

1방향 PC무량판 슬래브의 중력하중에 대한 구조성능평가

Structural Performance Evaluation of One-Way Precast Concrete Flat Slabs under Gravity Loads

신 희 준¹⁾

Shin, Hee-Jun

이 득 행²⁾

Lee, Deuckhang

요 약

이 연구는 공동주택 지하주차장에 적용 가능한 1방향 PC무량판 슬래브의 연결 상세를 개발하고 중력하중에 대한 구조성능을 평가하고자 실험적 연구를 수행하였다. 기존의 RC무량판 공법은 복잡한 철근 배근 및 뿔뿔 전단 문제로 시공성과 구조적 일체성에 불확실성이 있어 이를 보완할 수 있는 1방향 PC무량판 공법의 적용을 검토하고자 하였다. 이를 위해 다양한 연결 철근 정착 상세 및 슬래브 형식을 변수로 총 3개의 PC 실험체를 설계하고 비교군 실험체로 RC 공법이 적용된 실험체를 추가 설계하여 정적 내력 실험을 수행하였다. 실험 결과, 모든 실험체는 재료강도를 고려한 공칭강도를 초과하였으며, PC 실험체는 우수한 초과강도비를 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 슬래브 연결 철근은 위험단면에서 항복하는 연성적인 휨 파괴 거동을 보여주었다. 실험 결과를 통해 이 연구에서 제안한 1방향 PC무량판 공법은 기존 RC무량판을 대체할 수 있는 충분한 강도와 연성을 보유한 것으로 나타났다.

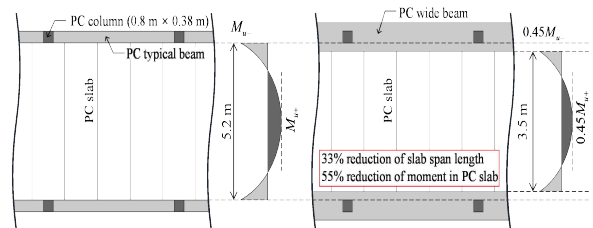
키워드 : 프리캐스트 콘크리트, 무량판, 연속슬래브, 구조성능평가, 중력하중

1. 서 론

최근 건설산업에서 신규 기술인력 유입 부족, 기능인력의 낮은 숙련도, 고임금 및 근로시간 단축 등으로 인해 공기단축 및 시공 효율성 향상을 목표로 건설환경을 변화하고 있다. 건설 원자재를 건축물 부지로 운반하여 작업자가 건설 장비를 통해 시공하는 기존 건설방식에서 벗어나 고품질·고성능·지속가능성을 목표로 하는 탈현장 공장생산 (Off-site construction, OSC) 기술이 주목받고 있다. 이러한 변화는 시공 효율성 향상 뿐만 아니라 품질 확보, 안전성 향상, 공기 단축 등 다양한 이점을 제공하며, 이에 따라 구조체를 공장에서 미리 제작하여 현장에서 조립하는 프리캐스트 콘크리트 (Precast concrete, PC) 공법이 국내외에서 빠르게 확산되고 있다. 국내 건축 PC 시장은 대형 물류시설 및 대형공장에 주로 적용되고 있으며 나아가 공동주택의 지하주차장까지 확대되어 PC 공급망을 변화시키고 있다.

지하주차장에 적용되는 무량판 구조는 시공성과 층고 절감 측면에서 장점이 있으나, 기존 RC무량판 공법은 2방향 슬래브 시스템에 기반하고 있다. 이러한 시스템은 뿔뿔 전단 및 불균형 모멘트에 대한 철근 배근이 복잡하여 시공성이 저하될 뿐만 아니라 이에 따른 구조물의 일체성에 대한 불확실성이 존재하여 추후 보수 또는 보강이 필요하다.

따라서 현재 공동주택 지하주차장에 적용 중인 RC무량판 공법을 대체하고자 장경간에 유리한 PC 공법을 적용한 1방향 PC무량판 공법에 대한 기술 개발이 필요하다. 이는 구조물의 하중 메커니즘상 뿔뿔 전단과 불균형 모멘트를 방지할 수 있어 구조적 단순성 및 경제성을 동시에 확보할 수 있다. [그림 1]은 기존 무량판 공법과 보의 폭이 넓은 와이드 보 공법 시스템의 하중 메커니즘을 나타내었으며, PC 공법과 와이드 보 시스템의 조합을 통해 장경간 슬래브를 구현하는데 특히 효과적이다.



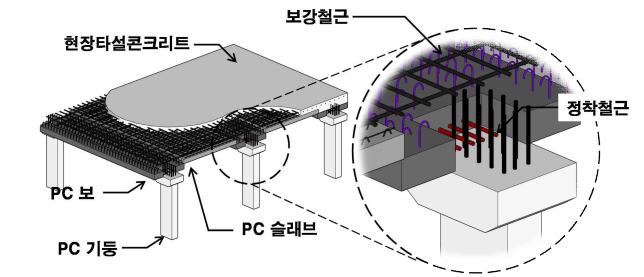
[그림 1] 1방향 와이드 보 시스템 하중 메커니즘

기존의 RC무량판 공법을 대체하기 위해 PC무량판 공법은 PC 보 상부에 PC 슬래브를 위치한 후 슬래브 연결 철근을 배근하고 덧침콘크리트 (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 배근 상세가 복잡하여 접합부 정착철근의 배근 상세를 개선

1) 충북대학교 건축공학과 학사과정

2) 충북대학교 건축공학과 교수

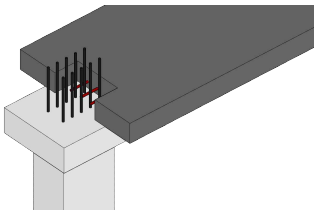
하고 안전성과 시공성을 향상시킬 수 있는 PC무량판 접합 상세를 개발하고자 한다.



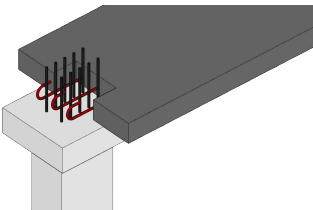
[그림 2] PC무량판 접합부 정착 상세

이 연구에서는 기존의 공동주택 지하주차장을 대상으로 기존 RC무량판 공법 대신 1방향 PC무량판 공법을 적용하고자 다양한 PC무량판 공법의 접합 구조성능을 실험적으로 검토하고자 한다. 또한, 공동주택 거주자의 사용성과 경제성을 고려하였을 때 층고 절감을 위한 다양한 PC무량판 형태를 적용하여 구조물의 일체성을 평가하고자 하며, [그림 3]과 같이 다양한 접합부 정착 상세에 따른 PC무량판 공법을 개발하고자 한다.

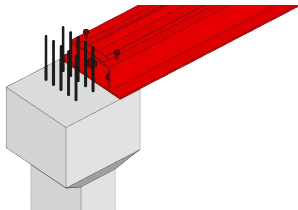
[그림 3-a]에 나타난 정모멘트 이형철근 정착 상세는 콘크리트구조 정착 및 이음 설계 기준 (KDS 14 20 52 : 2024) 4.4.2(1)에서 ‘단순부재의 정모멘트 철근의 1/3 이상, 연속부재에서 정모멘트 철근의 1/4 이상을 부재의 같은 면을 따라 받침부까지 연장하여야 한다. 보의 경우는 이러한 철근을 받침부 내로 150mm 이상 연장하여야 한다.’고 명시하고 있어 이 상세를 적용하였다. [그림 3-b]는 보의 하부 주철근(즉, 정모멘트 철근)의 접합부 내에서 정착 상세를 만족시키기 위해 180° 표준갈고리 정착 상세를 적용하였으며, 또한, 공동주택 지하주차장의 층고 절감을 극대화하기 위해 [그림 3-c]와 같이 강제형 합성보 상세도



(a) 정모멘트 이형철근 정착 상세



(b) 180° 표준갈고리 정착 상세



(c) 강제형 합성보 상세

[그림 3] PC무량판 공법 상세

[표 1] 연속슬래브 실험체 설계 요약

실험체명	적용공법	실험체 상세	적용 모듈	실험체 축소	지점 경간
GR-D	RC	RC 공법	8.2 m × 5.5 m	100%	2.5 m
GPN-D	PC	보 주철근 정착길이 확보			5.5 m × 8.2 m
GPS-H		보 주철근 정착길이 미확보			
GPN-H		강제형 합성보			

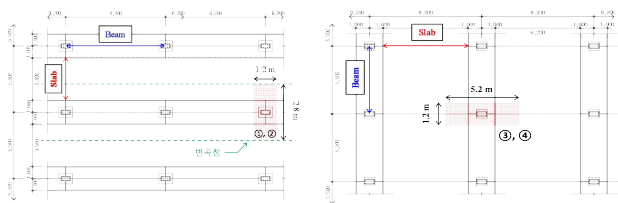
함께 개발하였다.

2. 중력하중 정적 실험

1방향 PC무량판 공법을 적용한 연속슬래브 골조의 구조성능을 검증하기 위해 접합부에서의 실제 구조물에서 발생하는 중력하중(사용하중, 계수하중)에 대해 내력을 검토하여야 한다. RC무량판 공법과 PC무량판 공법을 적용한 실험체에 대해 중력하중 정적 실험을 수행하고, 실험 결과를 정량적으로 평가함으로써 PC무량판 접합부의 구조성능을 평가하고자 한다.

2.1.1 실험체 개요 및 설계 변수

모든 실험체는 공동주택 구조물의 규모와 동일한 실대형 규모로 실험체를 설계하였으며, 중력하중 발생 시 변곡점을 고려하여 [그림 4]과 같이 모듈에 따른 연속 실험체의 규모를 결정하였다. 중력하중 정적 실험을 위한 실험체는 접합부에서 우수한 시공성을 도모할 수 있는 철근 배근 및 보, PC 슬래브를 변수로 하여 연속슬래브 골조 실험체 총 4개(PC-3개, RC-1개)를 설계하였다. [표 1]은 연속슬래브 실험체 설계 사항을 요약하였다.



8.2 × 5.5 type 5.5 × 8.2 type
[그림 4] 지하주차장 모듈에 따른 연속 슬래브 실험체 계획

(1) GR-D 실험체

GR-D 실험체는 공동주택 지하주차장의 8.2 m × 5.5 m 모듈을 적용한 비교군 실험체로 기둥 단면의 폭과 높이는 각각 0.38 m, 0.8 m이며, 길이방향 철근은 12-UHD22로 배근하였다. 기둥 상단은 철근 간섭 최소화를 위해 확대머리 정착 상세로 설계하였다. 보 단면의 폭과 높이는 각각 2.0 m, 0.5 m이며, GR-D 실험체의 위험단면은 보 단부에서 0.6 m 돌출되도록 설계하였으며, 걸침길이는 50 mm이다. 보-슬래브 연결 철근은 상부 SHD10@200, 하부 SHD13@600으로 배근되었다.

(2) GPN-D 실험체

GPN-D 실험체는 공동주택 지하주차장의 8.2 m × 5.5 m 모듈을 적용한 1방향 PC무관량 공법의 실험체이다. 보 주철근(4-UHD25)은 PC 기둥 내부로 190 mm가 돌출되도록 배근하였으며, 기둥, 보, 슬래브 단면 상세를 포함한 나머지 설계 사항은 GR-D 실험체와 동일하다.

(3) GPS-H 실험체

GPS-H 실험체는 공동주택 지하주차장의 5.5 m × 8.2 m 모듈을 적용한 구조로, 데크 슬래브가 적용된 다른 실험체보다 실험체의 경간이 길게 설계되었다. 기둥 단면의 폭과 높이는 각각 0.8 m, 0.38 m이며, 기둥의 길이 방향 철근은 12-UHD22로 배근되었다.

강재형 합성보 단면의 폭과 높이는 각각 0.9 m, 0.47 m이며, PC 기둥 상부면에는 2개의 M19 전산볼트를 이용해 합성보를 조립하였다. 단면 높이 320 mm인 중공슬래브는 강재형 합성보 하부 플랜지에 80 mm 걸침 길이로 설계하였다. 보 상부에는 8-UHD22가 배근되었으며, 보와 슬래브 연결철근은 SHD10@300으로 배근되었다.

(4) GPN-H 실험체

GPN-H 실험체는 공동주택 지하주차장의 5.5 m × 8.2 m 모듈을 적용한 구조로, 중공슬래브와 와이드 보가 적용된 실험체이다. 기둥 단면의 폭과 높이는 각각 0.8 m, 0.38 m이며, PC 보의 덧침콘크리트는 전단부와 후단부 기준 각각 300 mm, 600 mm 높이로 설계되었다. 보 주철근 (4-UHD25)은 PC 기둥 내부로 190 mm 돌출되도록 배근되어 있으며, 단면 높이 320 mm의 중공슬래브는 와이드 보에 걸침 길이 80 mm로 설계되었다. 슬래브 상부 철근은 12-UHD22가 배근되었다.

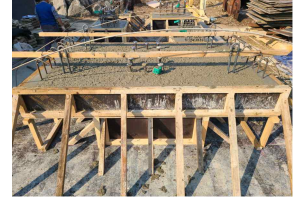
2.1.2 실험체 제작 과정

연속슬래브 실험체는 경기도 이천시에 위치한 PC 전문 제작 전문업체인 토탈피씨산업에서 제작되었으며, 모든 실험체들은 [그림 4]와 같이 각 시공 공법에 따라 제작되었다.

GR-D



(a) 기둥, 보 하부 철근 배근



(b) 기둥, 보 콘크리트 타설

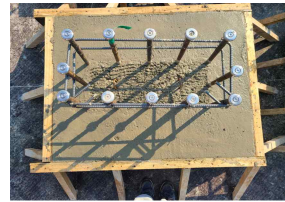
GPN-D, GPS-H, GPN-H



(c) PC 기둥 철근 배근



(d) PC 보 철근 배근



(e) PC 기둥 콘크리트 타설



(f) PC 보 철근 배근

GR-D, GPN-D



(g) 데크 슬래브 배치 및 철근 배근



(h) 슬래브 콘크리트 타설

GPS-H



(i) 강재형 합성보 제작



(j) 합성보-중공슬래브 조립



(k) 슬래브 상부 철근 배근



(l) 슬래브 콘크리트 타설

GPN-H



(m) 슬래브 상부 철근 배근



(n) 슬래브 콘크리트 타설

[그림 4] LPD 실험체 제작 과정

2.1.3 재료 실험

[표 2]와 [표 3]은 연속슬래브 중력하중 정적내력 실험체 제작에 사용된 콘크리트와 철근에 대한 재료 시험 결과를 정리하여 나타내었다. PC 및 RC 콘크리트의 설계 압축강도는 각각 40 MPa로 동일하며, PC 및 RC 콘크리트의 실제 압축강도는 39.5 MPa ~ 42.9 MPa 수준으로 나타났다. 철근의 항복강도는 설계 항복강도를 상회하였으며 인장강도는 현행 설계기준에 부합하는 것으로 나타났다.

[표 2] 연속슬래브 실험체 콘크리트 압축강도 시험 결과

구분	콘크리트 시험 압축강도 (f'_c , MPa)			
	GR-D	GPN-D	GPS-H	GPN-H
주두	45.5			
보	38.8	50.6	-	50.6
덧침콘크리트		38.8	38.8	38.8

[표 3] 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

2.2 가력 및 측정 방법

1방향 PC무량판 연속슬래브 중력하중 정적내력 구조성능을 평가하기 위해 [그림 5]와 같이 실험을 수행하였다. 연직하중 용량은 1,000 kN의 액추에이터(Actuator)를 이용하여 가력하였으며, 양단 지점은 핀 지점으로 설정하여 실험을 진행하였다. 가력은 액추에이터에 기둥 단면과 유사한 면적의 철물을 연결하여 수행하였다.



[그림 5] 연속슬래브 중력하중 정적내력 실험체 세팅안

공동주택 지하주차장 구조물에 발생할 수 있는 하중을 고려하여, 중공슬래브를 적용한 실험체(핀 지점 설계)를 제외한 실험체의 경우, 잔류변형 측정을 위해 나머지 슬래브 실험체에 대해 [표 4]와 같이 3단계 가력을 수행하였다.

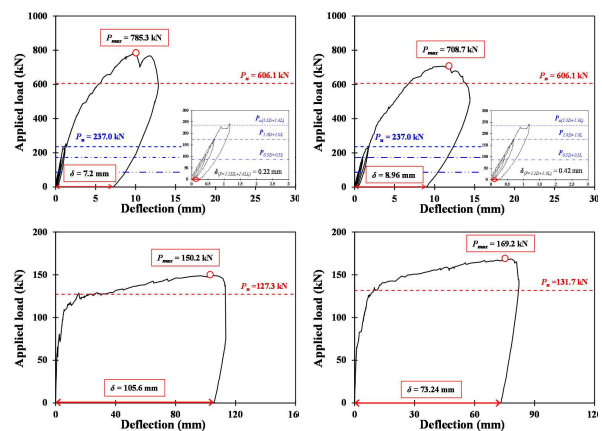
[표 4] 테크슬래브 적용 실험체 가력 하중 조합

하중	Dead Load	Live Load	0.5DL+ 0.5LL	1.0DL+ 1.0LL	1.2DL+ 1.6LL
ω (kN/m)	28.9	19.2	24.1	48.1	65.4
P_u (kN)	104.1	69.1	86.6	173.3	235.6

3. 실험 결과

모든 실험체의 최대 실험 강도는 재료 강도를 고려하여 산정한 설계강도를 상회하였으며, 기둥 및 브라켓의 손상은 경미한 수준으로 나타났다. 각 실험체의 파괴모드는 휨 파괴로 나타났으며, 설계 시 의도한 바와 같이 위험 단면 즉, 변단면 구간에서 균열이 집중되는 양상을 보였다. 특히, GPS-H 실험체는 합성보와 기둥 계면에서 균열이 집중되는 양상을 보였다. [그림 6]에는 모든 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내었으며, [표 4]에는 모든 실험체의 실험 결과를 요약하였다.

- (1) GR-D 실험체 실험 결과, 최대 하중(P_{max})은 785.3 kN, 최대 변위(δ)는 10.04 mm로 측정되었으며, 이는 공칭강도(P_n)인 606.1 kN 대비 약 29.6% 높은 수준이다.
- (2) GPN-D 실험체 실험 결과, 최대 하중(P_{max})은 708.7 kN, 최대 변위(δ)는 11.78 mm로 측정되었으며, 이는 공칭강도(P_n)인 606.1 kN 대비 약 16.9% 높은 수준이다.
- (3) GPS-H 실험체 실험 결과, 최대 하중(P_{max})은 150.2 kN, 최대 변위(δ)는 103.0 mm로 측정되었으며, 공칭강도(P_n)인 123.7 kN 대비 약 18.0% 높은 수준이다.
- (4) GPN-H 실험체 실험 결과, 최대 하중(P_{max})은 169.2 kN, 최대 변위(δ)는 73.2 mm로 측정되었으며, 공칭강도(P_n)인 131.7 kN 대비 약 14.0% 높은 수준이다.



[그림 6] 모든 실험체 하중 변위 곡선

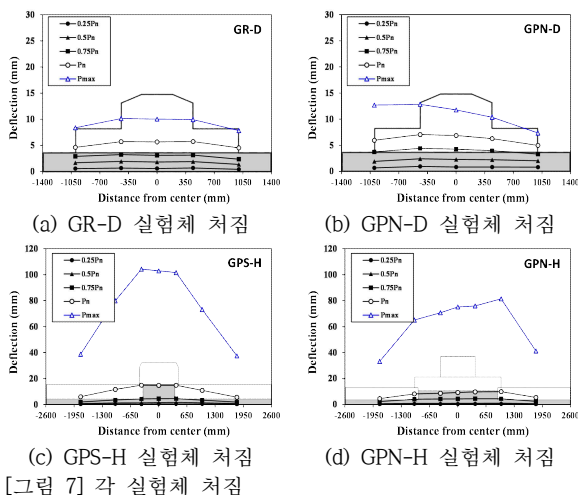
[표 4] 각 실험체 결과 요약

실험체명	하중 조합	실험체 하중	잔류 변위
GR-D	0.5DL + 0.5LL	110.7 kN	0.04 mm
	1.0DL + 1.0LL	177.1 kN	0.06 mm
	1.2DL + 1.6LL	241.0 kN	0.22 mm
	P_n	606.1 kN	-
	P_{max}	785.3 kN	7.2 mm
GPN-D	0.5DL + 0.5LL	91.6 kN	0.06 mm
	1.0DL + 1.0LL	177.4 kN	0.16 mm
	1.2DL + 1.6LL	239.4 kN	0.42 mm
	P_n	606.1 kN	-
	P_{max}	708.7 kN	8.96 mm
GPS-H	P_n	127.3 kN	-
	P_{max}	150.2 kN	103.0 mm
	P_{max}/P_n	1.18	-
GPN-H	P_n	131.7 kN	-
	P_{max}	169.2 kN	73.2 mm
	P_{max}/P_n	1.28	-

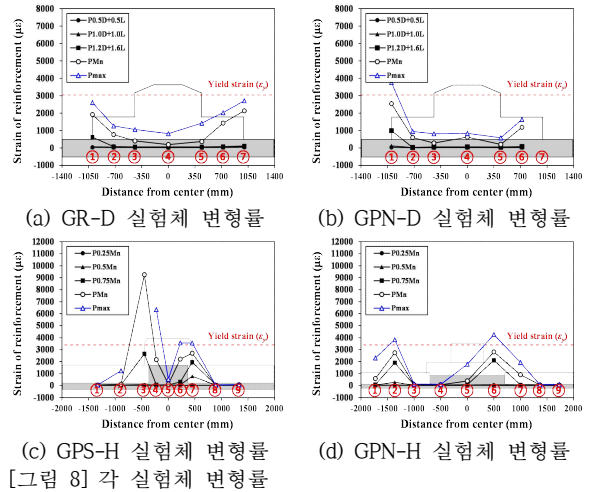
DL : Dead Load, L : Live Load

4. 처짐 및 변형률 분석

[그림 7]과 [그림 8]은 각각 계측장비와 주철근의 변형률 측정 결과, [표 5]에는 각 실험체의 처짐 및 잔류변형의 요약을 나타내었다. 모든 실험체는 기둥 및 주두 부분에서 최대 처짐이 발생한 것으로 나타났으며, 실험체의 연결 철근은 모두 위험 단면 즉, 변단면 구간에서 항복한 것으로 나타났다. 또한, 기둥 및 브라켓의 손상은 경미한 수준으로 나타났다.



[그림 7] 각 실험체 처짐



[그림 8] 각 실험체 변형률

[표 5] 각 실험체의 처짐 및 잔류변형 요약

구분	GR-D	GPN-D	GPS-H	GPN-H
Δ_{Pmax} (mm)	10.0	11.8	103.0	75.2
Δ_r (mm)	7.2	9.0	105.6	73.2

5. 결론

이 연구에서는 공동주책 지하주차장을 대상으로 1방향 PC무량판의 다양한 연결 상세를 변수로 연속슬래브 골조에 대해 실험적으로 구조성능을 파악하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. RC무량판 공법에서 PC무량판 공법으로 전환 설계를 수행함으로써 돌림전단, 불균형 모멘트에 유리한 PC무량판에 대해 구조안전성을 확보할 수 있는 상세를 제안하였으며, 실무에서 설계 적용가능성을 평가하였다. 현행설계 기준에 따라 설계한 결과, 이 연구에서 제안한 PC무량판 공법은 실무에서 충분히 적용가능한 것으로 판단된다.

2. 모든 실험체의 최대 실험 강도는 재료강도를 고려하여 산정한 설계강도를 상회하였으며, 각 실험체는 설계한 것과 같이 휨 파괴모드를 나타냈다.

3. 모든 실험체의 연결 철근은 위험단면 즉, 변단면에서 모두 항복하였으며, 균열 또한 위험단면에 집중되는 양상을 보였다. PC 실험체(GPN-D)와 RC 실험체(GR-D)를 비교한 결과, PC 실험체의 처짐과 잔류변형은 RC 실험체와 대등한 수준으로 나타났다.

4. 실험체의 강도, 연성, 균열, 변형률, 처짐을 정량적으로 분석한 결과, 이 연구에서 제안한 제작 공법 및 슬래브 유형의 구조성능은 우수한 것으로 판단된다.

5. 이 연구에서는 1방향 PC 연속 슬래브의 거동을 평가하고자 실험적 연구를 수행하였으며 추후 격마구조로서의

거동을 평가하고자 해석적 연구를 수행하여 연결성능을 평가할 필요가 있다.

6. 참고문헌

- KDS 14 20 20 : 2022 콘크리트구조 휨 및 압축 설계기준, 국토교통부, 2022.
- KDS 14 20 22 : 2022 콘크리트구조 전단 및 비틀림 설계 기준, 국토교통부, 2022.
- KDS 14 20 52 : 2024 콘크리트구조 정착 및 이음 설계기준, 국토교통부, 2024.
- KDS 14 20 62 : 2022 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준, 국토교통부, 2022.
- KDS 41 20 10 : 2024 건축물 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준, 국토교통부, 2024.
- Chen, X., Liu, Y., Ma, Q., Zhou, P., Liu, X., and Lin, J., Finite element analysis of flexural performance of reinforced truss hollow composite concrete slabs, Scientific Reports, Vol. 15, Article No. 7057, 2025.
- Moon, J. H., Choi, Y. C., Lim, J. H., Lee, L. H., Kwon, K. H., and Kim, K. S. "Post-Tensioned Interior Precast Wide Beam-ColumnConnections Subjected to Lateral Loading." Advances in Structural Engineering, Vol. 10, No. 5 2007, pp.487-500