

매립형 GFRP 판으로 보강된 플랫 플레이트의 전단강도 평가

황 승 연¹ · 김 민 숙¹ · 이 영 학¹ · 김 희 철^{1*}

¹경희대학교 건축공학과

Evaluation of Shear Strength for Reinforced Flat Plates Embedded with GFRP Plates

Seung Yeon Hwang¹, Min Sook Kim¹, Young Hak lee¹ and Heecheul Kim^{1*}

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

Abstract

In this study, The purpose of this study is to experimentally investigate the shear behavior of reinforced flat plate embedded with GFRP(glass fiber reinforced polymer) plate with openings. The GFRP shear reinforcement is manufactured into a plate shape with several openings to ensure perfect integration with concrete. The test was performed on 7 specimens. the parameters include the type of reinforcement and amount of the shear reinforcement., From the test, we analysed the crack, failure mode, Strain, load-displacement graph. a calculation of the shear strength of reinforced flat plate with GFRP plate based on the ACI 318-11 was compared with the test results. The results of the experiment indicate that GFRP plate is successfully applied as a shear reinforcement in the flat plate under punching shear.

Keywords : shear reinforcement, flat plate, glass fiber reinforced polymer(GFRP), shear strength

1. 서 론

1.1 연구의 목적

플랫 플레이트는 층고 절감, 평면의 가변성, 공기 단축 등 건축 설계와 시공에 있어서 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 보가 없이 슬래브와 기둥으로만 이루어져 있기 때문에 접합부에서 국부적인 응력집중 현상으로 뚫림 전단파괴가 발생하게 된다. 이러한 플랫 플레이트 접합부의 취성파괴를 방지하기 위해서 국내·외에서 철근 스테럽, 전단 스테드레일, 전단 머리 등 다양한 보강방법이 개발되어 왔다. 철근 스테럽을 전단보강재로 사용할 경우 얇은 슬래브에서는 시공 또는 정착의 문제가 발생할 수 있다. 전단 머리의 사용은 접합부의 성능을 높일 수 있지만 자중을 증가시키고, 전단 머리 또는 스테드 레일의 경우 설치 위치의 철근 배근과 공사비 증가에 대한 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 국

내·외에서 경량성, 시공성, 내구성, 고강도성의 장점을 가진 FRP가 플랫 플레이트의 전단보강재의 대체재로 연구되고 있다. Bayrak(2005)은 CFRP(Carbon fiber reinforced polymer)를 strip 형태로 제작하여 플랫 플레이트에 보강하여 보강방법 및 보강량을 변수로 한 뚫림 전단실험을 통하여 성능을 평가하였다. Sheikh(2007)은 CFRP를 ring 형태로 제작하여 슬래브에 구멍을 뚫어서 보수 보강하여 실험을 통해 CSA, ACI 강도식을 평가하였다. Mitchell (2009)는 GFRP를 bar의 형태로 제작하여 인장 주근을 대신해 사용하여 플랫 플레이트의 뚫림 전단성능에 관한 연구를 진행하였다. 이처럼 FRP를 기존 슬래브에 보수 보강형태로 사용하거나, 주근을 대신하여 bar로 사용한 연구는 꾸준히 진행되어 왔으나 철근 스테럽의 대체재로 연구를 진행한 경우는 매우 드물다.

1.2 연구의 중요성

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.

* Corresponding author:

Tel: +82-31-201-2542; E-mail: kimhc@khu.ac.kr
Received March 13 2014; Revised March 27 2014;
Accepted March 28 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

Choi(2012)는 신형상의 유공형 GFRP 판을 제작하여 철근 콘크리트 보에 매립하여 전단 실험을 수행하였다. 이를 통해, GFRP 판으로 전단보강할 경우 철근 스티럽으로 보강한 보에 비해 단위보강면적당 전단강도가 약 3.6배 향상됨을 보였다. 본 논문에서는 전단보강 성능이 검증된 유공형 GFRP 판을 플랫 플레이트의 전단보강재로 적용하고자 하였다. 유공형 GFRP 판은 Fig. 1과 같은 형상을 가진다. GFRP의 섬유 방향은 판의 수평 및 수직성분과 같은 방향을 갖도록 제작하였다. GFRP 판의 유공은 콘크리트의 유동적인 흐름을 가능하게 하여 콘크리트와 FRP 판의 부착력 향상을 기대할 수 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 기둥의 네 면에 설치된다. GFRP 판은 기존의 스페이서를 연결재로 사용하여 슬래브의 상·하부 철근에 끼움으로써 장착하도록 하였다.

본 논문에서는 유공형 GFRP 판을 플랫 플레이트의 전단보강재로 적용하여 이에 대한 전단성능을 평가하고자 하였다. 전단보강재의 종류, 전단보강량을 변수로 하여 플랫 플레이트의 뚫림 전단실험을 수행하였다. 시험체의 균열 및 파괴양상, 하중-변위, 변형률을 분석하여 GFRP 판으로 보강한 플랫 플레이트의 전단성능을 평가하였다. 또한 ACI 318-11의 전단강도 산정식을 따라 GFRP 판으로 보강한 플랫 플레이트의 전단강도 산정식 및 최대 전단 보강 간격을 제안하였다. 이는 향후 유공형 GFRP 판을 플랫 플레이트에 적용에 있어 설계 및 시공에 관한 기초자료로 활용하고자 한다.

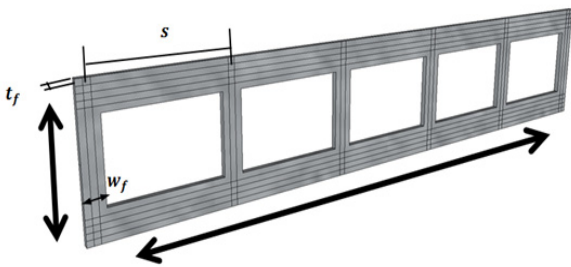


Fig. 1 Shape of GFRP plate

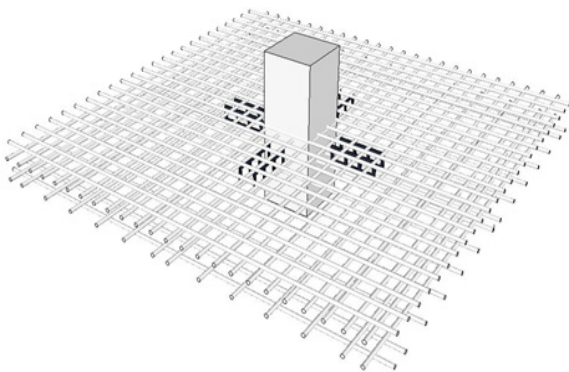


Fig. 2 Schematic View of a flat plate reinforced GFRP plates

2. GFRP 판으로 전단보강된 플랫 플레이트의 뚫림 전단실험

2.1 실험 재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트의 설계강도는 21MPa이다. 압축강도 테스트의 기준에 따라 재령 28일 후 압축강도를 측정된 결과 평균 20.25MPa의 압축강도를 확인하였다. 인장철근과 기둥철근은 D22 규격과 SD500 재질의 이형철근을 사용하였으며 기둥의 띠철근과 스티럽은 D10 규격과 SD400 재질의 이형 철근을 사용하였다. 사용된 재료 물성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties

	Diameter (mm)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Tension bar	22.2	500	200
Column bar			
Stirrup	9.5	400	200
GFRP	-	480	50

2.2 시험체 계획 및 변수

GFRP 판으로 전단 보강한 시험체 4개, 스티럽으로 전단 보강한 시험체 2개, 무보강 시험체 1개, 총 7개의 시험체를 제작하였다. 플랫 플레이트 시험체 평면도를 Fig. 3에 나타내었다. 시험체는 슬래브 두께 180mm, 유효 깊이 138mm, 크기는 2000×2000mm로 동일하게 설계하였다. 기둥의 크기는 250×250mm이며, 상부 기둥의 높이는 300mm, 하부 기둥의 높이는 150mm으로 하였다. 시험체의 단면을 Fig.

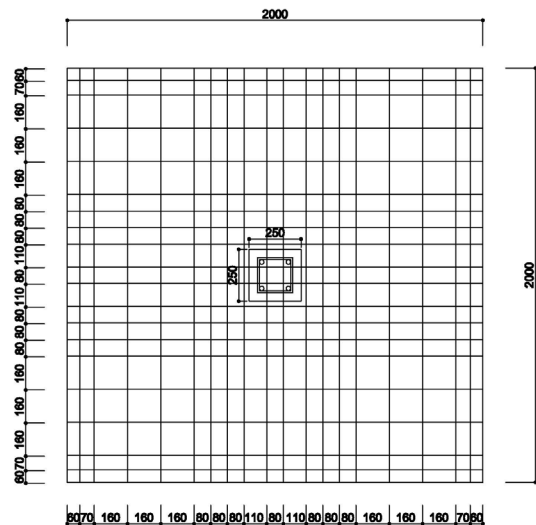


Fig. 3 Plan view of the slab specimen

Table 2 Characteristics of specimens

Specimens	slab dimension					Shear reinforcement characteristics					
	f'_c (Mpa)	slab size (mm)	C (mm)	h (mm)	d (mm)	f_y or f_{fu} (Mpa)	A_v or A_f (mm ²)	Amount of reinforcement $A_f \times f_{fu}$ or $A_v \times f_y$ (kN)	s (mm)	reinforcement type	
C	21	2000 × 2000	250	180	138	-	-	-	-	-	
S-1						400	1200	480	69	0.5d	Stirrup
S-2						400	1700	680	69	0.5d	
G-1						480	1000	480	38	0.3d	GFRP
G-2						480	640	307	69	0.5d	
G-3						480	512	246	95	0.7d	
G-4						480	384	184	138	d	

Specimens notation - S-1

S : Type of shear reinforcement(C : No shear reinforcement, S : Steel stirrup, G : GFRP plate)

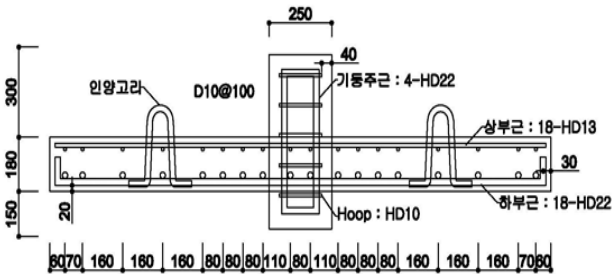


Fig. 4 Cross-sectional view of the slab specimen

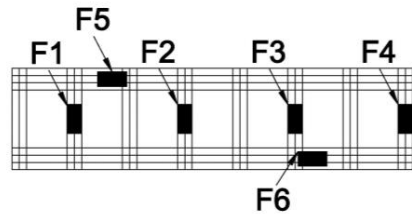


Fig. 5 Strain gauge setting on GFRP Plate of G-1 specimen

4에 나타내었다. 시험체 일람을 Table. 2에 나타내었다. 모든 시험체는 동일한 인장 철근비를 가지도록 설계되었으며 전단보강재의 성능을 알아보기 위한 뚫림 전단실험이므로 슬래브 하부에 18개의 인장철근을 설치하여 각 방향 철근비가 0.02로 휨 파괴가 발생하지 않고 뚫림 전단파괴가 발생하도록 설계하였다.

플랫 플레이트의 뚫림 전단실험을 위해 전단보강재의 종류와 전단보강량을 실험변수로 선정하였다. S-1 시험체와 G-1 시험체는 동일한 전단보강량($A_f \times f_{fu}$ or $A_v \times f_y$)으로 설계하였다. S-2 시험체는 G-1 시험체보다 큰 전단보강량을 가지도록 하였다. GFRP 판으로 보강한 시험체인 G-1, G-2, G-3, G-4 시험체는 전단보강량을 변수하여 전단보강량이 전단강도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2.3 실험 방법

시험체는 반력 프레임 위에 실험을 위하여 제작된 힌지로 4변을 단순 지지하고 최대용량 1000kN의 Actuator를 사용하여 평균 1kN/min의 속도로 하중을 재하하였다. 실제 구조물에서는 슬래브에 하중이 재하되어 슬래브에 처짐을 발생시키면서 뚫림 전단이 발생하지만 본 실험에서는 실험 여건상 인장 철근을 하부에 설치하고 상부 기둥에 하중을 재하하

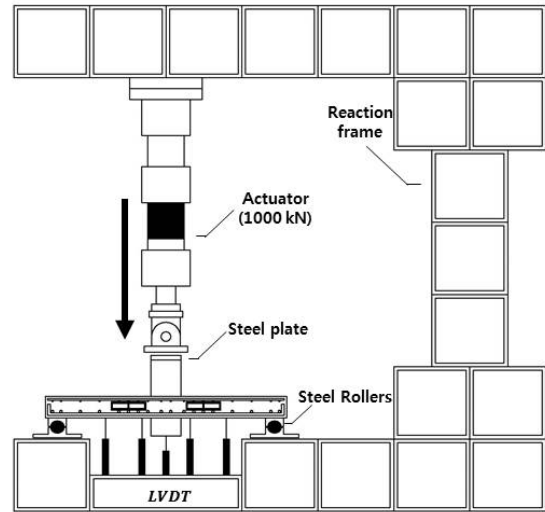


Fig. 6 Specimens setting

는 실험방법을 선택하였다. 시험체 하부에 다섯 개의 변위계(LVDT)를 설치하여 시험체의 수직 변위를 측정하였다. 인장 철근의 거동을 파악하기 위하여 기둥으로부터 가로 방향과 세로 방향으로 일정 간격으로 변형률 게이지를 여섯 개씩 부착하였다. Fig. 5에 G-1 시험체의 GFRP 판에 부착한 변형률의 부착 위치를 도식화하였다. 변형률 게이지는 GFRP 판의 수직요소의 중앙부에, 수평 요소에는 플랫 플레이트 슬래브의 콘 파괴 형상을 고려하여 기둥 방향에는 상부, 지지

점 방향에는 하부에 부착하였다. 데이터 로거를 사용하여 하중, 변위 및 변형률의 데이터를 수집하였다. 시험체 세팅을 Fig. 6에 나타내었다.

3. 실험 결과

3.1 시험체 균열 및 파괴양상

Fig. 7은 시험체의 하부 균열도이며 Fig. 8은 시험체의 기둥면으로부터 100mm 이격된 위치에 콘크리트 절단기를 이용하여 절단한 단면 사진을 나타내었다. 무보강 시험체인 C 시험체는 그림에서 확인할 수 있듯이 전형적인 뚫림 전단 파괴 양상을 보였다. 기둥면과 슬래브의 접합부에서 균열이 시작되어 위험구간까지 큰 파괴를 이루는 양상이다. 그러나 GFRP로 전단 보강된 시험체의 경우 초기 휨 균열이 발생하고, 기둥모서리 부분에서 사선방향으로 균열이 진행되었으며, 점차적으로 전단균열이 시작되어 방사형으로 확산되어 위험 단면의 균열 폭이 증가하였고 최대하중 이후 지점 방향으로 전단균열이 추가적으로 발생하였다. 하부에서 최종적으로 나타난 균열 양상이 C 시험체보다 전단보강된 시험체가 더 넓은 파괴면적을 보인다. 이는 전단보강재가 보강효과를 보여서 플랫 플레이트의 위험 단면(b_0)을 증가시켜 더 많은 콘크리트가 뚫림 전단에 저항했음을 알 수 있다. Fig. 8의 단면에서 보는 바와 같이 무보강인 C 시험체는 기둥 면에서 바로 균열이 시작되어 급격한 기울기로 큰 형상을 나타낸다. G-1



(a) C



(b) S-1



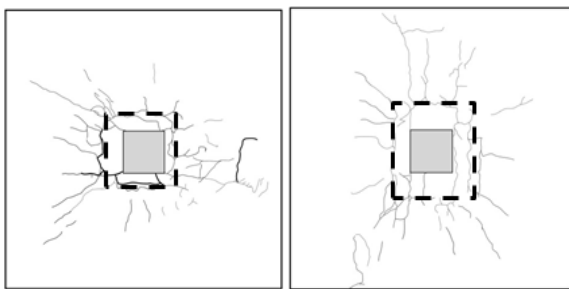
(c) S-2



(d) G-1

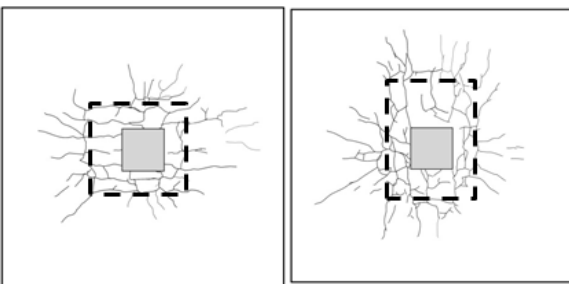
Fig. 8 Crack patterns after saw cut

시험체는 Stirrup 시험체와 비교하여도 가장 완만한 기울기를 가지는 뚫림 전단파괴 양상을 나타낸다. 이는 G-1 시험체가 Stirrup으로 보강된 시험체 보다 보강 효과가 더 분명하게 나타남을 알 수 있다.



(a) C

(b) S-1



(c) S-2

(d) G-1

Fig. 7 Crack patterns on slab tension side

3.2 변형률

각 시험체의 인장 철근에 기둥면에서부터 가로 세로 방향으로 150, 250, 350, 550, 700, 900mm 만큼 떨어진 위치에 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 측정하여 비교하였다. 모든 시험체의 최대하중 시 인장 철근 변형률을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 오른쪽 상단에 변형률 게이지의 부착위치를 도식하였고, 가로 스트립과 세로 스트립의 변형률을 비교하기 위하여 가로 스트립의 게이지에서 측정된 변형률들을 그래프의 마이너스 부분에 표현하였고, 세로 스트립의 게이지에서 측정된 변형률들을 플러스 부분에 표현하였다. 보이는 바와 같이 최대하중 시 모든 인장철근 변형률 값이 항복변형률 값에 미치지 못하였다. 즉 모든 시험체는 휨 철근이 항복하지 않았고 휨 파괴가 일어나지 않고 뚫림 전단 파괴가 발생했음을 알 수 있다. 또한 무보강 시험체의 경우 취약적인 뚫림 전단파괴의 영향으로 다른 시험체에 비하여 낮은 변형률이 나타났으며, 모든 시험체는 기둥 주변에서 가

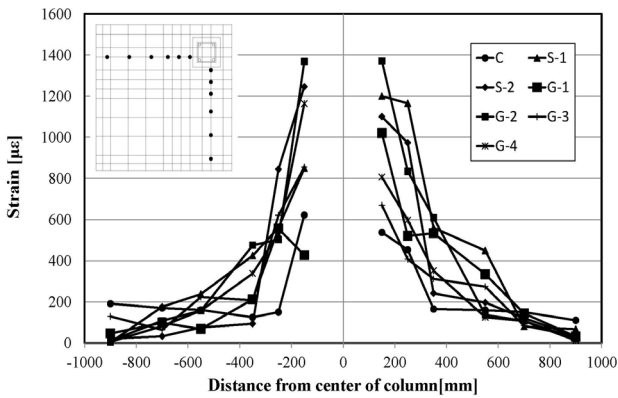


Fig. 9 Strains in tension reinforcing bars at peak load

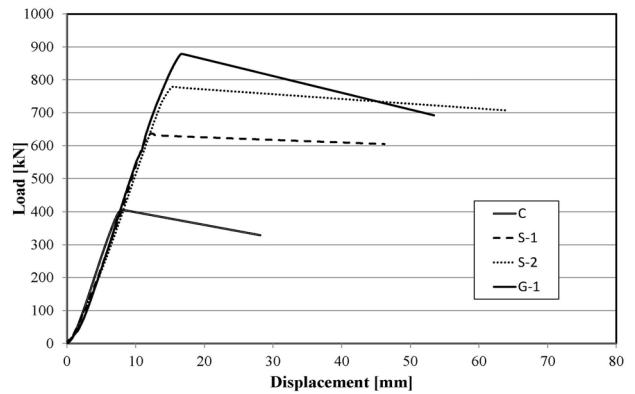


Fig. 11 Load-displacement curves (type of shear reinforcements)

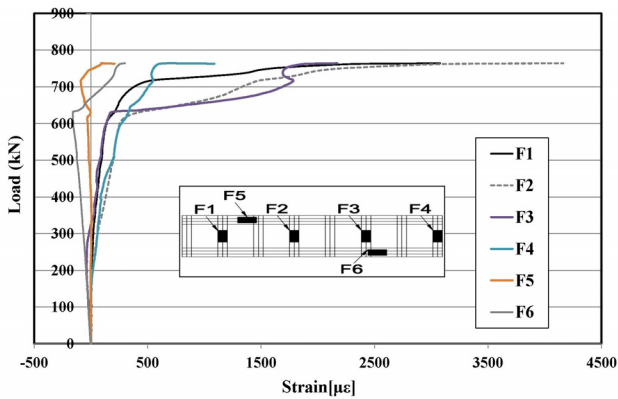


Fig. 10 Load-strain curves of G-1 specimen

장 높은 변형률을 보였다.

Fig. 10에 GFRP 판의 하중-변형률 곡선을 나타내었다. GFRP 시험체의 F2 게이지의 변형률을 보면 약 300kN 에서 초기균열이 발생하기 전까지 60 $\mu\epsilon$ 의 변형률을 보이며 탄성적인 거동을 하였으나 전단균열이 발생하는 시점부터 변형률이 크게 증가하여 변형률이 4000 $\mu\epsilon$ 이 넘어서 시험체가 파괴됨을 확인하였다. 수직 요소인 F1, F2, F3는 큰 변형률을 보이며 뚫림 전단에 효과적으로 지지하여 전단성능에 기여하였다. 하지만 수평요소 게이지인 F5, F6의 경우 수직 요소와 달리 작용하중이 증가함에 따라 균열이 진전되어도 변형률의 변화가 크지 않았다. GFRP 판의 수평 요소는 뚫림 전단 성능에 크게 기여하지 않는 것으로 판단한다.

3.3 하중-변위

시험체의 하중 변위 곡선을 데이터로 전단보강재의 종류에 따른 효과를 분석하였다. 시험체의 최대 처짐은 기둥하부 중앙부에 중력방향으로 발생한 변위를 측정된 값이다. Fig. 11에는 전단보강재의 종류에 따른 하중 변위 곡선을 나타내었다. Fig. 11에서 각 시험체의 최대 하중과 최대 변위를 무보강 시험체를 기준으로 비교한 결과 C 시험체의 최대 하중은

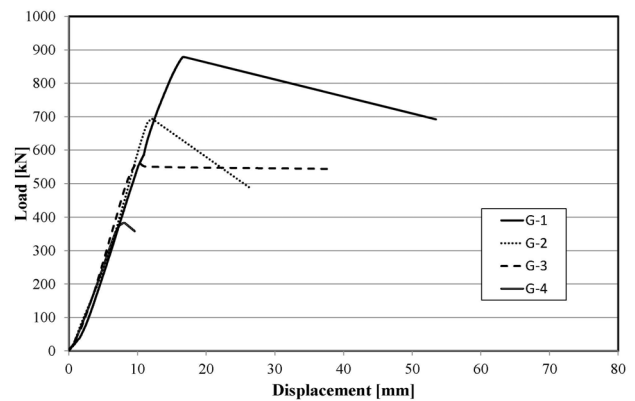


Fig. 12 Load-displacement curves (Amount of shear reinforcements)

406kN, S-1은 637kN, S-2는 780kN, G-1는 879kN으로 각각 C 시험체보다 57%, 92%, 116%의 순서로 증가된 전단보강재의 보강효과를 보였다. 또한 S-1 시험체는 G-1 시험체와 같은 전단보강량을 가지도록 설계하였지만 G-1 시험체 최대하중의 72%에 해당하는 최대하중을 보였다. G-1 시험체보다 40% 증가한 전단보강량을 가지도록 설계한 S-2 시험체의 최대하중은 G-1 시험체의 최대하중의 88% 수준에 해당하는 값을 나타냈다. 철근 스테럽으로 보강한 시험체의 경우 S-1, S-2 모두 G-1 시험체보다 낮은 최대하중을 보였는데 그 이유는 철근 스테럽의 경우 두께가 250mm 미만의 상대적으로 얇은 슬래브의 경우 피복 두께 확보 및 유효 춤 확보 등의 문제로 구조적으로 효과적인 전단성능을 발휘하지 못하기 때문이다. 하지만 GFRP 판의 경우 슬래브의 상·하부 철근에 끼움 형식으로 매립하였기 때문에 스테럽 사용시, 문제가 되고 있는 피복 두께 확보 및 유효 춤 확보를 해결할 수 있다. 따라서 250mm 미만의 얇은 슬래브에서 철근 스테럽 보다 GFRP 판 전단보강재가 더 효과적으로 뚫림 전단에 저항할 수 있다고 판단한다.

Fig. 12는 G-1, G-2, G-3, G-4 시험체의 하중변위 곡

선이다. 총 보강길이를 약 320mm로 동일하게 설계하고, GFRP 판의 전단보강량의 증가에 따른 플랫 플레이트 구조의 전단강도에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 12에서 보이는 대로 각각의 시험체가 최대하중을 도달하기 전까지 유사한 거동을 보이고, 예상되는 바와 같이 보강량이 증가함에 따라 최대하중이 증가하였다.

3.4 전단강도식 평가

매립형 유공 GFRP 판으로 전단보강된 플랫 플레이트의 전단강도를 ACI 318-11에 수록된 철근 스티립으로 보강한 플랫 플레이트의 전단강도식을 기준을 따라 산정하고 적합한가에 대해 분석하였다. 전단강도는 식 (1)에 나타난 것처럼 콘크리트 및 전단보강재의 전단강도 기여분의 합으로 구성된다. 전단강도의 콘크리트 기여분은 ACI 318-11 기준에 의거한 식 (2)와 같이 콘크리트의 압축강도를 고려하여 나타낸다. 콘크리트 위험 단면 b_0 는 ACI 318-11에 명시되어 있는 $d/2$ 를 사용하였다. 식 (3)은 GFRP 판의 전단강도 기여분을 표현한 식이다. 앞 장에서 논의된 것처럼 GFRP 판의 수평요소는 전단력에 대한 지지능력에 영향이 거의 없다고 판단하고 수직요소의 단면적만 고려한다. GFRP 판을 기둥 주변 네 면에 배치하였고, 철근 스티립의 경우와 달리 GFRP 판의 수직요소는 직사각형으로 되어 있어 판의 형상에 따라 폭을 계산하는 방법을 달리 해야 하며 이를 식 (4)에 표현하였다. 식 (5)의 GFRP 판의 수직성분 개수를 계산하여 식 (3)에 대입하면 GFRP 판의 전단강도 기여분이 산정된다.

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

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_0 d \tag{2}$$

$$V_f = n A_f f_{fu} \tag{3}$$

$$A_f = 8 t_f w_f \tag{4}$$

$$n = \frac{d}{s} \tag{5}$$

Table 3 Test results

Specimens	Displacement (mm)	V_{cal} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{cal}
C	8	327	406	1.24
S-1	12.23	489	637	1.30
S-2	15.48	572	780	1.36
G-1	16.66	561	879	1.57
G-2	12.05	459	694	1.51
G-3	10.32	429	562	1.30
G-4	8	398	382	0.96
Average ratio				1.32
Standard deviation				0.18

Table 3에서 제안된 전단강도식으로 설계한 최대 하중과 실험에 의해 나온 값을 비교한 결과를 나타내었다. 비교 결과 GFRP 판으로 보강된 시험체의 경우 평균 1.32 표준편차 0.18로 나타났다. 따라서 제안식은 GFRP 판의 설계식으로 비교적 정확한 값을 예측한다고 판단한다.

3.5 GFRP 판의 세로 스트립 최대 전단 보강간격 제한

ACI 318-11 기준에서는 철근 스티립의 전단 보강 간격을 유효깊이의 절반값(0.5d)로 제한하고 있다. 철근 스티립의 대체재인 GFRP 판으로 ACI 318-11 기준에 만족하는지 비교하였다. 이를 위해 G-1, G-2, G-3, G-4 시험체의 세로 스트립의 전단보강 간격을 각각 0.3d, 0.5d, 0.7d, d 값으로 설계하였다. Fig. 13에 GFRP 판으로 보강된 시험체의 전단강도비를 나타내었다. G-4 시험체는 0.96의 전단강도비 값을 보이며 전단강도는 398kN으로 나타났으며 이는 무보강 시험체인 C 시험체의 전단강도인 406kN에 98% 해당하는 수준이다. G-4 시험체는 세로 스트립의 전단 보강간격을 유효깊이(d)값인 138mm를 사용하였기 때문에 전단보강재로써 그 역할을 발휘하지 못했다고 판단한다. 반면에 G-1, G-2, G-3 시험체는 전단 강도비가 모두 1.3 이상의 값을 보이며 이는 전단보강재로써 슬래브의 뚫림 전단저항에 충분한 성능을 발휘하였다. 즉 ACI 318-11 철근 스티립 전단 보강간격 제한 기준을 GFRP 판에 적용하는 것은 적절하지 않으며 GFRP 판의 세로 스트립 보강 간격을 0.7d로 제한하는 것이 적합하다고 판단한다.

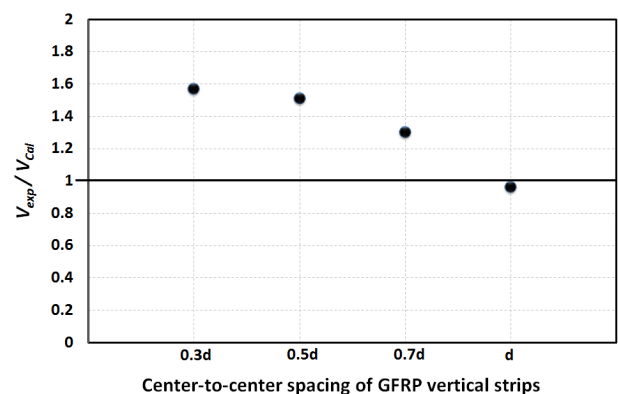


Fig. 13 Comparison of shear strength ratio

4. 결 론

이 연구에서 유공형 GFRP 판을 전단보강재로 플랫 플레이트에 적용하여 그 성능을 평가하였다. 이를 위해 7개의 시험체를 제작하여 플랫 플레이트의 뚫림 전단실험을 수행하였

으며, 시험체의 균열 및 파괴양상, 변형률, 하중-변위곡선을 비교하고 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 시험체의 균열 및 파괴양상을 비교한 결과 GFRP 판이 전단보강재로써 보강 효과를 보여 뚫림 전단에 저항하여서 전단 무보강 시험체나 철근 스티럽으로 보강한 시험체 보다 넓은 위험 단면과 완만한 기울기를 가지는 파괴 양상을 보였다.
- 2) GFRP 판의 하중-변형률 곡선을 비교한 결과 수직 요소는 변형률이 크게 증가하여 4000 $\mu\epsilon$ 이 넘어서 시험체가 파괴되었다. 반면에 수평 요소는 작용하중이 증가되어도 변형률의 변화가 크지 않았다. 따라서 GFRP 판의 수평요소가 슬래브의 뚫림 전단성능에 크게 기여하지 않는 것으로 판단한다.
- 3) 전단보강재의 종류에 따른 하중-변위 곡선을 비교한 결과 철근 스티럽의 경우 피복 두께 확보 및 유효 축확보의 문제로 250mm미만의 슬래브에서 효과적인 전단성능을 발휘하지 못하였다. 반면에 GFRP 판으로 보강할 경우 슬래브의 상·하부 철근에 끼움 형식으로 매립하기 때문에 위의 문제들을 해결할 수 있다.
- 4) ACI 318-11의 기준식을 따라 제안한 GFRP 판 전단강도식의 설계값과 실험값의 비교 결과 시험체의 전단강도비(V_{exp}/V_{cal})의 평균은 1.32, 표준편차 0.18로 실험결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 판단한다.
- 5) GFRP 판의 수직 요소의 보강 간격을 d 값으로 설계한 시험체는 전단 성능을 충분히 발휘하지 못하였지만, 보강 간격을 0.7d로 설계한 시험체는 전단성능을 충분히 발휘하였다. 따라서 GFRP 전단보강재의 최대 전단보강 간격은 0.7d로 제한한다.

감사의 글

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

기호 정리

- A_f : sectional area of a vertical strip of GFRP plate(mm²)
- A_s : sectional area of steel stirrup(mm²)
- b_0 : perimeter of critical section set at d/2(mm)
- C : column size(mm)
- d : effective depth of the slab(mm)
- f'_c : specified compressive strength of concrete (MPa)
- f_y : specified tensile strength of steel(MPa)
- f_{ft} : specified tensile strength of GFRP plate (MPa)

- h : slab thickness(mm)
- n : number of the vertical component of the GFRP plate
- s : center-to-center spacing of longitudinal reinforcement(mm)
- t_f : thickness of GFRP plate(mm)
- V_c : nominal shear strength provided by concrete (kN)
- V_{cal} : design punching shear strength(kN)
- V_{exp} : experimental punching shear strength(kN)
- V_f : nominal shear strength provided by GFRP plate(kN)
- V_n : nominal punching shear strength(kN)
- w_f : width of GFRP plate(mm)

참고 문헌

ACI Committee 318-11 (2011) *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-11)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, p.503.

Alejandro Perez Caldentey, Patricio Padilla Lavaselli, Hugo Corres Peiretti and Freddy Arinez Fernandez (2013) Influence of Stirrup Detailing on Punching Shear Strength of Flat Slabs, *Engineering Structures*, 49, pp.855~865.

Baris Binici and Oguzhan Bayrak (2005) Use of Fiber-Reinforced Polymers in Slab-Column Connection Upgrades, *ACI Structural Journal*, 102(1), pp.93~102.

Choi, J.H., Kim, D.J., Kim, H.C., Lee, Y.H. (2013) Evaluation of Shear Strength Equation of Concrete Beams Embedded with GFRP Plates, *Journal of KOSHAM*, 13(1), pp.11~16.

Choi, J.H., Kim, M.S., Kim, H.C., Lee, Y.H. (2012) An Experimental Study on Shear Behaviors for Reinforced Concrete Beams Embedded with GFRP Plate with Openings, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(4), pp.407~414.

Kim, M.S., Lee, Y.H., Kim, H.C. (2010) Analytical Study on Punching Shear of Reinforced Concrete Flat plates, *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 23(4), pp.409~415.

Kyriakos Sissakis and Shamim A. Sheikh (2007) Strengthening Concrete Slabs for Punching Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates, *ACI Structural Journal*, 104(1), pp.49~59.

Leandro M. Trautwein, Túlio N. Bittencourt, Ronaldo B. Gomes, João Carlos Della Bella (2011) Punching Strength of Flat Slabs with Unbraced Shear Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 108(2), pp.197~205.

Lee J.H., Yoon Y.S., William D. Cook, Denis

Mitchell (2009) Improving Punching Shear Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Slabs, *ACI Structural Journal*, 106(4), pp.427~434.

Eder, M.A., Vollum, R.L., Elghazouli, A.Y. Abdel-Fattah, T. (2010) Modelling and Experimental Assessment of Punching Shear in Flat Slabs with Shearheads, *Engineering Structures*, 32, pp.3911~3924.

Micael M.G., Inacio, A., Pinho Ramos and Duarte

M.V. Faria (2012) Strengthening of Flat Slabs with Transverse Reinforcement by Introduction of Steel Bolts using Different Anchorage Approaches, *Engineering Structures* 44, pp.63~77.

Miguel Fernández Ruiz and Aurelio Muttoni (2009) Applications of Critical Shear Crack Theory to Punching of Reinforced Concrete Slabs with Transverse Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 106(4), pp.485~493.

요 지

본 논문에서는 새로운 형상의 GFRP 판으로 전단보강된 플랫 플레이트의 전단거동에 관하여 실험적으로 연구하였다. GFRP 판은 개구부가 있는 판의 형태로서 콘크리트와의 일체화 거동을 위하여 콘크리트에 매립하여 사용한다. 총 7개의 시험체에 대한 뚫림 전단실험을 수행하였고, 실험 변수로는 전단보강재의 종류와 전단보강량을 선택하였다. 실험결과를 시험체의 균열 및 파괴양상, 변형률, 하중변위곡선으로 분석하였다. 또한 GFRP 판으로 전단 보강된 플랫 플레이트의 ACI 318-11 기준식에 의한 계산값과 실험에 의한 결과값을 비교하였다. 실험 결과 GFRP 판이 플랫 플레이트의 전단보강재로써 뚫림 전단에 효과적으로 적용함을 확인하였다.

핵심용어 : 전단보강재, GFRP, 전단강도, 플랫 플레이트, 뚫림 전단