

## 유공형 판으로 전단보강된 넓은 보의 전단거동 평가

고 명 준<sup>1</sup> · 이 영 학<sup>1</sup> · 김 민 숙<sup>1</sup> · 박 종 일<sup>2</sup> · 김 희 철<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 건축공학과, <sup>2</sup>서울과학기술대학교 안전공학과

### Evaluation of Shear Capacity of Wide Beam Reinforced with Shear Plates with Openings

Myung Joon Ko<sup>1</sup>, Young Hak Lee<sup>1</sup>, Min Sook Kim<sup>1</sup>, Jong Yil Park<sup>2</sup> and Heecheul Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University, Yongin, 17104, Korea

<sup>2</sup>Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

#### Abstract

In this paper, shear behavior of concrete wide beam reinforced with plates with openings was evaluated. For this evaluation, eleven specimens were manufactured. One specimen was non-shear reinforced, five specimens were reinforced with steel plates and the other five specimens were reinforced GFRP plates. Shear strengths measured through experiments were compared with ones calculated from the equation provided by ACI 318. Longitudinal spacing of shear reinforcement, transverse spacing of shear reinforcement and shear reinforcement material were considered as variables. Test results showed that the shear strength increased as the transverse and longitudinal spacing of shear reinforcement became narrow. Also, regardless of material type of shear reinforcement, the shear capacity was similar when the amount of shear reinforcement was the same.

**Keywords** : wide beam, shear reinforcement, openings, steel plate, GFRP plate

#### 1. 서 론

일반적으로 보의 폭이 보의 높이의 2배 이상인 보는 넓은 보로 분류한다. 넓은 보의 경우에는 보의 높이보다 보의 폭이 큰 특징으로 인하여 일반 보처럼 전단보강재를 배치할 경우, 보의 바깥 측면에만 전단보강재가 배치되어 보의 횡방향으로 배치된 전단보강재의 간격이 매우 커지게 된다. 이로 인해 보의 횡방향 단면의 중앙에 응력이 집중되는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 다수의 연구자들이 넓은 보의 횡방향 전단보강에 관한 연구를 수행하였다. Andersen 등(1989)은 전단보강재인 철근 스테럽의 형태, 길이방향 그리고 배치 등을 변수로 전단실험을 수행하여 횡방향 전단보강재의 간격이 매우 클 때, 스테럽과 주철근 사이에 대각 압축 응력(diagonal compression stress)이 집중되는 현상이 발생하여 기대한 전단성능에 미치지 못할 가능성이 있다고 하

였다. 따라서 넓은 보에서 횡방향으로 다수의 전단보강을 하는 것이 전단성능을 향상시키는 방법임을 제안하였다. Lubell 등(2009)은 또한 넓은 보에서 횡방향으로 배치되는 전단보강재의 레그의 간격이 증가할수록 전단성능이 감소하는 것을 실험을 통해 규명하고, 횡방향 보강간격의 최대간격을 제안하였다.

넓은 보의 횡방향 전단보강 간격이 부재의 전단성능에 영향을 미친다는 기존 연구에도 불구하고 미국 콘크리트 설계 기준인 ACI-318(2014)에서는 부재의 종방향의 최대간격만을  $0.5d$ 로 제한하고 있고, 횡방향의 간격에 대해서는 고려하고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 부재의 종방향과 횡방향의 보강 간격이 전단강도의 미치는 영향을 평가하고, 전단보강재의 재료를 GFRP와 강재 두 가지로 제작하여 두 재료가 부재의 전단강도에 미치는 영향과 이로 인한 넓은 보의 거동을 파악하고자 하였다. FRP는 경량이면서 내부식성에

\* Corresponding author:

Tel: +82-31-201-2542; E-mail: kimhc@khu.ac.kr  
Received October 12 2015; Revised October 26 2015;  
Accepted November 9 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.

장점이 있어 전단보강재로 적용하는 연구가 수행되고 있다. Grace 등(1998)은 FRP 스티럽 전단보강재와 철근 스티럽의 파괴모드와 연성지수 등을 비교하여 두 보강재 사이에 파괴 모드와 연성지수를 규정할 수 있는 방법을 제시하였다. Ahmed 등(2010)은 구부러진 형태의 FRP 스티럽의 강도를 측정하는 ACI440 코드 중 2가지 방법을 실험값과 비교 및 평가하여 신뢰할 수 있는 강도 평가방법을 제안하였다. 이러한 이유로 본 연구에서 전단보강재의 재료로 GFRP를 포함시켜 강재의 재료와 전단보강재의 성능을 비교하였다. 또한 전단보강재를 스티럽 형태로 사용하지 않고 기존연구(Choi *et al.*, 2012)에서 제안한 유공형 판 형태를 전단보강재로 사용하였다. 유공형 판 형태의 전단보강재는 주철근에 끼우는 방식으로 설치가 용이한 장점이 있다. 또한 유공형 판 형태의 전단보강재는 개구부를 통해 콘크리트의 유동성을 증가시켜 부착력이 확보되고 철근에 비해 얇은 두께로 피복두께의 손실이 감소한다. Fig. 1은 유공형 판 형태의 전단보강재를 사용한 넓은 보의 대략적인 형상을 나타내었다.

ACI Building Code는 철근으로 보강된 콘크리트 부재를 설계할 때 사용하는 ACI-318 규준과 FRP로 보강된 콘크리트 부재를 설계할 때 사용하는 ACI-440.1R(2006)규준 두 가지를 제공한다. 하지만 ACI-440.1R은 부재의 모든 보강재를 FRP로 사용하고 전단보강재를 철근의 형태로 사용하였을 때 사용하는 규준이다. 본 실험에서는 휨보강은 철근으로 하였고, 전단보강재는 판 형태로 제작하여 사용하였다. 이러한 이유로 본 연구의 시험체 설계는 ACI-440.1R을 사용하지 않고 두 재료 모두 ACI-318 규준을 기준을 이용하여 설계를 하였다.

본 논문은 넓은 보의 전단보강재의 재료, 횡방향 간격과 종방향 간격을 변수로 전단실험을 수행하여 상기 변수들이 넓은 보의 전단강도에 미치는 영향을 평가하고 이에 따른 넓은 보의 거동을 파악하는 것을 목적으로 하였다.

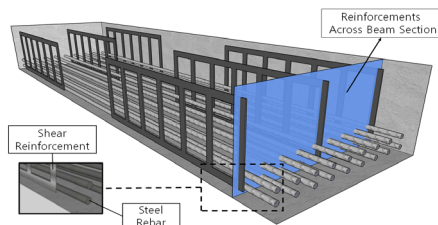


Fig. 1 Schematic view of a wide beam reinforced with plate with openings

## 2. 실험

### 2.1 재료 특성

시험체 제작에 사용된 콘크리트의 평균 압축강도는 KS F2405 기준에 따라 재령 28일 후 압축강도 실험을 통해 측정한 결과, 평균 28.8MPa임을 확인하였다. 인장철근은 지름 22mm, 항복강도 500MPa과 탄성계수 200GPa인 이형 철근을 사용하였으며, 전단보강재인 유공형 강판의 항복강도는 402.7MPa이며 탄성계수는 200GPa, 유공형 FRP의 인장강도는 480MPa이며 탄성계수는 31500MPa인 재료를 사용하였다. 실험에 사용된 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties

	Yield Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Steel rebar	500	200
Steel plate	402.7	200
	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)
GFRP plate	480	31,500

### 2.2 시험체 상세

본 실험에 사용된 실험체는 무보강 시험체 1개, 유공형 강판으로 전단보강된 시험체 5개와 유공형 GFRP판으로 전단보강된 시험체 5개, 총 13개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 단면은 800mm×300mm이고, 총 경간은 3100mm, 순경간은 2700mm이며 양쪽에 200mm의 정착 길이를 두었다. 피복두께는 40mm로 하였으며, 지점에서 가력지점까지의 거리를 유효깊이로 나눈 전단경간비  $a/d$ 는 3.75로 하였다. 또한 강판보강재의 경우 항복강도  $f_y$ 와 단면적  $A_s$ 의 곱으로, GFRP판 보강재의 경우는 인장강도  $f_{fv}$ 와 단면적  $A_s$ 의 곱으로 산정되는 전단보강량은 GFRP판은 52.8kN으로 강판은 53.1kN으로 최대한 동일하게 설계하였다. 유공형 판 형태의 전단보강재는 Fig. 2와 같이 수평과 수직 스트립으로 구성된다.

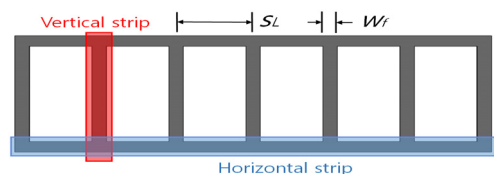


Fig. 2 Shape of shear reinforcement

유공판 형태의 전단보강재의 수평 스트립(horizontal strip)의 전단성능 기여도는 매우 적어 세로 스트립(vertical strip)의 면적만 전단성능 기여분에 포함시킨다는 기존 연구결과(Kim *et al.*, 2014)를 고려하여, 세로 스트립의 면적만 전단보강재의 면적으로 산정하였다. Fig. 3에 본 실험에서 전단보

강재로 사용된 유공형 판을 전단보강재로 적용한 시험체의 측면을 나타내었다.

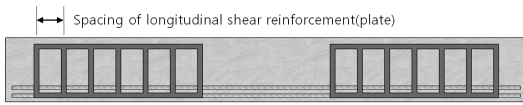


Fig. 3 Side view of shear reinforced beams

종방향 전단보강재의 간격은 유공형 판에서는 세로 스트립 간의 간격을 의미한다. 종방향 전단보강 간격  $s_L$ 은 Fig. 4와 같이 240mm, 180mm와 120mm로 설정하였다. 횡방향 전단보강 간격  $s_w$ 은 넓은 보의 단면에서 보강 개수  $n$ 을 의미한다. Fig. 5와 같이 횡방향의 전단보강 간격은 745mm(2 plate legs), 334mm(3 plate legs)와 268mm(4 plate legs)로 설정하였다. 시험체의 상세는 Table 2에 정리하였다.

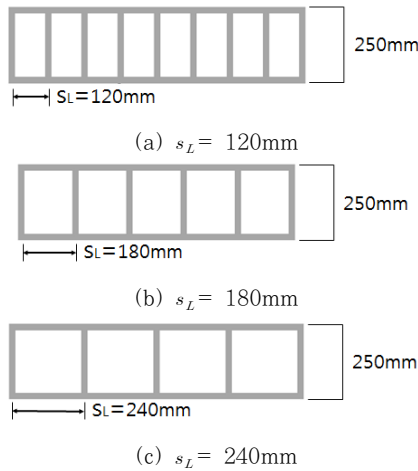


Fig. 4 Center-to-center spacing of plate

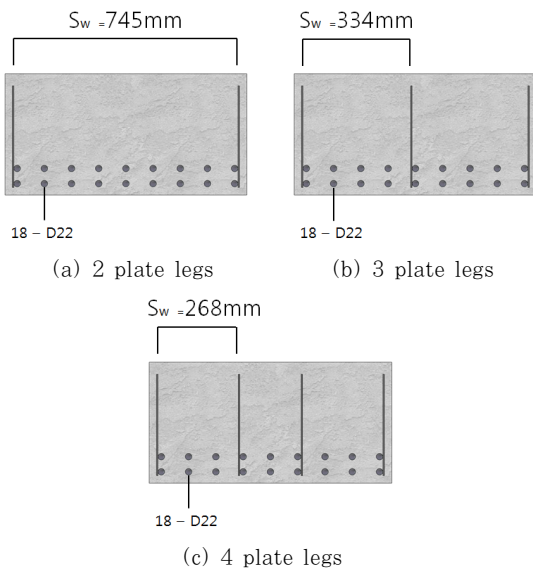


Fig. 5 The number of shear reinforcement legs in cross-section of beams

### 2.3 실험 방법

모든 시험체는 단순지지 상태에서 최대용량 500kN의 유압식 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 평균 10kN/min의 속도로 하중을 재하하였다. 또한 양 지점으로부터 각각 900mm 떨어진 지점에서 2점 가력하였다. 시험체 중앙 하부에 LVDT를 설치하여 시험체의 수직 변위를 측정하였다. 그리고 데이터로거를 사용하여 하중과 변위 데이터를 수집하였다. 시험체의 세팅 모습은 Fig.6에 나타내었다.

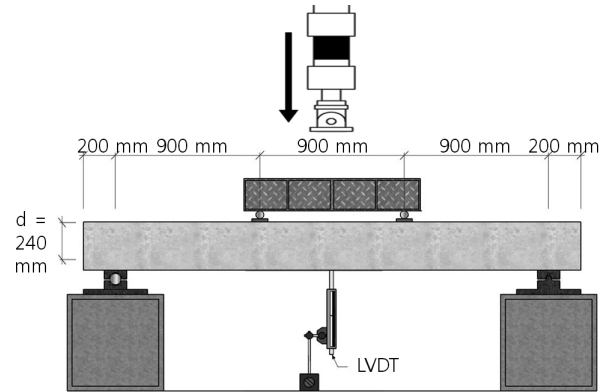


Fig. 6 Test setup

### 3. ACI-318 기준

ACI-318 설계식의 전단강도  $V_n$ 은 식 (1)에 나타낸 것처럼 콘크리트의 전단강도 기여분  $V_c$ 와 전단보강재의 전단강도 기여분  $V_s$ 의 합으로 구성된다. 본 실험은 넓은 보의 전단 파괴를 휨 파괴보다 먼저 유도하기 위해 인장 철근비  $\rho_w$ 를 크게 설계하였다. 따라서 콘크리트의 전단강도 기여분은 인장 철근비와 전단경간비가 변수로 포함된 식 (2)를 통해 계산하였다. 여기서  $f'_c$ 는 콘크리트 압축강도를 의미하고  $d$ 는 보의 유효깊이,  $b_w$ 는 보의 폭을 의미한다. 전단보강재의 전단 강도의 기여분은 부재 축에 직각인 단면철근을 사용하는 경우의 전단강도 기여분과 동일한 개념을 바탕으로 하여 식 (3)으로 계산하였고, 전단보강재의 단면적은 식 (4)를 통해 계산하였다. 여기서  $t_w$ 는 전단보강재의 두께,  $w_f$ 는 세로스트립의 폭을 의미한다. ACI-318 기준은 종방향 전단보강재의 간격이 증가할수록 전단보강 성능이 감소하는 것을 방지하기 위해 종방향 전단보강재의 최대간격을  $0.5d$ 로 제한하고 있다.

$$V_n = V_c + V_s \tag{1}$$

$$V_c = (0.16 \sqrt{f'_c} + \frac{17\rho_w d}{a}) b_w d \tag{2}$$

Table 2 Details of specimens

	Width of vertical strip ( $w_f$ ) (mm)	Thickness of plate ( $t_f$ ) (mm)	The number of plates of transverse cross-section ( $n$ ) (EA)	Transverse spacing ( $s_w$ ) (mm)	Width of support (mm)	Spacing of longitudinal shear reinforcement ( $s_L$ ) (mm)	Amount of shear reinforcement ( $A_v \times f_y, A_v \times f_{fv}$ ) (kN)
C	-	-	-	-	800	-	-
S120-A	30	2.2	2	745		120	53.1
S120-B	20		3	334			
S120-C	15		4	268			
S180-B	20		3	334			
S240-B	20		3	334			
G120-A	22	2.5	2	745		120	52.8
G120-B	15		3	334			
G120-C	11		4	268			
G180-B	15		3	334			
G240-C	15		3	334			

Specimens notation-S120-A

S: Reinforcement material(C: Without material, S: Steel plate, G: GFRP plate)

120: Spacing of longitudinal shear reinforcement(120: 120mm, 180: 180mm, 240: 240mm)

A: Transverse spacing of shear reinforcement(A: 745mm, B: 334mm, C:268mm)

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s_L} \quad (3)$$

$$A_v = n t_f w_f \quad (4)$$

력과 부재가 파괴될 때의 부재중양의 처짐  $\Delta$  및 파괴 모드를 Table 3에 정리하였고, Table 4에 ACI-318 설계규준을

#### 4. 실험 결과

실험 결과 모든 시험체에서 전단 압축 파괴가 발생하였다. 초기균열로서, 보의 중앙부에서 약간의 휨균열이 발생하였고, 이후 하중이 증가함에 따라 지지점으로 부터 유효길이 만큼 떨어진 곳에서 휨전단균열이 발생하였다. 이후 휨전단 균열과 사인장 균열이 증가하였고, 사인장 균열은 휨전단 균열과 연결되었다. 최종적으로 가력지점과 지지점을 연결하는 전단 균열에 의하여 부재가 전단 압축 파괴되었다. 또한 가력지점 주변에는 응력 집중 현상이 발생하여 가력지점 주변에 콘크리트 파쇄가 발생하였다. Fig. 7에 시험체의 균열 및 파괴 모드에 대한 균열도를 나타내었다. 모든 시험체의 최대전단

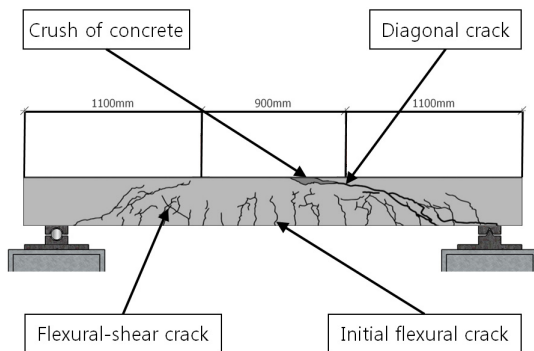


Fig. 7 Crack mode

Table 3 Test results

	$V_{exp}$ (kN)	$\Delta$ (mm)	Failure mode
C	199.21	13.67	Shear
S120-A	239.54	10.40	Shear
S120-B	323.38	12.49	Shear
S120-C	310.64	12.35	Shear
S180-B	225.39	8.67	Shear
S240-B	188.59	7.90	Shear
G120-A	244.61	15.37	Shear
G120-B	300.73	17.92	Shear
G120-C	326.98	15.05	Shear
G180-B	231.61	14.86	Shear
G240-C	199.21	13.36	Shear

Table 4 Experimental and theoretical shear strengths

	$V_{exp}$	ACI-318			
		$V_c$ (kN)	$V_s$ (kN)	$V_n$ (kN)	$V_{exp}/V_n$
C	199.21	190.13	-	190.13	1.05
S120-A	239.54	190.13	106.13	296.26	0.81
S120-B	323.38	190.13	106.13	296.26	1.09
S120-C	310.64	190.13	106.13	296.26	1.05
S180-B	225.39	190.13	70.75	260.88	0.86
S240-B	188.59	190.13	53.06	243.19	0.78
G120-A	244.61	190.13	105.60	295.73	0.83
G120-B	300.73	190.13	108.00	298.13	1.01
G120-C	326.98	190.13	105.60	295.73	1.11
G180-B	231.61	190.13	70.40	260.53	0.89
G240-C	199.21	190.13	52.80	242.93	0.82

통해 계산된 전단강도와 실험을 통해 얻은 전단강도를 정리하고 두 값의 비인 전단강도비를 함께 나타내었다.

#### 4.1 종방향 전단보강재의 간격

전단보강을 하지 않은 시험체 C의 최대 전단 하중인 199.21kN을 기준으로 유공형 강판으로 전단보강된 시험체 S120-B, S180-B, S240-B의 최대 전단강도를 비교해 보았을 때, 시험체 C보다 S120-B는 62%, S180-B는 13% 증가된 전단보강 효과를 보였고, S240-B는 5% 줄어든 것을 확인하였다. 무보강 시험체 C의 최대 전단하중과 유공형 GFRP판으로 전단보강된 G120-B, G180-B, G240-B의 최대 전단강도를 비교한 경우에는 시험체 C보다 G120-B는 51%, G180-B는 16% 증가된 전단보강 효과를 보였고, G240-B는 시험체 C와 같은 최대 전단강도 값으로 측정되었다. 다른 재료임에도 불구하고, 넓은 보에서 동일한 전단보강량으로 전단보강을 할 경우 비슷한 전단보강 효과를 보인 것을 확인하였다. 하지만 두 재료 모두 동일한 전단보강량에도 불구하고 종방향 전단보강재의 간격에 따라 각기 다른 전단보강 효과를 보였다. 이를 통해 동일한 전단보강량으로 보강하였어도 종방향 전단보강재의 간격에 따라 전단보강 효과가 달라지는 것과 종방향 전단보강재의 간격이 줄어들수록 전단보강 효과가 증가하는 것을 확인하였다. 또한 전단보강을 하였어도, 종방향의 전단보강 간격이 유효깊이 이상일 경우에는 전단보강의 미비한 것을 확인하였다. 이는 ACI-318 규준에서 종방향 전단보강재의 최대간격을  $0.5d$ 이하로 규정하고 있지만 S240의 시험체의 경우 종방향 전단보강재의 간격이  $d$ 이기 때문에 전단보강재가 전단보강의 역할을 하지 못하여, 전단성능 저하가 나타난 것으로 판단된다. Fig. 8에 실험을 통해 얻은 시험체의 최대 전단강도를 나타내었다.

ACI-318 규준의 설계식으로 계산한 전단강도와 위의 시험체들의 최대 전단강도를 비교하면 유공형 강판으로 전단보강한 시험체는 평균 0.91, 표준편차는 0.16으로 나타났고, 유공형 GFRP판으로 전단보강한 시험체는 평균 0.90, 표준편차는 0.16으로 나타났다. ACI-318 규준의 설계식은 두 재료 모두 종방향 전단보강재의 간격이  $0.5d$ 일 때 비교적 정확한 전단강도를 예측하고 있었고,  $0.5d$  이상일 경우에는 시험체의 최대 전단강도보다 높게 예측하고 있었다. ACI-318(2014) 규준에서는 보의 전단 설계에서 종방향 전단보강재의 간격이 증가함에 따라 전단강도의 저하가 발생하는 것을 언급하고 있다. 이러한 이유로 ACI-318 규준에서는 종방향 전단보강재의 최대간격을  $0.5d$ 로 제한하고 있다. 본 실험 결과를 통해 넓은 보에서 유공형 전단보강재를 사용할 때

에도 ACI-318 규준을 통해 설계한 전단강도를 얻기 위해서는 종방향 전단보강재의 최대 간격을  $0.5d$ 이하로 사용해야 한다는 것을 확인하였다.

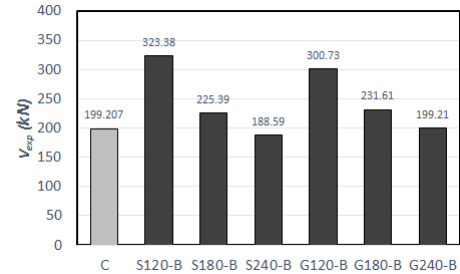


Fig. 8 Effect of the longitudinal spacing of the shear reinforcements on shear strength

#### 4.2 횡방향 전단보강재의 간격

횡방향 전단보강재의 간격이 변수인 시험체 S120-A, S120-B, S120-C, G120-A, G120-B, G120-C의 최대 전단하중을 전단보강이 되지 않은 시험체 C의 최대 전단하중과 비교하였을 때, 유공형 강판으로 전단보강된 시험체 S120-A, S120-B, S120-C는 20%, 62%, 55% 증가된 전단보강 효과를 보였고, 유공형 GFRP판으로 전단보강된 시험체 G120-A, G120-B, G120-C는 각각 22%, 50%, 64% 증가된 전단보강 효과를 보였다. Fig. 9는 실험을 통해 측정한 횡방향 전단보강재의 간격을 변수로 하는 시험체들의 최대 전단강도를 나타내었다. 동일한 전단보강량에도 불구하고, 시험체들은 횡방향 전단보강재의 간격에 따라 각기 다른 전단보강 효과를 보였다. 유공형 GFRP판으로 전단보강한 시험체의 경우에는 횡방향 전단보강재의 간격이 줄어들수록 전단보강 효과가 증가하였지만, 유공형 강판으로 전단보강한 시험체의 경우 전단보강재의 레그 수가 3개인 시험체가 가장 높은 하중에서 파괴되는 것을 확인하였다. 이는 lubell 등(2009)에서 횡방향 스텝 레그의 증가는 부재 전단보강재의 횡방향 간격이 줄어들어 넓은 보의 전단강도를 증가시키지만 다수의 레그수의 증가로 인하여 일정 간격 이하의 좁은 횡방향 간격이 형성되면 전단강도 전단저항 성능이 저하되는 것을 규명한 것과 같은 이유로 횡방향 전단 레그 수가 4개인 시험체 S-120C는 보의 폭에 비해 너무 좁은 횡방향 전단보강재의 간격으로 인하여 전단성능이 3개인 S-120B 시험체보다 오히려 전단성능 효과가 저하된 것으로 판단된다. 이를 통해 횡방향 전단보강재의 간격이 줄어들수록 응력이 집중되는 현상을 막고 전단보강 효과가 증가되지만, 횡방향 전단보강재의 간격이 감소함에 따라 스텝의 너무 많은 레그수가 단면에 존재하게 되면 전단저항 성능이다



시 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 전단저항 성능이 감소하는 횡방향 전단보강재의 최소간격은 재료마다 다른 것을 확인하였다.

실험을 통해 측정된 시험체의 전단강도와 ACI-318 기준의 설계식을 통해 계산한 전단강도를 비교해 보면, 유공형 강판으로 전단보강한 경우 평균 0.98, 표준편차 0.15으로 나타났고 유공형 GFRP판으로 전단보강한 경우 평균 0.98 표준편차 0.14로 나타났다. 두 재료 모두 비교적 정확한 전단강도를 예측하였지만, 두 재료 모두 횡방향 전단보강재의 간격이 가장 큰 시험체인 S120-A와 G120-A의 경우는 실험값과 ACI-318 기준의 설계값이 다소 큰 차이를 보였다. ACI-318 기준의 경우, 횡방향 전단보강재의 간격에 대한 규정이 존재하지 않아 횡방향 전단보강재의 간격이 증가할 때 응력 집중현상으로 전단강도가 감소하는 것을 예측할 수 없기 때문이라고 판단된다. 이를 통해 유공형 판형태의 전단보강재를 사용한 넓은 보에서 ACI-318 기준을 통해 정확한 전단강도를 설계하기 위해서는 재료별로 횡방향 전단보강재의 간격에 대한 요소가 전단강도식에 포함되어야 한다고 판단된다.

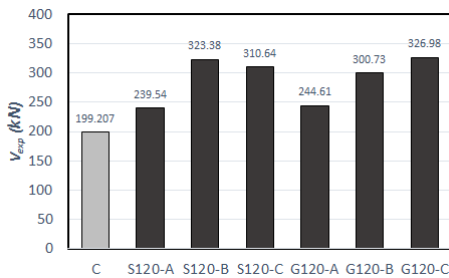


Fig. 9 Effect of the transverse spacing of the shear reinforcements on shear strength

### 5. 넓은 보의 거동

종방향 전단보강재의 간격이 변수인 시험체들의 하중-변위 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 종방향 보강재의 간격이 줄어들수록

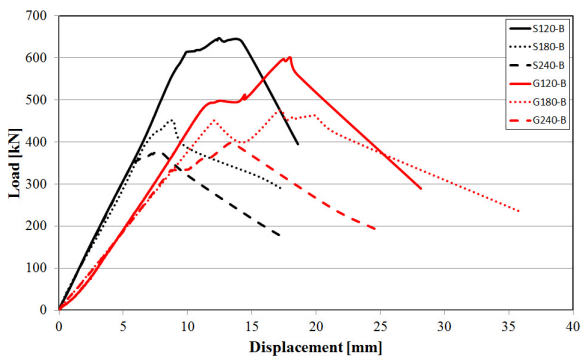


Fig. 10 Load-displacement curves (Spacing of longitudinal shear reinforcement)

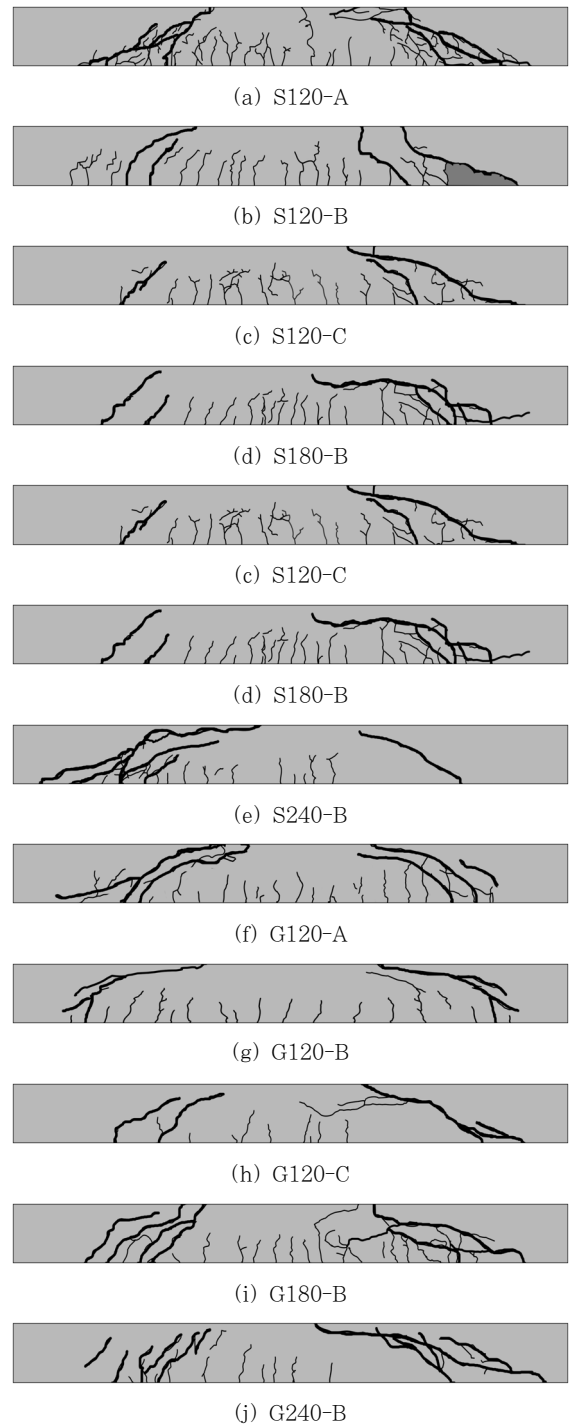


Fig. 11 Crack patterns

들수록 전단파괴 하중과 변위가 증가하였다. 모든 시험체의 균열도를 Fig. 11에 나타내었고, 사인장 균열은 굵은 선으로 표시하였다. 이를 통해 넓은 보에서 횡방향 전단보강재의 간격과 종방향 전단보강재의 간격이 줄어들수록 사인장 균열이 감소하는 것을 확인하였다. 또한 강재로 전단보강을 한 부재의 경우, GFRP로 전단보강한 부재보다 전단보강재가 위치해 있는 부분에서 균열이 많이 발생하는 것을 확인하였다. 이는

강재의 연성의 특징으로 인하여 항복이후 부재의 변형이 크게 발생되어 균열이 많이 발생하는 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 강재와 GFRP로 제작한 유공형 판형상의 전단보강재로 보강한 넓은 보의 전단성능을 실험적으로 평가하고 이에 따른 넓은 보의 거동을 분석하였다. 또한 ACI-318규준의 설계식을 통해 계산된 전단강도와 실험을 통해 얻은 전단강도를 비교하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 유공형 판형대의 전단보강재는 동일한 전단보강량 일 때, 강재와 GFRP의 전단보강 효과가 유사한 것을 실험을 통해 확인하였다.
- (2) 동일한 전단보강량으로 전단보강한 넓은 보에서 두 재료 종방향 전단보강재의 간격이 줄어들수록 넓은 보의 전단강도가 증가하는 것을 확인하였다. 또한 ACI-318규준을 통해 설계한 전단강도를 얻기 위해서는 종방향 전단보강재의 최대간격을  $0.5d$ 으로 이하로 사용하는 것이 옳다고 판단된다.
- (3) 유공형 GFRP판의 경우 횡방향 전단보강재의 간격이 줄어들수록 응력 집중현상을 방지하여 넓은 보의 전단강도가 증가하지만 유공형 강판의 경우 횡방향 전단보강재의 간격이 과도하게 줄어들었을 때, 부재 단면에 다수의 스티럽 레그수가 존재하여 전단저항 성능을 저하시키는 것을 확인하였다. 이를 통해 횡방향 전단보강재의 최소간격에 대한 규준이 필요하고 최소간격은 재료마다 다르게 제한되어야 한다고 판단된다.
- (4) 종방향 전단보강재 간격과 횡방향 전단보강재 간격이 줄어들수록 사인장의 균열이 감소하는 것을 확인하였고, 강재를 전단보강재로 사용한 부재의 경우 GFRP를 전단보강재로 사용할 경우보다 전단보강재가 위치한 곳에서 균열이 많이 발생하였다. 이는 강재의 연성적인 특징으로 인하여 부재가 파괴될 때, 보강재의 변형이 많이 발생하여 균열이 증가한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 기호 정리

$A_s$  : sectional area of shear reinforcement(mm<sup>2</sup>)

$a$  : 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)  
 $f_y$  : specified yield strength of shear reinforcement(MPa)  
 $f_{fv}$  : specified tensile strength of GFRP plate(MPa)  
 $s_L$  : 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)  
 $V_{exp}$  : experimental maximum shear strength(kN)  
 $V_n$  : nominal shear strength of wide beam(kN)  
 $V_s$  : nominal shear strength provided by shear reinforcement(kN)

## References

- ACI Committee 318-14** (2014) *Building Code Requirement for Reinforced Concrete and Commentary(ACI 318-14)*, American Concrete Institute, Farmington Hills.
- ACI Committee 440.1R-06** (2006) *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars(ACI 440.1R-06)*, American Concrete Institute, Farmington Hills.
- 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.
- Anderson, N.S., Ramirez, J.A.** (1989) Detailing for 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.
- Kim, D.-J., Kim, M.S., Choi, J.H., Kim, H.C., Lee, Y.H.** (2014) Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer Shear Reinforcement, *ACI Struct. J.*, 111(4), pp.903~912.
- Lubell, A.S., Bentz, E.C., Collins, M.P.** (2008) One-Way Shear in Wide Concrete Beams with Narrow Supports, *ASCE Structural Congress*,

Crossing Borders, Reston, VA.  
Lubell, A.S., Bentz, E.C., Collins, M.P. (2009)

Shear Reinforcement Spacing in Wide Member, *ACI Struct. J.*, 106(2), pp.205~214.

---

## 요 지

본 논문은 유공형 관 형태로 진단보강한 넓은 보의 전단파괴 실험을 수행하여 넓은 보의 거동을 평가하였다. 무보강 시험체, 유공형 강관으로 진단보강된 시험체 5개와 유공형 GFRP로 보강된 시험체 5개 총 11개의 시험체를 전단파괴 실험을 통해 계측한 전단강도와 ACI-318 기준의 설계식을 통해 얻은 전단강도와 비교·평가하였다. 또한 넓은 보의 진단보강재의 재료, 종방향 진단보강재의 간격과 횡방향 진단보강재의 간격을 변수로 하여 넓은 보의 거동과 전단강도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 종방향과 횡방향 진단보강재 간격이 줄어들수록 전단강도가 증가하고 사인장 균열이 적게 발생하는 것을 확인하였다. 또한 진단보강재의 재료인 강재와 GFRP에 상관없이 진단보강량이 동일하다면 넓은 보에서 비슷한 진단보강효과를 보이는 것을 확인하였다.

**핵심용어** : 넓은 보, 진단보강, 유공형 강관, 유공형 GFRP관