

FRP Bar 보강 콘크리트 보의 전단거동

최익창* · 정대진**†

* 목포해양대학교 해양·플랜트건설공학과, ** 목포해양대학교 대학원

Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with FRP Bar

Ik-Chang Choi* · Dae-Jin Jung**†

* Department of Ocean · Plant Construction Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

** Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 철근 및 FRP Bar를 보강재로 사용한 콘크리트 보의 전단 거동을 실험적으로 평가하였다. 실험 변수는 특성이 다른 보강근을 휨 및 전단 보강한 것과 전단보강근비이다. 콘크리트 보의 전단강도 산정에 일반적으로 널리 이용되는 수정트러스 이론의 타당성을 실험 결과의 분석을 통하여 평가하였다. CFRP 및 GFRP를 휨 및 전단 보강한 콘크리트 보에 그대로 적용하는 것은 적절하지 않음을 알 수 있었다. 실험결과는 FRP Bar를 보강근으로 사용한 콘크리트 보의 전단 문제에 수정트러스 이론을 그대로 적용하는 것은 타당하지 않다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : FRP bar, 전단거동, FRP 보강, 역학적 특성, 콘크리트 보

Abstract : Shear behavior of concrete beams reinforced with steel and/or FRP bar is studied through experimental tests. Experimental parameters includes the mechanical properties of reinforcements in shear and bending, and the ratio of shear reinforcement. The validity of the modified truss analogy, that has been widely accepted as a basis for the practical shear design of concrete beams, has been examined thoroughly by analyzing experimental results. The experimental results indicate that the modified truss analogy cannot be directly adopted to the shear problem of concrete beams reinforced with FRP bar.

Key Words : FRP bar, Shear behavior, FRP reinforcement, Mechanical properties, Concrete beam

1. 서 론

해양구조물은 염해에 노출되어 장기내구성에 심각한 문제점으로 지적되고 있다. 그 이유는 콘크리트 구조물의 보강근으로 사용되는 철근은 부식에 매우 취약하기 때문이다.

이러한 고부식 환경인 해양 환경 하의 콘크리트 구조물의 부식을 원천적으로 억제하는 방법으로 철근 대신에 FRP (Fiber Reinforced Plastic)을 사용하는 방법이 대두되고 있다.

FRP는 철근에 비해 비부식성, 경량성, 비자기성 및 고강도의 재료적인 특성을 갖고 있으며, 콘크리트 구조물의 보강재로 적용하기 위한 연구는 1950년대 말부터 시작되었다 (Rubinsky and Rubinsky, 1959).

국내에서는 2008년 한국콘크리트학회에 “FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 설계 및 시공지침(안)”이 소개되었다(KCI, 2008).

이재훈 등이 전단보강이 없는 FRP RC 보의 파괴 거동(Lee et al., 2010)과 전단강도 예측(Lee and Shin, 2010)에 관한 연구를 하였다. 휨 보강근을 철근 대신에 FRP Bar를 보강한 RC 보에 대한 실험을 실시하여 파괴 거동을 분석하였으며, 실험결과를 회귀분석 하여 전단보강이 없는 FRP RC 보의 전단강도 설계식을 제안하였다.

또한, RC 보를 FRP로 외부 부착하여 전단 보강한 보에 대한 연구는 심 등(Sim et al., 2005a, Sim et al., 2005b)과 최 등(Choi et al., 2011)에 의해 이루어 졌으며, FRP 보강 RC 보의 전단강도 예측 모델을 제안하였다.

FRP Rods를 전단보강근으로 사용한 콘크리트 보에 대한 연구는 최 등(Choi et al., 2004)에 의해 발표되었으며, 수치 해

* First Author : choi@mmu.ac.kr, 061-240-7309

† Corresponding Author : jdj2689@mmu.ac.kr, 061-240-7340

석 모델을 이용한 수치 해석을 실시하여, 전단강도식을 제안하였다.

그러나, 국내에서는 철근 대신 FRP bar를 전단보강근으로 사용한 콘크리트 보에 대한 전단 거동을 분석한 연구가 전혀 보고되지 않았다. FRP의 역학적 특성이 철근과 매우 다르기 때문에 FRP를 보강재로 사용한 보는 철근을 사용한 RC 보와 다른 전단 거동을 할 것으로 판단된다.

본 연구는 저자 등이 실시한 실험인 철근, CFRP, GFRP 및 PS 강선을 휨 및 전단 보강재로 사용한 총 10개의 콘크리트 보의 실험 결과를 토대로 보강근의 역학적 특성이 전단 거동에 미치는 영향을 분석한다.

2. 콘크리트 보의 실험 개요

2.1 실험체 보의 제원

실험은 철근, CFRP(탄소섬유), GFRP(유리섬유) 및 PS 강선을 휨보강 및 전단보강근으로 사용한 총10개의 철근콘크리트 보에 대해 실시하였다(Niwa et al., 1996).

Fig. 1은 보의 형상 및 크기를 나타내고 있다. 보의 길이는 5.2 m, 단면의 폭은 300 mm, 단면의 높이는 철근(D25)을 휨보강근으로 사용한 보(No.1~No.3)에 대해서는 400 mm, CFRP(ϕ 16) 및 GFRP(ϕ 16)를 휨보강근으로 사용한 보(No.4~No.10)에 대해서는 휨보강근을 2단 배근하였기 때문에 418 mm로 했다. 전단보강근의 배근은 등간격으로 하였으며, 전단보강근으로 사용한 FRP Bar는 절곡부를 사전에 절곡 가공하여 나선형으로 배근하였다. 또한, 철근과 PS 강선은 폐쇄형으로 배근하였다.

Table 1은 모든 실험체에 사용한 보강근의 종류를 나타내고 있으며, 휨보강근으로 철근(D25), CFRP(ϕ 16), GFRP(ϕ 16)를 사용하였으며, 전단보강근으로 철근(D6, D10), PS강선(ϕ 6), CFRP(ϕ 6), GFRP(ϕ 6)를 사용하였다.

실험 변수는 휨보강근 및 전단보강근의 역학적 특성이 다른 보강근의 사용과 전단보강근비(r_w)이다. 모든 실험체에 대해서 휨보강근비는 1.93 %, 전단스판비(a/d)는 4.0으로 일정하게 하였다. FRP Bar의 부착능력이 철근에 비해 떨어지기 때문에 실험체 제작시 휨보강근의 완전한 정착을 위해서 지점 밖으로 보의 길이를 1,000 mm 연장하여 충분한 정착길이를 확보하였다.

2.2 사용재료의 역학적 특성

실험에서 사용한 콘크리트는 조강 포틀랜드 시멘트이며, 굵은골재의 최대크기는 20 mm이다. 재령28일의 콘크리트의 압축강도는 Table 3에 나타낸 것처럼 26.0~42.1 MPa이다.

Table 2에는 FRP Bar의 인장시험 결과이며, 항복강도, 극한강도 및 탄성계수를 나타내고 있다. 실험에서 사용한 FRP Bar는 부착력을 향상시키기 위해 이형철근과 같은 리브를 갖는 형태의 것을 사용하였다.

Table 1. Information of the Concrete Beams Reinforced with FRP Bar and/or Steel

Specimen	Bending Reinforcement		Shear Reinforcement		
	Kind	Diameter	Kind	Diameter	r_w
No.1	SD685	D25	SD345	D6	0.12
No.2	SD685	D25	CFRP	ϕ 6	0.11
No.3	SD685	D25	GFRP	ϕ 6	0.11
No.4	CFRP	ϕ 16	-	-	-
No.5	CFRP	ϕ 16	CFRP	ϕ 6	0.05
No.6	CFRP	ϕ 16	CFRP	ϕ 6	0.11
No.7	CFRP	ϕ 16	CFRP	ϕ 6	0.22
No.8	CFRP	ϕ 16	PS Bar	ϕ 6	0.12
No.9	CFRP	ϕ 16	GFRP	ϕ 6	0.11
No.10	GFRP	ϕ 16	CFRP	ϕ 6	0.11

Table 2. The Mechanical Properties of Reinforcements

Stiffener	Diameter	Yielding Strength (MPa)	Breaking Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (($\times 10^5$)MPa)
SD685	D25	733	923	1.98
SD345	D10	398	577	1.97
	D6	381	559	1.98
GFRP	ϕ 16	-	1224	0.59
	ϕ 6	-	1230	0.50
CFRP	ϕ 16	-	1085	1.00
	ϕ 6	-	1302	1.15
PS Bar	ϕ 6	1484	1652	2.29

Table 3. Experimental Results (Diagonal Cracking Load, Ultimate Load, Compressive Strength of Concrete)

Specimen	P_{cr} (kN)	P_u (kN)	f'_c (MPa)
No.1	266.0	375.0	31.3
No.2	270.0	387.0	37.9
No.3	295.0	378.0	42.1
No.4	210.0	210.0	30.2
No.5	230.0	245.0	29.4
No.6	210.0	315.0	26.0
No.7	245.0	470.0	32.2
No.8	245.0	465.0	32.1
No.9	245.0	331.0	33.3
No.10	205.0	325.0	26.4

FRP Bar 보강 콘크리트 보의 전단거동

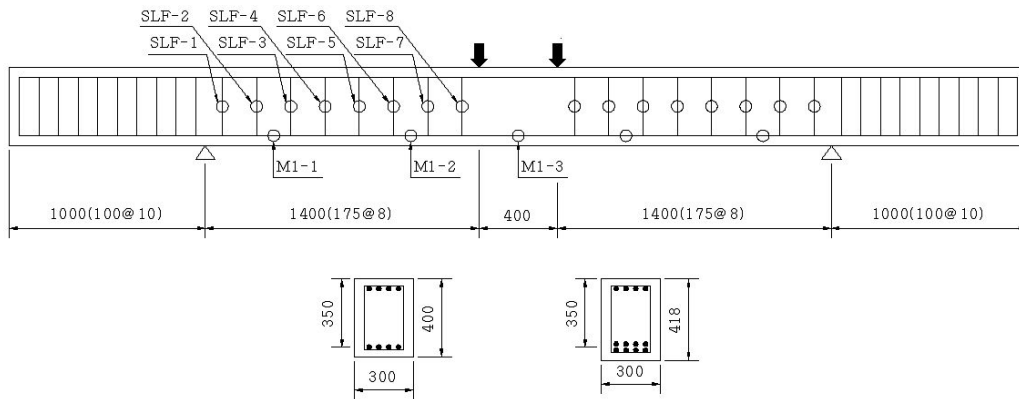


Fig. 1. Shape of Beams and Measure Points of Strain of Reinforcements.

2.3 재하방법 및 변형 측정 위치

재하는 등휨간격 400 mm, 전단스판 1,400 mm의 대칭 2점 재하를 하였다.

실험체의 재하 실험시 처짐을 측정하기 위하여 부재 중앙과 3곳에 변위계를 설치하였으며, 휨보강근 및 전단보강근의 변형률을 측정하기 위하여 보강근에 변형 게이지를 부착하였다. 변형률 게이지의 부착한 위치는 Fig. 1에 나타내고 있다.

3. 보강재의 재료특성이 RC보의 전단 거동에 미치는 영향

본 연구는 보강근의 역학적 특성이 전단거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 휨 및 전단보강근이 다른 총 10개의 콘크리트 보에 대한 실험을 실시하였다. Table 3은 실험에 의한 보의 사인장 균열 발생하중(P_{cr}), 극한하중(P_{cu}) 및 콘크리트의 압축강도(f'_c)를 나타낸 것이며, 모든 보는 전단파괴가 발생하였다.

3.1 전단보강재의 재료 특성의 영향

Fig. 2는 콘크리트 보의 휨보강근으로 철근을 사용하고, 전단보강근으로 각각 철근(No.1), CFRP(No.2), GFRP(No.3)를 사용한 보의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 2에 나타난 것처럼, 휨 균열이 발생하기 전에는 거의 같은 거동을 보이지만, 휨 균열이 발생한 후부터 거동이 조금씩 차이를 보이다 사인장 균열 발생 후에는 거동이 많은 차이를 보이고 있다.

전단보강근으로 철근을 사용한 보(No.1)의 전단 강도는 CFRP를 보강한 보(No.2)와 GFRP를 보강한 보(No.3)와 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 이것은 항복강도가 작은 철근을 보강한 보의 전단강도가 파단강도가 큰 CFRP 및 GFRP를 보강한 보와 거의 비슷한 값을 보인다는 것을 의미한다.

이와 같은 결과는 파단강도가 큰 FRP를 보강한 콘크리트 보의 전단강도 산정에 식(1)의 수정트러스 이론을 그대로 적용하는 것은 문제가 있다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 3은 전단보강근으로 철근을 사용한 보(No.1)의 하중 증가에 따른 지점으로 부터 하중 작용점까지의 전단보강근의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 지점으로 부터 437 mm 부근에서 전단철근의 변형률이 크게 나타나고 있으며, 하중 300 kN에서 항복변형률을 크게 초과하고 있다.

Fig. 4는 전단보강근으로 CFRP를 사용한 보(No.2)의 하중 증가에 따른 지점으로 부터 하중 작용점까지의 전단보강근의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 지점으로 부터 437 mm 부근에서 전단보강근의 변형률이 크게 나타나고 있다.

Fig. 5는 전단보강근으로 GFRP를 사용한 보(No.3)의 하중 증가에 따른 지점으로 부터 하중 작용점까지의 전단보강근의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 지점으로 부터 612 mm 부근에서 전단보강근의 변형률이 크게 나타나고 있다.

Fig. 3~5에서 전단보강근의 변형률이 크게 발생하는 위치에서 사인장균열이 발생한 것으로 추정할 수 있으며, 전단보강근으로 철근을 사용한 보(No.1)의 경우에는 사인장 균열이 발생한 것으로 추정되는 위치(지점으로 부터 437 mm 부근)와 인접한 전단 철근이 전단력을 공동으로 부담하고 응력 재분배가 잘 되고 있으나, CFRP로 보강한 보(No.2)와 GFRP로 보강한 보(No.3)에서는 사인장 균열이 발생한 것으로

로 추정되는 위치에 존재하는 전단보강근에 전단력이 집중되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 CFRP 및 GFRP는 항복 없이 파단하는 재료의 특성 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 콘크리트 보의 휨보강근으로 CFRP를 사용하고, 전단보강근으로 각각 CFRP(No.6), PS강선(No.8), GFRP(No.9)를 사용한 보의 하중·처짐 곡선을 나타낸 것이다. 휨 균열과 사인장 균열 발생 전후의 거동은 Fig. 2에 나타난 것과 유사하나, PS강선을 전단보강근으로 사용한 보(No.8)에서는 사인장 균열 발생 후에도 강성을 계속 유지하며, 높은 극한하중 값을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 2에서 설명한 것처럼, 기존의 수정트러스 이론을 그대로 적용하는 것은 문제가 있다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 7은 전단보강근으로 CFRP를 사용한 보(No.6)의 하중 증가에 따른 지점으로 부터 하중 작용점까지의 전단보강근의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 지점으로 부터 262 mm 부근과 787 mm 부근에서 전단보강근의 변형률이 크게 나타나고 있다. 이것은 사인장 균열이 262 mm 부근과 787 mm 부근에서 발생하였기 때문이다.

Fig. 8은 전단보강근으로 PS강재를 사용한 보(No.8)의 하중 증가에 따른 지점으로 부터 하중 작용점까지의 전단보강근의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 지점으로 부터 787 mm 부근의 전단보강근은 변형률이 크게 나타나고 있으나 인접한 전단보강근의 변형률도 함께 증가함을 나타내고 있다.

Fig. 9는 전단보강근으로 GFRP를 사용한 보(No.9)의 하중 증가에 따른 지점으로 부터 하중 작용점까지의 전단보강근의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 지점으로 부터 612 mm 부근의 전단철근은 변형률이 크게 나타나고 있으며, 보의 파괴시의 변형률은 $20,000 \times 10^{-6}$ 을 나타내고 있다.

Fig. 7~Fig. 9에 나타낸 전단보강근의 변형률 분포를 보면, 전단보강근으로 PS강재를 사용한 보(No.8)에서는 사인장 균열 발생 후의 전단력을 인접한 전단 철근과 공동으로 부담하고 있다. 그러나, CFRP나 GFRP로 보강한 보에서는 사인장 균열이 발생한 위치에 존재하는 전단보강근에 전단력이 집중되는 경향을 보이고 있다.

3.2 휨보강근의 재료특성의 영향

Fig. 10은 휨보강근으로 각각 철근(No.2), CFRP(No.6), GFRP(No.10)을 사용하였으며, 전단보강근으로 CFRP를 사용한 콘크리트 보의 하중·처짐 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 10에 나타난 것처럼, 휨 균열이 발생하기 전에는 거의 같은 변위 거동을 보이지만, 휨 균열이 발생한 후에는 휨보강근의 탄성 계수가 작아지면 변위가 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. Fig. 10과 Fig. 2 및 Fig. 6을 비교해 보면, 전단보강근의 역학적 특성 보다는 휨보강근의 역학적 특성이 변위 거동에 미

치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 휨보강근으로 철근을 사용한 보의 전단강도가 CFRP 및 GFRP를 사용한 보보다 큰 값을 보이고 있다. 이것은 다웰 작용(Dowel Action)에 의한 것으로 판단되며, 전단강도 산정에 휨보강근의 역학적 특성을 고려해야 할 것으로 생각된다.

Fig. 11은 휨보강근으로 GFRP, 전단보강근으로 CFRP를 사용한 보(No.10)의 하중 증가에 따른 지점에서 하중 작용점까지의 전단보강근의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 지점으로 부터 437 mm 부근에서 전단보강근의 변형률이 크게 나타나고 있다.

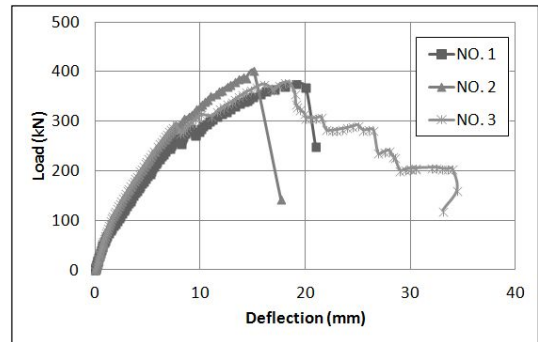


Fig. 2. Comparison of Load - Deflection Relationships in Beams of Different Shear Reinforcements.

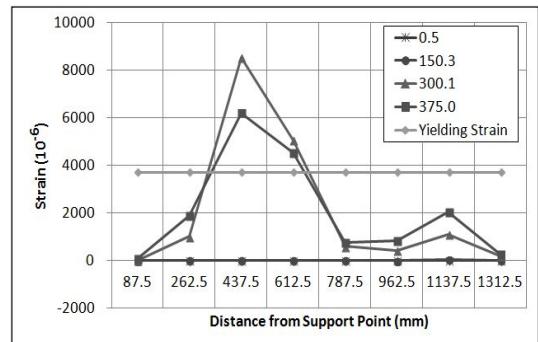


Fig. 3. Distribution of Strain on Steel for Specimen (No.1).

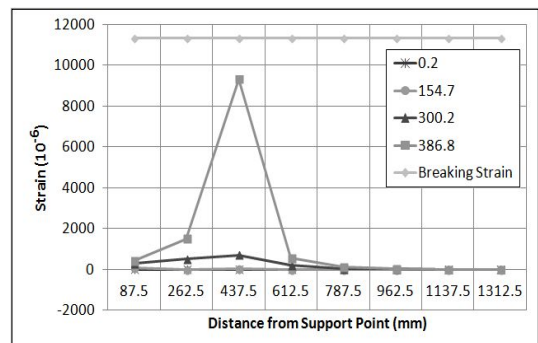


Fig. 4. Distribution of Strain on CFRP for Specimen (No.2).

FRP Bar 보강 콘크리트 보의 전단거동

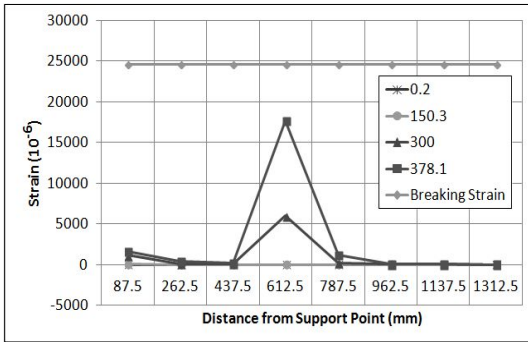


Fig. 5. Distribution of Strain on GFRP for Specimen (No.3).

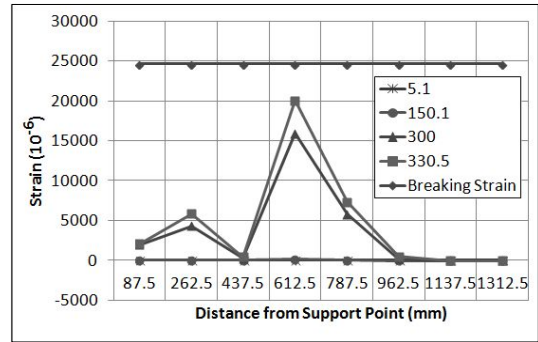


Fig. 9. Distribution of Strain on GFRP for Specimen (No.9).

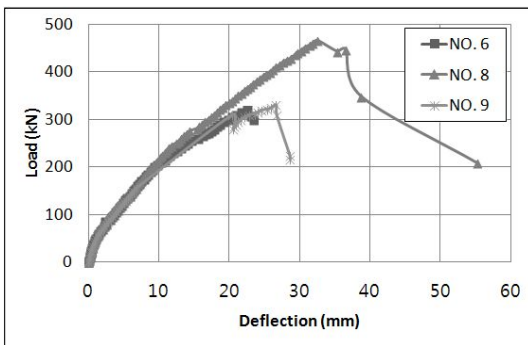


Fig. 6. Comparison of Load - Deflection Relationships in Beams of Different Shear Reinforcements.

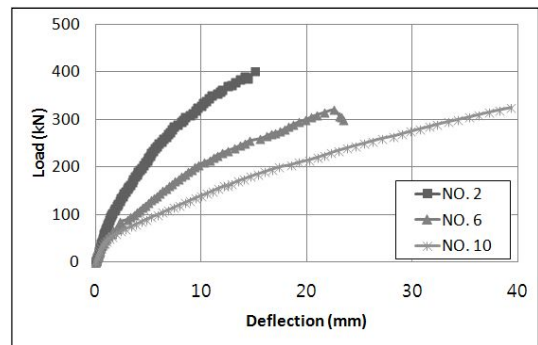


Fig. 10. Comparison of Load - Deflection Relationships in Beams of Different Bending Reinforcements.

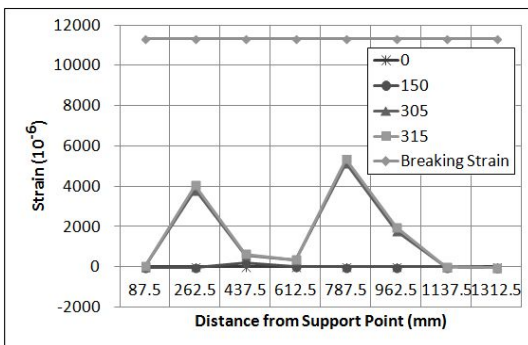


Fig. 7. Distribution of Strain on CFRP for Specimen (No.6).

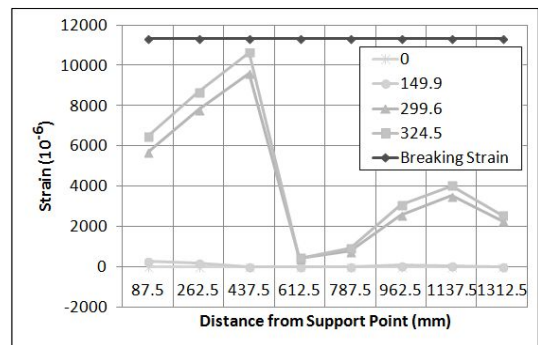


Fig. 11. Distribution of Strain on CFRP for Specimen (No.10).

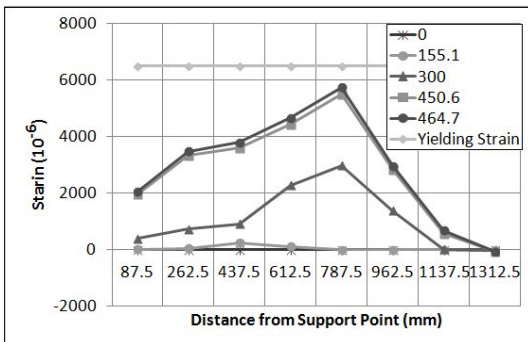


Fig. 8. Distribution of Strain on PS Bar for Specimen (No.8).

4. 보강재의 특성이 전단강도에 미치는 영향

철근콘크리트 보의 전단강도는 식(1)에 나타난 수정트러스이론에 의해 산정한다.

$$V_u = V_c + V_s \dots\dots\dots (1)$$

$$V_s = A_v \cdot f_y \cdot \frac{d}{s} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 V_u 는 전단강도이며, V_c 는 콘크리트 부담분이고, V_s 는 트러스이론에 근거한 전단철근의 부담분이며, A_v 는 전단보강철근량, f_y 는 철근의 항복강도, d 는 단면 유효 깊이, s 는 전단철근 간격이다.

수정트러스이론은 많은 실험결과를 토대로 제안된 반경험식으로 전단보강근으로 철근을 사용한 콘크리트 보에 대한 실험결과들을 토대로 제안된 식이다.

식(2)는 전단보강근의 부담분으로 트러스이론에 근거한 것이며, 전단보강근의 보강량과 항복강도의 곱의 형태로 계산된다. 그러나 FRP와 철근은 다음과 같은 역학적 특성이 다르기 때문에 수정트러스 이론을 그대로 적용하기에는 많은 문제점이 있다.

FRP는 철근과 다음과 같은 역학적 특성이 다르다. ①철근에 비해 작은 탄성계수를 갖으며, ②철근의 항복점과 같은 특성이 없이 파단되며, ③파단강도가 철근에 비해 매우 크다.

①의 작은 탄성계수 특성은 보의 변형을 크게 하며, 다웰 작용에도 영향을 미친다. ②의 항복점 없이 파단하는 특성은 철근의 항복 이후의 응력 재분배 현상이 발생하지 않고 보가 파괴되게 한다. ③파단강도가 매우 크기 때문에 파괴 시 부재는 큰 변형이 발생한다. 변형이 크게 발생하면 사인장 균열 폭도 확대되어, 콘크리트 부담분도 저하될 것으로 판단된다. 따라서 전단강도 산정에 FRP의 파단강도를 사용하는 것이 타당한지 검토가 필요하다.

상기의 문제점 때문에 FRP 보강 콘크리트 보의 전단강도를 산정할 때 기존의 수정트러스이론을 그대로 적용하기에는 문제가 있다고 판단된다.

Fig. 12는 실험결과인 보의 최대 하중이 작용할 때, σ_{max}/f_{wu} 와 역학적 전단보강근비($(r_w \times f_{wu})/f'_c$)와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, r_w 는 전단보강근비이며, f_{wu} 는 철근의 항복강도와 FRP의 파단강도이고, f'_c 는 콘크리트 압축강도이다. 또한 σ_{max} 는 전단보강근의 최대응력이며, 최대변형률에 탄성계수를 곱하여 구했다.

Fig. 12에서 실선으로 나타낸 것은 실험결과를 회귀 분석한 것이다. 최대응력비가 1을 나타내는 보는 전단보강제로 철근을 사용한 보(No.1)이며, 전단철근이 항복하였다.

역학적 전단보강근비가 증가함에 따라 최대응력비(σ_{max}/f_{wu})가 감소하고 있음을 보이고 있다. 이것은 파단강도가 큰 CFRP 및 GFRP를 전단보강근으로 사용한 보에서는 FRP의 파단강도를 트러스이론의 식(2)에 그대로 적용하는 것은 문제가 있다는 것을 보여 주고 있으며, CFRP 및 GFRP 보강 콘크리트 보의 전단강도를 평가할 때에 강도가 저하되는 부분을 고려해야 할 것으로 판단된다.

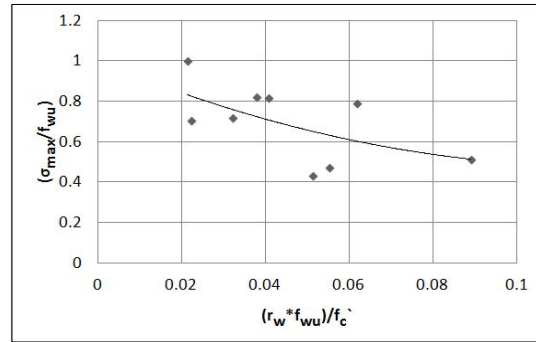


Fig. 12. Relationships between σ_{max}/f_{wu} and $(r_w \times f_{wu})/f'_c$.

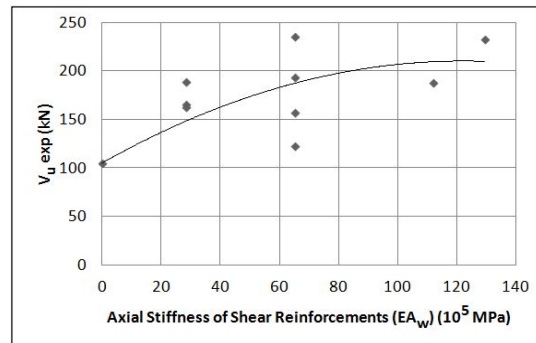


Fig. 13. Relationships between Shear Carrying Capacity and Axial Stiffness of Shear Reinforcements.

Fig. 13은 전단보강근의 축강성(EA)과 보의 전단강도와 의 관계를 나타낸 것이며, 실선은 회귀분석한 것이다. 축강성이 증가함에 따라 전단강도도 증가하고 있지만, 직선적인 증가를 보이지는 않고 있다. 이것은 축강성의 증가에 따라 전단철근의 부담분이 직선적으로 증가하는 트러스이론인 식(2)의 결과와 다른 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 FRP가 탄성계수가 작고, 항복하지 않고 파단하는 역학적 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 이것은 탄성계수가 작고 파단강도가 큰 CFRP 및 GFRP로 보강한 콘크리트 보의 전단강도를 산정할 때에 이러한 현상을 고려해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 역학적 특성이 다른 철근, CFRP, GFRP 및 PS 강선을 휨 및 전단 보강제로 사용한 총 10개의 콘크리트 보의 실험 결과를 토대로 보강근의 역학적 특성이 전단 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구 결과에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

FRP Bar 보강 콘크리트 보의 전단거동

1. 본 연구에서 하중-처짐 관계와 보의 전단강도의 분석 결과, 철근과 역학적 특성이 다른 FRP를 보강한 콘크리트 보의 전단강도 산정에 수정트러스 이론을 그대로 적용하는 것은 문제가 있다는 것을 알 수 있었다.

2. 전단보강근으로 철근이나 PS강선을 사용한 보에서는 사인장 균열이 발생 후에 응력 재분배가 잘 되고 있으나, CFRP와 GFRP로 보강한 보에서는 사인장 균열이 발생한 위치에 존재하는 전단보강근에 전단력이 집중되는 경향을 보이고 있다.

3. 전단보강근의 역학적 특성 보다는 휨보강의 역학적특성이 변위 거동에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

Prediction of the Shear Strength of FRP Strengthened RC Beams (I), Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 17, No. 3, pp. 343-351.

원고접수일 : 2013년 03월 19일

원고수정일 : 2013년 07월 24일

게재확정일 : 2013년 08월 28일

참 고 문 헌

- [1] Choi, I. C., J. H. Yeon and J. Y. Ko(2004), Estimation of shear Carrying Capacity on Concrete Beams, Reinforced with FRP Rods, The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 18, No. 1, pp. 63-68.
- [2] Choi, K. K., S. M. Kang and W. C. Sim(2011), Shear Strength Model for FRP Shear-Reinforced Concrete Beams, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 23, No. 2, pp. 185-193.
- [3] KCI(2008), Korea Concrete Institute, "Design and Construction Guide of Concrete Structures with Reinforcement of FRP" Proceedings of the Korea Concrete Institute, Vol. 20, No. 1, p. 67.
- [4] Lee, J. H., H. A. Son and S. J. Shin(2010), Failure Behavior of FRP RC Beam without Shear Reinforcements, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22, No. 2, pp. 199-208.
- [5] Lee, J. H. and S. J. Shin(2010), Shear Strength Prediction of FRP RC Beam without Shear Reinforcements, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22, No. 3, pp. 313-324.
- [6] Niwa, J., I. C. Choi, T. Mishima and A. Suzuki, (1996), Evaluation of Shear Carrying Capacity of Concrete Beams Reinforced with FRP Rods by the Lattice Model, Journal of JSCE, Vol. 31, pp. 105-114.
- [7] Rubinsky, I. A. and A. Rubinsky(1959), "A Preliminary Investigation of the Use of Fiber Glass for Prestressed Concrete", Magazine of Concrete Research, Sept, pp. 71-78.
- [8] Sim, J. S., C. W. Park, D. Y. Moon and J. W. Sim(2005a), Prediction of the Shear Strength of FRP Strengthened RC Beams (II), Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 17, No. 3, pp. 353-359.
- [9] Sim, J. S., H. S. Oh, D. Y. Moon and K. D. Park(2005b),