

GFRP 판을 전단보강재로 사용한 플랫 플레이트의 뚫림전단 성능 평가

이 영 학¹ · 김 민 숙¹ · 황 승 연¹ · 최 진 용¹ · 김 희 철^{1*}

¹경희대학교 건축공학과

Evaluation of Punching Shear for Flat Plates Using GFRP Plate Shear Reinforcement

Young Hak Lee¹, Min Sook Kim¹, Seung Yeon Hwang¹, Jinwoong Choi¹ and Heecheul Kim^{1*}

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

Abstract

The purpose of this study is to experimentally investigate the shear behavior of flat plate that reinforced by embedded GFRP(glass fiber reinforced polymer) plate with openings. Shape of the GFRP shear reinforcement is a plate with several openings to ensure perfect integration with concrete. The test was performed on 7 specimens to check shear strength of flat plate that reinforced by GFRP plate. The parameters include the spacing of the shear reinforcement and amount of the shear reinforcement. The result of test showed that when amount of shear reinforcement was increased, shear strength improved. The result of test showed that maximum shear strength was confirmed when spacing of shear reinforcement was 0.3d. The calculation of the shear strength of reinforced flat plate with GFRP plate based on the KCI was compared with the test results.

Keywords : shear reinforcement, GFRP, flat plate, punching shear

1. 서 론

플랫 플레이트는 보가 없어 슬래브에서 기둥으로 직접 하중이 전달되므로 기둥 주위에 큰 응력 집중으로 뚫림전단 파괴가 발생할 수 있다는 구조적 취약성을 가지고 있다. 뚫림전단 파괴를 방지하기 위해 전단보강재로 사용되는 철근 스티럽은 부식 및 스티럽의 정착으로 인한 피복두께 확보 등이 문제가 되고 있다. 부식 문제 해결 및 높은 인장 강도의 장점으로 FRP를 플랫 플레이트에 보강하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. Abdullah 등(2013)은 FRP를 plate 형태로 제작하여 플랫 플레이트 밑면에 부착하여 보강하였으며 실험을 통해서 뚫림 전단성능을 평가하였다. Lawler와 Polak(2011)은 플랫 플레이트의 위험단면 구간에 구멍을 뚫어서 bolt 형태로 제작된 FRP를 보강하는 방법을 제안하였다. Dulude 등(2013)은 GFRP를 bar로 제작하여 플랫

플레이트의 주근 대신 사용하여 철근과 비교하였다.

본 논문에서는 철근 스티럽을 전단보강재로 사용하는 대신, 선행연구(Hwang *et al.*, 2014)에서 그 성능이 검증된, 판 형태의 GFRP를 플랫 플레이트에 전단보강하여 전단성능을 평가하고자 하였다. GFRP 판은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘크리트와의 부착을 향상시키기 위한 개구부가 있으며, 섬유 방향에 따라 수평 및 수직 스트립으로 구성된다. 전단 보강재의 유무, 전단 보강 간격, 전단 보강량을 변수로 한

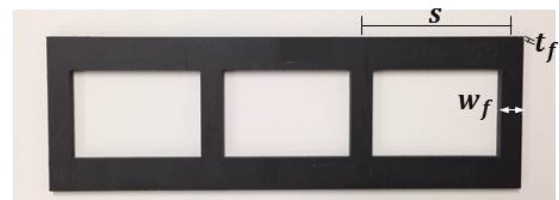


Fig. 1 Shape of GFRP plate

* Corresponding author:

Tel: +82-31-201-2542; E-mail: kimhc@khu.ac.kr

Received June 3 2014; Revised June 22 2014

Accepted June 24 2014

©2014 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.

플랫 플레이트의 뚫림전단 실험을 수행하였으며 실험결과를 바탕으로 변수에 따른 전단 성능을 평가하였다. 또한 KCI의 전단강도식을 사용하여 GFRP 판을 전단 보강재를 사용한 플랫 플레이트의 전단강도를 산정하였으며, 이를 실험결과와 비교하여 그 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1 사용 재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405의 기준에 따라 재령 28일 후 압축강도를 측정한 결과 평균 20.25MPa로 확인되었다. 인장철근과 기둥철근은 D 22의 이형철근을 사용하였으며, 인장철근의 항복강도는 500 MPa을 사용하였다. 기둥의 띠철근은 D10의 이형철근을 사용하였다. GFRP 재료의 항복강도는 480MPa, 탄성계수는 50GPa이다. 사용된 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties

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

2.2 시험체 상세

GFRP 판으로 전단 보강된 시험체 6개, 무보강 시험체 1개로, 총 7개의 시험체를 제작하였다. 시험체 상세를 Fig. 2에 나타내었다. 모든 시험체는 2000mm×2000mm 크기의 두께 180mm, 유효 길이 138mm으로 동일하게 설계하였

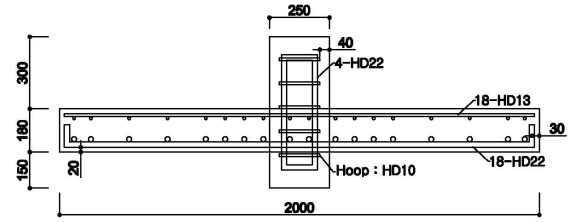


Fig. 2 Cross-sectional view of the slab specimen

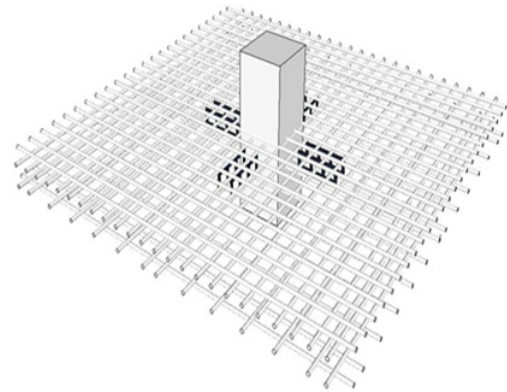


Fig. 3 Schematic view of a flat plate reinforced with GFRP plates

다. 기둥의 크기는 250mm×250mm이며, 상부 기둥의 높이는 300mm, 하부 기둥의 높이는 150mm으로 하였다. 모든 시험체는 동일한 인장 철근비를 가지도록 설계되었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 GFRP 판이 기둥의 네 면에 설치된다. GFRP 판은 슬래브의 상·하부 철근에 끼우는 방법으로 설치하였다.

2.3 시험체 설계

시험체 일람을 Table 2에 나타내었다. 시험체 표기방법은 실험변수인 전단 보강 간격, 전단 보강량을 표시한다. Control

Table 2 Characteristics of specimens

Specimens	slab dimension						Shear reinforcement characteristics				Calculated properties	
	f'_c (Mpa)	slab size (mm)	Column size (mm)	h (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_{fu} (Mpa)	A_f (mm ²)	Amount of reinforcement $A_f \times f_{fu}$ (kN)	s/d	P_y (kN)	P_V (kN)
Control	21	2000 × 2000	250 × 250	180	138	2.2	-	-	-	-	1251	470
A184							480	384	184	0.3	1251	660
B184							480	384	184	0.5	1251	666
C184							480	384	184	0.75	1251	682
A246							480	512	246	0.3	1251	697
B246							480	512	246	0.5	1251	702
C246							480	512	246	0.75	1251	722

Specimens notation-A184

A : center-to-center spacing of shear reinforcement(A : 40mm, B : 69mm, C : 104mm)

184 : Amount of shear reinforcement(184kN, 246kN)

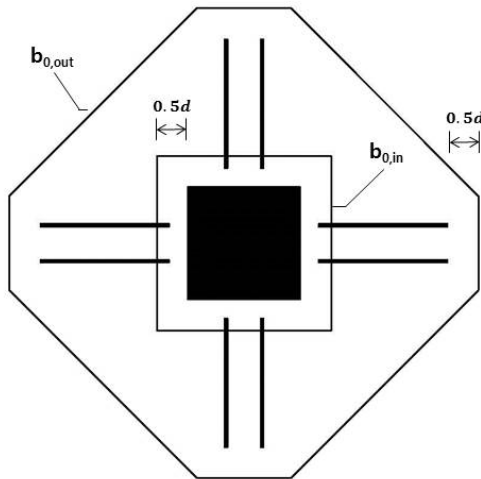


Fig. 4 Critical sections according to KCI

시험체는 전단 보강재가 없는 무보강 시험체를 나타낸다. A, B, C는 전단 보강재의 보강 간격을 나타내며 각각 40mm (0.3d), 69mm(0.5d), 104mm(0.75d)를 나타낸다. 시험체의 전단강도는 KCI 식을 수정하여 산정하였다. Fig. 4에 내부 위험단면($b_{0,in}$)과 외부 위험단면($b_{0,out}$)을 도식화 하였다. 내부 위험단면은 기둥으로부터 0.5d만큼 떨어진 거리의 둘레길이이고, 외부 위험단면은 최외단 전단 보강재로부터 0.5d 떨어진 둘레길이이다. 전단 보강재가 보강된 플랫 플레이트의 경우 외부 위험단면을 설계식으로 사용하여 산정한다. 전단강도는 식 (1)에 나타난 것처럼 콘크리트와 전단 보강재의 전단강도 기여분의 합으로 구성된다. 전단강도의 콘크리트 기여분은 KCI 기준에 의거한 식 (2)와 같이 인장철근비와, 슬래브 유효깊이의 두께효과, 압축대에 작용하는 전단력과 휨모멘트의 복합응력을 고려하여 나타내고 식 (3)은 GFRP 판의 전단강도 기여분을 표현한 식이다. 선행연구 (Hwang *et al.*, 2014)에서 규명된 바와 같이 GFRP 판의 수평 요소는 전단력에 대한 지지 능력의 영향이 없으므로 수직 요소의 단면적만 고려하여 식 (4)와 같은 방법으로 전단 보강 면적을 산정하였다. 식 (5)의 GFRP 판 수직성분 개수를 계산하여 식 (3)에 대입하면 GFRP 판의 전단강도 기여분이 산정된다.

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

$$V_c = k_s k_w f_{tc} \cot \phi \left(\frac{c_u}{d} \right) b_{0,out} d \tag{2}$$

$$V_f = 0.5n A_f f_{fu} \tag{3}$$

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

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

모든 시험체는 휨 파괴 이전에 뚫림전단 파괴가 발생하도록 설계하였다. 이를 위해 KCI를 통해 산정한 전단강도 보다 Johansen(1998)의 Yield line theory를 통해 산정한 휨 강도가 크게 설계하였다. Yield line theory는 4변이 단순 지지된 슬래브의 소성 휨모멘트 강도에 의해 발휘되는 최대 휨강도 P_y 의 크기를 다음 식 (6)과 같이 계산하도록 제시하였다.

$$P_y = 8m_r \left(\frac{1}{1-c/l} \right) \tag{6}$$

$$m_r = \rho f_y d^2 \left(1 - 0.59 \frac{\rho f_y}{f_c} \right) \tag{7}$$

Table 2에서 보는 바와 같이 모든 시험체의 전단강도 보다 휨 강도가 529kN~781kN까지 크게 설계하였다. 전단 보강량($A_f \times f_{fu}$)은 전단강도 산정에 필요한 위험단면 내에 존재하는 전단 보강재의 단면적과 인장강도의 곱으로 나타낸다. GFRP 판으로 보강한 A184~C184, A246~C246 시험체는 각각 전단 보강량을 184kN, 246kN으로 동일하게 설계하고 전단 보강 간격(s)을 변수로 하였다.

2.4 실험 방법

시험체는 반력 프레임 위에 실험을 위해 제작된 힌지로 4변을 단순 지지하고 최대용량 1000kN의 Actuator를 사용하여 평균 1kN/min의 속도로 하중을 재하하였다. 실제 구조물에서는 슬래브에 하중이 재하 되어 처짐을 발생시키면서 뚫림전단이 발생하지만 본 실험에서는 기둥에 하중을 재하하는 방법을 선택하였다. 시험체 하부에 다섯 개의 변위계(LVDT)를 설치하여 시험체의 수직 변위를 측정하고 데이터 로거를 사용하여 하중, 변위 데이터를 수집하였다. 시험체 세팅을 Fig. 5에 나타내었다.

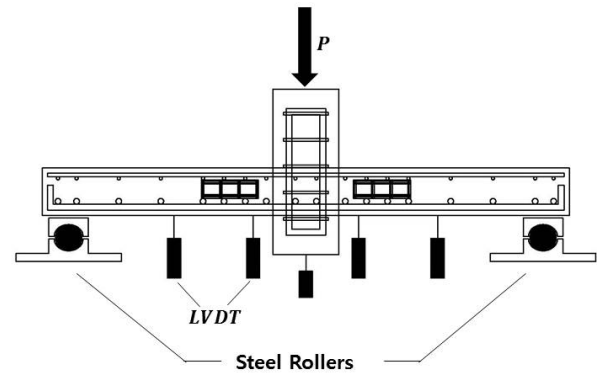


Fig. 5 Specimens setting

3. 실험 결과

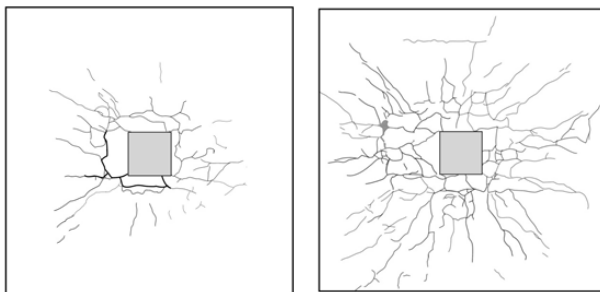
3.1 시험체 균열 및 파괴양상

Fig. 6은 Control, B246 시험체의 하부 균열도이며 Fig. 7은 Control, B246 시험체의 기둥면으로부터 100mm 이격된 위치에 콘크리트 절단기를 이용하여 절단한 단면 사진을 나타내었다. 모든 시험체에는 B246 시험체와 같이 뚫림전단 파괴가 발생하였다. Control 시험체의 초기 균열은 기둥 모서리에서 대각선 방향으로 시작되어 기둥면에서 슬래브 지지점을 향해 방사형(radial form)으로 형성되었고 기둥면에서 바로 균열이 시작되어 위험단면인 $d/2$ 이내에서 큰 형상으로 균열이 크게 형성되다가 최대하중 이후 급격한 취성적 거동으로 최종 파괴가 일어나는 전형적인 뚫림전단 파괴 양상을 보였다. GFRP 판으로 보강한 시험체는 기둥에서 조금 떨어진 부근에서 초기균열이 발생한 이후 기둥-슬래브 접합부의 위험단면 내 균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 슬래브 바깥 방향으로 균열이 확산되었다. 이후 전단 보강영역 외부에서 균열이 점진적으로 증가하다가 최대하중 도달 후 최대하중이 감소하면서 파괴되었다. Fig. 6에서 확인할 수

있듯이 Control 시험체보다 B246 시험체가 더 넓은 파괴면적을 보였다. 이는 전단 보강재가 보강효과를 보여 플랫 플레이트의 위험단면을 증가시켜서 더 많은 콘크리트가 뚫림전단에 저항했음을 의미한다.

3.2 시험체 처짐

기둥 하부에 설치된 LVDT와 기둥면에서 양 방향으로 0.5d, 3d 만큼 떨어진 위치에서 LVDT로 슬래브의 처짐을 측정하였다. 시험체 최대하중(V_{exp})의 30%, 50%, 75%, 100%의 단계로 나누어서 Control, B246 시험체의 하중별 슬래브 처짐을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 무보강 Control 시험체는 최대하중 상태에서 기둥 하부는 8mm의 변위가 발생하였고 기둥으로부터 0.5d 만큼 떨어진 구간에서는 각각 5.62mm, 6.24mm의 변위가 발생하였고 3d 만큼 떨어진 구간에서는 각각 1.84mm, 2.32mm의 변위가 발생하였다. Control 시험체는 하중이 증가함에 따라 위험단면에서는 변위가 크게 증가하였지만 3d 만큼 떨어진 위치에서는 하중 증가에 비하여 변위의 증가가 크지 않았다. 이를 통해 Control 시험체의 경우 기둥면에서 0.5d 떨어진 위험단면에서 파괴가 발생한 것을 알 수 있다. 반면에 GFRP 판으로 보강한



(a) Control (b) B246
Fig. 6 Crack patterns on slab tension side

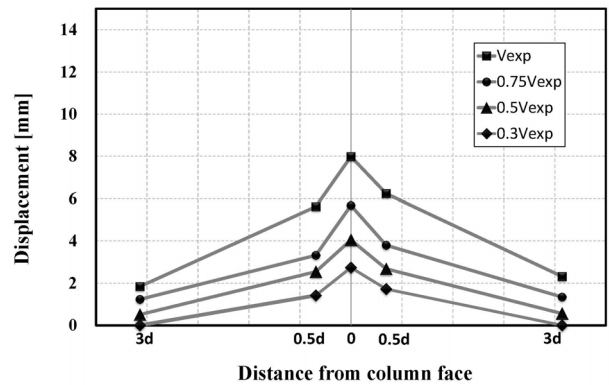


(a) Control

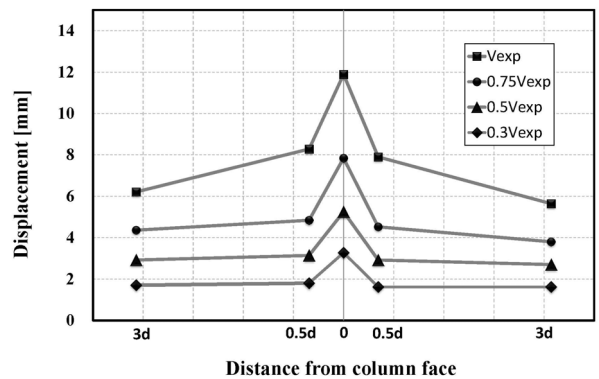


(b) B246

Fig. 7 Crack patterns after saw cut



(a) Control



(b) B246

Fig. 8 Displacement of specimens

B246 시험체는 하중이 증가함에 따라 0.5d, 3d 만큼 떨어진 위치에서도 모두 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 GFRP 판이 슬래브의 위험단면을 확장시켰음을 확인할 수 있다.

3.3 전단 보강재 유무

GFRP 판으로 전단보강한 플랫 플레이트에서 GFRP 판의 전단강도 기여분을 분석하기 위하여 무보강 Control 시험체 및 GFRP 판으로 보강된 시험체의 하중-변위 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. Control 및 A246 시험체에서 전단 보강재의 유무를 제외한 나머지 변수들은 모두 동일하게 설계하였다.

Fig. 9에서 보이는 바와 같이, 시험체의 전단균열이 발생한 하중 400kN 이전에는 유사한 거동을 보였다. Control 시험체의 경우 전단균열이 발생한 이후 전단에 저항하지 못하고 파괴되었으나, A246 시험체의 경우 전단균열에 저항하면서 높은 전단강도를 나타내었다. 전단 보강재의 유무에 따른 각 시험체의 최대하중을 비교한 결과, GFRP 판으로 보강된 시험체의 최대하중은 약 607kN이고 Control 시험체의 최대하중은 406kN으로 나타났다. 여기서 A246 및 Control 시험체의 최대하중 차이인 201kN은 GFRP 판의 전단강도 기여분으로 판단된다.

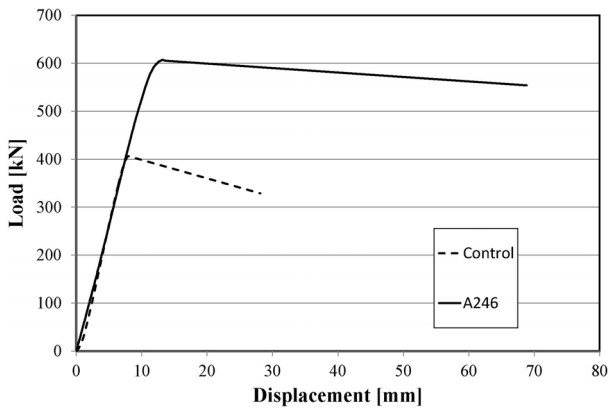


Fig. 9 Load-displacement curves

3.4 전단 보강 간격 및 전단보강량

시험체의 전단강도를 184kN과 246kN의 두 그룹으로 나누어 전단 보강 간격에 따른 전단강도를 분석하였다. Fig. 10에 각 그룹 별로 최대 전단강도를 비교한 결과, 전단 보강 간격이 감소할수록 시험체의 전단강도가 증가하였다. C184 시험체를 기준으로 B184는 6%, A184는 14% 증가한 전단 강도를 보였고 C246 시험체를 기준으로 B246은 3%,

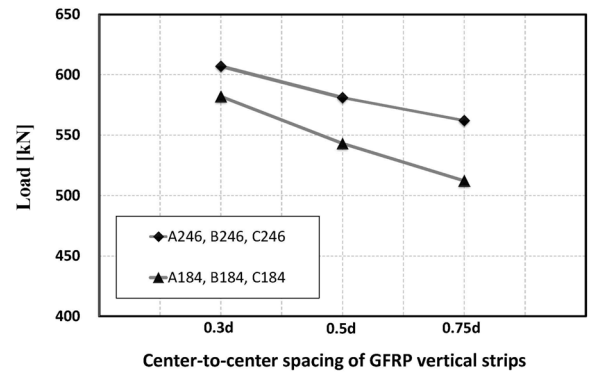


Fig. 10 Shear strength depending on the spacing of GFRP vertical strips

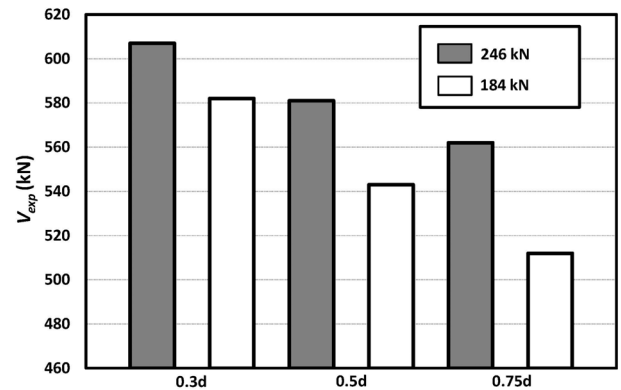


Fig. 11 Shear strength depending on the amount of shear reinforcement

A246은 8% 증가한 전단강도를 보였다. 따라서 두 그룹 모두 전단 보강 간격이 0.3d일 경우 가장 높은 전단강도를 나타내었다.

시험체의 전단 보강 간격을 기준으로 세 그룹으로 나누어 전단 보강량에 따른 전단강도를 비교하였다. 각각 전단 보강 간격을 0.3d, 0.5d, 0.75d로 동일하게 설계하고 전단 보강량을 184kN, 246kN으로 설계한 시험체의 최대 전단강도를 Fig. 11에 나타내었다. 예상되는 바와 같이, 세 그룹 모두 전단 보강량을 246kN으로 설계한 시험체에서 더 높은 전단 강도를 보였으나 전단보강 간격이 좁을수록 전단보강량의 증가에 따른 하중의 증가 영향은 더 적은 것으로 나타났다.

3.5 전단강도식 평가

매립형 유공 GFRP 판으로 전단 보강된 플랫 플레이트의 전단강도를 KCI에 수록된 철근 스티립으로 보강한 플랫 플레이트의 전단강도식을 기준으로 수정하여 전단강도를 산정하고 그 적용성에 대해 분석하였다. Table 3과 Fig. 12에 수정한 KCI 전단강도식으로 산정된 전단강도와 실험에 의한 전단강도를 비교하여 나타내었다. GFRP 판으로 보강된 시

Table 3 Test results

Specimens	Displacement (mm)	V_{exp} (kN)	V_{cal} (kN)	V_{exp}/V_{cal}
Control	8	406	470	0.86
A184	12	582	660	0.88
B184	11.30	543	666	0.82
C184	10.41	512	682	0.75
A246	13.23	607	697	0.87
B246	11.89	581	702	0.83
C246	10.32	562	722	0.78
Average ratio				0.83
Standard deviation				0.05

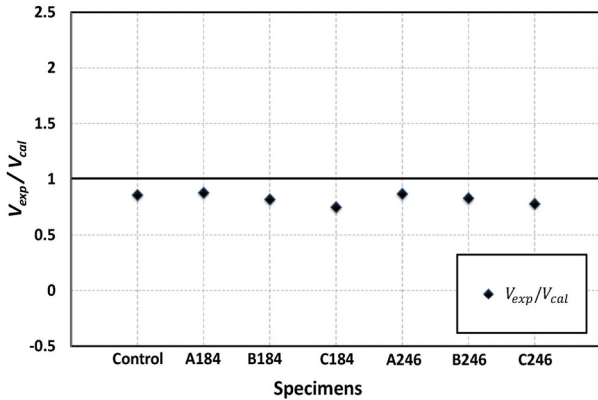


Fig. 12 Comparison of shear strength ratio

시험체의 전단강도비는 평균 0.83, 표준편차 0.05로 KCI 설계식이 시험체의 전단성능을 과대평가한 것을 알 수 있다. Fig. 12에서 확인 할 수 있듯이 모든 시험체는 전단강도비 1이하 값을 보이며 전단강도를 과대평가하였으며 이는 실제 구조물의 설계에 있어서 위험한 결과를 가져올 수 있다고 판

단된다.

전단 보강재를 보강한 플랫 플레이트의 파괴양상은 크게 전단 보강재 안에서 일어나는 파괴양상과 전단 보강재 밖에서 일어나는 파괴 양상으로 구분된다. 철근 스테럽 기준식을 GFRP 판에 맞게 수정하여 파괴양상 예측식이 적합한지 분석하였다. 파괴 양상이 GFRP 판 안에서 일어났을 때의 전단 강도식을 식 (8), (9)에 나타내었다. 이 때 콘크리트 기여분의 위험단면은 기둥으로부터 0.5d 만큼 떨어진 둘레길이인 내부 위험단면($b_{0,in}$)을 사용하여 산정한다.

$$V_{n,in} = V_{c,in} + V_f \tag{8}$$

$$V_{c,in} = k_s k_{10} f_{tc} \cot \phi \left(\frac{c_u}{d} \right) b_{0,in} d \tag{9}$$

파괴양상이 GFRP 판 밖에서 일어났을 때의 전단강도식을 식 (10)으로 나타내었다. 위험단면은 전단 보강재 영역에서 0.5d 떨어진 외부 위험단면($b_{0,out}$)을 사용하여 산정하며 전단 보강재의 전단강도 기여분은 포함하지 않는다.

$$V_{n,out} = k_s k_{10} f_{tc} \cot \phi \left(\frac{c_u}{d} \right) b_{0,out} d \tag{10}$$

식 (8)의 $V_{n,in}$ 과 식 (10)의 $V_{n,out}$ 값을 비교하여 더 낮은 강도에서 플랫 플레이트 파괴양상을 예측할 수 있다. Table 4에 예측과 실제 파괴 양상을 비교하여 나타내었다. A184 시험체는 $V_{n,out}$ 강도가 $V_{n,in}$ 강도보다 18kN 더 낮으며 따라서 전단 보강재 밖에서 파괴가 일어났음을 예측할

Table 4 Failure mode

Specimens	$V_{n,in}$ (kN)	$V_{n,out}$ (kN)	Failure mode		Crack patterns
			Predicted	Actual	
A184	574	556	Outside	Outside	
B184	532	605	Within	Within	
C184	512	641	Within	Within	
A246	563	605	Within	Within	
B246	532	641	Within	Within	
C246	517	677	Within	Within	

수 있다. A184 시험체를 제외한 모든 시험체는 전단 보강제 안에서 파괴가 일어났음을 예측하였으며, 실제 파괴양상과 비교하였을 때 모든 시험체에서 예측한 파괴 양상과 동일한 결과가 나타났다. 따라서 GFRP 판으로 보강된 플랫 플레이트의 파괴양상 예측식이 정확하다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 개구부가 있는 매립형 GFRP 판으로 전단 보강된 플랫 플레이트의 전단성능을 평가하였다. 이를 위해 총 7개의 시험체에 대한 뚫림전단 실험을 통해, 시험체의 균열 및 파괴양상을 분석하고, 전단 보강재 유무, 전단 보강재의 전단 보강 간격, 전단 보강량이 전단강도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, KCI의 전단강도 산정식과 실험에 의한 전단강도를 비교하였다.

- 1) Control 시험체는 기둥면으로부터 위험단면인 $d/2$ 이 내에서 뚫림전단 파괴 양상을 보였지만 GFRP 판으로 보강한 시험체는 보다 넓은 위험단면을 가지는 파괴양상을 보였으며 최대하중 역시 Control 시험체 보다 높게 나타났다. 따라서 GFRP 판이 전단 보강재로서 뚫림전단에 효과적으로 저항하는 것으로 판단된다.
- 2) GFRP 판의 전단 보강 간격에 따른 전단강도를 분석한 결과, 전단 보강 간격이 $0.3d$ 의 경우 가장 높은 전단강도를 보였다. GFRP 판의 전단 보강량 증가함에 따라 전단강도 또한 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) KCI의 기준식을 사용하여 GFRP 판을 전단 보강한 플랫 플레이트의 전단강도를 산정하였으며 이를 통해 산정된 설계값과 실험값을 비교하였다. 비교 결과 시험체의 전단강도비 (V_{exp}/V_{cal})의 평균은 0.83, 표준편차 0.05로 나타나 FRP를 보강한 플랫 플레이트의 경우, KCI 전단강도 산정식이 시험체의 전단강도를 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서 FRP를 전단보강재로 사용할 경우, FRP의 특성을 고려할 수 있는 수정된 전단강도식의 제안이 필요할 것으로 판단된다.
- 4) KCI에서 강도식에 따른 파괴 양상 예측식은 모든 시험체의 파괴 양상을 정확히 예측하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2010-0024 387).

기호 정리

A_f	: sectional area of a vertical strip of GFRP plate(mm ²)
$b_{0,\in}$: perimeter of critical section set at $d/2$ from the face column(mm)
$b_{0,out}$: perimeter of critical section set at $d/2$ from the shear reinforcement zone(mm)
c	: side length of square column(mm)
c_u	: depth of the compression zone(mm)
d	: effective depth of the slab(mm)
f'_c	: specified compressive strength of concrete(MPa)
f_{fu}	: specified tensile strength of GFRP plate(MPa)
f_{te}	: tensile strength of the concrete
h	: slab thickness(mm)
l	: span length of slab(mm)
k_{b0}	: modification factor of critical section
k_s	: modification factor of size effect
n	: number of the vertical component of the GFRP plate
P_V	: nominal punching shear strength(kN)
P_y	: yield line theory flexural strength(kN)
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)
$V_{c,\in}$: nominal shear strength provided by concrete(governing failure within shear reinforced zone)(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)
$V_{n,\in}$: nominal punching shear strength(governing failure within shear reinforced zone)(kN)
$V_{n,out}$: nominal punching shear strength(governing failure outside shear reinforced zone)(kN)
w_f	: width of GFRP plate(mm)
ρ	: ratio of tension reinforced bar
ϕ	: average angle of the inclined punching shear crack

References

- Abdullah, A., Bailey, C. G., Wu, Z. G. (2013) Tests Investigating the Punching Shear of a Column-slab Connection Strengthened with Non-prestressed or Prestressed FRP Plates, *Constr. & Build. Mater.*, 48, pp.1134~1144.
- Dulude, C., Hassan, M., Ahmed, E. A., Benmokrane, B. (2013) Punching Shear Behavior of Flat Slabs Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars, *ACI Struct. J.*, 110(5), pp.723~733.
- Hwang, S. Y., Kim, M. S., Lee, Y. H., Kim, H. (2014) Evaluation of Shear Strength for Reinforced Flat Plates Embedded with GFRP Plates, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 27(2), pp.121~128.

Johansen, K. W. (1998) *Yield line formulate for slabs*, Cement and Concrete Association, London, p.120.

Korea Concrete Institute (2011) *KCI Concrete Structure Design Code 2011*, Seoul, p.548.

Lawler, N., Polak, M. A. (2011) Development of FRP Shear Bolts for Punching Shear Retrofit of Reinforced Concrete Slabs, *J. Compos. Constr.*, 15(4), pp.591~601.

요 지

본 논문에서는 유공형 형상의 GFRP 판으로 전단 보강된 플랫 플레이트의 전단거동을 실험을 통해 평가하였다. GFRP 판은 개구부가 있는 판의 형태로서 콘크리트와의 일체화 거동을 위하여 콘크리트에 매립하여 시공하였다. GFRP 판으로 전단 보강된 플랫 플레이트의 전단 성능 실험을 위하여 총 7개의 시험체에 대한 전단 실험을 수행하였다. 실험 변수로는 전단 보강량, 전단 보강 간격을 선정하였다. GFRP 판의 전단 보강량에 따른 비교결과, 전단 보강량이 증가할수록 전단강도도 증가하는 결과를 보여주었다. GFRP 전단 보강 간격에 따른 비교결과, 전단 보강 간격이 0.3d 일 때 가장 높은 전단강도를 확인하였다. 실험결과를 바탕으로 KCI에서 제시하고 있는 전단강도식을 수정하여 GFRP 판에 적용이 가능한지 평가하였다.

핵심용어 : 전단 보강, GFRP, 플랫 플레이트, 뚫림 전단