

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.09.007

预应力碳纤维布加固混凝土圆柱预应力损失试验研究

卢春玲^{1,2,3}, 刘传超¹, 吴有胜¹, 王 鹏¹, 李中洋¹

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;
3. 桂林理工大学 广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了研究预应力碳纤维布加固圆柱的应力损失情况, 在恒温恒湿条件下进行了为期30 d的预应力碳纤维布加固混凝土圆柱预应力损失试验。试验考虑的影响因素包括: 圆柱的直径大小、预应力大小、柱表面处理情况。试验得到了预应力碳纤维布的摩擦损失量和长期的应力松弛损失量, 分析了各因素对碳纤维布预应力损失的影响, 得出了预应力损失的发展规律, 并提出了减小碳纤维布预应力损失的措施。试验结果表明: 当预应力越大、圆柱直径越小、圆柱表面越粗糙, 则摩擦损失越大; 持荷初期碳纤维布应力松弛发展较快, 12 h松弛率可达30 d松弛率的51%以上, 之后逐渐趋于稳定; 碳纤维布表面涂胶情况下的预应力松弛量较不做处理的情况小; 圆柱直径越大、预应力越大, 碳纤维布应力松弛率越低。预应力碳纤维布的松弛量和有效应力随圆柱直径及预应力度度的增大而增大。摩擦损失占预应力总损失76.4%以上, 碳纤维布应力松弛损失相对较小, 占总损失的9.9%~23.6%。对加固圆柱表面及碳纤维布表面涂胶可有效减少预应力损失。增大预应力度, 可提高碳纤维布有效预应力。试验结果对预应力碳纤维布加固圆柱的设计及施工具有一定的指导意义。

关键词: 桥梁工程; 预应力损失; 试验研究; 预张拉碳纤维布; 混凝土圆柱; 加固修复

中图分类号: U445.7⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2018) 09-0041-08

Experimental Study on Prestress Loss of Concrete Circular Columns Strengthened with Prestress CFRP Sheets

LU Chun-ling^{1,2,3}, LIU Chuan-chao¹, WU You-sheng¹, WANG Peng¹, LI Zhong-yang¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Rock-soil Mechanics and Engineering, Guilin Guangxi 541004, China;
3. Guangxi Collaborative Innovation Center for Hidden Metal Deposits Exploration and Development of New Materials, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: For researching the prestress loss of concrete columns strengthened with prestressed CFRP sheets, an experiment of the prestress loss of the concrete columns for a period of 30 d under constant temperature and humidity conditions is conducted. The influencing factors of the test include diameter of cylinder, degree of prestressing and treatment of surface. The frictional loss and the long-term stress relaxation loss of the prestressed CFRP sheets are obtained, the influence of various factors on the prestress loss of the CFRP sheets is analyzed, the development law of prestress loss is obtained, and the measures to reduce the loss of prestressed CFRP sheets are put forward. The result shows that (1) the greater the prestress is, the smaller the diameter is, the rougher the cylindrical surface is, the greater the friction loss becomes; (2) the stress

收稿日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51568015); 广西岩土力学与工程重点实验室 (2015-B-08); 桂林理工大学博士启动基金项目; 大学生创新项目 (YCSW2017154)

作者简介: 卢春玲 (1978-), 女, 重庆北培人, 博士. (277342007@qq.com)

relaxation of CFRP in the initial stage of loading is fast, the relaxation rate of 12 h can reach more than 51% of the 30 d relaxation rate, then it gradually stabilizes; (3) the prestress relaxation of coated CFRP sheets is lower than the sheets without coating; (4) the greater the prestress and diameter are, the lower the relaxation rate becomes; (5) the relaxation and the effective stress of the prestressed CFRP sheets increase with the increase of the diameter of the cylinder and the degree of prestressing; (6) the friction loss accounts for more than 76.4% of the total prestress loss, the stress relaxation loss of CFRP sheets is relatively small, accounting for 9.9% to 23.6% of the total loss; (7) the coating on the surface of reinforced cylinder and the surface of CFRP sheets can effectively reduce the prestress loss, and increasing the degree of prestressing can improve the effective prestress of CFRP sheets. The test result has a certain guiding significance for the design and construction of prestressed CFRP reinforced columns.

Key words: bridge engineering; loss of prestress; experimental study; pretensioned CFRP sheet; concrete circular column; reinforcement and repair

0 引言

碳纤维增强复合材料 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 力学性能优良, 化学性能稳定, 具有高强、轻质、耐腐蚀、弹模高、比重小等特性, 其热膨胀系数与混凝土相近, 被广泛应用于混凝土结构加固^[1-4]。普通 FRP 材料对混凝土构件的约束属于“被动约束”, 只有在混凝土充分膨胀下, FRP 材料才开始发挥约束作用, 存在一定程度的应力滞后, FRP 材料的高强性能得不到充分发挥。预应力 CFRP 布加固技术是一种主动加固方法, 利用 CFRP 的高强度特性, 使得环向约束的混凝土柱处于主动三向受压状态, 提高了混凝土柱的承载能力、抗震能力、耗能能力、延性性能^[5-6]。

目前对 CFRP 材料的预应力损失研究主要集中在其加固梁的试验研究上^[7-22], 对加固柱的预应力损失试验研究较少^[23]。杨勇新^[11]等通过对 7 根混凝土梁碳纤维布放张后的预应力损失研究, 提出了预应力损失的计算式及减小预应力损失的相关措施; 许晓^[14]等通过分析预应力碳纤维布加固技术产生预应力损失的机理, 对加固工艺进行了改进; 朱永祥^[15]等建立了预应力长期损失的增量微分模型预测预应力的长期损失; 黄侨^[18]等基于国内外规范及研究成果, 提出了预应力纤维复合材料加固的参数取值及损失计算方法, 并检验了其可行性与可靠性; 尚守平^[21]等通过自主研发的张拉和锚固装置加固 H 型钢梁并取得较好的加固效果; 周长东^[23]等通过预应力 CFRP 布环向约束混凝土圆柱的预应力损失试验发现, 预应力损失主要是来自于摩擦损失、碳纤维布松弛损失, 而混凝土收缩徐变、锚具回缩引起的预应力损失可忽略不计。为了对 CFRP 布加固圆柱预应

力损失进一步研究, 本研究主要从预应力度大小、圆柱表面粗糙度、圆柱的直径大小以及 CFRP 布表面有无涂胶这 4 个方面来研究和分析。为预应力碳纤维布加固设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及材料力学性能指标

本试验试件采用素混凝土圆柱, 直径分别为 305 mm 和 240 mm。CFRP 布及与 CFRP 布配套的浸渍黏结胶由某材料公司生产, CFRP 布型号为 CFS-I-300, 厚度为 0.175 mm。测得的混凝土、CFRP 布以及浸渍胶的材料力学性能指标如表 1 所示。

表 1 材料力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of materials

材料	抗拉/屈服 强度/MPa	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa
混凝土	—	42.7	3.26×10^4
CFRP 布	厂家提供	3 400	2.4×10^5
	实测	3 634	2.38×10^5
碳布浸渍黏结胶	58	—	2 584

1.2 锚具装置及测试方法

1.2.1 自锁式锚具的构造及预应力的施加

在文献 [24-25] 的基础上, 对该自锁式锚具进行改进如图 1 所示, 锚具主要由锚片、高强螺栓组成, 且锚具的端部两边粗、中间细, 这样可避免包裹碳纤维布并对其施加预应力时纤维布发生错动, 且端部加粗也可防止对螺栓施加扭矩时发生弯曲。

预应力加载方式通过同步拧螺杆使锚具向内靠拢, 对碳纤维布施加预应力。预应力度通过监测锚具端两侧应变片的应变值控制, 预应力度为锚具端两侧测点的应变均值与纤维布的极限拉应变的比值。

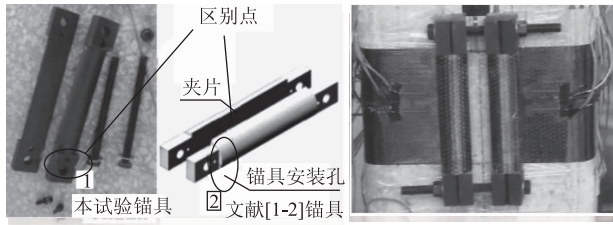


图1 锚具装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of anchorage device

1.2.2 测试方法

本试验在温度差为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围、恒湿条件下测试。图2(a)是CFRP布环向包裹直径为305 mm(图左)和240 mm(图右)圆柱时应变片位置图。应变片按逆时针顺序编号。在图2(a)左图中,测点1(9)为锚具端位置,测点5为锚具最远端位置;在图2(a)右图中,测点1(7)为锚具端位置,测点4为锚具端最远端位置。图2(b), (c)为纤维布上应变片布置的展开图,利用对称性,图中只显示的纤维布一半长度范围内应变片布置情况(如1 $\rightarrow$ 2 $\rightarrow$ 3 $\rightarrow$ 4 $\rightarrow$ 5、1 $\rightarrow$ 2 $\rightarrow$ 3 $\rightarrow$ 4)。应变片连接在DH3816静态电阻应变采集仪上。

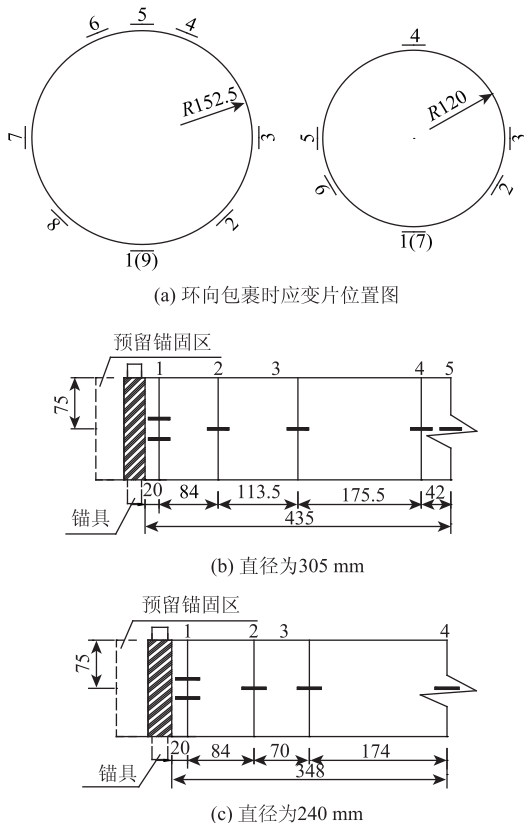


图2 纤维布上应变片布置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of arrangement of strain gauges on fiber sheet (unit: mm)

预应力损失的测试分为摩擦损失、松弛损失两部分。摩擦损失的测试,首先在测试前将静态应变采集系统平衡并调至初始值为“0”,并设定每隔1 s定时采样。然后开始同步拧上下锚杆,并启动采样按钮,当应变值达到所控制的应变值停止施加预应力;预应力松弛损失的测定为当张拉完预应力后,每隔30 min采集一次数据。当相同位置不同时间段采集的应变值之差小于 $10\ \mu\epsilon$,每隔6 h采集一次,直到应变差值小于 $2\ \mu\epsilon$,隔12 h采集一次,测试周期为30 d。

2 试验参数

表2是本研究中预应力损失试验的试件参数。本研究针对摩擦损失、碳纤维布应变随时间变化的松弛损失这两个因素进行试验研究。摩擦损失是在施加预应力的过程中由于混凝土和纤维布表面发生相对滑动产生摩擦力阻碍纤维布中预应力的传递,导致距离锚具张拉端越远处纤维布的预应力越小。由文献[23]可知,摩擦损失影响因素主要包括预应力度大小、圆柱直径大小、圆柱表面粗糙度。表面粗糙度一种情况是柱表面不做处理,另一种是在柱表面涂抹浸渍黏结胶至胶体固化后的表面,涂胶后柱表面光滑平整。

表2 预应力损失试验的试件参数

Tab. 2 Parameters of specimens in prestress loss test

试件编号	预应力度	圆柱的直径/mm	圆柱表面处理情况	CFRP布表面处理情况
YZT1240-1	0.1	240	涂胶	涂胶
YZW1240-2	0.1	240	不做处理	不做处理
YZT2240-1	0.2	240	涂胶	涂胶
YZT2240-2	0.2	240	涂胶	不做处理
YZW2240-2	0.2	240	不做处理	不做处理
YZT1305-1	0.1	305	涂胶	涂胶
YZT2305-1	0.2	305	涂胶	涂胶
YZT2305-2	0.2	305	涂胶	不做处理
YZW2305-2	0.2	305	不做处理	不做处理

注:试件编号 YZW2240-1 和 YZW2240-2 中的 YZ 表示圆柱; W 表示圆柱表面不做处理; 2 表示预应力度为 0.2; 240 表示圆柱的直径为 240 mm; -1 表示 CFRP 布表面涂胶; -2 表示 CFRP 布表面不做处理。试件编号 YZT1305-1 和 YZT1305-2 中 T 表示圆柱表面涂胶; 1 表示预应力度为 0.1, 305 表示圆柱的直径为 305 mm; -1 表示 CFRP 布表面涂胶; -2 表示 CFRP 布表面不做处理。以上其他试件编号的表示方法与此相同。

应力松弛是材料塑性变形形态的反映。由文献[23-24]可知,碳纤维布长期的应变松弛损失因素主要包括预应力度大小、圆柱直径大小、碳纤维布有无涂胶。CFRP 布表面涂胶是当加完预应力后立即涂胶。CFRP

布表面不做处理。

3 数据分析

3.1 摩擦损失数据分析

由文献[23]可知,摩擦损失与柱表面的粗糙程度、预应力、圆柱半径大小有关。本试验中碳纤维布锚具近端与最远端处均贴有应变片(见图2)并连接至静态应变采集系统测量其应变值。

本试验摩擦损失结果见表3,其中碳纤维布锚具端与最远端处的应力值为对应位置处的应变值乘以碳纤维布弹性模量;摩擦损失量为碳纤维布锚具端应力与锚具最远端处应力之差。摩擦损失比为摩擦损失量与碳纤维布锚具端应力值的比值。

从表3中数据可看出:在其他条件相同时,预应力越大、圆柱直径越小、圆柱表面越粗糙,摩擦损失值越大。

表 3 摩擦损失试验结果

Tab. 3 Result of friction loss test

试件编号	锚具端应力/MPa	锚具最远端应力/MPa	摩擦损失量/MPa	摩擦损失比/%
YZT1240-1	388.1	276.2	111.9	28.8
YZW1240-2	428.6	264	164.6	37.8
YZT2240-1	741.3	490.8	250.5	33.8
YZT2240-2	741.3	490.8	250.5	33.8
YZW2240-2	760.8	454.8	306.0	40.2
YZT1305-1	411.1	304.1	107.0	26.0
YZT2305-1	734.1	493.2	240.9	32.8
YZT2305-2	734.1	493.2	240.9	32.8
YZW2305-2	758.4	476.9	281.5	37.1

图3是不同参数情况下预应力CFRP布上各测点应变分布曲线,从图中可以看出,碳纤维布上应变随着距张拉端距离增加而减小。随着预应力度增加,曲线斜率增大,斜率为摩擦损失率,斜率越大,摩擦损失越大。

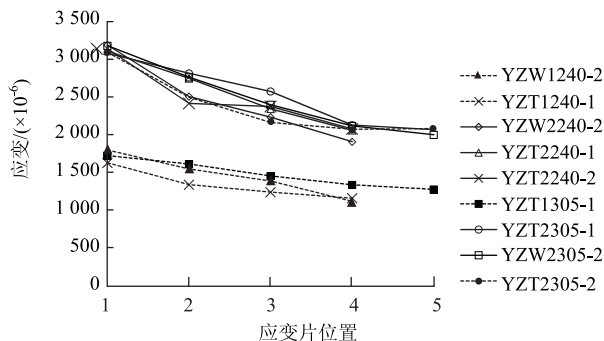


图 3 应变分布曲线

Fig. 3 Curves of strain distribution

预应力度度的影响:预应力度越大,摩擦损失越大。从表3可知,YZT2240-1的摩擦损率为33.8%,YZT1240-1的摩擦损率为28.8%;YZW1240-2的摩擦损率为37.8%,YZW2240-2的摩擦损率为40.2%;YZT2305-1的摩擦损率为32.8%,YZT1305-1的摩擦损率为26%。由此可见,预应力度为10%的摩擦损失率比预应力为20%的摩擦损失率降低5%左右。

圆柱表面粗糙度的影响:圆柱表面涂胶比不做处理的摩擦损失小。通过表3知,YZT1240-1的摩擦损失率为28.8%,YZW1240-2的摩擦损失率为37.8%;YZW2240-2的摩擦损失率为40.2%,YZT2240-1的摩擦损失率为33.8%;YZT2305-1的摩擦损失率为32.8%,YZW2305-2的摩擦损失率为37.1%。这说明圆柱表面涂胶,能有效减少摩擦损失。

圆柱直径大小的影响:圆柱直径越大,摩擦损失越小。根据表3可以看出,YZT1240-1的摩擦损失率为28.8%,YZT1305-1的摩擦损失率为26%;YZW2240-2的摩擦损失率为40.2%,YZW2305-2的摩擦损失率为37.1%;YZT2240-1的摩擦损失率为33.8%,YZT2305-1的摩擦损失率为32.8%。直径越大的圆柱产生的摩擦损失越小。

分析上述数据发现,当预应力度大小与圆柱直径相同时,将柱表面涂胶可降低摩擦损失比5%~7%,对摩擦损失的影响最大;预应力度大小的影响次之,预应力度由0.2降至0.1,可降低摩擦损失比3%~5%;柱直径大小对摩擦损失的影响最小,柱直径由240 mm增大至305 mm,可降低摩擦损失比1%~3%。

3.2 碳纤维布松弛损失的分析

图4为不同条件下CFRP布应力损失随时间的变化曲线。图中纵坐标轴上“0”表示张拉结束后测点的初始松弛应力值,纵坐标负半轴表示松弛损失量在增大。表4为碳纤维布长期的应力松弛损失量。其中松弛率为张拉结束后碳纤维布总松弛损失量与初始预应力值之比。

从图4中可看出,碳纤维布锚具近端测点松弛损失幅度最大,而锚具远端测点处的松弛损失幅度最小。

对于CFRP布表面涂胶,由表4可知,总松弛损失量为22.1~40.5 MPa,总松弛损失量是当松弛损失处于稳定时,CFRP布上所有测点的松弛损失之和的平均值。其中预应力松弛损失过程分为3个阶段:

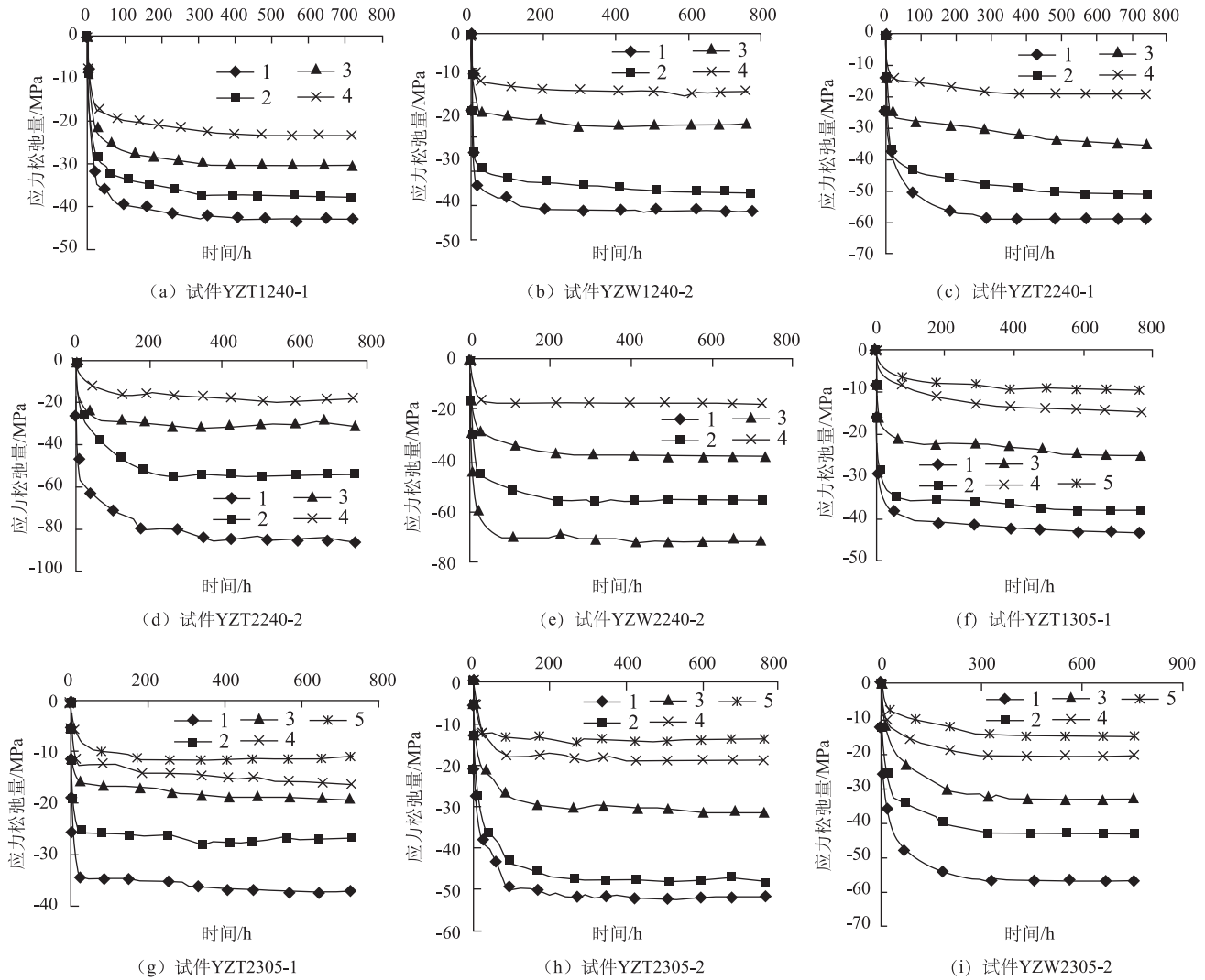


图4 碳纤维布应力损失值-时间关系

Fig. 4 Stress loss of CFRP sheets vs. time

胶体固化前、胶体固化后、松弛损失趋于稳定阶段。

第1阶段,从涂胶到完全固化这个过程需要12 h左右,松弛损失量占总松弛损失量的60.4%以上。

第2阶段,12 h至100 h之间为胶体固化后CFRP布的应力损失阶段。在100 h左右CFRP布松弛损失量占总松弛损失量的81%~87%。这是因为胶体的黏结和固化后作用,阻止了碳纤维布自由收缩,松弛幅度变小,松弛损失稳定时间缩短。

第3阶段,400 h以后应力损失变化小于0.24 MPa,曲线趋于平缓,此阶段损失量占总损失量的98.5%以上。

对于CFRP布表面没涂胶情况,由表4可知,总松弛损失量为30~52.1 MPa,绝大部分松弛损失量在12 h左右均小于CFRP布表面涂胶情况。当达到100 h左右松弛损失量达到总松弛量的72%~83.6%。

从松弛损失的发展趋势来看,发现CFRP布表面有无涂胶对松弛损失的影响主要发生在第1、2个阶段,当测试到400 h左右,CFRP布表面有无涂胶影响不明显。

CFRP布表面有无涂胶影响:由表4可以看出,YZT2240-2在12,100,400 h的平均松弛量均大于YZT2240-1。且在12 h左右,YZT2240-1的松弛量达到总松弛量的67.7%,而YZT2240-2的松弛量达到总松弛量的57.2%。所以CFRP布表面涂胶的松弛损失小于CFRP布表面没涂胶。

预应力度大小的影响:在CFRP布涂胶的情况下,将YZT2240-1与YZT1240-1对比,从表4中发现,YZT2240-1在12,100,400 h的平均松弛量均大于YZT1240-1;在CFRP布不涂胶的情况下,将YZW2240-2与YZW1240-2对比,由表4

表 4 长期的应力松弛损失量

Tab 4 Long-term stress relaxation loss

参数编号	初始预应 力值/MPa	12 h 松弛损 失量平均 值/MPa	12 h 占总松 弛损失量 百分比/%	100 h 以后松 弛损失量 平均值/MPa	100 h 以后占 总松弛损失 量百分比/%	400 h 以后松 弛损失量平 均值/MPa	400 h 以后占 总松弛损失 量百分比/%	总松弛损 失量/MPa	松弛率/%
YZT1240-1	384.8	20.8	60.4	29.76	86.1	34.5	100	34.5	9.0
YZW1240-2	425.1	30.4	78.8	31.32	81	38.1	98.7	38.6	9.1
YZT2240-1	735.2	27.1	67.7	33.41	82.5	40.1	99	40.5	5.5
YZT2240-2	735.2	27.6	57.2	37.73	78.2	47.2	98	48.2	6.6
YZW2240-2	754.5	33.1	63.9	43.44	83.6	51.8	99.5	52.1	6.9
YZT1305-1	407.7	17.2	78	19.30	87	21.8	98.5	22.1	5.4
YZT2305-1	728.0	18	68.2	21.38	81	25.6	97.3	26.3	3.6
YZT2305-2	728.0	15.3	51.1	23.71	78.9	28.5	95	30	4.1
YZW2305-2	752.1	16.5	52	22.97	72	30.0	94	31.9	4.2

注：松弛损失的平均值是 CFRP 布上所有测点对应时刻的松弛损失量之和的平均值。

可知, YZW2240-2 在 12, 100, 400 h 的平均松弛量均大于 YZW1240-2。这说明预应力越大, 松弛损失量越大。

圆柱直径大小的影响：在 CFRP 布不涂胶的情况下, 将 YZT2305-2 与 YZT2240-2 对比, 从表 4 中发现, YZT2240-2 在 12, 100, 400 h 的平均松弛量均大于 YZT2305-2。将 YZW2305-2 与 YZW2240-2 对比, 发现 YZW2240-2 在 12, 100, 400 h 的平均松弛量均大于 YZW2305-2, 近似 2 倍关系。这说明直径越大, CFRP 布越长, 松弛损失量越小。

分析上述数据发现, 圆柱直径大小和预应力度对松弛率的影响最大, 柱直径由 240 mm 增大至

305 mm, 可降低松弛率 1.9% ~ 3.6%; 预应力度对松弛率的影响程度基本与柱直径相同, 预应力度由 0.1 增加至 0.2, 松弛率降低 1.8% ~ 3.5%, 但随着预应力度的增大, 总松弛损失量也有所增大; CFRP 布表面是否涂胶对松弛率的影响最小, 布表面涂胶可降低松弛率 0.5% ~ 1.1%。

3.3 预应力损失的分析

表 5 为各类参数的预应力损失量。从表中可知, 在摩擦损失和松弛损失这两大影响因素中, 发现摩擦损失占主要部分, 摩擦损失占总损失值的 76.4% 以上, CFRP 布表面涂胶情况下的预应力松弛量较不做处理的情况小。

表 5 预应力损失量

Tab. 5 Prestress loss

参数编号	CFRP 布表 面处理情况	摩擦损失 值/MPa	松弛量平均 值/MPa	预应力总损 失值/MPa	初始预应力 值/MPa	预应力总损失占初始 预应力值比值/%	摩擦损失占总 损失比值/%
YZT1240-1	涂胶	110.9	34.3	145.2	384.8	37.7	76.4
YZW1240-2	不做处理	163.3	38.3	201.6	425.1	47.4	81.0
YZT2240-1	涂胶	248.5	40.2	288.7	735.2	39.3	86.1
YZT2240-2	不做处理	248.5	47.8	296.3	735.2	40.3	83.9
YZW2240-2	不做处理	303.5	51.6	355.1	754.5	47.1	85.5
YZT1305-1	涂胶	106.1	21.9	128.0	407.7	31.4	82.9
YZT2305-1	涂胶	239	26.2	265.1	728.0	36.4	90.1
YZT2305-2	不做处理	239	29.8	268.7	728.0	36.9	88.9
YZW2305-2	不做处理	279.2	31.7	310.8	752.1	41.3	89.8

圆柱的直径大小影响：由表 5 可知, 在 CFRP 布表面不涂胶情况下, YZT2305-2 的总损失值为 268.7 MPa, 其中摩擦损失为 239 MPa, 而 YZT2240-2 的总损失值为 296.3 MPa, 其中摩擦损失为 248.5 MPa。YZW2305-2 的总损失值为 310.8 MPa, 其中摩擦损失为 279.2 MPa; 而 YZW2240-2 的总损

失值为 355.1 MPa, 其中摩擦损失为 303.5 MPa。在 CFRP 布表面涂胶的情况下, YZT1240-1 的总损失值为 145.2 MPa, 摩擦损失为 110.9 MPa, 而 YZT1305-1 的总损失值为 128 MPa, 摩擦损失值为 106.1 MPa。YZT2305-1 的总损失为 265.1 MPa, 其中摩擦损失值为 239 MPa, 而 YZT2240-2 的总损失

值为 296.3 MPa, 其中摩擦损失值为 248.5 MPa。因此直径越小, 预应力总损失值越大, 摩擦损失越大。

预应力度大小影响: 由表 5 可以看出, 在 CFRP 布表面涂胶情况下, YZT2240-1 的总损失值为 288.7 MPa, 其中摩擦损失为 248.5 MPa, 而 YZT1240-1 的总损失值为 145.2 MPa, 其中摩擦损失为 110.9 MPa; 在圆柱表面没涂胶情况下, YZW2240-2 的总损失值为 355.1 MPa, 其中摩擦损失为 303.5 MPa, 而 YZW1240-2 的预应力总损失值为 201.6 MPa, 其中摩擦损失为 163.3 MPa。这说明预应力度越大, 摩擦损失越大, 相应的总损失值越大。

圆柱表面有无涂胶影响: 由表 5 可见, 在 CFRP 布表面均不涂胶情况下, YZT2240-2 的总损失值为 296.3 MPa, 其中摩擦损失占预应力总损失的 83.9%; YZW2240-2 的总损失值为 355.1 MPa, 其中摩擦损失占预应力总损失的 85.7%。这说明圆柱表面不涂胶, 总损失值越大。

CFRP 布表面有无涂胶: 由表 5 可知, 对于 YZT2240-2, 在 CFRP 布表面不涂胶的情况下, 总损失值为 296.3 MPa; 对于 YZT2240-1 在 CFRP 布表面涂胶的情况下, 总损失值为 288.7 MPa。这说明 CFRP 布表面涂胶, 能有效减小 CFRP 布的松弛损失。

分析上述数据发现, 在预应力损失中摩擦损失占主要部分, 摩擦损失占总损失比值的 76.4% ~ 90.1%, 松弛损失所占比例较小, 占总损失比值的 9.9% ~ 23.6%; 圆柱表面是否涂胶对总损失值占总预应力值比值的影响最大, 当其他条件不变时, 圆柱表面涂胶可降低总损失比的 4.2% ~ 6.8%; 圆柱直径的影响程度次之, 柱直径由 240 mm 增加至 305 mm, 总损失比降低 1.9% ~ 6.3%; 预应力度影响程度低于柱直径, 当预应力度由 0.2 降低至 0.1 时, 总损失比降低 1.6% ~ 5%; CFRP 布表面是否涂胶对总损失比的影响最小, 将 CFRP 布表面涂胶可降低总损失比的 0.5% ~ 1%。设计时应采取柱表面涂胶, 增大柱直径等方式减少摩擦损失, 提高有效预应力, 取得更好的加固效果。

4 结论

通过本试验得出以下结论:

(1) CFRP 布加固圆柱的预应力损失主要来源于摩擦损失, 该项损失占总损失的 76.4% 以上, 而 CFRP 布应力松弛损失相对较小, 占总损失的 9.9% ~ 23.6%。

(2) 在其他条件相同情况下, 圆柱直径越小、

预应力度越大、以及 CFRP 布表面不涂胶, 预应力损失值越大。

(3) 在其他条件相同情况下, 预应力度越大、圆柱直径越小、CFRP 布表面不涂胶, 松弛损失越大。CFRP 布表面有无涂胶对松弛损失的影响, 主要发生在胶体固化后 100 h 内, 其后影响不明显。

(4) 根据试验结果分析, 减少 CFRP 布预应力损失的措施有: 对加固圆柱表面涂胶; CFRP 布表面涂胶; 改善施工工艺, 进一步减少张拉过程中的预应力损失。

参考文献:

References:

- [1] 岳清瑞. 我国碳纤维材料 (CFRP) 加固修复技术研究应用现状与展望 [J]. 工业建筑, 2000, 30 (4): 23-26.
YUE Qing-rui. Present Status of Research and Application of Strengthening and Repairing Technology with Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) and Its Outlook in China [J]. Industrial Building, 2000, 30 (4): 23-26.
- [2] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T, et al. FRP-strengthened RC Structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002: 35-73.
- [3] 周长东, 田腾, 吕西林, 等. 预应力碳纤维条带加固混凝土圆墩抗震性能试验 [J]. 中国公路学报, 2012, 25 (4): 57-66.
ZHOU Chang-dong, TIAN Teng, LÜ Xi-lin, et al. Test on Seismic Performance of RC Circular Piers Strengthened with Pre-stressed CFRP Belts [J]. Journal of China Highway, 2012, 25 (4): 57-66.
- [4] 周长东, 田腾, 吕西林, 等. 预应力碳纤维条带加固高轴压比混凝土圆柱抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33 (11): 115-123.
ZHOU Chang-dong, TIAN Teng, LÜ Xi-lin, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Circular RC Columns Strengthened with Pre-stressed CFRP Belts under High Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33 (11): 115-123.
- [5] 易亚敏. 预应力 CFRP 布加固混凝土方柱轴心受压试验及有限元分析 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
YI Ya-min. Test of Prestressed CFRP Reinforced Concrete Columns Subjected to Axial Compression and FEA [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [6] 周长东, 白晓彬, 赵锋, 等. 预应力纤维布加固混凝土圆形截面短柱轴压性能试验 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34 (2): 17-26.
ZHOU Chang-dong, BAI Xiao-bin, ZHAO Feng, et al.

- Experimental Study on Circular Concrete Short Columns Strengthened with Pre-stressed FRP under Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (2): 17-26.
- [7] COSTA I, BARROS J. Prestress Losses in NSM-CFRP Flexurally Strengthened RC Beams [J]. Strain, 2015, 51 (4): 276-287.
- [8] 江胜华, 侯建国, 何英明. 考虑预应力损失的 CFRP 布加固钢筋混凝土梁正常使用极限状态可靠度研究 [J]. 土木工程学报, 2015 (11): 36-43.
- JIANG Sheng-hua, HOU Jian-guo, HE Ying-ming. Reliability Research of Serviceability Limit States for RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets Considering Prestress Loss [J]. China Civil Engineering Journal, 2015 (11): 36-43.
- [9] 黄照南. CFRP 修复震后严重破坏钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- HUANG Zhao-nan. Experimental Investigation on Seismic Behavior of Severe Earthquake-damaged RC Bridge Piers Repaired with Wrapped CFRP Sheets [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [10] 杨建江, 张雅琴. CFRP 筋预应力损失研究进展 [J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42 (4): 30-35.
- YANG Jian-jiang, ZHANG Ya-qin. Research Progress of Prestress Loss of CFRP Bars [J]. Sichuan Building Science, 2016, 42 (4): 30-35.
- [11] 杨勇新, 李庆伟, 岳清瑞. 预应力碳纤维布加固混凝土梁预应力损失试验研究 [J]. 工业建筑, 2006, 36 (4): 5-8.
- YANG Yong-xin, LI Qing-wei, YUE Qing-rui. Experimental Research on Prestress Loss in Technique of Concrete Structure Strengthened with Prestressed CFRP Sheets [J]. Industrial Construction, 2006, 36 (4): 5-8.
- [12] 黄金林, 黄培彦, 郑小红. 预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁预应力损失试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 1 (36): 85-91.
- HUANG Jin-lin, HUANG Pei-yan, ZHENG Xiao-hong. Experimental Study of Prestress Losses of RC Beams Strengthened with Prestress FRP [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (1): 85-91.
- [13] 邓朗妮, 张鹏, 杨帆, 等. 预应力碳纤维板加固混凝土钢结构预应力损失研究 [J]. 工业建筑, 2012, 42 (9): 71-74.
- DENG Lang-ni, ZHANG Peng, YANG Fan, et al. Study of Prestress Loss of Steel Structure Strengthened with Prestress CFRP Plates [J]. Industrial Construction, 2012, 42 (9): 71-74.
- [14] 许晓, 艾军, 潘建伍, 等. 预应力纤维布加固钢筋混凝土小梁工艺及预应力损失试验研究 [J]. 工业建筑, 2013, 43 (12): 129-132.
- XU Xiao, AI Jun, PAN Jian-wu, et al. Experimental Research on Technique of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Prestressed FRP Sheets and Prestress Loss [J]. Industrial Construction, 2013, 43 (12): 129-132.
- [15] 朱永祥, 王文伟. 预应力碳纤维布加固混凝土梁预应力长期损失的增量微分法 [J]. 重庆大学学报, 2015, 38 (4): 61-66.
- ZHU Yong-xiang, WANG Wen-wei. Incremental Differential Model for Long-term Prestress Losses of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets [J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38 (4): 61-66.
- [16] 王文伟, 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究 [J]. 土木工程学报, 2012 (11): 88-94.
- WANG Wen-wei, DAI Jian-guo, ZHANG Lei. Experimental Study and Analytical Modeling of Prestress Losses of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Post-tensioned CFRP Sheets [J]. China Civil Engineering Journal, 2012 (11): 88-94.
- [17] 何初生, 王文伟, 杨威, 等. 预应力 CFRP 布加固钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41 (4): 841-847.
- HE Chu-sheng, WANG Wen-wei, YANG Wei, et al. Experimental Study on Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Prestressed CFRP Sheets [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41 (4): 841-847.
- [18] 黄侨, 万世成, 侯旭. 桥梁预应力碳纤维板加固中的参数取值及损失计算方法研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (9): 52-57.
- HUANG Qiao, WAN Shi-cheng, HOU Xu. Study on Parameter Determination and Calculation Method of Prestress Loss of Prestressed CFRP Plates in Bridge Reinforcement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (9): 52-57.
- [19] 江胜华, 侯建国, 何英明. 考虑预应力损失的 CFRP 布加固钢筋混凝土梁正常使用极限状态可靠度研究 [J]. 土木工程学报, 2015 (11): 36-43.
- JIANG Sheng-hua, HOU Jian-guo, HE Ying-ming. Reliability Research of Serviceability Limit States for RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets Considering Prestress Loss [J]. China Civil Engineering Journal, 2015 (11): 36-43.

- GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. Application of Distance Discriminant Analysis Method to Classification of Engineering Quality of Rock Masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (1): 190-194.
- [14] 刘希亮, 赵学胜, 陆锋, 等. 基于 GA-SVM 的露天矿抛掷爆破抛掷率预测 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (12): 1999-2005.
- LIU Xi-liang, ZHAO Xue-sheng, LU Feng, et al. A GA-SVM Based Model for Throwing Rate Prediction in the Open-pit Cast Blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (12): 1999-2005.
- [15] 温廷新, 孙红娟, 徐波, 等. 矿区采空塌陷危险性预测的 RS-SVM 模型 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25 (10): 16-21.
- WEN Ting-xin, SUN Hong-juan, XU Bo, et al. RS-SVM Model for Predicting Underground Goaf Collapse Risk [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25 (10): 16-21.
- [16] 龙文, 梁昔明, 龙祖强, 等. PSO-LSSVM 灰色组合模型在地下水埋深预测中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33 (1): 243-248.
- LONG Wen, LIANG Xi-ming, LONG Zu-qiang, et al. LSSVM Grey Combined Forecasting Model Based on PSO and Its Application in Groundwater Dynamic Prediction [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33 (1): 243-248.
- (上接第48页)
- [20] 江胜华, 侯建国, 何英明. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁的抗弯性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29 (增1): 10-14.
- JIANG Sheng-hua, HOU Jian-guo, HE Ying-ming. Experimental Study on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29 (S1): 10-14.
- [21] 尚守平, 张宝静, 吕新飞. 预应力碳纤维板加固梁桥长期徐变性能的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (5): 68-74.
- SHANG Shou-ping, ZHANG Bao-jing, LÜ Xin-fei. Experimental Study on Long-term Creep Behavior of Beam Bridge Strengthened with Prestressed CFRP Plate [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (5): 68-74.
- [22] WANG W W, DAI J G, HARRIES K A, et al. Prediction of Prestress Losses in RC Beams Externally Strengthened with Prestressed CFRP Sheets/Plates [J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2014, 33 (8): 699-713.
- [23] 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.
- (1): 243-248.
- [17] 周翠英, 张亮, 黄显艺. 基于改进 BP 网络算法的隧洞围岩分类 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2005, 30 (4): 480-486.
- ZHOU Cui-ying, ZHANG Liang, HUANG Xian-yi. Classification of Rocks Surrounding Tunnel Based on Improved BP Network Algorithm [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2005, 30 (4): 480-486.
- [18] 邵良杉, 徐波. 基于因子分析与 Fisher 判别分析法的隧洞围岩分类研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (7): 98-119.
- SHAO Liang-shan, XU Bo. Research on Research on Classification of Tunnel Surrounding Rock Based on Factor Analysis and Fisher Discriminant Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (7): 98-119.
- [19] 李鹏远, 姜谔男. 公路隧道施工期围岩快速分类极限学习机模型研究 [J]. 城市勘测, 2016 (1): 149-153.
- LI Peng-yuan, JIANG An-nan. Study on the Extreme Learning Machine Model of Highway Tunnel Rapid Surrounding Rock Classification in Construction Phase [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2016 (1): 149-153.
- ZHOU Chang-dong, LI Ji, LÜ Xi-lin. Experimental Research on Pre-stress Loss of Concrete Circular Columns Confined with Post-tensioned FRP [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2012, 40 (12): 1760-1765.
- [24] 李季. 纤维复合材料自锁式锚具设计及其性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- LI Ji. Study on Design and Performance of Self Locking Anchorage for Fiber Composite [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [25] 周长东, 李季, 朱万旭, 等. 碳纤维复合材料自锁式锚具设计及力学性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34 (2): 141-148.
- ZHOU Chang-dong, LI Ji, ZHU Wan-xu, et al. Design of Self-locking Anchor System of FRP and Research on Mechanical Properties [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (2): 141-148.
- [26] 张建伟, 张瑞云, 杜修力. 芳纶纤维布松弛性能试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27 (1): 73-77.
- ZHANG Jian-wei, ZHANG Rui-yun, DU Xiu-li. Experiment of Relaxation Performance of AFRP Sheets [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27 (1): 73-77.