

AFRP 보강근 콘크리트 깊은보의 전단강도에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Shear Strength of AFRP-Reinforced Concrete Deep Beam

조 장 세* · 이 영 학** · 김 희 철***
Cho, Jang Se · Lee, Young Hak · Kim, Heecheul

요 약

본 연구는 섬유 보강 폴리머(Fiber Reinforced Polymers, 이하 FRP) bar로 보강된 콘크리트 깊은보의 전단강도를 평가하기 위하여 전단경간비, 보강비, 주근의 종류를 변수로 총 6개의 실험체에 대한 전단 실험을 수행하였다. 전단실험을 토대로 FRP bar로 보강된 콘크리트 깊은보의 균열 및 처짐에 대한 거동 조사를 수행하였으며, ACI 318-08의 스트럿-타이 모델을 이용한 전단강도와 아치작용을 고려한 기존 제안식에 의한 전단강도를 비교·평가하였다. 그 결과, FRP bar로 보강한 실험체와 철근으로 보강한 실험체는 상이한 전단거동을 보였으며, FRP bar로 보강한 경우의 전단강도가 철근으로 보강한 경우보다 증가하는 것으로 나타났다. 전단강도 산정에 있어서는 ACI 318-08의 스트럿-타이 모델을 이용한 방법이 기존 제안식에 의한 방법보다 상대적으로 정확했다.

keywords : FRP, 깊은보, 전단강도, 스트럿-타이 모델, ACI 318-08

1. 서 론

콘크리트 구조체의 보강근으로써 부식에 취약점을 가진 철근과는 달리 비부식성과 경량, 비자기성, 고강도의 재료적 성질을 가진 FRP가 철근의 대체 재료로 널리 사용되고 있다. 전단경간비가 2.5이상의 FRP bar로 보강된 보의 전단강도에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔으며 전단력 산정에 관련된 식 또한 비교적 합리적인 값을 도출하는데 이르렀다(Razaqpur와 Isgor, 2006). 하지만 FRP bar로 보강된 콘크리트 깊은보의 전단력에 관련된 연구는 미비한 실정이며, 또한 그에 대한 구조설계기준 조차 마련되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 FRP bar로 보강된 깊은보의 거동에 대한 분석과 기존 기준 및 제안식들의 적합성을 조사하는 것을 목표로 부재의 전단력에 영향을 미치는 요소인 전단경간비, 보강비, 주근의 종류를 변수로 전단실험을 수행하였으며, ACI 318-08의 스트럿-타이 모델을 통한 전단강도와 아치효과가 고려된 일반보의 전단력 산정식을 통한 전단강도의 비교·평가와 더불어 파괴 거동에 대한 조사를 실시하였다.

2. 실험

* 학생회원 · 경희대학교 건축공학과 석사과정 joejangse@khu.ac.kr
** 정회원 · 경희대학교 건축공학과 교수 leeyh@khu.ac.kr
*** 정회원 · 경희대학교 건축공학과 교수 kimhc@khu.ac.kr

2.1 실험체 제작

실험체에 사용된 콘크리트의 설계 강도는 27MPa이며 KS F 2405에 따라 압축강도실험을 실시한 결과, 평균 26.1MPa의 압축강도를 나타냈다. 보강근은 아라미드 섬유 보강 폴리머(Aramid Fiber Reinforced Polymer, 이하 AFRP)와 이형 철근을 사용하였다. 콘크리트 배합비는 표 1, 보강근의 물성치는 표 2에 나타내었다.

표 1 콘크리트 배합표

설계 강도 (MPa)	W/B (%)	물 (kg/m ³)	굵은골재 (kg/m ³)	잔골재 (kg/m ³)
27	44.9	161	924	841

표 2 보강근 물성치

	직경 (mm)	면적 (mm ²)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
Steel	10	78.54	400	200
AFRP	9	63.62	1,826.9	80.7

AFRP bar로 보강된 실험체 5개와 철근으로 보강된 실험체 1개를 제작하여 총 6개의 실험체에 대한 실험을 수행하였다. 실험체의 총 길이는 2,000mm이며 순경간은 1500mm이다. 폭은 200mm로 일정하며 전단경간비(1.4, 1.7, 2.1)와 보강비(0.38%, 0.51%, 0.64%), 주근의 종류에 따른 실험체를 제작하였다. 뿔힘 및 미끄럼에 의한 파괴를 방지하기 위하여 반력지점에서 양단으로 210mm의 정착길이를 두었으며 피복두께는 40mm로 하였다. 모든 실험체는 전단보강근을 설치하지 않았으며 FRP bar의 파단에 의한 취성파괴를 방지하기 위해 ACI 440.1R-06에서 제시하는 균형보강비 이상으로 보강하였다. 표 3에 실험체 일람을 나타내었다.

2.1 실험 방법

하중재하는 단순지지상태에서 실험체 중앙부에 2점 가력형태로 최대 용량 1,000kN의 정적가력기를 사용하여 실시하였다. 정적가력기에 로드셀을 부착하여 하중을 측정하였고 실험체 중앙 하부에 LVDT를 설치하여 수직 변위를 측정하였다. 콘크리트와 보강근의 변형률은 실험체의 중앙 상부와 하부에 각각 Strain Gage를 부착하여 측정하였으며 이와 관련된 사항은 그림 1에 나타내었다.

표 3 실험체 일람

실험체	변수	a/d	보강비 (%)		
			ρ	ρ_b	ρ_{min}
A3D9-1.4*	a/d	1.4	0.38	0.12	0.12
A3D9-1.7	a/d, ρ	1.7	0.38		
A3D9-2.1	a/d	2.1	0.38		
A4D9-1.7	ρ	1.7	0.51		
A5D9-1.7	ρ , bar	1.7	0.64		
S4D10-1.7	bar	1.7	0.63	2.87	0.32

* 실험체 표기법 - "A3D9-1.4"

A : 보강근 종류 (A-Aramid, S-steel)

3 : 보강근 개수 (3, 4, 5)

D9 : 보강근 지름 (9mm, 10mm)

1.4 : 전단경간비 (1.4, 1.7, 2.1)

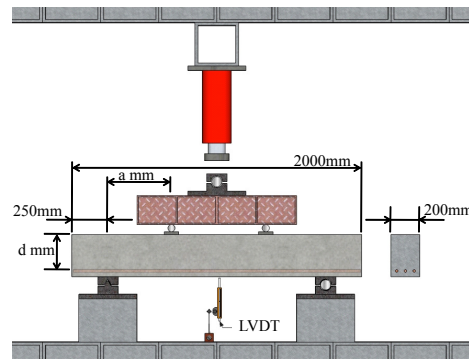


그림 1 실험 셋팅 및 치수

3. 실험결과

3.1 하중-변위 곡선

실험결과는 표 4에, 변수별 하중-처짐 곡선은 그림 2에 나타내었다. 모든 실험체는 초기균열을 기점으로 처짐이 증가하는 것을 알 수 있으며 실험 종료시점에서 AFRP 실험체는 취성, 철근 실험체는 연성 거동하는 것을 알 수 있다. 변수에 따라 보강비와 전단경간비가 각각 증가·감소할수록 실험체에 작용하는 최대하중이

표 4 실험 결과

실험체	실험		최대 변형률, $\mu\epsilon$		파괴 모드	P_{exp}/P_{ACI}	P_{exp}/P_{Neh}	P_{exp}/P_{Raz}	P_{exp}/P_{CSA}	P_{exp}/P_{JSCE}
	하중 (kN)	처짐 (mm)	보강근	콘크리트						
A3D9-1.4	272.1	18.2	8,744	-1,771	SC*	1.04	0.98	1.38	4.35	6.07
A3D9-1.7	198.0	22.7	8,960	-2,121	SC	0.93	0.96	1.39	3.38	4.41
A3D9-2.1	176.0	34.5	12,226	-1,124	SC	1.05	1.41	1.75	3.22	4.90
A4D9-1.7	242.0	26.8	6,588	-2,188	SC	1.09	1.12	1.56	3.75	4.90
A5D9-1.7	267.9	15.9	6,350	-1,747	SC	1.16	1.20	1.62	3.86	5.04
S4D10-1.7	203.0	10.3	36,614	-2,420	SC	1.07	-	-	-	-

* Shear compression failure

증가하며 같은 하중에서 처짐이 감소하는 것으로 나타났다. 보강근의 종류에 따라 상대적으로 인장강도가 큰 AFRP로 보강된 실험체가 철근 실험체보다 최대하중이 높게 측정되었다. 보이론이 적용되는 일반적인 보에서는 보강근의 탄성계수와 보강량이 전단력을 결정하지만 깊은보의 경우에는 보강근의 인장강도가 전단력을 결정하는 중요 인자임을 알 수 있다. 같은 하중에서의 처짐은 탄성계수가 큰 재료로 보강된 실험체 순으로 작게 나타났다. 이는 인장강도의 증가에 따른 최대하중의 증가와는 달리 각 하중에 대응되는 처짐이 주근의 탄성계수에 기인하기 때문인 것으로 사료된다.

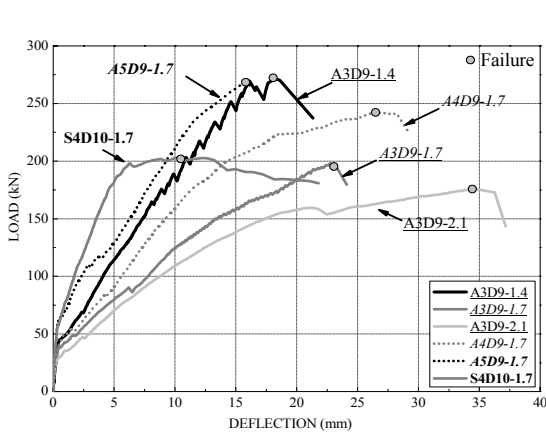


그림 2 하중-처짐 곡선

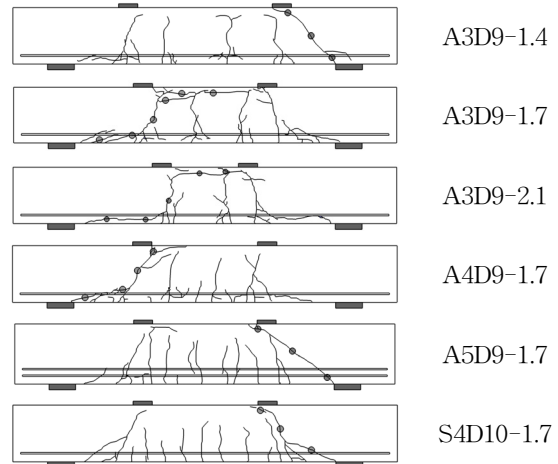


그림 3 균열도

3.2 균열양상

전체적으로 AFRP bar로 보강된 깊은보의 균열양상은 일반보와 유사한 형태로 나타났지만 최대하중 도달 시 가력지점에서의 콘크리트 압괴 현상이 철근 실험체 보다 AFRP 실험체에서 뚜렷하게 나타났다. 모든 실험체의 최종적인 파괴형상은 전단압축파괴(shear compression failure)이며 그림 3에 모든 실험체의 균열도를 나타내었다. 모든 실험체는 보 중앙부근에서 초기균열이 발생하였으며 작용하중이 증가할수록 전단경간에서도 이와 같은 수직균열이 발생되나 하중이 증가할수록 가력지점을 향하여 진전되는 경향을 보였다. 이러한 휨전단균열은 사인장균열 및 반력지점 부근의 균열과 연결되며, 최종적으로 가력지점의 파쇄부분과 함께 전단압축파괴로 이어졌다. 전단경간비와 보강비가 각각 감소·증가할수록 가력지점의 파쇄가 뚜렷하게 나타났으며, 균열 간격은 탄성계수가 큰 철근, AFRP 실험체의 순으로 좁은 것으로 나타났다.

3.3 전단강도 비교·평가

전단강도 산정값을 비교하기 위하여 ACI 318-08, Nehdi et al., CSA S806-02, JSCE, Razaqpur와 Isgor의 제안식을 적용하였으며 표 4에 결과를 나타내었다. 그 결과, ACI 318-08이 실험하중/예상하중의 평균이 1.05, 변동계수가 8.0%로 실험결과와 비교적 근접한 값을 나타내었다. Nehdi et al.의 제안식은 실험하중/예상하중의 평균이 1.14, 변동계수가 16.2%로 아치작용을 고려한 제안식들보다는 정확한 예측결과를 나타내지만 해당 실험 데이터에 국한되어 제안된 식이기 때문에 본 연구에 적용 시 ACI 318-08보다 정확성이 낮은 것으로 나타났다. 아치작용이 고려된 기존 제안식들은 실험체의 전단강도를 과소평가하는 것으로 나타났으며, 이는 제안식에 아치작용과 크기효과를 반영하는 계수가 적용되고 있으나 D영역의 특성이 정확히 반영할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

- 1) AFRP bar로 보강된 콘크리트 깊은보의 전단강도는 전단경간비가 감소하고 보강비가 증가할수록 상승하는 것으로 나타났다. 같은 보강비를 가질 경우, AFRP로 보강된 실험체의 전단강도는 철근으로 보강된 실험체에 비해 약 32% 증가되었으며, AFRP로 보강된 실험체는 철근으로 보강된 실험체와는 달리 취성거동하는 것으로 나타났다.
- 2) ACI 318-08의 스트럿-타이 모델을 적용하여 AFRP bar로 보강된 콘크리트 깊은보의 전단강도를 산정하는 방법이 가장 정확성이 뛰어났다. 전단강도 산정 시 아치작용이 적용된 기존 제안식을 적용할 경우 깊은보의 하중 메커니즘을 반영하기에 한계가 있는 반면 부재 전체의 하중 전달 흐름을 명확하게 시각화해주고 응력집중현상을 반영하는 스트럿-타이 모델을 통한 해석이 적절한 것으로 판단된다.
- 3) 전단강도 상승에 따라 AFRP bar는 깊은보에 적용 가능한 효과적인 보강재라 사료된다. 하지만 AFRP는 인장강도가 높은 반면, 탄성계수가 낮아 처짐 증가를 야기하며 취성적 특성에 따른 급작스런 파괴는 사용성 문제에 있어 해결되어야할 사항인 것으로 판단된다. 향후 FRP bar로 보강된 콘크리트 깊은보의 다양한 실험체에 대한 연구수행과 더불어 사용성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제코드:07도시재생B03)의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- A. Ghani Razaqpur, O. Burkan Isgor (2006) Proposed shear design method for FRP-reinforced concrete members without stirrups, *ACI Structural Journal*, 103(1), 93-102.
- ACI 318-08 (2008) *Building code requirements for structural concrete*, Farmington Hills, Michigan.
- CSA S806-02 (2002) *Design and construction of building components with fibre reinforcement polymers*, Rexdale, Ontario.
- Japan Society of Civil Engineers (1997) *Recommendations for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforced materials*, A. Machida(ed), Tokyo.
- M. Nehdi, Z. Omeman, H. EI-Chabib (2008) Optimal efficiency factor in strut-tie model for FRP-reinforced concrete short beams with $(1.5 < a/d < 2.5)$, *Material and Structure*. 41(10), 1713-1727.