



정모멘트와 부모멘트를 받는 프리캐스트 콘크리트 합성보의 전단강도에 대한 실험적 연구

박연주¹⁾ · 이문석²⁾ · 배백일³⁾ · 최현기⁴⁾ · 최창식^{5)*}

¹⁾한양대학교 건축공학과 석사과정 ²⁾한양대학교 건축공학과 박사과정 ³⁾한양사이버대학교 디지털건축도시공학과 교수

⁴⁾경남대학교 소방안전공학과 교수 ⁵⁾한양대학교 건축공학부 교수

Experimental Study on the Shear Strength of Precast Concrete Composite Beams Subjected to Positive and Negative Moments

Yeon-ju Park,¹⁾ Moon-seok Lee,²⁾ Beak-Il Bea,³⁾ Hyun-Ki Choi,⁴⁾ and Chang-Sik Choi^{5)*}

¹⁾Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

²⁾Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

³⁾Professor, Department of Digital Architectural and Urban Engineering, Hanyang Cyber University, Seoul 04763, Rep. of Korea

⁴⁾Professor, Department of Fire Safety Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Rep. of Korea

⁵⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

ABSTRACT This study experimentally analyzed the impact of shear reinforcement ratio and positive/negative bending moments on the shear strength of precast (PC) and cast-in-place (CIP) concrete composite beams. The shear performance of composite beams with separate casting was evaluated using eight specimens with identical reinforcement layouts: four monolithically cast, and four separately cast. All specimens were designed to induce vertical shear failure by having high longitudinal reinforcement ratios and high horizontal shear strengths. The experiments were conducted using 4-point loading to assess the effect of the shear reinforcement ratio on the vertical shear strength of the PC and CIP concrete composite beams. The results showed that among the separately cast specimens, the specimen under negative moment with lower transverse reinforcement ratio had higher shear strength compared to the specimen under positive moment. The moment direction influenced the shear deformation and crack patterns. Additionally, the experimental results were compared with current design codes to evaluate shear performance.

Keywords : precast concrete, composite beam, positive moments, negative moments

1. 서 론

현재 경제성, 구조 성능, 시공성 등을 향상시키기 위해 프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete, 이하 PC)와 현장 타설 콘크리트(Cast-in-Place Concrete, 이하 CIP)를 합성하는 공법이 널리 사용되고 있으며, 이러한 합성공법은 시공의 효율성을 높이고, 비용을 절감할 수 있다. PC와 CIP의 구조적 일체성을 확보하는 것이 중요하고 두 가지의 콘크리트 강도, 탄성계수 등이 상이함에 따라 PC-CIP 합성보의 전단강도를 평가하는 연구가 중요하다.

실제 시공 현장에서 사용되는 PC와 CIP의 합성 부재는 정모

멘트와 부모멘트를 함께 받게 된다. 정모멘트의 경우 PC와 CIP의 계면이 압축측에 위치하게 되고, 부모멘트의 경우 PC와 CIP의 계면이 인장측에 위치하게 된다. 따라서 PC 합성보는 정모멘트와 부모멘트에 따라 압축을 받는 콘크리트의 강도가 달라지며, 부모멘트를 받는 부재는 정모멘트와 다른 전단 거동과 전단 변형을 보인다. 이는 전단강도 평가와 PC와 CIP의 합성보가 구조적으로 일체성을 유지하는 데 있어 고려되어야 한다.

Rueda-Garcia et al.(2021)은 콘크리트 합성보의 PC-CIP 강도 차이를 고려한 전단 저항 메커니즘을 제시하였다. 이 연구에 따르면, 합성보의 계면을 따라 사인장 균열이 발생하여 일체 타설 및 분리 타설 보의 균열 패턴이 달라지게 되고 또한, PC와 CIP 콘크리트의 압축 강도가 유사한 합성보의 경우 계면이 부재의 전단 강도에 변화를 주지 않는다고 언급하였다. Kim et al.(2013)과 Kim et al.(2014)은 전단철근량, 분리타설 여부, 분리 타설된 콘크리트 깊이 등에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서

*Corresponding author E-mail : ccs5530@hanyang.ac.kr

Received June 18, 2024, Revised August 04, 2024,

Accepted August 08, 2024

©2024 by Korea Concrete Institute

는 전단철근의 기여도는 전단경간비와 압축대의 깊이에 영향을 받았으며, 압축대에 고강도 콘크리트를 사용한 경우 전단강도가 증가하였다. 이와 같이 현재 기존 연구에서는 PC 합성보의 전단 철근비, 전단경간비, 콘크리트 압축 강도에 따른 전단강도를 평가하는 연구가 주로 이루어졌다.

따라서, 본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트와 현장타설 콘크리트 합성보의 모멘트 방향에 따라 달라지는 전단강도를 평가하기 위해 균열 패턴과 압축측 콘크리트 강도 및 전단철근량이 전단강도에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

2. 실험체 계획

현행 KDS 14 20 22(KCI 2021)에서는 전단력과 휨모멘트가 작용하는 부재의 수직전단강도를 다음 식 (1)을 통해 계산하도록 규정하고 있다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

여기서 V_c 는 콘크리트의 전단기여분이며, 식 (2)와 (3)으로 산정한다.

$$V_c = \frac{1}{6} \lambda \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (2)$$

$$V_c = \left(0.16 \lambda \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (3)$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트 설계기준 압축강도, b_w 는 복부의 폭, d 는 압축콘크리트 연단에서 종방향 인장철근의 중심까지의 거리, ρ_w 는 인장철근비 V_u 와 M_u 는 각각 하중에 의해 발생하는 계수전단력과 계수 모멘트이다. 콘크리트 수직전단강도 V_c 의 값은 $0.29 \lambda \sqrt{f_{ck}} b_w d$ 를 초과할 수 없고, $V_u d / M_u$ 의 값은 1.0을 초과할 수 없다. 전단철근에 의한 전단강도는 식 (4)와 같다.

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (4)$$

여기서, A_v 는 간격 s 내의 횡인장철근에 수직한 전단철근의 단면적, mm^2 , f_{yt} 는 횡방향 철근의 설계기준항복강도, MPa이다.

수평전단강도는 다음과 같이 계산한다. 최소 전단연결재가 있으며 접촉면이 청결하고 부유물이 없으며 표면이 약 6 mm 깊이로 거칠게 만들어진 경우, 공칭수평전단강도는 식 (5)로 산정한다.

$$V_{nh} = (1.8 + 0.6 \rho_v f_y) \lambda b_v d \quad (5)$$

공칭수평전단강도는 $3.5 b_v d$ 보다 크게 취할 수 없다. λ 는 경량 콘크리트 계수이며, ρ_v 는 $A_v / (b_v s)$ 이다.

기존 연구 및 KDS 14 20 22에서 확인할 수 있는 바와 같이, 콘크리트 합성보의 수직 및 수평 전단강도는 콘크리트의 설계기준 압축강도, 그리고 전단철근 배치 간격에 영향을 받는다. 이에 따라 본 연구에서는 합성보 설계에 대해 전단철근량에 따른 전단능력과 구조적 일체성을 평가하기 위해 PC 합성보의 전단거동을 일체 타설된 RC 보와 비교하였다. 또한, 분리 타설된 콘크리트 합성보의 정모멘트와 부모멘트의 영향 및 전단철근량에 따른 전단능력을 평가하기 위해 단순 지지된 8개 보의 실험을 계획하였다. 주요 실험 변수는 전단철근의 배근 간격(200 mm 및 400 mm)과 모멘트 방향(정모멘트 및 부모멘트)이다.

2.1 실험체 상세

일체타설된 실험체와 분리타설된 실험체 모두 단면의 전체 높이는 650 mm, 폭은 300 mm로 동일하게 계획하였다. 모든 합성보 실험체에 대하여 프리캐스트 콘크리트 단면의 높이는 500 mm, 현장타설 콘크리트 단면의 높이는 150 mm로 동일하게 계획하였다. 프리캐스트 콘크리트 부에는 40 MPa의 설계기준압축강도 콘크리트를, 현장타설 콘크리트는 24 MPa의 설계기준 압축강도를 갖는 콘크리트를 계획하였다. 실험체의 전단철근의 배근 간격(200 mm 및 400 mm) 중 400 mm는 최소전단철근량 이하의 간격으로 설정하여 전단보강이 필요하지 않은 보를 모사하였다. 이 실험체군은 전단보강이 필요한 실험체의 전단 성능 차이를 비교하기 위함이며 최소전단보강근을 만족하지 않더라도 이론상 수평전단파괴는 발생하지 않는다. 또한 모든 실험체의 주철근은 요구 정착길이를 확보하도록 하여 전단파괴 전 부차파괴는 발생하지 않도록 계획하였다.

지점과 가력점 사이의 거리는 1,600 mm로 전단파괴를 유도하기 위해 실험체의 전단경간비(a/d)를 2.78로 설정하였고 또한 주인장철근은 SD500으로 D25 철근을 하부에 8개 배근하였다. PC와 CIP의 계면에서 수평전단파괴가 발생하지 않도록 수평전단강도가 수직전단강도보다 크게 계획하였고 전단철근은 SD400으로 D10 철근을 사용하였다. Fig. 1은 실험체 상세도면을 나타낸다.

실험체의 예상강도와 변수는 Table 1에 나타내었다. 실험체 명의 400, 200은 횡보강철근의 mm 단위 간격을 나타낸 것이고, 40, 24는 콘크리트 압축강도를 나타낸 것이다. 또한, SP, SN은 분리타설된 실험체 중 정모멘트를 받는 실험체, 분리타설된 실험체 중 부모멘트를 받는 실험체를 나타낸 것이다.

2.2 재료시험

실험체의 주인장철근으로는 설계기준항복강도가 500 MPa인 SD500의 D25가 사용되었으며, 전단철근으로는 설계기준항복강도가 400 MPa인 SD400의 D10을 사용하였다. 철근의 인장시험은 KS B 0801(KATS 2017)의 금속재료 인장시험 규정에 따라 제작하여 KS B 0802(KATS 2018)에 따라 인장시험을 수행하였다. 인장시험에 따른 철근의 기계적 특성은 Table 2에 나타냈다. SD500 철근의 항복강도는 589.76 MPa, SD400 철근의 항복강도는 459.89 MPa로 시험 결과 모든 철근은 설계기준항복강

Table 1 Dimensions and material properties of specimens

Specimen	b (mm)	h (mm)	a/d	$f_{ck,pc}$ (MPa)	$f_{ck,cip}$ (MPa)	s (mm)	V_{mn} (kN)	V_{nh} (kN)	V_{nv} (kN)	V_{mn}/V_{nv}	V_{nh}/V_{nv}
400-SP	300	650	2.78	40	24	400	518.63	359.72	222.88	2.33	1.61
400-SN							518.63	359.72	222.88	2.33	1.61
200-SP						200	518.63	408.94	304.91	1.7	1.34
200-SN							518.63	408.94	304.91	1.7	1.34
400-24				-	24	400	518.63	359.72	222.88	2.33	1.61
400-40					40		602.53	359.72	263.86	2.28	1.36
200-24					24	200	518.63	408.94	304.91	1.7	1.34
200-40					40		602.53	408.94	345.89	1.74	1.18

Notes: a/d : shear span ratio; f_{ck} : concrete compressive strength; f_y : yield stress of longitudinal rebar; f_{yt} : yield stress of shear reinforcement; V_{nv} : calculated shear strength $V_c + V_s$; V_{nh} : horizontal shear strength; V_{mn} : shear force according to flexural performance M_n/a

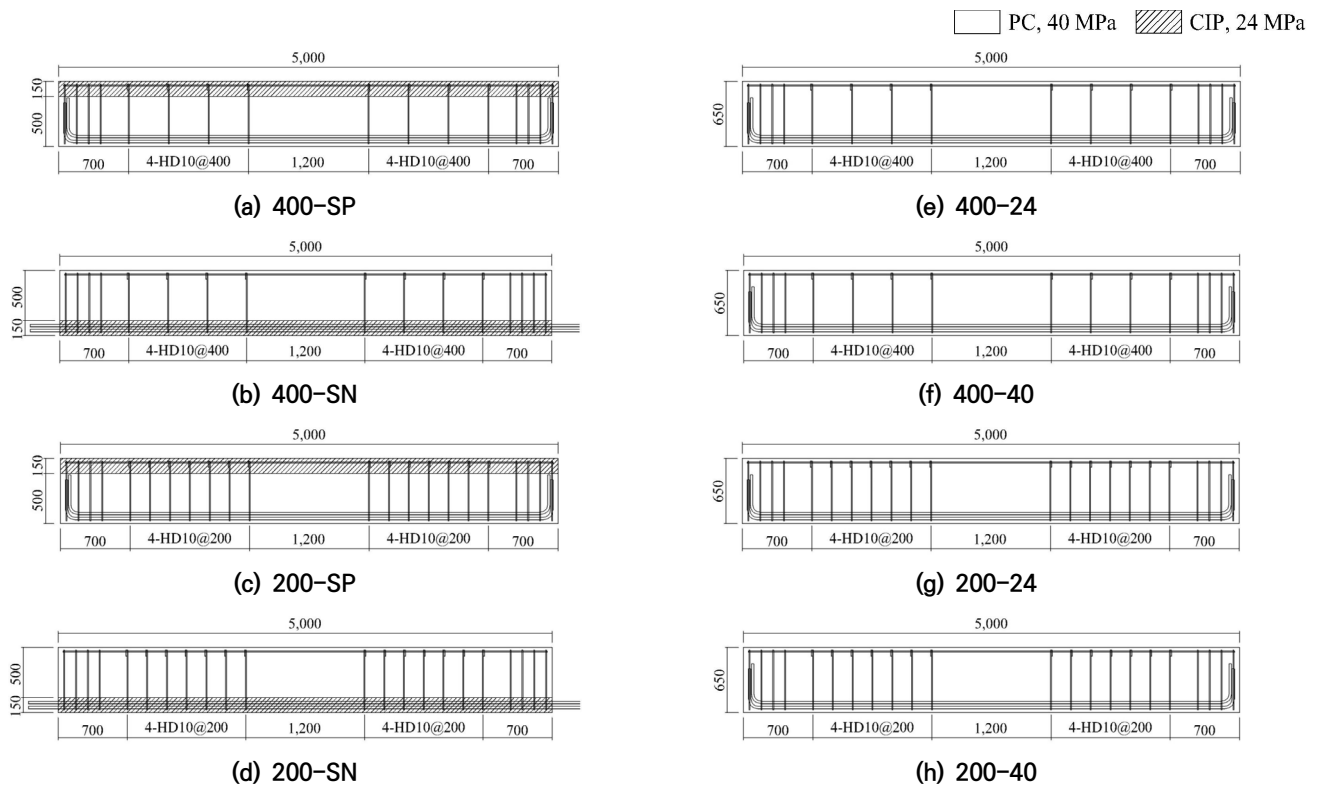


Fig. 1 Specimen detail (unit: mm)

Table 2 Rebar tensile test result

Rebar	Specification	$f_{y,aver}$ (MPa)	ϵ_y
D10	SD400	459.89	0.0023
D25	SD500	589.76	0.0029

Notes: f_y : yielding stress; ϵ_y : yield strain

도를 상회하는 결과를 나타냈다.

실험체에 사용된 콘크리트는 설계기준압축강도 40 MPa, 24 MPa를 사용하였으며, Table 3에 콘크리트 배합설계를 나타내었다. 콘크리트 압축강도 평가를 위해 KS F 2403(KATS 2019)에 따라 $\phi 100$ mm $\times$ 200 mm의 원주형 공시체를 제작하여 실험

Table 3 Mixing proportions of concrete

f_{ck} (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
			W	B	S	G	A	SP
24	48.4	47.9	165	290	863	938	51	2.7
40	30.1	42.8	164	463	693	927	82	4.4

Notes: f_{ck} : concrete compressive strength; W/B: water binder ratio; S/a: fine aggregate ratio; W: water; C: cement; S: fine aggregate; G: coarse aggregate; A: admixture; SP: chemical admixture

체와 동일한 조건에서 양생 후 KS F 2405(KATS 2022)에 따라 콘크리트의 압축강도를 평가하였다. 공시체의 압축강도 시험 결과는 Table 4와 같이 각각 28.54 MPa, 32.54 MPa로 나타났다.

Table 4 Mechanical properties of concrete

Nominal strength	f'_c (MPa)	E_c (MPa)
24	29.41	27369.82
40	32.39	28147.62

Notes: f'_c : compressive strength of concrete; E_c : elastic modulus

2.3 실험체 제작 및 실험 세팅

분리타설 실험체는 40 MPa 콘크리트를 1차로 타설한 후 KDS에 따라 현장타설콘크리트가 타설 될 계면에 약 6 mm의 거칠기를 내어 증기양생 하였다. 증기양생 후 24 MPa 현장타설 콘크리트를 2차 타설하였다.

실험은 전단성능평가를 위해 Fig. 2와 같이 보의 중앙부에 800 mm 간격으로 가력점을 계획하였고, 보의 양 단부 500 mm 지점에 힌지를 설치하여 4점 가력 실험을 수행하였다. 주인장철근과 전단철근의 항복 여부와 변형률을 확인하기 위해 주인장철근 중앙과 전단철근 중앙에 변형률 게이지를 부착하여 실험 시 측정하였다.

실험체의 처짐을 측정하기 위해 실험체의 하부 중앙과 양쪽으로 400 mm 간격으로 200 mm 변위 측정이 가능한 LVDT를 설치하였고, 전단변형을 측정하기 위해 실험체의 가력점과 지점 사이를 500 mm로 나눠 6개의 LVDT를 대각선으로 설치하였다. 실험 시 가력은 2,000 kN 용량의 만능재료시험기(universal testing machine, UTM)을 이용하여 실험체가 최대하중에 도달하기 전까지 가력속도 0.35 mm/min으로 변위제어 하였다.

3. 실험결과

3.1 하중-변위 관계

Table 5에 최대강도와 기준식에 따른 공칭강도를 비교한

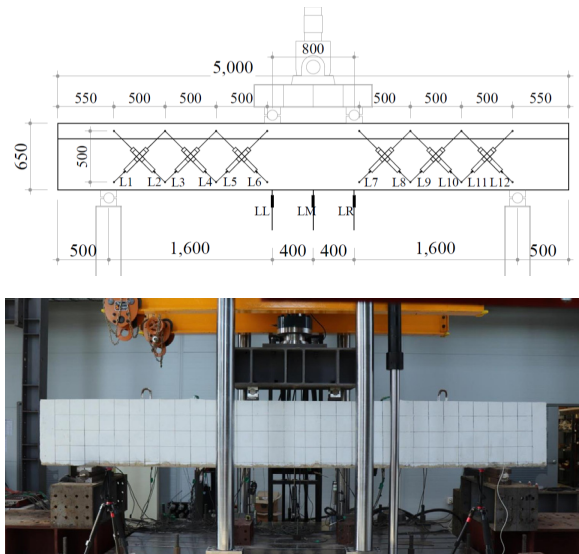


Fig. 2 Test configuration

결과를, Fig. 3에는 하중-변위 관계를 나타냈다. Fig. 3에서 실선과 점선은 실험결과, 원형은 최대 전단강도이다. 실험체 최대강도는 전단철근이 400 mm로 배근된 실험체 4개 중 분리타설 실험체의 부모멘트를 받는 400-SN, 일체타설 실험체의 콘크리트 설계압축강도 40 MPa로 타설한 400-40, 24 MPa로 타설한 400-24, 분리타설 실험체의 정모멘트를 받는 400-SP 순으로 크게 나타났다. 전단철근이 200 mm로 배근된 실험체는 부모멘트를 받는 200-SN, 콘크리트 압축강도 40 MPa로 타설한 200-40, 정모멘트를 받는 실험체 200-SP, 200-24

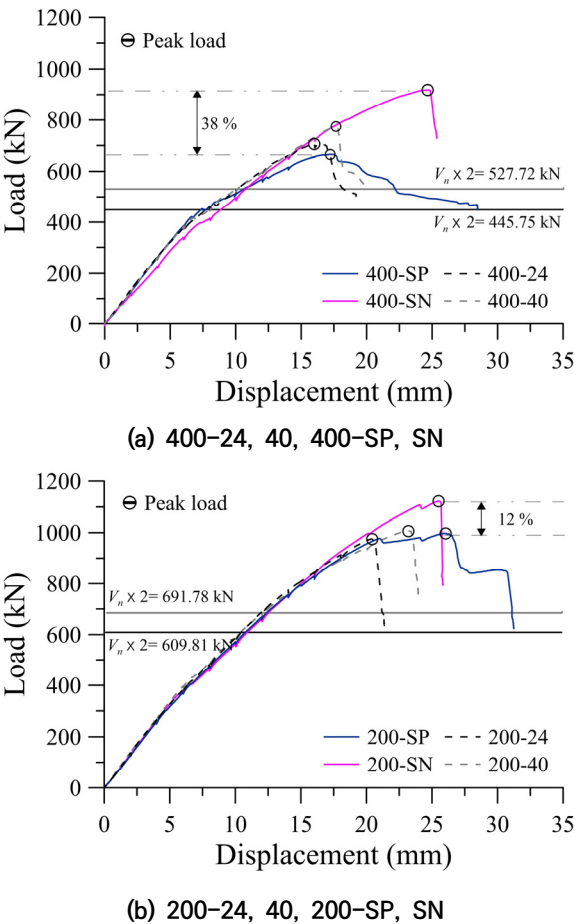


Fig. 3 Load-displacement relationship

Table 5 Test results of specimens

Specimen	$V_n \times 2$ (kN)	V_{test} (kN)	$V_{test} / (V_n \times 2)$
400-SP	445.75	665.92	1.49
400-SN	445.75	918.23	2.06
200-SP	609.81	997.7	1.64
200-SN	609.81	1,122.14	1.84
400-24	445.75	705.86	1.58
400-40	527.72	774.56	1.47
200-24	609.81	975.85	1.6
200-40	691.78	1,006.56	1.46

Notes: V_n : calculated shear strength; V_{test} : shear strength

순으로 크게 나타났다.

전단철근이 400 mm로 배근된 실험체 400-SP와 400-SN은 설계전단강도는 동일하지만 400-SP는 설계전단강도 대비 약 1.49 배, 400-SN은 약 2.06배 큰 것으로 나타났다. 400-SN의 최대강도가 400-SP의 최대강도 대비 약 38 % 크게 나타났다. 400-SP는 일체타설 실험체 400-24보다 약 6 %, 400-40보다 약 14 % 낮은 최대강도를 나타냈으나, 최대강도 도달 이후에 일체타설 실험체보다 상대적으로 큰 변형을 보이며 파괴되었다.

전단철근이 200 mm로 배근된 실험체 200-24, 200-40, 200-SP, 200-SN은 초기 전단균열 발생 시점에서 차이를 보였고, 이후 하중을 받는 동안의 변형 및 변위 거동은 유사했다. 200-SN의 최대강도가 200-SP의 최대강도 대비 약 12 % 높았으며, 200-SP는 일체타설 실험체 200-24보다 약 2 %, 200-40보다 약 10 % 높은 강도를 보였다. 최대강도 이후 변형에서도 일체타설 실험체보다 큰 변형을 보이며 파괴되었다. 분리타설 실험체는 모두 부모멘트 실험체가 더 높은 최대강도를 나타냈으며, 모멘트 방향에 따라 전단강도의 차이가 발생하는 것으로 보인다. 전단철근량에 따른 최대강도는 정모멘트 실험체 400-SP와 200-SP의 경우 약 38 %, 부모멘트 실험체 400-SN과 200-SN의 경우 약 22 %의 차이를 보였다.

3.2 파괴패턴

Fig. 4에 파괴패턴을 나타내었다. 파괴패턴을 관찰한 결과 전단철근 배근 간격과 모멘트 방향에 따라 파괴 양상이 다르게 나타났다. 전단철근이 400 mm 간격으로 배근된 400-SP와 400-SN은 두 실험체 모두 초기 힘 균열 발생 이후 계면의 수평균열 발생, 사인장균열 및 수평균열 폭의 확장을 경험하였다. 두 실험체 중 정모멘트가 작용하는 400-SP의 경우 실험체 하부 힘균열에서 연장된 사인장균열이 PC-CIP 계면에서 발생한 수평 균열을 관통하지 못하여 압축역으로 진전되지는 못하였다. 부모멘트 작용을 모사한 400-SN의 경우 힘균열이 복부로 진전되지 못하여 사인장균열의 발달이 억제되면서 수평방향 균열폭의 확장이 더 두드러지게 나타났다. 이후 수평균열을 따라 가력점과 수평 거리가 가까운 계면에서 사인장균열이 시작되어 가력점으로 이어졌고 이로 인해 전단경간비가 짧아진 형상을 보이며 전단균열의 각도가 높아지는 패턴을 보였다. 또한 수평균열이 발생하였지만 사인장균열로 인하여 최종 파괴되었다.

반면, 전단철근이 200 mm 간격으로 배근된 200-SP와 200-SN의 경우 400 mm 간격으로 배근된 실험체들과는 달리 계면에서 힘균열 및 전단균열의 진전을 방해하는 수평균열의 균열폭 확장이 이루어지지 않고, 힘균열 및 전단균열이 계면을 관통하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 균열의 폭이 좁고, 전단경간을 따라 균열이 균일하게 분포된 패턴을 보였다. 이는 전단철근 간격이 좁아짐에 따라 전단철근이 더 많은 균열을 지나가고, 합성보의 일체성을 확보하며 균열 폭을 제어하는 데 기여하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.

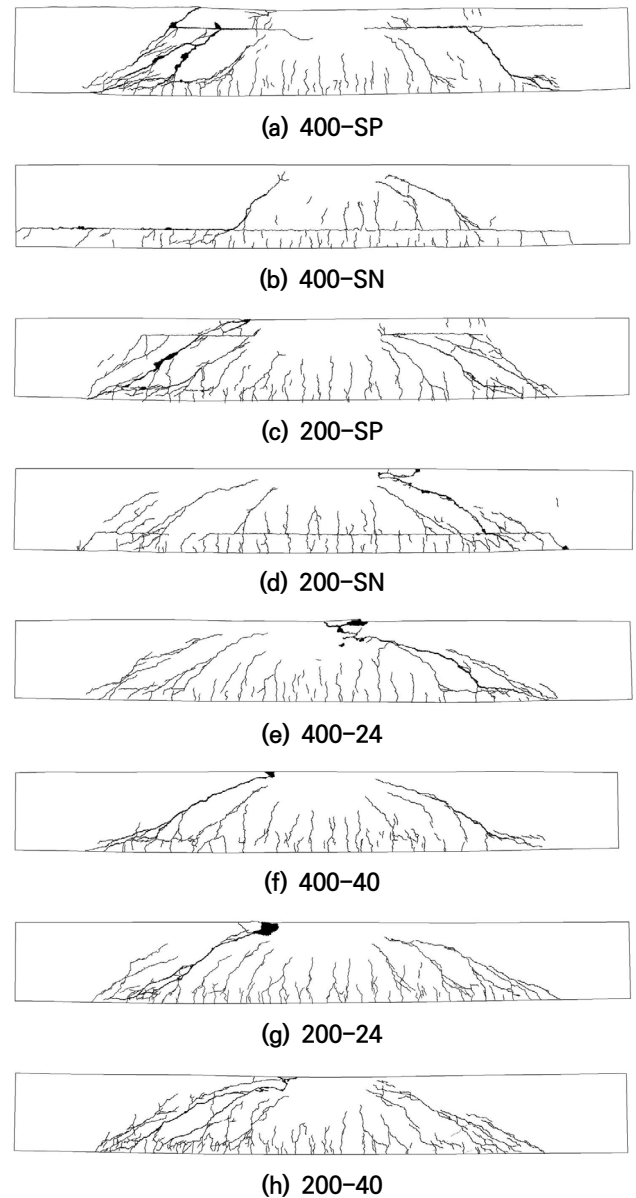


Fig. 4 Crack pattern at failure

3.3 전단강성

계면에서의 변형 집중에 따른 전단강성 감소를 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 실험체에 설치된 LVDT로 측정된 데이터를 식 (6)을 바탕으로 산정하여 전단변형을 도출하였다.

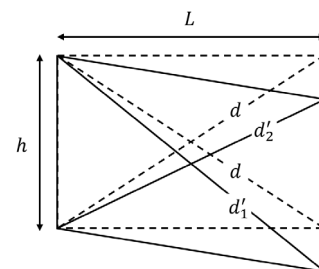
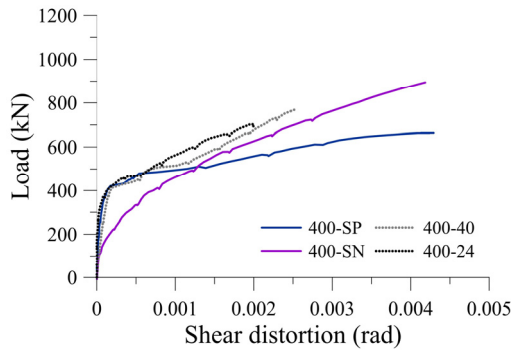
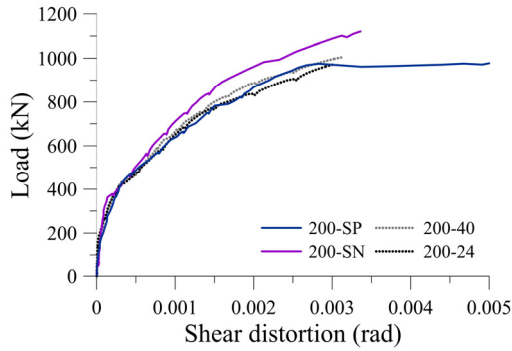


Fig. 5 Shear distortion measurement X configuration



(a) 400-24, 40, 400-SP, SN



(b) 200-24, 40, 200-SP, SN

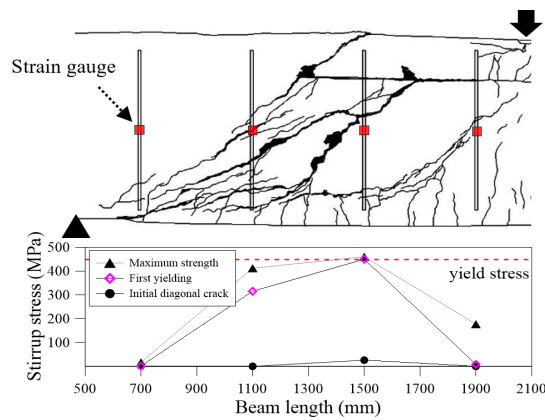
Fig. 6 Shear distortion

$$\gamma = \frac{(d'_1 - d)d - (d'_2 - d)d}{2Lh} \quad (6)$$

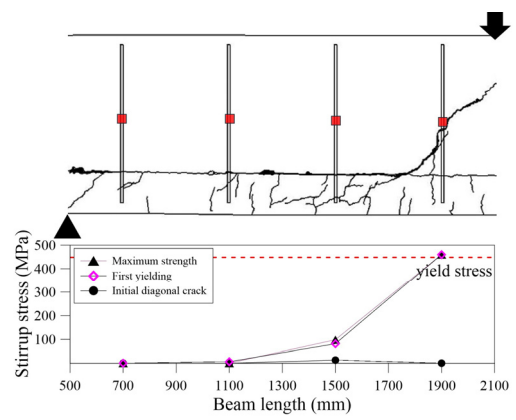
전단철근이 400 mm 간격으로 배근된 일체타설 및 분리타설된 실험체들의 하중-전단변형 관계를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 정모멘트가 작용하는 400-SP의 경우 작용하중 409 kN까지는 일체타설된 실험체와 유사한 거동을 하는 것으로 확인되었으나, 부모멘트가 작용하는 400-SN의 경우 초기에 전단변형량이 급격하게 증가하여 다른 실험체 대비 전단강성이 작았다. 그러나 사인장균열 발생 이후에는 다른 실험체의 전단강성이 급격하게 감소하였다. 반면, 전단철근이 200 mm 간격으로 배근된 분리타설된 모든 경우가 일체타설된 경우와 유사한 것으로 확인되었다. 이는 전단철근 간격이 좁아짐에 따라 슬립이 발생하지 않거나 미미한 수준에 머물러, 전단강성에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 또한, 부모멘트가 작용하는 200-SN은 400-SN과 마찬가지로 하중 증가에 따른 전단변형량의 증가 속도는 더 작은 것으로 나타났다.

3.4 전단철근 변형률

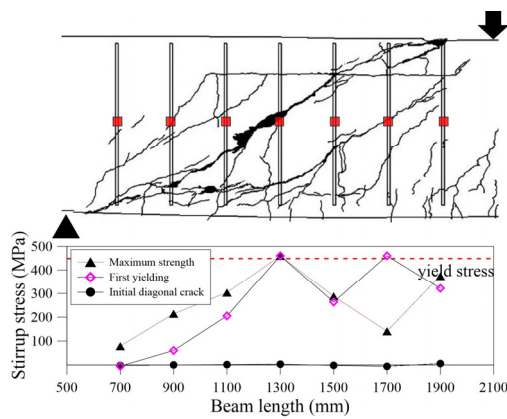
Fig. 7에 분리타설 실험체의 전단철근에 부착한 변형률 게이지의 데이터를 이용하여 전단파괴가 발생한 전단경간의 전단철근 변형률을 보의 길이에 따라 나타내었다. 변형률은 전단철근



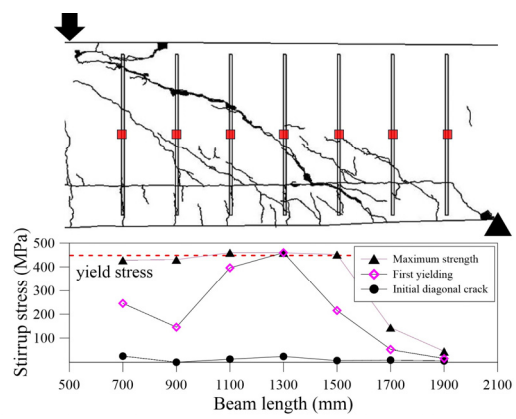
(a) 400-SP



(b) 400-SN



(c) 200-SP



(d) 200-SN

Fig. 7 Strain distribution of shear reinforcement

중앙에 부착한 게이지의 변형률을 사용하였다. 실험체 400-SP, 400-SN, 200-SP, 200-SN 각각에 대해, 초기 사인장균열, 첫 번째 항복시점, 최대강도 시점의 변형률을 나타냈다.

200-SP와 200-SN은 400-SP와 400-SN보다 변형률이 균일하게 분포되어 있으며, 이는 전단철근이 계면에서 응력을 효과적으로 균등하게 전달하였기에 나타난 현상으로 판단된다. 400-SN의 경우 사인장균열이 발생하지 않은 부분에서 큰 변형은 발생하지 않았고 수평균열에서 시작된 사인장균열이 발생한 부분의 철근이 가장 큰 변형률을 보였다.

3.5 전단강도 기여분

각각의 실험체마다 전단파괴가 발생한 전단경간의 전단철근을 이용하여 기여분을 평가하였다. 전단철근이 400 mm로 배근된 실험체는 각각 4개의 전단철근, 전단철근이 200 mm로 배근된 실험체는 각각 7개의 전단철근의 변형률을 사용하였다. 모멘트 방향과 전단철근 간격에 따른 전단철근과 콘크리트의 기여분은 다음 식 (7)과 같이 전단철근 변형률(ϵ_{st})에 철근 탄성계수(E_s) 200,000 MPa를 곱하여 철근의 기여분을 평가하여 Table 6에 나타내었다.

$$V_{s,test} = A_v \epsilon_{st} E_s \leq A_v f_{yt} \quad (7)$$

또한, 콘크리트의 기여분은 식 (8)과 같이 전체 전단강도에서 전단철근의 기여분을 빼 콘크리트 기여분으로 평가하였다.

$$V_{c,test} = V_{test} - V_{s,test} \quad (8)$$

이를 Table 6에 나타내었다. 전단철근 간격이 좁아질수록 전단철근의 기여분이 증가하며, 실험체의 전체 전단강도 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다.

또한 전단철근이 400 mm로 배근된 실험체인 400-24와 400-40은 콘크리트 압축강도에 따라 콘크리트의 전단강도 기여분이 일정하게 나타난 반면, 부모멘트 실험체인 400-SN은 정모멘트

실험체인 400-SP와 일체타설 실험체인 400-24, 400-40보다 콘크리트 기여분이 차지하는 비율이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 파괴패턴에서 설명한 것과 같이 수평균열로 인해 전단경간에 사인장균열이 진전되지 않아 전단철근이 작용하중을 지지하는 데 기여하지 않게 되고 콘크리트 기여분이 커진 것으로 판단된다. 부모멘트를 받는 보의 콘크리트 전단기여분이 크기에 따라 타설 방향에 따른 콘크리트 전단기여분을 다르게 적용해야 할 필요가 있을 것으로 사료 된다.

200-40의 파괴패턴을 살펴보면 200-24 실험체보다 전단철근을 지나가는 사인장균열이 더 많이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 전단철근의 기여분이 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트와 현장타설 콘크리트 합성보의 전단강도에 대한 분석을 위해 실험적으로 평가했다. 실험연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 전단철근 배근 간격과 모멘트 방향에 따라 파괴 양상이 다르게 나타났다. 400-SP와 400-SN 실험체는 초기 휨 균열 발생 이후 수평균열과 사인장균열의 확장을 경험하였으며, 특히 400-SN 실험체는 부모멘트로 인해 수평방향 균열폭의 확장이 더 두드러졌다. 전단철근 간격이 200 mm로 배근된 실험체들은 균열의 폭이 좁고 균일하게 분포된 패턴을 보여, 전단철근 간격이 좁아짐에 따라 합성보의 일체성을 확보하는 데 기여함을 확인할 수 있었다.
- 2) 실험 결과, 전단철근 간격이 좁아질수록 전단강도와 전단강성이 증가하는 경향을 보였다. 전단철근이 200 mm로 배근된 실험체에서는 분리타설된 200-SN이 가장 높은 최대강도를 나타냈으며, 이는 전단철근이 계면에서 응력을 효과적으로 전달하여 전단변형을 억제한 결과로 판단된다. 반면, 전단철근이 400 mm로 배근된 실험체 중 400-SN 실험체는 부모멘트로 인해 폭이 큰 수평균열이 발생하여 다른 실험체에 비해 전단변형이 빠른 시점에 나타나 초기 강성이 낮아지는 경향을 보였다.
- 3) 정모멘트가 작용하는 400-SP 실험체는 작용하중 409 kN 까지 일체 타설된 실험체와 유사한 거동을 보였으나, 부모멘트가 작용하는 400-SN 실험체는 전단변형량의 증가가 더 빨리 나타났다. 그러나 하중 증가에 따른 전단변형량의 증가 속도는 부모멘트가 작용하는 실험체에서 더 작은 것으로 나타났다.
- 4) 200-SP와 200-SN 실험체는 400-SP와 400-SN보다 변형률이 균일하게 분포되었으며, 이는 전단철근이 계면에서 응력을 효과적으로 전달한 결과로 판단된다. 400-SP보다 400-SN 실험체가 콘크리트 기여분이 더 크게 나타났으며, 이는 수평균열로 인해 전단철근이 작용하중을 지지하지 못하고 콘크리트 기여분이 커진 것으로 판단된다.

Table 6 Shear strength contribution

Specimen	$V_{c,test}$ (kN)	$V_{s,test}$ (kN)	$V_{test}/2$ (kN)
400-SP	180.97	151.99	332.96
400-SN	379.52	79.6	459.12
200-SP	162.52	336.33	498.85
200-SN	216.02	345.05	561.07
400-24	204.63	148.3	352.93
400-40	285.93	101.35	387.28
200-24	230.99	256.94	487.93
200-40	182.65	320.63	503.28

Notes: $V_{c,test}$: concrete shear strength; $V_{s,test}$: reinforcement shear strength; V_{test} : maximum shear strength

감사의 글

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부) 연구비 지원을 받아 수행된 연구에 의한 결과의 일부입니다. (No. NRF-2022R1A2C3008940, RS-2023-00207763)

References

- KATS (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0801)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- KATS (2018) *Method of Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0802)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- KATS (2019) *Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens (KS F 2403)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- KATS (2022) *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete (KS F 2405)*. Seoul, Korea: Korea Agency for Technology and Standards (KATS), Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- KCI (2021) *Shear and Torsion (KDS 14 20 22)*. Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Korea Concrete Institute (KCI). 30. (In Korean)
- Kim, C. G., Park, H. G., Hong, G. H., and Kang, S. M. (2013) Shear Strength of Hybrid Beams Combining Precast Concrete and Cast-in-Place Concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute* 25(2), 175-185. (In Korean)
- Kim, C. G., Park, H. G., Hong, G. H., and Kang, S. M. (2014) Shear Strength of PC-CIP Composite Beams with Shear Reinforcement. *Journal of the Korea Concrete Institute* 26(2), 189-199. (In Korean)
- Rueda-García, L., Bonet Senach, J. L., Miguel Sosa, P. F., and Fernández Prada, M. A. (2021) Analysis of the Shear Strength Mechanism of Slender Precast Concrete Beams with Cast-in-Place Slab and Web Reinforcement. *Journal of the Engineering Structure* 246, 113043.

요 약 본 연구에서는 프리캐스트(PC) 및 현장타설(CIP) 콘크리트 합성보의 전단철근비와 정모멘트 및 부모멘트가 전단강도에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 분리타설된 합성보의 전단 성능을 평가하기 위해 동일한 철근 배치를 가진 8개의 실험체를 사용하였으며, 그 중 4개는 일체타설되고, 4개는 분리타설되었다. 모든 실험체는 높은 종방향 철근비와 높은 수평 전단 강도를 가지도록 설계되어 수직 전단 파괴를 유도하였다. 실험은 PC와 CIP 콘크리트 합성보의 전단철근비가 수직 전단 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 4점 하중 실험을 통해 수행되었다. 실험 결과, 분리타설된 실험체 중에서 부모멘트가 작용하고 전단 보강비가 낮은 실험체가 정모멘트가 작용한 실험체보다 더 높은 전단 강도를 보였다. 모멘트 방향은 전단 변형 및 균열 패턴에 영향을 미쳤다. 또한, 전단 성능을 평가하기 위해 실험 결과를 현행 설계 기준과 비교하였다.

핵심용어 : 프리캐스트 콘크리트, 합성보, 정모멘트, 부모멘트