张拉台座

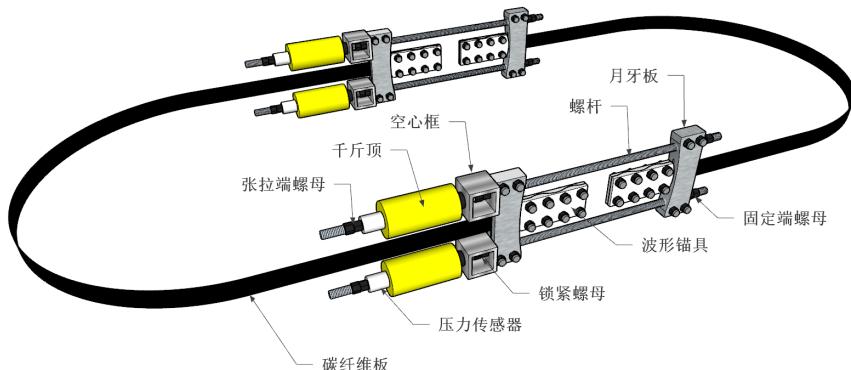


Figure 2. Circumferential tensioning device

图 2. 环向张拉装置

环向张拉装置(如图 2)主要由月牙板、张拉螺杆及配套螺母、夹持 CFRP 板的波形锚具、空心框、测力工具压力传感器和顶升工具穿心式千斤顶组成，通过 U 形布置的 CFRP 板连接而成。

2.4. 试验方法

2.4.1. 加载方案

如图 3 所示，本次试验拉力的加载通过穿心式千斤顶传导，在每个千斤顶处设置了压力传感器，通过压力传感器读数大小和 CFRP 板的张拉伸长量实现预应力水平的双控。

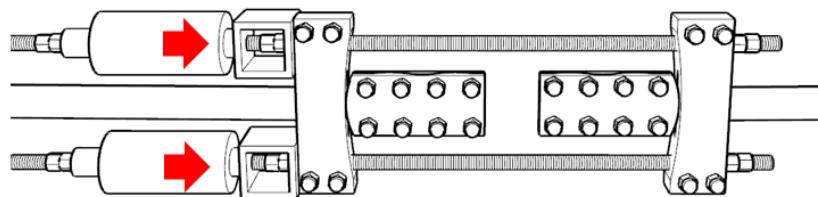


Figure 3. Working principle of prestress generation

图 3. 预应力产生工作原理



Figure 4. Single end tensioning

图 4. 单端张拉



Figure 5. Tension at both ends

图 5. 双端张拉

在张拉方式中，单端张拉为一条 CFRP 板环绕在构件上，通过一个千斤顶的顶升力产生预应力张拉 CFRP 板达到加固效果，如图 4 所示。双端张拉为两条相同长度的 CFRP 板对称环绕在构件上，同时用千斤顶的顶升力产生预应力张拉两条 CFRP 板达到加固效果，如图 5 所示。

2.4.2. 测量方案

CFRP 板在环向张拉台座上分为直线段和弯曲段，直线段为 CFRP 板的锚头位置到 CFRP 板刚与转向块接触位置，弯曲段为 CFRP 板绕转向块贴边的整个长度。试验在温度为 $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 70%~80% 的恒温、恒湿环境中进行，为了采集试验过程中 CFRP 板不同位置的应力大小，得到连续的预应力损失图像，试验采用应变片来测量 CFRP 板不同位置处的应变。在 CFRP 板上按照转向块大小分别布置了 24 组电阻应变片，应变片布置如图 6、图 7 所示，每组两片。在 CFRP 板由直线段刚进入弯曲段的附近处，应变片布置间距为 5 cm，在 CFRP 板弯曲段的中部，应变片布置间距为 10 cm。此外，由于力的相互作用，左右转向块上的 CFRP 板受力情况相同，所以本文试验只研究一侧 CFRP 板的摩擦预应力损失。

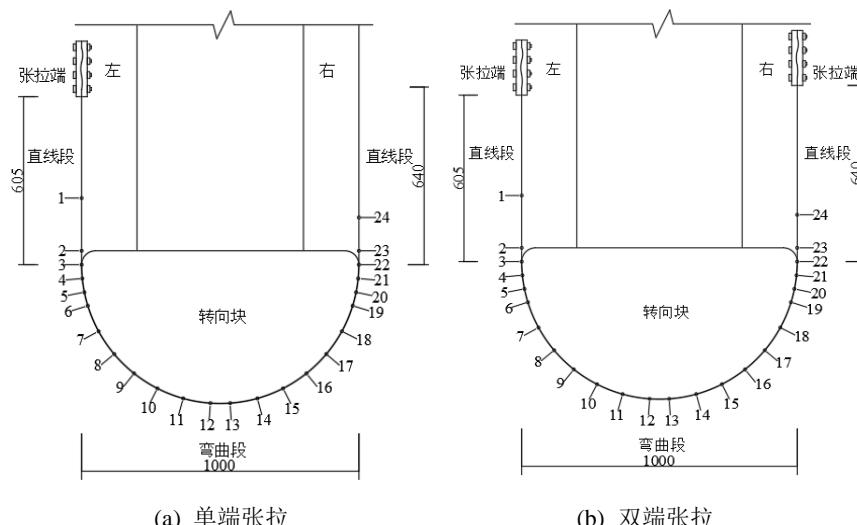


Figure 6. Single/double end measuring point layout of CFRP plate

图 6. CFRP 板单/双端测点布置图

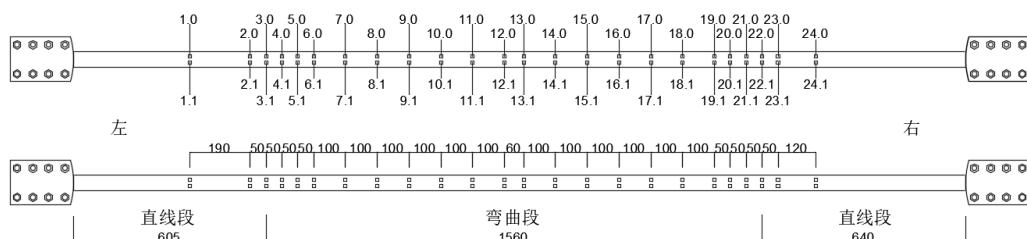


Figure 7. Detailed drawing of strain gauge setting

图 7. 应变片设置详图

2.4.3. 总体方案

为研究 CFRP 板环向张拉的摩擦预应力损失和在不同摩擦介质下的曲段摩擦系数，共计 6 组试验方案。其中方案一、方案三和方案五进行对比，研究不同介质下单端张拉状态下的摩擦预应力损失情况。方案二、方案四和方案六进行对比，研究双端张拉状态下的摩擦预应力损失情况。具体情况如表 1 所示。

Table 1. Comparison scheme of circumferential tension test
表 1. 环向张拉试验对比方案

试件编号	张拉拉力	试件编号	张拉拉力
I-W-1	60 KN	II-P-1	60 KN
I-W-2	60 KN	II-P-2	60 KN
II-W-1	60 KN	I-B-1	60 KN
II-W-2	60 KN	I-B-2	60 KN
I-P-1	60 KN	II-B-1	60 KN
I-P-2	60 KN	II-B-2	60 KN

注: I/II 为单/双端张拉; W 表示无摩擦介质, P 表示四氟板为摩擦介质, B 表示黄油为摩擦介质; 1 表示第一次试验, 2 表示相同情况下第二次验证实验。

试验前为了保证试验结果的准确性, 对此次试验所用到的压力传感器、千斤顶都进行了标定。标定数据在试验加载前处理, 以便调整数据采集仪上的相关系数, 保证试验的顺利进行。且严格执行相同规格的张拉方式和数据采取方式, 根据统一的计算公式对数据结果进行对比分析。

3. 试验结果

3.1. 无摩擦介质

本工况试验为无摩擦介质的单/双端张拉, 用于测得 CFRP 板单/双端张拉下的摩擦预应力损失率。无摩擦介质的环向张拉试验是直接将 CFRP 板与转向块侧表面的铁皮接触, 铁皮表面较粗糙, 预应力损失也会相应变大。将应变箱采集的数据进行处理, 各点的应变值采取其各组的平均值, 得到前后两次 CFRP 板应力曲线图像。

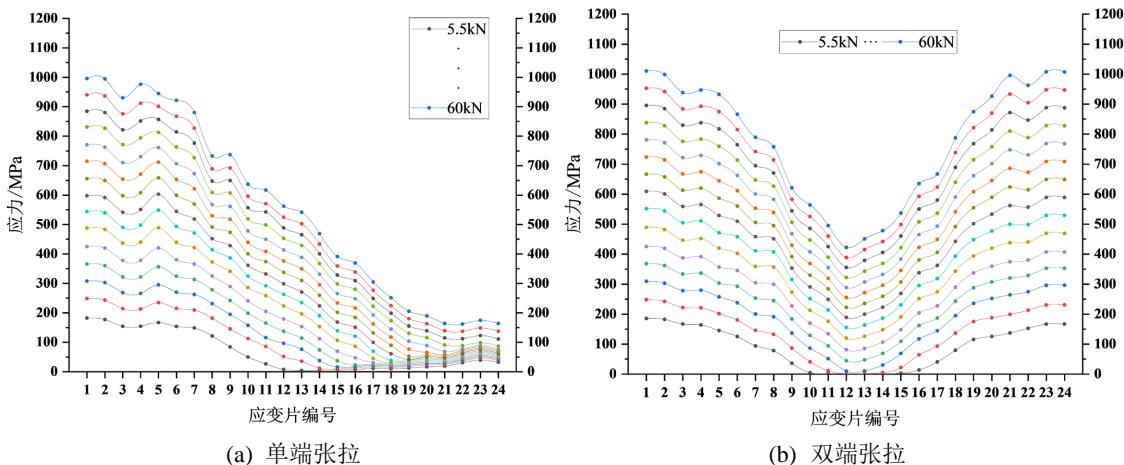


Figure 8. CFRP plate stress curve

图 8. CFRP 板应力曲线

从图 8 可知, 在无摩擦介质的情况下, CFRP 板与转向块的铁皮直接接触, 应力曲线下降十分明显。在较高应力时 CFRP 板进入转向处即 3 号点处应力突减, 之后应力往上升, 同时, 在 CFRP 板结束转向处即 22 号点处应力低于邻近应力值。

双端张拉同样在较高应力时 CFRP 板进入转向处即 3 号点处应力突减, 之后应力往上升, 在 CFRP

板结束转向处即 22 点处也呈现出同样现象，22 点处应力低于邻近应力值。在双端张拉力近似一样的情况下，应力最低点出现在 12 点处，该点位于转向块的对称线附近处。

3.2. 四氟板介质

本工况试验摩擦介质为四氟板单/双端张拉，用于测得 CFRP 板单/双端张拉下的摩擦预应力损失率。将四氟板放入 CFRP 板和转向块侧表面之间，需保证四氟板在 CFRP 板环绕之下不致松脱。另外，由于四氟板的加入，需要对 CFRP 板进行移动调整，保证应变片位于设计规定位置。将应变箱采集的数据进行处理，各点的应变值采取其各组的平均值，得到两次 CFRP 板应力曲线图像。

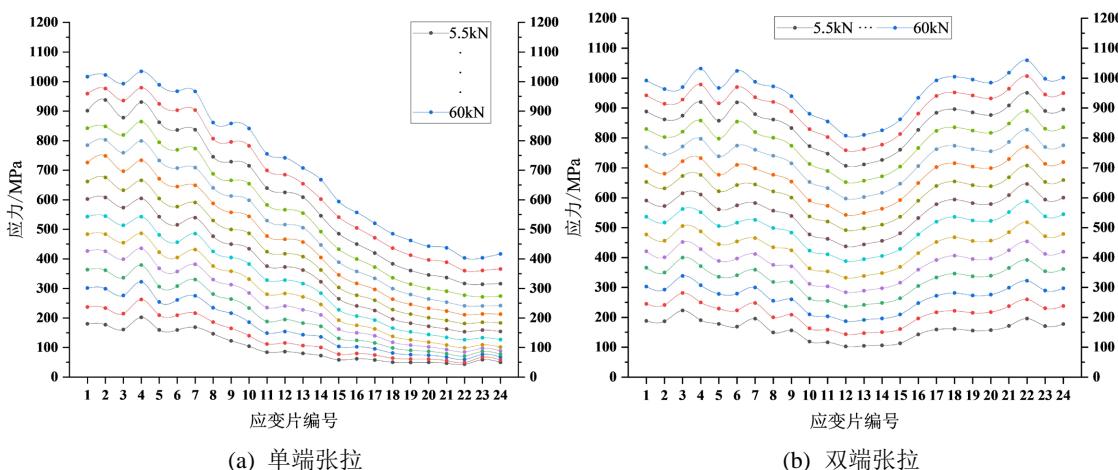


Figure 9. CFRP plate stress curve

图 9. CFRP 板应力曲线

从图 9 可知，在摩擦介质为四氟板的情况下，CFRP 板与四氟板接触，应力曲线下降趋势比 CFRP 板与铁皮直接接触的下降趋势小。在 CFRP 板进入转向处即 3 号点处应力突减，之后应力往上升。

在摩擦介质为四氟板的双端张拉情况下，CFRP 板与四氟板接触，应力曲线下降趋势明显得到改善。在 CFRP 板进入转向处后即 3 号点到 6 号点范围内应力出现不稳定波动，之后应力稳定下降，同时，在 CFRP 板结束转向附近即 22 点左右也呈现出应力不稳定现象，在 22 点处应力高于邻近应力值。在双端张拉力近似一样的情况下，应力最低点出现在 12 点处，该点位于转向块的对称线附近处。

3.3. 黄油介质

本工况试验摩擦介质为黄油单/双端张拉，用于测得 CFRP 板单端张拉下的摩擦预应力损失率和计算 μ 值。先将螺母拧松，利用 CFRP 板与转向块侧表面之间的空隙，把黄油涂刷于 CFRP 板表面和转向块侧表面。同样，在张拉前，因黄油的涂刷造成 CFRP 板位置改变，需通过拧松螺母调节 CFRP 板的位置，使应变片置于规定点位。涂刷黄油之后，因为黄油的作用，会使 CFRP 板在张拉时向下滑移，因此需重复多次预张拉，使其 CFRP 板与转向块侧表面接触稳定后开始进行张拉。将应变箱采集的数据进行处理，各点的应变值采取其各组的平均值，得到三组 CFRP 板应力曲线图像。

从图 9 可知，在摩擦介质为黄油的情况下，CFRP 板表面被涂刷黄油后，应力曲线下降趋势变缓。在较高应力时 CFRP 板进入转向处后即 3 号点到 6 号点范围内应力出现不稳定波动，之后在应力下降过程中又出现了应力波动点，但整体呈稳定下降趋势。

从图 10 可知，在摩擦介质为黄油的双端张拉情况下，CFRP 板表面被涂刷黄油，应力曲线下降趋势

放缓。在较高应力时 CFRP 板进入转向处后即 3 号点到 6 号点范围内应力出现不稳定波动，之后应力稳定下降，同时，在 CFRP 板结束转向附近即 21 点左右处也呈现出应力不稳定现象，在 21 点处应力高于邻近应力值。在双端张拉力近似一样的情况下，应力最低点出现在 12 点处，该点位于转向块的对称线附近处。全部工况摩擦预应力损失率总结如表 2 所示。

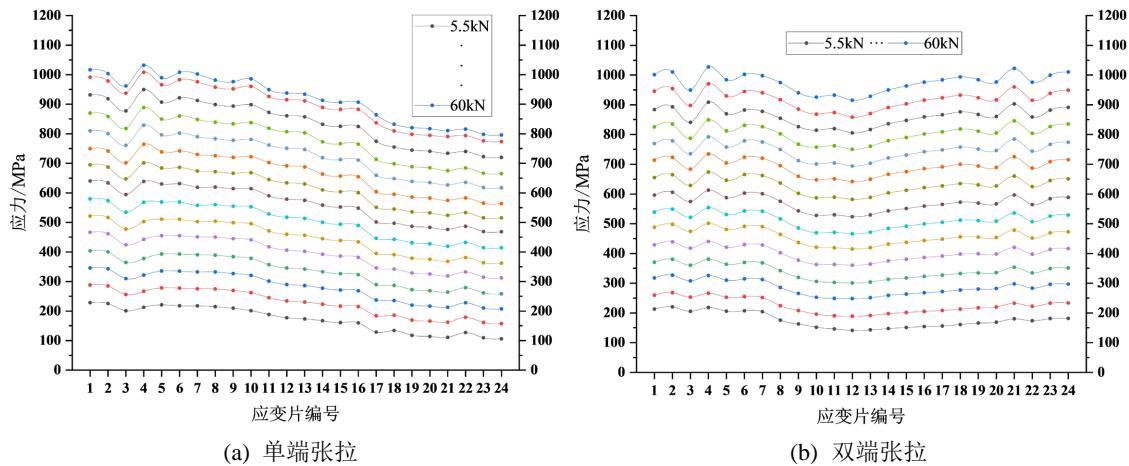


Figure 10. CFRP plate stress curve

图 10. CFRP 板应力曲线

Table 2. Frictional prestress loss rate of each specimen

表 2. 各试件摩擦预应力损失率

试件编号	摩擦预应力损失率	试件编号	摩擦预应力损失率
I-W-1	83.45%	II-P-1	18.50%
I-W-2	84.17%	II-P-2	18.44%
II-W-1	58.42%	I-B-1	21.67%
II-W-2	58.88%	I-B-2	22.51%
I-P-1	58.91%	II-B-1	8.56%
I-P-2	59.86%	II-B-2	8.85%

通过分析张拉时的摩擦预应力损失来看，两次试验的结果都非常接近，具有共性。因此，同取次数 1 的数据进行张拉方式对比分析，无论哪种摩擦介质，双端张拉都优于单端张拉。在无摩擦介质工况下，单端张拉方式中 CFRP 板应力越靠近固定端越小，应力损失大。双端张拉方式中 CFRP 板由于两侧都是张拉端，因此靠近张拉端的应力高，远离张拉端的应力逐渐降低，应力损失大；在四氟板介质工况下，单端张拉和双端张拉方式中应力损失得到好转，损失较大；在黄油介质工况下，两种张拉方式应力损失改善都十分明显，特别是单端张拉中的应力大小不再很低，若是在施工时张拉端前后交替布置，这样可以很好的避免单侧约束力偏低问题，可以更好的减少摩擦预应力的损失。

4. 有限元验证

4.1. 有限元模型的建立

本次试验将采用 ABAQUS 有限元软件用作分析与对比，建立相应的有限元实体模型如图 11，实体为混凝土半圆和碳纤维板并分别给予材料定义[7]。实体的单元类型、材料定义和网格划分如表 3 所示。

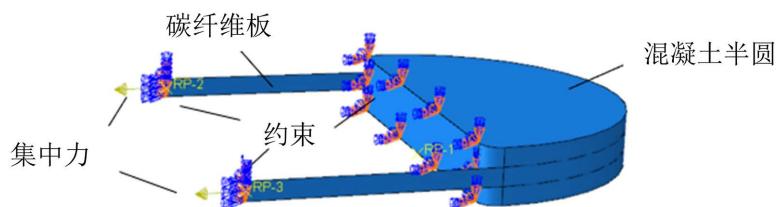


Figure 11. Entity model
图 11. 实体模型

Table 3. Element type, material and mesh of different entities
表 3. 各实体的单元类型、材料定义和网格划分

实体名称	混凝土半圆	碳纤维板
单元类型	C3D8R	S4R
材料定义	刚体	CFRP
网格划分	20 mm	10 mm

因为只考虑碳纤维板张拉时摩擦引起的预应力损失，所以混凝土半圆部件赋予刚体属性，单一研究碳纤维板的应力变化[8]。在相互作用里创建表面与表面的接触，设置由试验测出的摩擦系数数值。并将碳纤维板两侧张拉端分别进行耦合设置。载荷情况为用集中力作为对碳纤维板的张拉力并加在耦合处。混凝土半圆内侧平面段设置为固定约束，同时在碳纤维板的张拉两端端部设置 Y, Z 方向的位移约束。

4.2. 有限元模型的验证

利用试验所测得的数据验证建立的有限元模型。无摩擦介质的两端张拉试验数据和有限元的模拟数据如表 4 所示，对比如图 12 所示。

Table 4. Test result
表 4. 试验结果

类型	1 点/MPa	24 点/MPa	应力最小值/MPa	应力最小值出现位置
试验	1040.83	1037.51	435.03	12 点
模拟	1047.30	1043.90	454.24	13 点

可以看出，在设置相同的拉力下，两条碳纤维板应力曲线近似重叠，个别应力点数据有些偏差，这主要是因为试验下的无摩擦介质张拉，混凝土半圆侧表面不太平整。应力最小值位于 12 点附近，两者应力最小值相差 19.21 MPa，可认为本文所采用的数值模型准确合理，可以进行下一步使用不同摩擦介质的张拉试验模拟。

以建立的有限元模型为基础，进行摩擦副材料为四氟板和黄油的模拟。试验测出四氟板摩擦系数为 0.28，黄油的摩擦系数为 0.08，用其系数将其替换，并分次计算不同集中力大小(22 kN、32 kN、42 kN、52 kN、62 kN)的碳纤维板应力数据。

不同集中力与预应力损失的关系如图 13 和图 14 所示，在三种工况下，预应力损失呈相同规律，即

随着拉力的增加，预应力损失率逐渐减小，而预应力损失量逐渐增大，并且在拉力越来越大的情况下，预应力损失率下降趋势放缓。其中，黄油的预应力损失率的下降幅度最小，而无摩擦介质条件下的预应力损失率的下降幅度最大。

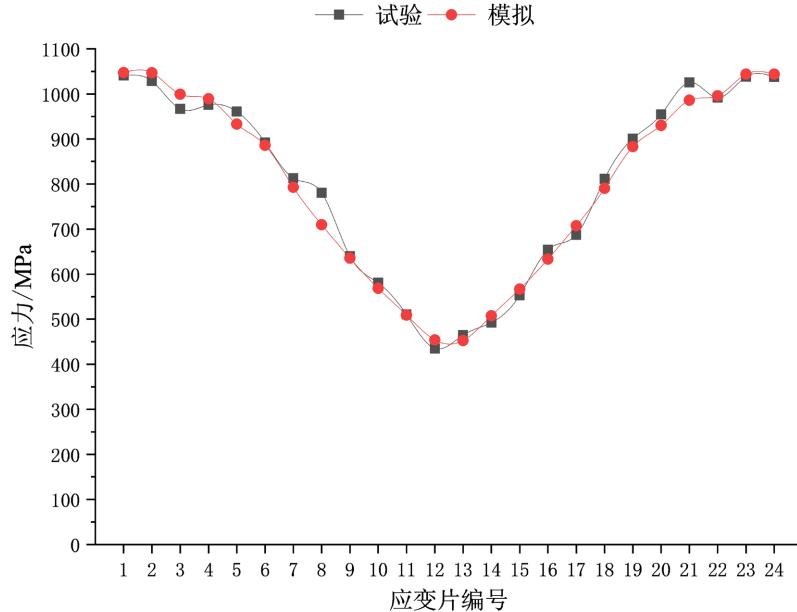


Figure 12. Stress curve comparison

图 12. 应力曲线对比

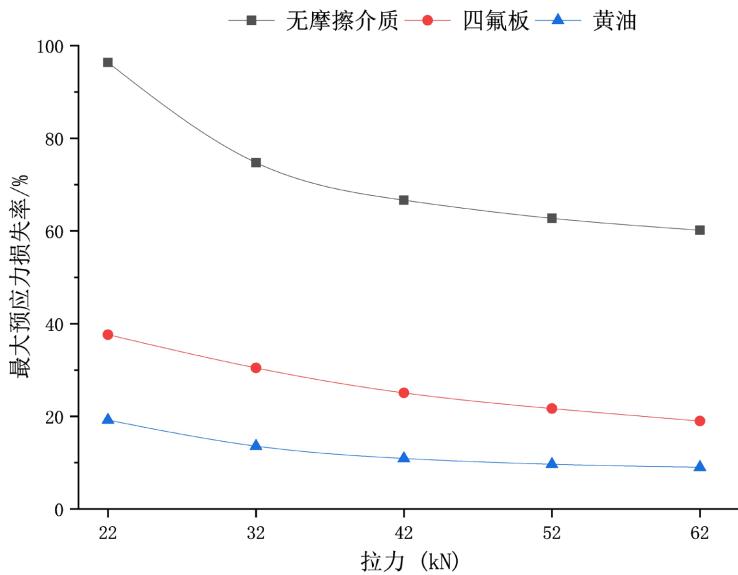
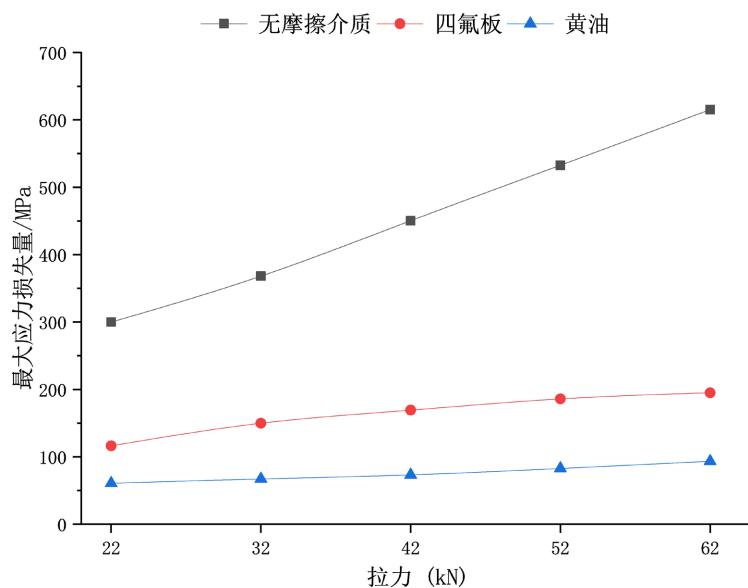
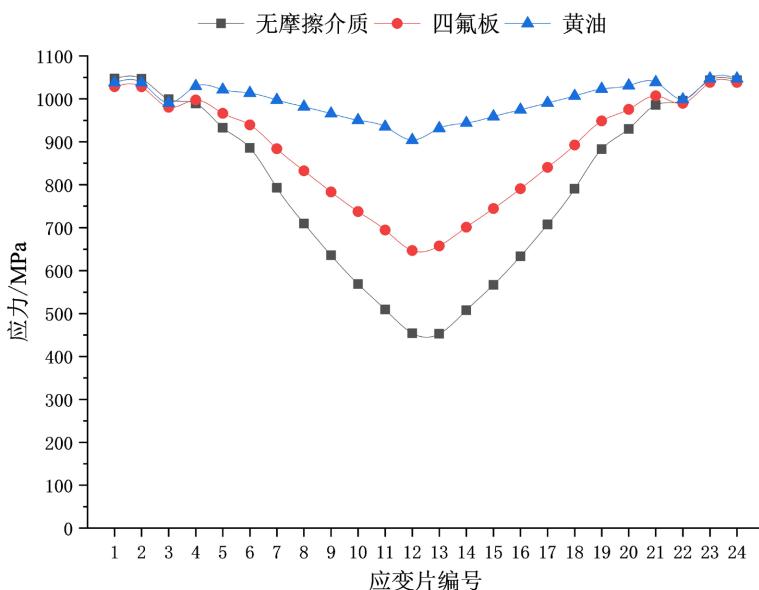


Figure 13. Prestress loss rate diagram

图 13. 预应力损失率图

将三组试验方案中的最大拉力值对应的应力曲线进行对比，如图 15 所示。从图中可以看出，通过加入四氟板和涂刷黄油，碳纤维板预应力损失得到有效缓解。其中，黄油的作用效果最为明显，能够充分地减小预应力损失。最大拉力值下的预应力损失对比如表 5 所示。

**Figure 14.** Prestress loss diagram**图 14.** 预应力损失量图**Figure 15.** Comparison of circumferential stress curves under 62 kN**图 15.** 62 kN 下的环向应力曲线对比**Table 5.** Tensile stress loss at both ends under tension of 62 kN**表 5.** 62 kN 下的两端张拉应力损失

方案编号	摩擦副材料	张拉两端应力平均值/MPa	应力最小值/MPa	应力损失率/%
方案一	无	1045.60	452.61	56.71%
方案二	四氟板	1033.40	646.70	37.42%
方案三	黄油	1042.65	904.30	13.27%

从表5可知，在相同的拉力下，无摩擦介质的碳纤维板环向张拉预应力损失率高达56.71%，这将极大的削弱了碳纤维板环向张拉下对构件的束缚力，影响加固效果；加入摩擦副材料为四氟板的碳纤维板环向张拉预应力损失率为37.42%，预应力损失较小，较无摩擦介质相比，预应力损失率减少19.29%；涂刷黄油后的碳纤维板环向张拉预应力损失率为13.27%，预应力损失得到明显改善，较无摩擦介质相比，预应力损失率减少43.44%，较加入四氟板条件相比，预应力损失率减少24.15%。

5. 总结

综上，可以得出如下结论：

(1) 通过三组不同工况的试验对比，得出CFRP板在受到环向单端张拉后，与直线张拉不同，无论与哪种摩擦介质接触都存在摩擦预应力损失现象，且最大预应力损失出现在构件对称线附近。构件对称线周围的预应力损失过大直接影响对构件的径向约束力不均匀，因此预应力碳纤维板体外曲线加固圆柱式构件产生的预应力损失不可忽视。

(2) 曲线张拉的预应力损失与张拉控制拉力大小有关，拉力越大，预应力损失量越大，预应力损失率越小。

(3) 在减少预应力损失方面，以黄油为代表的润滑材料能够有效减小预应力损失，在62 kN拉力下，预应力损失率控制在13.27%，极大的解决了对构件产生的横向约束力不均问题。故工程中的桥墩加固可借鉴于这一张拉工艺和减少预应力损失方法。

需要说明的是，本文仅分析了预应力碳纤维板曲线张拉加固环向构件时摩擦引起的预应力损失，关于锚具变形、碳纤维板材料松弛及温度变化等因素对预应力的影响将另文研究。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(项目批准编号：YKJCX2220648)。

参考文献

- [1] 卢毅, 张誉, 贾彬, 等. 预应力玄武岩纤维布加固钢管的预应力损失研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(6): 22-26.
- [2] 周长东, 李季, 吕西林. 预张拉纤维布约束混凝土圆柱预应力损失试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1760-1765.
- [3] Costa, I. and Barros, J. (2015) Prestress Losses in NSM-CFRP Flexurally Strengthened RC Beams. *Strain*, **51**, 276-287.
- [4] 卢春玲, 吴有胜, 王强, 等. 预应力碳纤维布加固混凝土方柱预应力损失试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(11): 41-46.
- [5] Saadatmanesh, H. and Tannous, F.E. (1999) Relaxation, Creep and Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Plastic Tendons. *ACI Materials Journal*, **96**, 143-153.
- [6] 王文炜, 戴建国, 张磊. 后张预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁预应力损失试验及计算方法研[J]. 土木工程学报, 2012, 45 (11): 88-94.
- [7] 高子祁, 张津滔, 张浩, 郝汉, 郭瑞. 纤维复材增强加固损伤混凝土梁抗弯性能的有限元分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(5): 43-50.
- [8] 林树潮. 预应力碳纤维布加固钢梁抗弯性能的试验研究和有限元分析[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(1): 40-45.
<https://doi.org/10.19731/j.gdtmyjz.2024.01.011>