

# 碳纤维板蠕变性能研究综述

鲁 鹏, 罗德康, 陈柏宏, 孙权伟, 汤凯菱

重庆科技学院, 建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2022年10月16日; 录用日期: 2022年11月17日; 发布日期: 2022年11月24日

## 摘 要

碳纤维增强聚合物片材(CFRP)作为一种新型材料, 在结构工程领域作为加固材料, 通过对构件施加预应力大幅度提升结构的抗弯承载能力, 常用于桥梁的加固工程中, 可显著延长结构的耐久性, 大幅度减少结构的维护费用, 碳纤维板材料在长期受力过程中会产生蠕变和应力松弛, 蠕变性能会削弱结构加固效果, 进而影响结构正常工作, 甚至会导致工程结构破坏而造成巨大经济损失, 因此, 为保证碳纤维拉索结构的安全和耐久性, 针对碳纤维板材料的蠕变性能研究十分有必要。本文主要归纳国内外对于蠕变性能的综合研究以及碳纤维拉索系统的蠕变影响因素, 并探究应该如何对锚固系统锚固下的碳纤维拉索进行整体性能试验研究。

## 关键词

CFR拉索, 蠕变, 耐久性, 力学模型, 松弛

# Review on Creep Properties of Carbon Fiber Plates

Peng Lu, Dekang Luo, Baihong Chen, Quanwei Sun, Kailing Tang

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

Received: Oct. 16<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 17<sup>th</sup>, 2022; published: Nov. 24<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Carbon fiber reinforced polymer sheet (CFRP), as a new material, is widely used in structural engineering. As a reinforcement material, the flexural bearing capacity of the structure is greatly improved by applying prestress to the components. It is often used in bridge reinforcement engineering, which can significantly extend the durability of the structure and greatly reduce the maintenance cost of the structure. In the long-term stress process, the carbon fiber plate material will produce creep and stress relaxation, and the creep performance will weaken the reinforce-

ment effect of the structure, thus affecting the normal operation of the structure. It may even lead to structural damage and huge economic losses. Therefore, in order to ensure the safety and durability of the carbon fiber cable structure, it is necessary to study the creep properties of carbon fiber sheet materials. This paper sums up the factors influencing the creep of carbon fiber cable system, and explores how to conduct the overall performance test research of carbon fiber cable anchored by the anchoring system.

## Keywords

CFR Cable, Creep, Durability, Mechanical Model, Slack

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. 研究背景

桥梁及房屋建筑的各种构件随着使用年限的增加,或因荷载等级增加等等多方面原因,结构性能已不能继续满足使用功能要求时,这就需要进行必要的加固与修复,使其恢复使用功能、获得等于或大于原有的抗力。针对桥梁结构的损坏情况,如采用全部更换或重新建设则耗资巨大,且需要中断交通,这将对国民经济和人民生活造成很大影响,切实可行的办法是对这些有病害的构件或结构采取必要的加固补强措施,以延长其使用寿命,提高可靠度。碳纤维板[1]凭借轻质高强、耐腐蚀[2]性强等特点在桥梁加固中得以应用。预应力碳纤维板加固技术是近几年发展起来的新兴技术,不同的加固方法对桥梁加固效果的影响很大[3],而对于这方面的研究比较少。建国以来,我国基础设施建设飞速发展,桥梁建设成绩举世瞩目。据统计,截至2018年底,中国共有公路桥梁85.15万座,其中特大桥梁4000余座,预期未来每年还将新增2~3万座;铁路桥梁6.5万座,其中高速铁路桥梁建设成就特别突出;市政桥梁与特种桥梁也有快速发展。其中大部分的桥梁由于使用时间较长,建国初期的设计标准较低,施工水平不高,材料质量不高和荷载的增加等众多原因,导致老化、破损等问题,需要拆除重建或补强加固。如果采用拆除重建则需要耗费巨大的人力物力财力,给国家和社会带来巨大的经济负担。因此,研究开发效果显著,技术便捷、造价低的加固技术对我国桥梁建设具有重要意义。

近年来,碳纤维板对钢筋混凝土、钢结构或其他结构的加固相比于其他加固技术具有很大的优势,是目前加固技术的发展趋势。但由于碳纤维板材在实际工程中往往长期承受荷载会产生松弛,对结构长期承载能力稳定性产生影响,关于碳纤维材料[4]松弛的力学性能未被人们完全了解,为保证结构的安全,对波形锚夹具夹持下的碳纤维材料松弛性能的研究刻不容缓。CFRP板材的蠕变性能对加固效果的影响在以后的加固工作中有着极为重要的影响。研究成果对于预应力碳纤维加固技术的进一步发展和应用提供参考。

## 2. 国内外 CFRP 拉索蠕变试验研究

### 2.1. 国内研究现状

任慧韬[5]于2003年设计了拉伸玻璃纤维片材和碳纤维片材的实验装置,测试并分析了不同粘结剂对纤维片材拉伸性能的影响及碳纤维片材的徐变性能,得出拟合的徐变-时间曲线,分析了徐变对结构加固效果的影响和对预应力碳纤维片材加固钢筋混凝土的影响以及各种环境对复合材料性能影响的原因。

同时任慧韬、胡安妮针对 0.11 mm 厚度的进口碳纤维片材进行了不同应力水平下的蠕变试验研究, 试验采用碳纤维片材采用钢夹具夹持, 钢夹具放入夹具套, 将夹具套一端固定在工字钢横梁上, 另一端固定在加载筐上, 采用加载筐中堆积重物的形式加载, 保证碳纤维片材垂直受力, 试验过程中保持恒载。试验经 517 小时观测, 进行试验前后的试件抗拉强度对比, 试验结果表明: 碳纤维片材具有蠕变特性, 有明显的蠕变变化曲线; 卸载后的碳板有一定的残余应变[6]; 试验后极限拉应力出现最大下降 20%。因此对于碳纤维的松弛性能的研究可以与蠕变模型结果相对比; 而刘鹏飞, 赵启林, 王景全[7]通过试验研究了纤维片材自身的松弛性能以及外界应力、温度和材料性质对松弛性能的影响规律, 探讨了复合材料的松弛机理, 分析了常用的模拟和预测松弛行为的模型。试验方法一个是研究蠕变模型, 一个是研究蠕变变化曲线。

同济大学的曾磊[8]在梁体两端采用永久性锚具的形式, 张拉碳纤维板获得预应力。而湖南大学尚守平[9]团队研究的平板锚固系统, 并进行了预应力碳纤维板加固梁桥长期徐变性能的试验研究, 试验将预应力碳纤维板张拉和锚固装置都安置在 12 m 长的 H 型钢梁上进行, 通过固定在锚固支座上的百分表记录碳纤维板锚固端滑移量, 检验碳板锚具的长期锚固稳定性。得到的主要试验结论为: 碳纤维板在长期预应力和外界荷载作用下具有徐变特性, 徐变主要发生在张拉锚固后的前 3 个月内, 后期徐变趋于稳定; 张宝静[10]对预应力碳纤维板加固结构长期徐变性能进行了试验研究, 通过对粘贴于碳板表面的光纤光栅传感器[11]对碳纤维板长期预应力作用下的应变进行了长期观测, 得出了预应力碳纤维板加固结构的长期徐变性能。尚守平团队是百分表记录滑移量, 张宝静是传感器观测。

朱葛平, 节志宇, 张梓华, 丁勇, 侯苏伟[12]为 CFRP 筋粘结型锚固锚固区中的粘结界面提出了剪应力分布模型, 在考虑了松弛之后, 有建立了用于评估此类锚固的承载能力的模型, 评估了松弛对锚具的承载能力[13]的影响, 提出了消除松弛对锚具的负面影响的理论方法[14]。通过实验验证了在考虑松弛之前和之后建立的两个承载能力预测模型; 曹健, 王元丰, 安小平, 巩健[15]自制了实验加载装置, 对粉煤灰混凝土构件在轴向压应力作用下的徐变效应进行了研究, 比较了现有徐变模型对高强度混凝土徐变[16]是否适用, 根据实验数据和已有模型建立了高强度混凝土轴压构件徐变预测模型, 结合各国已有徐变试验数据, 对中国现行桥梁设计规范中混凝土名义徐变系数计算公式进行了修正; 吴韶斌[17]采用试验与理论分析相结合的方法, 进行了高持续荷载的混凝土徐变研究, 建立了考虑徐变与损伤耦合的混凝土非线性徐变模型, 计算了长期持续荷载下混凝土的变形; 张电杰[18]通过进行 FRP 约束混凝土柱单轴受压徐变的实验和理论研究建立了 FRP 约束混凝土徐变的预测模型, 并利用该模型对影响徐变的因素进行了分析, 在徐变试验结束后, 对其中 12 个徐变和收缩试件进行了单轴抗压试验以测定其应力应变关系曲线。三者均是从徐变预测模型出发研究。

## 2.2. 国外研究现状

M. Emara, L. Torres, M. Baena, C. Barris, M. Moawad [19]通过实验研究了用于用碳纤维增强聚合物(CFRP)层压板增强钢筋混凝土(RC)结构的结构环氧胶粘剂的松弛行为; F. Puigvert, A.D. Crocombe, L. Gil [20]使用有限元分析分别预测了粘结的 CFRP 筋锚的松弛和疲劳性能。他们均是从松弛方面研究蠕变, 一个研究的胶粘剂对于材料本身造成的蠕变影响, 另一个是从锚具对材料的锚固性能有限元模拟。

M. Nakada, Y. Miyano [21] [22]提出了一种利用在各种温度下测得的聚合物复合材料的静态强度来预测其松弛破坏时间的方法。然后, 通过实验和统计方法测量在沿单向 CFRP 长度方向的拉伸载荷作用下, 在不同温度下的静态强度。通过统计方法对单向 CFRP 的松弛破坏时间进行预测。最后, 使用许多 CFRP 链条通过实验和统计方法测量了在恒定载荷和温度下单向 CFRP 的松弛破坏时间; Ahmed K. El-Sayed, Rajeh A. Al-Zaid, Abdulaziz I. Al-Negheimish, Ahmed B. Shuraim, Abdulrahman M. Alhozaimy [23]研究了

碳纤维增强塑料(CFRP)板加固的 RC 梁的长期挠度和开裂特性,构造了五个全尺寸的梁:两个梁在静载荷下进行测试,三个梁在持续载荷下进行 600 天的测试。其中三根梁用贴在梁腹板上的 CFRP 板加固,而两根未加固的梁作为对照,提出了一种用于预测梁的裂缝宽度的分析程序。前者得到的松弛破坏时间和后者提出的预测程序均有一定的工程价值。

### 3. 试验影响因素

影响碳纤维板材蠕变的因素见图 1,其中主要分为两大类:一是材料内在因素,二是试验过程相关的外在因素。

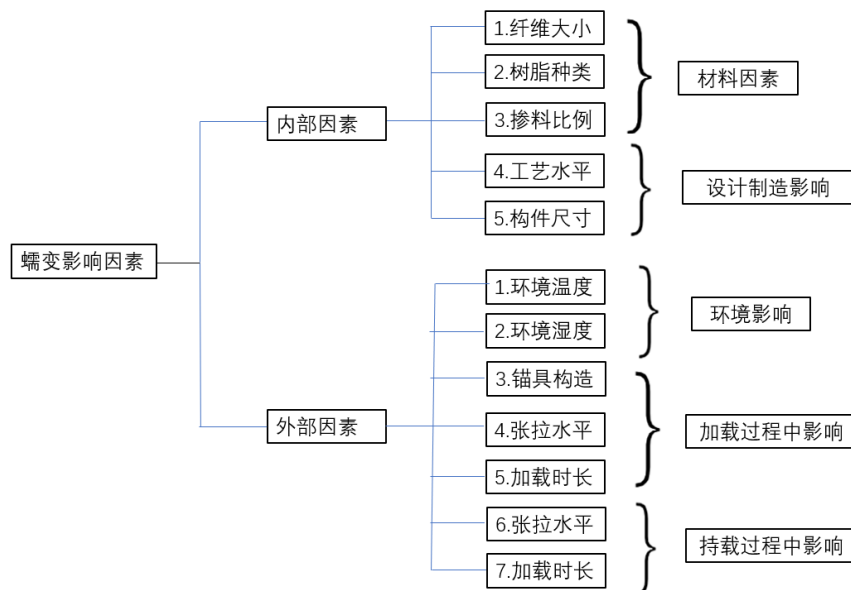


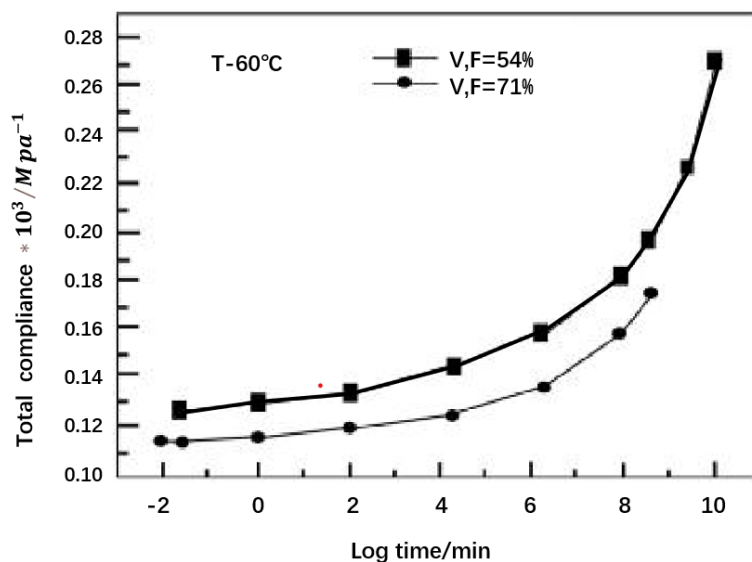
Figure 1. Creep influencing factors  
图 1. 蠕变影响因素

#### 3.1. 材料因素对碳纤维板材的蠕变影响

在树脂中掺入纤维后能起到提升基体强度,韧性,弹性模量等相关性能,由于纤维含量不同,复合材料的性能也有所差异,最终导致性能上出现差异。Chandra Viswanathan [24]进行了在 60℃,采用两种碳纤维体积含量分别为 54%, 71%两种纤维含量不同的材料进行了蠕变试验,见图 2 在 5 MPa 的拉伸作用下,明显纤维含量较大的,其材料的抗蠕变性能也随之增大,纤维含量较低的蠕变时间越长,蠕变伸长量越大,同一荷载水平下,蠕变总体的变化趋势均保持一致。由此可以证明,碳纤维增强复合材料中纤维含量的多少对整体的性能都有着显著的影响,碳纤维材料的抗蠕变性能随纤维材料的增加,其此项特性也随之增加。

#### 3.2. 应力对碳纤维板材的蠕变影响

受到的应力类型不同,其材料的蠕变也不尽相同。试件处于拉、压、弯和剪的不同受力状态下,其蠕变是不一样的。不同张拉水平下的蠕变表现也有所不同,通常来说,随着应力水平的提高,材料的蠕变柔量与蠕变速率都比低水平应力状态要略大些,受应力水平的影响的复合材料蠕变行为与受温度影响的蠕变行为影响相似。当初始张拉力大于蠕变断裂强度时,只要试验的时间足够长,哪怕后期蠕变十分缓慢,但往往也能观测到材料发生蠕变破坏。



**Figure 2.** Creep compliance diagram of carbon fiber content of 54% and 71% under 5Mpa tension

**图 2.** 5 Mpa 拉力下碳纤维含量为 54%，71% 蠕变柔量图

### 3.3. 构件尺寸对碳纤维板材的蠕变影响

Farid Bouziadi, Bensaid Boulekbache, Abdelkader Haddi, Mostefa Hamrat, Chafika Djelal [25] 预测使用碳纤维增强聚合物(CFRP)和玻璃纤维增强聚合物(GFRP)层压板体外加固钢筋混凝土(RC)梁[26]的松弛, 其中 Burge 模型有效的预测了 CFRP 加固的梁的松弛, 并认为 CFRP 的厚度会严重影响松弛。

### 3.4. 材料因素对碳纤维板材的蠕变影响

Chandra Viswanathan [27] 进行了在 60°C, 采用两种碳纤维体积含量分别为 54%, 71% 两种纤维含量不同的材料进行了蠕变试验, 在 5 MPa 的拉伸作用下, 明显纤维含量较大的, 其材料的抗蠕变性能也随之增大, 纤维含量较低的蠕变时间越长, 蠕变伸长量越大, 同一荷载水平下, 蠕变总体的变化趋势均保持一致。由此可以证明, 碳纤维增强复合材料中纤维含量的多少对整体的性能都有着显著的影响, 碳纤维材料的抗蠕变性能随纤维材料的增加, 其此项特性也随之增加。

### 3.5. 持载时间对碳纤维板材的蠕变影响

Jeong Y.S., Lee J.H. 和 Kim W.S. [28] 研究了持续荷载和高温对粘结到混凝土上的碳纤维增强聚合物(CFRP)片材随时间变化的影响。

## 4. 研究结论与展望

今后开展的蠕变相关试验中, 可对以下问题进行深入的研究:

1、拉索结构长期暴露在室外, 受外界因素影响较大, 在潮湿、炎热、暴晒等环境中, 是否会对预应力碳纤维拉索的性能产生影响还有待研究;

2、蠕变断裂应力在碳纤维板的设计中具有很高的参考价值, 国内外文献中各专家学者提出的蠕变断裂应力差异性较大, 因此, 在今后的试验中, 可以对蠕变断裂应力进行进一步的研究;

3、碳纤维板长期受力过程中, 蠕变产生的同时伴随应力松弛, 应力松弛同样会影响实际加固效果, 因此, 在后续研究中, 可进一步考虑蠕变与松弛性能同时对碳纤维材料的影响。

4、高预应力的拉索, 单层预应力板提供的预应力有限, 因此在大型结构中需要采用多层预应力碳纤维板拉索, 多层预应力碳纤维板拉索在长期持载过程中, 碳纤维板蠕变性能对结构的影响, 仍是一个值得探究的问题。

## 参考文献

- [1] 姚国文, 吴海军, 李世亚. 桥梁检测与加固技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014: 181-255.
- [2] Kamal, A.S.M. and Boulfiza, M. (2010) Durability of GFRP Rebars in Simulated Concrete Solutions under Accelerated Aging Conditions. *Journal of Composites for Construction*, **15**, 473-481. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000168)
- [3] 陈波. 多层预应力 CFRP 板加固混凝土梁协同受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [4] Wu, Z.S., Fahmy, M.F.M. and Wu, G. (2011) Damage-Controllable Structure Systems Using FRP Composites. *Journal of Earthquake and Tsunami*, **5**, 241-258. <https://doi.org/10.1142/S1793431111000966>
- [5] 任慧韬. 纤维增强复合材料加固混凝土结构基本力学性能和长期受力性能研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [6] Triantafillou, T.C., Deskovic, N. and Deuring, M. (1992) Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets. *Structural Journal*, **89**, 235-244. <https://doi.org/10.14359/2940>
- [7] 刘鹏飞, 赵启林, 王景全. 树脂基复合材料松弛性能研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(3): 109-117, 12.
- [8] 曾磊. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁试验与理论研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海同济大学, 2005.
- [9] 尚守平, 吴建任, 张毛心, 等. 预应力碳纤维板加固系统的预应力损失试验[J]. 公路交通科技, 2012, 29(1): 71-74.
- [10] 张宝静. 预应力碳纤维板加固梁桥间接刚度及长期徐变性能研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [11] Wang, X., Wu, Z., Wu, G., et al. (2013) Enhancement of Basalt FRP by Hybridization for Long-Span Cable-Stayed Bridge. *Composites Part B: Engineering*, **44**, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.001>
- [12] Ping, Z.G., Jie, Z.-Y., Zhang, Z.-H., et al. (2019) The Influence of Load Transfer Medium Creep on the Load-Carrying Capacity of the Bond-Type Anchors of CFRP Tendons. *Construction and Building Materials*, **206**, 236-247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.017>
- [13] 王胜年. 我国海港工程混凝土耐久性技术发展及现状[J]. 水运工程, 2013(z1): 1-7.
- [14] 曹健, 王元丰, 安小平, 巩健. 轴心受压粉煤灰混凝土构件徐变系数研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 73-81.
- [15] GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] 吴韶斌. 长期持续荷载下的混凝土徐变破坏研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [17] 张电杰. 考虑徐变效应的 FRP 约束混凝土塑性模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [18] Emara, M., Torres, L., Baena, M., et al. (2017) Effect of Sustained Loading and Environmental Conditions on the Creep Behavior of an Epoxy Adhesive for Concrete Structures Strengthened with CFRP Laminates. *Composites Part B*, **129**, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.026>
- [19] Puigvert, F., Crocombe, A.D. and Gil, L. (2014) Fatigue and Creep Analyses of Adhesively Bonded Anchorages for CFRP Tendons. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **54**, 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.013>
- [20] Nakada, M. and Miyano, Y. (2016) Statistical Creep Failure Time of Unidirectional CFRP. *Experimental Mechanics*, **56**, 653-658. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0049-6>
- [21] Lam, L. and Teng, J.G. (2004) Ultimate Condition of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete. *Journal of Composites for Construction*, **8**, 539-548.
- [22] Nakada, M., Okuya, T. and Miyano, Y. (2014) Statistical Prediction of Tensile Creep Failure Time for Unidirectional CFRP. *Advanced Composite Materials*, **23**, 451-460. <https://doi.org/10.1080/09243046.2014.915099>
- [23] El-Sayed, A.K., Al-Zaid, R.A., Al-Negheimish, A.I., et al. (2014) Long-Term Behavior of Wide Shallow RC Beams Strengthened with Externally Bonded CFRP Plates. *Construction and Building Materials*, **51**, 473-483. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.055>
- [24] Chandra, V. (2001) Individual and Interactive Influence of Temperature, Stress, Physical Aging and Moisture on Creep, Creep Rupture and Fracture of Epoxy Matrix and Its Composite. The University of Manitoba, Winnipeg.

- 
- [25] Bouziadi, F., *et al.* (2020) Finite Element Modeling of Creep Behavior of FRP-Externally Strengthened Reinforced Concrete Beams. *Engineering Structures*, **204**, Article ID: 109908. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109908>
- [26] Wu, Z., Wang, X., Iwashita, K., *et al.* (2010) Tensile Fatigue Behaviour of FRP and Hybrid FRP Sheets. *Composites Part B: Engineering*, **41**, 396-402. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.02.001>
- [27] Ali, N.M., Wang, X. and Wu, Z. (2013) Integrated Performance of FRP Tendons with Fiber Hybridization. *Journal of Composites for Construction*, **18**, A4013007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000427](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000427)
- [28] Jeong, Y.S., Lee, J.H. and Kim, W.S. (2016) Combined Effects of Sustained Load and Temperature on Pull-Off Strength and Creep Response between CFRP Sheet and Concrete Using Digital Image Processing. *Korea Concrete Institute*, **28**, 535-544. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2016.28.5.535>