

2경간 프리캐스트 콘크리트 모멘트골조의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Multi-Span Precast concrete Moment Frames

최 수 빈¹⁾
Choi, Subin

이 득 행²⁾
Lee, Deuckhang

요 약

이 연구는 공동주택 지하주차장에 적용 가능한 2경간 프리캐스트 콘크리트 보통모멘트골조 내진성능을 평가하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 기존의 RC 공법은 장경간 구현과 복잡한 철근 배근에 따른 시공성 저하 문제가 있어, 이를 대체할 수 있는 2경간 프리캐스트 모멘트골조 공법의 적용을 검토하고자 하였다. 이를 위해 보 주철근의 정착 상세에 따라 총 3개의 PC 실험체를 제작하였고, 접합부가 일체로 제작된 RC 공법을 적용한 실험체를 비교군 실험체로 계획하였다. 실험 결과, PC 실험체는 초기 균열 발생 이후에도 최대 하중이 설계강도를 상회하였으며, 파괴모드는 중앙 기둥 휨 강도 도달 이후 전단파괴로 나타났다. 실험 결과를 토대로 정량적으로 평가한 결과, RC 공법 적용 실험체와 대등한 성능 수준으로 나타났다. 이 연구에서 제안한 PC 공법 적용 실험체는 보통모멘트골조 상세를 갖도록 설계하였음에도 건축물 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준에서 명시하고 있는 중간모멘트골조 동등성 평가 기준을 모두 만족하여, 제안하는 2경간 프리캐스트 콘크리트 보통모멘트골조 공법이 기존 RC 공법을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 모멘트골조, 할선강성, 등가감쇠비, 동등성 평가

1. 서 론

최근 국내 건설 산업은 현장 위주의 전통적인 시공 방식에서 벗어나, 표준화와 모듈화를 기반으로 한 탈현장 공장 생산 방식 (Off-site construction, OSC)의 도입이 요구되고 있다. 현재 건설시장은 숙련 기능 인력 부족과 인건비 상승 등 다양한 어려움에 직면해 있으며, 이에 따라 생산성 향상과 근로자 안전 확보, 그리고 지속 가능한 건설방안의 모색이 필수적이다. 이러한 배경에서 프리캐스트 콘크리트 (Precast concrete, PC) 공법은 유력한 대안으로 부각되고 있다. PC 공법은 전통적인 철근콘크리트 (Reinforced concrete, RC) 공법과 달리, 우수한 품질의 부재를 공장에서 사전 제작하여 현장에서 조립하는 방식이므로, 시공 중 폐기물 발생을 최소화할 수 있는 친환경적인 방법으로 평가된다. 이러한 특성은 건설 현장의 환경적 영향을 최소화하며 ESG 경영 실현에도 기여할 수 있다. 이에 따라 최근 국내 건축 PC 시장은 대형 물류시설 및 대형공장에 적용되고 있으며 나아가 공동주택의 지하주차장까지 확대되어 건설 산업 전반에서 그 적용 가능성이 더욱 주목받고 있다.

지하주차장에 적용되는 PC 공법은 장경간과 층고 절감 측면에서 RC 공법에 비해 우수한 성능을 보유하고 있으며, 특히 이 연구에서 제안한 와이드 보 시스템의 경우 보의 폭을 넓혀 PC 슬래브의 걸침길이를 증가시키고, 슬래

브의 경간 및 단면을 감소시킬 수 있다. 특히, 구조물의 총 중량의 50% 이상을 차지하고 있는 슬래브의 중량을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 기존의 공동주택 지하주차장에 적용 중인 RC 공법을 대체하고자 장경간에 유리한 PC 공법을 적용한 2경간 프리캐스트 콘크리트 모멘트골조에 대한 기술 개발이 필요하다. [그림 1]은 기존 PC 공법과 보의 폭이 넓은 와이드 보 공법 시스템의 하중 메커니즘을 나타내었으며, PC 공법과 와이드 보 시스템의 조합을 통해 구조물에 발생하는 하중을 감소시키는데 특히 용이하다.

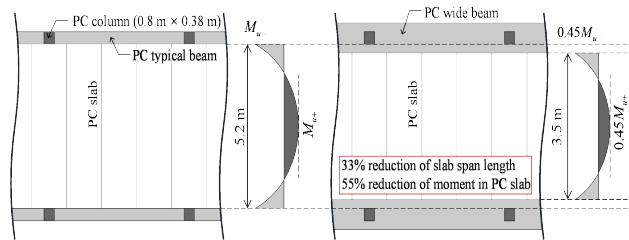


그림 1. 1방향 와이드 보 시스템 하중 메커니즘

기존의 RC 공법을 대체하기 위해 PC 공법은 PC 보 상부에 PC 슬래브를 위치한 후 슬래브 연결 철근을 배근하고 덧칠콘크리트 (Cast-in-place concrete, CIP)를 타설함으로써 구조물의 일체성을 확보하는 반건식 PC 공법을 개발하고자 한다. 또한, [그림 2]와 같이 접합부 내 기둥 및 보의 주철근, 슬래브의 연결 철근 등으로 인해 배근상세가 복잡하여 접합부 정착철근의 배근상세를 개선하고 안전성

1) 충북대학교 건축공학과 학사과정

2) 충북대학교 건축공학과 교수

과 시공성을 향상시킬 수 있는 PC 공법의 접합 상세를 개발하고자 한다.

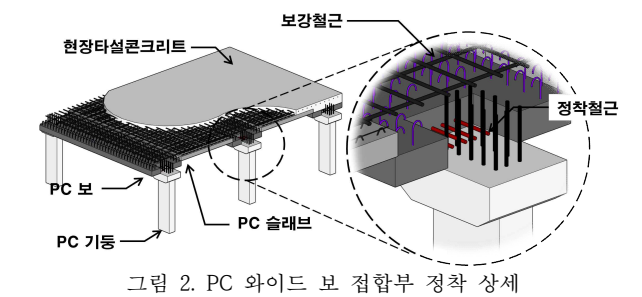


그림 2. PC 와이드 보 접합부 정착 상세

이 연구에서는 기존의 공동주택 지하주차장을 대상으로 기존 RC 공법 대신 2경간 프리캐스트 모멘트골조 공법을 적용하고자 다양한 PC 공법의 접합 구조성능을 실험적 및 해석적으로 검토하고자 한다.

2. 실험체 계획

이 연구에서는 접합부에서 우수한 시공성을 기대할 수 있는 철근 배근 상세와 보 부재의 상세를 변수로 하여 2 경간 골조 실험체를 계획하였다. 콘크리트구조 정착 및 이음 설계기준 (KDS 14 20 52 : 2024) 4.4.2(1)에서 ‘단순부재에서 정모멘트 철근의 1/3 이상, 연속부재에서 정모멘트 철근의 1/4 이상을 부재의 같은 면을 따라 받침부까지 연장하여야 한다. 보의 경우는 이러한 철근을 받침부 내로 150mm 이상 연장하여야 한다.’ 고 명시하고 있는 정모멘트 이형철근 정착 상세와 보의 하부 주철근(즉, 정모멘트 철근)의 접합부 내에서 정착 상세를 만족시키기 위한 180° 표준갈고리 정착 상세, 공동주택 지하주차장의 층고 절감을 극대화하기 위한 강제형 합성보 상세로 구분할 수 있다.

2.1 실험체 상세

공동주택 지하주차장의 모듈을 고려하여 경간을 상이하게 설정하였으며, LPS 실험체를 제외한 실험체는 8.2 m × 5.5 m 모듈로 설계될 수 있으나, LPS 실험체의 경우 장경간 강제형 합성보의 사용처짐을 고려하여 5.5 m × 8.2 m 모듈에서 적용가능한 상세이며 [표 1]에 실험체 설계 사항 요약을 나타냈고, [그림 3]은 실험체의 제작 과정

을 나타내었다.

LPS를 제외한 나머지 실험체의 기둥 단면 치수의 폭과 높이는 각각 0.3 m, 0.45 m이며, 길이방향 철근은 UHD16 철근 10개가 배근되었다. 기둥 최상단에는 정착길이 부족 및 철근 간섭 최소화를 위해 확대머리 정착 상세로 설계하였다.

LR 실험체는 기존 공동주택 지하주차장의 8.2 m × 5.5 m 모듈을 적용한 구조로 2경간 프리캐스트 콘크리트 모멘트골조 실험체와 비교를 위한 실험체이다. 보의 단면의 폭과 높이는 각각 1.1 m, 0.28 m이며, 실제 구조물의 하중 분포를 고려하여 보 양단부 (부방향 모멘트)와 중앙부 (정방향 모멘트)의 철근배근 상세가 상이하도록 설계하였다. 보의 양단부 상·하부에는 각각 10-UHD19, 6-SHD13 철근이 배근되어 있으며, 중앙부 상·하부에는 각각 6-UHD19, 12-SHD13 철근이 배근되어 있다. 또한, RC 공법 적용 구조물의 시공 시 주철근의 겹침이음을 모사하기 위해 모멘트가 적게 발생하는 변곡점 구간에 겹침이음을 계획하였다.

LPD 실험체는 존 RC 공법의 대체안으로, 보-기둥 접합부 (즉, 패널존)에서 보 주철근을 180° 표준갈고리를 통해 요구 정착길이를 만족하도록 설계한 실험체이다. 또한 PC 보 상부와 패널존에 덧침콘크리트를 타설함으로써 구조적 일체성을 확보하였으며, 덧침 콘크리트 전후의 보 단면 높이는 각각 160 mm, 280 mm이다. 기둥 단면의 치수 및 길이방향 철근은 LR 실험체와 동일하게 설계하였으며, 보의 양단부에는 상부 4-UHD16, 8-SHD10, 하부 10-UHD19 철근이, 보의 중앙부에는 상부 4-UHD16, 10-SHD10, 하부 6-UHD19 철근이 배근되었다. 보의 단부 하부근에 배치된 4-UHD16 철근은 180° 표준갈고리로 정착되어 기둥을 관통하도록 설계하였다.

LPN 실험체는 LPD 실험체와 동일하게 기존 RC 공법의 대체안이며, KDS 14 20 52 4.4.2(1)에 따라 보의 하부근 (즉, 정모멘트 철근)이 받침부 내로 최소 연장길이 (즉, 150 mm)로 배근한 상세이다. 이외의 PC 기둥 및 PC 보 철근 배근 상세와 형상은 동일하다.

LPS 실험체는 강제형 합성보는 ‘ㄱ’ 자 단면 형상이며, 하부 플랜지의 폭은 브라켓 폭과 동일하게 설계하였다. 또한, 합성보 상부에는 철골 보의 뒤틀림을 방지하고 콘크리트 타설 시 시공성을 고려하여 500 mm 간격으로 플레이트를 배치하였다. 내부에는 2-SHD13 대각 보강근을 1,000 mm 간격으로 배근하여 합성보의 변형을 방지하였다. 보

[표 1] 2경간 프리캐스트 모멘트골조 실험체 설계 요약

실험체명	적용공법	실험체 상세	축소비율	모듈방식	비고
LR	RC	RC 공법	55%	8.2 m × 5.5 m	<div>LR</div> <div>R : Reinforced concrete PD : Precast concrete + Development rebar PN : Precast concrete + No development rebar PS : Precast concrete + Steel beam L : Lateral load specimen</div>
LPD	PC	보 주철근 정착길이 확보			
LPN		보 주철근 정착길이 미확보			
LPS		강재형 합성보		5.5 m × 8.2 m	

상부에는 4-UHD19 철근을 배근하였으며, 이는 모든 기둥을 관통하도록 설계하였다. 강제형 합성보는 기둥 상단에서 수직방향으로 돌출된 2-M19 전산볼트와 나사식 체결 방식으로 연결되어 구조적 일체성을 확보하였으며, PC 브라켓과의 걸침길이는 200 mm로 하였다.



(a) PC 기둥 철근 배근



(b) PC 보 철근 배근



(c) PC 기둥 콘크리트 타설



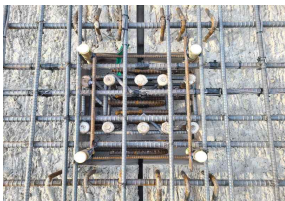
(d) PC 보 콘크리트 타설



(e) PC 기둥 및 보 조립



(f) 보 상부 철근 배근



(g) PC 보-기둥 접합부 상세



(h) 덧침콘크리트 타설

그림 3. LPD 실험체 제작 과정

2.2 재료 실험

PC 및 RC 콘크리트의 설계 압축강도는 각각 40 MPa로 동일하며, PC 콘크리트의 실제 압축강도는 39.5 MPa~42.9 MPa 수준으로 나타났다. [표 2]는 실험체 제작에 사용된 철근의 재료강도를 나타냈다.

[표 2] 연속슬래브 실험체 철근 인장강도 시험 결과

구분	SHD10	SHD13	UHD16	UHD19	SHD22
f_y (MPa)	500.0	500.0	600.0	600.0	500.0
$f_{y.test}$ (MPa)	677.4	608.8	686.1	713.8	664.6
$f_{u.test}$ (MPa)	827.5	725.9	793.6	828.0	772.9

2.3 가력 및 측정 방법

2경간 프리캐스트 콘크리트 모멘트골조의 내진성능을 평가하기 위해 [그림 4] 과 같이 실험을 수행하였다. 횡력은 1,000 kN 용량의 액추에이터 (Actuator)를 이용해 가력되었으며, 각 기둥의 하부에는 힌지 지점 철물을 체결하여 핀 지점을 구현하였으며, 총 3개의 힌지 철물을 배치하였다. 실제 구조물에서 발생하는 중력하중을 모사하기 위해 기둥 상부에 기둥의 설계 축하중 10%에 대응되는 약 54 tonf의 축력을 오일 잭 (Oil jack)을 통해 가력하였다.

횡방향 하중 가력은 변위 제어방식으로 층간변위비 0.2%~4.5%까지 총 11STEP에 대해 정방향 (Push. +), 부방향 (Pull, -)으로 각각 3회씩 반복 가력하였다.

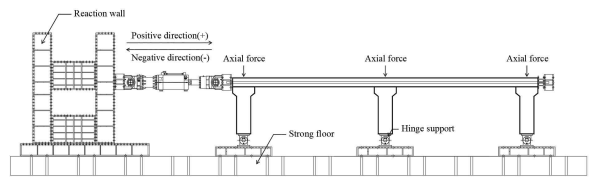


그림 4. 2경간 골조 횡하중 반복가력 실험체 세팅안

[그림 6]에서는 실험체의 항복점 산정 근거를 나타내었다. ACI 374.2R-13에 명시되어 있는 항복점 산정 방식으로 산정하였으며, 이는 하중-변위 곡선 상에서 선형(탄성) 응답에서 비선형(소성) 응답으로 변하는 점을 산정하는 방식으로, 항복강도는 항복 부재의 공칭강도(Q_y)에 대해 αQ_y 로 산정하며, 휨 부재의 경우 α 는 0.75로 산정한다. 이후 유효 탄성강성(K_e)을 갖는 기울기로 원점과 αQ_y 지점을 연결하는 직선을 통해 항복변형(δ_y)을 산정한다.

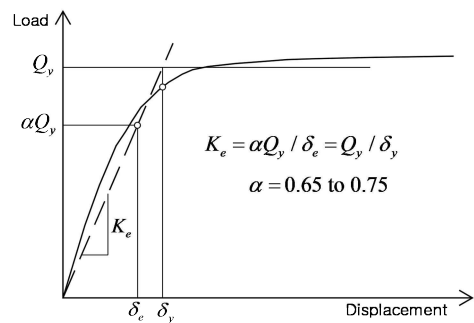


그림 6. 실험체 항복점 산정

3. 실험 결과

모든 실험체는 초기 단계에서 보 단부와 중앙 기둥에서 휨 균열이 발생하였으며, 이후 층간변위비 증가에 따라 접합부 전단 균열이 관찰되었다. 각 실험체의 항복점은 층간변위비 약 0.44~0.80% 범위에서 나타났으며, 최대 하중은 정방향 320.3 kN~371.6 kN, 부방향 -317.0 kN~-382.5 kN의 범위로 계속되었다. [표 3]는 각 실험체의 주요 실험 결과를 요약한 것이다. 또한 [그림 7]에는 모든 실험체의

하중-충간변위비 곡선을 나타내었으며, 이력거동은 유사하게 나타났다.

LR 실험체는 ±0.20%에서 보 단부 영역과 중앙 기둥에서 초기 휨 균열이 나타났다. 이후 충간변위비 정방향 2.00%, 부방향 -1.00%에서 접합부 영역에서 전단 균열이 발생하였다. 항복점은 정방향 0.80%, 부방향 -0.63%에서 도달하였으며, 최대 하중은 정방향 1.94%에서 320.3 kN, 부방향 -2.43%에서 -338.9 kN이었다. 충간변위비 ±4.5% 가력 중 정방향 3.76%, 부방향 -3.73%에서 파괴점에 도달하였으며, 파괴모드는 중앙 기둥 휨 강도 도달 이후 전단 파괴로 나타났다.

LPD 실험체는 ±0.20%에서 보 단부 영역에서 초기 휨 균열, ±0.25%에서 중앙 기둥에서 휨 균열이 나타났고, 정방향 3.50%, -2.50%에서 접합부 전단 균열이 발생하였다. 항복점은 정방향 0.67%, 부방향 -6.4%에서 도달하였으며, 최대 하중은 정방향 3.10%에서 371.6 kN, 부방향 -3.31%에서 -382.5 kN이었다. 충간변위비 ±4.5% 가력 중 중앙 기둥에 전단 손상이 집중되어 실험을 종료하였으며, 파괴모드는 중앙 기둥 휨 강도 도달 이후 전단파괴로 나타났다.

LPN 실험체의 초기 휨 균열의 경우 LPD와 유사하였으며, 정방향 2.00%, 부방향 -2.50%에서 접합부 전단 균열이 관찰되었다. 항복점은 정방향 0.72%, 부방향 -0.87%에서 도달하였고, 최대하중은 정방향 3.18%에서 353.2 kN, 부방향 -3.36%에서 -320.8 kN이었다. 충간변위비 ±5.5% 가력 종료 후 정방향 4.67%에서 실험체의 파괴점에 도달하였으며, LPD 실험체와 같이 중앙 기둥의 전단 손상이 집중되어 실험을 종료하였으며, 파괴모드는 중앙 기둥 휨 강도 도달 이후 전단파괴로 나타났다.

LPS 실험체의 ±0.20%에서 보 단부 영역에서 초기 휨 균열, ±0.25%에서 중앙 기둥에서 휨 균열이 나타났고, 정방향 1.00%, 부방향 -1.50%에서 접합부 전단 균열이 발생하였다. 항복점은 정방향 0.44%, 부방향 -0.48%로 네 실험체 중 가장 낮았다. 최대 하중은 정방향 2.43%에서 330.0 kN, 부방향 -2.40%에서 -317.0 kN이었다. 충간변위비

±4.5% 1cycle 가력 이후 정방향 3.58%, 부방향 -3.77%에서 파괴점이 형성되었으며, 중앙 기둥의 전단 손상이 집중되어 실험을 종료하였으며, 파괴모드는 중앙 기둥 휨 강도 도달 이후 전단파괴로 나타났다.

[표 3] 2경간 프리캐스트 모멘트골조 실험체 설계 결과 요약

실험체명		LR	LPD	LPN	LPS
P_y	충간변위비 (%)	0.80 (-0.63)	0.67 (-0.64)	0.72 (-0.87)	0.44 (-0.48)
	충간변위비 (%)	1.94 (-2.43)	3.10 (-3.31)	3.18 (-3.36)	2.43 (-2.40)
P_{max}	하중 (kN)	320.3 (-338.9)	371.6 (-382.5)	353.2 (-320.8)	330.0 (-317.0)
	충간변위비 (%)	3.76 (-3.73)	- (-)	4.67 (-)	3.58 (-3.77)
연성비 (μ)		4.7 (5.9)	≥6.71 (≥7.03)	6.48 (≥5.17)	8.13 (7.85)
P_n (kN)		310.7 (-310.7)	310.7 (-310.7)	310.7 (-310.7)	272.6 (-272.6)
P_{max}/P_n		1.03 (1.09)	1.19 (1.23)	1.13 (1.03)	1.21 (1.16)

* 괄호 안의 숫자는 부방향 가력 시기를 의미함

4. 구조성능 평가

4.1 에너지 소산 능력 검토

에너지 소산 능력은 철근콘크리트 모멘트골조의 내진성능을 나타내는 핵심 지표이다. 구조물은 지진과 같은 반복 하중을 저항할 때, 재료의 비탄성 거동과 구조적 이력거동에 의해 외부로부터 받은 에너지를 소산하게 되며, 이러한 에너지 소산 능력은 연성 및 내진성능을 더욱 정량적으로 평가가 필요하다.

구조물의 내진 저항성을 정량적으로 평가하기 위하여, 등가감쇠비(ζ_{eq})가 널리 사용된다. 이는 구조물이 입력에너지 대비 어느 정도를 반복거동을 통해 소산하는지를 나타내며, 이력곡선에서 산출된 소산에너지와 정적 변형에너지로부터 계산된다. 등가감쇠비는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_I}{E_{SO}} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 E_I 는 이력곡선에서 소산된 누적에너지, E_{SO} 는 첫 번째 이력곡선에서의 정적 변형에너지를 의미한다.

IBC (International building code)에서는 일반 구조물에 대해 허용충간변위비를 내진등급 II인 2.0%로 정의하고 있다. 이 연구에서 수행된 LR, LPD, LPN, LPS 실험체의 등가감쇠비는 각각 12.2%, 13.6%, 15.3%, 17.5%로 나타났으며, 모든 실험체는 항복점 도달 이후, 소성거동을 하면서 충간변위비가 높아질수록 등가감쇠비는 높게 나타났다. 따

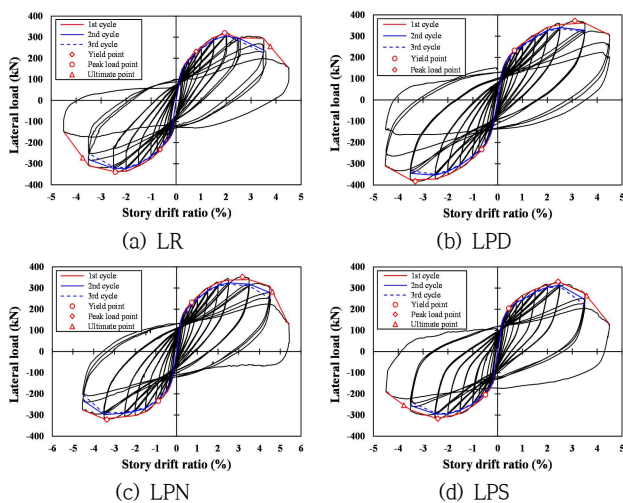


그림 7. 실험체별 하중-충간변위비 이력곡선

라서 해당 실험체들은 반복 하중 조건에서도 우수한 에너지 소산능력을 보유하고 있음을 입증하였다. [그림 8]은 모든 실험체의 누적 에너지소산량 검토를 [그림 9]는 층간변위비에 따른 등가감쇠비를 나타냈다.

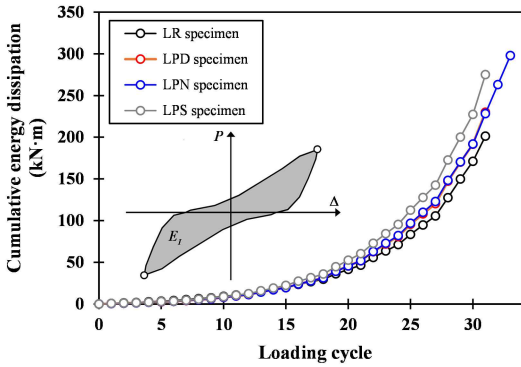


그림 8. 누적 에너지소산량 검토

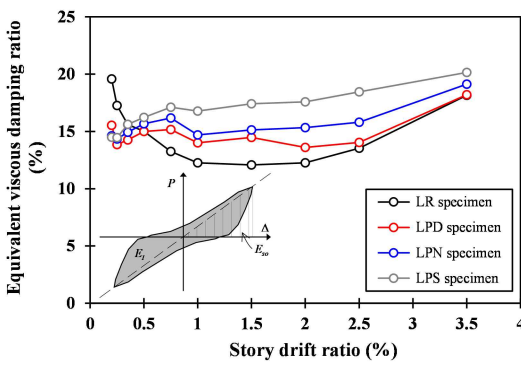


그림 9. 등가점성감쇠비 검토

4.2 활선강성 검토

구조물이 반복하중에 따라 구조적으로 손상될 경우, 초기 탄성강성에 비해 점차 강성이 저하되는 거동을 보이며, 이러한 변화는 구조물의 내진성능과 직결된다. 구조물의 이력거동의 최대 하중과 이에 대응되는 변위의 기울기로 정의되며, 구조물의 비선형 거동의 유효 강성을 평가할 수 있는 주요 평가 지표 중 하나이다. 이 장에서는 2경간 프리캐스트 콘크리트 모멘트골조 실험체의 구조적 강성 특성을 분석하기 위해 활선강성 (Secant stiffness)을 산정하였다. 각 층간변위비에 따른 첫 번째 하중 단계에서의 강도와 이에 대응되는 변위의 기울기로 활선강성을 평가하였으며 이 추이를 통해 실험체의 비탄성 거동 및 저항 성능을 분석하고자 하였다.

[그림 10]은 각 실험체의 하중-활선강성 관계를 나타내었으며, 정량적으로 평가하기 위해 각 실험체의 연성도에 따른 활선강성을 [그림 11]에 나타내었다. 초기 하중 단계 정방향 및 부방향에서 LPS 실험체와 LR 실험체가 다소 높은 강성을 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 각 실험체의 항복점 도달 이후, 강성이 감소하는 경향으로 나타났다. 특히, LPN 실험체의 경우, 접합부 내에서 보의 주철근이 150 mm 정착되어 있어 요구 정착길이를 만족하지 않아 180° 표준갈고리 정착 상세로 정착길이를 만족한 LPD

실험체보다 전반적으로 낮은 활선강성을 보유하고 있는 것으로 판단된다.

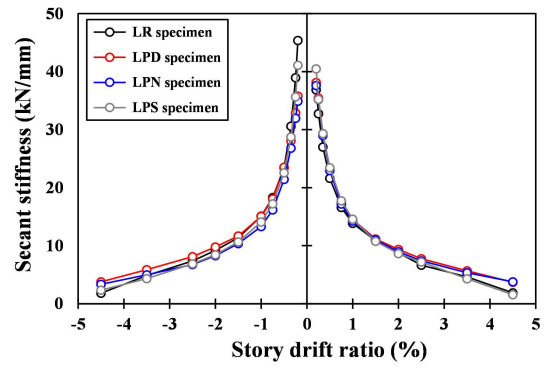


그림 10. 하중단계-활선강성 검토

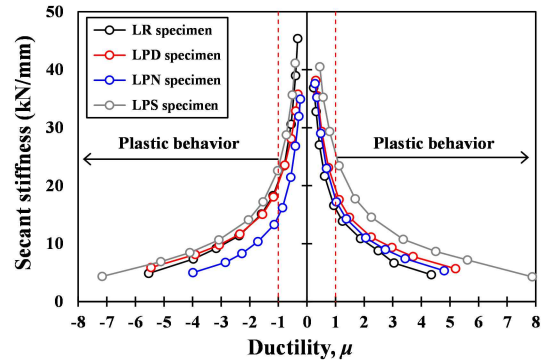


그림 11. 연성도-활선강성 검토

4.3 동등성 평가

기존 PC 공법은 구조 부재를 조립식으로 시공하여 접합부를 일체식으로 제작하는 RC 공법 대비 낮은 내진성능을 보유하고 있는 것으로 여겨진다. 이 연구에서는 PC 실험체가 RC 실험체 대비 우수한 구조성능을 정량적으로 평가하기 위해 건축물 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준 (KDS 41 20 10 : 2024) 4.6.2(1)에서 명시하고 있는 동등성 평가를 수행하였다. 이는 특수 및 중간모멘트골조 PC 실험체가 RC 실험체와 비교 가능한 내진성능을 발휘하는지를 검증하기 위한 최소 성능기준 (휨 강도, 강성, 에너지 소산능력)을 규정하고 있으며, [표 4]에는 PC 실험체의 동등성 평가 결과를 요약하여 나타내었다. 이 연구에서의 실험체는 보통모멘트골조 상세를 갖도록 설계하였으나, 동등성 평가를 수행하기 위해 중간모멘트골조의 요구사항에 따라 평가하였다.

휨 강도 평가 내용은 PC 실험체의 최대 실험강도 (E_{max})는 재료의 실제 강도를 반영하여 산정한 $1.0E_{nt}$ 이상이어야 하며, 한계변위비의 2번째 반복하중에서 실험체의 하중은 동일한 방향 최대 하중의 80% 이상을 유지해야 한다. 이는 PC 공법이 낮은 층간변위비에서 급격한 하중저감을 방지하기 위해 규정되었다.

활선강성 규정은 상대적 및 절대적 동등성 평가로 구분되며, 상대적 동등성 기준에 따르면, 한계변위비의 두 번째 반복하중에서 PC 실험체의 활선강성이 RC 실험체 강

성의 90% 이상이어야 한다. 절대적 동등성 기준에서는 한계변위비의 두 번째 반복하중 단계에서의 강성이 초기 강성의 0.05배 이상을 유지해야 하며, 중간모멘트골조의 경우 한계변위비의 $\pm 1/7$ 에서의 강성이 초기 강성의 0.05배 이상이어야 한다. 이는 반복하중에 따른 강성 저하가 구조물의 변형능력 확보를 저감하지 않도록 하기 위한 규정이다.

에너지 소산능력 평가는 할선강성 평가와 동일하게 상대적 및 절대적 동등성 평가로 구분되어 있으며 상대적 동등성 기준은 한계변위비의 두 번째 반복하중에서 PC 실험체의 에너지소산이 RC 실험체의 에너지소산의 90% 이상이어야 한다. 절대적 동등성 기준에서는 한계변위비의 두 번째 반복하중 가력 시 에너지소산비(β)가 $1/8$ 이상이어야 한다. 이는 PC 구조가 비탄성 반복거동 하에서도 충분한 연성 및 에너지 소산능력을 확보하도록 하기 위함이다.

[표 4]는 2경간 프리캐스트 모멘트골조 실험체 동등성 평가 결과를 나타내었다. 모든 실험체는 현행설계기준에서 명시하는 동등성 성능 기준을 모두 만족하였으며, 보통모멘트골조 설계 상세로 설계하였으나, 중간모멘트골조와 대등한 성능을 보유한 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 공동주택 지하주차장 지붕층을 대상으로 PC 와이드보 상세가 포함된 다양한 상세를 갖는 2경간 골조에 대해 실험적으로 구조성능을 파악하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 2경간 프리캐스트 모멘트골조의 내진성능과 접합부 영역에서 일체성능을 검증하기 위해 2경간 골조 실험체를

제작하였으며, 횡하중 반복가력 실험을 수행하였다. 실험 결과, 모든 2경간 골조 실험체의 최대 실험 강도는 재료강도를 고려하여 산정한 설계강도를 상회하였으며, 층간변위비 4.5% 이상의 우수한 연성능력을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

2. 모든 실험체의 파괴모드는 약기둥-강보에 맞춘 보통모멘트골조의 상세대로 중앙 기둥의 휨 강도 도달 이후 전단파괴로 나타났으며, 이는 기둥 콘크리트의 손상이 집중되어 콘크리트의 전단기여분(V_c)을 손실한 것으로 나타났다.

3. 실험결과(내력, 연성능력, 강성, 에너지 소산능력)를 검토한 결과, 이 연구에서 제안한 2경간 프리캐스트 모멘트골조 공법은 우수한 내진성능을 보유하고 있는 것으로 판단된다.

4. 추후 2경간 골조의 층간변위비에 따른 기둥 및 보, 접합부의 분배율을 고려하여 공동주택 지하주차장 설계 시 설계 고려사항을 제안하고, 이를 FE 해석을 통해 각 부재의 거동을 분석하고자 한다.

5. 참고문헌

김선훈, 조종, 오효근, 최석동, 여운용, 이득행, “중간모멘트골조 상세를 갖는 건식 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능평가”, 한국지진공학회 논문집 제 27권 3호, 2023년, pp.129~137.

김선훈, 이원준, 이득행, “비선형동적해석을 통한 건식 기계적이음을 갖는 프리캐스트 모멘트골조의 동등성 평가”, 한국지진공학회 논문집 제 28권 2호, 2024년, pp.85~92.

KDS 41 20 10 건축물 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준, 국토교통부, 2024.

[표 4] 2경간 프리캐스트 모멘트골조 실험체 동등성 평가 결과 요약

실험체명			LPD	LPN	LPS
강도	공칭하중, P_n (kN)		310.7		
	P_{2nd} (kN)		326.6 (-335.7)	312.6 (-281.6)	304.0 (-295.5)
	$0.8P_{\max}$ (kN)		297.3 (-306.0)	282.5 (-256.6)	264.0 (-253.6)
기준 만족 여부			만족		
강성	상대적 동등성 평가	$K_{2nd,s}$ (kN/mm)	8.98 (9.18)	8.53 (7.67)	8.33 (8.08)
		$0.9K_{2nd,RC}$ (kN/mm)	7.57 (7.98)		
	절대적 동등성 평가	K_{2nd} (kN/mm)	3.05 (3.19)	3.49 (3.64)	3.80 (2.82)
		$0.05K_i$ (kN/mm)	1.97 (1.74)	1.97 (1.70)	2.03 (1.95)
기준 만족 여부			만족		
에너지 소산 능력	상대적 동등성 평가	$E_{2nd,s}$ (kN · m)	9.13	9.77	11.41
		$0.9E_{2nd,RC}$ (kN · m)	7.78		
	절대적 동등성 평가	β_{2nd}	0.132	0.224	0.260
		β	0.125		
기준 만족 여부			만족		

* 괄호 안의 숫자는 부방향 가력 시기를 의미함