

GFRP 판을 전단보강재로 사용한 넓은 보의 전단성능 평가

조 은 선¹ · 최 진 웅¹ · 김 민 숙¹ · 김 희 철¹ · 이 영 학^{1*}

¹경희대학교 건축공학과

Evaluation of Shear Strength for Wide Beam using GFRP Plate Shear Reinforcement

Eunsun Jo¹, Jin Woong Choi¹, Min Sook Kim¹, Heecheul Kim¹ and Young Hak Lee^{1*}

¹Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University, Yongin, 446-701, Korea

Abstract

In this paper, an experimental evaluation of shear strength of wide beam is presented. By the experiment in paper, shear strength depending on parameter of shear reinforcement by GFRP plate on wide beam is investigated. Specimens are 7 of reinforced by GFRP plate with openings. The shear reinforcement is manufactured into plate shape with openings to ensure perfect integration with concrete. The test was performed on 7 specimens. The parameters are including number of shear reinforcement by GFRP plates and center-to-center spacing between vertical strip. We analysed the crack, failure mode, strain, shear strength of specimens. A calculation of the shear strength of reinforced wide beam with GFRP plate based on ACI 318-11. The result of the experiment shows that the GFRP plate is works successfully as shear reinforcement in the wide beam.

Keywords : shear reinforcement, wide beam, GFRP plate, shear strength

1. 서 론

1.1 선행 연구

철근콘크리트 보의 전단거동은 취성적이고 콘크리트 강도 및 단면 형태에 따라 거동이 달라지기 때문에 이에 대한 정확한 예측이 어렵다. 철근콘크리트 보에서 일반적으로 전단 보강재로 사용되고 있는 철근 스티럽은 전단균열에 저항하며 부재가 더 높은 하중을 견딜 수 있도록 한다. 그러나 높은 전단력이 요구되는 부재의 경우, 철근 스티럽의 배근이 조밀해지기 때문에 전단에 대한 저항력은 증가하지만 동시에 자중이 증가하고 골재가 고르게 배치되지 않는 위험성을 동반하여 구조물의 성능저하를 유발할 수 있다. 또한 철근 스티럽의 현장작업으로 인한 공사기간의 지연과 철근의 부식으로

인한 내구성 저하의 우려가 있다. 이러한 이유로 경량이면서 내부식성의 장점이 있는 FRP(fiber reinforced polymer)를 전단보강재로 적용하는 연구가 수행되고 있다. Grace 등(1998)은 FRP 스티럽 전단보강재와 철근 스티럽의 파괴양상, 연성 지수 등을 비교하여 두 보강재 사이에 파괴 모드와 연성 지수를 규정할 수 있는 방법을 제시하였다. Ahmed 등(2010)은 구부러진 형태의 FRP 스티럽의 강도를 측정하는 ACI 440 코드 중 2가지 방법을 실험값과 비교 및 평가하여 신뢰할 수 있는 강도 평가방법을 제안하였다.

이와 같이, FRP로 전단보강한 일반 보에서의 전단성능 평가에 관한 연구는 다수 수행되고 있으나, 넓은 보의 전단 거동에 관한 연구는 거의 미비하다. 넓은 보의 경우, 보 높이에 비해 보의 폭이 넓기 때문에 일반 보와 같이 철근 스티럽을 배치할 경우, 보의 바깥쪽에만 스티럽이 위치하여 횡방향 단면의 중앙에 응력집중이 발생할 위험이 있다. 이러한 이유

* Corresponding author:

Tel: +82-31-201-3815; E-mail: leeyh@khu.ac.kr
Received February 11 2015; Revised March 17 2015
Accepted May 3 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 넓은 보의 횡방향 전단보강에 관한 연구가 수행되고 있으며, 횡방향으로 배치되는 스티럽의 개수를 증가시킬 것을 제안하고 있다. Anderson 등(1989)은 철근 스티럽의 형태 및 길이방향 철근과의 결속 방식, 그리고 배치 등을 변수로 실험을 수행하여 보의 전단성능을 평가하여 넓은 보에는 횡방향으로 다수의 전단보강을 하는 것이 전단성능을 향상시키는 방법임을 규명하였다. Lubell 등(2009)은 넓은 보에 철근 스티럽을 다양한 방식으로 배치하고 지지점 너비를 변화시켜 횡방향 전단보강 간격 및 지지점 너비가 전단성능에 미치는 영향을 연구하였다. Shuraim 등(2012)은 넓은 보와 기둥 간의 뿔림전단 실험을 통해 지지점의 너비를 고려한 전단강도식을 제안하였다. 이와 같이 넓은 보에서 철근 스티럽을 전단보강재로 사용하여 전단성능을 평가하는 연구는 진행 중이지만 철근 외의 재료를 사용한 전단보강재에 관한 연구는 거의 전무하다. 횡방향의 철근 스티럽 개수를 증가시킬 경우, 철근 스티럽의 간격이 좁아지며 구조물의 성능을 저하시키고 부식의 위험이 있어 철근 스티럽을 대체할 수 있는 전단보강재의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 일반 보의 전단 거동 평가연구(Choi *et al.*, 2012)에서 실험을 통해 그 성능이 평가되었던 판 형상의 GFRP를 전단보강재로 적용하였다.

1.2 연구 범위

Fig. 1과 같이 유공형으로 제작된 GFRP 판으로 넓은 보를 전단보강 하였다. 공장에서 생산된 전단보강재를 현장에 서 주철근에 끼워 보강하므로 설치가 간소화되어 시공성이 용이한 장점이 있다. GFRP 판의 개구부를 통해 콘크리트 타설 시 콘크리트의 유동성을 증가시키고 콘크리트와의 넓은 부착면적을 형성하여 보강재와 콘크리트의 부착력을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 유공형 GFRP 판의 횡방향 단면의 보강개수 및 종방향 전단보강 간격을 변수로 하여 전단실험을 수행

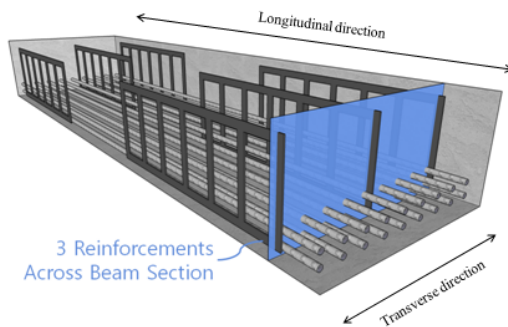


Fig. 1 Schematic view of a wide beam reinforced with GFRP plates

하였다. 시험체의 균열 및 파괴양상 그리고 GFRP 판의 변형률을 분석하고 횡방향 단면의 GFRP 판의 보강개수와 종방향 전단보강 간격에 따른 전단강도를 분석하였다. 이를 통해, 유공형 GFRP 판 형태의 전단보강재의 역학적 거동과 및 이를 적용한 넓은 보의 전단성능을 평가하는 것을 본 연구의 목적으로 한다. 또한 넓은 보에 유공형 GFRP 판을 전단보강재로 사용했을 경우 최대 전단보강 간격을 제시하는 것에 연구의 목적을 두었다. 이는 향후 유공형 GFRP 판 형태의 전단보강재 적용에 있어 설계 및 시공에 관한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험

2.1 사용 재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트의 압축강도는 24MPa이다. KS F 2405의 기준에 따라 재령 28일 후 압축강도를 측정할 결과 평균 28.8MPa의 압축강도를 확인하였다. 철근은 항복강도 500MPa이며, 지름 22mm의 이형철근 18개를 배근하였다. 전단보강재로 제작에 이용된 재료의 종류는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)로, GFRP는 인장실험 결과, 평균 인장강도는 480MPa이며, 탄성계수는 31,500MPa이다.

2.2 시험체와 GFRP 판의 형상

GFRP 판으로 보강된 총 7개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 크기 및 측면도를 Fig. 2에 나타내었다. 주 실험변수는 GFRP 판의 횡방향 단면의 보강개수, GFRP 판의 종방향 전단보강 간격, 유효깊이다. GFRP 판의 보강개수는 Fig. 1에서와 같이 보의 횡방향 단면에 보강한 GFRP 판의 수를 나타내는 변수로, 판의 보강개수가 넓은 보의 전단강도에 미치는 영향을 알아 보고자 하였다. 보강개수의 영향을 평가하기 위해 길이방향으로 보강된 전단보강량은 동일하게 하였다. 종방향 전단보강 간격을 변수로 한 시험체의 실험결과를 통해 GFRP 판으로 전단보강된 넓은 보의 최대 전단보강 간격의 제한을 검토하였다. 종방향 전단보강 간격은 GFRP 판의 세로스트립(vertical strip)의 간격을 말한다. Fig. 3의 (a)는

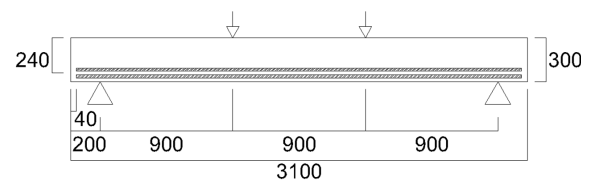


Fig. 2 Size of specimens(mm)

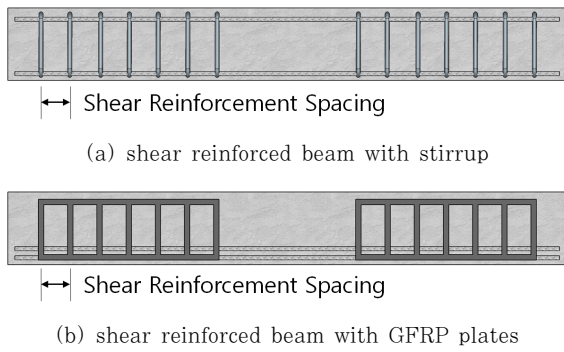


Fig. 3 Side view of shear reinforced beams

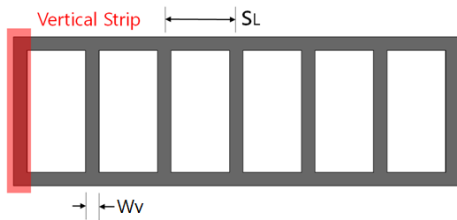


Fig. 4 Shape of GFRP plate

철근 스티럽을 적용한 보를 나타낸 측면 그림이고, (b)는 GFRP 판을 전단보강재로 적용한 그림의 측면을 나타낸 그림이다. 즉, 종방향 전단보강 간격은 철근 스티럽에서는 스티럽 사이의 간격을 의미하고 GFRP 판에서는 세로스트립 간의 간격을 의미한다.

시험체의 단면은 800×300(mm)이고, 총 경간은 3100 mm, 순경간은 2700mm이며 200mm의 정착길이를 두었다. 피복두께는 40mm로 하였으며 전단경간비는 3.75로 하였다. 전단경간비는 지점에서 가리지점까지의 거리를 유효깊이로 나눈 값을 의미한다.

GFRP 판은 직사각형으로 제작하였으며 두께는 2.5mm이다. 전단보강재의 형상을 Fig. 4에 나타내었다. GFRP 판은 철근 스티럽의 레그 역할을 하는 세로스트립과 판 형태를 형성하는 가로스트립으로 이루어져 있다. S_L 은 세로스트립과 세로스트립 사이의 간격으로, 종방향 전단보강 간격을 나타낸다. 또한 모든 시험체는 동일한 전단보강량($A_f \times f_{fu}$)으로 설계하기 위해 세로스트립의 폭(W_v)을 조절하여 세로스트립의 단면적(A_f)을 변화시켰다.

Fig. 5에는 GFRP 판의 횡방향 단면의 보강개수를 변수로 한 시험체들의 횡방향 단면을 나타내었다. WF240-A2시험체는 외곽의 인장철근 바깥방향에 GFRP 판을 보강하였고, WF240-A3시험체는 중앙부 인장철근에 GFRP 판을 추가로 보강하였으며 WF240-A4시험체는 끝으로부터 4번째 인장철근에 각각 GFRP 판을 부착하여 보강하였다. Fig. 6은 종방향 전단간격에 따른 GFRP 판의 형상을 나타낸 그림이다.

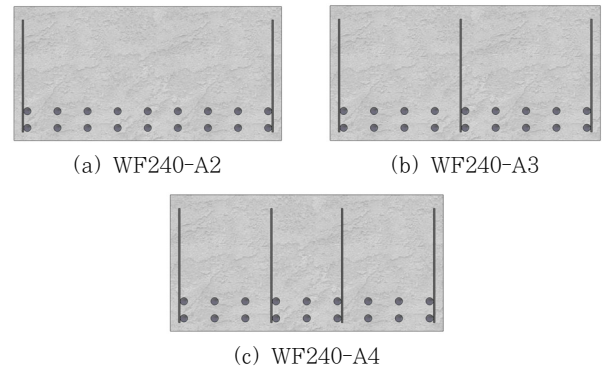


Fig. 5 The number of GFRP plates of the transverse cross-section

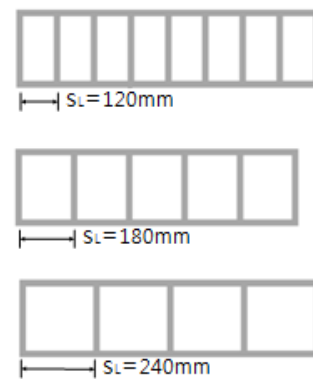


Fig. 6 Center-to-Center spacing of GFRP plates

2.3 시험체 설계

시험체의 설계는 ACI 318-11을 기준으로 전단강도를 계산하였다. 식 (1)은 보의 전단강도식이다. V_n 은 보의 공칭강도이며, V_c 는 콘크리트에 의한 전단강도 기여분, 그리고 V_f 는 GFRP 판에 의해 보강되는 전단강도 기여분이다. V_n 은 식 (2)에 의해 산정되는 콘크리트의 전단강도와 식 (3)에 의해 산정되는 전단보강재의 전단강도 기여분의 합으로 나타낸다.

$$V_n = V_c + V_f \quad (1)$$

$$V_c = \frac{1}{6}bd\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

$$V_f = \frac{A_f f_{fu} d}{S_L} \quad (3)$$

여기서, b 는 보의 폭, d 는 보의 유효깊이, f'_c 은 콘크리트 압축강도, A_f 는 세로스트립의 단면적, f_{fu} 는 GFRP 판의 설계기준 항복강도, 그리고 S_L 은 종방향 전단보강 간격이다.

실험 변수와 예상 파괴하중을 Table 1에 정리하였다. P_M 과 P_V 는 각각 ACI 318-11 기준의 산정식에 따라 휨파괴를

Table 1 Characteristics of specimens

	Width of vertical strip (W_v , mm)	Thickness of Plate (mm)	The number of GFRP plates of the transverse cross-section(n)	Amount of Shear Reinforcement ($A_v \times f_{yv}$, kN)	Effective Depth (d , mm)	Center-to-center spacing (S_L , mm)	Calculated properties	
							P_V (kN)	P_M (kN)
WF240-A2	22	2.5	2	52.8	240	120	554.66	1597
WF240-A3	15		3			120	559.46	
WF240-A4	11		4			120	554.66	
WF240-B3	15		3			180	487.46	
WF240-C3	15		3			240	451.46	
WF280-A3	15		3		280	652.72		
WF320-A3	15		3		320	745.95		

Specimens notation-WF240-A3

WF: Wide beam reinforced with FRP plate

240: Effective depth of specimen(240mm / 280mm / 320mm)

A: Center-to-center distance between vertical strip(A: $0.5d$, 120mm / B: $0.75d$, 180mm / C: d , 240mm)

3: Number of Reinforcement across Beam Section(2EA / 3EA / 4EA)

유발하는 가력하중과 전단파괴 하중이다. 전단파괴를 유도할 수 있도록 휨 파괴 하중이 전단파괴 하중의 약 2~3배가 되도록 설계하였다.

2.4 실험 방법

모든 시험체는 단순지지 상태에서 최대용량 5000kN의 유압식 UTM을 사용하여 평균 10kN/min의 속도로 하중을 재하하였다. 또한 양 지점으로부터 각각 900mm 떨어진 가력지점에서 2점 가력하였다. 시험체 중앙 하부에 LVDT를 설치하여 시험체의 수직 변위를 측정하였다. 그리고 GFRP 판의 수평 및 수직요소의 균열이 예상되는 지점에 변형률 게이지를 부착하여 GFRP 판의 변형률을 측정하였다. 데이터 로거를 사용하여 하중, 변위 및 변형률의 데이터를 수집하였다. 시험체 세팅 모습을 Fig. 7에 나타내었다.

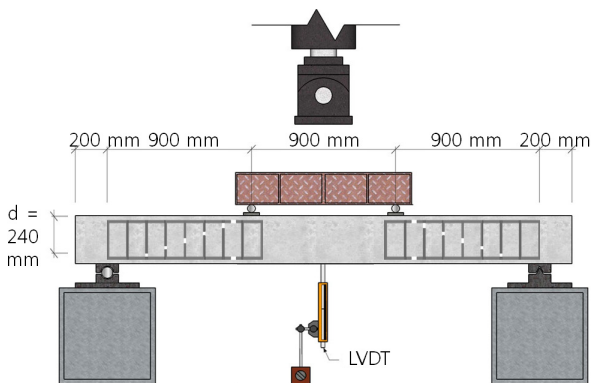


Fig. 7 Specimen setting

3. 실험 결과

3.1 시험체 균열 및 파괴양상

Fig. 8은 시험체들의 균열양상을 나타내었다. 균열도는 하중 재하 초기부터 최대하중이 재하되는 시점까지의 균열을 모두 나타내었다. 균열도에서 사인장 균열은 굵은 실선으로 표시하고, 그 외의 균열은 가는 실선으로 표시하였다. Fig. 8의 (a)~(c)는 횡방향 단면에서 GFRP 판의 보강개수(n)를 변

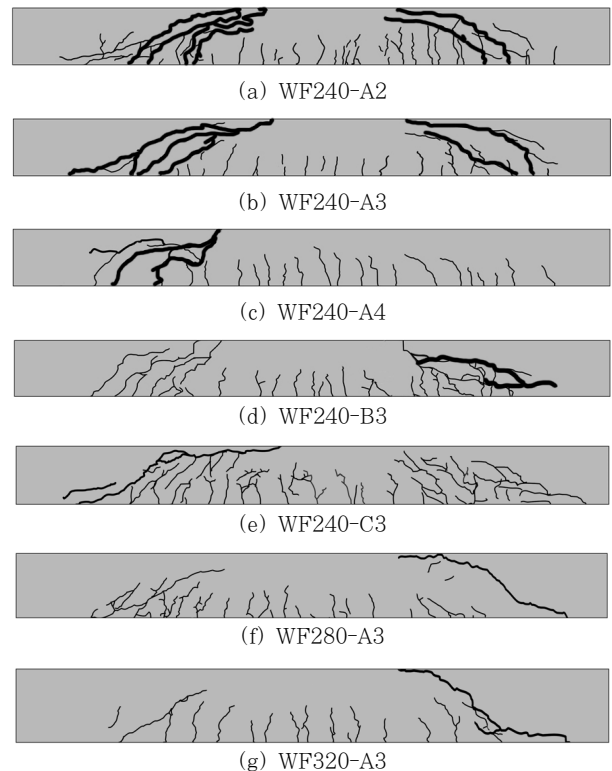


Fig. 8 Crack patterns

수로 한 시험체들의 균열도이며, (b)와 (d) 및 (e)는 종방향 전단보강 간격(S_L)을 변수로 한 시험체들, 그리고 (b)와 (f) 및 (g)는 유효깊이(d)를 변수로 한 시험체들의 균열도이다. 모든 시험체에서 공통적으로 약 200kN의 하중을 기점으로 초기 휨균열이 발생하였다. 뒷면의 균열은 앞면과 비슷한 형상의 띄었기에 앞 면의 균열도만 본문에 나타내었다. GFRP 판의 보강개수가 변수인 시험체의 경우 횡방향 단면에서 전단보강재의 보강개수가 증가함에 따라 굵은 실선으로 표시한 사인장 균열의 수가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 육안으로 확인할 수 있는 사인장 균열의 수가 GFRP 판의 보강개수가 2개인 경우는 5개(Fig. 8(a)), GFRP 판의 보강개수가 3개인 경우는 3개(Fig. 8(b)), GFRP 판의 보강개수가 4개인 경우는 2개(Fig. 8(c))를 확인하였다. WF240-A2 시험체의 경우 외곽 양 끝에만 전단보강을 했기 때문에 횡방향 단면 중앙에 응력이 집중되어 사인장 균열이 다수 발생하였고, WF240-A4 시험체의 경우 외곽에만 보강을 한 경우와 다르게 내부에 추가적인 전단보강재의 배치로 횡방향 단면 중앙에 응력이 집중되는 현상이 줄어들어서 전단성능이 향상되고, 이로 인해 사인장 균열의 발생이 줄어들었다. WF240-A3, WF240-B3, WF240-C3 시험체는 종방향 전단보강 간격을 $0.5d$, $0.75d$, d 로 각각 120mm, 180mm, 240mm로 설계하였다. 식 (3)에 따르면 종방향 전단보강 간격(S_L)이 넓어짐에 따라 전단강도 기여분이 감소한다. 이에 따라 횡방향 단면의 전단보강재가 3개이고 유효깊이 240mm의 동일한 조건을 지니는 세 가지 시험체의 균열 양상을 비교하면 다음과 같다. S_L 이 180mm인 WF240-B3 시험체는 S_L 이 120mm인 WF240-A3 시험체보다 많은 사인장 균열이 발생하였고, S_L 이 240mm인 WF240-C3 시험체에서 가장 많은 사인장 균열이 발생하였다. 이로써 전단보강 간격이 넓어질수록 전단성능이 저하되는 것으로 나타났다. 유효깊이를 변수로 한 시험체의 경우 유효

깊이가 증가함에 따라 휨 균열과 전단균열 간의 간격이 증가하는 것으로 나타났다. 모든 시험체는 40mm의 동일한 피복 두께를 유지한다. 따라서 부재의 유효깊이가 증가하면 GFRP 판의 전단보강재의 높이 또한 증가하게 된다. 이에 따라 세로 스트립의 면적이 증가하게 되고, 이는 콘크리트와 GFRP 판의 부착면적이 증가함을 의미한다. 전단보강재와 콘크리트 사이의 부착 면적이 증가함으로써 시험체의 변형이 상대적으로 적게 발생하게 되고 균열의 진전을 억제한 것으로 판단된다. 예상된 파괴 시점의 최대하중과 실험 시 최대하중, 그리고 파괴 양상을 Table 2에 나타내었다. P_{cal} 은 계산식에 의해 예상된 시험체의 예상 파괴하중이며, P_{exp} 는 시험체 실험 시 실제 최대하중 값이다. Fig. 9에서와 같이 사인장 균열에 의해 전형적인 전단파괴가 발생하는 것을 볼 수 있다.

3.2 변형률

이 장에서는 넓은 보에 전단보강한 GFRP 판에 부착된 변형률 게이지로부터 얻은 변형률 데이터를 분석하였다. 이를 하중-변형률 곡선으로 도식화하였다. 변형률 게이지는 총 7개를 부착하였다. GFRP 판의 전단균열이 예상되는 세로 스트립 영역에 V1부터 V5까지 변형률 게이지 5개를 부착하였으며 H1은 상부 가로스트립에 부착하였다. H2는 하부 가로스트립에 부착하여 하부 인장철근과 같은 위치에 있도록 하였다. Fig. 10은 넓은 보에 보강된 GFRP 판의 변형률 게이지 부착 위치를 나타내었다.

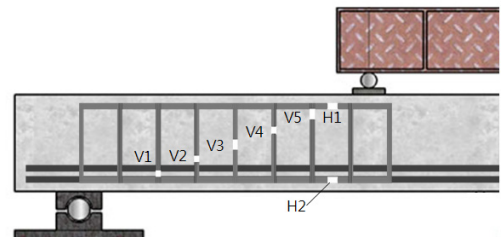


Fig. 10 Location of strain gauge on GFRP plate

Fig. 11은 수직 및 수평 요소에 따른 GFRP 판의 하중-변형률 곡선을 나타내었다. GFRP 판의 변형률은 전단균열이 발생하기 전까지 작은 변형률을 보이다가 작용하중의 증가에 따라 사인장 균열이 발생하고, 사인장 균열 발생시점 이후부터 변형률이 크게 증가하였다. 수직 및 수평요소에 따른 변형률을 비교할 경우, 수평요소의 변형률(H1)은 탄성범위 내에 머무르고 그 값이 크지 않은 것으로 보아 전단력에 대한 지지능력에 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 오히려 (-)값의 변형률을 보였는데, 이는 넓은 보의 압축영역 내에 위치한 상부 가로스트립이 압축근과 유사하게 거동했기 때문으로 판단된다. 반면

Table 2 Test result

	P_{cal} (kN)	P_{exp} (kN)	Failure mode
WF240-A2	554.66	489.23	Shear
WF240-A3	559.46	601.45	Shear
WF240-A4	554.66	653.97	Shear
WF240-B3	487.46	463.21	Shear
WF240-C3	451.46	398.41	Shear
WF280-A3	652.72	828.93	Shear
WF320-A3	745.95	1008.21	Shear



Fig. 9 Shear failure mode(WF240-A2)

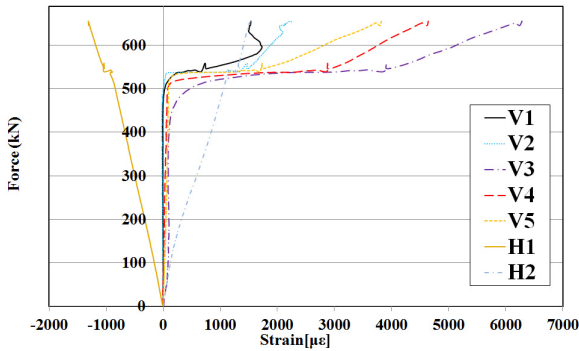


Fig. 11 Load-strain curve of GFRP plate(WF240-A3)

수직요소의 변형률(V1~V5)은 2000~6000 $\mu\epsilon$ 정도의 큰 변형률을 나타내는 것으로 보아 전단력에 대한 지지능력의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 하부 인장철근과 맞닿아 있는 H2의 변형률은 큰 변형이 발생하지는 않았으나, 다른 위치에 부착된 변형률과 달리 초기균열이 시작되기 전부터 변형이 발생하였다. 또한 하중이 증가함에 따라 변형률이 일정하게 증가하였는데, 이는 하부 인장철근에 인접하여 이와 유사하게 거동했기 때문이다.

4. 변수에 따른 전단강도 효과

4.1 횡방향 단면에서 GFRP 판의 보강개수

이 장에서는 횡방향 단면에서 GFRP 판의 보강개수가 넓은 보의 전단강도에 미치는 영향을 확인한다. Fig. 12는 GFRP 판의 보강개수를 변수로 한 시험체들(WF240-A2, WF240-A3, WF240-A4)의 하중-변위 그래프이다. Fig. 13은 GFRP 판의 보강개수를 변수로 한 시험체들의 보강개수 증가에 따른 전단 강도비를 보여준다. WF240-A3와 WF240-A4시험체는 예상한 값과 유사한 실험값을 보여주지만, WF240-A2시험체는 예상된 전단강도의 90%에도 미치지 못하였고 세 시험체 중에 가장 낮은 하중 값을 보였다. 이는 GFRP 판 전단보강재

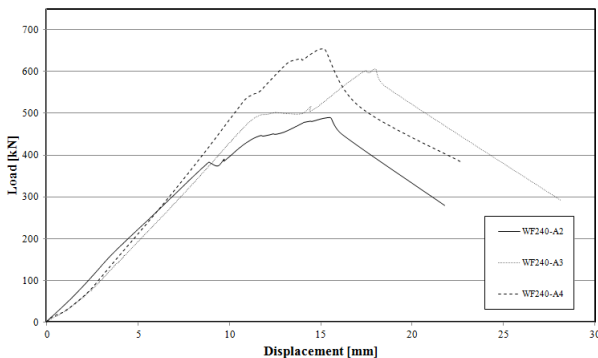


Fig. 12 Load-displacement curve depending on the number of GFRP plate

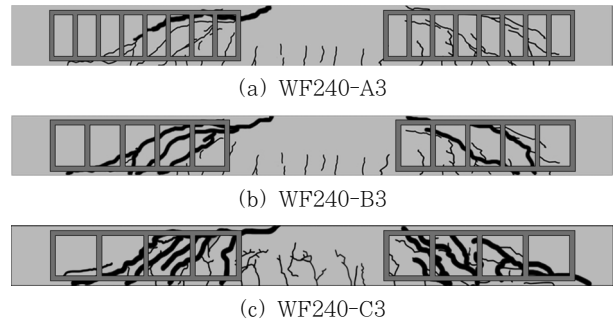


Fig. 13 Crack patterns depending on the center-to-center distance between vertical strip

2개를 외곽의 양 끝에만 보강하여 내부에 전단보강재를 추가 배치한 WF240-A3와 WF240-A4시험체들과 다르게 단면에서의 전단응력이 고르게 분포되지 못하는 응력집중현상이 발생하였기 때문에 판단된다. 이는 설계한 강도보다 낮은 강도에서 파괴된 것으로 전단보강 성능을 제대로 발휘하지 못하였음을 의미한다.

넓은 보의 전단 설계를 할 경우, 기대한 전단보강 성능을 제대로 발휘하기 위해서는 WF240-A2시험체와 같이 양끝의 외곽에만 전단보강하는 것을 피하고, 외곽의 양끝에 두 개의 전단보강 외에도 내부에 추가적인 전단보강이 필요한 것으로 판단된다.

4.2 GFRP 판의 종방향 전단보강 간격

이 장에서는 GFRP 판 내의 세로스트립 간의 간격이 나타내는 전단보강 간격에 따른 전단강도의 영향을 실험결과로 확인하였다. Fig. 13은 전단보강재의 전단보강 간격에 따른 시험체에 전단보강재를 함께 표시한 그림으로 전단파괴되는 사인장 균열에 저항하는 전단보강재의 실제 개수를 보여준다. Fig. 14는 GFRP 판의 종방향 전단보강 간격을 변수로 한 시험체들의 하중-변위 그래프이다. Fig. 13과 Fig. 14를 보면 전단보강 간격을 0.5d로 제한한 시험체가 가장 높은 하중에 저항하며 가장 적은 사인장 균열의 수로 전단성능을 잘 발휘하는 것으로 나타났다. ACI-318-11기준에 따르면 보의 전단설계에서 종방향 전단보강 간격이 늘어남에 따라 전단 강도의 저하가 발생하는 것을 알려준다. ACI 318-11 기준에서는 전단보강의 최대간격을 0.5d로 제한하고 있다. 전단보강 간격을 0.5d로 설정한 WF240-A3시험체의 경우 예상한 성능과 유사한 성능을 보이고 있다. 그러나 전단보강 간격이 더 넓은 0.75d의 WF240-B3와 d의 WF240-C3시험체의 경우, 예상된 하중의 95%와 88%에서 파괴되어 설계 강도보다 낮은 전단강도를 나타내고 있다. GFRP 판을 넓은 보에 적용할 경우, 설계한 전단강도를 이끌어내기 위해

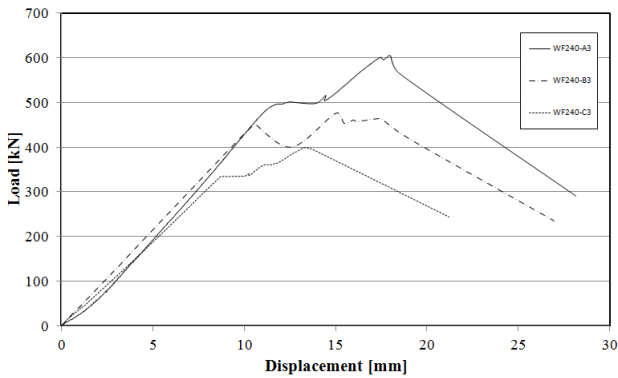


Fig. 14 Load-displacement curve depending on the center-to-center distance between vertical strip

서는 전단보강 최대간격을 0.5d로 제한하는 것이 옳다고 판단된다.

4.3 유효깊이

Fig. 15는 유효깊이를 변수로 한 시험체들의 하중-변위 그래프이다. Table 3에 시험체의 전단강도 계산 값과 실험값 및 전단강도 비를 정리하였다. 유효깊이를 변수로 한 시험체들의 경우 실제 파괴 시 실험값이 설계된 전단강도 계산값에 비하여 크게 나타나 전단강도 값이 과소평가 된 결과를 나타내었다. 기준이 되는 WF240-A3 시험체보다 유효깊이가 40mm 증가한 WF280-A3 시험체는 전단강도비가 1.3에 가까운 결과를 보였고, 유효깊이가 80mm 증가한 WF320-A3 시험체는 1.35의 전단강도비를 나타내었다. 유공형 GFRP 판을 전단보강재로 사용하는 경우에 ACI 318-11 기준에서의 유효깊이에 의한 영향은 과소평가되고 있는 것으로 판단된다. 일반보의 경우 size effect로 인해, 유효깊이가 증가할수록 전단강도 산정식이 전단강도를 과대평가하는 경향을 보이지만 본 논문의 경우는 일반 보와 달리 보 높이의 2배 이상의 폭을 가지는 넓은 보의 특성으로 인해 일반보와는 다른 결과를 나타내었다.

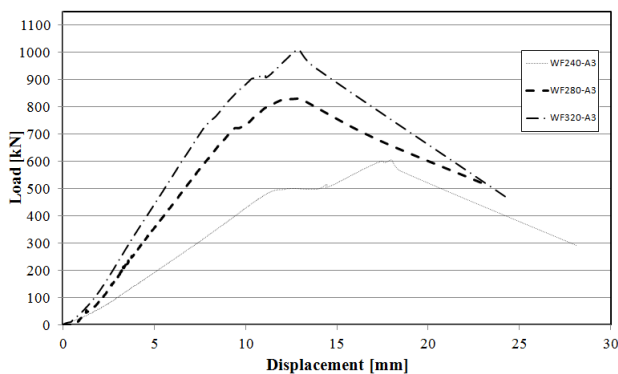


Fig. 15 Load-displacement curve depending on effective depth

Table 3 Shear strength ratio

	V_n (kN)	V_{exp} (kN)	Shear strength ratio
WF240-A2	277.33	244.62	0.88
WF240-A3	279.73	300.73	1.08
WF240-A4	277.33	326.99	1.18
WF240-B3	243.73	231.61	0.95
WF240-C3	225.73	199.21	0.88
WF280-A3	326.36	414.47	1.27
WF320-A3	372.98	504.11	1.35

Table 3에 시험체의 전단강도 계산 값과 실험값 및 전단강도 비를 정리하였다. Table 3에서 V_n 은 ACI 318-11 기준의 산정식을 바탕으로 산정한 전단강도이며, V_{exp} 는 실험을 통해 얻은 하중 데이터 값을 시험체의 전단강도 값으로 산정한 값이다. 시험체들의 전단강도비도 함께 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 유공형 GFRP 판 형상의 전단보강재를 적용한 넓은 보의 전단성능을 실험적으로 평가하였으며, GFRP 판의 횡방향 단면의 보강개수 및 종방향 전단보강 간격에 의한 영향을 확인하였다. ACI 318-11 기준식을 적용하여 전단강도를 예상하였고 이는 실험결과와 비교하여 그 유효성을 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) GFRP 판의 수평 및 수직 요소의 변형률을 비교한 결과 GFRP 판의 수평요소는 변형률 값이 크지 않은 것으로 나타났으나 수직요소는 큰 변형률을 보여, 전단력에 대한 지지능력의 영향이 크다는 것을 확인하였다.
- 2) 횡방향 단면에서의 GFRP 판의 보강개수가 늘어날수록 횡방향 단면 중앙의 응력이 집중되는 현상이 줄어들어 사인장 균열의 발생이 감소하였고, 종방향 전단보강 간격이 넓을수록 전단 성능이 저하되어 사인장 균열의 수가 증가하였다.
- 3) 횡방향 단면에서의 GFRP 판의 보강개수에 따른 비교 결과, WF240-A2 시험체와 같이 외곽의 양 끝에만 전단보강하는 기존의 방식으로 넓은 보를 보강할 경우 내부에 전단보강재가 배치되어 있지 않아서 횡방향 단면 중앙에 응력집중 현상이 발생하게 되어 설계된 전단성능을 발휘하지 못하는 것으로 확인하였고, 내부에 전단보강을 추가적으로 배치하면 단면 내 응력의 분포가 균등하여 전단보강 성능향상에 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 4) 종방향 전단보강 간격이 증가함에 따라 전단강도비를 비교한 결과, 기존 ACI 318-11 기준에서 제시한 것

과 같이 최대 전단보강 간격인 $0.5d$ 를 초과할 경우, 기대하는 전단성능에 미치지 못하는 것을 확인하였다.

- 5) 유효깊이를 변수로 한 시험체들의 경우 유효깊이가 증가함에 따라 계산값보다 실험값이 큰 결과를 나타내었다. 이에 따라 본 논문에서 전단강도 계산 시에 사용된 산정식에서 유공형 GFRP 판을 전단보강재로 사용한 넓은보의 경우에는 유효깊이에 의한 영향이 과소평가 되고 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0016332).

기호 정리

A_v	: sectional area of a vertical strip of shear reinforcement plate(mm ²)
a	: depth of equivalent rectangular stress block(mm)
b_w	: width of wide beam(mm)
d	: effective depth of wide beam(mm)
f_c'	: specified compressive strength of concrete(MPa)
f_{yt}	: specified tensile strength of shear reinforcement(MPa)
f_{yv}	: specified tensile strength of GFRP plate(MPa)
P_{exp}	: experimental maximum load strength(kN)
P_M	: calculated nominal flexural strength(kN)
P_V	: calculated nominal shear strength(kN)
s_L	: center-to-center spacing of longitudinal shear reinforcement(mm)
s_w	: maximal transverse spacing between shear reinforcement(mm)
V_c	: nominal shear strength provided by concrete(kN)
$V_{c,exp}$: experimental shear strength provided by concrete(kN)
V_{exp}	: experimental maximum shear strength(kN)
V_n	: nominal shear strength of wide beam(kN)
V_{sL}	: nominal shear strength provided by shear reinforcement(kN)

$V_{s,cal}$: calculated nominal shear strength of shear reinforcement(kN)
$V_{s,exp}$: experimental shear strength provided by shear reinforcement(kN)
v_w	: width of vertical strip of shear reinforcement(mm)
ρ_s	: ratio of tensile reinforcement

References

- ACI Committee 318-11 (2011) Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-11), American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Adam, S.L., Evan, C.B., Michael, P.C. (2009) Shear Reinforcement Spacing in Wide Members, *ACI Struct. J.*, 106(2), pp.205~214.
- Ahmed, E.A., Ahmed, K., El-Sayed, El-Salakawy, E., Benmokrane, B. (2010) Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods, *J. Compos. Constr.*, 14(1), pp.3~10.
- Ahmed, B. Shuraim, A.M. (2012) Transverse Stirrup Configurations in RC Wide Shallow Beams Supported on Narrow Columns, *J. Struct. Eng.*, 138, pp.416~424.
- Anderson, N.S., Ramirez, J.A. (1989) Detailing of Stirrup Reinforcement, *ACI Struct. J.*, 86(5), pp.507~515.
- Choi, J.H., Kim, M.S., Kim, H.C., Lee, Y.H. (2012) Experimental Study on Shear Behaviors for Reinforced Concrete Beams Embedded with GFRP Plate with Openings, *J. Korea Concr. Inst.*, 24(4), pp.407~414.
- Grace, N. F., Soliman, A. K., Abdel-Sayed. G., Sale. K. R. (1998) Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP, *J. Compos. Constr.*, 2(3), pp.186~194.

요 지

본 논문은 넓은 보의 전단강도를 대상으로 한 실험적 평가에 대해 기술하였다. 본 논문의 실험을 통해 넓은 보에 횡방향 단면에서 GFRP 판의 보강개수와 종방향 전단보강 간격, 그리고 유효깊이가 전단강도에 끼치는 영향에 관하여 연구하였다. 총 7개의 시험체에 유공형 GFRP 판 형태로 전단보강재를 보강하여 전단성능 실험을 실시하였다. 본 논문에 기재된 전단보강재는 유공형 판 형태로 제작되어 타설 시 콘크리트의 유동성을 증가시켜 보강재와 콘크리트의 부착력을 향상시켰다. 7개 시험체의 주 변수로는 전단보강재의 횡방향 단면에 대한 판의 보강개수와 종방향 전단보강 간격, 그리고 유효깊이로 정하였다. 시험체의 균열 및 파괴 양상, 변형률과 전단강도비를 분석하였다. GFRP판으로 전단보강된 넓은 보의 전단강도는 ACI 318-11 기준으로 산정되었다. 실험의 결과를 통해 유공형 GFRP 판이 전단보강재로서 넓은 보에 효과적으로 적용됨을 확인하였다.

핵심용어 : 전단보강재, 넓은 보, GFRP, 전단강도