

일반 철근 배근 상세를 갖는 강섬유 보강 콘크리트 연결보의 전단강도 평가

송성희¹, 손동희¹, 배백일², 최창식^{3*}

Shear Strength Evaluation of Steel Fiber Reinforced Concrete Coupling Beams with Conventional Reinforcements Details

Seong-Hwi Song¹, Dong-Hee Son¹, Baek-Il Bae², Chang-Sik Choi^{3*}

Abstract: The purpose of this study is to prevent diagonal tension failure of existing conventional coupling beams, increase the shear strength of conventional coupling beams, and quantitatively evaluate the increase. Steel fibers can improve shear strength and partially change the failure mechanism, but this is the result of research on general RC beams and columns, and research on the shear strength enhancement of conventional coupling beams for steel fiber reinforced concrete is still lacking. Therefore, in order to confirm the increased shear strength caused by steel fiber and the resulting change in failure mechanism, three specimens were fabricated with the steel fiber volume fraction as a variable (0%, 1%, 2%) and repeated loading experiments were performed. As a result, the shear strength of the specimens reinforced with steel fibers (1%, 2%) increased as the shear resistance contribution of concrete increased after the maximum strength was developed compared to the specimens without it (0%).

Keywords: Coupling beam, Steel fiber, Volume fraction, Shear strength

1. 서론

세장비가 작은 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보는 지진하중 및 풍하중과 같은 횡하중이 발생할 경우, 급격한 강도 저하 및 취성 파괴가 발생하게 된다. 1964년, 알래스카 대지진이 발생함에 따라 병렬전단벽에 연결된 세장비가 작은 연결보는 대각 균열이 발생하면서 급격한 파괴가 발생하였다. 대각 균열의 발생 이후, 균열 면에 따라 연결보는 마치 2개의 캔틸레버와 같은 거동을 하게 된다. 이러한 연결보 전체를 가로 지르는 대각 균열의 발생 및 파괴되는 양상을 대각인장파괴(Diagonal Tension Failure)이라고 한다. 연결보는 대각인장파괴가 발생하게 될 경우 충분한 강도발현을 하지 못하고 병렬전단벽과의 일체화 거동이 저하됨에 따라 연성 감소 및 구조물의 사용성이 감소하게 된다.

현행 ACI 318-19에서는 대각 인장파괴를 방지하기 위해 세장비가 2 미만이며, 계수 전단력 비($V_u/b_wd\sqrt{f'_c}$)가 0.33을 초과하는 경우 대각보강근을 사용하도록 명시하고 있다. 대

각보강근을 사용한 연결보는 전단강도, 강성, 에너지소산능력이 우수하며, 대각인장파괴를 방지할 수 있다. 그러나 대각보강근 연결보를 사용할 경우, 대각보강근의 압축에 의한 좌굴을 방지하기 위해 크로스타이 및 횡보강근을 배근하여 구속효과(Confinement effect)를 필연적으로 확보해야한다. 따라서 대각보강근과 크로스타이, 횡보강근을 배근할 경우 서로 간섭이 발생하게 되며, 이에 따라 시공성이 감소하게 된다.

한편 기존연구(Seo et al., 2017)에 따르면 대각보강근을 사용한 연결보는 높은 변형 능력이 필요한 경우에만 사용되며, 그 이외의 경우에는 SMF로 설계된 연결보(대각보강근을 사용하지 않은 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보)를 사용하는 것이 적절하다고 언급하였다. 따라서 높은 변형 능력이 필요하지 않은 건물에서 낮은 세장비를 가지는 연결보의 대각인장파괴를 방지할 경우, 대각보강근 대비 시공성이 우수한 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보를 사용하는 것이 적절하다고 판단된다. Paulay(1971)는 일반 철근 배근 상세를 가진 연결보의 대각인장파괴를 방지하기 위해서는 횡보강근을 통해 전단강도를 확보해야함을 제시하고 있다. 그러나 이는 과배근으로 이어지므로 전단강도를 증진시킬 수 있는 추가 연구가 필요하다.

그러나 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보에 대한 기존 연구는 주로 대각보강근 상세를 가진 연결보와 구조성능을 비교하기 위한 연구가 대다수이며, 충분한 전단강도를 발현시켜

¹정회원, 한양대학교 대학원 건축공학과 박사과정

²정회원, 한양사이버대학교 디지털건축도시공학과 교수

³정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

*Corresponding author: ccs5530@hanyang.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2023년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

대각인장파괴를 방지하는 연구수가 부족한 것이 실정이다.

따라서 본 연구에서는 전단강도의 증진 및 대각인장파괴를 방지하기 위해 강섬유를 사용하여 반복가력실험을 진행하였으며, 본 실험결과를 기반으로 대각인장파괴의 메커니즘과 최종적으로 세장비가 작은 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보의 전단강도를 평가하였다.

2. 강섬유 보강 콘크리트

2.1 강섬유의 혼입률

ACI 544.4R-88 와 ACI 318-19에서는 일반 RC보에 대한 강섬유의 혼입률을 최소 체적비의 0.75%를 제시하고 있으며, 강섬유의 뭉침 현상을 방지하기 위해 강섬유 혼입률을 최대 2%로 제시하고 있다. 또한 Kim et al.(2015)은 강섬유 보강 콘크리트 일반보의 전단강도는 강섬유 혼입률이 1% 이하일 경우 급격히 증가되는 것을 확인 하였으나, 1%를 초과할 경우 전단강도 증진률이 크지 않은 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 강섬유 혼입률에 따른 전단강도 증진 효과를 확인하기 위해 직경 0.5mm, 길이 30mm, 형상비 60인 양단 후크형 타입의 강섬유로 혼입률이 0%인 일반 콘크리트와 혼입률이 각각 1% 및 2%인 실험체를 제작하여 0%인 일반 콘크리트와 비교하였다.

2.2 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도

기존연구에 따르면 강섬유는 콘크리트 압축강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 Arnon and Sidney (1990)은 강섬유 혼입률이 2% 미만인 경우, 콘크리트 압축강도 증진이 크지 않으며, 2% 이상 혼입할 경우 콘크리트 압축강도 증진률은 0%~25%의 증진률을 보인다고 언급하였다. 또한 ACI 544.4R-88에 따르면 강섬유 혼입률은 압축강도 증진에 큰 영향을 미치지 못하며, 연성이 증진되는 것을 확인하였다.

본 연구에서 계획한 강섬유 혼입률에 따른 콘크리트 압축강도를 비교하기 위해 KS F 2405에 따라 직경 100mm, 높이 200mm의 원추형 공시체를 제작하여 재료시험을 수행하였다. 그 결과, 강섬유 혼입률이 0%인 공시체 대비 섬유 혼입률이 1%, 2%인 공시체 모두 압축강도가 감소하는 것을 확인하였다. 재령 3일에서의 압축강도를 비교한 결과, 강섬유 혼입률이 1%인 공시체의 압축강도가 강섬유 혼입률이 2%인 공시체 대비 압축강도가 약 1.04배 높은 것을 확인하였으나, 재령 28일에서의 압축강도를 비교한 결과, 강섬유 혼입률이 2%인 공시체의 압축강도가 강섬유 혼입률이 1%인 공시체 대비 압축강도가 1.09배 높은 것을 확인하였다. 연성을 비교한 결과, 강섬유 혼입률이 증가될수록 최대강도 발현 이후 콘크리트의

Table 1 Concrete compressive strength test results

Day	Specimens	Average Stress (MPa)
3 days	$V_f = 0\%$	26.42
	$V_f = 1\%$	21.66
	$V_f = 2\%$	20.86
28 days	$V_f = 0\%$	52.42
	$V_f = 1\%$	39.62
	$V_f = 2\%$	43.28

연성이 증가되는 것을 확인하였다. 콘크리트 압축강도 재료 시험 결과는 Table 1에 나타내었다.

2.3 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도

Arnon and Sidney(1990)에 따르면 강섬유는 콘크리트의 인장강도 증진 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 Straight 형태의 강섬유를 5% 혼입할 경우, 인장강도가 1.33배 증진된다고 언급하였다. 그러나 섬유의 분산도가 적절하지 않을 경우, 인장강도 증가 정도가 감소할 수 있음을 제시하였다. ACI 544.4R-88에서는 강섬유 형태에 따라 인장강도 증진 및 연성의 차이가 발생하는 것을 언급하였다. 강섬유는 형태에 따라 Straight, Hooked-End, Enlarged-End로 구분되며, 인장강도 및 연성의 증진 정도는 Enlarged-End 형태의 강섬유가 가장 적절하며, Straight 형태의 강섬유가 가장 효율이 낮다.

본 연구에서는 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도 분석을 위해 KS F 2408 및 KS F 2423에 따라 휨인장강도, 조깅인장강도 재료시험을 수행하였다. 두 인장강도 시험은 측정된 최대하중 값을 기반으로 최대 인장강도를 측정하였다. 콘크리트 휨인장강도 재료시험 결과, 강섬유 혼입률이 0%인 공시체 대비 강섬유 혼입률이 1%, 2%인 공시체 모두 휨인장강도가 증가하는 것을 확인하였다. 강섬유 혼입률이 1%인 공시체의 압축강도는 강섬유 혼입률이 0%인 공시체 대비 약 1.1배 증가된 것을 확인하였으며, 강섬유 혼입률이 2%인 공시체의 압축강도는 강섬유 혼입률이 0%인 공시체 대비 약 1.6배 증가된 것을 확인하였다. 콘크리트 조깅인장강도 재료시험 결과, 강섬유 혼입률이 0%인 공시체 대비 강섬유 혼입률이 1%, 2%인 공시체 모두 휨인장강도가 증가하는 것을 확인하였다. 강섬유 혼입률이 1%인 공시체의 압축강도는 강섬유 혼입률이 0%인 공시체 대비 약 1.21배 증가된 것을 확인하였으며, 강섬유 혼입률이 2%인 공시체의 압축강도는 강섬유 혼입률이 0%인 공시체 대비 약 1.31배 증가된 것을 확인하였다. 재료시험 결과, 강섬유 혼입률이 증가될수록 휨인장 및 조깅 인장강도가 증가되는 것을 확인하였다. 휨인장강도 및 조깅인장강도 시험 결과는 Table 2, 3에 나타내었다.

Table 2 Test results of concrete flexural tensile strength

Day	Specimens	Average Stress (MPa)
28 days	$V_f = 0\%$	4.2
	$V_f = 1\%$	4.64
	$V_f = 2\%$	6.85

Table 3 Test results of concrete splitting tensile strength

Day	Specimens	Average Stress (MPa)
28 days	$V_f = 0\%$	4.23
	$V_f = 1\%$	5.13
	$V_f = 2\%$	5.56

3. 실험계획

3.1 실험체 계획

일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보는 세장비가 낮으면서 일정 수준 이상의 계수전단력비가 작용할 경우 적절한 구조성능을 발휘하지 못하므로, 반드시 대각보강근을 사용하여 설계해야 한다. 따라서 본 연구에서는 세장비가 낮으면서 계수전단력비가 일정 수준 이상인 경우 발생하는 전단강도 및

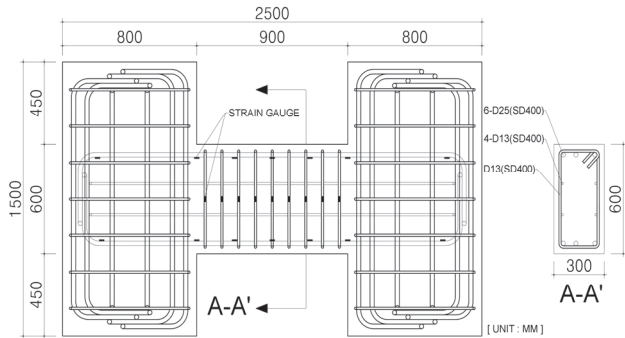


Fig. 1 Conventional coupling beam details

파괴 패턴을 분석하고 강섬유 혼입률이 증가됨에 따라 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보의 전단강도 및 파괴패턴을 분석하고자 한다. 따라서 세장비가 1.5이며 작용하는 계수전단력비는 0.54로 설정하였다. 이를 기반으로 실험체를 현행 설계기준에 따라 설계하였다. 각 실험체 도면은 Fig. 1에 나타내었으며 실험체 상세는 Table 4에 나타내었다.

3.2 가력 계획

본 실험을 수행하기 위해 ACI 374.2R-13을 기반으로 가력 계획을 설정하였다. 가력계획은 변위제어를 기반으로 설정하였으며, 또한 동일 변위를 3번 반복하여 가력하였다.

실험체의 주기는 초기 균열 및 탄성, 소성, 파괴 영역으로 구분할 수 있다. ACI 374.2R-13에서는 전단지배부재의 항복 변위각 (θ_y)을 0.5%~0.75%로 제안하고 있다. 따라서 본 가력 계획에서는 연결보의 항복 변위각을 0.75%로 계획하였다. 또한 항복 이전의 초기 강성 및 균열을 확인하기 위해 항복 변위각을 $1/2\theta_y$, $1/4\theta_y$ 로 구분하여 추가 가력을 계획하였다. ASCE 41-17에서는 내진상세를 가진 연결보의 최대 변위각(θ_u)을 4%로 제안하고 있다. 따라서 8 Drift (4.5%)이후를 파괴 영역으로 계획을 하였다. 이에 대한 모든 가력계획은 Fig. 2에 나타내었다.

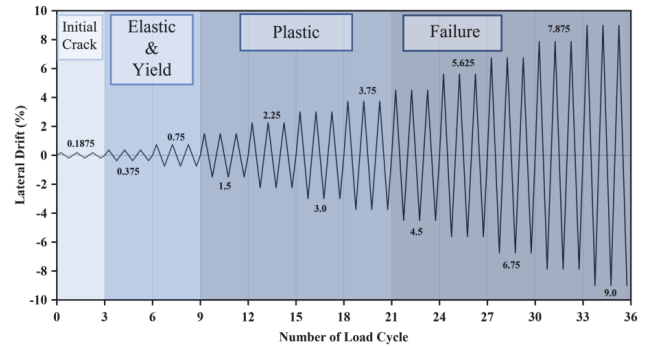


Fig. 2 Loading protocol

Table 4 Dimensions and material properties of specimens

Specimens	b (mm)	d (mm)	h (mm)	l (mm)	a/d	concrete	Longitudinal		Transverse		Steel fiber		
						f_{ck} (MPa)	Rebar	f_y (MPa)	Rebar	f_{yt} (MPa)	l_f (mm)	D_f (mm)	V_f (%)
CCB-Vf0						52.42					-	-	0
CCB-Vf1	300	544	600	900	1.5	39.62	D25	493.9	D13	483.5	30	0.5	1
CCB-Vf2						43.28					30	0.5	2

b: Section width, d: Section depth, h: Height, l: Beam length, a/d: Shear span to depth ratio, f_{ck} : Concrete compression strength, f_y : Longitudinal reinforcement yield strength, f_{yt} : Transverse reinforcement yield strength, l_f : Steel fiber length, D_f : Steel fiber diameter, V_f : Steel fiber volume fraction

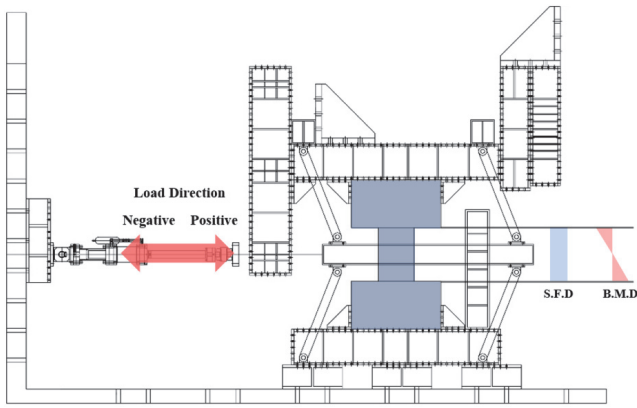


Fig. 3 Test configuration

3.3 실험체 셋팅

횡하중을 받는 연결보는 접합부 구속조건이 고정단이므로, 복곡률(Double Curvature)이 발생하게 된다. 그러나 연결보 실험체를 수평 방향으로 셋팅하여 복곡률을 모사하는 것은 어려움이 있으므로, 본 실험에서는 연결보 실험체를 수직으로 셋팅하여 반복가력실험을 수행하였다. 사용된 액츄에이터(Actuator)의 용량은 2,000kN이며, 상·하부 베이스는 볼트 고정을 통해 고정단을 모사하였다. 또한 추가로 현치를 베이스 양 옆에 배치하여 베이스를 고정하였다. 실험체 셋팅은 Fig. 3에 나타내었다.

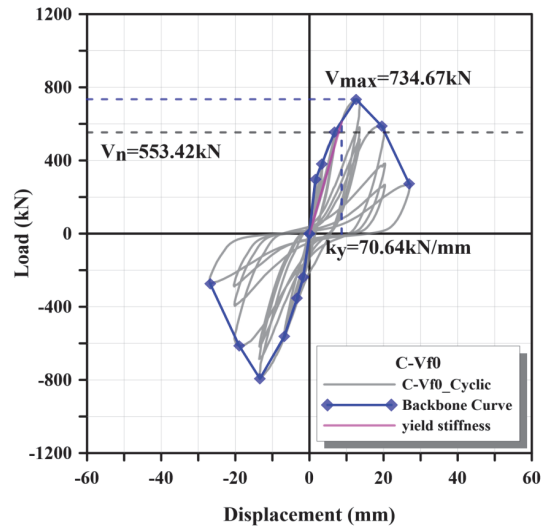
4. 실험 결과

4.1 하중-변위 관계

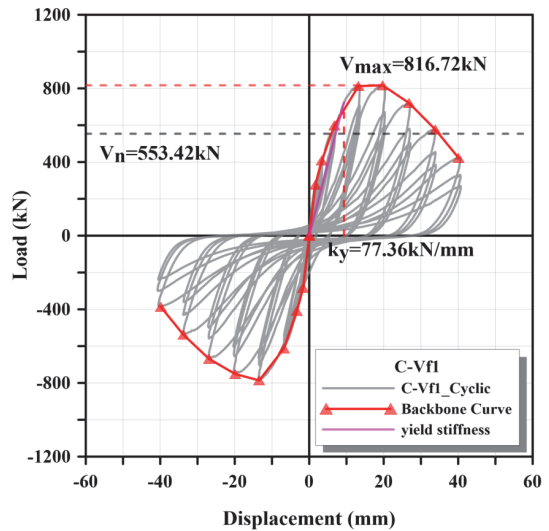
기준 실험체인 CCB-Vf0 실험체의 경우 변위각 0.97% (8.69mm)에서 항복을 경험하였으며 이때 하중은 613.83kN으로 나타났다. 이에 따른 실험체의 초기강성은 70.64kN/mm로 확인하였다. 변위각 1.4%(12.63mm)에서 최대강도를 경험한 후 실험을 종료하였다. 극한하중상태는 587.74kN이었으며 변위각은 2.17%(19.56mm)로 나타났다.

기준 실험체 대비 강섬유 혼입률이 1%인 CCB-Vf1 실험체의 경우 변위각 1.04%(9.35mm)에서 항복을 경험하였으며 이때 하중은 723.35kN으로 나타났다. 실험체의 초기강성은 기준 실험체인 CCB-Vf0과 비교하였을 때 약 9.5% 증가함을 확인하였다. 변위각 2.19%(19.72mm)에서 최대강도 816.72kN을 나타내었으며 2 Cycle에서 급격한 강도저하가 나타났다. 극한하중상태는 653.38kN이었으며 변위각은 3.34%(30.1mm)로 나타났다.

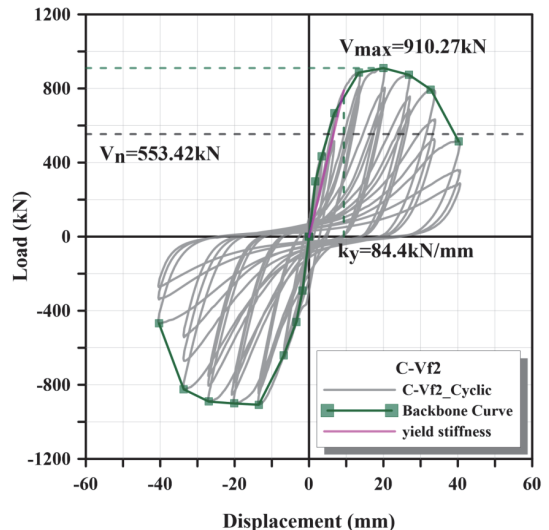
강섬유 혼입률이 2%인 CCB-Vf2 실험체의 경우 변위각 1.04%(9.36mm)에서 항복을 경험하였으며 이때 하중은 790.00kN으로 나타났다. 실험체의 초기강성은 기준 실험체



(a) CCB-Vf0



(b) CCB-Vf1



(c) CCB-Vf2

Fig. 4 Load-displacement curve

Table 5 Test result

Specimens	Yield point				Maximum load			Ultimate load ($0.8 \times P_{max}$)			
	Drift Ratio (%)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	k_y (kN/mm)	Drift Ratio (%)	P_{max} (kN)	Δ_{max} (mm)	Drift Ratio (%)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	μ (Δ_u / Δ_y)
CCB-Vf0	0.97	613.83	8.69	70.64	1.40	734.67	12.63	2.17	587.74	19.56	2.25
CCB-Vf1	1.04	723.35	9.35	77.36	2.19	816.72	19.72	3.34	653.38	30.10	3.22
CCB-Vf2	1.04	790.00	9.36	84.40	2.22	910.27	19.98	3.83	728.22	34.47	3.68

P_y : experiment load at yield state, Δ_y : experiment displacement at yield state, k_y : stiffness at yield state, P_{max} : experiment load at maximum load state, Δ_{max} : experiment displacement at maximum load state, P_u : experiment load at ultimate state, Δ_u : experiment displacement at ultimate state μ : displacement-ductility ratio

인 CCB-Vf0과 비교하였을 때 약 19.5% 증가하였으며 1% 실험체와 비교하였을 때 약 9.1% 증가함을 확인하였다. 변위각 2.22%(19.98mm) 에서 최대강도 910.27kN을 나타내었으며 2 cycle 에서 급격한 강도저하가 발생하였다. 극한하중 상태는 728.22kN이었으며 이때 변위각은 3.83%(34.47mm)로 나타났다. 모든 실험체의 실험 결과 그래프는 Fig. 4에 나타내었으며 실험 결과는 Table 5에 정리하였다.

각 실험체의 강도 변화 및 연성능력을 확인하기 위해 사이클 별 최대하중을 Fig. 4에 표현하였다. 최대 강도 비교 시 기준 실험체인 CCB-Vf0 대비 CCB-Vf1, CCB-Vf2가 각각 1.11배, 1.24배 높은 최대강도를 확인하였다. 이에 따라 강섬유 혼입률이 증가할수록 연결보의 최대강도가 증가하는 것으로 판단된다. 변위각 연성비의 경우 기준 실험체인 CCB-Vf0 대비 CCB-Vf1, CCB-Vf2가 각각 1.48배, 1.64배 높은 것으로 확인되었다.

4.2 실험체별 주인장철근 변형률과 파괴패턴

세장비가 작은 연결보는 하중을 받게 되면 초기에는 휨균열이 발생하게 된다. 이때 주인장철근의 변형률은 큰 증가 없이 일부 변형률만 발생하게 된다. 그러나 일정 이상의 하중이 가해지면, 대각 균열이 발생하게 된다. 이후 연결보 전체를 가로지르는 주 균열(Main crack)인 대각 균열이 발생한다. 대각 균열의 발생과 함께, 연결보는 균열면을 따라 균열의 확장 및 캔틸레버와 같이 2개로 나뉘어 거동을 하게 되는데, 이때 주인장철근은 장부작용으로 인해 변형률이 크게 증가된다. 이러한 파괴 패턴을 대각인장파괴라고 한다. Paulay(1971)는 이러한 균열 패턴은 전단파괴 메커니즘이 주 대각 균열(Major diagonal crack)과 연관이 있으며 연결보가 두 개로 나뉘어 거동을 한다고 언급하였다. 따라서 주 대각 균열이 발생하는 시점에서 주인장철근의 변형률을 확인해야 한다. 또한 대각인장파괴가 발생할 경우, 충분한 강도 발현과 연성의 확보가 어려우므로, 해당 파괴를 피해야함을 언급하고 있다. 따라서 본 연구에서는 연결보 실험체의 Drift 별 균열 양상을 분석하여

연결보 실험체 전체를 가로지르는 주 대각 균열의 발생 시점을 확인하였다. 주 대각 균열이 발생한 시점에서의 접합부 위치에 부착한 철근 게이지를 확인하여 이전 Drift 대비 철근 변형률을 비교 및 분석하여 Fig. 5에 나타내었다.

CCB-Vf0 실험체의 경우, 1 Drift에서 휨균열이 발생하였으며, 2~3 Drift에서 대각 균열이 발생하기 시작했다. 이후 4 Drift에서 연결보 전체를 가로지르는 대각 균열이 발생한 것을 확인하였다. 따라서 주인장철근의 장부작용을 확인하기 위해 4 Drift 이전인 1~3 Drift 시점에서의 주인장철근 변형률이 66%가 증가하였다. 이는 실제 주인장철근의 장부작용이 발생한 것으로 판단된다. 4 Drift 이후 대각 균열의 확장 및 최종파괴양상에서 대각인장파괴가 발생한 것을 확인하였다.

CCB-Vf1 실험체의 경우, 1 Drift에서 휨균열이 발생하였으며, 2~3 Drift에서 대각 균열이 발생하기 시작했다. 마찬가지로 4 Drift에서 대각 균열이 발생하였으나, 실험체 전체를 가로지르는 대각균열이 아닌 것을 확인하였다. 또한 4 Drift 이전인 1~3 Drift 시점에서 주인장철근의 변형률이 15%가 증가하였다. 4 Drift 이후 대각 균열이 확장되는 것을 확인하였으나, 강섬유의 가교작용으로 인해 균열이 다수 발생하였으며 추가로 2개의 X 형태 균열이 발생한 것을 확인하였다.

CCB-Vf2 실험체의 경우, 1 Drift에서 휨균열이 발생하였으며, 2~3 Drift에서 대각 균열이 발생하기 시작했다. 4 Drift 이전인 1~3 Drift 시점에서의 주인장철근 변형률이 22%가 증가하였다. 연결보 전체를 가로지르는 대각 균열은 발생하지 않았다. 강섬유의 가교작용으로 인해 균열이 다수 발생하였으며 추가로 2개의 X 형태 균열이 발생한 것을 확인하였다.

4 Drift 이후 실험체 단부 주철근의 최종 변형률을 비교한 결과, CCB-Vf0 실험체 대비 CCB-Vf1과 CCB-Vf2의 변형률이 각각 12.4%, 27.4% 낮았다. 이는 강섬유의 가교작용으로 인해 콘크리트의 전단저항 기여분이 증가함과 동시에 주철근의 장부작용으로 인한 전단저항 기여분이 작아진 것으로 판단된다.

5. 연결보의 전단강도 기여분 평가

5.1 최대강도 발현 시 횡보강근의 변형률

각 실험체의 요소별 전단강도를 분석하기 위해서는 먼저 횡보강근의 변형률을 확인해야 한다. 따라서 Drift 별 횡보강근 TG 1~9의 변형률을 확인하여 최대강도 발현 시점에서 항복여부를 분석하였다. 해당 그림은 Fig. 6에 나타내었다.

CCB-Vf0 실험체의 Drift 별 횡보강근 변형률을 확인한 결과, 최대강도 발현 시점인 4 Drift에서 TG 3, 4, 5, 6 철근이 항복한 것으로 나타났다. TG 7의 경우 철근에 부착된 게이지 값이 측정 불능으로 값을 표현하지 못하였으나, 실험체 배근 상세가 대칭이며, 모멘트와 전단력이 대칭으로 작용하는 점을 고려하여 대칭점인 TG 3이 항복하였으므로, TG 7 또한 항복하였다고 가정하였다. 따라서 최대강도 발현 시점에서 항복한 철근은 총 5개로 확인되었다.

CCB-Vf1 실험체의 Drift 별 횡보강근 변형률을 확인한 결과, 최대강도 발현 시점인 5 Drift에서 TG 3, 4, 5, 6, 7 철근이

항복한 것으로 나타났다. 따라서 최대강도 발현 시점에서 항복한 철근은 총 5개로 확인되었다. CCB-Vf0 실험체의 경우 중앙에 배근된 TG 5의 변형률이 가장 큰 것을 확인하였으나, CCB-Vf1 실험체의 경우, TG 5의 변형률이 감소되었으며, TG 4, TG 6의 변형률이 크게 증가된 것을 확인하였다. 이는 파괴 메커니즘이 변화됨에 따라 횡보강근 게이지에 변형률 양상이 변화된 것으로 판단된다.

CCB-Vf2 실험체의 Drift 별 횡보강근 변형률을 확인한 결과, 최대강도 발현 시점인 5 Drift에서 TG 2, 3, 4, 6, 7 철근이 항복한 것으로 나타났다. TG 8의 경우 철근에 부착된 게이지 값이 측정 불능으로 값을 표현하지 못하였으나, 실험체 배근 상세가 대칭이며, 모멘트와 전단력이 대칭으로 작용하는 점을 고려하여 대칭점인 TG 2이 항복하였으므로, TG 8 또한 항복하였다고 가정하였다. 따라서 최대강도 발현 시점에서 항복한 철근은 총 6개로 확인되었다. CCB-Vf1 실험체와 마찬가지로 CCB-Vf0 실험체 대비 TG 5의 변형률이 감소하였으며, 변형률 양상이 CCB-Vf1 실험체와 비슷한 것을 확인하였다.

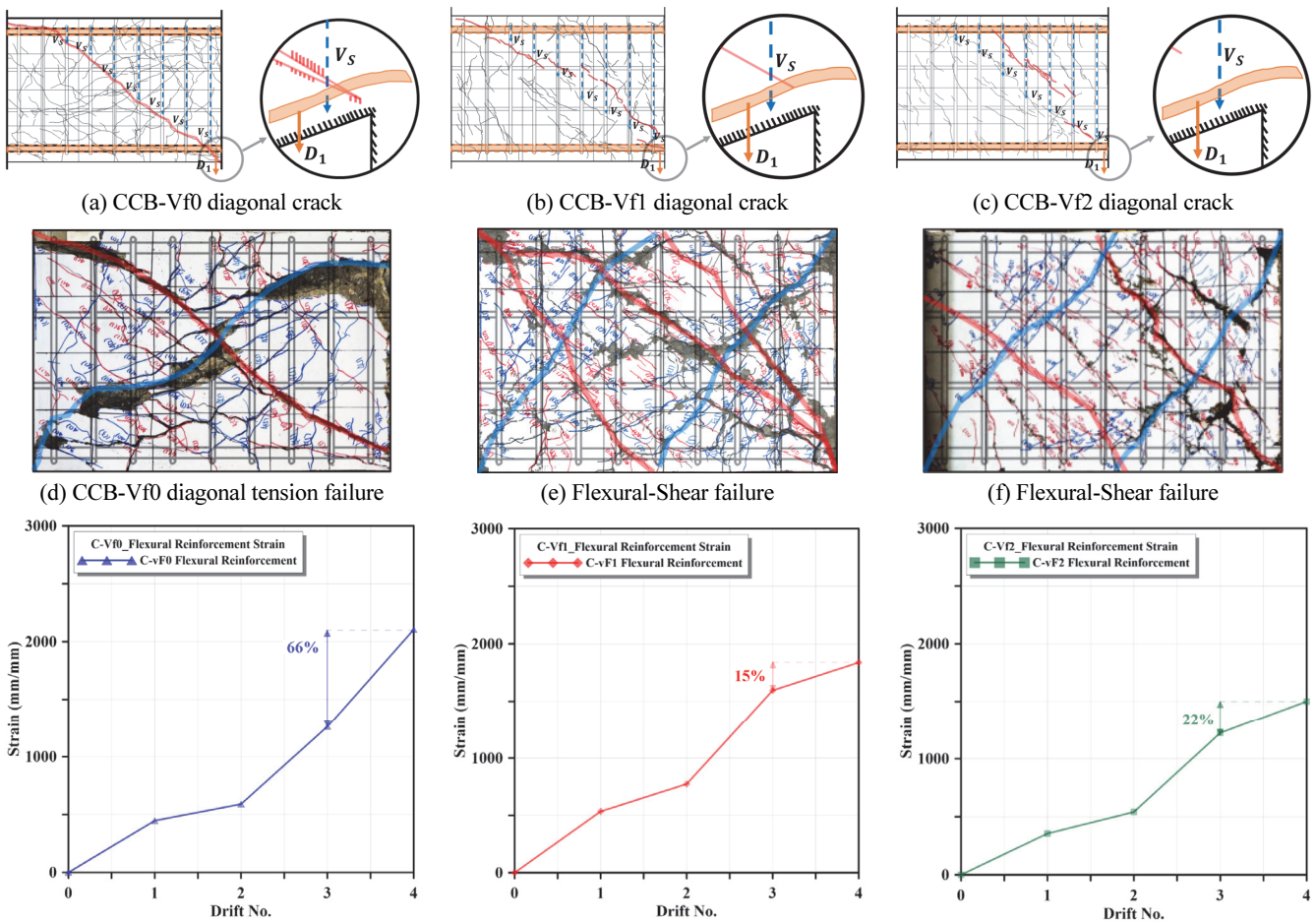
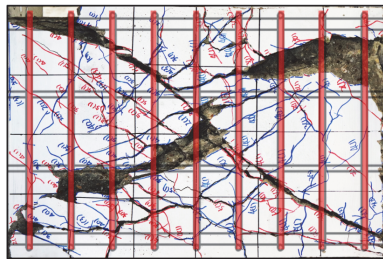


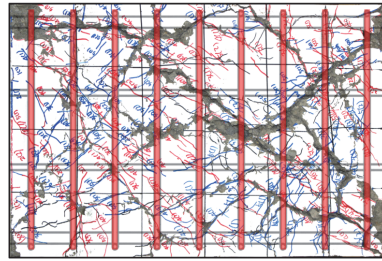
Fig. 5 Crack pattern and reinforcement strain

TG1 TG2 TG3 TG4 TG5 TG6 TG7 TG8 TG9



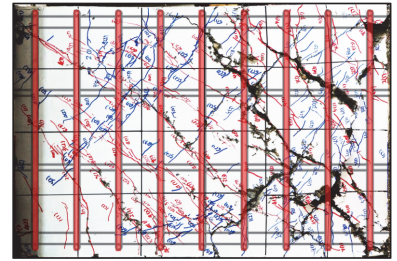
(a) CCB-Vf0 at failure

TG1 TG2 TG3 TG4 TG5 TG6 TG7 TG8 TG9

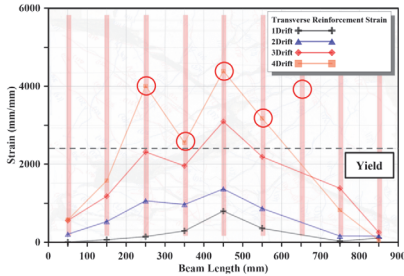


(b) CCB-Vf1 at failure

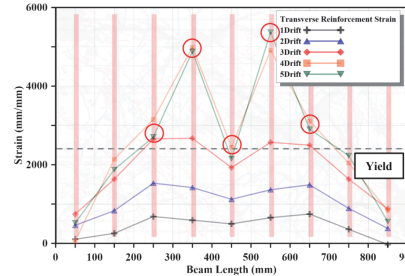
TG1 TG2 TG3 TG4 TG5 TG6 TG7 TG8 TG9



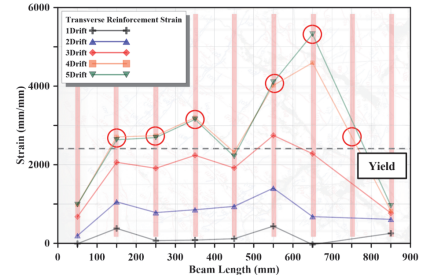
(c) CCB-Vf2 at failure



(d) CCB-Vf0 transverse reinforcement strain



(e) CCB-Vf1 transverse reinforcement strain



(f) CCB-Vf2 transverse reinforcement strain

Fig. 6 Transverse reinforcement strain

5.2 횡보강근 및 콘크리트 전단강도 기여분

Paulay(1971)에 따르면, 횡하중을 받는 일반 철근 배근 상 세로 설계된 연결보는 횡보강근의 전단강도가 지배적이라고 언급하였다. 이를 확인하기 위해 최대강도 발현 시, 항복한 횡 보강근을 기반으로 콘크리트에 의한 전단강도 및 횡보강근에 의한 전단강도를 비교하였다. 철근의 전단강도는 아래 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = nA_s f_{yt} \quad (1)$$

여기서 V_s 는 횡보강근의 전단기여분이며 n 은 항복한 철근의 개수, A_s 는 횡보강근의 단면적, f_{yt} 는 횡보강철근의 항복강도 이다. 일반콘크리트의 전단기여분(V_c)은 CCB-Vf0 실험체의 최대강도에서 횡보강 철근의 전단기여분을 제외하여 나타낼 수 있다. 강섬유 보강 콘크리트 연결보의 전단강도에서 강섬 유에 의한 전단기여분(V_f)은 각 실험체의 최대강도에서 일반

콘크리트의 및 횡보강근의 전단기여분을 제외하여 평가할 수 있다. 항복한 횡보강근의 개수 및 이를 기반으로 한 강섬유 보 강 콘크리트의 전단기여분을 Table 6에 나타내었으며 각 실험 체의 Drift 별 전단기여분은 Fig. 7에 나타내었다.

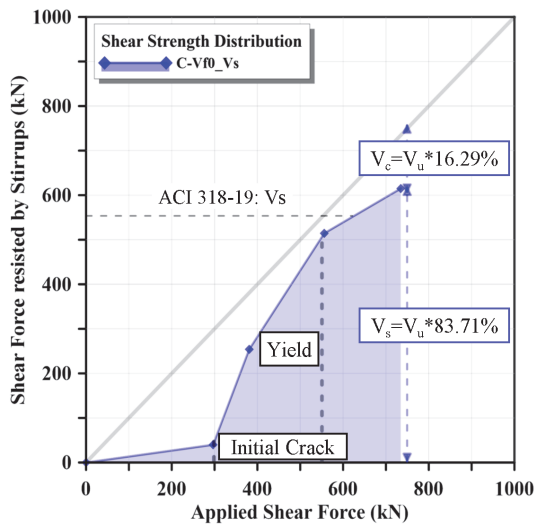
CCB-Vf0 실험체의 경우, 초기 균열 발생 이전에는 주로 콘 크리트에 의한 전단저항 기여분이 높은 것을 확인하였다. 이 후 1 Drift에 초기 균열이 발생하면서 콘크리트에 의한 전단저 항 기여분의 감소 및 횡보강근에 의한 전단저항 기여분이 증 가되는 것을 확인하였다. 최대강도 발현 시점에서 항복한 횡 보강근의 개수는 5개 이므로, 철근 재료시험을 기반으로 횡보 강근에 의한 전단강도는 614.96kN으로 확인하였으며, 이는 CCB-Vf0 실험체의 전단강도 중 83.71%를 차지한 것을 확인 하였다. 따라서 콘크리트에 의한 전단저항 기여분은 16.29% 인 것을 확인하였다.

CCB-Vf1 실험체의 경우, 초기 균열 발생 이전에는 주로 콘 크리트에 의한 전단저항 기여분이 높은 것을 확인하였다. 이

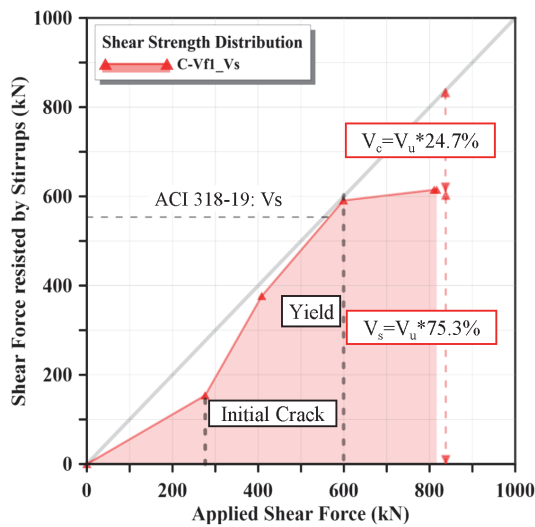
Table 6 Shear strength of specimens

Specimens	V_u (kN)	n (EA)	V_s (kN)	V_c (kN)	V_f (kN)
CCB-Vf0	734.67	5	614.96		0
CCB-Vf1	816.72	5	614.96	119.71	82.05
CCB-Vf2	910.27	6	728.73		61.83

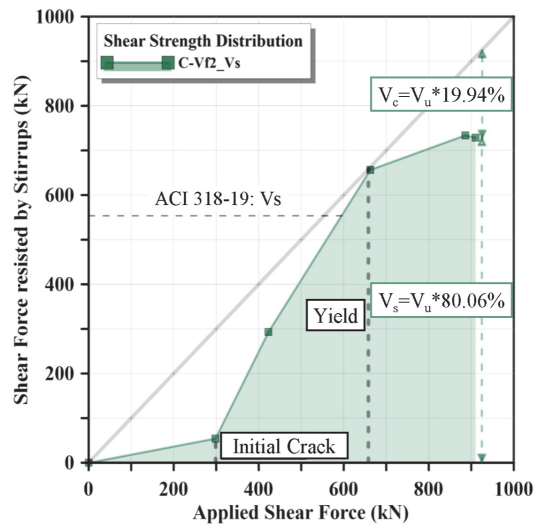
V_u : maximum shear strength, n : number of yield transverse reinforcement, V_s : shear strength by transverse reinforcement, V_c : shear strength by concrete ($V_{u,CCB-Vf0} - V_{s,CCB-Vf0}$), V_f : shear strength by steel fiber



(a) CCB-Vf0



(b) CCB-Vf1



(c) CCB-Vf2

Fig. 7 Shear strength carried by stirrup and concrete

후 1 Drift에 초기 균열이 발생하면서 콘크리트에 의한 전단저항 기여분의 감소 및 횡보강근에 의한 전단저항 기여분이 증가되는 것을 확인하였다. 최대강도 발현 시점에서 항복한 횡보강근의 개수는 5개 이므로, 철근 재료시험을 기반으로 횡보강근에 의한 전단강도는 614.96kN으로 확인하였으며, 이는 CCB-Vf1 실험체의 전단강도 중 75.3%를 차지한 것을 확인하였다. 따라서 콘크리트에 의한 전단저항 기여분은 24.7%인 것을 확인하였다. 따라서 C-Vf0 실험체 대비 콘크리트에 의한 전단저항 기여분이 증가되었으며 이는 강섬유에 의해 콘크리트 전단강도가 증가된 것으로 판단된다.

CCB-Vf2 실험체의 경우, 최대강도 발현 시점에서 항복한 횡보강근의 개수는 6개 이므로, 철근 재료시험을 기반으로 횡보강근에 의한 전단강도는 728.73kN으로 확인하였으며, 이는 CCB-Vf2 실험체의 전단강도 중 80.06%를 차지한 것을 확인하였다. 따라서 콘크리트에 의한 전단저항 기여분은 19.94%인 것을 확인하였다. CCB-Vf0 실험체 대비 콘크리트에 의한 전단저항 기여분이 증가되었으며 항복한 횡보강근의 개수가 증가된 것을 확인하였다. 이를 통해 강섬유는 콘크리트의 전단강도 증진뿐만 아니라 횡보강근 항복에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 세장비가 작은 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보에 강섬유 혼입률에 따른 전단강도를 평가하기 위해 3개의 연결보 실험체에 대한 반복가력실험을 수행하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 모든 실험체는 계수전단력비 0.33을 초과하여 강도를 발현하였다. 그러나 강섬유 혼입률이 0%인 C-Vf0 실험체는 최대강도 발현 이후 강도가 급격하게 감소하였으며, 대각인장파괴가 발생하였다. 강섬유 혼입률이 각각 1%, 2%인 C-Vf1 및 C-Vf2 실험체는 최대강도 발현 이후 C-Vf0 실험체 대비 연성이 증가되면서 하중 감소 정도가 완화된 것을 확인하였다. 이는 강섬유의 가교작용으로 인한 연성 증진으로 판단된다.
2. 현행기준에서는 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보의 전단강도를 횡보강근에 의한 전단강도만을 고려하고 있다. 그러나 실험결과 연결보는 횡보강근 뿐만 아니라 콘크리트에 의한 전단강도가 발현하는 것을 확인하였다.
3. 최대강도 발현시의 횡보강근 변형률을 확인한 결과, 항복한 횡보강근의 개수는 C-Vf0, C-Vf1, C-Vf2 각각 5, 5, 6개로 확인되었다. 이를 기반으로 실험체의 전단강도 분석 결과, C-Vf0 대비 C-Vf1, C-Vf2 실험체 모두 최대강도 발현 시, 콘크리트의 전단강도 기여분이 증가되는 것

을 확인하였다. 또한 콘크리트의 전단강도에는 강섬유에 의한 전단강도 기여분이 포함된 것으로 판단된다. C-VI2 실험체의 경우 강섬유의 전단강도 기여분은 C-Vf1 대비 감소하였으나 항복한 횡보강근 개수가 증가되어 최종적으로 전단강도가 증진되었다.

4. 강섬유 보강 철근콘크리트 연결보의 전단기여분을 평가한 결과, 강섬유가 콘크리트 및 철근 전단기여분을 변화시켜 대각인장파괴가 아닌 휨-전단파괴가 발생하게 된다. 따라서 일반 철근 배근 상세로 설계된 연결보에 강섬유를 혼입할 경우 부재의 전단강도 증진 및 급격한 취성 파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.
5. 본 연구에서는 세장비가 작고 계수전단력비가 큰 실험체를 대상으로 실험을 수행하였다. 추후 연구에서는 다양한 세장비와 철근상세에 따른 연결보의 전단강도 평가가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부) 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(과제번호: NRF-2020R1A4A1019 074).

References

1. ACI 318-19. (2019), Building code requirement for structural concrete and commentary, ACI Committee 318, American Concrete Institute.
2. ACI 374.2R-13. (2013), Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic load, ACI Committee 374, American concrete Institute.
3. ACI 544.4R-88. (2017), Design considerations for steel fiber reinforced concrete, ACI Committee 544, American Concrete Institute.
4. Architectural Institute of Korea. (2016), Korean building code and commentary, Architectural Institute of Korea. (in Korean).

5. Arnon, B., and Sidney, M. (1990), Fibre Reinforced Cementitious Composites, Taylor & Francis.
6. ASCE 41-17. (2017), Seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings. Proceedings of the SEAOC.
7. Cai, G., Zhao, J., Degée, H., and Vandoren, B. (2016), Shear capacity of steel fibre reinforced concrete coupling beams using conventional reinforcements, *Engineering Structures*, 128, 428-440.
8. Chung, J. H., Son, D. H., Kim, S. Y., Bae, B. I., and Choi, C. S. (2020), Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Coupling Beams According to Volume Fraction of Steel Fiber, *Sustainability*, 13(1), 182.
9. Zhao, J., Li, K., Shen, F., Zhang, X., and Si, C. (2018), An analytical approach to predict shear capacity of steel fiber reinforced concrete coupling beams with small span-depth ratio, *Engineering Structures*, 171, 348-361.
10. Kim, C. G., Park, H. G., Hong, G. H., and Kang, S. M. (2015), Evaluation on Shear Contribution of Steel Fiber Reinforced Concrete in Place of Minimum Shear Reinforcement, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(6), 603-613. (in Korean).
11. KS F 2405. (2014), Standard test method for compressive strength of concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 1-16. (in Korean).
12. KS F 2408. (2016), Method of test for flexural strength of concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 1-16. (in Korean).
13. KS F 2423. (2016), Method of test for splitting tensile strength of concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 1-12. (in Korean).
14. Paulay, T. (1971), Coupling Beams of Reinforced Concrete Shear Walls, *Journal of the Structural Division*, 97(3), 843-862.
15. Seo, S. Y., Yun, H. D., and Chun, Y. S. (2017), Hysteretic Behavior of Conventionally Reinforced Concrete Coupling Beams in Reinforced Concrete Coupled Shear Wall. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11, 599-616.
16. Kim, K. H. (2021), Shear strength Evaluation According to Steel Fiber Volume Fraction of Reinforced Concrete Conventional Coupling Beams, Master's thesis, Hanyang university. (in Korean).

Received : 11/07/2022
 Revised : 01/05/2023
 Accepted : 01/05/2023

요 지 : 본 연구의 목적은 기존 연결보의 사인장 파괴를 방지하고 연결보의 전단강도를 증가시키며 증가분을 정량적으로 평가하는 것이다. 강섬유는 전단강도를 향상시키고 파괴 메커니즘을 부분적으로 변화시킬 수 있지만 이는 일반적인 RC보와 기둥에 대한 연구결과이며, 강섬유 보강콘크리트에 대한 연결보의 전단강도 증진에 대한 연구는 아직까지 부족한 실정이다. 따라서, 강섬유에 의한 증가된 전단강도와 이에 따른 파괴 메커니즘 변화를 확인하기 위해 강섬유의 혼입률을 변수(0%, 1%, 2%)로 세 개의 실험체를 제작하여 반복가력 실험을 수행하였다. 그 결과, 강섬유를 보강한 실험체(1%, 2%)가 그렇지 않은 실험체(0%) 대비 최대강도 발현 후 콘크리트의 전단저항 기여분이 증가됨에 따라 전단강도가 증진되었다.

핵심용어 : 연결보, 강섬유, 혼입률, 전단강도