

FRP-콘크리트 합성을 위한 퍼포본드 전단 연결재의 성능 평가

Performance Evaluation of Perfobond Rib FRP Shear Connectors for Composition between FRP and Concrete

박성용* 조정래* 황훈희* 조근희* 백동열*** 김성태**
Park, Sung Yong Cho, Jeong-Rae Hwang, Hoon Hee Cho, Keunhee Baik, Dong-Youl Kim, Sung-Tae

ABSTRACT

One of main issues of the FRP-concrete composite member is shear connection between FRP and concrete in order to secure composite behavior of FRP and concrete. To solve this problem, perfobond rib FRP shear connector is introduced for the mechanical shear connection. In this study, experimental study was carried out on the perfobond rib FRP shear connectors in order to develop the effective details of perfobond rib FRP shear connectors. Pull-out test specimens were manufactured with FRP plate with holes embedded in concrete block. Main parameters considered in this study were diameter of holes, ratio of spacing between the centres of holes to the diameter of holes, and thickness of FRP plates. Test results are discussed according to above parameters compared with other empirical expressions for steel perfobond rib connector.

1. 서론

FRP는 내구성이 뛰어나고, 중량 대비 강도가 우수하며, 부식의 염려가 없는 장점으로 인해 토목구조물에 적용하려는 시도가 증가하고 있으나, 재료비가 고가이며 강도 대비 강성이 매우 적은 단점이 있다. FRP와 콘크리트를 합성한 하이브리드 구조는 이와 같은 FRP의 단점을 보완하면서 두 재료의 장점을 극대화할 수 있는 조합으로 볼 수 있다. 이중 재료의 결합으로 구성되는 합성구조에서 가장 중요한 것은 두 재료간 접합면에서의 합성거동을 확보하는 문제일 것이다.

현재까지 FRP와 콘크리트를 합성시키는 방법으로는 FRP 표면에 접착제를 바르고 그 위에 규사를 뿌려서 접착시키는 화학적인 연결방법과, FRP 패널 위에 돌기를 두어 콘크리트에 매립되게 하거나 FRP 관 제작시에 관 내부에 나선형 홈을 연속시키는 기계적인 연결방법 등이 있다. 본 연구는 현재 강-콘크리트 합성 바닥판의 합성을 위해 개발된 퍼포본드 리브 전단연결재를 FRP-콘크리트 합성 구조에 적용하기 위하여 필요한 기초적인 자료를 얻기 위하여 수행되었다. 즉, 강관 대신에 FRP 관에 구멍을 뚫은 후 이를 콘크리트 블록에 매립하고, 인발실험(push-out test)을 실시하여 전단 성능을 평가하고, 이를 FRP-콘크리트 합성 구조에 적용할 상세를 개발하기 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*** 학생회원, 국민대학교 토목환경공학과 석사과정, 한국건설기술연구원 연구생

2. 퍼포본드 리브 전단연결재의 강도평가식 관련 기존 연구 분석

퍼포본드 리브 전단연결재의 강도평가식을 살펴보면, Oguejiofor 등(1997)이 강거더에 퍼포본드 리브 전단연결재를 부착하여 인발실험을 통해서 식 (1)과 같이 강도평가식을 제안한 바 있으며, Medberry 등(2002)은 추가적인 실험을 통해 식 (2)를 제안하였다(식 2는 원래 식에 대해 단위를 환산한 것임).

$$q_u = 4.5htf_{ck} + 0.91A_{tr}f_y + 3.31nd^2\sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$q_u = 0.75bh\sqrt{f_{ck}} + 0.90A_{tr}f_y + 1.31nd^2\sqrt{f_{ck}} + 0.41b_fL_c \quad (2)$$

위 식에서 첫 번째 항은 콘크리트의 지압 또는 활렬 저항 효과이고, 두 번째 항은 횡방향 철근의 기여분이며, 세 번째 항은 리브 구멍에 형성된 콘크리트의 다웰 효과이다. 식 (2)의 네 번째 항은 강재 리브와 콘크리트 간의 부착에 의한 저항이다. 위 식들에 사용된 기호는 해당 문헌을 참고하기로 하고 여기서는 생략한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 FRP-콘크리트 합성용 퍼포본드 전단연결재는 일반적인 강-콘크리트 합성을 위한 리브와는 달리 연속구조이며, 또한 그림 1과 같은 형상으로 실험체를 제작하였으므로 식 (1), (2)에서 해당되는 항만 분리하여 식 (3)과 같이 일반화할 수 있다.

$$q_u = \alpha nd^2\sqrt{f_{ck}} + \beta b_s l_s \quad (3)$$

식 (3)에서 n d^2 는 각각 구멍의 개수 및 직경(mm), b_s , l_s 는 콘크리트에 매립되어 있는 리브의 폭과 길이(mm)이다. 식 (1), (2)를 식 (3)에 대비하면 위의 두 연구 결과는 각각 $\alpha=3.31$, 1.31 이고, $\beta=0.0$, 0.82 (양면)이 된다. 식 (3)에서 첫 번째 항은 콘크리트의 다웰 효과만을, 그리고 두 번째 항은 콘크리트와 리브 간의 마찰에 의한 기여도를 표현한 것이므로 α 값만으로 두 식을 비교하기에는 무리가 따른다. 이러한 점을 감안하여 퍼포본드 리브 전단연결재에서 콘크리트의 다웰 작용에 의한 전단강도의 기여도를 정확히 파악하기 위하여 이 두 가지의 효과를 분리해서 평가할 필요가 있다.

3. 퍼포본드 FRP 리브 전단연결재의 전단 성능 평가

3.1 실험 개요

실험체는 표 1과 같이 구멍의 직경, 간격, 형상, FRP 리브의 두께를 변수로 하여 각각 3개씩 제작하였다. 실험체의 형상 및 제원은 그림 1과 같다. 압축강도실험으로 구한 콘크리트의 강도는 28.4MPa로 나타났다. 한편, FRP 판의 인장강도는 두께가 8mm인 경우에는 345MPa, 4mm인 경우에는 478MPa이고, 각각의 인장탄성계수는 39.7GPa, 41.1GPa로 나타났다. 한편, 구멍이 없는 S 실험체를 제외하고는 모든 실험체의 표면에 윤활제를 발라서 접합면에서의 마찰력을 제거하였다.

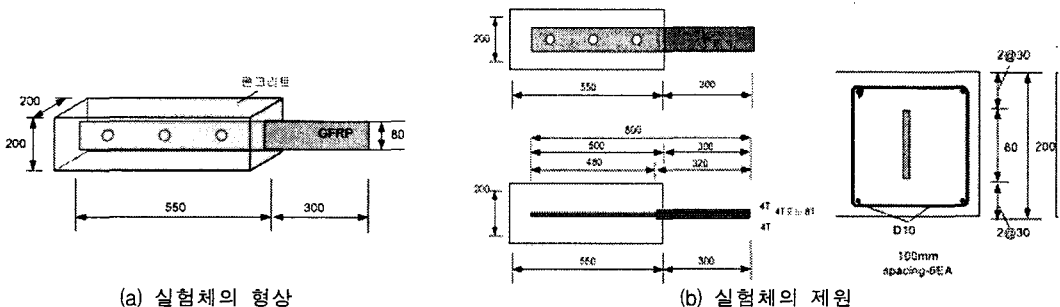


그림 1 실험체의 형상 및 제원

표 1 퍼포본드 FRP 전단연결재의 성능 평가를 위한 실험 변수

실험체명	S	D40-S120	D40-S160	D30-S160	D40-S160-4T	D40-S160-H
형상 및 제원						
구멍 직경(d)	-	40mm	40mm	30mm	40mm	40mm
구멍 간격(s)	-	120mm	160mm	160mm	160mm	160mm
FRP 두께(t)	8mm	8mm	8mm	8mm	4mm	8mm

3.2 실험 결과 분석

실험은 그림 2와 같이 노출된 FRP 판재를 아래쪽으로 향하게 고정시키고, 콘크리트 부재를 들어 올려서 인발하는 방법으로 진행되었으며, 변위계 설치하여 FRP 부재와 콘크리트 부재간의 상대변위를 측정하였다.

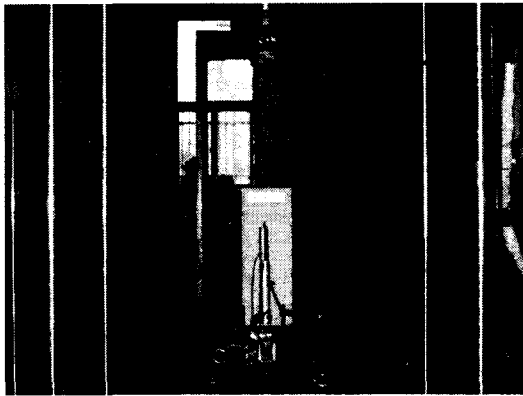


그림 2 인발실험 전경

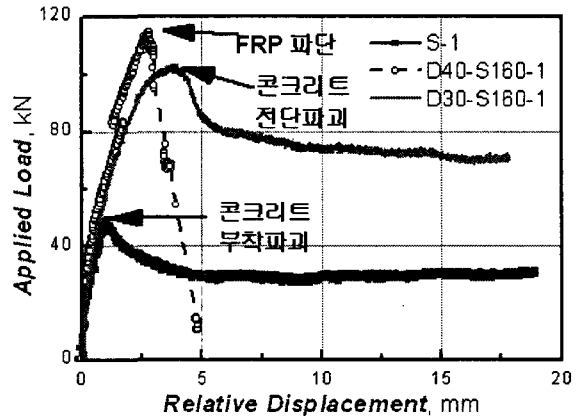


그림 3 파괴모드별 하중-상대변위 곡선

그림 3은 이 실험에서 나타난 세 가지의 파괴모드에 대하여 하중-상대변위 곡선을 그린 것이다. FRP가 파단된 실험체는 거의 선형인 관계를 보이다가 재하점에서 가장 가까운 구멍 중심부의 FRP 리브가 파단되면서 순식간에 하중이 감소함을 볼 수 있다. 콘크리트가 파괴된 경우에는 극한하중에 도달하기까지 명확한 비선형 구간이 형성되어 항복의 징후를 인지할 수 있었다. 이와 같은 파괴형태는 전단연결판의 구멍에 충전된 콘크리트의 다웰 효과에 의한 것으로 판단되며, 극한 하중점 이후에 충전된 콘크리트의 전단파괴와 함께 소정의 하중저하가 발생되지만 점차 하중의 감소폭은 줄어들고 상대변위는 지속적으로 증가하였다. FRP 리브와 콘크리트의 부착이 파괴된 경우에는 상대적으로 극한하중이 낮기는 하지만 무시할 만한 수준은 아닌 것으로 나타났으며, 변위의 지속적인 증가를 관찰할 수 있었다.

표 2에 각 실험체별로 실험에 의한 극한하중을 정리하였다. 표에서 콘크리트 파괴시의 극한하중에 대한 예상치는 식 (3)에 대하여 Oguejiofor 등(1997)의 연구를 이용하여 $\alpha=3.31$, $\beta=0.0$ 을 적용한 것과 Medberry 등(2002)의 연구를 이용하여 $\alpha=1.31$, $\beta=0.82$ 를 적용한 것의 두 가지로 분리하였다. 또한, FRP 파괴시의 파괴하중 예상치는 FRP 리브의 최소 순단면(FRP 리브의 폭에서 구멍 직경을 뺀 값)에 앞에서 언급한 FRP의 인장강도를 곱한 값이다.

표 2 실험체별 극한하중(kN) 비교

실험체명		S	D40-S120	D40-S160	D30-S160	D40-S160-4T	D40-S160-H	
예 측 치	콘크리트	$\alpha=3.31, \beta=0.0$	-	112.9	84.7	47.6	84.7	84.7
	파괴시*	$\alpha=1.31, \beta=0.82$	31.4'	44.7	33.5	18.8	33.5	33.5
	FRP 파괴시		220.8	110.4	110.4	138.0	76.5	110.4
실 험 치	시편-1		48.1 (I)	128.1 (F)	112.9 (F)	101.8 (C)	96.6 (F)	127.3 (F)
	시편-2		56.3 (I)	114.7 (F)	113.4 (F)	141.6 (F)	101.1 (F)	127.6 (F)
	시편-3		47.1 (I)	112.8 (F)	120.2 (F)	111.7 (C)	89.3 (F)	154.6 (F)
	평균		50.6	118.5	115.5	118.4	95.7	136.5

* 1. S 실험체를 제외한 나머지 실험체는 표면에 윤활제를 발랐기 때문에 모두 $\beta=0$ 을 적용하였다.

2. 표에서 (I)는 FRP-콘크리트 계면의 부착파괴, (F)는 FRP의 파단, (C)는 콘크리트 전단파괴를 의미한다.

표 2와 같이 구멍을 갖는 실험체의 대부분이 당초의 예측과는 달리 FRP 리브가 파괴되는 결과를 보였다. 즉, 상대적으로 구멍 크기가 작은 D30-S160 실험체만 3개 중에서 2개가 콘크리트 파괴를 보였다. 이는 예측치를 근거로 대부분의 실험체들이 콘크리트가 파괴되도록 설계한 것과는 다른 결과이다. 표에서 FRP가 파단된 실험체는 FRP 파괴시의 예측치에서 크게 벗어나지 않고 있음을 볼 수 있다. 이는 FRP가 완전한 선형 거동을 나타내는 재료임을 다시 한 번 입증해주는 결과라 할 수 있다.

콘크리트가 파괴된 두 개의 실험체를 근거로 하여 식 (3)의 α 값을 구하면, 평균 6.73이 되어서 Oguejiofor 등(1997)의 연구보다 약 2배 정도 큰 값이 된다. FRP 리브가 파괴된 다른 실험체에 이 값을 대입하면, 모두 FRP 리브가 먼저 파괴되는 것으로 나타난다. 한편, FRP 리브와 콘크리트와의 마찰을 구하기 위한 실험체 S에서는 극한하중이 평균 50.6kN으로 나타났다. 이 값을 근거로 하여 식 (3)의 β 값을 구하면, 평균 1.32가 된다. 이 값은 Medberry 등(2002)이 제안한 값보다 1.5배 이상 크며, 이를 근거로 한 FRP와 콘크리트의 부착응력은 0.66MPa이 된다.

4. 결 론

FRP-콘크리트 합성 부재의 전단 연결을 위한 방법으로 퍼포본드 FRP 리브 전단연결재를 도입하였으며, 이에 대한 기초적인 자료를 얻기 위한 실험을 수행하였다. 그 결과, 강제와 콘크리트의 합성구조용 퍼포본드 전단연결재의 인발실험을 통해 구한 기존의 전단강도 평가식으로 유추한 전단강도에 비해서 실험치가 2배 이상 큰 것으로 나타났다. 하지만, 실험체의 개수가 너무 적고 실험 방법도 상이하므로 이 결과로써 새로운 전단강도 평가식을 도출하는 데에는 무리가 있다고 판단된다. 이 연구를 토대로 하여 추가적인 실험을 수행하면 FRP-콘크리트 합성 구조에 적용 가능한 퍼포본드 FRP 리브의 전단강도 평가식을 도출할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(05건설핵심D09-차세대 시설물용 신재료 활용기술 연구단)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- Oguejiofor, E. C. & Hosain, M. U. (1997), Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors, Computers and Structures, Vol. 62, No. 4, pp. 617-624
- Medberry, S. B. & Sharooz, B. M. (2002), Perfobond shear connector for composite construction, Engineering Journal, AISC, Vol. 39; Part 1, pp. 2-12