

유공 FRP plate로 전단보강된 철근 콘크리트 보의 전단 성능 평가

Shear Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Plates



김희철*
Kim, Heecheul



이영학*
Lee, Young Hak

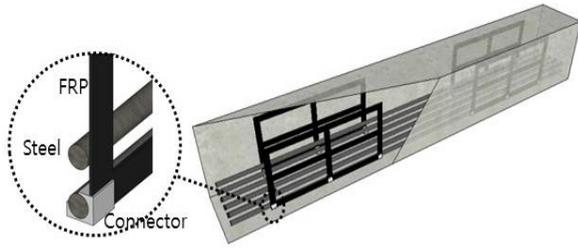
1. 기술개발 배경

철근 콘크리트의 보에 발생하는 전단응력은 균열이 발생하기 전에는 콘크리트에 의해 지지되지만, 균열이 발생하면 이러한 전단 저항이 감소하면서 취성적인 파괴가 발생한다. 전단균열로 인한 파괴는 건축물의 안정성은 물론 안전과도 직결되는 문제로 이에 설계 또는 보강에 관한 연구는 꾸준히 요구되어 왔다. 일반적으로 철근 콘크리트 보의 전단파괴를 방지하기 위해 철근 스티럽을 사용한다. 높은 전단 저항력이 요구되는 부재의 경우, 철근 스티럽의 배근이 조밀해지는데, 이는 전단에 대한 저항력은 증가하지만 자중의 중량화 및 불균등한 골재의 배치 등의 문제로 인해 오히려 구조물의 성능저하를 유발할 수 있다. 철근의 부식 문제 또한 아직 해결해야

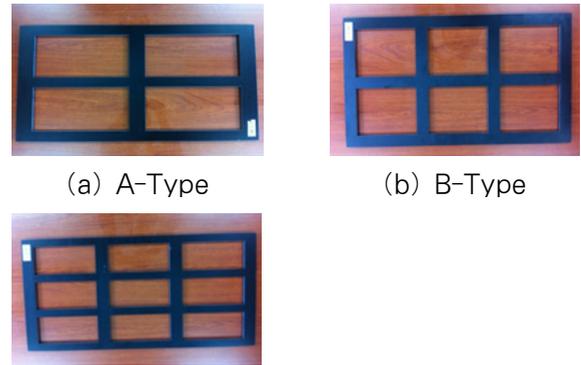
하는 과제이다. 이에 대한 해결책으로, FRP(fiber reinforced polymer)를 철근 스티럽 대신 전단보강재로 적용하고자 하였다. FRP는 섬유를 혼합하여 만든 복합재료로서 경량성, 가공성, 시공성, 부식저항성, 고강도성의 장점을 가지고 있어 자중 및 부식 문제를 충분히 해결할 수 있다. 본 연구에서 개발한 FRP 전단보강재를 <그림 1>에 나타내었다. FRP 전단보강재는 가로 및 세로 요소가 교차되어 유공을 가지는 플레이트 형상이다. FRP 전단보강재의 세로 요소는 전단에 저항하는 철근 스티럽과 같은 역할을 하며 이러한 세로 요소의 지지를 위해 가로 요소가 존재한다. 가로 및 세로 요소의 교차로 인해 생성되는 유공은 콘크리트 타설 시, 콘크리트의 유동성을 증가시키고 콘크리트와의 넓은 부착면적을 형성하여 보강재와 콘크리트의 부착력을 향상시킬 수 있다. FRP 전단보강재는 기존 철근 콘크리트 보 시공시, 피복두께 확보를 위해 거푸집에 설치하는 모르타르

* 정회원·경희대학교 공과대학 건축공학과 교수

스페이서와 주근 사이에 끼우는 방식으로 설치하게 된다.



〈그림 1〉 FRP 판으로 보강된 콘크리트 보



(a) A-Type

(b) B-Type

(c) C-Type

〈그림 2〉 FRP 판의 유공배열

2. 본 기술의 성능 평가

2.1 전단 실험

본 기술에서 개발한 FRP 전단보강재를 보강한 철근 콘크리트 보의 전단성능을 평가하기 위해 전단실험을 수행하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 압축강도는 45 MPa 이며, 전단보강재 제작에 이용된 FRP 는 GFRP, AFRP, CFRP 등 총 세 가지를 사용하였다. 〈표 1〉에 철근과 FRP의 재료실험을 통해 구한 물성치를 나타내었다.

〈표 1〉 사용재료

	f_y or f_{fu} (MPa)	탄성계수 (GPa)
인장 철근 철근 스티럽	498.8	200
GFRP	481.5	50
AFRP	1396.5	80
CFRP	1835.6	140

FRP 판의 유공 배열에 따라서 〈그림 2〉와 같이 세 가지 형상으로 제작하였으며 FRP 판의 형상을 〈그림 3〉과 같이 직사각형과 평행사변형 두 가지 형상으로 제작하였다. 직사각형 FRP 판은 가로, 세로 요소의 방향이 각각 0° , 90° 로서 서로 직각을 이루고 있으며, 평행사변형 FRP 판의 경우 각 요소의 방향은 각각 0° 와 45° 이다.

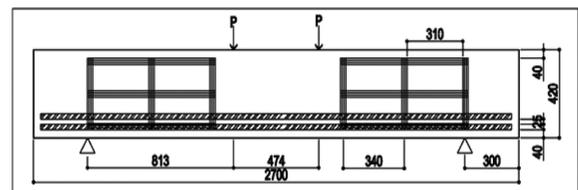


(a) 직사각형

(b) 평행사변형

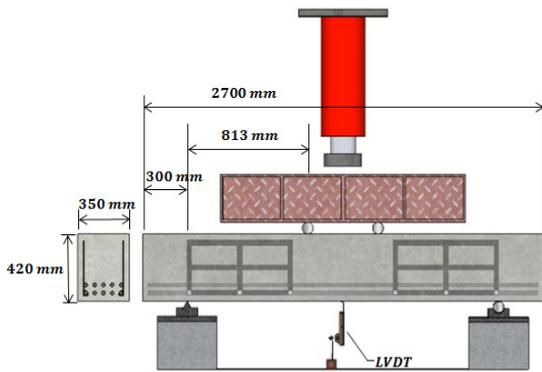
〈그림 3〉 FRP 판의 형상

시험체 내의 FRP 판의 배치형태를 〈그림 4〉에 나타내었다. 모든 시험체의 단면은 $350\text{mm} \times 420\text{mm}$ 이고, 총 경간은 2700mm, 순경간은 2100mm이며 300mm의 정착길이를 두었다. 피복두께는 40mm로 하였다. 시험체의 유효깊이는 342.5mm이다. 또한 전단경간비는 2.4로 설계하였다. 그리고 모든 시험체는 동일한 전단보강량($A_f \times f_{fu}$)으로 설계하여 FRP 판의 종류와 유공배열, 형상에 따른 보강 효과를 분석하였다.



〈그림 4〉 FRP 판의 배치형태

모든 시험체는 단순지지 상태로 최대용량 5000 kN의 유압식 UTM을 사용하여 양 지점으로부터 각각 813mm 떨어진 가력지점에서 2점 가력하였다. 시험체 세팅을 〈그림 5〉에 나타내었다.

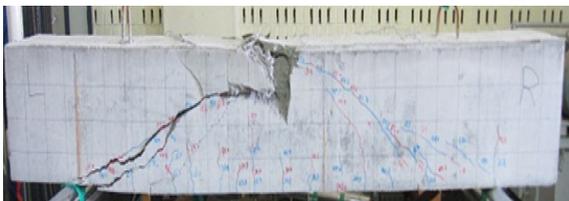


〈그림 5〉 시험체 세팅

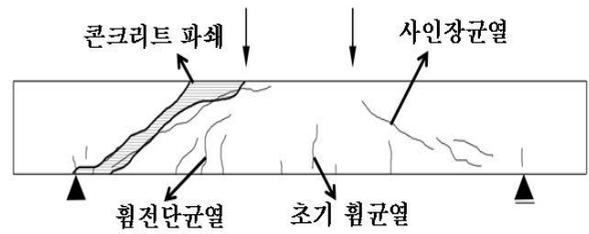
2.2 전단실험의 결과

〈그림 6〉에 나타난 것처럼 모든 시험체들에서 전단 압축파괴가 발생하였다. 전단 압축파괴는 사인장 균열과 동시에 가력지점과 지지점의 직접적인 압축대에서 생성되는 강한 압축력에 의해 가력지점의 콘크리트 파쇄와 동시에 전단파괴가 발생하는 것이다. 이와 관련하여 균열 및 파괴 모드에 대한 균열도를 〈그림 7〉에 나타내으며, 초기균열, 휨전단균열, 사인장 균열, 콘크리트 파쇄가 순차적으로 발생하였다.

작용하중의 증가에 따른 시험체의 균열양상을 살펴보면, 초기 균열은 보의 중앙부에서 보에 수직한 방향으로 휨인장 응력에 의한 휨 균열로 나타냈다. 휨 균열 이후 지지점으로부터 유효길이 만큼 떨어진 곳에서 휨 전단균열이 발생하였다. 이후 작용하중이 증가할수록 휨 전단균열과 사인장균열의 수는 증가하게 되었다. 결과적으로 사인장 균열은 지지점 부근의 휨 전단균열과 연결되었다. 또한 가력지점 부근에 국부적인 응력집중현상이 발생하여 콘크리트 압축대는 하중집중현상에 의해 상대적으로 더 큰 하중을 받게 되면서 콘크리트가 파쇄되었다.



〈그림 6〉 전단 압축 파괴

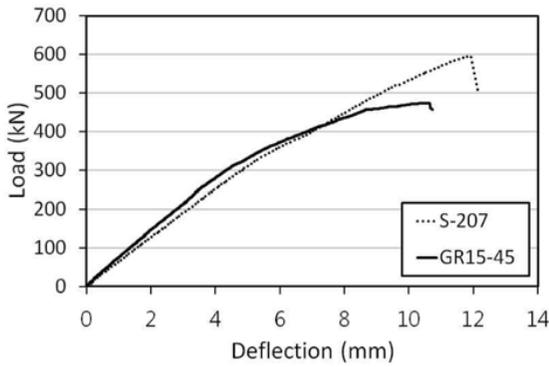


〈그림 7〉 파괴 모드

2.2.1 전단보강재의 종류

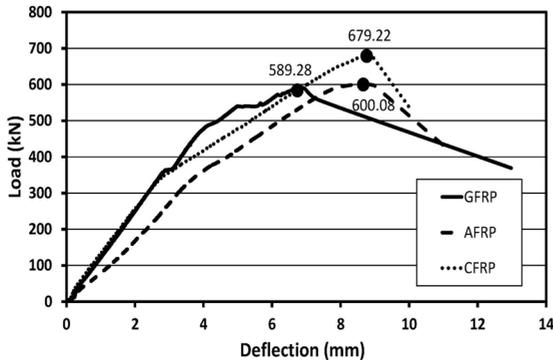
GFRP 판으로 보강한 시험체와 철근 스테럽으로 보강한 시험체의 하중-변위 곡선을 〈그림 8〉에 나타내었다. 이 실험은 철근 스테럽과 GFRP 판의 전단보강재로서의 성능을 비교 및 분석하기 위하여 전단보강재의 항복에 의하여 전단파괴가 발생하는 것으로 가정하였다. 이는 두 가지의 전단보강재가 최대내력을 발휘했을 때 전단성능 비교가 가능하기 때문이다. 철근 스테럽으로 보강한 시험체는 철근 스테럽의 항복에 의하여 전단파괴가 발생하였다. FRP는 항복하지 않는 재료적 특성을 가지고 있으므로 GFRP 판의 파단이 발생한 시점을 최대내력이 발현된 구간으로 보았다. 다음으로 철근 스테럽을 전단보강재로 사용한 현행 설계기준과 달리 GFRP 판의 전단강도는 위험단면구간에 존재하는 보강재의 보강면적과 보강재의 인장강도를 통해 산정할 수 있다. 따라서 형상이 다른 두 보강재의 전단성능을 비교하기 위하여 단위 보강면적을 맞추고 최대전단강도를 비교하였다. 철근 스테럽으로 보강한 시험체의 보강면적은 207mm^2 이고 GFRP 판으로 보강한 시험체의 보강면적은 45mm^2 이다. 단위 보강면적당 최대전단강도를 비교한 결과 GFRP 판으로 보강한 보가 철근 스테럽으로 보강한 보에 비해 3.6배 우수한 것으로 나타났다. 따라서 GFRP 판이 충분한 전단성능을 발휘한다면 철근 스테럽보다 전단성능 향상에 더 효과적이라고 판단된다.

GFRP, CFRP, AFRP 판으로 보강된 철근 콘크리트 보의 하중-변위 곡선을 〈그림 9〉에 나타내었다. FRP 판으로 보강된 모든 시험체는 대부분 유사한



〈그림 8〉 철근스터립과 하중-처짐 관계 비교

전단거동을 나타내었다. 초기균열이 발생한 후 전단 균열이 발생하기 전까지 탄성거동을 보이다가 전단 균열 이후부터 변위가 급격하게 증가하였다. FRP 판이 파단된 이후 최대하중에 도달하면서 취성적으로 파괴되었다. FRP 판의 종류에 따른 전단강도를 비교한 결과 GFRP 판 및 AFRP 판으로 보강된 시험체는 거의 동일한 전단강도를 나타내었다. 반면 CFRP 판으로 보강된 시험체는 다른 시험체보다 비교적 큰 전단강도를 나타내었다.

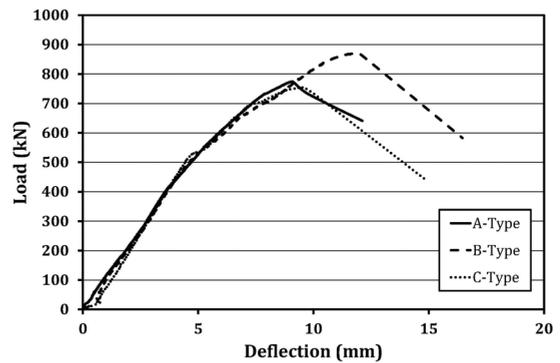


〈그림 9〉 FRP 판의 종류에 따른 하중-처짐 관계 비교

2.2.2 FRP 판의 유공배열

FRP 형상을 제외한 다른 설계가 동일한 세 가지 유공배열(A-type, B-type, C-type)의 GFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 실험결과를 확인하였다. 〈그림 10〉은 세 개의 시험체에 대한 하중-변위 곡선을 보여준다. 세 가지 시험체는 전단 파괴되기 전까지 동일한 거동을 보여주었다.

실험결과, A-Type과 B-Type 시험체의 비교를 통해 B-Type 시험체가 A-Type 시험체보다 콘크리트와 GFRP 판의 부착면적 증가로 일체화 거동에 효과적으로 작용하였다. 또한, B-Type과 C-Type 시험체의 비교를 통해 C-Type 시험체가 콘크리트와 GFRP 판의 부착면적은 증가하였지만, B-Type 보다 낮은 전단강도를 보였다. 그 이유는 C-type 시험체의 개구부 사이즈가 100mm 이하여서 GFRP 판의 전단보강성능을 발휘하지 못하였다고 판단하였다. 따라서, 개구부의 사이즈의 조건을 충족시키면서 GFRP 판과 콘크리트의 부착면적을 증가시켜 보강한다면 전단보강성능이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

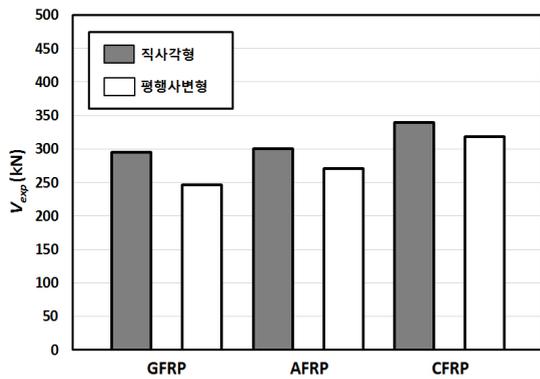


〈그림 10〉 FRP 판의 유공배열에 따른 하중-처짐 관계 비교

2.2.3 FRP 판의 형상

〈그림 11〉에서 보이는 바와 같이 FRP 형상을 제외하고 다른 설계를 동일하게 한 기본격자형 및 평행사변형 FRP 판으로 보강된 시험체의 전단강도를 비교한 결과, 직사각형 FRP 판으로 보강된 시험체가 평행사변형 FRP 판으로 보강된 시험체보다 전단강도가 크게 나타났다. 이와 관련하여 수정압축장 이론에 기반한 Bentz 등(2006)이 제안한 전단균열 각 예측식과 본 시험체 들의 전단균열 경사각을 비교한 결과, 균열각이 20° 에서 30° 사이의 범위내에서 비교적 좋은 예측결과를 보여 주고 있는 것으로 나타났다. 본 실험에서 사용된 시험체들의 전단

균열 경사각이 대체로 20° 정도로 측정된 점과 일반적으로 전단균열 경사각과 전단보강재의 각도가 수직에 가까울수록 보강성능이 더 좋아지는 점을 감안 하였을 때, 본 실험에서는 90° 로 보강된 직사각형 FRP 판이 발생된 전단균열에 더 수직인 방향으로 보강되었기 때문에 더 큰 보강성능을 발휘한 것으로 판단하였다.



〈그림 11〉 FRP 판의 형상에 따른 전단강도 비교

3. 결 언

본 연구에서는 철근 스테럽의 대체재인 매립형 유공 FRP 판으로 전단 보강된 철근콘크리트 보의 전단거동을 분석하기 위하여 철근 스테럽과의 비교, FRP 판의 종류, FRP 판의 형상을 변수로 실험하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 철근 스테럽과 GFRP 판을 단위 보강면적당 전단강도를 비교한 결과, GFRP 판으로 보강한 시험체가 3.6배 우수한 것으로 나타났다.
2. FRP의 종류에 따른 비교결과, 최대전단강도에 큰 영향이 없는 것으로 나타났으나 CFRP 판으로 보강한 시험체가 GFRP 및 AFRP 판으로 보강된 시험체보다 전단강도가 다소 크게 나타났다.
3. FRP의 유공배열에 따른 비교 결과 개구부의 사이즈가 100mm를 넘는 범위 내에서 GFRP 판과 콘크리트의 부착면적을 증가시키는 것이 전단보강성능을 향상시키는 것으로 나타났다.

4. FRP 판의 형상에 따른 비교결과 직사각형이 평행사변형보다 큰 전단강도를 나타냈다. 이는 본 실험에서 사용된 시험체들의 평균 전단균열이 20° 라는 점을 고려했을 때 실제 실험에서 균열각에 더 수직에 가깝게 보강된 직사각형 FRP 판 보강 시험체가 더 큰 전단강도를 발휘한 것으로 판단하였다.
5. 제안된 전단 보강재가 실무적으로 널리 사용되기 위해서는 유공면적과 부착에 대한 관계가 좀 더 다양한 실험을 통해서 정리가 되어 설계에 활용될 수 있어야 하고, 또한 시공성 측면에서의 개선이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

References

1. 최종훈, 김민숙, 김희철, 이영학, “매립형 유공 GFRP 판으로 보강된 RC보의 전단거동에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제24권 제4호 2012, pp.407-414.
2. 최종훈, 김대진, 김희철, 이영학, “매립형 GFRP 판으로 보강된 콘크리트 보의 전단강도식 평가”, 한국방재학회논문집, 제13권 제1호 2013, pp.11-16.
3. 최종훈, 김민숙, 김희철, 이영학, “FRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 전단강도 평가”, 대한건축학회논문집, 제29권 제6호 2013, pp.13-20.
4. Bentz E. C., Vecchio F. J., and Collins M. P., “Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements”, ACI Structural Journal, Vol. 103, No. 4, 2006, pp.614-624