J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea, 28(3)
pp.259~266, June, 2015
http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.3.259

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

유공형 강판으로 전단보강된 넓은 보에서의 횡방향 보강 간격에 따른 전단성능 평가

최 진 웅[1] · 김 민 숙[1] · 최 봉 섭[2] · 이 영 학[1] · 김 희 철[1†]

[1]경희대학교 건축공학과, [2]청운대학교 건축공학과

Evaluation of Shear Capacity According to Transverse Spacing of Wide Beam Shear Reinforced with Steel Plate with Openings

Jin Woong Choi[1], Min Sook Kim[1], Bong-Seob Choi[2], Young Hak Lee[1] and Heecheul Kim[1†]

[1]*Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University, Yongin, 446-701, Korea*
[2]*Department of Architectural Engineering, Chung Woon University, Hongseong, 350-701, Korea*

Abstract

In this paper, transverse shear spacing and effective depth of wide beams were considered as parameters to evaluate the shear capacity of wide beam according to transverse spacing of steel plates with openings in experimental way. The eight specimens were composed of: five specimens of shear reinforced by steel plates with openings and three non-reinforced specimens. Crack, failure mode, strain and load-displacement curve of specimens were analysed. Shear contribution of shear reinforcement is evaluated and maximum transverse spacing of shear reinforcement was proposed. Shear strength of the specimen that reinforced with three stirrup legs was higher than shear strength of the specimen that reinforced with two stirrup legs. And as the effective depth increased, shear strength was increased.

Keywords : *steel plate with openings, wide beam, shear reinforcement, transverse spacing, effective depth*

1. 서 론

일반적으로 보의 폭이 기둥의 폭보다 넓은 경우 넓은 보(Wide beam)로 분류한다. 넓은 보는 제한된 층고에서 공간 활용성이 높다는 장점을 가지고 있어 아파트 하부층의 통로 및 주차장 또는 필로티에 주로 적용되고 있다. 그러나 이러한 넓은 보는 높이에 비하여 폭이 넓기 때문에 일반적인 보와 같이 상부 및 하부의 주철근에 스터럽을 감아 전단보강할 경우, 보의 너비 방향인 횡방향으로 배치된 스터럽의 간격이 매우 커지게 된다. Anderson과 Ramirez(1989)의 연구에 따르면, 이러한 경우, 스터럽과 주철근 사이에 대각 압축 응력(Diagonal compression stress)이 집중되는 현상이 발생하여 기대한 전단성능에 미치지 못할 가능성이 있다고 하였다. 이러한 이유로 다수의 연구자들이 넓은 보에서의 횡방향 전단보강에 관한 연구를 수행하였다. Serna-Ros 등(2002)는 16개의 넓은 보에 대한 전단실험을 수행하여 효과적인 횡방향 전단보강재의 배치에 대하여 연구하였다. 실험결과, 동일한 전단보강 면적을 가지더라도 횡방향 전단보강재(Stirrup leg)의 간격에 따라 전단성능이 달라짐을 확인하였으며, 스터럽 레그의 수가 2개인 시험체 보다 스터럽 레그를 여러 개 배치한 경우 전단성능이 향상됨을 규명하였다. Lubell 등(2009) 또한 넓은 보에서 횡방향으로 배치되는 스터럽 레그의 간격을 변수로 한 전단실험을 수행하였으며, 스터럽 레그의 간격이 증가할수록 전단성능이 감소하는 것을 실험을 통해 규명하고, 횡방향 보강간격의 최대간격을 제안하였다.

† Corresponding author:
Tel: +82-31-201-2542; E-mail: kimhc@khu.ac.kr
Received January 19 2015; Revised March 6 2015
Accepted March 18 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.

국내 콘크리트 설계기준(2012)과 ACI Building Code (ACI 318-11)에서는 다음의 식 (1)과 같이 콘크리트와 전단보강재인 스터럽의 전단강도를 합하여 보의 전단강도를 산정하도록 하고 있다.

$$V_n = V_c + V_{sL} \tag{1}$$

여기서, V_n은 공칭전단강도, V_c는 콘크리트에 의한 공칭전단강도, V_{sL}은 종방향으로 보강된 전단철근에 의한 공칭전단강도이며 전단철근에 의한 전단강도는 다음의 식 (2)를 통해 산정할 수 있다.

$$V_{sL} = \frac{A_v f_{yt} d}{s_L} \tag{2}$$

여기서, A_v는 전단철근의 단면적, f_{yt}는 전단철근의 설계기준 항복강도, d는 유효깊이, s_L은 종방향철근에 평행한 방향으로 배치된 전단철근의 간격을 말한다. 종방향으로 배치되는 간격 s_L은 철근 콘크리트 부재일 경우 $d/2$이하 또는 600mm이하로 제한하고 있다.

넓은 보에서 횡방향 전단보강재의 간격이 전단성능에 영향을 미친다는 기존 연구결과에도 불구하고, 식 (1)과 식 (2)에서 알 수 있듯이, 국내 콘크리트 설계기준과 ACI Building Code에서는 횡방향 전단보강에 관한 기준은 제시하고 있지 않다. 이는 여전히 관련된 연구를 통한 실험 데이터 축적 양이 부족하기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 횡방향으로 배치된 전단보강재의 보강 간격에 따른 전단성능을 평가하고자 하였다. 그러나 철근 스터럽을 사용하는 대신, 기존 연구(Choi *et al.*, 2012)에서 사용한 유공형 판을 전단보강재로 사용하였다. 유공형 판으로 제작된 전단보강재는 주철근에 끼우는 방식으로, 설치의 간소화가 가능하며 자중 감소가 가능하다는 장점이 있다. 다만, 기존 연구에서 사용한 FRP 보다 제작이 용이한 구조용 강재를 사용하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 유공형 판 형태로 제작된 전단보강재는 개구부를 통해 콘크리트의 유동성을 높여 콘크리트와 전단 보강재의 부착력을 확보하도록 하였다. 또한 철근에 비해 얇은 두께로 피복두께의 손실이 감소할 것으로 기대하였다.

본 논문에서는 횡방향 전단보강재의 간격과 유효깊이를 변수로 전단실험을 수행하여 시험체의 균열 및 파괴양상, 하중-변위, 변형률을 분석하여 유공형 강판으로 보강한 넓은 보의 전단성능을 평가하고자 하였다. 또한 ACI 318-11 기준에 의한 전단강도 산정식과 실험을 통한 넓은 보의 전단강도를 비교하여 최대 횡방향 보강간격을 제안하는 것을 목표로 하였다. 이는 향후 유공형 전단보강재를 넓은 보에 적용함에 있어 설계에 관한 기초자료로 활용하고자 한다.

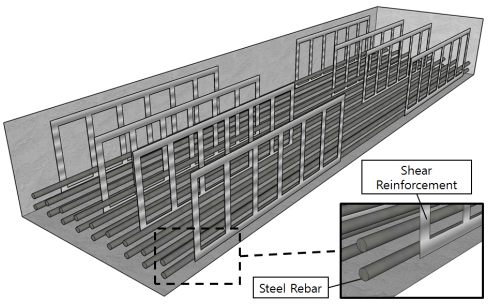


Fig. 1 Schematic view of a wide beam reinforced with steel plate

2. 실 험

2.1 실험변수

유공형 강판으로 보강된 시험체 5개, 무보강 시험체 3개, 총 8개의 시험체를 제작하였다. 8개 시험체의 일람을 Table 1에 정리하여 나타내었다. 무보강 시험체는 전단보강된 시험체의 전단강도에서 무보강 시험체의 전단강도를 제함으로써 전단보강재의 전단강도 기여분을 산정하기 위한 목적으로 제작하였다. 유공형 강판을 횡방향 전단보강재로 사용한 넓은 보에서 횡방향 전단보강 간격에 따른 전단성능을 평가하기 위해 횡방향의 전단보강 간격과 시험체의 유효깊이를 변수로 설정하였다. 보강간격은 전단보강재의 거리로 결정된다. Fig. 2와 같이 중심 간 거리(s_w)는 268mm, 334mm, 745mm으로 하되, 강판의 인장강도와 단면적의 곱으로 산정되는 전단보강량($A_v \times f_{yv}$)은 전단보강재의 간격과 관계없이 동일하게 설계하였다.

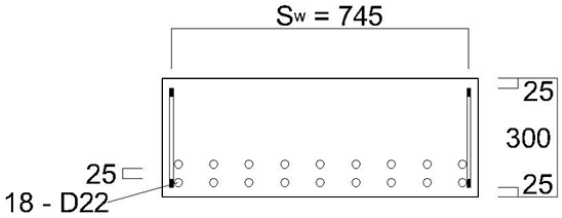
유공형 전단보강재는 Fig. 3와 같이 수평 및 수직 스트립으로 구성된다. 여기서 전단보강면적(A_v)은 유공형 전단보강재의 세로 스트립에 해당하는 단면적이며, 세로 스트립의 두께(t)와 너비(v_w)의 곱이다. 이는 판 형태의 전단보강재에서 가로 스트립은 전단성능에 기여하는 바가 매우 미미하기 때문에 세로 스트립만을 전단성능의 기여분에 포함시킨다는 기존 연구(Kim *et al.*, 2014) 결과를 고려하였다. 시험체의 높이는 300mm, 340mm, 380mm 세 가지로 설계하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 시험체의 폭은 800mm, 길이는 3100mm로 모든 시험체가 동일하게 제작하였다. 또한 휨 파괴 이전에 전단파괴가 발생하도록 설계하였다.

시험체의 전단강도는 ACI 318-11의 앞서 제시한 식 (1)

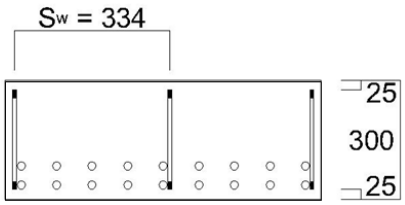
Table 1 Characteristics of specimens

	Width of vertical strip (v_w, mm)	Thickness of Plate (mm)	Number of Plate	Transverse Spacing (s_w, mm)	Effective Depth (d, mm)	s_w/d	Amount of Shear Reinforcement ($A_v \times f_{yw}$, kN)	Calculated properties	
								P_V (kN)	P_M (kN)
C240	-	-	-	-	240	-	-	343	1597
C280					280			401	
C320					320			458	
WS240-2	30	2.2	2	745	240	3.1	53.1	556	
WS240-3	20		3	334	240	1.4		556	
WS240-4	15		4	268	240	1.1		556	
WS280-3	20		3	334	280	0.96		648	
WS320-3	20		3	334	320	0.84		741	

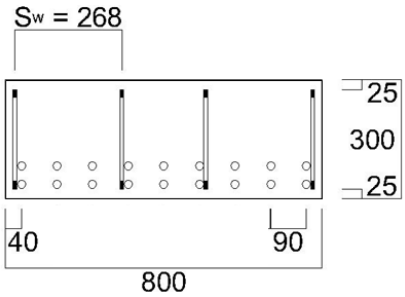
Specimens notation-WS240-3
WS: Reinforcement Material(C: without reinforcement, WS: steel)
240: Effective Depth of Specimen(240mm, 280mm, 320mm)
3: Number of Shear Reinforcement Leg across Beam Section(2EA, 3EA, 4EA)



(a) 2 stirrup legs(WS240-2)



(b) 3 stirrup legs(WS240-3)



(c) 4 stirrup legs(WS240-4)

Fig. 2 Number of shear reinforcement leg in section

과 식 (2)를 통해 계산하였다. 다만, 휨 파괴 이전에 전단파괴가 선행되도록 인장철근을 과보강하였기 때문에 인장철근의 영향이 고려된 식 (3)을 사용하여 콘크리트의 전단강도를 산정하였다.

$$V_c = (0.16\sqrt{f_c'} + 17\rho_s d/a)b_w d \quad (3)$$

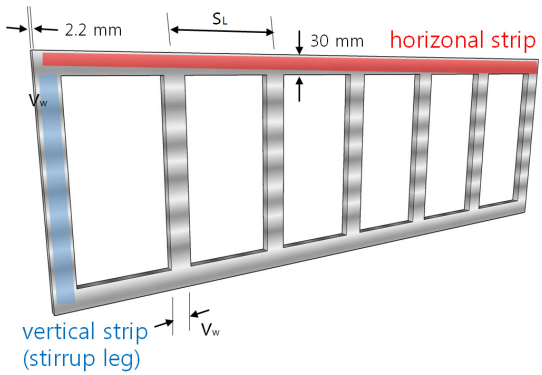


Fig. 3 Shape of shear reinforcement

여기서, f_c'은 콘크리트 압축강도, ρ_s는 인장철근비, a는 응력블록의 등가응력깊이, b_w는 보의 폭, 그리고 d는 보의 유효깊이를 말한다.

2.2 실험 재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트의 압축강도는 24MPa이다. KS F 2405의 기준에 따라 재령 28일 후 압축강도를 측정한 결과 평균 28.8MPa의 압축강도를 확인하였다. 인장철근은 지름 22mm의 이형철근으로 인장강도 500MPa이며 전단보강재로 제작된 강판은 인장강도 402MPa를 사용하였다. 사용된 재료의 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Material properties

	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Steel rebar	500	200
Steel plate	402.7	200

2.3 실험 방법

모든 시험체는 단순지지 상태로서 최대용량 5000kN의 유압식 UTM(Universal Test Machine)을 사용하여 평균 5kN/min의 속도로 하중을 재하하였다. 양 지점으로부터 각각 900mm 떨어진 가력지점에서 2점 가력하였다. 전단균열이 예상되는 곳에 위치한 전단보강재의 수평 및 수직요소에 변형률 게이지를 부착하여 하중 재하에 따른 전단보강재의 변형을 측정하고자 하였다. 시험체 세팅 모습을 Fig. 4에 나타내었다.

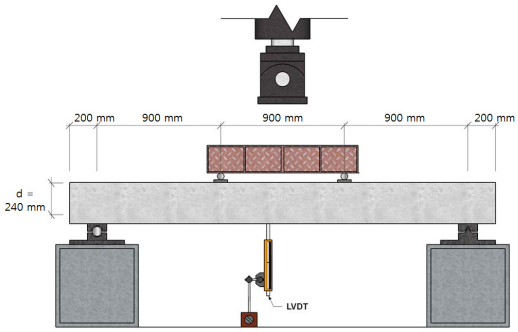


Fig. 4 Specimens setting(WS240-3)

3. 실험 결과

3.1 시험체 균열 및 파괴양상

초기균열은 보의 중앙부에서 휨인장 응력에 의한 휨 균열로 일어났다. 초기균열이 발생한 이후 지지점으로부터 유효길이만큼의 거리에서 휨전단 균열이 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 휨전단 균열과 사인장 균열의 수가 증가하였고, 결과적으로 사인장 균열은 지지점 주변의 휨전단 균열과 연결되었다. 또한 가력지점 주변에 국부적인 응력집중현상이 발생하여 해당 부분의 콘크리트가 파쇄가 발생하였으며 최종적으로 가력점과 지지점을 연결하는 전단균열에 의해 파괴되었다. Fig. 5에 균열을 나타내었다.

Table 3 Test results

Specimen	P_{exp}(kN)	V_{exp}(kN)	Failure Mode
C240	398.41	199.20	Shear
C280	508.89	254.45	Shear
C320	613.65	306.83	Shear
WS240-2	479.07	239.54	Shear
WS240-3	646.75	323.38	Shear
WS240-4	621.28	310.64	Shear
WS280-3	813.48	406.74	Shear
WS320-3	1007.03	503.51	Shear

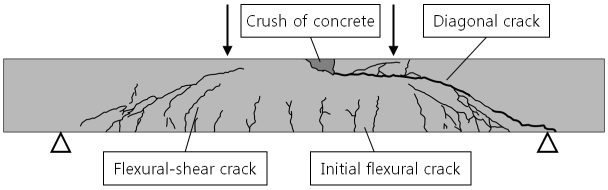


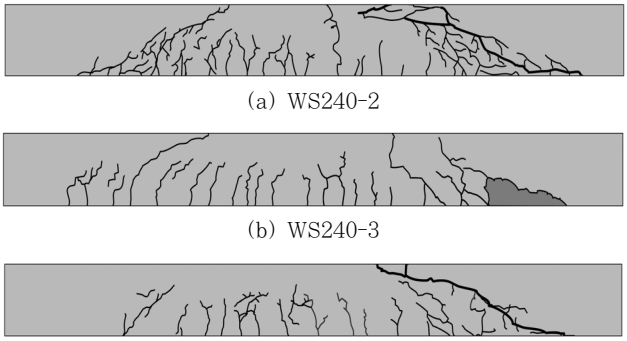
Fig. 5 Cracking mode(WS320-3)

Fig. 6 Shear compression failure(WS240-2)

Fig. 7 Crush of concrete(WS320-3)

Table 3에 모든 시험체의 최대하중 및 파괴모드를 정리하여 나타내었다. P_{exp}는 최대하중이며, V_{exp}는 최대 전단력이다. 모든 시험체는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 사인장 균열과 동시에 가력지점과 지지점의 직접적인 압축대에서 생성되는 강한 압축력에 의해 가력지점의 파쇄와 함께 발생한 전단압축파괴를 보였다. 결과적으로 Fig. 7에서 보는 바와 같이 가력지점 부근의 콘크리트 파쇄는 이미 진행된 휨 전단균열 및 사인장 균열과 합쳐지면서 전단압축파괴가 발생하였다.

Fig. 8에는 스터럽 레그 수를 변수로 한 시험체들의 파괴 및 균열양상을 표시하였다. 초기 균열은 모두 약 200kN에서 발생하였으며 이후 휨균열이 콘크리트 보의 압축 부분으로 발전하였다. WS240-2 시험체는 389kN의 하중에서 첫 사인장 균열이 발생하고 이후 23%의 하중 증가 후 전단파괴되었다. WS240-3 시험체는 450kN의 하중에서 첫 사인장 균열이 발생 후 43%의 하중이 증가 후 전단파괴되고, 우측 지지부 부근에 콘크리트 표면의 탈락 현상이 발생하였다. WS240-4 시험체는 413kN의 하중에서 첫 사인장 균열 발생 후 50%의 하중 증가 후 파괴되었다. 스터럽 레그의 개수가 증가함에 따라 사인장 균열이 적게 발생하는 것으로 나타났다. WS240-2 시험체의 경우, 시험체 바깥쪽 인장철근 부근에 응력집중 현상이 일어나 사인장균열이 다수 발생하였고, WS240-4 시험체는 WS240-2 시험체에 비해 전단보강재 간격이 좁아 단면 전체에 응력이 고르게 분산되었기 때문에 균열발생 정도가 적은 것으로 판단된다.



(a) WS240-2

(b) WS240-3

(c) WS240-4

Fig. 8 Crack patterns after failure

3.2 변형률

Fig. 9에 하부 인장철근에 부착한 변형률 게이지의 위치를 나타내었다. 각 변형률 게이지를 부착한 지점에서의 변형률을 측정함으로서 응력집중현상을 관찰하고, 다수의 스터럽 레그를 배치하였을 때 효과를 관찰하고자 하였다. 지지점과 맞닿는 면적의 끝부분에서 측정이 되도록 시험체의 끝부분으로부터 270mm 떨어진 부분에 변형률 게이지를 부착하였다. 부착한 변형률 게이지는 총 5개로, 최외곽 인장철근 하부에 S1 게이지부터 차례대로 중앙부 인장철근 하부에 S5 게이지까지 부착하여 인장철근의 변형률을 측정하였다.

Fig. 10에는 WS240-2와 WS240-4 시험체, 즉 유공형 전단보강재가 2개 보강되어 양 끝에서만 전단에 저항하는 시

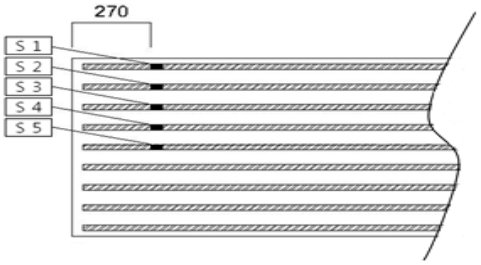


Fig. 9 Location of strain gauge

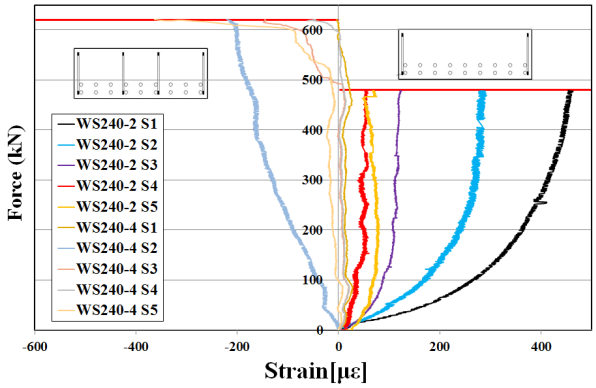


Fig. 10 Load-strain curve(WS240-2)

Table 4 Strains in failure

Gauge Number	Strain($\mu\varepsilon$)	
	WS240-2	WS240-4
S1	542	4
S2	281	221
S3	122	146
S4	58	45
S5	68	363

험체의 철근 변형률과 유공형 전단보강재가 한 단면에 4개 보강된 시험체의 철근 변형률을 그래프로 나타내었다. 두 시험체 인장철근의 변형률을 비교할 수 있도록 좌측 (-)값에 WS240-2 시험체의 변형률을, 우측 (+)값에 WS240-4 시험체의 변형률을 나타내었다. WS240-2 시험체의 경우 전체적으로 큰 변형률을 보이지는 않지만, 최외곽 하부 인장철근에 부착된 S1 게이지에서 파괴하중 시 500$\mu\varepsilon$ 이상의 가장 큰 변형률을 보이고 있다. 그리고 그다음 외곽 인장철근 하부에 부착한 S2 변형률 게이지에서 큰 변형률을 관찰하였다. Fig. 10의 그래프를 통해 최외곽 인장철근에 부착한 변형률 게이지에서 가장 큰 변형률이 발생함을 관찰하여 응력이 집중되는 현상을 확인하였다. Table 4에는 파괴하중 시 인장철근 하부에 부착한 각 변형률 게이지에서 측정된 변형률을 표로 나타내었다. WS240-4 시험체의 경우 전체적으로 변형률에 큰 변화없이 모두 탄성범위 내에서 머무는 것을 관찰할 수 있다. WS240-2 시험체에서 가장 큰 변형률이 발생한 S1 변형률 게이지의 WS240-4의 S1 철근 변형률 또한 파괴 시까지 큰 변형률이 발생하지 않았다. WS240-2 시험체의 그래프와 비교해 보았을 때, 스터럽 레그수를 4개로 보강하여 내부에도 유공형 전단보강재가 배치되는 경우, 최외곽 인장철근에 부착하여 2개 보강한 경우에 비해 단면에 응력이 고르게 분포되어 응력집중현상이 일어나지 않은 것으로 판단된다.

3.3 변수에 따른 하중-변위 곡선

시험체로부터 얻은 하중 및 변위 데이터를 사용하여 하중-변위 그래프로 도식화하고 변수에 따른 전단성능을 분석하였다. 처짐은 시험체 중앙 하부에서 중력 방향으로 발생한 변위를 측정한 값이다. Fig. 11은 횡방향 전단보강재의 스터럽 레그 수를 변수로 한, 유공형 강판으로 보강된 시험체들의 하중-변위 곡선이다. Fig. 11에서 각 시험체의 최대 하중을 무보강 시험체를 기준으로 비교한 결과 C240 시험체의 최대 하중은 398kN, WS240-2는 479kN, WS240-3는 647kN, WS240-4는 621kN으로, C240 시험체보다 각각 20%, 63%, 56% 증가된 전단보강 효과를 보였다.

유공형 강판으로 보강된 시험체는 예상한 바와 같이 무보강 시험체와 비교하여 전단강도가 증가함을 보였다. C240 시험체를 제외한 나머지 전단보강된 시험체는 동일한 전단보강량으로 설계하였으나 각기 다른 전단강도를 보였다. 이와 같은 실험 결과를 통해 동일한 전단보강량으로 보강하였어도 스터럽 레그수가 달라짐으로서 전단보강의 효과도 달라짐을 알 수 있다. 보의 단면에 응력집중현상이 발생하지 않은 WS240-4 시험체의 전단강도가 WS240-2 시험체의 전단강도보다 높은 것을 Fig. 10에서 확인했던 것과 같이, 내부에 추가적인 스터럽 레그를 보강함으로서 횡방향 전단보강간격을 줄이는 것이 전단성능 향상에 효과가 있는 것으로 판단된다. 하지만 스터럽 레그수가 4개인 경우, 스터럽 레그가 3개인 시험체보다 더 낮은 최대 하중에서 파괴되었는데, 이는 다수의 스터럽 레그로 인해 좁은 횡방향 전단보강 간격이 형성되어 전단성능이 저하된 것으로 사료된다.

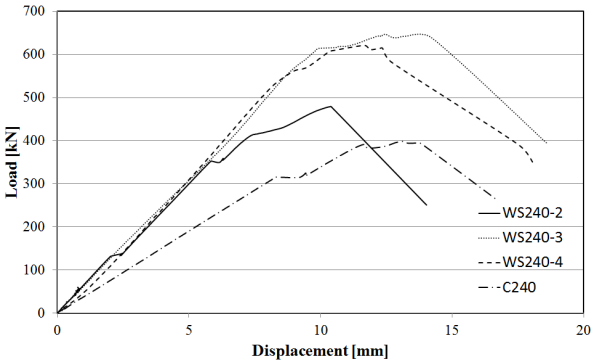


Fig. 11 Load-displacement curves (Number of transverse reinforcement)

Fig. 12은 유효깊이를 변수로 한 시험체들의 하중-변위 곡선이다. WS240-3 시험체를 기준으로 유효깊이가 40mm 증가한 WS280-3 시험체는 26%, 유효깊이가 80mm 증가한 WS320-3 시험체는 56%의 증가된 전단보강 효과를 보였다. 또한 유효깊이의 증가에 따라 같은 하중에서의 처짐이 감소하였다. 유효깊이를 변수로 한 실험에서 기대한 바와 같이 유효깊이가 증가함에 따라 전단성능이 함께 증가함을 관찰하였다.

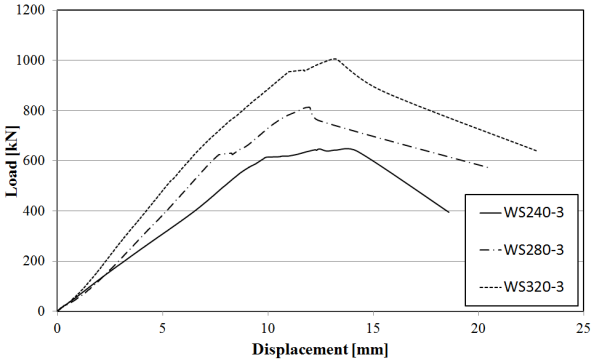


Fig. 12 Load-displacement curves(Effective depth)

4. 횡방향 전단보강 간격의 제한

이 장에서는 횡방향으로 보강한 전단보강재가 전단강도에 끼친 영향을 알아보기 위해 실험의 결과로부터 전단보강재의 기여분을 산정하고, 횡방향 보강간격에 따른 보강 효과를 분석하였다. 전단보강재의 전단보강 기여분을 계산하기 위해 기존의 전단보강식을 변형하였다. 식 (1)에서 V_n 대신실험을 통해 얻은 $V_{\exp}$를 적용하고, V_c를 무보강 시험체의 실험결과로부터 얻은 $V_{c,\exp}$로 적용하여 식 (4)와 같이 정리하였다. 이를 통해 전단보강재의 전단강도 기여분을 계산할 수 있다. 전단강도의 기여분에 대한 실험값은 $V_{s,\exp}$로 표현하였다.

$$V_{s,\exp} = V_{\exp} - V_{c,\exp} \tag{4}$$

식 (4)를 통해 산정한 전단보강재의 전단강도 기여분과 실험에 의해 나온 값을 비교하여 Table 5에 정리하였다. 스터럽 레그를 3개 배치한 WS240-3과 스터럽 레그를 4개 배치한 WS240-4 시험체의 경우, 설계한 전단강도에 가까운 실험결과를 나타내었으며, 스터럽 레그를 3개 배치한 WS280-3과 WS320-3 시험체의 경우, 설계 전단강도에 비해 실험값이 다소 크게 나타났다. 그러나 스터럽 레그를 2개 배치한, WS240-2 시험체의 경우 설계강도의 40% 수준의 전단강도를 나타내었다.

즉, 최외곽 인장철근에만 전단보강한, 2개의 스터럽 레그를 배치한 WS240-2 시험체는 다른 시험체에 비하여 전단성능이 현저히 낮게 나타났다. 이는 같은 값을 가지도록 설계하더라도 횡방향 전단보강재의 배치 간격(스터럽 레그 수)에 따라 전단성능이 달라질 수 있다는 것을 나타낸다.

Lubell(2009)과 Shuraim(2012)은 횡방향 보강간격의 유효깊이에 대한 비를 기준으로 그 값이 1.0 보다 작아야만 ($s_w/d \le 1$) 전단보강 효과가 기대한 만큼 발현된다고 하였다. 즉 횡방향 보강간격을 유효깊이 d 보다 작도록 제한한 것이다. 본 논문에서는 유공형 전단보강재로 전단보강을 한 경우, 횡방

Table 5 Contribution of shear reinforcement

Specimen	$V_{\exp}$ (kN)	$V_{c,\exp}$ (kN)	$V_{s,\exp}$ (kN)	$V_{s,cal}$ (kN)	$V_{s,\exp}/V_{s,cal}$
WS240-2	239.5	199.2	40.3	106.1	0.38
WS240-3	323.4		124.2	106.1	1.17
WS240-4	310.6		111.4	106.1	1.05
WS280-3	406.7	254.5	152.3	123.8	1.23
WS320-3	503.5	306.8	196.7	141.5	1.39

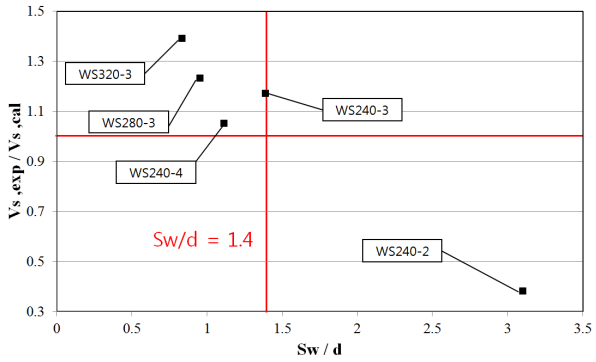


Fig. 13 Influence of transverse spacing on effectiveness of shear reinforcement

향 보강간격과 유효깊이 간의 비가 전단보강 효과를 발현하는데 있어 어떤 영향을 미치는지 분석하고, 최대 횡방향 보강간격을 제한하고자 하였다. Fig. 13에는 유공형 전단보강재로 보강된 시험체의 전단강도비를 나타내었다. s_w/d가 1.5보다 작은 시험체들의 경우 1.0 이상의 전단강도비를 나타내고 있다. 그러나 WS240-2 시험체의 경우 전단보강비가 각각 0.38으로, 전단보강재가 그 역할을 발휘하지 못했다고 판단된다. 따라서 유공형 전단보강재로 보강한 넓은 보의 경우, 횡방향 전단보강간격을 Lubell(2009)와 Shuraim(2012)가 제안한 최대 횡보강 간격 d보다 큰, $1.4d$로 제한하는 것이 더 적합하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 강판을 사용한 유공형 전단보강재로 횡방향 전단보강된 넓은 보의 전단거동을 평가하고 자였다. 이를 위해 총 8개의 시험체에 대한 전단실험을 수행하였으며 실험결과를 통해 다음의 결과를 얻었다.

1) 본 논문의 시험체는 모두 휨균열로 초기균열이 시작되어 사인장 균열이 발전되어 전단파괴가 발생하였다. 스터럽 레그수가 2개인 WS240-2 시험체는 다른 시험체에 비해 다수의 사인장 균열이 발생하였다. 인장철근의 변형률로부터 스터럽 레그수가 2개인 경우 최외곽 인장철근의 변형률이 크게 나타나 스터럽과 인장철근의 교차점에 응력 집중현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 스터럽 레그수가 4개인 경우 2개인 경우에 비하여 인장철근의 변형률이 비교적 고르게 나타나 고른 응력분포를 보이는 것을 알 수 있었다.
2) 유공형 강판을 넓은 보에 횡방향 전단보강재로 보강한 경우, 전단보강량을 모두 동일하게 설계하였음에도 불구하고 전단성능이 다르게 나타났다. 이는 전단보강량과 함께 전단보강간격이 전단성능에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 즉, 다수의 스터럽 레그를 배치하여 횡방향 전단보강 간격을 감소할 경우, 전단보강 향상의 효과가 있는 것으로 나타났다.
3) 횡방향 전단보강간격과 유효깊이의 비인 s_w/d 값을 1.4로 설계한 시험체의 경우 기대한 전단성능이 발휘되었으나 이보다 큰 경우 설계 전단강도의 40% 수준에 그치는 성능을 보였다. 따라서 유공형 전단보강재로 전단보강한 경우 횡방향 전단보강 간격은 $1.4d$로 제한하는 것을 권장한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(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, 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. l 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 Embededded with GFRP Plate with Openings, *J. Korea Concr. Inst.,* 24(4), pp.407~414.

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.

Serna-Ros, P., Fernandez-Prada, M.A., Miguel-Sosa, P., Debb, O.A.R. (2002) Influence of Stirrup Distribution and Support Width on the Shear Strength of Reinforced Concrete Wide Beams, *Mag. Concr. Res.*, 54(3), pp.181~191.

요 지

본 논문에서는 유공형 강판의 횡방향 보강간격에 따른 넓은 보의 전단성능을 실험적으로 평가하기 위하여 횡방향 전단보강 간격과 넓은 보의 유효깊이를 변수로 고려하였다. 시험체는 총 8개로 유공형 강판으로 전단보강한 시험체가 5개, 무보강 시험체가 3개이다. 균열 및 파괴유형, 변형률과 하중-변위 곡선을 분석하였다. 유공형 전단보강재의 전단강도 기여분을 분석하고, 횡방향 전단보강의 최대간격을 제안하였다. 횡방향 전단보강 개수가 2개인 시험체에 비해 3개인 시험체에서 전단강도가 크게 나타났으며 유효깊이가 증가할수록 전단강도가 크게 나타났다.

핵심용어 : 유공형 강판, 넓은 보, 전단보강, 횡방향 전단보강 간격, 유효깊이