

# CFRP 보강근을 이용한 콘크리트 보의 피로거동

## Fatigue Behavior of Concrete Beam Using CFRP Rebar

장 페 원<sup>1</sup>김 옥 규<sup>2</sup>최 현<sup>3\*</sup>Zhang, Pei-Yun<sup>1</sup>Kim, Okk-Yue<sup>2</sup>Cui, Xian<sup>3\*</sup>*Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, yanbian University, gongyuan-lu, yanji, 133002, china <sup>1</sup>**Professor, Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Seowon-Gu, Chungbuk, 28644, Korea <sup>2</sup>**Assistant Professor, Department of Civil Engineering, yanbian University, gongyuan-lu, yanji, 133002, china <sup>3</sup>*

### Abstract

Recently, research has been carried out into the use of carbon fiber reinforced polymer (CFRP), which has good tensile strength and corrosion resistance, as an alternative to rebar. But as of yet, the research into fatigue failure of CFRP is insufficient. In this paper, an analysis was performed of the mechanical behavior and failure patterns of CFRP reinforced concrete beams according to static and cyclic loads, in order to evaluate the safety and validity of CFRP rebar as an alternative material for rebar. The cyclic load ranged from 10 % to 70% of the ultimate load, and was loaded at a speed of 3Hz using a sine wave in the form of a three-point loading method. Through the static load test, the maximum load or stiffness of the beam was found to increase remarkably with the increase of the reinforcement, but the fatigue test showed that the number of repetitions decreased and the amount of deflection increased with the increase of the reinforcement.

Keywords : cfrp bar, fatigue behavior, crack, strengthening

## 1. 서 론

철근 콘크리트 구조물은 역학적으로나 재료적으로 많은 장점을 가지고 있지만 철근이 부식에 취약하다는 단점을 가지고 있고 이것은 구조물의 내구성 저하에 중요한 요인으로 작용한다. 통계자료에 의하면 미국의 16만 개소 철근 콘크리트 교량의 철근 부식으로 인한 보수비용은 220억불에 달하며 유럽도 연간 18억불의 보수비용을 지불하고 있다[1]. 이러한 부식 문제를 해결하기 위하여 비부식성 재료를 사용한 철근을 대체할 수 있는 재료를 개발하여야 할 것이며 그러한 재료중 하나로 섬유복합재료(fiber reinforced polymer, 이하 FRP)를 이용한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.

FRP는 기존의 철근에 비해 우수한 내 부식성, 높은 인장 강도, 특히 FRP의 열팽창계수는 콘크리트와 비슷하여 온도에 의한 응력이 아주 작으므로 콘크리트와의 부착파괴가 발생하지 않아 콘크리트 구조물의 보강재로 사용될 수 있는 가장 적합한 조건을 가지고 있다. 그러나 FRP근은 취성재료로 소성변형이 없이 탄성 거동을 하며 재료의 탄성계수가 작아 과도한 처짐이 발생하여 응력파괴 위험이 발생하는 단점이 있다.

국외에서는 FRP보강 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 이에 대한 설계기준을 제정하여 사용하고 있는 나라는 미국, 캐나다, 유럽, 일본정도로 많지 않다[2]. 또한 부재의 성능평가는 정적 실험을 위주로 동적 거동에 대한 실험 데이터는 많지 않은 실정이다. 즉, 최대 사용하중 상태에서 반복 하중에 대한 안전성 검토는 미흡한 실정이다 [3].

따라서 본 연구에서는 CFRP보강 콘크리트 보를 제작하여 정적 및 반복 하중에 따른 역학적 거동과 파괴형태를

Received : September 2, 2019

Revision received : December 6, 2019

Accepted : December 11, 2019

\* Corresponding author : Cui, Xian

[Tel: 86-156-4332-4605, E-mail: concsky@naver.com]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

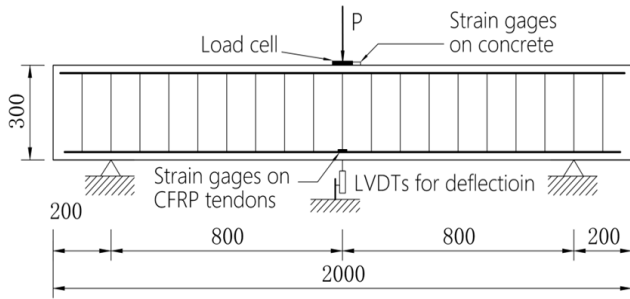


Figure 1. Dimensions of specimen

분석하고 철근 콘크리트 보와 비교 분석하여 철근의 대체 재료로서 CFRP보강 근 사용에 대한 안전성과 타당성을 평가하도록 하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 시험체 제원

시험체는 200×300×2,000mm로 제작하였다. RS2S는 압축부와 인장부에 D14 철근을 각각 2개씩 배근하였고 BS2F는 압축부와 인장부에 D14 철근과 CFRP근을 각각 2개씩 배근하였으며 BS3F는 압축부에 D14 철근을 2개, 인장부에 D14 CFRP근을 3개 배근하였다. 스티럽을 D8 철근을 19@100으로 전단 보강하였고 Figure 1과 같은 제원으로 제작하였다.

#### 2.1.1 실험 및 데이터 수집

실험은 3점 재하법으로 피로 실험 시 반복 하중은 sine파를 이용하여 재하 속도에 큰 영향을 받지 않는 3 Hz로 재하하였다. 반복 하중의 범위는 시험체의 정적 실험을 실시하여 얻은 결과로부터 파괴 하중 값을 기준으로 반복 하중의 범위를 결정하였다.

피로 실험 방법은 ACI 440.3R에 제시된 방법을 참조하여 최소 하중과 최대 하중을 일정하게 유지하는 방법을 선택하여 실시하였다[4]. 본 실험에서는 정적 실험을 통해서 얻은 극한 하중의 10%를 최소 하중으로, 파괴 하중의 70%를 최대 하중으로 변화시키면서 피로 실험을 실시하였다.

피로 실험 기준으로는 총 200만회 이상의 반복 하중 가력에 대하여 안전해야하나, 본 실험은 소형 실험체로서 보강재의 손상이나 보의 전단파괴가 발생하면 보강근의 작용을 상실하였다고 판단하고 피로 실험을 중지하고 정적 재하

실험을 진행하였다.

정적 실험인 경우 하중 제어방식으로 0.5 kN/sec의 속도로 재하하고 약 10 kN 마다 균열을 확인하여 표시하였다. 하중은 Load cell을 이용하여 수집하고 시험체의 변위를 측정하기 위하여 Figure 1과 같이 보 중앙에 변위계를 설치하였다. 데이터는 동적 변형률 측정기DH3817를 이용하여 CFRP와 콘크리트 압축부에 strain gage를 부착하여 수집하였다.

피로 실험 시 반복 횟수 0, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 100000회가 될 때 반복 하중을 멈추고 정적 실험을 실시하여 보의 강도변화를 측정하였다.

## 2.2 재료

### 2.2.1 콘크리트

시험체에 적용된 콘크리트는 C30( $f_c=14.3\text{MPa}$ ), 시멘트는 42.5#(보통 포틀랜드 시멘트), 슬럼프는12cm, 굵은 골재 최대치수는 25mm를 초과 하지 않았다. 실험 시 측정 한 6개 공시체의 28일 평균 강도는 35.6MPa이었다[5].

### 2.2.2 철근

시험체에 사용된 압축부와 인장부 철근은 3등급 D14이형 철근을 사용하고, 스티럽은 D8 철근을 사용하였다. 철근의 인장시험결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Test results of tensile strength of rebar

Type	Diameter (mm)	Ultimate strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Elastic modulus (GPa)
HRB400	D14	565	430	205.4
	D10	542	416	210.6

### 2.2.3 CFRP

CFRP 보강근은 흔히 사용되고 있는 N사에서 개발한 제품을 사용하였으며 보강근의 표면은 나선형으로 탄소섬유를 구속하여 기본 형태를 구성하였다. 무게는 261g/m이고 Table 2에 CFRP의 세부 특성을 나타내었고 형상은 Figure 2와 같다. CFRP의 거동은 Figure 3과 같이 선형 탄성거동을 한다.

Table 2. CFRP tendon specification

Type	Cross section (mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation (%)	Elastic modulus (GPa)
CFRP	154	2060	>150	145

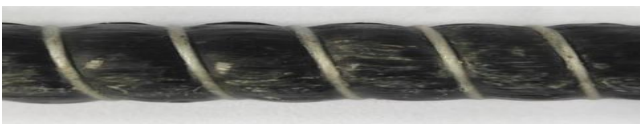


Figure 2.. Shape of CFRP tendon

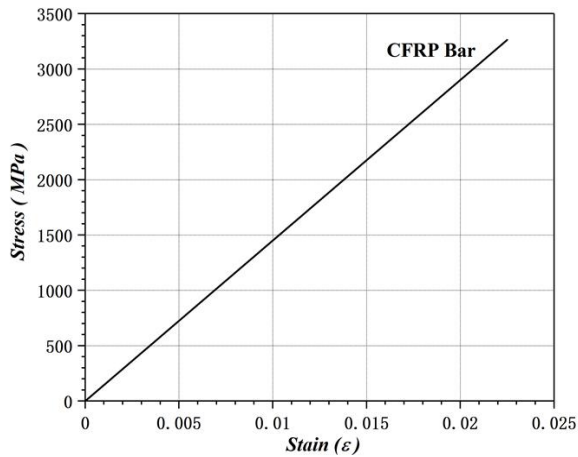


Figure 3. Stress-strain curve of CFRP tendon

### 2.2.4 실험변수

CFRP로 보강된 콘크리트 보의 피로실험을 진행하기 위하여 실험체의 극한 하중을 선정하는 것이 중요하다. 따라서 극한 하중을 측정하기 위한 시험체(BS) 2개와 피로 하중을 측정하기 위한 시험체(BF) 2개를 제작하고 시험체의 정적 하중을 비교하기 위하여 철근 콘크리트 시험체(RS) 1개 제작하여 극한 하중을 비교하였다. 본 연구에 사용된 실험변수는 Table 3과 같다.

Table 3. Experimental parameters

Parameters	Specimen	Pressure region(mm <sup>2</sup> )	tensile region(mm <sup>2</sup> )	Load ranges(%)	
RC	Static	RS2S	As=308	As=308	-
	Static	BS2F	As=308	Af=308	-
CFRP	Fatigue	BF2F	As=308	Af=308	10~70
	Static	BS3F	As=308	Af=462	-
	Fatigue	BF3F	As=308	Af=462	10~70

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 정적실험결과

실험 시 피로 하중의 범위를 산정하기 위하여 정적 하중 실험을 우선 진행하였다. CFRP근으로 보강된 보의 실험 결과는 Table 4에 정리하였다. 실험체의 파괴형태는 실험 시 균열 발생과 보강재의 파단여부, 콘크리트와 보강재에 부착된 게이지수치와 변위계의 값을 참고로 하여 파괴 형태를 결정하였다.

Figure 4는 실험으로부터 얻은 RS2S, BS2S, BS3S의 하중과 처짐 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보이듯이 BS2S, BS3S 두 시험체는 초기에는 하중과 처짐이 직선적으로 증가하지만 초기 균열 발생하중을 넘어가면 기울기가 작아지면서 이후에 선형적으로 하중과 처짐이 증가하였다. 이는 균열 발생 후 CFRP 보강근이 보의 거동에 대한 절대적인 영향을 미치지 때문이다. 허나 CFRP 보강근의 증가에 따라 극한하중은 현저하게 증가되었으나 기준 시험체 RS2S와 비교한 결과 동일 하중에서 처짐이 증가하고 강성이 다소 약화되었으며 갑작스러운 파괴를 일으켜 연성 확보는 아주 미흡하였다.

또한 힘 실험결과 힘 파괴(Flexural failure), CFRP bar 인장 파괴(CFRP bar rupture), 전단압축파괴(Shear compression failure) 등 다양한 형식으로 파괴 되었다.

Table 4. Test results of static experiment

Specimen	Yield		Ultimate	
	Load(kN)	Deflection(mm)	Load(kN)	Deflection(mm)
RS2S	113	5.5	146	62.1
BS2F	-	-	134	15.8
BS3F	-	-	267	18.4

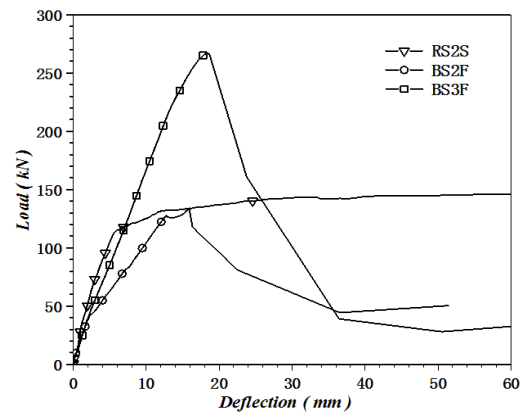


Figure 4. Load-Deflection curves of static test



Figure 5. Real view of RS2S specimens



Figure 7. Real view of BS3S specimens



Figure 6. Real view of BS2S specimens

RS2S 시험체는 압축부와 인장부에 각각 2개의 D14철근이 보강된 시험체이다. RS2S 시험체는 약 23kN에서 초기 휨 균열이 발생하였고 하중의 증가에 따라 가력점 방향으로 균열 폭이 점점 확대되었다. 재하 하중이 약 113kN에서 철근이 항복되었고 이후 우수한 연성을 보이며 약 146kN에서 콘크리트 압축부가 파괴되면서 최종 파괴되었다. Figure 5는 RS2S의 전형적인 휨 파괴 모습을 나타내고 있다.

BS2S 시험체는 압축부에 2개의 D14철근을, 인장부에 2개의 D14 CFRP근을 보강한 시험체이다. BS2S 시험체는 약 21kN에서 초기 균열을 나타내었고 이후 기울기가 작아지면서 선형 탄성거동을 보였다. 하중의 증가에 따라 중심부 균열은 점점 확대되었고 압축부로 연결되어 갔다. 약 120kN에서 하중 처짐 곡선의 기울기가 작아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 CFRP 보강근이 인장 파괴를 시작하면서 나타낸 것으로 판단된다. 약 134kN에서 CFRP가 인장 파괴를 완료하면서 콘크리트 압축부 파괴를 유발하여 최종

파괴를 이루었다. Figure 6는 BS2S의 파괴 후 모습을 나타내고 있다. 초기 균열이 발생 후 보강재의 변형률이 증가하면서 인장 파괴되어 콘크리트 압축부가 파괴되었다.

BS3S 시험체는 압축부에 2개의 D14철근을, 인장부에 3개의 D14 CFRP근을 보강한 시험체이다. BS3S 시험체는 약 24kN에서 초기 균열을 보였고 보강근의 증가로 보의 강성이나 극한 하중은 BS2S보다 모두 현저하게 증가되었다. 최종파괴는 전단구간에서의 갑작스런 파괴가 발생하여 2개의 CFRP 보강근은 단면이 절단되었고 1개 CFRP 보강근은 인장파괴 되었다. Figure 7은 BS3S의 파괴 후 모습을 나타내고 있다. 보강재의 증가로 극한 하중은 증가하나 과도한 보강으로 재료의 사용률은 현저히 감소되었다.

### 3.2 피로실험결과

정적 실험 결과를 토대로 최소, 최대 피로응력범위는 정적 파괴강도의 10%, 70%취하여 실험을 진행하였다. 실험결과는 Table 5와 같다.

#### 3.2.1 시험체별 분석

BF2F 시험체는 정적 휨 강도의 70%인 94kN으로 설정하여 실험을 진행하였고 반복횟수의 증가에 따라 처짐은 증가하다 약 30,000회 정도 진행 되었을 때 CFRP 보강근이 점차적으로 인장파열 되고 균열이 압축부로 성장하면서 최종 파괴를 이루었다. 파괴 시 콘크리트 인장부에서 피복이 탈락하는 현상은 보였지만 보강재의 미끄럼 현상은 보이지 않았으며 균열 폭은 22mm정도이고 Figure 8에 보강근의 파단 모습이 나타나 있다.



Figure 8. Real view of BF2F specimens



Figure 9. Real view of BF3F specimens

Table 5. Summary of fatigue test results

Specimens	Pmax(kN)	Pmin(kN)	Number of cycles	Resident deflection(mm)	Max deflection(mm)	Failure type
BF2F	94	9.4	1	0.491	9.795	Rupture of CFRP bar
			$10^2$	5.629	9.974	
			$10^3$	6.736	11.393	
			$10^4$	6.872	11.638	
			$2 \times 10^4$	7.415	11.882	
			$3 \times 10^4$	7.419	12.144	
BF3F	187	18.7	1	0.957	12.591	Shear failure
			$10^2$	7.445	15.394	
			$2 \times 10^2$	8.871	15.514	
			$3 \times 10^2$	11.057	16.215	
			$3.88 \times 10^2$	18.393	21.407	

보강재의 인장파열과 함께 전단균열이 압축부로 이어지면서 보의 최종파괴를 이루었다.

BF3F 시험체는 정적 휨 강도의 70%인 187kN으로 설정하여 실험을 수행하였고 약 388회에서 갑자기 전단파괴가 발생하면서 보강근의 단면이 절단되어 최종파괴를 이루었다. 파괴 시 최대 균열 폭은 26mm이며 Figure 9에 파괴 후 모습을 나타내고 있다. 반복 횟수의 증가에 따라 균열 폭이 증가하면서 압축부로 이어져 BF2F와 비슷한 거동을 하면서 최종 파괴를 이루었다.

### 3.2.2 반복횟수에 따른 하중-처짐 관계

Figure 10~11에는 BF2F, BF3F 시험체의 반복횟수에 따른 하중-처짐 관계를 나타낸 것이다. 두 시험체는 모두 반복횟수와 하중이 증가함에 따라 영구 변위량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

BF2F 시험체는 10~70% 하중범위에서 30,000회의 높은 피로 횟수를 보였지만 보강율이 증가한 BF3F 시험

체는 300회의 낮은 피로 횟수를 보였다.

BF 시험체의 경우 반복 하중 범위가 클수록 최대 처짐량과 초기 반복 하중에 의한 최대 처짐량이 증가하는 것을 알 수 있다.

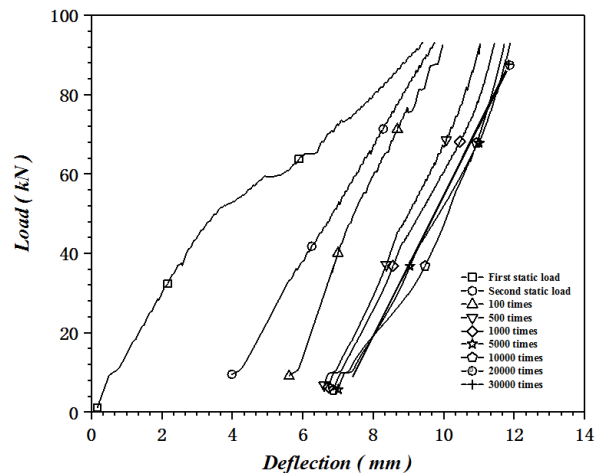


Figure 10. L-D curves with number of cycles(BF2F)

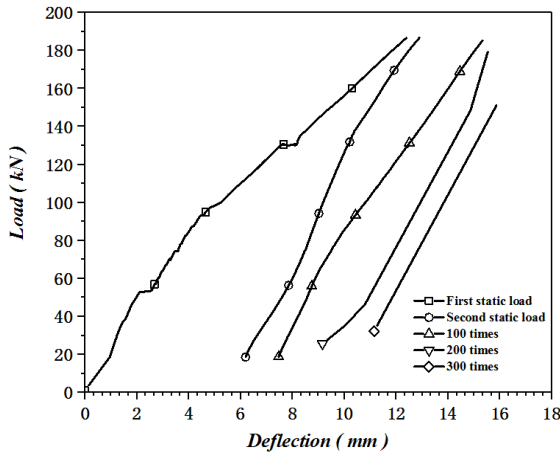


Figure 11. L-D curves with number of cycles(BF3F)

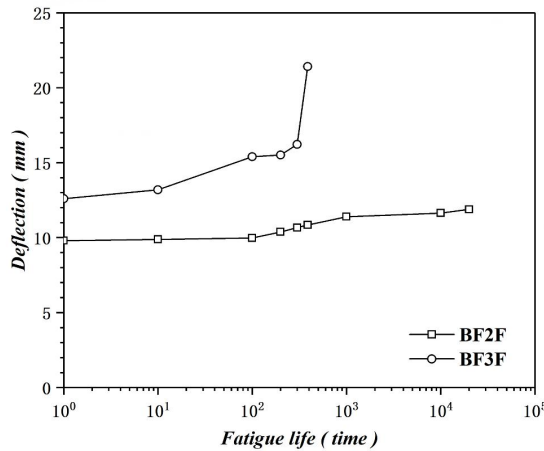


Figure 12. Central deflection by repeat count

### 3.2.3 반복횟수에 따른 중앙부 최대 처짐

Figure 12는 보의 중앙부 최대 처짐을 이은 곡선이다. BF2F 시험체의 경우 1회 피로하중 재하 후 변위가 9.8mm 이고 높은 수준의 반복하중으로 인해 30,000회 피로실험을 진행한 후 내하력 저하로 인해 처짐이 상당히 증가하여 12.1mm되었다. 1회 피로반복하중 재하 후 처짐은 커지지만 증가폭은 완만한 경향을 보이다가 파괴직전에 처짐의 증가폭이 증가 하였다. BF3F 시험체는 1회 피로하중 재하 후 처짐은 12.5mm정도이고 높은 반복하중으로 인해 388회 피로실험을 실시한 후 내하력의 저하로 처짐이 상당히 증가하면서 최종파괴에 이르렀다. 따라서 단면에 대한 적절한 보강량의 설계가 이루어진다면 대체재로서의 성능을 극대화 할 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 CFRP 보강근을 이용한 콘크리트 보의 피로 실험을 통하여 극한 사용하중 상태에서 반복 하중에 대한 CFRP 보강재의 안전성을 파악하고 피로 성능을 평가 하였다.

- 1) 피로 실험결과 BF2F 시험체는 약 30,000회에서 인장 부 보강근의 파단으로 피로 실험을 중지하였는데 BF3F 시험체 보다 피로 수명은 현저히 저고 되었다. 이는 보강량의 증가에 따라 보의 전단 파괴를 유도하면서 조기파괴를 이루었기 때문이다.
- 2) 피로 실험 결과 반복 횟수가 증가함에 따라 최대 처짐 과 보강재의 변형률이 증가하였다.
- 3) 피로 실험에 의한 균열 양상은 반복 횟수가 증가함에 따라 균열이 확산되었고 파괴 형태는 보강재의 인장 파괴, 콘크리트 사인장 파괴로 나타났다. 두 시험체 모두 취성파괴 되었으며 파괴 시 뚜렷한 징후를 나타 내지 않아 안전성이 취약함을 알 수 있다. 따라서 파괴 시 압축파괴를 유도하는 것이 적절하다고 판단된다.
- 4) 피로 실험결과를 바탕으로 보강량의 증가에 따라 극한 하중은 증가하였으나 피로수명은 감소하였다. 이는 보강재의 성능 발휘를 다하지 못한 것으로 판단되며 보의 단면에 적합한 보강량의 제안이 필요하다.

## 요 약

최근 철근의 대체재로서 인장강도나 내부식성이 좋은 CFRP(carbon fiber reinforced polymer)를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 현재 피로 파괴에 대한 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 CFRP보강 콘크리트 보를 제작하여 정적 및 반복 하중에 따른 역학적 거동과 파괴형태를 분석하고 철근의 대체 재료로서 CFRP 보강근 사용에 대한 안전성과 타당성을 평가하도록 하였다. 반복하중의 범위는 극한하중의 10~70%를 취하고 3점 재하방식으로 sine파를 이용한 3Hz의 속도로 재하 하였다. 정적 실험결과 보강량의 증가에 따라 보의 최대하중이나 강성은 현저하게 증가하였지만 피로 실험결과 보강량의 증가에 따라 반복 횟수는 감소하고 처짐량은 증가하여 안전성은 다소 감소됨을 알 수 있었다.

---

키워드 : CFRP bar, 피로 거동, 균열, 보강량

## Funding

Not Applicable

## ORCID

Pei-Yun Zhang, <https://orcid.org/0000-0002-0397-8819>

Okk-Yue Kim, <https://orcid.org/0000-0001-9059-5957>

xian cui, <https://orcid.org/0000-0003-3167-5281>

## References

1. Gao P. Experimental Study and Application on Fatigue Behaviors of CFRP Tendons Reinforced FRCC Flexural Components, [dissertation], [Southeast (China)]:College of Civil Engineering Southeast University; 2016. 124 p.
2. ACI 440,IR-06, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, Farmington Hills(USA), American Concrete Institute, 2006.
3. Seo DW, Han BS, Shin SW. Behaviour of One-Way Concrete Slabs Reinforced with Fiber Reinforced Polymer(FRP) Bars, Journal of the Korea Concrete Institute, 2007 Dec;19(6):763-71.
4. ACI 440,3R-04, Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, 2004, p. 20-2.
5. Kim JS, Kim KS. A study on ductility capacity of reinforced concrete beam without shear reinforcement using cockle shells as fine aggregate. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2005 Jun;5(2):139-46.