Journal of The Korea Institute of Building Construction
Vol. 24, No. 5, pp. 577-585 / October, 2024
https://doi.org/10.5345/JKIBC.2024.24.5.577

pISSN 1598-2033
eISSN 2233-5706
www.jkibc.org

Research Paper

콘크리트 함수율에 따른 CFRP의 부착강도 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Bond Strength Characteristics of CFRP Depending on Moisture Content of Concrete

김주성[1] · 김영진[2] · 박선규[3]*
Kim, Ju-Sung[1] · Kim, Young-Jin[2] · Park, Sun-Gyu[3]*

[1]Doctorate Coures, Department of Architectural Engneering, Mokwon University, Seo-Gu, Daejeon, 35349, Korea
[2]Research Director, Research Center, Korea Concrete Institute, Seoul, 06130, Korea
[3]Professor, Department of Architectural Engineering, Mokwon University, Seo-Gu, Daejeon, 35349, Korea

***Corresponding author**
Park, Sun-Gyu
Tel : 82-42-829-7712
E-mail : psg@mokwon.ac.kr

Received : September 26, 2024
Revised : October 14, 2024
Accepted : October 15, 2024

ABSTRACT

Reinforced concrete structures are vulnerable to the corrosion of reinforcing steel, which is typically caused by the neutralization of concrete and the presence of surrounding chlorides in various environmental conditions. This corrosion leads to cracking in the concrete, thereby reducing durability of the structure and shortening its lifespan. To address this issue, there has been an increasing interest in research on Fiber Reinforced Polymers(FRP), particularly Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP). CFRP, composed of carbon fibers, is noted for its lightweight properties, outstanding tensile strength, and high elastic modulus. It also offers excellent corrosion resistance and durability against weathering. Despite the potential benefits, the data on CFRP's performance and integration into reinforced concrete structures remain limited. This study contributes fundamental data regarding the application of CFRP, highlighting its advantages and exploring its practical implications. A significant finding from this research is that concrete specimens cured underwater exhibited superior bond strength compared to those cured under dry conditions.

Keywords : reinforced concrete, corrosion, carbon fiber reinforced plastics, bond strength

1. 서 론

건설산업 분야에 있어 철근콘크리트 구조는 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 철근콘크리트에 사용되는 재료는 경제성과 내구성이 우수하며, 재료 간 부착력이 뛰어나다는 장점을 가지고 있다[1,2]. 하지만 철근콘크리트 재료는 여러 환경에 의해 콘크리트가 중성화되고 강재에 부식이 발생하는 단점을 가지고 있다[3]. 철근콘크리트 구조물에 배근되어 있는 철근은 콘크리트의 강알칼리성에 의해 부동태 피막이 형성된다. 부동태 피막이란 시멘트의 강알칼리성에 의해 철근주위가 미세하게 산화가 발생되어 생성되는 것을 말하며, 이러한 부동태 피막으로 인해 철근 부식을 일으키는 산소와 물 등의 접촉을 방지해 철근 부식을 보호한다[4]. 하지만 부동태 피막은 콘크리트의 중성화 및 표면 균열을 통해 염화물의 침투로 인해 파괴되며, 철근에 부식이 발생하게 된다[5]. 철근의 부식으로 인해 콘크리트는 균열이 발생하고, 철근콘크리트 부재의 강도와 내구성이 저하되어 건축물의 수명을 단축시키는 원인이 된다[6]. 이를 해결하기 위해 철근 코팅, 피복두께 증가 등의 많은 방법이 연구되고 있으나 현장 시공 시 코팅의 깨짐, 건축물의 하중 증가의 문제점을 가지고 있어 궁극적인 해결책이 되지 못했다[7]. 이러한 문제점을 개선하기 위해 기존의 철근을 대체할 수 있는 재료 중 하나인 FRP에 대한 연구가 증가 되었다[8-10].

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2024 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

FRP(Fiber Reinforced Plastics)는 섬유의 종류에 따라 나뉘며, 대표적으로 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)와 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)가 있다. CFRP는 탄소 섬유로 만들어졌으며, 경량화로 시공성이 우수하다. 이러한 CFRP는 기존 GFRP보다 높은 인장강도와 탄성계수가 뛰어나다는 장점이 있으며, 내식·내후성이 우수하다는 특징을 가지고 있다[11]. 하지만 CFRP를 철근콘크리트에 적용하기 위한 부착강도에 대한 데이터가 미비한 실정이다. 특히, 철근콘크리트 구조물에 하중이 가해지면 철근은 인장력을 받으며, 철근과 콘크리트 사이의 응력 전달은 주로 철근과 콘크리트의 부착력에 의존하므로 철근콘크리트 구조물에 가장 중요한 요소로 뽑힌다[12]. 또한, 철근콘크리트 구조물은 다양한 환경에 노출될 수 있으며, 물을 접하게 되는 경우가 많이 발생한다. 기존의 연구에 의하면 CFRP의 부착강도는 수분을 포함한 주위 환경에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 이러한 수분의 공급이 제한된 상태로 유지되면 콘크리트의 건조수축 및 부착면에 미세균열이 발생할 가능성이 존재한다[13]. 따라서, 본 실험적 연구에서는 철근콘크리트 구조물에 CFRP 보강근을 적용하기 위한 실험적 연구를 실시하였으며, 콘크리트의 함수율에 따른 CFRP의 부착강도 평가를 진행하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1에나 나타낸 바와 같으며, 콘크리트 함수율에 따른 CFRP 보강근의 부착강도 특성을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 물/시멘트비의 경우 35, 45, 55%로 설정하였으며, 부착강도 시험체의 경우 변수당 3개씩 제작하였으며, 3개의 평균값을 사용하였다. 함수율의 경우 양생과정을 달리한 수중양생과 기건양생으로 진행하였으며, 초기 양생 온도의 경우 20±2°C로 설정하여 양생을 진행하였다. 부착강도 측정용 시험체 제작은 CSA S806에 의거하여 Figure 1에 나타낸 바와 같이 제작하였다.

Table 1. Overview of experimental design

Factors	Levels
W/B ratio(%)	- 35, 45, 55
Bar type	- Rib CFRP
Curing condition	- Temperature 20±2°C
Test item	- Compressive strength(28 days) - Bond strength

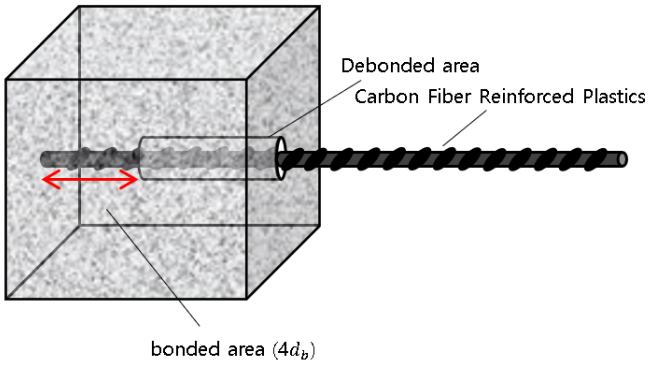


Figure 1. Test specimen of CFRP bar for bond strength

2.2 사용재료

본 실험에 사용된 CFRP 보강근은 Figure 2에 나타낸 바와 같으며, CFRP 보강근의 물리적 특성은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 시멘트의 경우 국내에서 판매되는 'H'사 시멘트를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 3에 나타낸 바와 같다. 잔골재의 경우 국내에서 판매되는 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 쇄석을 사용하였다. 잔골재와 굵은골재의 물리적 특성은 Table 4에 나타낸 바와 같다. 또한, 원활한 타설을 위해 고성능 AE감수제 0.3%를 첨가하여 실험을 진행하였다.

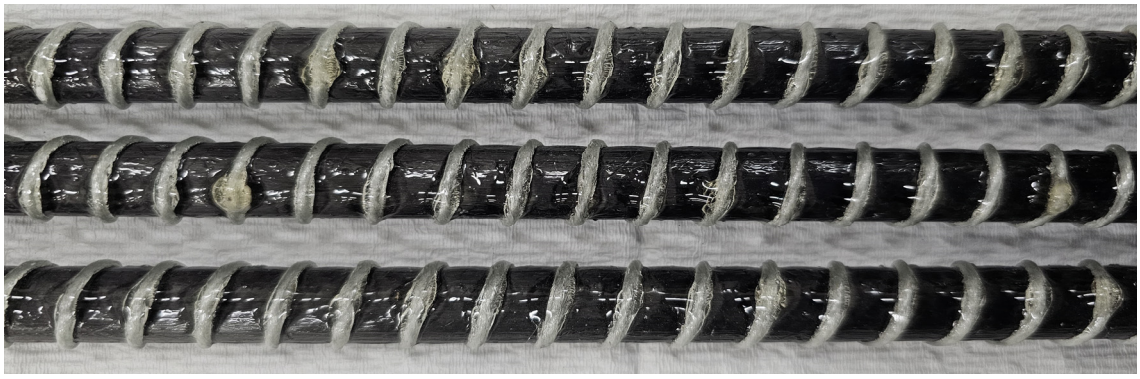


Figure 2. CFRP bar used in this experimental study

Table 2. Physical properties of fiber-reinforced polymer(FRP)

	Diameter(mm)	Fiber	Tensile strength(MPa)
Rib CFRP	13	Carbon fiber 24K	1,714

Table 3. Physical properties of cement used in this study

	Specific gravity(g/cm^3)	Fineness(cm^2/g)
Cement	3.15	3,750

Table 4. Physical properties of sand and gravel components

	Density(g/cm^3)	Fineness modulus	Absorption(%)
River sand	2.56	2.57	0.94
Crushed gravel	2.63	7.531	0.8

2.3 실험방법

본 실험의 콘크리트 배합의 경우 Table 5에 나타낸 바와 같다. 압축강도 공시체의 경우 KS F 2403에 의거하여 내경 100×200mm 원기둥 몰드를 사용하여 제작하였으며, 부착강도 시험체 제작은 Figure 3과 같이 CSA S806에 의거하여 내경 150×150×150mm 정육면체 몰드를 사용하여 제작하였다[14,15]. 부착면인 $4d_b$를 제외한 부분에 PE폼을 사용하여 비부착면을 조성하였다. 부착강도 시험체의 경우 수직 타설을 원칙으로 진행하지만, 본 연구단에서는 수평 삽입 후 타설을 진행하였다. 콘크리트와 보강근의 수직도는 부착강도에 큰 영향을 주기 때문에 수직도 개선을 위해 수평 타설로 실험을 진행하였다. 타설의 경우 16mm 다짐봉을 사용하여 총 4회에 걸쳐 매회 25회 다짐을 진행하였으며, 타설을 진행한 뒤 24시간 경과 후 탈

형을 진행하였다. 부착강도 시험체를 변수당 3개씩 제작하였으며, 20±2℃에서 수중양생, 30±2℃에서 기건양생을 28일동안 진행하였다. 부착강도 실험은 Figure 4에 나타낸 바와 같이 진행하였으며, CSA S806에 의거하여 인발을 실시하였다. 지그에 부착강도 시험체를 수평에 맞게 배치 후 클렘핑 죠에 보강근을 물려 진행하였다. 100t의 성능을 가진 UTM(Universal testing machine)을 사용하여 인발을 진행하였다. Load and slip을 확인하기 위해 양쪽 하단에 LVDT 변위계 2개를 설치하여 측정하였으며, Free and slip을 확인하기 위해 상단 보강근에 LVDT 변위계를 설치하였다. Load and slip의 경우 LVDT 변위계 2개의 평균값을 사용하였다. 보강근과 클렘핑 죠의 슬립을 방지하기 위해 물림 길이를 20㎝이상 확보하여 실험을 진행하였다. 부착강도 실험은 UTM을 사용하여 진행하였으며, 가력속도는 CSA S806에 의거하여 1.27mm/min보다 낮은 속도인 0.02mm/sec로 진행하였다. 부착강도 실험 시 측정되는 데이터는 UTM의 로드셀을 데이터 로거에 연결하여 초당 1회씩 측정된 데이터를 수집하였다.

Table 5. Concrete mix design and proportions

W/C(%)	Air(%)	S/a(%)	Water(kg/m^3)	Unit volume(l/m^3)			Unit weight(kg/m^3)		
				Cement	Sand	Gravel	Cement	Sand	Gravel
35	5	42	180	163	255	352	514	647	933
45		43	178	126	278	368	396	706	976
55		44	175	101	297	377	318	753	1000

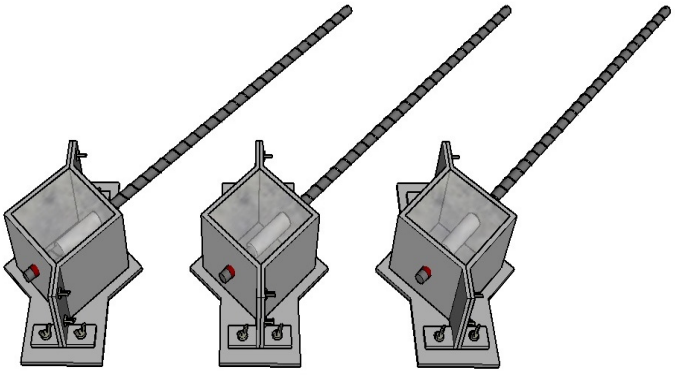


Figure 3. Mold for bond strength specimens of CFRP bars

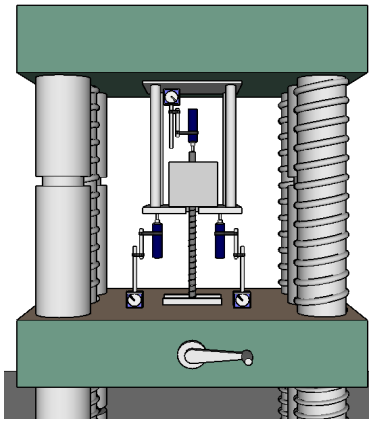


Figure 4. Testing equipment and methods for bond strength of CFRP bar

3. 실험결과

3.1 압축강도

Figure 5는 재령 28일의 콘크리트의 함수율에 따른 압축강도 측정 결과를 나타낸 것이다. 기건양생이 수중양생보다 낮은 압축강도 발현을 보였다. 이는 콘크리트 수화반응 시 시멘트 페이스트 근처에 존재하는 수분을 사용하게 되며, 콘크리트 내부에 수분이 존재하지 않을 경우 외부로부터 공급 되어야한다. 이로 인해 기건양생의 경우 외부로부터 수분공급이 제한되어 수화반응이 저하되고, 강도발현이 지연된 것으로 판단된다.

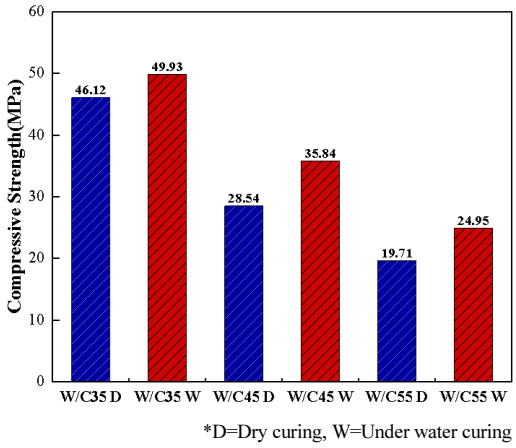


Figure 5. Test of concrete compressive strength

3.2 부착강도

CFRP 보강근의 부착강도 실험은 LVDT 변위계의 Free and slip양이 20mm가 넘을 때 까지 인발을 진행하였으며, 데이터 로거에 받은 데이터 중 최대 하중값일 때 부착강도를 구하였다. CFRP 보강근의 부착강도는 시험체 3개 데이터의 평균값을 사용하였으며, 식 (1)에 나타낸 바와 같이 부착강도를 산정하였다. u는 평균부착강도를 의미하며, p는 시험체에 가해진 하중의 피크값, d_b는 CFRP 보강근의 지름, l_d는 CFRP 보강근의 묻힘길이를 의미한다.

$$u = \frac{P}{\pi d_b l_d} \tag{1}$$

Figure 6은 CFRP 보강근의 평균 부착강도를 나타낸 것이다. 수중양생을 진행한 CFRP 보강근이 기건양생을 진행한 CFRP 보강근보다 높은 부착강도 발현을 보였다. 콘크리트 압축강도와 부착강도는 비례하다고 알려져 있으며, 압축강도와 동일하게 수중양생을 진행한 시험체는 충분한 수분을 공급받아 시멘트 수화반응이 원활하게 이루어진 것으로 판단된다. 이는 콘크리트의 강도와 밀도를 증가시키며, 결과적으로 콘크리트와 CFRP 보강근의 부착 성능을 향상시킨 것으로 판단된다. 또한, 수중양생의 경우 수분 손실을 방지해 건조수축에 의한 미세균열을 줄여 콘크리트와 CFRP 보강근 사이 부착면이 더 균일하게 유지되어 나타낸 결과로 판단된다.

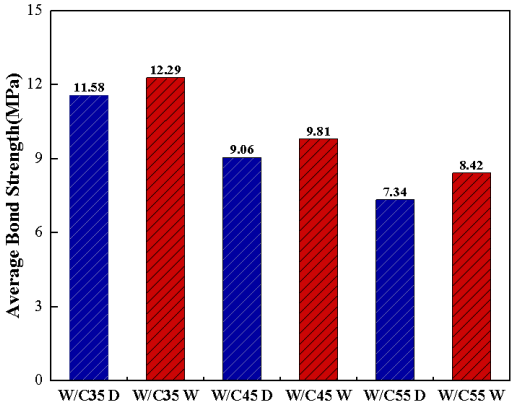


Figure 6. Results of CFRP bar bond strength tests

3.3 부착강도와 슬립의 관계

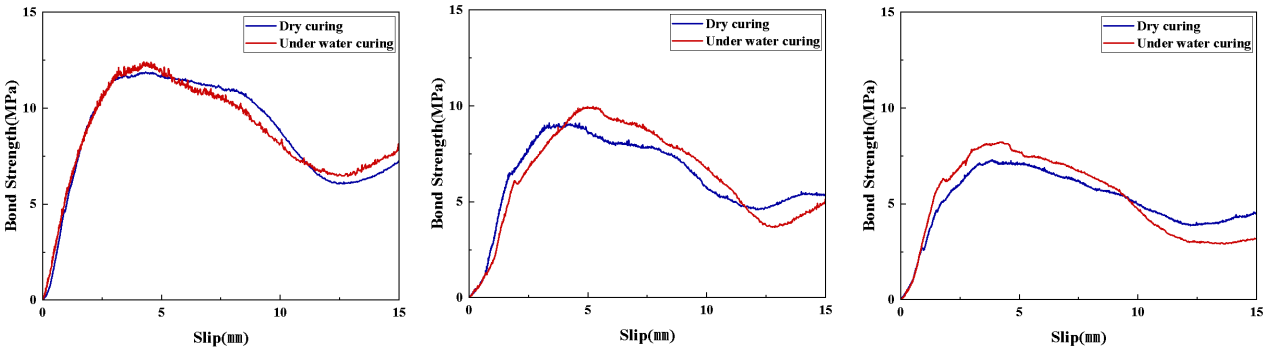
Table 6은 CFRP 보강근의 부착강도 측정 데이터를 나타낸 것이다. Load and slip은 양쪽 하중단에 배치한 LVDT 변위계 값을 나타낸 것이며, Free and slip은 보강근에 배치한 LVDT 변위계의 값을 나타낸 것이다. 모든 데이터 값은 최대 하중에서의 부착강도와 Load and slip, Free and slip을 나타내었다.

Table 6. Bond strength and slip proportions of CFRP bars

Specimen name	Ultimate state			
	Bond strength(MPa)	Free and slip(mm)	Load and slip(mm)	Load(kN)
D_35#1	11.87	11.45	4.06	25.20
D_35#2	10.97	10.09	4.88	23.29
D_35#3	11.89	11.77	4.33	25.24
W_35#1	12.41	10.19	4.25	26.34
W_35#2	12.08	10.42	4.44	25.64
W_35#3	12.37	11.29	3.98	26.26
D_45#1	9.12	14.65	4.85	19.36
D_45#2	8.99	13.22	4.01	19.08
D_45#3	9.07	10.73	4.16	19.25
W_45#1	9.77	9.59	4.91	20.74
W_45#2	9.97	9.94	4.33	21.16
W_45#3	9.65	10.22	4.41	20.49
D_55#1	7.14	9.84	4.21	15.16
D_55#2	7.53	8.95	4.34	15.98
D_55#3	7.36	8.69	3.85	15.62
W_55#1	8.23	10.12	4.23	17.47
W_55#2	8.62	10.42	3.81	18.30
W_55#3	8.41	9.74	4.12	17.85

D=dry curing, W=under water curing, 35=W/C, #1=specimen number

Figure 7은 콘크리트 함수율에 따른 CFRP bar의 부착-슬립 관계를 나타낸 것이다. 모든 물/시멘트비에 있어서 시험체의 부착-슬립관계는 서로 유사한 형상을 나타내고 있으며, 물/시멘트비 45, 55% 초기 상승부에 끊긴 그래프는 하중에 의해 리브의 손상이 발생하여 끊긴 것으로 판단된다. 이후 최대 부착강도를 지나 하중이 저하되는 모습을 나타내고 있으며, 잔류부착강도에 있어서 대부분의 시험체는 다시 하중이 상승하는 모습을 보이고 있다. 이러한 현상은 리브형 FRP의 고유특성으로 일반적으로 콘크리트 내에 있는 철근의 부착강도는 대표적으로 점착력, 지압력, 마찰력에 의한 영향으로 인해 산정된다. 부착-슬립의 상승부에서는 점착력과 지압력에 의해 부착강도가 증가하며, 이후 마찰력에 의해 잔류 부착강도가 산정된다. 즉, CFRP 보강근의 표면에 존재하는 에폭시 접착제와 리브에 의해 상승부에 부착강도가 증가하며, 이후 잔류부착강도에서는 콘크리트와 CFRP bar 사이 부착면에 콘크리트의 잔해물과 파괴된 리브의 잔류로 인해 새로운 마찰력을 제공하게 되어 잔류부착강도에서 약간의 강도증진에 영향을 주는 것으로 판단된다. CFRP 시험체의 부착-슬립관계에 대한 실험결과 최대부착강도 이후의 함수율에 따른 특별한 차이는 보이지 않는 것으로 나타났다.



(a) W/C35 (b) W/C45 (c) W/C55

Figure 7. Results of bond strength and slip behavior

4. 결 론

본 실험적 연구는 콘크리트의 함수율에 따른 CFRP 보강근의 부착강도 특성을 파악하기 위한 것으로, 본 연구 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 양생방법을 달리한 콘크리트 압축강도 측정 결과 수중양생을 진행한 콘크리트가 기건양생을 진행한 콘크리트 보다 높은 압축강도 발현을 보였다. 이는 시멘트 수화반응 시 수분이 필요하며, 기건양생을 진행한 콘크리트의 경우 수분공급이 제한되어 수화반응이 지연되어 낮은 압축강도 발현을 보인 것으로 판단된다.
2) CFRP 보강근의 부착강도 측정 결과 압축강도와 동일한 경향을 나타내는 것을 확인하였으며, 수중양생을 진행한 시험체가 높은 부착강도 발현을 보였다. 이는 충분한 수분공급으로 수화반응이 원활하게 이루어져 나타난 결과로 판단된다. 또한, 수중양생의 경우 수분 손실을 방지해주며, 건조수축에 의한 미세균열을 줄여 콘크리트와 CFRP 보강근 사이 부착면이 더 균일하게 유지되어 나타낸 결과로 판단된다.
3) 부착-슬립 관계를 확인해본 결과 모든 시험체에서 유사한 형상을 나타내고 있으며, 최대 하중 이후 하중이 감소하는 모습을 보이고 있다. 이는 CFRP 보강근 표면에 존재하는 리브의 손상으로 인해 지압력과 마찰력을 버티지 못하여 하중이 감소하는 것으로 판단된다. 또한, 이후 하중이 다시 상승하는 모습은 콘크리트와 CFRP 보강근 사이 부착면에 리브의 잔류로 인해 새로운 마찰력을 제공하여 나타난 결과로 판단된다.

따라서, CFRP 보강근을 철근콘크리트 구조물에 적용하기 위해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 다양한 환경조건에 따른 추가적인 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

요 약

철근콘크리트 구조물은 여러 환경에 의해 콘크리트 중성화 및 주위 염화물로 인해 철근 부식이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 철근의 부식으로 인해 콘크리트 균열이 발생되며, 내구성을 저하시키는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 FRP에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. FRP 종류 중 CFRP는 높은 인장강도와 탄성계수가 뛰어나다는 장점이 있으며, 내식성과 내후성이 우수하다는 특징을 가지고 있다. 이러한 CFRP에 대한 데이터는 미비한 실정이며, 본 연구는 철근콘크리트 구조물에 적용하기 위한 기초적인 데이터를 제공하기 위해 수행된 것이다. 본 연구의 범위 내에서는 콘크리트 함수상태에 따라서 수중양생의 부착강도 시험체가 기건양생의 부착강도 시험체보다 높은 부착강도를 보였다.

키워드 : 철근콘크리트, 부식, 탄소보강근, 부착강도

Funding

Not applicable

Acknowledgement

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport(RS-2021-KA163381).

ORCID

Ju-Sung Kim, https://orcid.org/0000-0002-4928-3043
Young-Jin Kim, https://orcid.org/0000-0003-1943-0994
Sun-Gyu Park, https://orcid.org/0000-0002-7618-1544

References

1. Kim CS, Seo DW, Shin SW, Ahn JM, Han BS. Effect of concrete strength on concrete beams reinforced with FRP bar. Celebrating the 60th anniversary of the founding of the Architectural Institute of Korea. 2005 Oct 24~25; Seoul, Korea. Seoul (Korea): Architectural Institute of korea; 2005. p. 24-5.
2. Kim TY, Park JS, Lee JY, Kim KH. Effect of compressive strength of concrete on the bond strength of glass fiber reinforcement plastic bars. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 2005 Dec;21(12):69-76.
3. Kim HH, Jang SM, Noh SY. Crack behavior of reinforced concrete tension member under steel corrosion. Journal of the Architectural. 2007 Oct;23(9):99-106.
4. Yu HG, Ahn TS, Kim KH, Jeong YS. Concrete cover & corrosion of steel bar. Magazine of the Korea Concrete Institute. 1999 Jan;11(4):12-24.
5. Choi DW, Ha SS, Lee CH. Development length of GFRP rebars based on pullout test. Journal of the Korea Concrete Institute. 2007 Jun;19(3):323-31. https://doi.org/10.4334/JKCI.2007.19.3.323
6. Yang JM, Shin HO, Min KH, Yoon YS. Flexural Behavior of FRP Bar Reinforced HSC Beams with Different Types of Reinforcing Bar and Fiber. Journal of the Korea Concrete Institute. 2011 Jun;23(3):273-80. https://doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.3.273
7. Okelo, Roman., Yuan, Robert L. Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. Journal of composites for construction. Jun;9(3):203-13. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:3(203)
8. Nanni A, Deluca A, Zadeh HJ. Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design. FL: CRS Press; 2014. p. 35-63.
9. Benmokrane B, Wang P, Ton-That TM, Rahman H, Robert JF. Durability of glass fiber reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment. Journal of composites for Construction. 2002 Jul;6(3):143-55. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(143)
10. Baena M, Torres L, Turon A, Barris C. Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. Composites Part B: Engineering. 2009 Dec;40(8):784-97. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.07.003
11. Benmokrane B, Nazair C, Loranger MA, Manalo A. A Field Durability Study of Vinylester-Based GFRP Rebars in Concrete Bridge Barriers. Journal of Bridge Engineering. 2018 Sep;23(12):04018094. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.

0001315

12. Park SJ, Kang TS, Moon DY. A study on the flexural minimum reinforcement for prevention of brittle failure specified in KCI and EN codes. Journal of the Korea Concrete Institute. 2014 Apr;26(2):211-8. https://doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.2.211
13. Micelli F, Myers JJ, Murthy S. Effect of environmental cycles on concrete cylinders confined with FRP. International Conference Composites in Construction (CCC2001); 2001 Oct 10-12; Porto, Portugal. Porto (Portugal): Proc int conf on composites in construction; 2001. 317-21 p.
14. KS F 2403. In Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens. Eumseong (Korea): Korean Agency for Technology and Standards. 2014. 14 p.
15. CSA S806-12. Canadian Standards Association. Design and Construction of Building Structures with Fibere-Reinforced Polymers. Mississauga (Canada): Canadian Standards Association. 2017. 111 p.