

규사 코팅 방법에 따른 FRP Hybrid Bar의 부착강도 평가

정규산*, 박기태, 유영준, 서동우, 김병철, 박준석
한국건설기술연구원 구조융합연구소

Evaluation of Bond Strength for FRP Hybrid Bar According to Coating Methods using Silica Sands

Kyu-San Jung*, Ki-Tae Park, Young-Jun You, Dong-Woo Seo, Byeong-Cheol Kim,
Joon-Seok Park

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 본 논문은 FRP Hybrid Bar의 최적 부착 성능 도출을 위한 실험 결과를 나타낸다. FRP Hybrid Bar는 이형 철근의 부식문제를 해결하기 위하여 이형 철근 외측에 유리섬유를 감싸 만들어졌다. 콘크리트와의 부착 성능 향상을 위해 매끈한 FRP Hybrid Bar 표면에 수지와 규사를 이용하여 코팅하였고 수지의 종류 및 점도, 그리고 규사의 크기를 실험 변수로 하여 FRP Hybrid Bar의 부착 성능을 실험적으로 평가하였다. FRP Hybrid Bar의 부착 성능 평가를 위해 한 변의 길이가 200 mm인 정육면체 콘크리트 블록에 FRP Hybrid Bar를 매립하였고, 인발 실험을 통하여 FRP Hybrid Bar와 콘크리트의 계면에서의 최대 하중과 슬립을 측정하였다. 실험 결과로부터, 각 실험 변수에 따른 최대 하중 및 부착 강도를 산정하였고 FRP Hybrid Bar의 부착 성능이 가장 우수한 수지 종류 및 점도, 그리고 규사 크기를 도출하였다. 예폭시 수지와 5호 규사를 사용한 실험체의 최대부착강도는 이형철근의 최대부착강도 대비 약 35% 정도 증가되었다.

Abstract In this study, we examined the bond performance of FRP Hybrid Bars. FRP Hybrid Bars are developed by wrapping glass fibers on the outside of deformed steel rebars to solve the corrosion problem. The surface of the FRP Hybrid Bars was coated with resin and silica sand to enhance its adhesion bonding performance with concrete. Various parameters, such as the resin type, viscosity, and size of the silica sand, were selected in order to find the optimal surface condition of the FRP Hybrid Bars. For the bonding test, FRP Hybrid Bars were embedded in a concrete block with a size of 200 mm³ and the maximum load and slip were measured at the interface between the FRP Hybrid Bar and concrete through the pull-out test. From the experimental results, the maximum load and bond strength were calculated as a function of each experimental variable and the resin type, viscosity and size of the silica sand giving rise to the optimal bond performance were evaluated. The maximum bond strength of the specimen using epoxy resin and No. 5 silica sand was about 35% higher than that of the deformed rebar.

Keywords : Bond Strength, Fiber Reinforced Polymer, Glass Fiber, Reinforcing Bar, Silica Sands

1. 서론

철근과 콘크리트는 경제적이면서도 인장력 혹은 압축력에 대한 역학적 특성이 우수하여 구조 재료로서 널리 사용되고 있다. 하지만 콘크리트는 환경적인 요인과 시

간이 지남에 따라 내구성이 저하되는 문제를 가지고 있다. 특히, 철근콘크리트 구조에서 콘크리트 내부에 위치한 철근의 부식문제는 매우 중요하다. 내부 철근이 부식하게 되면 부피가 팽창하게 되고 이로 인해 주변 콘크리트에 균열을 발생시키게 된다. 발생된 균열을 따라 수분

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kyu-San Jung(KICT)

Tel: +82-31-910-0793 email: jungkyusan@kict.re.kr

Received September 29, 2017

Revised (1st October 26, 2017, 2nd November 13, 2017)

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

과 공기의 침투가 용이해지고 이에 따라 철근과 콘크리트에 열화는 가속화된다[1]. 결국, 철근 부식으로 인한 단면 손실과 그에 따른 내하력 감소, 철근과 콘크리트의 부착력 저하 등이 발생되고 이는 구조물의 안전성에 매우 심각한 영향을 미친다[2].

국내·외적으로 철근 부식 문제를 해결하기 위하여 비부식 재료인 Fiber Reinforced Polymer(FRP) 재료를 활용하여 철근을 대체하기 위한 연구들이 있어왔다[3-6]. 한국건설기술연구원에서는 유리섬유강화폴리머(Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP))를 이용하여 보강근을 개발하였으며[4], 이에 대한 역학적 성능을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다[7-8]. 하지만 GFRP 보강근은 기존의 이형철근의 인장, 압축, 그리고 부착 성능과 같은 역학적 거동이 달라 현재의 구조설계 기준을 그대로 적용할 수 없는 문제를 가지고 있다. 따라서 이러한 문제를 보완하고자 하는 연구가 활발히 진행되었고[9-17], 한국건설기술연구원은 철근을 부식으로부터 보호하고 현재의 설계기준을 준용 가능한 FRP Hybrid Bar를 개발하였다[2,4]. FRP Hybrid Bar는 이형철근의 표면에 유리섬유를 블레이딩 방식으로 피복하고 열경화성 수지를 사용하여 GFRP가 이형철근을 감싼 형태로 만들어졌다. 표면의 GFRP가 이형철근을 부식으로부터 보호하지만 표면이 매끄러운 특성 때문에 콘크리트와의 부착에서 기존 이형철근 대비 부착성능의 저하 우려가 있었다[18].

본 연구에서는 FRP Hybrid Bar 표면에 규사를 코팅하여 부착성능을 개선하고자 하였으며 규사 직경, 수지 종류, 그리고 수지의 점도를 변수로 하여 시험체를 제작하였다. 직접부착시험을 수행하여 결과를 비교하였으며 최적의 부착성능을 나타내는 규사 코팅 방법을 도출하고자 하였다.

2. 시험 계획 및 방법

2.1 시험체 개요

FRP Hybrid Bar의 최적 부착성능 도출을 위한 시험 변수를 Table 1에 제시하였다. 시험 변수는 3 가지로써 첫 번째 시험 변수는 규사의 크기이다. 규사의 크기로는 5 호사와 6 호사, 그리고 5 호사와 6 호사를 1:1로 혼합한 경우를 사용하였다. 5 호사의 직경은 0.66~1.2 mm 이고 6 호사의 직경은 0.56~0.66 mm이다. 두 번째 시

험 변수는 규사의 부착을 위해 사용된 수지의 종류이다. 사용된 수지는 2 가지 종류로써 비닐에스터(Vinyl Ester)와 에폭시(Epoxy)를 사용하였다. 마지막 시험 변수는 사용된 수지의 점도이다. 제조사에서 만들어진 본래의 수지 점도와 희석제와 증점제를 각각 사용하여 수지의 점도를 낮게 혹은 높게 개량하여 사용하였다.

또한 FRP Hybrid Bar의 부착성능을 상대적으로 비교하기 위하여 FRP Hybrid Bar에 사용된 인장 철근 직경과 같은 D16 이형철근과 GFRP의 두께를 포함한 FRP Hybrid Bar의 직경과 동일한 D22 이형철근을 포함하였다. 각각의 시험체 명은 3가지 시험 변수를 나타내는 숫자와 영문자로 표기하였으며 각각의 숫자 혹은 문자의 의미를 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Test Parameters

Specimen ID	Type of Reinforcement	Size of Silica Sand	Type of Resin	Viscosity
R-16	Rebar	-	-	-
F-5VO	FHB	5	Vinyl Ester	Original
F-5VL	FHB	5	Vinyl Ester	Low
F-5EH	FHB	5	Epoxy	High
F-5EO	FHB	5	Epoxy	Original
F-5EL	FHB	5	Epoxy	Low
F-6EO	FHB	6	Epoxy	Original
F-56EO	FHB	5+6	Epoxy	Original

* F-5VO

① ②③④

① : Type of Reinforcement(R:Rebar, F:FRP Hybrid Bar)

② : Size of Silica Sands(5, 6, 56:Mixed)

③ : Type of Resin(V:Vinyl Ester, E:Epoxy)

④ : Viscosity(O:Original, L:Low, H:High)

2.2 사용 재료의 특성

시험 변수에 따른 직접부착 시험체 제작에 사용된 이형철근의 역학적 특성을 확인하기 위하여 ASTM A370에 따른 직접 인장 시험을 수행하였다[19]. 시험 결과에 의한 사용된 철근의 역학적 특성을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Mechanical Properties of Rebar

Nominal Diameter (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation (%)
15.9	200,000	496.2	623.9	19.5
22.2	200,000	516.7	548.2	17.3

FRP Hybrid Bar 제작에 사용된 유리섬유의 역학적 특성과 사용된 수지의 역학적 특성은 Table 3과 4에 각각 나타냈다.

Table 3. Mechanical Properties of Glass Fiber

Elastic Modulus (MPa)	Ultimate Stress (MPa)	Ultimate Strain (%)
72,400	2,600	3.6

Table 4. Mechanical Properties of Resin Used in the Test

Type of Resin	Elastic Modulus (MPa)	Ultimate Stress (MPa)	Ultimate Strain (%)
Vinyl Ester	3,216	80	2.5

직접부착 시험체의 콘크리트 블록 제작에 사용된 콘크리트의 배합표를 Table 5에 제시하였으며 콘크리트 블록의 압축강도를 확인하기 위하여 ASTM C39/C39M에 따른 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체 5개에 대한 압축강도 시험을 수행하였다[20]. 직접부착시험 당일에 수행된 압축강도 시험 결과로부터, 평균 19.5 MPa의 압축강도를 확인하였으며 그 결과를 Table 6에 나타냈다.

Table 5. Mixing Proportion of Concrete

W/B	S/a	Unit of Weight(kg/m ³)						SP*
		W	C	BS	FA	S	G	
53.8	49.7	162	189	80	29	915	925	2.08

* SP: Superplasticizer

Table 6. Results of Compressive Strength for Concrete

Specimen No.	Compressive Strength(MPa)
1	18.7
2	20.1
3	19.4
4	18.6
5	20.9
Average	19.5

2.3 FRP Hybrid Bar의 제작방법

FRP Hybrid Bar는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 Braid-trusion 공정에 의해 제작되었다. Braid-trusion 방식을 통하여 섬유 배열성을 향상하고 섬유 사이의 공극을 감소하기 위하여 유리섬유 다발 및 돌기 섬유에 소정의 인장력을 도입하였다. 유리섬유가 완전히 경화된

이후 시험 변수에 따른 표면 규사 코팅을 수행하였다. FRP Hybrid Bar 표면에 수지를 얇고 고르게 펴 바른 후 규사를 FRP Hybrid Bar 표면에 부착하였다. 이후 규사의 부착성능 향상을 위하여 노즐 직경 1.5 mm의 스프레이드 건과 공기압을 사용하여 표면에 수지를 2차례 도포하였다. 규사 부착을 위해 사용된 수지가 충분히 경화된 후에 직접부착 시험체를 제작하였다.

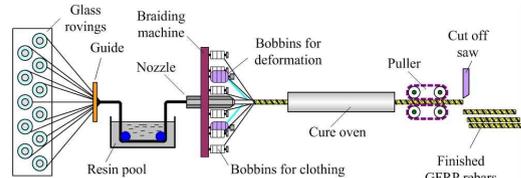


Fig. 1. Modified Braid-trusion Process[2, 4]

2.4 직접부착 시험체 제작

직접부착 시험체는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이, ASTM D 7913에 따라 제작하였다[21]. 콘크리트 블록은 한 변의 길이가 200 mm인 정육면체로 제작되었고 보강근은 콘크리트 정중앙에 수직으로 매립되었다. 보강근과 콘크리트의 부착 길이는 ASTM D 7913에 준하여 각 사용 보강근 직경의 5배인 80 mm로 하였으며 부착 구간을 제외한 비부착 구간을 위해 방수 스펀지(Water Proof Sponge)를 매립하였다.

모든 시험체는 동일 시험 변수에 대해 각각 3개씩 제작되었고 전체 24개의 시험체는 한 배치의 콘크리트를 사용하여 타설하였다. 콘크리트 타설 이후, 충분한 양생을 거친 뒤에 실험실로 옮겨져 직접부착시험을 수행하였다.

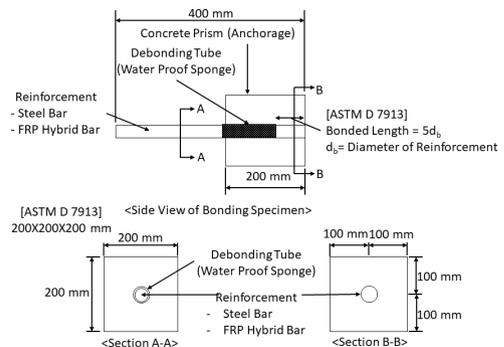


Fig. 2. Test Specimen Layout[21]

2.5 시험체 설치 및 계측 계획

이형철근 및 FRP Hybrid Bar 부착 시험은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이, 한국건설기술연구원 구조실험동에 있는 최대 용량 1,000 kN의 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 1 mm/min의 변위제어를 통해 하중을 가력하였다. 또한 보강근의 슬립량을 측정하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 것과 같이, 시험체 상면에 돌출된 보강근의 끝단에 25 mm 용량을 가진 1개의 변위계를 설치하였다. 하중 및 기계 변위, 그리고 변위계의 측정값과 같은 모든 계측 값은 매 초마다 데이터 로거(Data Logger)를 통하여 수집되었고 컴퓨터에 저장되었다. 그리고 시험 중 발생하는 시험체의 특이사항을 육안을 통하여 관찰하고 기록하였다.

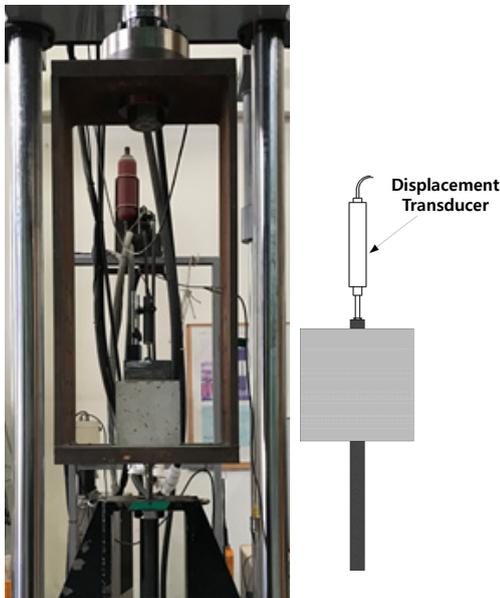


Fig. 3. Test Setup

3. 시험 결과 및 분석

3.1 시험 결과의 요약

Table 7은 직접부착시험에 의한 결과를 정리한 것이다. 각 시험체의 최대하중, 부착강도, 그리고 최대하중에서의 슬립(Slip)은 동일 시험체 3개에 대한 평균값이다. 각 시험체의 부착강도(τ_{max})는 아래의 식 1과 같이, 측정된 각 시험체의 최대 하중(P_{max})을 부착면적($\pi d_b l_b$)으로 나누어 계산하였다.

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{\pi d_b l_b} \quad (1)$$

여기서,

τ_{max} = 부착강도(MPa)

P_{max} = 최대 하중(N)

d_b = FRP Hybrid Bar의 공칭 직경(mm)

l_b = FRP Hybrid Bar의 부착 길이(mm)

Table 7. Summary of Experimental Results

Specimen ID	Maximum Load (kN)	Bond Strength (MPa)	Slip at the Maximum Load (mm)
R-16	31.79	7.96	1.09
F-5VO	44.38	7.95	2.65
F-5VL	51.99	9.32	2.02
F-5EH	38.12	6.83	3.55
F-5EO	59.86	10.73	2.75
F-5EL	54.96	9.85	2.67
F-6EO	42.95	7.70	2.54
F-56EO	38.39	6.88	2.77

D16 이형철근의 부착강도는 7.96 MPa 이고 FRP Hybrid Bar의 부착강도는 6.83 ~ 10.73 MPa로써 이형철근 대비 약 85 ~ 135%의 결과 값을 보였다. 이형철근의 부착강도보다 높은 시험체는 F-5VL, F-5EO, 그리고 F-5EL로써 각각 비닐에스터 수지의 점도를 낮게 개량하여 사용한 경우와 에폭시 수지의 점도를 낮게 개량하거나 혹은 본래의 점도를 사용한 경우이다. 또한, 이형철근의 부착강도보다 높은 3개 시험체들은 직경이 6 호 사보다 상대적으로 큰 5 호사를 사용한 공통된 특징을 가지고 있다.

이형철근의 최대하중에서 슬립은 약 1.09 mm이고 FRP Hybrid Bar의 최대하중에서 슬립은 실험 변수에 따라 2.02 ~ 3.55 mm로 측정되었다. 대부분의 FRP Hybrid Bar를 매립한 시험체의 최대하중은 이형철근의 경우보다 컸기 때문에 최대하중에서 측정된 FRP Hybrid Bar의 슬립도 이형철근의 슬립보다 약 1.85배 이상 컸다.

3.2 부착-슬립 곡선의 비교

Fig. 4는 R-16 시험체의 부착-슬립 곡선을 나타낸 것이다.

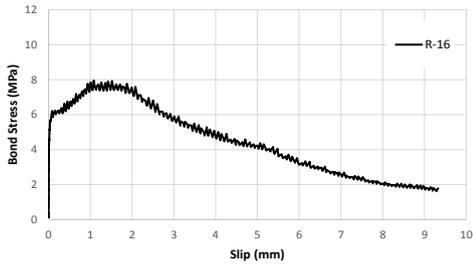


Fig. 4. Bond Stress - Slip Curve of R-16 Specimen

R-16 시험체는 초기 약 5 MPa까지는 슬립이 없다가 이후 응력의 증가와 함께 슬립이 발생하였다. 약 8 MPa의 최대부착강도에 도달한 뒤에 응력이 감소하기 시작했다. 콘크리트와의 완전부착으로 인해 초기에는 슬립이 없으며 철근을 감싸고 있는 주변 콘크리트의 균열로 인해 파괴되었다.

Fig. 5는 비닐에스터 수지를 사용한 F-5VO, F-5VL 시험체에 대한 부착-슬립 곡선을 나타낸 것이다.

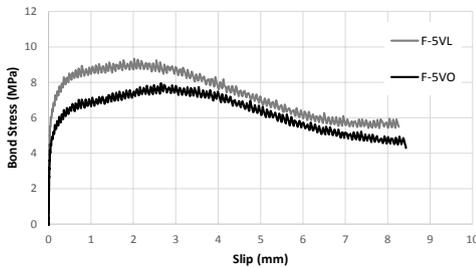


Fig. 5. Bond Stress - Slip Curves of F-5VO and F-5VL Specimens

비닐에스터 수지는 본래 자체의 점도가 높아 점도를 증가시킨 시험체는 고려하지 않았다. 본래의 점도를 사용한 F-5VO 시험체는 약 4 MPa의 응력에서 슬립 발생이 시작되었고 약 8 MPa의 최대부착강도에 도달하였다. 점도를 낮춘 F-5VL 시험체는 약 5 MPa의 응력에서 슬립이 발생하여 약 9 MPa의 최대부착강도에 도달한 뒤에 응력이 서서히 감소하기 시작하였다.

두 시험체 모두 비슷한 경향의 부착-슬립 곡선을 나타냈으나 F-5VL 시험체의 최대부착강도가 약 1 MPa 정도 높았다. FRP Hybrid Bar의 규사 코팅에서 비닐에스터 수지의 점도를 낮춤으로써 보다 균질한 부착면을 형성할 수 있었고 이로 인해 최대부착강도가 향상된 것으로 판

단된다.

Fig. 6은 규사의 부착을 위해 에폭시 수지를 사용한 시험체의 부착-슬립 곡선의 비교를 나타낸 것이다. F-5EO 시험체는 수지 본래의 점도를 사용한 경우이고 F-5EH와 F-5EL 시험체는 각각 점도를 높게 혹은 낮게 개량하여 사용한 경우이다.

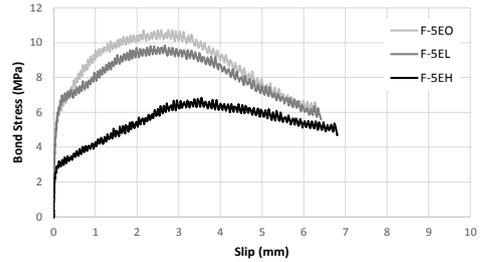


Fig. 6. Bond Stress - Slip Curves of F-5EH, F-5EO and F-5EL Specimens

F-5EO 시험체의 최대부착강도는 약 10.73 MPa로 가장 크게 측정되었으며 점도를 낮게 개량한 F-5EL 시험체의 최대부착강도는 약 9.85 MPa로 F-5EO 시험체의 부착-슬립 곡선과 매우 유사했다. 하지만 점도를 증가시킨 F-5EH 시험체의 경우에는 약 3 MPa의 응력에서 슬립이 발생하였으며 최대부착강도도 약 6.83 MPa로 F-5EO 시험체의 최대부착강도와 비교하여 큰 차이를 나타냈다. 점도를 낮춘 경우, 최대부착강도가 소폭 감소하기는 하였으나 전체적인 거동에는 큰 영향이 없으므로 확인하였고 다만, 수지의 점도를 증가시킨 경우에서 부착 거동이 매우 상이함을 확인하였다. 이는 증가된 수지의 점도로 인하여 FRP Hybrid Bar 코팅 시에 수지가 고르게 도포되지 못하고 규사의 부착이 균질하게 이루어지지 못했기 때문에 다른 시험체들과 달리 비교적 적은 응력에서 슬립이 발생하였으며 최대부착강도도 F-5EO 시험체와 비교하여 약 37%정도 감소하였다. 실제 구조물에 적용 시에 사용하중 상태에서도 콘크리트와 완전부착되지 못하여 보강근이 제대로 힘을 받지 못하고 뽑히는 파괴가 발생할 우려가 있으며 심각한 경우 구조물에 구조적 균열이나 대변형을 발생시킬 수도 있다.

Fig. 7은 수지 종류와 점도가 동일한 조건에서 부착되는 규사의 크기에 따른 각 시험체의 부착-슬립 곡선을 나타낸 것이다.

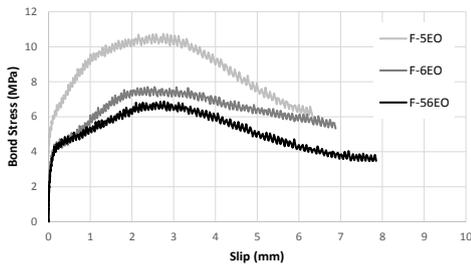


Fig. 7. Bond Stress - Slip Curves of F-5EO, F-6EO and F-56EO Specimens

규사의 직경이 상대적으로 큰 5 호사를 사용한 F-5EO 시험체의 최대부착강도는 약 10.73 MPa로 가장 컸으며 6 호사를 전체 혹은 부분적으로 사용한 F-6EO와 F56EO 시험체의 최대부착강도는 각각 7.7 MPa과 6.88 MPa로써 약 3 ~ 3.85 MPa 정도로 낮게 측정되었다. 이러한 결과는 규사의 직경이 상대적으로 큰 5 호사를 사용한 F-5EO 시험체가 F-6EO 혹은 F-56EO 시험체와 비교하여 FRP Hybrid Bar의 표면의 거칠기가 보다 거칠기 때문에 최대부착강도가 보다 크게 측정된 것으로 판단된다.

Fig. 8은 비닐에스터 수지와 에폭시 수지를 사용한 경우에서 가장 큰 부착강도를 나타낸 F-5VL 시험체와 F-5EO 시험체의 부착-슬립 곡선을 나타낸 것이다.

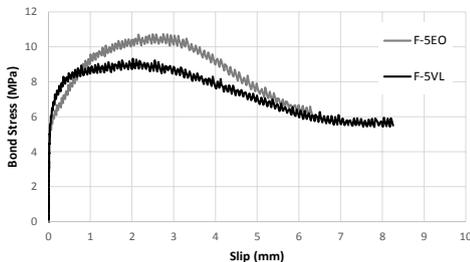


Fig. 8. Bond Stress - Slip Curves of F-5VL and F-5EO Specimens

두 시험체 모두 약 5 MPa의 응력에서 슬립이 발생되기 시작하였으며 각각 약 10.73 MPa과 9.32 MPa의 최대부착강도에 도달한 뒤에 응력이 감소하는 형태를 보였다. FRP Hybrid Bar의 부착-슬립 곡선은 이형철근을 사용한 R-16의 부착-슬립 곡선과 비교하여 최대응력 부분에서 완만한 곡선을 나타낸다. 이러한 차이는 이형철근

의 경우, 철근 마디와 콘크리트의 기계적인 결합이 콘크리트에 발생된 균열에 의해 취성적으로 파괴되고 FRP Hybrid Bar의 경우, 수지로 부착한 GFRP와 규사의 계면에서 수지의 연성적으로 파괴되기 때문이다. 모든 시험 변수 중에서 가장 좋은 역학적 성능을 나타내는 시험체는 에폭시 수지를 점도 변경 없이 사용하여 5 호사를 부착한 F-5EO 시험체였으며 비닐에스터 수지를 사용하는 경우에는 점도를 낮게 조절하여 사용하는 것이 F-5EO 시험체의 결과와 가장 유사하였다.

4. 결론

본 연구에서 FRP Hybrid Bar의 규사 코팅 방법에 따른 부착강도를 평가하기 위하여 수지의 종류, 수지의 점도, 그리고 사용 규사의 크기를 변수로 하여 직접부착 시험을 수행하였다. 수행된 시험으로부터 취득된 결과들을 정리하여 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

- (1) 에폭시 수지를 사용한 시험체의 부착강도가 비닐에스터 수지를 사용한 경우보다 약 5 ~ 35% 정도 향상되었고 수지의 점도를 높인 경우보다 낮은 경우에서 부착강도가 약 44% 정도 향상되는 것으로 확인하였다. 점도가 낮은 수지를 사용하면 FRP Hybrid Bar에 보다 고르게 수지를 바를 수 있고 규사의 뭉침 현상이 없어 보다 균질한 부착면을 형성할 수 있었기 때문에 부착강도가 향상된 것으로 사료된다.
- (2) 규사의 직경이 상대적으로 큰 5 호사를 사용한 F-5EO 시험체의 부착강도가 6 호사를 사용한 F-6EO 시험체의 부착강도보다 약 3.0 MPa 정도 큰 것을 확인하였고 이는 규사의 크기가 클수록 부착면이 거칠기 때문에 부착강도가 증가하는 것으로 판단된다.
- (3) FRP Hybrid Bar의 규사 코팅을 위한 수지의 종류, 수지의 점도, 규사의 크기를 변수로 한 시험에서 가장 좋은 역학적 특성을 나타내는 시험체는 F-5EO였으며 약 10.73 MPa의 최대부착강도를 나타냈다. 이는 D16 이형철근의 최대부착강도 7.96 MPa보다 약 35% 정도 증가된 값이다.
- (4) 이형철근의 부식문제를 해결하기 위하여 개발된 FRP Hybrid Bar의 건설 분야 적용을 위해서 향

후, FRP Hybrid Bar로 제작된 콘크리트 부재의 역학적 성능에 관한 실험적 조사와 해안가와 같은 염분노출 환경에서의 장기적인 내구성 조사가 추가적으로 수행될 필요가 있다.

References

- [1] B. H. Oh, K. H. Kim, S. Y. Jang, Y. R. Jiang, and B. S. Jang, "Cracking Behavior of Reinforced Concrete Structures due to Reinforcing Steel Corrosion," *Journal of the Korean Concrete Institute*, vol. 14, no. 6, pp. 851-863, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2002.14.6.851>
- [2] Y. Liu and R. E. Weyers, "Modelling the Time-to Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures," *ACI Materials Journal*, vol. 95, no. 6, pp. 675-681, 1998.
- [3] S. S. Ha and D. U. Choi, "Development Length of GFRP Bars," *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 22, no. 1, pp. 131-141, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.1.131>
- [4] Y. J. You, K. T. Park, D. W. Seo, J. H. Hwang, "Tensile Strength of GFRP Reinforcing Bars with Hollow Section," *Advances in Material Science and Engineering*, vol. 2015, Article ID 621546, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/621546>
- [5] L. Taerwe, "Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Second International RILEM Symposium," CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, 1995.
- [6] A. Nanni, T. Okamoto, M. Tanigaki, S. Osakada, "Tensile Properties of Braided FRP Rods for Concrete Reinforcement," *Cement and Concrete Composites*, vol. 15, no. 3, pp. 121-129, 1993.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(93\)90001-P](https://doi.org/10.1016/0958-9465(93)90001-P)
- [7] Y. J. You, Y. H. Park, H. Y. Kim, J. S. Park, "Hybrid Effect on Tensile Properties of FRP Rods with Various Material Compositions," *Composite Structures*, vol. 80, no. 1, pp. 117-122, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.065>
- [8] J. H. Hwang, D. W. Seo, K. T. Park, Y. J. You, "Experimental Study on the Mechanical Properties of FRP Bar by Hybridizing with Steel Wires," *Engineering*, vol. 6, pp. 365-373, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2014.67039>
- [9] K. D. Jones, A. T. DiBenedetto, "Fiber Fracture in Hybrid Composite Systems," *Composites Science and Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 53-62, 1994.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(94\)90156-2](https://doi.org/10.1016/0266-3538(94)90156-2)
- [10] G. Kretsis, "A Review of the Tensile, Compressive, Flexural and Shear Properties of Hybrid Fibre-reinforced Plastics," *Composites*, vol. 18, no. 1, pp. 13-23, 1987.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(87\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0010-4361(87)90003-6)
- [11] C. E. Bakis, A. Nanni, J. A. Terosky, S.W. Koehler, "Self Monitoring, Pseudo-ductile, Hybrid FRP Reinforcement Rods for Concrete Applications," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 6, pp. 815-823, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00184-6)
- [12] G. Wu, Z. S.Wu, Y. B. Luo, Z. Y. Sun, X. Q. Hu, "Mechanical Properties of Steel-ftp Composite Bar under Uniaxial and Cyclic Tensile Loads," *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, no. 10, Article ID 010010, pp. 1056-1066, 2010.
- [13] A. Nanni, M. J. Henneke, T. Okamoto, "Tensile Properties of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 8, no. 1, pp. 27-34, 1994.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0950-0618(94)90005-1)
- [14] A. Nanni, M. J. Henneke, T. Okamoto, "Behaviour of Concrete Beams with Hybrid Reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 8, no. 2, pp. 89 - 95, 1994.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(09\)90017-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(09)90017-4)
- [15] M. M. S. Cheung and T. K. C. Tsang, "Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Hybrid FRP Composite Rebar," *Advances in Structural Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 81-93, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.1.81>
- [16] J. P. Won, C. G. Park, S. J. Lee, B.T. Hong, "Durability of Hybrid FRP Reinforcing Bars in Concrete Structures Exposed to Marine Environments," *International Journal of Structural Engineering*, vol. 4, no. 1-2, pp. 63-74, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2013.050764>
- [17] J. P. Won and C. G. Park, "Effect of Environmental Exposure on Thermochemical and Bonding Properties of Hybrid FRP Reinforcing Bars for Concrete Structures," *Journal of Composite Materials*, vol. 40, no. 12, pp. 1063-1076, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998305057362>
- [18] M. K. Ju, G. T. Park, S. Y. Lee, and C. W. Park, "Bond Performance of GFRP and Deformed Steel Hybrid Bar with Sand Coating to Concrete," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 36, no. 6, pp. 464-475, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684416684209>
- [19] ASTM A370, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, American Society for Testing and Materials (ASTM), Pennsylvania, USA, 2013.
- [20] ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials (ASTM), Pennsylvania, USA, 2013.
- [21] ASTM D7913/D7913M, Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing, American Society for Testing and Materials (ASTM), Pennsylvania, USA, 2014.

정 규 산(Kyu-San Jung)

[정회원]



- 2010년 2월 : 충북대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 8월 : 충북대학교 일반대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2016년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

토목구조, 구조물 유지관리, 보수·보강

서 동 우(Dong-Woo Seo)

[정회원]



- 2008년 5월 : Bucknell Univ. 토목환경공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : Northeastern Univ. 토목환경공학과 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

내풍공학, 구조물 유지관리, 구조물 SHM

박 기 태(Ki-Tae Park)

[정회원]



- 1994년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1994년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

시설물 유지관리, 건설-IT 융합

김 병 철(Byeong-Cheol Kim)

[정회원]



- 2004년 9월 ~ 2007년 2월 : (주)노하우솔루션 토목구조설계
- 2009년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

토목구조(FEM,CFD,신호처리)

유 영 준(Young-Jun You)

[정회원]



- 1998년 8월 : 연세대학교 토목공학과 대학원 (공학석사)
- 2015년 8월 : 연세대학교 토목환경공학과 대학원 (공학박사)
- 1998년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

보수·보강, 신재료, 교량

박 준 석(Joon-Seok Park)

[정회원]



- 2007년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2015년 2월 : 서일대학교 토목과 강의전담교수
- 2016년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

토목구조공학, 복합재료