실용과제 연구관리-2025-039

LH 주차장 1방향 PC구조 공법 제안

Development of a One-Way Precast Concrete(PC) Method for LH Parking Lot

김민준 이범식
박시현 오정민
신장효 형성혁



LH 토지주택연구원

연구관리 2025-039

LH 주차장 1방향 PC구조 공법 제안

지 은 이 김민준, 이범식, 박시현, 오정민, 신장효, 형성혁
발 행 인 정창무
발 행 처 한국토지주택공사 토지주택연구원
주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99
홈페이지 http://lhri.lh.or.kr

전화번호 042-866-8678

이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로써 공사나 정부의 공식적인 견해와 관계가 없습니다.
우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

연구관리 2025-039

LH 주차장 1방향 PC구조 공법 제안

Development of a One-Way Precast Concrete(PC) Method for LH Parking Lot

김민준·이범식·박시현·오정민·신장효·형성혁

LH 토지주택연구원

참여 연구진

연구책임
김민준 LH 토지주택연구원 수석연구원

연구진
이범식 LH 토지주택연구원 연구위원
박시현 LH 토지주택연구원 수석연구원
오정민 LH 토지주택연구원 주임
신장효 LH 공공주택본부 설계검증처
형성혁 LH 공공주택본부 설계검증처

연구심의위원(가나다순)
이동건 LH 토지주택연구원 수석연구원
이용준 까뮤이앤씨 수석연구원
전주영 LH 토지주택연구원 건설기술연구실장
전명훈 LH 토지주택연구원 연구위원
하상수 강남대학교 교수
한선진 전주대학교 교수

자문위원(가나다순)
김길희 공주대학교 교수
이정윤 성균관대학교 교수
오영훈 건양대학교 교수

위탁연구
위탁기관 (사)대한건축학회
용역책임 인하대학교 김창혁 교수
연구진 한밭대학교 김승훈 교수
충북대학교 이득행 교수
연우구조 최석동 대표

LH 주차장 1방향 PC구조 공법 제안

김민준 수석연구원 (연구책임) | 이범식 연구위원 | 박시현 수석연구원 | 오정민 주임 | 신장효 차장

미래 건설환경 변화에 적극 대응할 수 있는 LH 탈현장(OSC)공법의 요소기술을 개발하여 LH 공동주택 건설품질확보 필요

- '23년 4월 발생한 인천검단지구(AA13-2BL) 주차장 붕괴 사고 이후, LH 공동주택의 품질 확보가 가능한 탈현장(OSC) PC공법에 대한 연구의 시의성 증대
- LH는 2030 LH OSC 로드맵 (주거혁신처)을 선포하여 LH 사업에 적용할 예정으로 이를 뒷받침 할 수 있는 기술적인 대안이 필요한 시점임

LH 공동주택 주차장에 품질관리에 용이한 PC구조 공법의 적용에 대한 연구 필요

- 건설품질 확보 및 시공관리에 유리한 PC공법을 주차장 구조에 적용할 경우, 적기에 고품질 LH 공동주택을 공급할 수 있을 것으로 판단됨
- LH 실무부서에서는 공동주택 주차장에 적용할 수 있는 1방향 PC보-기둥 구조 공법을 제안하고 이에 대한 구조안전성 등 실무적용성 검증을 요청하였음
- LH 공동주택에 제안된 PC공법을 적용하기 위해서는 현행 구조설계에 근거한 검증(해석 및 실험) 데이터가 축적되어야 하며, 향후 LH 공동주택 주차장 설계에 반영할 수 있는 구조 지침 등의 마련이 필요함

본 연구에서는 LH 공동주택 주차장을 대상으로,

❶ LH 설계검증처에서 제안한 1방향 PC보-기둥 공법의 구조안전성 등 실무적용성 검증

❷ LH 주차장 PC공법 확대 적용을 위한 1방향 PC무량판 공법의 제안 및 구조안정성 검증

❸ 연구결과로부터의 LH 공동주택 주차장의 실무적용성 검토

이를 토대로 해석 및 실험적 연구를 수행하여 LH 주차장 PC구조 공법의 방향성을 제시

CONTENTS

❶ 1방향 PC구조 제안
❷ 1방향 PC구조 공법의 구조성능평가
❸ 1방향 PC구조의 실무적용성 검토

주차장 # 1방향 # PC구조 # 공법

1 1방향 PC구조 제안

• 건설생산성 향상 및 고품질화가 기대되는 PC공법을 이용한 LH 공동주택 주차장 건설을 위하여 PC보 및 기둥을 활용한 1방향 PC구조 공법 제안

■ 주차장 PC공법의 특징

○ **(건설현황)** LH는 공동주택 주차장에 RC 보-기둥 구조 및 LHFS(LH-Flat Slab)을 주로 적용하고 있음. 대형 민간건설사의 경우, PC공법을 공동주택 주차장에 적용중이며, 향후 PC공법 주차장을 확대할 계획임

○ **(장점)** LH 공동주택 주차장에 PC공법을 적용할 경우 다음과 같은 이점이 있음

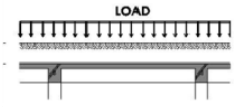
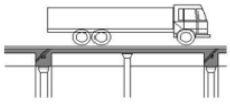
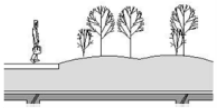
- PC부재의 표준화로 주차장 품질관리 용이
- 현장여건(날씨 및 기타공정)에 영향이 적어 공사기간 관리 용이
- PC골조 공사 작업 중 발생하는 분진과 PC부재 생산에 따른 CO_2 감소 가능(RC공법 대비)
- PC부재의 장경간 확보, PC기둥 효율적 배치로 주차 설계 유연성 확보(차량 문 찍힘 방지, 주차대수 증가)

■ LH 아파트 주차장 하중 조건 검토

○ LH 아파트 주차장은 규모 및 주차대수가 표준화되어 있으므로 하중 조건을 검토 후 주차장 프로토 타입 선정

- 주택건설기준 등에 관한 규정, 대통령령 제34092호, 2024. 1. 2., 일부개정
- LH 주차장 하중조건 검토: 시공하중, 성토하중, 작업하중 등 고려
- PC공법(PC보 및 PC기둥)을 이용한 장경간 확보 가능성 검토(최대 8.2m)

※ 주차장 하중조건 검토 예

내 용	하 중 재 하 형 태		
	주 차 장	시 공 시	조 경
세가지 중 불리한 경우 적용			
	DL : 슬래브자중+무근Con'c LL : 16.0 kN/m²+흙 H_V : 상재흙	DL : 슬래브자중+무근Con'c LL : 이동하중	DL : 슬래브자중+무근Con'c LL : 5.0 kN/m² H_V : 조경흙하중

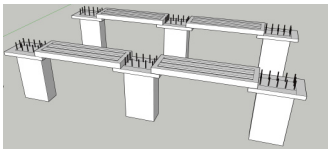
1방향 PC구조 공법 제안

○ 본 연구에서 제안된 1방향 PC구조 공법은 PC보-기둥 구조와 PC무량판 구조로 제안되어 LH 공동주택 주차장 건설 특성에 맞게 적용할 수 있음

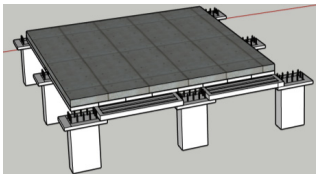
○ 1방향 PC보-기둥 구조는 폭 2,000mm의 PC보와 PC기둥을 골조시스템으로 적용하였으며, 슬래브는 데크플레이트 슬래브를 적용

- 데크플레이트 슬래브 특징: 동바리가 없기 때문에 하층의 작업이 용이, 거푸집의 해체공정이 줄어들어 공기단축 기대, 철재거푸집과 보강근을 사용하여 구조적 안전성 확보 등

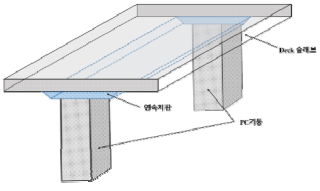
※ 1방향 PC보-기둥 공법 예시



PC보-기둥 설치



데크플레이트 슬래브 설치 후 덧침 콘크리트 타설

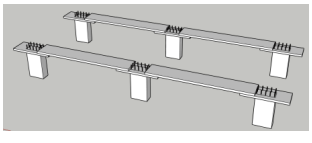


투시도

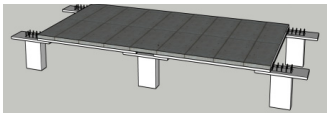
○ 1방향 PC무량판 구조는 층고절감을 극대화시킬 수 있는 철골합성보-PC기둥의 접합상세로 Slim 플로어 형태(무단차)로 제안하였으며, 슬래브는 할로우 코어 슬래브 적용

- 할로우코어 슬래브 특징: PC슬래브 내에 중공을 두어 경량화, 장 스팬 구현가능, 생산 특성상(베드 타입 생산) 모듈화 가능

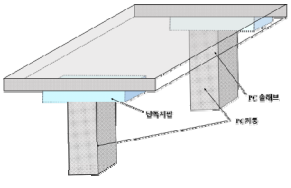
※ 1방향 PC무량판 공법 예시



철골합성보 및 PC기둥 설치



할로우 코어 등 슬래브 설치 후 덧침 콘크리트 타설



투시도

○ 제안된 모든 1방향 PC구조 공법은 PC보-기둥 하부에 브라켓을 두어 PC부재 설치 시의 시공 안정성 및 구조 안정성을 확보하였음

○ 또한, 제안된 1방향 PC구조 공법은 건설 현장에서 널리사용되는 데크 플레이트 슬래브 외에도 현장타설 콘크리트 슬래브, 할로우 코어 슬래브, 역리브 슬래브 등 다양한 슬래브가 적용 가능한 장점이 있음

2 1방향 PC구조 공법의 구조성능평가

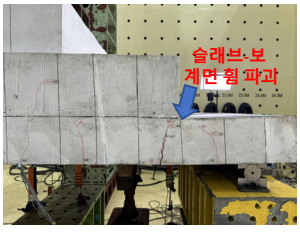
• 현행 국가건설기준에 근거한 구조실험 및 해석을 수행하여 제안된 1방향 주차장 PC구조 공법의 구조안정성을 입증하였으며, 이를 통하여 실무적용을 위한 정량적 데이터를 도출하였음

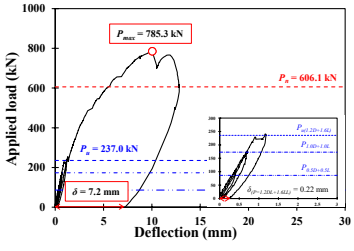
1방향 PC구조 공법의 중력하중 실험

○ **(실험개요)** 본 연구에서 제안된 1방향 PC구조 공법의 접합부 영역을 대상으로, 철근 배근 상세, 슬래브 등을 변수로 하여 연속슬래브 골조 실험체를 실물크기로 제작 후 중력하중 실험 수행

○ **(실험결과)** 모든 실험체는 실험변수(철근 배근상세, 슬래브 등)에 관계없이 RC무량판 공법과 동등이상의 내력과 변형능력을 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 현행 기준(KDS) 기준의 공칭강도를 상회하는 것으로 나타났음. 또한 실험체 설계에서 의도한 바와 같이 슬래브와 PC보의 연결부에서 파괴되는 결과가 나타나 설계의 타당성을 입증하였음

※ 중력하중 실험 결과





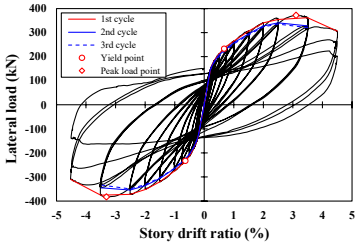
1방향 PC구조 공법의 반복하중 실험

○ **(실험개요)** 본 연구에서 제안된 1방향 PC구조 공법의 접합부 영역을 대상으로, 철근 배근 상세, 슬래브 등을 변수로 하여 2경간 골조 실험체를 약 60% 축소 모형으로 제작 후 횡하중 반복가력 실험 수행

○ **(실험결과)** 모든 실험체는 실험변수(철근 배근상세, 슬래브 등)에 관계없이 RC공법과 동등이상의 내력과 변형능력을 보유하고 있는 것으로 나타났으며, 현행 기준(KDS) 기준의 공칭강도 및 연성 능력을 상회하는 것으로 나타났음. 또한 실험체 설계에서 의도한 바와 같이 경간과 경간 사이 PC기둥의 소성힌지 구간에서 파괴되는 결과가 나타나 설계의 타당성을 입증하였음

※ 반복 실험 결과



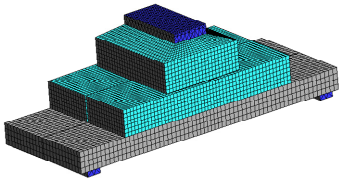


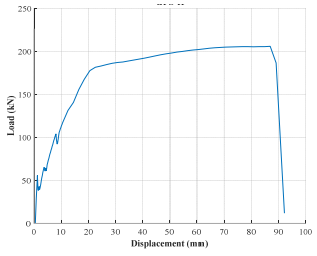
■ 전산해석을 통한 구조성능평가의 타당성 검증

○ **(해석개요)** 본 연구에서 통하여 수행된 1방향 PC구조 공법의 구조성능평가 및 설계의 타당성을 검증하기 위하여 범용 유한요소 해석 프로그램(ATENA)를 사용하여 전산해석을 수행하였음

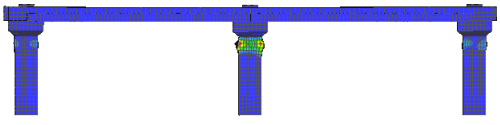
○ **(해석결과)** 전산해석결과, 1방향 PC구조 공법의 중력하중 및 반복하중 실험과 최대 하중 파괴 모드, 철근 항복 시점 등 구조성능에 주요한 영향을 미치는 인자 등이 유사함을 확인하였음. 이를 통하여 구조성능평가의 타당성을 검증하였음

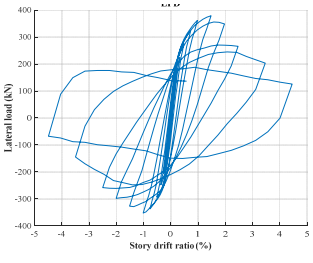
※ 전산 해석 결과





중력하중 해석결과





반복하중 해석결과

3 1방향 PC구조 공법의 실무적용성 검토

• 제안된 1방향 PC구조 공법의 실무적용성 검토를 위하여 실무도면 작성, 물량검토, 실무적용 시 중점고려사항 등을 정리하였음

■ 1방향 PC보-기둥 구조의 실무도면 작성

○ **(개요)** LH 공동주택 주차장에 현장적용이 가능하도록 제안된 1방향 PC보-기둥 공법의 실무 도면을 작성하였음

○ **(결과)** 작성도면은 PC보, PC기둥, 접합부 등의 프로토 타입으로 제공하였으며, 향후 LH 공동주택 주차장 특성에 부합하게 설계변경 가능

■ 1방향 PC보-기둥 구조의 물량 비교

○ **(개요)** 1방향 PC보-기둥 구조와 RC공법으로 전환설계 된 1방향 RC보-기둥 구조를 대상으로 현장작업

철근과 콘크리트 물량을 비교하였음. 비교 대상은 주차장 최상 지붕층을 대상으로 하였으며, 슬래브는 데크 플레이트 슬래브로 한정하였음

○ **(비교결과)** 1방향 PC보-기둥 공법은 동일 하중조건일 때 RC공법 대비 현장작업 철근 및 콘크리트 물량이 감소되는 것으로 나타났음

※ PC공법과 RC공법의 물량 검토 결과

적용 공법 명		PC공법		RC공법	
		보	기둥	보	기둥
철근	현장배근 전체 철근량 (kg)	①615.8	②5.7	③1,184.1	④278.8
	단위면적 (m^2)	45.1	45.1	45.1	45.1
	현장배근 단위 철근량 (kg/m^2)	13.65	0.126	144.8	210.1
	RC공법 대비 비교 (현장작업 감소량)	**①/③ (▽48.0%)**	**②/④ (▽98.0%)**	-	-
콘크리트	현장타설 전체 콘크리트량 (m^3)	⑤3.428	⑥0.060	⑦8.180	⑧1.327
	PC부재 전체 콘크리트량	4.752	1.267	-	-
	RC공법 대비 비교 (현장작업 감소량)	**⑤/⑦ (▽58.0%)**	**⑥/⑧ (▽96.0%)**	-	-

* 슬래브는 모두 데크 플레이트 슬래브 적용

■ 1방향 PC무량판 공법의 실무적용성 검토

○ **(구조안전성)** LH 설계검증처에서 제안된 1방향 PC구조 공법은 구조성능평가 및 전산해석 결과, 관련 구조기준을 만족하였으며, 실험체 설계 시 의도한 파괴모드가 나타나 구조적 안전성을 입증하였음

○ **(품질확보)** 1방향 PC보-기둥 공법은 현장작업 물량이 감소되어, LH 공동주택 주차장의 품질관리가 용이할 것으로 보이며, 데크 플레이트 슬래브 사용으로 시공용 가설재(서포트)의 최소화를 구현할 수 있어 시공성 향상 및 안전사고 저감이 가능함

○ **(실무적용을 위한 중점 관리사항)** PC공법 특성 상 접합부에서 구조성능저하가 발생할 수 있으므로 시공시 접합부 품질관리(철근배근, 거친면 처리)가 철저히 이루어져야 함

차례

Ⅰ. 연구배경 및 목적 ····· 1

Ⅱ.1방향 PC구조 공법의 제안 ····· 7

Ⅲ. 1방향 PC구조 공법의 구조성능평가 ····· 19

Ⅳ. 1방향 PC구조 공법의 실무적용성 검토 ····· 103

Ⅴ. 결론 ····· 117

표차례

[표 2-1] 선행연구 및 시사점 정리(LH 내부연구) ····· 9
[표 2-2] 선행연구 및 시사점 정리(외부수행 연구) ····· 11
[표 2-3] 주차장 설계하중 산정 ····· 12

[표 3-1] 중력하중 실험체 설계 요약 ····· 20
[표 3-2] 실험체 콘크리트 압축강도 시험 결과 ····· 29
[표 3-3] 실험체 철근 인장강도 시험 결과 ····· 29
[표 3-4] 데크슬래브 적용 실험체 가력 하중 조합 ····· 30
[표 3-5] 와이드 보 적용 실험체 가력 하중 조합 ····· 30
[표 3-6] 실험체 단면 내력 산정결과 ····· 32
[표 3-7] GR-D 실험체 실험 결과 요약 ····· 33
[표 3-8] GPN-D 실험체 실험 결과 요약 ····· 36
[표 3-9] GPS-H 실험체 실험 결과 요약 ····· 39
[표 3-10] GPN-H 실험결과 요약 ····· 42
[표 3-11] 1방향 PC구조 반복하중 실험체 설계 요약 ····· 45
[표 3-12] 반복하중 실험체 콘크리트 압축강도 실험결과 ····· 55
[표 3-13] 반복하중 실험 결과 요약 ····· 85
[표 3-14] 반복하중 실험체 주요 층간변위비에 따른 잔류변형 ····· 89
[표 3-15] 해석에 사용된 콘크리트 및 철근의 재료 물성치 ····· 92
[표 3-16] 중력하중 실험체의 해석결과 비교 ····· 98
[표 3-17] 반복하중 실험체의 해석결과 비교 ····· 100

[표 4-1] PC공법과 RC공법의 물량 검토 결과 ····· 111

그림차례

[그림 1-1] 건설산업 생산성 저하 (콘크리트 비전 2050, 한국콘크리트학회) ····· 1
[그림 1-2] 2030 LH OSC 주택 로드맵 ····· 2
[그림 1-3] LH 공동주택 PC공법 적용을 위한 연구 방안 ····· 2
[그림 1-4] LH PC공동주택 건설 사업 현황 ····· 3
[그림 1-5] 연구수행 내용 및 방법 ····· 6

[그림 2-1] 공동주택 주차장 비교 ····· 7
[그림 2-2] 무량판 공법의 구조적 불안정성 ····· 8
[그림 2-3] PC무량판 주차장 하중 메커니즘(예) ····· 8
[그림 2-4] 주차장 하중조건 검토 예 ····· 12
[그림 2-5] 1방향 PC구조 공법 시스템 모듈 ····· 13
[그림 2-6] W-PC 프로토 타입 ····· 14
[그림 2-7] H-PC 프로토 타입 ····· 15
[그림 2-8] 1방향 PC구조 제안 설계도(안) ····· 16

[그림 3-1] 중력하중 실험체 명명 상세 ····· 19
[그림 3-2] 주차장 모듈에 따른 중력하중 실험체 제작 계획 ····· 20
[그림 3-3] GR-D 실험체 설계 상세 ····· 21
[그림 3-4] GPN-D 실험체 설계 상세 ····· 22
[그림 3-5] GPS-H 실험체 설계 상세 ····· 23
[그림 3-6] GPN-H 실험체 설계 상세 ····· 24
[그림 3-7] GR-D 실험체 제작 과정 ····· 25
[그림 3-8] GPN-D 실험체 제작 과정 ····· 26
[그림 3-9] GPS-H 실험체 제작 과정 ····· 27
[그림 3-10] GPN-H 실험체 제작 과정 ····· 28
[그림 3-11] 중력하중 실험체 세팅 ····· 31
[그림 3-12] 중력하중 실험체 단면 해석 ····· 32
[그림 3-13] GR-D 실험체 하중-변위 실험결과 ····· 33
[그림 3-14] GR-D 실험체 철근게이지 부착 위치 상세 ····· 34
[그림 3-15] GR-D 실험체 철근 변형률 추이 ····· 35

그림차례

[그림 3-16] GPN-D 실험체 하중-변위 실험결과 ····· 36
[그림 3-17] GPN-D 실험체 철근 변형률 추이 ····· 38
[그림 3-18] GPS-H 실험체 하중-변위 실험결과 ····· 39
[그림 3-19] GPS-H 실험체 게이지 부착 위치 상세 ····· 40
[그림 3-20] GPS-H 실험체 철근 변형률 추이 ····· 41
[그림 3-21] GPN-H 실험체 하중-변위 실험결과 ····· 42
[그림 3-22] GPN-H 실험체 게이지 부착 위치 상세 ····· 43
[그림 3-23] GPN-H 실험체 철근 변형률 추이 ····· 44
[그림 3-24] 1방향 무량판 2경간 골조 실험체 명명 상세 ····· 45
[그림 3-25] 주차장 모듈에 따른 실험체 ····· 46
[그림 3-26] LR 실험체 설계 상세 ····· 47
[그림 3-27] LPD 실험체 설계 상세 ····· 48
[그림 3-28] LPN 실험체 설계 상세 ····· 49
[그림 3-29] LPS 실험체 설계 상세 ····· 50
[그림 3-30] LR 실험체 제작 과정 ····· 51
[그림 3-31] LPD 실험체 제작 과정 ····· 52
[그림 3-32] LPN 실험체 제작 과정 ····· 53
[그림 3-33] LPS 실험체 제작 과정 ····· 54
[그림 3-34] 1방향 PC구조 반복가력 실험체 세팅안 ····· 56
[그림 3-35] 1방향 PC구조 반복가력 실험체 세팅 사진 ····· 56
[그림 3-36] 실험체 변위 계측 계획 ····· 56
[그림 3-37] 철근 변형률 계측 위치 ····· 57
[그림 3-38] 실험체 가력 프로토콜 ····· 58
[그림 3-39] 항복하중과 항복변형 산정 근거 ····· 58
[그림 3-40] 반복하중 실험체 전단력도(Shear force diagram, SFD) ····· 59
[그림 3-41] 반복하중 실험체 휨모멘트도(Bending moment diagram, BMD) ···· 60
[그림 3-42] LR 실험체 가력 단계별 균열 양상 ····· 63
[그림 3-43] LR 실험체 하중-층간변위비 이력곡선 ····· 64
[그림 3-44] LR 실험체 최종 균열 양상 ····· 64

그림차례

[그림 3-45] LR 실험체 철근 변형률 계측 결과(기둥) ····· 65
[그림 3-46] LR 실험체 철근 변형률 계측 결과(보) ····· 66
[그림 3-47] LPD 실험체 가력 단계별 균열 양상 ····· 69
[그림 3-48] LPD 실험체 하중-층간변위비 이력곡선 ····· 70
[그림 3-49] LPD 실험체 최종 균열 양상 ····· 70
[그림 3-50] LPD 실험체 철근 변형률 계측 결과(기둥) ····· 71
[그림 3-51] LPD 실험체 철근 변형률 계측 결과(보) ····· 72
[그림 3-52] LPN 실험체 가력 단계별 균열 양상 ····· 75
[그림 3-53] LPN 실험체 하중-층간변위비 이력곡선 ····· 76
[그림 3-54] LPN 실험체 최종 균열 양상 ····· 76
[그림 3-55] LPN 실험체 철근 변형률 계측 결과(기둥) ····· 77
[그림 3-56] LPN 실험체 철근 변형률 계측 결과(보) ····· 78
[그림 3-57] LPS 실험체 가력 단계별 균열 양상 ····· 81
[그림 3-58] LPS 실험체 하중-층간변위비 이력곡선 ····· 82
[그림 3-59] LPS 실험체 최종 균열 양상 ····· 82
[그림 3-60] LPS 실험체 철근 변형률(기둥) ····· 83
[그림 3-61] LPS 실험체 철근 변형률(보) ····· 84
[그림 3-62] 반복하중 실험체 이력곡선 분석 ····· 85
[그림 3-63] 반복하중 실험체 내진성능 ····· 87
[그림 3-64] 반복하중 실험체 할선강성 검토 ····· 88
[그림 3-65] 유한요소해석에 사용된 콘크리트 및 철근 모델 ····· 91
[그림 3-66] 접착면 요소를 위한 Morh-Columb 파괴 기준 모델 ····· 92
[그림 3-67] 중력하중 실험체 유한요소해석 모델링 ····· 94
[그림 3-68] 반복가력 실험체 유한요소해석 모델링 ····· 96
[그림 3-69] 중력하중 해석 모델 하중-변위 관계 ····· 97
[그림 3-70] 중력하중 실험 및 해석의 실험체 균열 분포 비교 ····· 99
[그림 3-71] 횡하중 반복가력 해석 모델 하중-변위 관계 ····· 100
[그림 3-72] 반복하중 실험 및 해석의 실험체 균열 분포 비교 ····· 101

그림차례

[그림 4-1] 1방향 PC구조 공법 실무도면(PC기둥) ····· 103
[그림 4-2] 1방향 PC구조 공법 실무도면(PC보) ····· 104
[그림 4-3] 1방향 PC구조 공법 실무도면(브라켓) ····· 105
[그림 4-4] 1방향 PC구조 공법 실무도면(접합부 상세) ····· 106
[그림 4-5] 1방향 PC구조 공법 실무도면(A단면 상세) ····· 107
[그림 4-6] 1방향 PC구조 공법 실무도면(B단면 상세) ····· 108
[그림 4-7] LH 공동주택 주차장 1개 모듈 도면 ····· 109
[그림 4-8] 보 및 기둥 부재 상세 ····· 110
[그림 4-9] PC무량판 공법 물량 산출 근거 ····· 112
[그림 4-10] RC무량판 공법 물량 산출 근거 ····· 113
[그림 4-11] 접착면 요소의 마찰 계수에 따른 하중-변위 관계 변화 ····· 115

I 연구배경 및 목적

Key Point

- LH 공동주택의 건설생산성 향상을 이룩하기 위하여 탈현장 공법(OSC)의 적용 필요
- 공동주택 주차장의 PC공법 적용으로 고품질화 구현 가능

1 연구배경

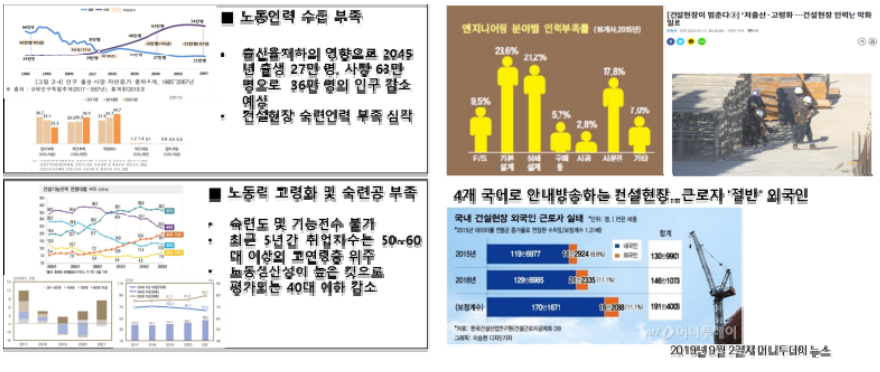
1) 미래건설환경 변화에 대한 LH의 전사적 탈현장 공법(OSC) 대응 필요

■ LH OSC 주택 로드맵 제시

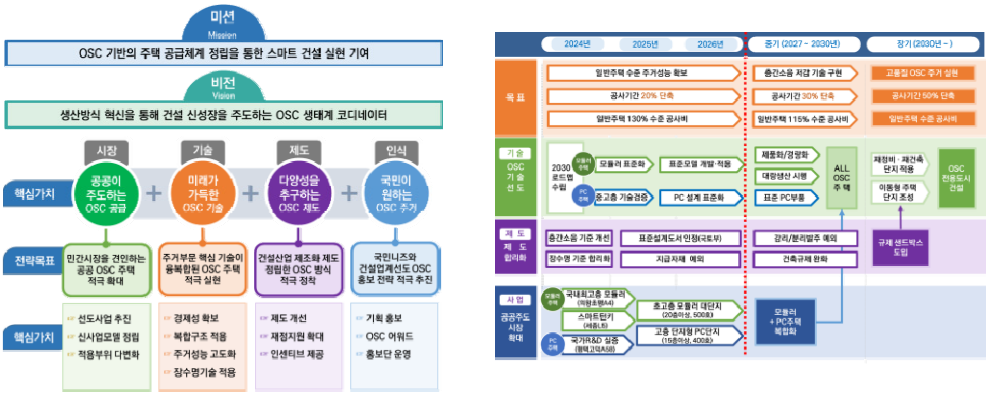
○ 현장 중심의 재래식 공법(이하 RC공법)은 [그림 1-1]과 같이 인구구조 변화에 따라 생산성 한계에 봉착하여 이를 극복하기 위한 연구가 필요

○ 건설 생산성 향상이 가능한 탈현장(Off-Site Construction, 이하 OSC)공법은 PC(Precast concrete)공법, 모듈러 공법 등이 있으나, 다각화된 LH 사업에 적용하기 위해서는 각 공법에 맞는 구체적인 실행 방안이 필요

○ LH는 [그림 1-2]와 같이 2030 LH OSC 로드맵 (주거혁신처)을 선포하여 OSC공법의 특징에 부합한 연구를 수행하여 LH 사업에 적용할 예정



[그림 1-1] 건설산업 생산성 저하 (콘크리트 비전 2050, 한국콘크리트학회)



[그림 1-2] 2030 LH OSC 주택 로드맵

2) PC공법을 활용한 고품질 LH 공동주택 건설 방안 마련 필요

■ LH 공동주택 건설품질 확보 가능한 공법에 대한 연구

○ ‘23년 4월 발생한 인천검단지구 무량판 주차장 붕괴 사고 이후, LH 공동주택의 품질 확보가 가능한 PC공법에 대한 연구의 시의성이 높아짐 [그림 1-3]

- PC공법의 연구와 관련하여 LH에서는 “포스트 혁신, 주택건설 및 생산방식 고도화 방안” (2023.11) 등을 토대로 PC공법에 대한 다양한 연구 진행 및 PC건설업계와 공동으로 공동주택 관련 업무협약(MOU) 개최



[그림 1-3] LH 공동주택 PC공법 적용을 위한 연구 방안

○ PC공법을 적용한 3건의 벽식 및 보-기둥 구조 공동주택의 시범 사업 및 성과 분석 수행[그림 1-4]

- 김포한강 Aa-12BL(벽식구조, 지하 1층 지상 4층 규모 1개동, 지하주차장 없음, 2021.2 준공)
- 아산탕정 A-15BL(보-기둥 구조, 지하 1층 지상 7층 규모 1개동, PC 보-기둥 주차장, 2022.10 준공)
- 평택고덕 A-58BL(보-기둥 구조, 지하 1층 지상 12층 규모 1개동, RC 무량판 주차장(LHFS), 2025.10 준공)



(a) 김포한강 Aa-12BL



(b) 아산탕정 A-15BL



(c) 평택고덕 주동 A-58BL

지하주차장 없음



(a-1) 김포한강 Aa-12BL 주차장



(b-1) 아산탕정 A-15BL 주차장

(c-1) 평택고덕 주동 A-58BL 주차장

[그림 1-4] LH PC공동주택 건설 사업 현황

LH 공동주택 주차장 PC공법 적용 필요

○ '23년 인천검단지구 지하주차장 붕괴사고 원인 분석 결과, 품질 및 감리 문제가 대두되어 현장 작업(배근 및 콘크리트 타설)의 최소화가 필요한 시점임

- PC공법은 공장생산으로 현장작업의 최소화(시공성) 및 품질관리가 용이함

○ LH 공동주택 주차장은 협소공간내에 법적으로 규정된 주차대수를 확보해야 하므로, 주차장 기둥의 수(크기)와 배치가 구조적으로 중요함

- PC공법은 장경간(장스팬, 8m 이상) 구현이 가능하여 기둥 수 절감 가능

○ 이에, LH 설계검증처에서는 시공성·품질관리 확보 및 장경간 구현이 가능한 PC구조를 LH 공동주택 주차장에 적용하고자 1방향 PC구조 공법을 제안하였음

- PC기둥 및 넓은 PC보(이하 PC보)를 1방향으로 배치
- 주차장 슬래브는 시공성을 고려한 데크 플레이트 슬래브로 계획

2 연구목적

1) 연구목적

LH 실무부서에서 제안한 1방향 PC공법의 구조 및 실무적용성 검증

○ LH 설계검증처에서는 LH 공동주택 주차장에 PC공법을 적용하고자 1방향의 보-기둥 PC구조를 제안하였으며, 이를 실험 및 해석적으로 검증하는 것이 본 연구의 주요 목적임

- 1방향 PC 보-기둥 구조의 보는 Half PC로 구성되며, 기둥은 완전 PC, 슬래브는 데크 플레이트 슬래브로 구성됨

○ 제안된 1방향 PC무량판 구조와 현행 RC무량판 구조와의 물량(경제성) 및 시공성 등의 비교를 통하여 실무적용성 검증 수행

PC공법에 최적화된 장경간 1방향 PC구조 제안 및 검증

○ 주차장에 적용되는 PC공법은 대부분 보-기둥(라멘) 구조 형태로 할로우 코어 슬래브 등과 혼용하여 건설되고 있음. PC라멘 구조는 시공성·장경간 등에 유리하나 무량판 구조에 비하여 층고절감이 불가능함

- 대형 물류센터, 반도체공장, 민간건설사 주차장 등에 PC구조 적용 중

○ 본 연구에서는 철골합성보-PC기둥의 무량판 구조를 제안하고 이를 실험 및 해석적으로 검증하는 것이 추가적인 연구 목적임

- PC무량판 구조는 PC보-기둥 구조에 비하여 층고절감이 가능할 것으로 기대

LH 실무적용을 위한 정량적인 데이터 제공

○ LH 공동주택 주차장 적용을 위하여 연구결과를 바탕으로 정량적인 데이터를 제공하여 발주 및 구조 지침 마련 지원

○ 본 연구결과를 통하여 제시되는 데이터는 실무적용을 위한 설계상세, 구조안전성 확보 결과(실험결과), 물량 검토 등임

2) 연구수행 내용 및 방법

■ 최종연구목표 달성을 위한 연구수행 내용 및 방법



[그림 1-5] 연구수행 내용 및 방법

Ⅱ 1방향 PC구조 공법의 제안

Key Point

• 시공성·품질확보 및 주차대수 확보 등이 가능한 PC공법을 LH 공동주택 주차장에 적용하기 위하여 PC라멘 및 PC무량판 공법을 제안

1 공동주택 주차장 공법

1) 보-기둥 공법

○ RC 또는 PC의 보와 기둥을 사용하여 공동주택 주차장을 건설하는 공법

○ 대형 민간건설사는 RC공법 대신 시공성 및 품질 제고를 위하여 PC공법을 주차장에 적용중[1]이며, 향후 PC공법을 이용한 공동주택 주차장의 수는 점차 늘어날 것으로 전망됨

○ LH는 공동주택 주차장에 RC공법과 PC공법을 혼용하여 적용하고 있음

- RC공법: 보-기둥(라멘) 구조 및 LHFS 적용
- PC공법: 보-기둥(라멘) 구조



(a) 보-기둥 구조 주차장



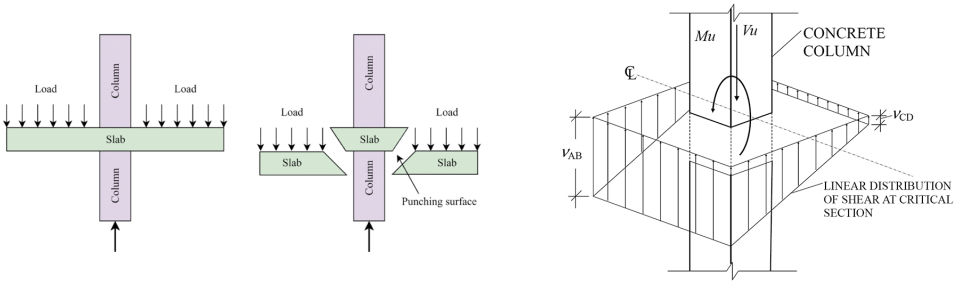
(b) LHFS 구조 주차장

[그림 2-1] 공동주택 주차장 비교

1) 덕산지에스 자료 인용 (2023년도 기준)

2) 무량판 공법

○ 무량판 구조는 보가 없는 바닥판 구조, 즉, 주차장 슬래브를 보 없이 곧바로 기둥 위에 얹는 구조방식으로 시공성 향상 및 층고절감이 가능하나, 2방향의 뚫림 전단 및 불균형 모멘트에 대한 구조 보강 및 철저한 품질관리가 요구됨



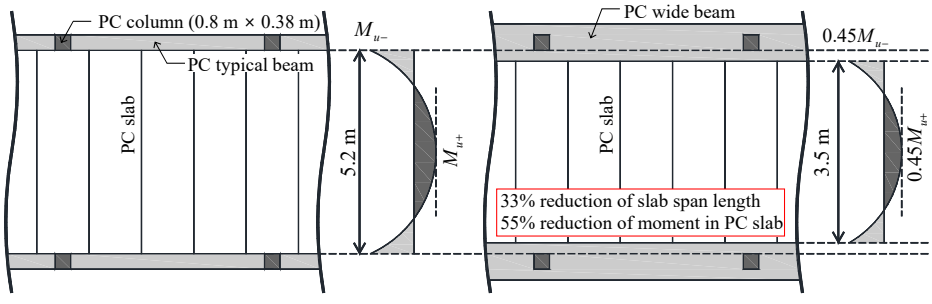
(a) 펀칭 전단 (Punching shear)　　(b) 불균형 모멘트 (Unbalanced moment)

[그림 2-2] 무량판 공법의 구조적 불안정성

○ 현행 RC무량판 공법에 비하여 1방향의 PC무량판 공법을 적용할 경우 주차장의 장경간 구현에 유리하므로 설계의 자유도가 확보 될 수 있음

○ 다만, PC무량판 공법은 PC기둥, 보 또는 슬래브를 현장에서 조립하여야 하므로 필연적으로 접합부가 발생하며, 접합부의 품질에 따라 주차장의 구조 안전성이 결정됨

○ 이에, PC무량판 공법의 접합부는 중력하중에 의한 뚫림전단 또는 횡하중에 의한 불균형 모멘트가 발생할 수 있으므로 이에 대한 구조적 안전성 확보가 필요함



[그림 2-3] PC무량판 주차장 하중 메커니즘(예)

2 공동주택 주차장 공법에 대한 선행연구

1) LH 내부수행 연구 현황

○ LH에서는 공동주택에 PC공법을 적용하고자 90년대 초부터 연구를 수행하였으나 PC 보-기둥 구조 및 PC 무량판 주차장에 대한 연구는 수행하지 않았음

- 최근 5년간 공동주택 주동에 PC공법을 적용하는 연구는 실증사업 등을 토대로 활발히 수행되었음

○ LH 내부 연구 대부분은 본 연구의 주 대상과 범위가 다르므로 유사성 및 중복성이 없으나, 선행 연구에서 진행된 실험 및 구조해석 방법 등을 참고하여 본 연구를 진행하였음

[표 2-1] 선행연구 및 시사점 정리(LH 내부연구)

저자	년도	선행연구명	시사점
LH토지주택연구원 (김민준 외)	2024	고품질 PC아파트 공급을 위한 품질관리 시스템 고도화(1) - PC접합부 품질관리 지표 수립 -	PC아파트의 구조성능에 가장 중요한 요소인 PC부재 접합부 그라우트 충전의 품질확보를 목표로, 접합부 실험 및 그라우트 충전 지표 마련 연구 수행
LH토지주택연구원 (이범식 외)	2023	주차장 무량판 슬래브-기둥 접합부 보강공법의 보강성능평가	무량판 슬래브-기둥 접합부 보강공법의 보강성능을 구조실험 및 해석적 연구를 통하여 평가 하고, 무량판 공법에 맞는 최적의 주차모듈과 전단보강상세 제안
LH토지주택연구원 (이범식 외)	2020	OSC기반 PC구조 아파트 핵심 설계·엔지니어링 기술개발 및 실증	국토교통부 발주 국책과제로, 1990년대 이후 30여년 만에 수행하는 대규모 연구이며, 연구결과를 반영하여 PC공동주택 1개동에 대한 실증 사업을 수행중임
LH토지주택연구원 (이범식 외)	2019	미래수요대응형 LH아파트 건식공법 적용방안	LH형 PC아파트 공급을 위하여 PC구조설계 및 시공지침 수립을 위한 연구로, 국내외 PC기준을 분석하여 PC구조설계 지침 작성, 2024년 제정 예정 KDS PC기준의 근간이 됨

저자	년도	선행연구명	시사점
LH토지주택 연구원 (김상연 외)	2014	LH형 주차장 일방향 PC공법 개발 연구	현장인력저감 및 주차장 PC공법 적용을 위한 일방향 PC공법 개발 연구로 PC공법의 경제성 분석 및 설계 지침 수록
LH토지주택 연구원 (이범식 외)	2013	뚫림전단이 작용하는 슬래브와 기초의 전단보강공법 개발	2012년 전단관련기준의 개정에 따른 LH 아파트 무량판 슬래브 설계 시 미치는 영향을 구조적으로 검토하고 전단보강상세 개발 연구 수행
LH토지주택 연구원 (이범식 외)	2013	건설사업비 절감을 위한 LH형 하이브리드 건설시스템 개발	건설사업비 절감을 위한 LH형 하이브리드 건설 시스템 개발을 위하여 주동 및 기초에 무량판 슬래브 시스템 적용을 위한 구조검토 및 관련기준비교 연구 수행
대한주택 공사 (천영수 외)	2007	면진 무량판 구조시스템 개발 및 경제성 분석	본 연구는 내진기준 강화에 따른 설계의 어려움을 극복하고, 주택의 장수명화 및 리모델링이 용이하며 공기단축도 가능한 면진 무량판 구조 시스템을 개발하는 연구로서, 기술분석을 통하여 면진 무량판 아파트의 구조모델과 고성능 내진이 가능한 하이브리드 면진 시스템을 제안
대한주택 공사 (김상연 외)	2006	무량판 건물의 기둥주변 슬래브 개구부 보강방안 개발	무량판 구조의 슬래브에 필연적으로 발생할 수(전기, 기계, 소방등)밖에 없는 개구부에 대한 보강 방안 및 설계 방법을 제시
대한주택 공사 (천영수 외)	2005	무량판 구조시스템의 내진설계기법 정립 및 접합부 보강상세 개발	아파트 주동을 대상으로 벽식구조의 장점을 최대한 활용하면서 골조와 접목 가능한 무량판 구조시스템을 개발하고, 동 시스템의 내진설계기법을 정립하는 것을 목표로 추진
대한주택 공사 (김상연 외)	1998	아파트 지하층을 주차장으로 활용하기 위한 골조형식 연구 :구조계획 및 해석을 중심으로	전용면적 59㎡, 20층 규모의 아파트를 대상으로 아파트 직하부는 보-기둥, 상부는 벽식, 상하부경계는 전이보를 도입한 복합구조, 상하부 모두 무량판구조를 도입한 무량판구조 형식과 하부는 무량판, 상부는 넓은보로 구성되는 부분골조형식의 아파트 구조형식을 제안
대한주택 공사 (김두영 외)	1995	벽식 기둥과 플랫 플레이트로 구성된 골조시스템의 실용화 연구	슬래브 기둥 접합부에 대하여 기존 연구결과를 참고하고 무량판구조에 대한 구조실험을 수행하여 내부 슬래브-기둥 접합부의 전단력과 불균형 모멘트를 산정하기 위한 유효 슬래브 폭에 대한 해석모델을 제안
대한주택 공사	1991	PC아파트의 내진설계 규준제정을 위한 연구	기존 국내 PC아파트의 내진설계 기준 및 설계지침을 작성하기 위한 연구로 PC아파트의 내진 안정성 검토 연구 수행

2) 외부수행 연구 현황

○ 공동주택 지하나 내부에 주차장을 건설하는 공법은 대부분 국내에서만 이루어지고 있는 실정으로, 관련 국외 연구는 많지 않았음

○ 외부수행 연구에서 진행된 경제성 분석 결과를 참고하여 본 연구에서 제안된 1방향 주차장 PC공법의 실무적용성 검토를 수행하였음

[표 2-2] 선행연구 및 시사점 정리(외부수행 연구)

저자	년도	선행연구명	시사점
JD, Lee 외 2인	2016	Combined half precast concrete slab and post-tensioned slab topping system for basement parking structures	주차장에 프리텐션 및 포스트텐션 Half PC공법을 적용하기 위한 연구로 해석을 이용하여 결과 도출
조민주 외 1인	2015	장수명주택에 적합한 주차장 PC구조 시스템의 경제성 분석에 관한 연구	장수명주택에 적용할 수 있는 PC구조 시스템을 비교 분석하고 각각에 대한 경제성을 분석하여 최적의 주차장 구조형식 도출

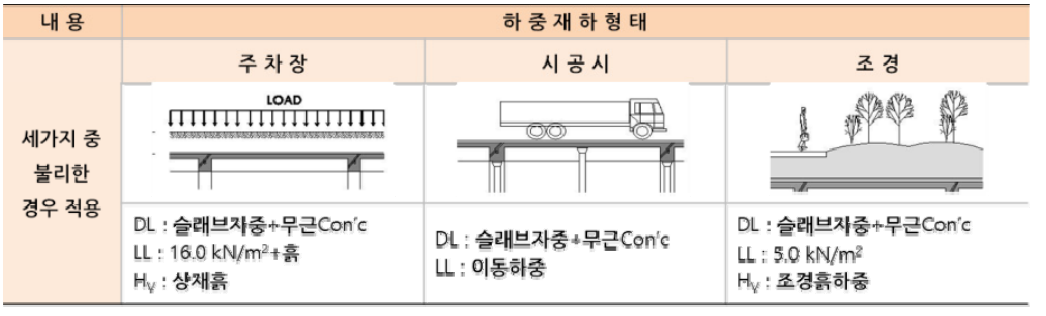
3 1방향 주차장 PC구조 공법 제안

1) LH 공동주택 주차장 하중조건 및 PC구조 계획 검토

LH 공동주택 하중조건 검토

○ LH 주차장은 공동주택의 규모에 따라 주차대수가 법제화[2]되어 있어 주차장 크기가 표준화 되어 있음

- 하중조건 검토: 고정하중(D.L)과 활하중(L.L)로 구분하여 고려
- 설계하중은 [표 2-3]과 같이 공동주택의 주차장을 안전측으로 설계 할 수 있도록 산정하였음



[그림 2-4] 주차장 하중조건 검토 예

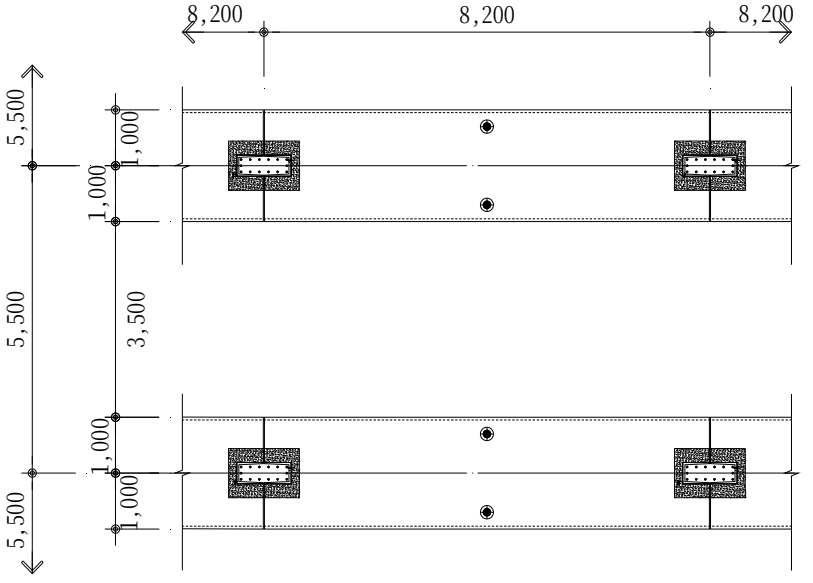
[표 2-3] 주차장 설계하중 산정

실험체 명	설계 하중 산정		비고
고정하중 (D.L)	토피 (t=900 mm)	16.2 kN/m^2	총 고정하중 24.08 kN/m^2
	무근 (t=100 mm)	2.3 kN/m^2	
	슬래브 (t=220 mm)	5.28 kN/m^2	
	설비배관	0.3 kN/m^2	
활하중 (L.L)	적재	16.0 kN/m^2	-

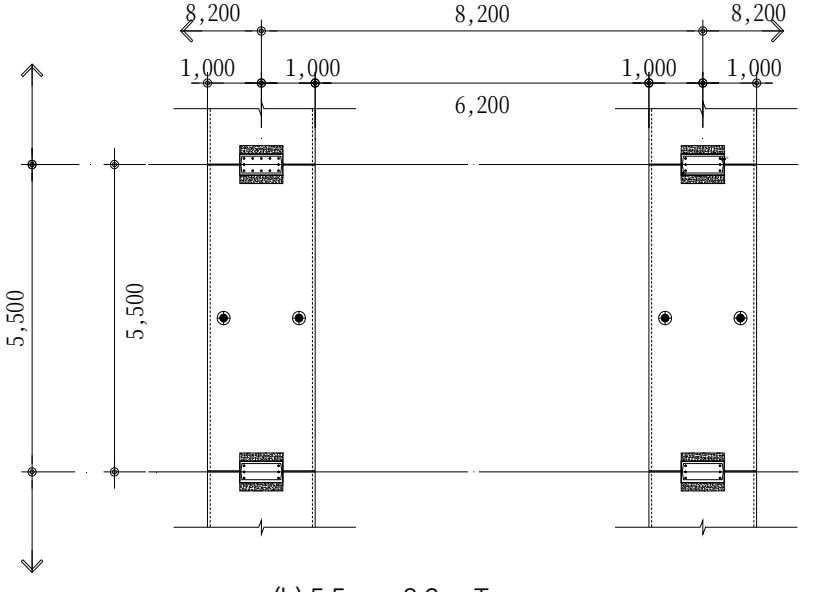
2) 주택건설기준 등에 관한 규정, 대통령령 제34092호, 2024. 1. 2., 일부개정

LH 아파트 주차장 하중조건에 부합하는 PC구조 계획 검토

○ PC 기둥과 기둥 사이 드롭패널 및 PC보를 이용한 장경간 확보 및 설계 유연성 확보 가능성 검토(8.2m×5.5m, 5.5m×8.2m)



(a) 8.2 m × 5.5 m Type



(b) 5.5 m × 8.2 m Type

[그림 2-5] 1방향 PC구조 공법 시스템 모듈

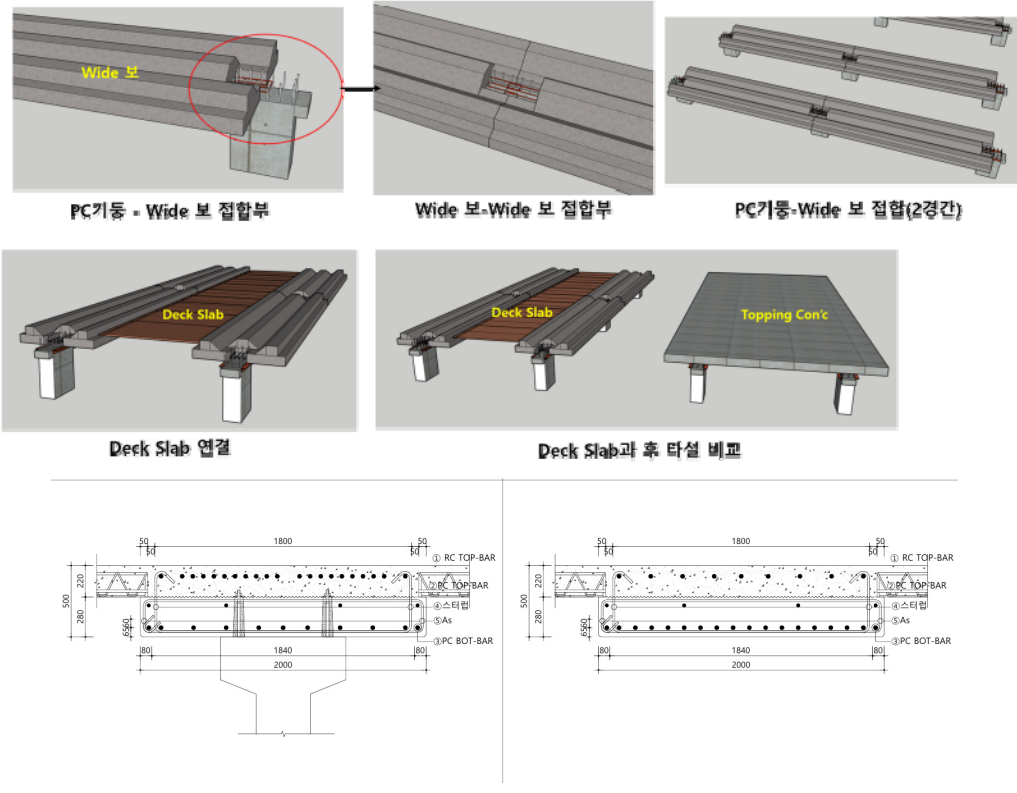
2) 1방향 PC 보-기둥 구조(W-PC)

LH 설계검증처 제안 1방향 PC구조로 연속 보 형태로 구성

○ PC보 및 PC기둥을 적용한 1방향 보-기둥 구조로, 슬래브는 건설현장에서 널리 사용하고 있는 데크플레이트 슬래브를 적용하여 가설재 최소화 구현

- 데크플레이트 슬래브 특징: 가설재(서포트) 최소화가 가능하여 시공의 연속성이 확보되고 거푸집의 해체공정이 줄어들어 공기단축 가능
- PC보의 폭은 2,000mm, 주차장 1경간의 데크플레이트 슬래브 길이는 3,500mm로 설계하여 구조적 안정성 확보

○ PC보와 PC기둥의 접합부에는 지판(브라켓)을 두어 보와 기둥이 구조적으로 안전하게 접합할 수 있도록 구성



[그림 2-6] W-PC 프로토 타입

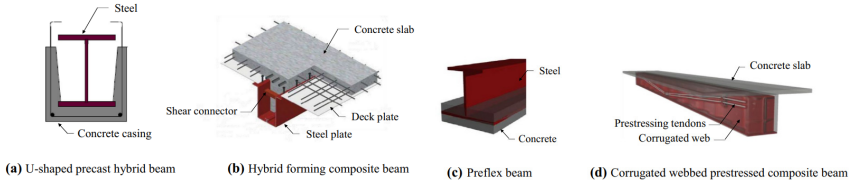
3) 1방향 PC무량판 구조(H-PC)

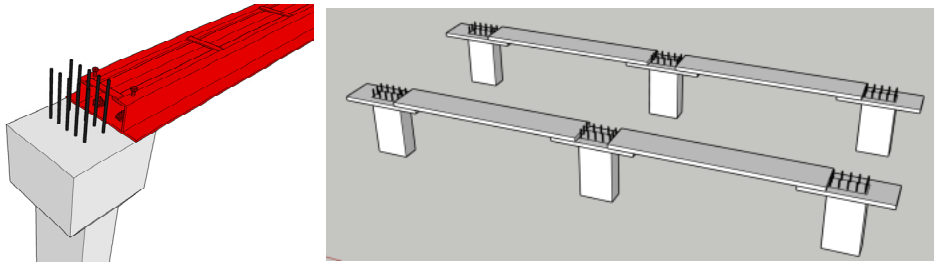
PC공법의 장점인 장경간 구현을 위한 1방향 PC무량판 구조 제안

○ PC기둥-철골 합성보와 장경간 구현이 가능한 할로우 코어 슬래브(HCS)를 적용하여 1방향 PC무량판 공법을 제안하였음

- 할로우코어 슬래브 특징: PC슬래브 내에 중공을 두어 경량화, 장경간 구현 가능, 생산 특성상(베드 타입 생산) 모듈화 가능
- PC기둥과 철골 합성보는 지판(브라켓)으로 접합되어 구조성능을 확보하며, 철골 합성보와 할로우 코어 슬래브는 무단차(Slim)로 연결됨

○ 관련 참고문헌을 참고하여 PC기둥 및 할로우 코어 슬래브 접합이 가능한 철골 합성보 제안





[그림 2-7] H-PC 프로토 타입

[그림 2-8] 1방향 PC구조 제안 설계도(안)

4 1방향 주차장 PC구조 공법 검증 계획

○ LH 실무적용을 위한 실험변수 설정

- LH 공동주택 현장에서 사용하는 재료(철근 및 콘크리트) 강도를 사용하여 구조 실험 수행
- LH 공동주택 주차장 설계 및 하중조건에 부합하는 가력 방법 설정 및 해석을 통한 가력방법의 유효성 검증(중력하중, 반복하중)
- LH 실무부서 적용성을 향상시키기 위하여 구조 실험을 수행하되 실험실 여건(하중 및 크기)에 따라 축소율 50% 이상 실험체 제작
- 실험체 해석은 콘크리트 및 철근, PC접합부 등을 효과적으로 구현(모델링)할 수 있는 범용구조해석 프로그램을 사용

○ 구조실험의 경험 및 안전성이 확보된 인력 및 장비 사용

- 보-기둥 접합부 및 무량판 관련 실험 경험이 풍부한 인력을 통하여 실험의 안전성 및 데이터의 유효성 확보

○ 실험체 변형의 실시간 계측을 위한 계획

- 실험체에 배근된 철근에는 변형률 게이지(W.S.G)를 부착하여 하중단계로부터의 철근의 변형을 계측
- 가력하중의 조건(중력하중, 반복하중)에 따라 실험체의 실시간 외부변위를 변위변환계(LVDT)로 계측

Ⅲ 1방향 PC구조 공법의 구조성능평가

Key Point

- 본 연구로부터 제안된 1방향 PC 보-기둥(W-PC) 및 무량판(H-PC) 공법의 실무적용의 근거자료 도출을 위한 구조성능평가를 수행

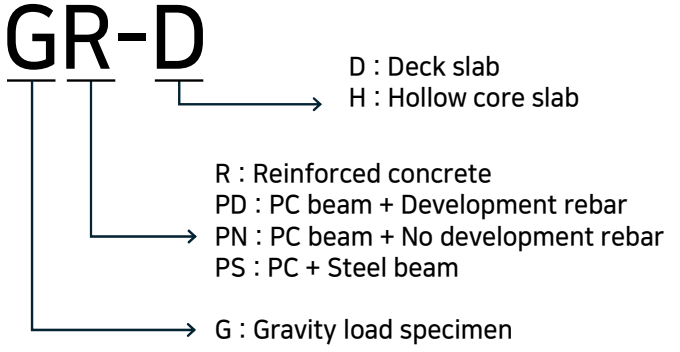
1 1방향 PC구조 공법의 중력하중 실험

1) 중력하중 실험 계획

1방향 PC구조 공법의 구조안정성 검증을 위한 중력하중 실험개요

○ 중력하중 실험은 철근배근 및 보 형상을 변수로 하여 실험체 총 4개(PC-3개, RC-1개)를 제작하여 수행

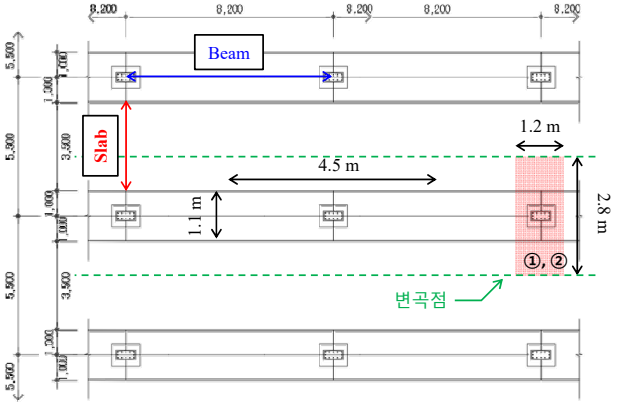
- 모든 실험체는 LH 주차장 및 제안 평면의 실물 크기로 현행기준에 부합하게 설계 및 실험 수행
- 보-기둥 접합부의 보 주철근의 정착길이에 따라 구조안전성이 결정되므로 보 주철근 정착 상세에 대한 실험 수행
- PC구조의 특성을 반영하기 위하여 주차장 모듈(Type)을 변수로 구성



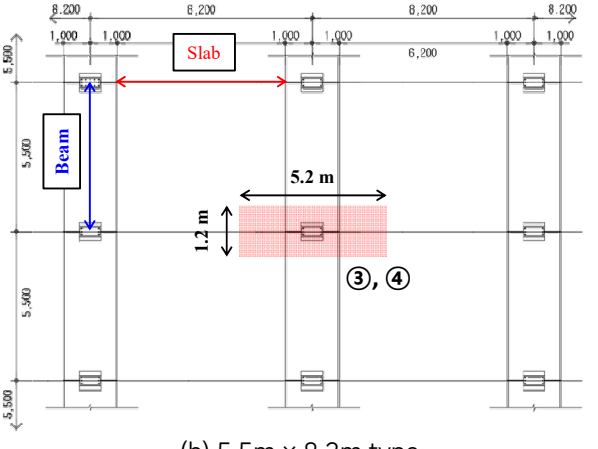
[그림 3-1] 중력하중 실험체 명명 상세

[표 3-1] 중력하중 실험체 설계 요약

실험체 명	GR-D	GPN-D	GPS-H	GPN-H
적용 공법	RC 공법	PC 공법		
실험체 상세	데크 슬래브		할로우 코어 슬래브 강재형 합성보	할로우 코어 슬래브
적용 모듈	8.2 m × 5.5 m		5.5 m × 8.2 m	
실험체 크기	실물모형			
실험체 길이	3.1 m		5.74 m	5.84 m
지점 경간	2.8 m		5.2 m	



(a) 8.2m × 5.5m type



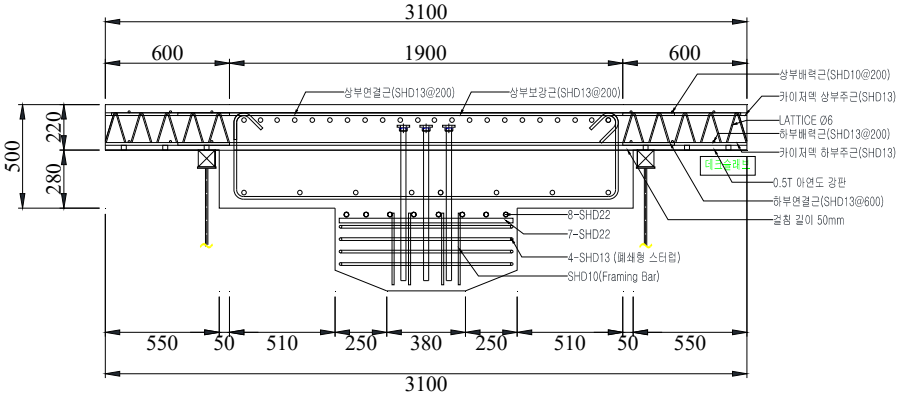
(b) 5.5m × 8.2m type

[그림 3-2] 주차장 모듈에 따른 중력하중 실험체 제작 계획

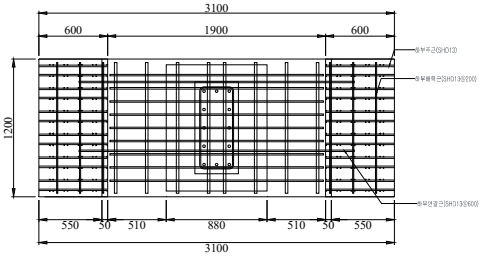
GR-D 실험체 설계

○ GR-D는 1방향 보-기둥(W-PC) 공법 적용 실험체로, 8.2 m × 5.5 m 모듈에 적용된 상세이며, 현장타설인 RC공법을 적용하였음

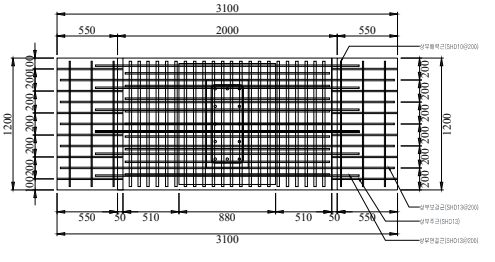
- RC기둥 단면의 치수는 폭 380mm, 높이 800mm이며, 길이방향 철근은 UHD22(항복강도 600MPa 등급) 철근 12개로 배근 되었음. 기둥 상단의 주철근은 정착길이 확보 및 시공성 향상을 위해 확대머리 철근으로 설계
- RC보 단면의 치수는 폭 2000mm, 높이 500mm이며, 데크 플레이트 슬래브는 일반적인 기성 제품으로 폭 600mm, 높이 1200mm로 가공하여 사용하였음. 시공성 및 구조성능을 고려하여 데크 플레이트 슬래브의 걸침길이는 50mm로 계획함



(a) 측면도



(b) 하부 평면도



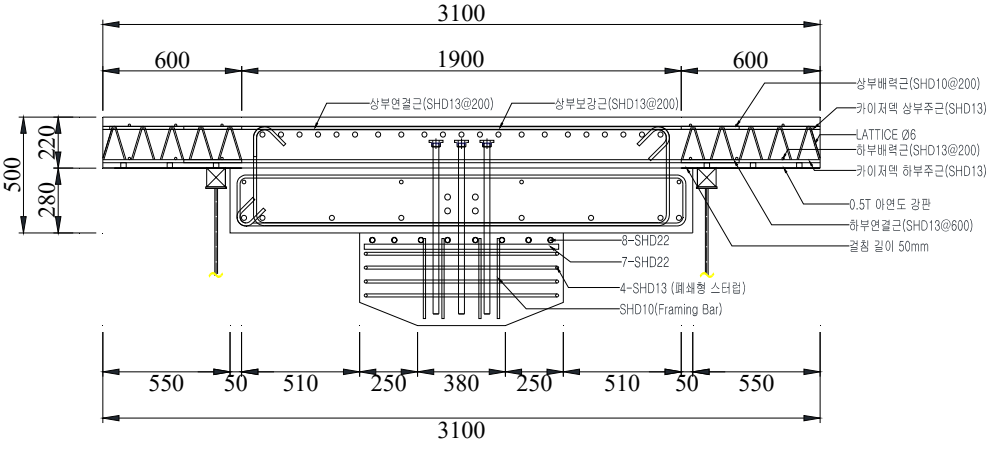
(c) 상부 평면도

[그림 3-3] GR-D 실험체 설계 상세

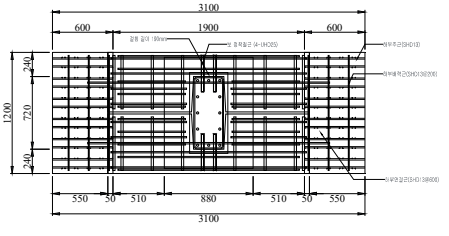
GPN-D 실험체 설계

○ GPN-D 실험체는 1방향 보-기둥(W-PC) 공법 적용 실험체로, 8.2 m × 5.5 m 모듈에 적용된 상세이며, PC공법을 적용하였음

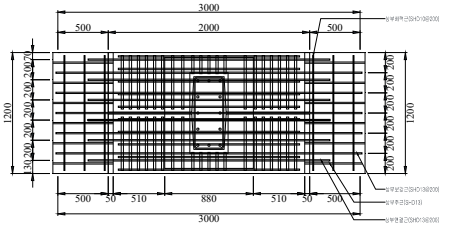
- PC기둥, 보, 데크 플레이트 슬래브의 단면 상세와 철근 배근 상세는 GR-D 실험체와 동일



(a) 측면도



(b) 하부 평면도



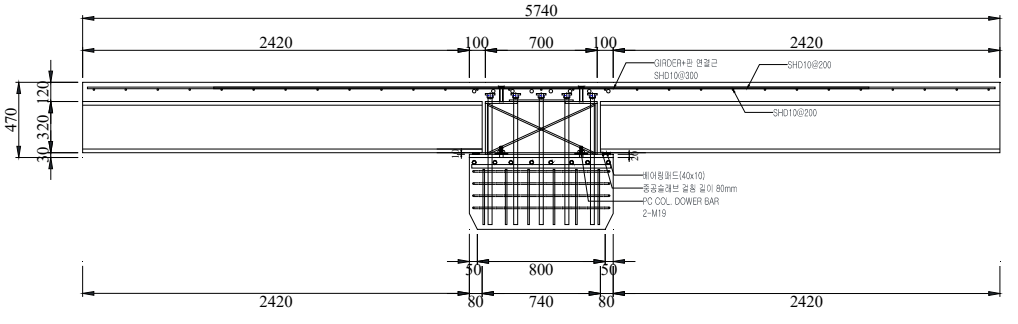
(c) 상부 평면도

[그림 3-4] GPN-D 실험체 설계 상세

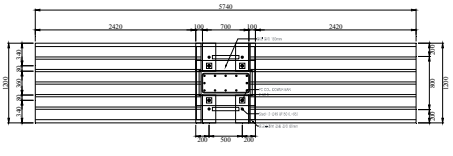
GPS-H 실험체 설계

○ GPS-H 실험체는 1방향 무량판(H-PC) 공법 적용 실험체로, 5.5 m × 8.2 m 모듈에 적용된 상세이며, PC기둥, 철골 합성보, 할로우 코어 슬래브를 적용하였음

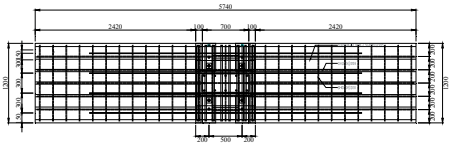
- PC기둥, PC보, 데크플레이트 슬래브의 단면 상세와 철근 배근 상세는 GR-D 실험체와 동일함. GPS-H 실험체는 할로우 코어 슬래브를 적용하여 데크 플레이트 슬래브를 적용한 GR-D, GPN-D 실험체에 비하여 하중 지점의 경간이 크게 설계됨
- PC기둥의 단면 치수는 폭 800mm, 높이 380mm이며, 기둥의 주철근은 UHD22 12개로 배근되어 있음
- 철골 합성보 단면의 치수는 폭 900mm, 높이 470mm이며, PC기둥 상부 면에는 2개의 M19 전산볼트를 이용해 합성보를 조립하였고, 단면 높이 320mm인 할로우 코어 슬래브는 강재형 합성보 하부 플랜지에 80mm 걸침 길이로 설계하였음



(a) 측면도



(b) 하부 평면도



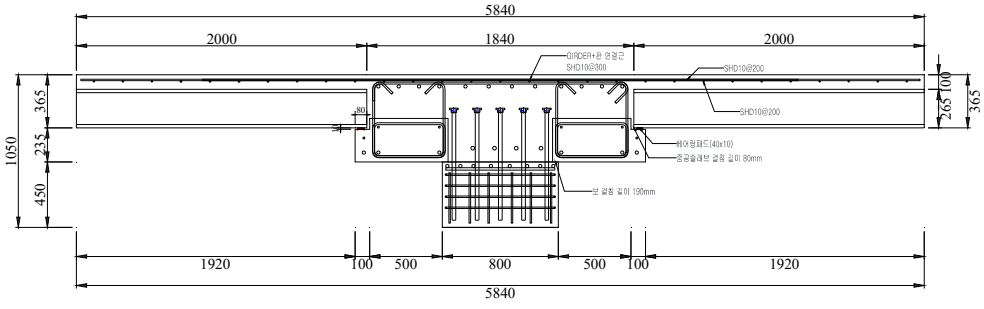
(c) 상부 평면도

[그림 3-5] GPS-H 실험체 설계 상세

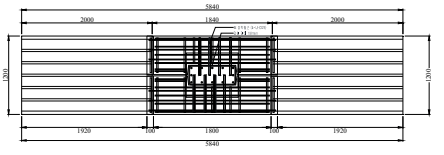
GPN-H 실험체 설계

○ GPN-H 실험체는 1방향 보-기둥(W-PC) 공법 적용 실험체로, 5.5m × 8.2 m 모듈에 적용된 상세이며, PC공법을 적용하였음. PC기둥, PC보로 구성되었으며, 데크 플레이트 슬래브 대신 할로우 코어 슬래브를 적용하였음

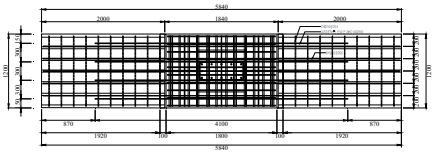
- PC기둥의 단면 치수는 폭 800mm, 높이 380mm이며, 기둥의 주철근은 UHD22 12개로 배근되어 있음
- PC보 주철근 (UHD25 4개)은 PC기둥 내부로 190mm 돌출되도록 배근되어 있으며, 단면 높이 320mm의 할로우 코어 슬래브는 PC보에 걸침 길이 80mm로 설계되었음



(a) 측면도



(b) 하부 평면도



(c) 상부 평면도

[그림 3-6] GPN-H 실험체 설계 상세

중력하중 실험체 제작

○ 실험체는 각 시공 공법 및 도면에 따라 제작되었음

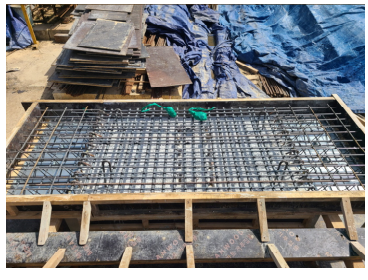
- GR-D 실험체는 RC기둥을 먼저 제작한 후, 기둥 상부에 데크플레이트 슬래브를 배치하고 보와 슬래브에 콘크리트를 일체화 타설하여 제작
- PC실험체의 경우, 일반적인 PC부재 설치와 동일하게 PC기둥과 PC보를 각각 별도로 제작한 뒤, 데크 슬래브 또는 할로우 코어 슬래브를 설치하고 덧침콘크리트를 타설하여 제작
- Half PC 보 상부 면에는 덧침콘크리트와 PC부재 간의 일체성을 확보하도록 기준에 맞춰(6mm이상) 거친면 처리를 수행하였음



(a) RC 기둥 및 보 하부 철근 배근



(b) RC 기둥 및 보 콘크리트 타설





(c) 데크플레이스 슬래브 배치 및 보 상부 철근 배근





(d) 슬래브 콘크리트 타설

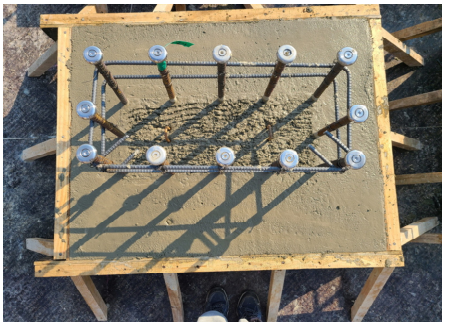
[그림 3-7] GR-D 실험체 제작 과정



(a) PC 기둥 철근 배근

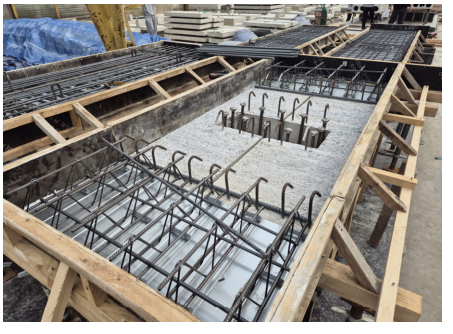


(b) PC 보 철근 배근





(c) PC 주두 및 PC 보 콘크리트 타설



(d) PC기둥-PC 보 조립



(e) 데크플레이트 슬래브 상부 철근 배근





(f) 슬래브 콘크리트 타설

[그림 3-8] GPN-D 실험체 제작 과정



(a) PC 기둥 철근 배근



(b) PC 기둥 콘크리트 타설



(c) 강재형 합성보 제작



(d) 강재형 합성보-할로우 코어 슬래브 조립





(e) 슬래브 상부 철근 배근





(f) 슬래브 덧침콘크리트 타설

[그림 3-9] GPS-H 실험체 제작 과정



(a) PC 기둥 철근 배근



(b) PC 기둥 콘크리트 타설



(c) 강재형 합성보 제작



(d) 강재형 합성보-할로우 코어 슬래브 조립





(e) 슬래브 상부 철근 배근





(f) 슬래브 덧침콘크리트 타설

[그림 3-10] GPN-H 실험체 제작 과정

중력하중 실험체 재료 물성

○ 실험체에 사용된 콘크리트는 현행 LH 및 PC공장에서 널리사용되는 강도를 적용하였음. 실험체 콘크리트 설계 압축강도는 40MPa, 실제 공시체 시험을 통해 얻은 압축강도는 39.5 ~ 42.9 MPa 수준으로 나타났음

○ 현행 LH기준에 맞추어 철근의 직경에 따른 항복강도를 적용하였으며, 인장시험결과, 항복강도 및 인장강도가 설계항복강도를 상회하였음

[표 3-2] 실험체 콘크리트 압축강도 시험 결과

구분		시험 압축강도 (f_c', MPa)			
		GR-D	GPN-D	GPS-H	GPN-H
콘크리트 (PC/RC*)	보	- / 42.9	41.9 / 42.9	- / 42.9	41.9/ 42.9
	기둥	41.3	39.5	41.3	39.5

* PC 실험체의 경우, RC는 덧침콘크리트를 의미함.

[표 3-3] 실험체 철근 인장강도 시험 결과

구분	SHD10	SHD13	UHD16	UHD19	SHD22
설계항복 강도 f_y (MPa)	500	500	600	600	500
시험항복 강도 $f_{y.test}$ (MPa)	677.4	608.8	686.1	713.8	664.6
시험인장 강도 $f_{u.test}$ (MPa)	827.5	725.9	793.6	828.0	772.9

실험방법 및 계측계획

○ 중력하중 실험은 1,000 kN 용량의 액추에이터(Actuator)에 기둥 단면과 유사한 철물을 연결하여 가력 하였으며, 양단 지점은 핀 지점으로 설정하여 실제 하중 조건과 동일하게 실험을 수행하였음

○ 하중의 가력은 제안된 1방향 PC구조 공법의 구조안정성 검증의 신뢰성 확보를 위하여 LH 공동주택 주차장에 작용하는 하중조합에 따라 3단계 가력을 수행하였음

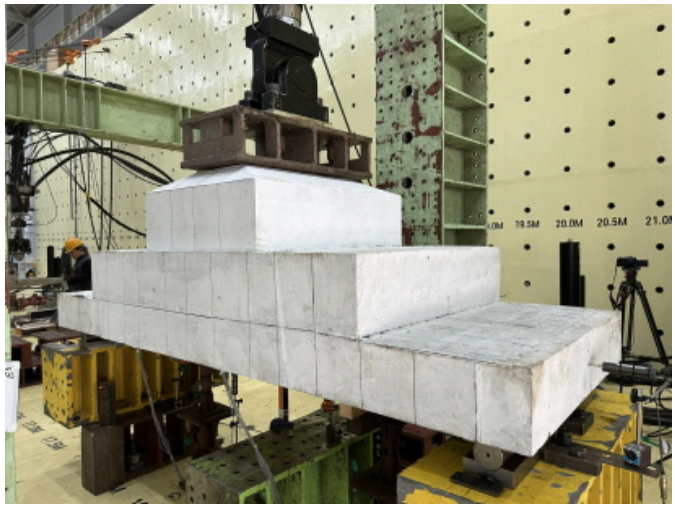
- 하중 조합은 고정하중(D.L, 24.1 kN/m^2)과 활하중(L.L, 16.0 kN/m^2)을 기준으로 하여, 1차 가력(0.5D.L+0.5L.L), 2차 가력(D.L+L.L), 3차 가력(1.2D.L+1.6L.L) 순으로 실험을 수행

[표 3-4] 데크슬래브 적용 실험체 가력 하중 조합

하중	Dead load (D.L)	Live load (L.L)	0.5D.L + 0.5L.L	1.0D.L + 1.0L.L	1.2D.L + 1.6L.L
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

[표 3-5] 와이드 보 적용 실험체 가력 하중 조합

하중	Dead load (D.L)	Live load (L.L)	0.5D.L + 0.5L.L	1.0D.L + 1.0L.L	1.2D.L + 1.6L.L
ω (kN/m)	72.9	48.4	60.7	121.3	164.9
P_u (kN)	109.4	72.6	91.0	182.0	247.4





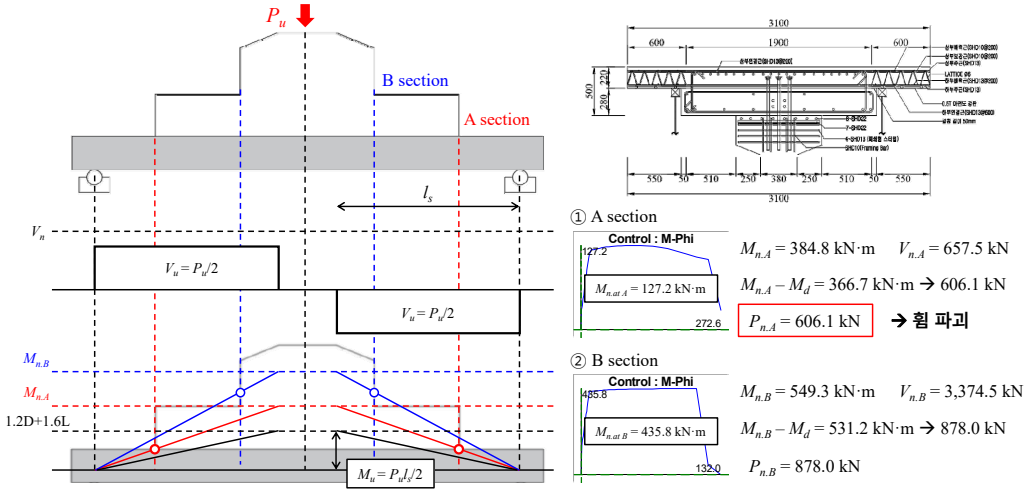
[그림 3-11] 중력하중 실험체 세팅

실험체 단면해석

○ 실험의 유효성 및 실험체 파괴모드를 알아보기 위하여 역학에 기초한 단면 해석을 수행하였음

- LH 공동주택 지하주차장 지진력저항시스템과 동일하게 보통모멘트골조 상세 기준을 적용
- 재료강도: 콘크리트 설계 압축강도 (40 MPa); 철근 설계 항복강도(D13 이하: 500 MPa; D16 이상: 600 MPa)

○ 단면해석 결과, 중력하중 실험체는 PC보와 데크플레이트 슬래브 또는 할로우코어 슬래브가 접합되는 “A-section”에서 휨파괴로 파괴됨을 확인하였으며, 그 때의 파괴강도는 606.1kN 이였음



[그림 3-12] 중력하중 실험체 단면 해석

[표 3-6] 실험체 단면 내력 산정결과

실험체	A section			B section		
	$M_{n.A}$ (kN·m)	$P_{n.A}$ (kN)	$V_{n.A}$ (kN)	$M_{n.B}$ (kN)	$P_{n.B}$ (kN)	$V_{n.B}$ (kN)
① GR-D	366.7	606.1	657.5	531.2	878.0	3,374.5
②GPN-D						
③ GPS-H	140.0	127.3	107.9	-	-	-
④ GPN-H	144.9	131.7	299.7	193.8	176.2	1,003.6

2) 중력하중 실험 결과

GR-D 실험체 하중-변위 관계

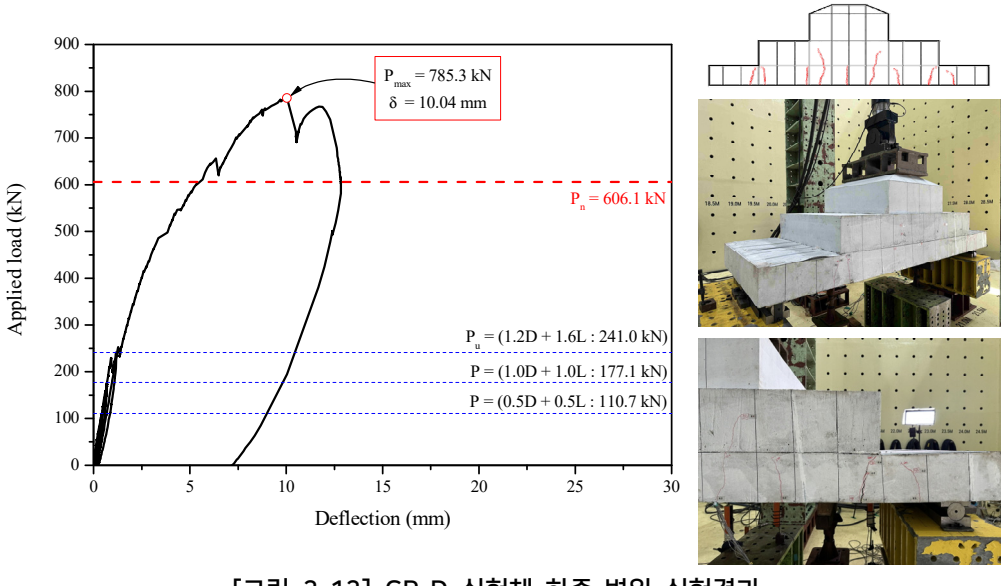
○ 실험 결과, 하중 초기단계에서는 선형 탄성 거동을 보였으며, 철근이 항복점에 도달한 이후에는 연성 거동을 나타내며 최대하중에 도달 후 파괴 예상지점에서 파괴되었음

- 실험체 하중은 강도 설계법에 따라 산정된 대표 하중 조합값(0.5D+0.5L: 110.7 kN, 1.0D+1.0L: 177.1 kN, 1.2D+1.6L: 241.0 kN)을 모두 상회함
- 최대 하중(Pmax)은 785.3kN, 최대 변위(δ)는 10.04mm로 나타나 이는 공칭강도(Pn)인 606.1kN 대비 약 29.6% 높은 수치임

[표 3-7] GR-D 실험체 실험 결과 요약

하중조합	실험체 하중		잔류변위
0.5D + 0.5L	110.7 kN		0.04 mm
1.0D + 1.0L	177.1 kN		0.06 mm
1.2D + 1.6L	241.0 kN		0.22 mm
P_n	606.1 kN	29.6%	-
P_{max}	785.3 kN		7.2 mm

D : Dead Load, L : Live Load

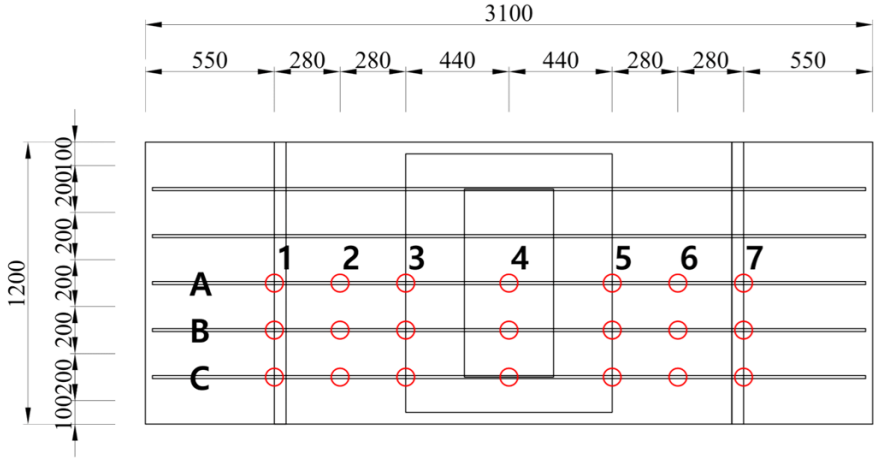


[그림 3-13] GR-D 실험체 하중-변위 실험결과

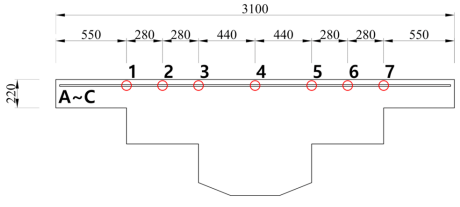
GR-D 실험체 변형률 분석

○ 실험 결과, 실험체 주철근에 부착된 철근의 변형률은 하중이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 최대하중 이후 실험체 파괴면(입면 1)에서 주철근의 항복이 나타남

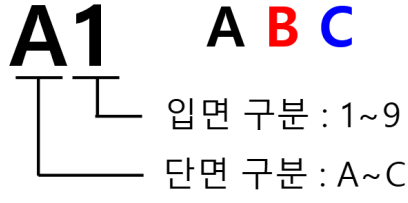
- 하중 조합값 0.5D+0.5L(110.7 kN)에서는 B1 위치에서 최대 변형률 47$\mu\varepsilon$가 측정되었고, 1.0D+1.0L(177.1 kN)에서는 C7 위치에서 79$\mu\varepsilon$, 1.2D+1.6L(241.0 kN)에서는 B1 위치에서 720$\mu\varepsilon$가 측정되어, 모두 탄성 거동 범위에 내에 있는 것으로 나타남



(a) 철근게이지 부착 위치(실험체 상부)

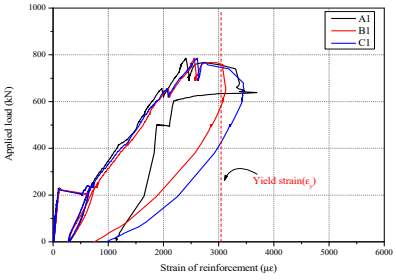


(b) 철근게이지 부착 위치(실험체 단면)

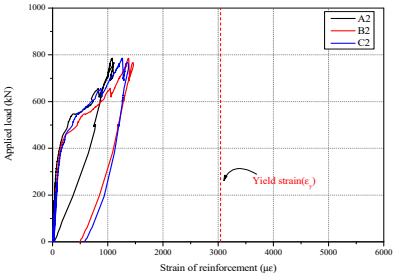


(c) 철근게이지 명명

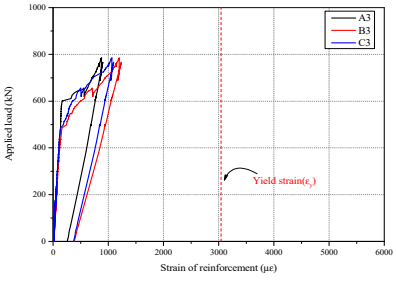
[그림 3-14] GR-D 실험체 철근게이지 부착 위치 상세



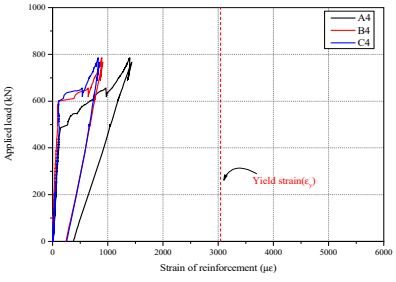
(a) 입면 1



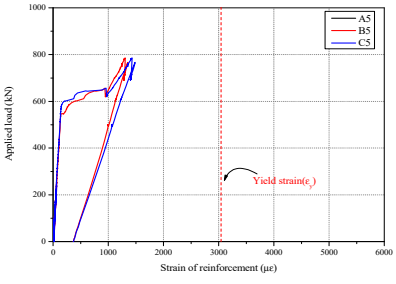
(b) 입면 2



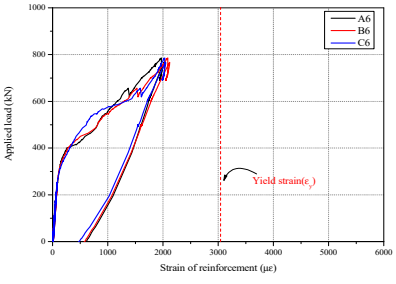
(c) 입면 3



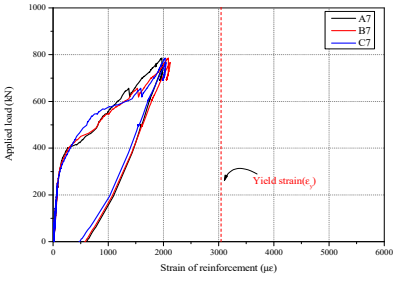
(d) 입면 4



(e) 입면 5



(f) 입면 6



(g) 입면 7

[그림 3-15] GR-D 실험체 철근 변형률 추이

GPN-D 실험체 하중-변위 관계

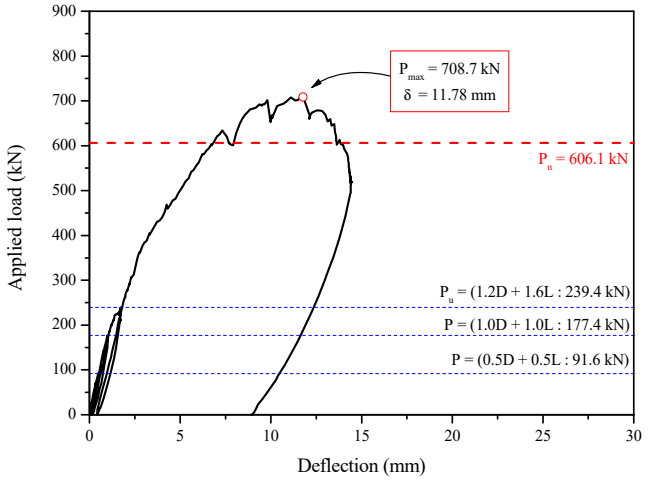
○ 실험 결과, GR-D 실험체와 유사하게 하중 초기단계에서는 선형 탄성 거동을 보였으며, 철근이 항복점에 도달한 이후에는 연성 거동을 나타내며 최대하중에 도달 후 파괴 예상지점에서 파괴되었음

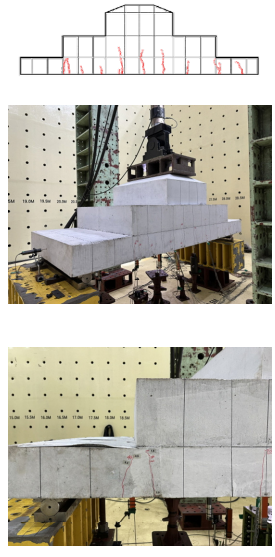
- 실험체 하중은 강도 설계법에 따라 산정된 대표 하중 조합값인 0.5D+0.5L (91.6 kN), 1.0D+1.0L(177.4 kN), 1.2D+1.6L(239.4 kN)을 모두 상회함
- 최대 하중(Pmax)은 708.7kN, 최대 변위는 11.78mm로 측정되었으며, 이는 공칭강도(Pn)인 606.1kN보다 약 16.9% 높은 수치임

[표 3-8] GPN-D 실험체 실험 결과 요약

하중조합	실험체 하중		잔류변위
0.5D + 0.5L	91.6 kN		0.06 mm
1.0D + 1.0L	177.4 kN		0.16 mm
1.2D + 1.6L	239.4 kN		0.42 mm
P_n	606.1 kN	16.9%	-
P_{max}	708.7 kN		8.96 mm

D : Dead Load, L : Live Load





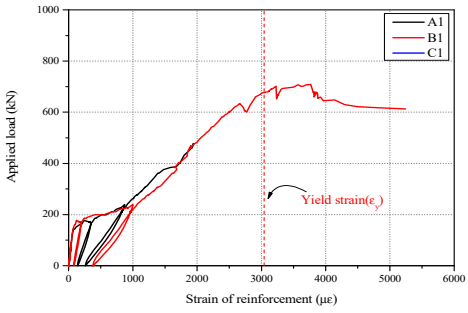
[그림 3-16] GPN-D 실험체 하중-변위 실험결과

GPN-D 실험체 변형률 관계

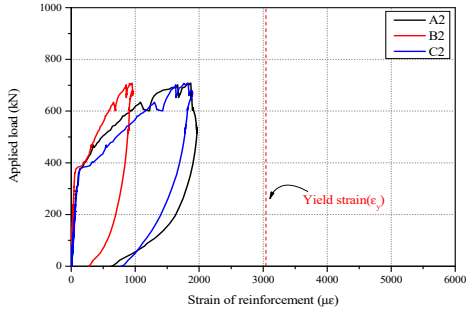
○ GPN-D 실험체는 GR-D 실험체와 동일한 철근 위치에 변형률게이지를 부착하였음

○ 실험 결과, 실험체 주철근에 부착된 철근의 변형률은 하중이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 최대하중 이후 실험체 파괴면(입면 1의 B 철근)에서 주철근의 항복이 나타남

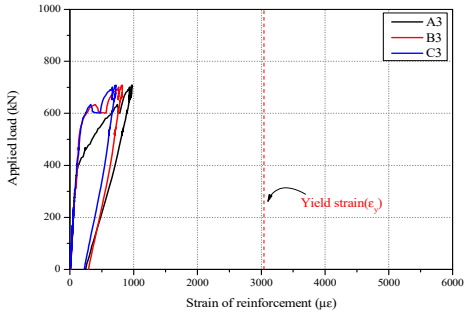
- 하중 조합값 0.5D+0.5L(91.6 kN)에서는 A1 위치에서 최대 변형률 39$\mu\varepsilon$가 측정되었고, 1.0D+1.0L(177.4 kN)에서는 동일 위치에서 240$\mu\varepsilon$, 1.2D+1.6L (239.4 kN)에서는 B1 위치에서 996$\mu\varepsilon$가 측정되어, 모두 탄성 거동 범위에 내에 있는 것으로 나타남



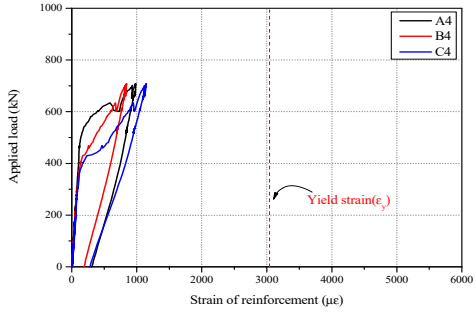
(a) 입면 1



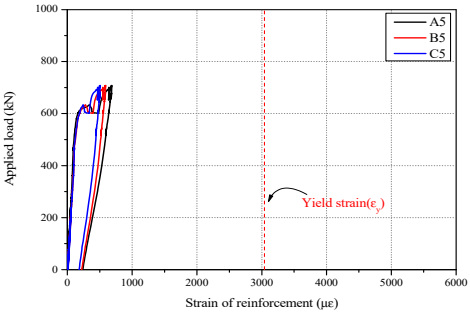
(b) 입면 2



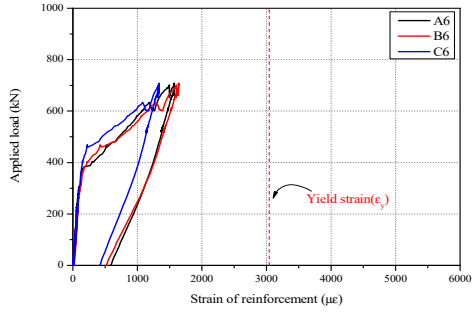
(c) 입면 3



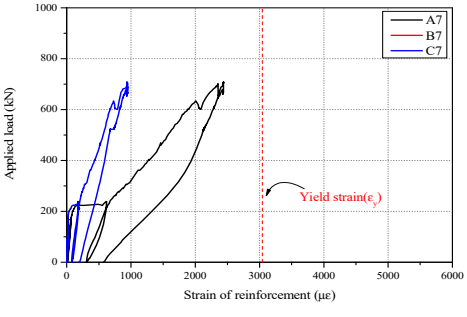
(d) 입면 4



(e) 입면 5



(f) 입면 6



(g) 입면 7

[그림 3-17] GPN-D 실험체 철근 변형률 추이

GPS-H 실험체 하중-변위 관계

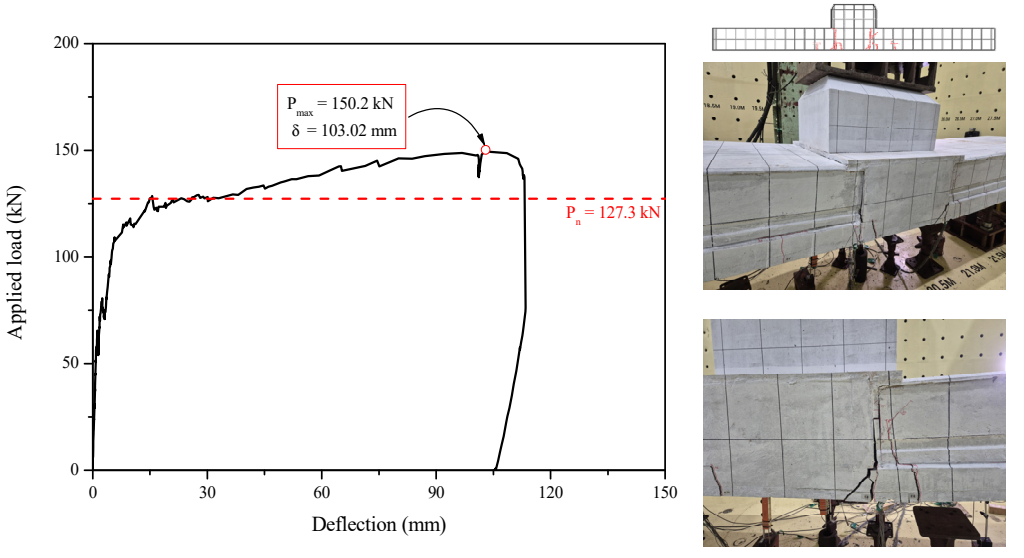
○ 실험 결과, 보-기둥 구조(W-PC) 실험체와 유사하게 하중 초기 단계에서는 선형 탄성 거동을 보였으며, 철근이 항복점에 도달한 이후에는 연성 거동을 나타내며 최대하중에 도달 후 철골보와 PC기둥의 접합면에서 파괴되었음

- 최대 하중(Pmax)은 150.2kN, 최대 변위는 103.0mm로 측정되었으며, 이는 공칭강도(Pn)인 127.3kN보다 약 18.0% 높은 수치로 확인됨

[표 3-9] GPS-H 실험체 실험 결과 요약

하중조합	실험체 하중		잔류변위
P_n	127.3 kN	18%	-
$P_{\max}$	150.2 kN		103.0 mm

D : Dead Load, L : Live Load

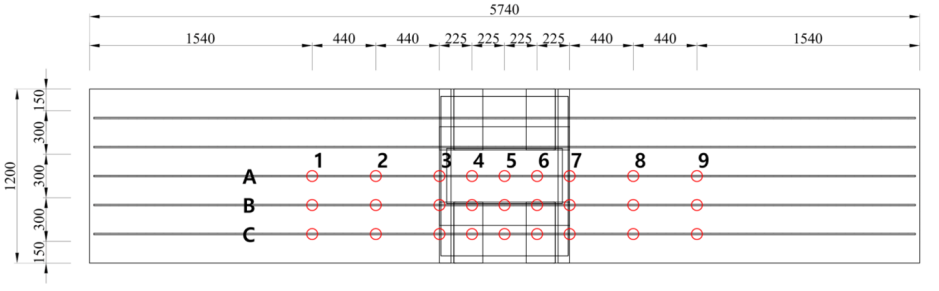


[그림 3-18] GPS-H 실험체 하중-변위 실험결과

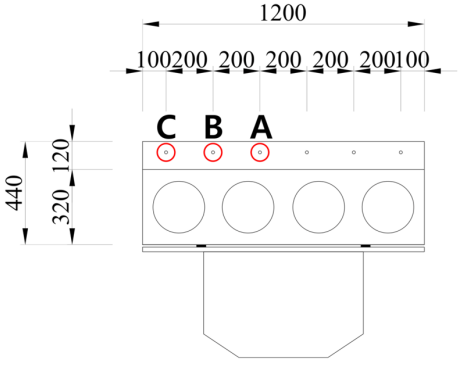
GPS-H 실험체 변형률 관계

○ 실험 결과, 실험체 주철근에 부착된 철근의 변형률은 하중이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 최대하중 이후 철골합성보와 PC거둥의 접합부(입면 3,4,5,6,7)에서 주철근의 항복이 나타남

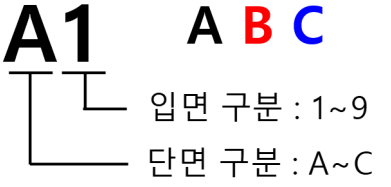
- 최대 하중(Pmax)인 150.2 kN 시점에서는 A3 위치에서 최대 11,341$\mu\varepsilon$, B4 위치에서 8,309$\mu\varepsilon$, C5 위치에서 10,572$\mu\varepsilon$의 변형률이 각각 측정되었으며, 세 지점 모두 철근의 항복 변형률을 초과하여 항복 상태에 도달



(a) 철근게이지 부착 위치(실험체 상부)

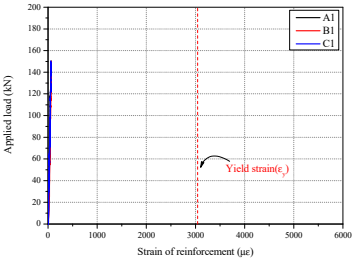


(b) 철근게이지 부착 위치(실험체 단면)

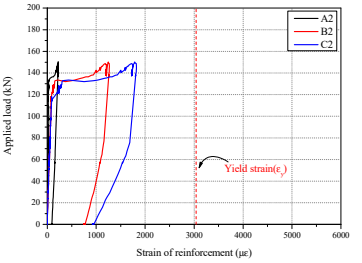


(c) 철근게이지 명명

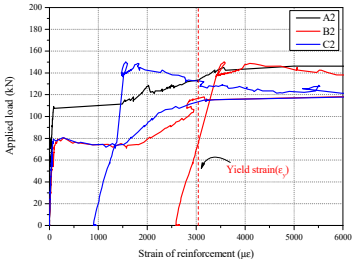
[그림 3-19] GPS-H 실험체 게이지 부착 위치 상세



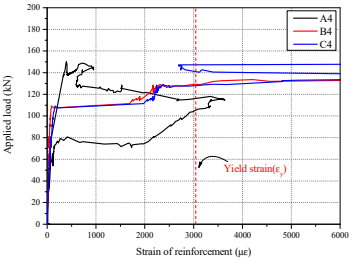
(a) 입면 1



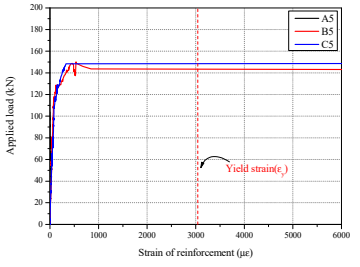
(b) 입면 2



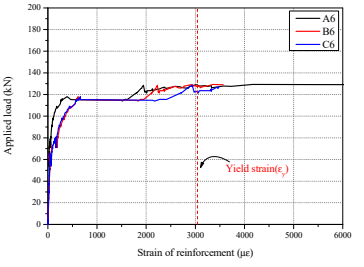
(c) 입면 3



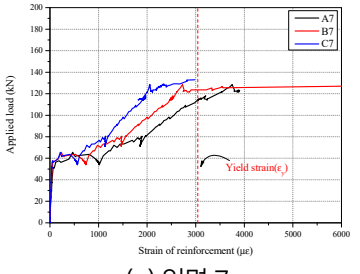
(d) 입면 4



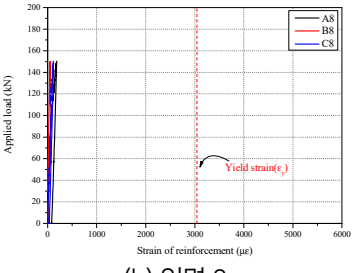
(e) 입면 5



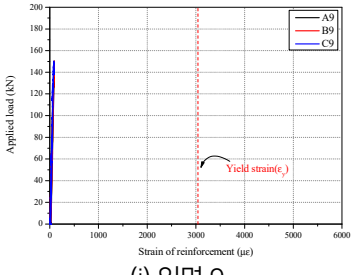
(f) 입면 6



(g) 입면 7



(h) 입면 8



(i) 입면 9

[그림 3-20] GPS-H 실험체 철근 변형률 추이

GPN-H 실험체 하중-변위 관계

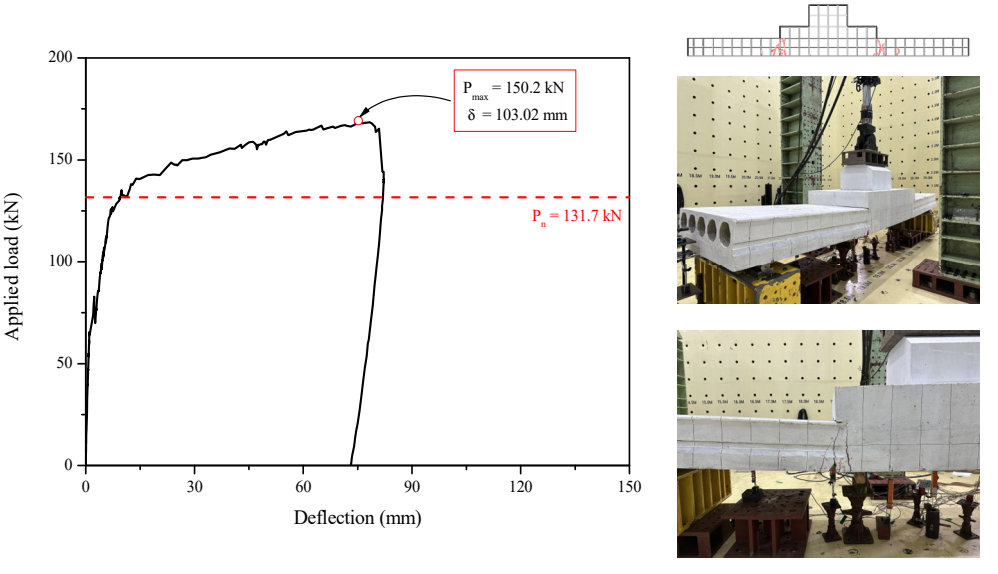
○ 실험 결과, 모든 실험체와 유사하게 하중 초기 단계에서는 선형 탄성 거동을 보였으며, 철근이 항복점에 도달한 이후에는 연성 거동을 나타내며 최대하중에 도달 후 PC보와 할로우 코어 슬래브 접합면에서 파괴되었음

- 최대 하중(Pmax)은 169.2kN, 최대 변위는 73.2mm로 측정되었으며, 이는 공칭강도(P_n)인 131.7kN보다 약 14.0% 높은 수치로 확인됨

[표 3-10] GPN-H 실험결과 요약

하중조합	실험체 하중	잔류변위
P_n	131.7 kN	-
$P_{\max}$	169.2 kN	103.0 mm

D : Dead Load, L : Live Load

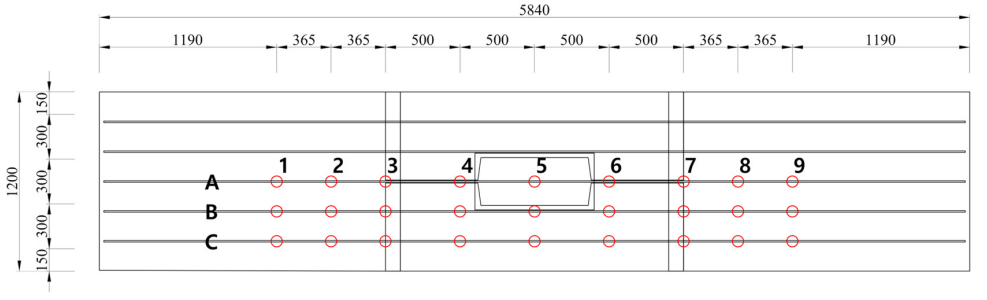


[그림 3-21] GPN-H 실험체 하중-변위 실험결과

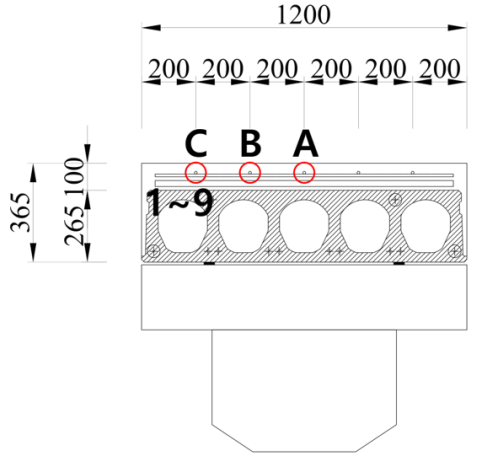
GPN-H 실험체 변형률 관계

○ 실험 결과, 실험체 주철근에 부착된 철근의 변형률은 하중이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 최대하중 이후 PC보와 할로우 코어 슬래브 접합부에서 철근의 항복이 발생

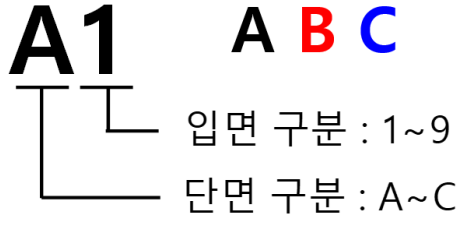
- 최대 하중(Pmax)인 169.2 kN 시점에서 A2 위치의 변형률은 2,281 $\mu\varepsilon$, B6 위치는 3,283 $\mu\varepsilon$, C4 위치는 11,300 $\mu\varepsilon$로 측정되어 B6와 C4에서 항복이 나타났음



(a) 철근게이지 부착 위치(실험체 상부)

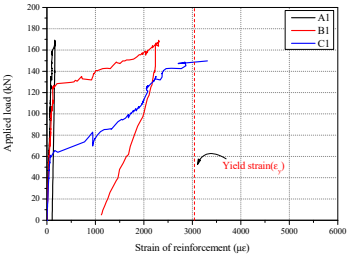


(b) 철근게이지 부착 위치(실험체 단면)

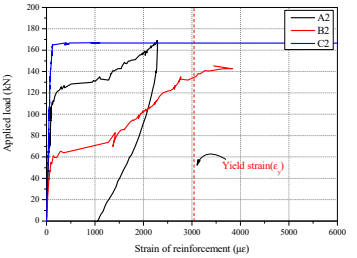


(c) 철근게이지 명명

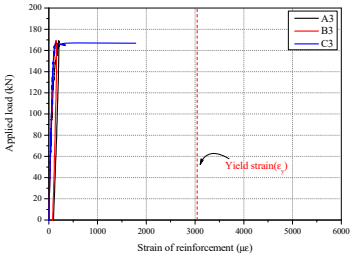
[그림 3-22] GPN-H 실험체 게이지 부착 위치 상세



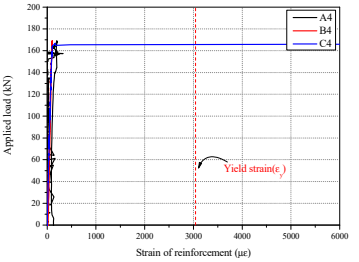
(a) 입면 1



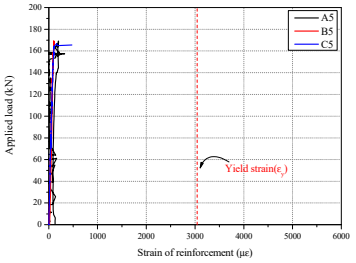
(b) 입면 2



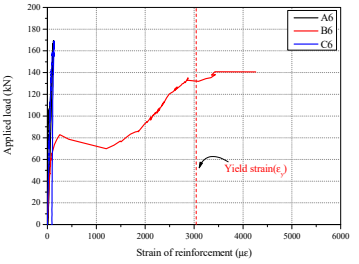
(c) 입면 3



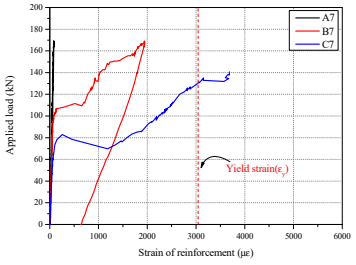
(d) 입면 4



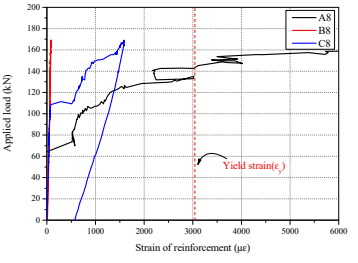
(e) 입면 5



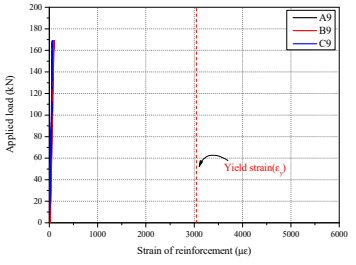
(f) 입면 6



(g) 입면 7



(h) 입면 8



(i) 입면 9

[그림 3-23] GPN-H 실험체 철근 변형률 추이

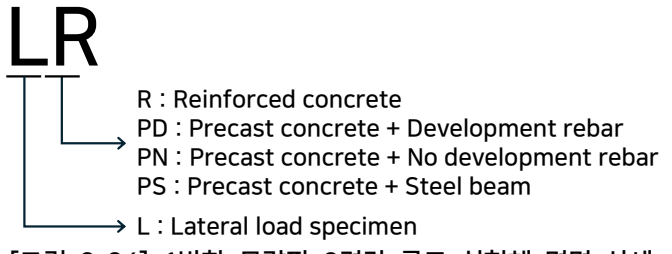
2 1방향 PC구조 공법의 반복하중 실험

1) 반복하중 실험 계획(2경간 골조)

1방향 PC구조 공법의 접합부 영역을 대상으로 반복하중 실험 수행

○ 반복하중 실험은 1방향 PC무량판 공법에서 경간에 차이에 의하여 발생할 수 있는 불균형 모멘트에 대한 구조안정성 검증을 위하여 수행됨

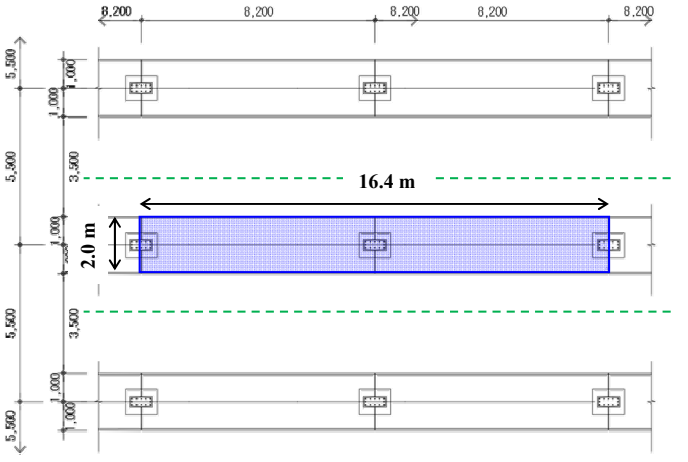
- LH 주차장 프로토 타입(보통모멘트골조)과 현행기준(KDS)에 맞추어 설계
- 철근 배근 상세와 보 부재의 상세를 변수로 하여 2경간 골조 축소 실험체(축소율 55%) 총 4개(PC-3개, RC-1개)를 계획



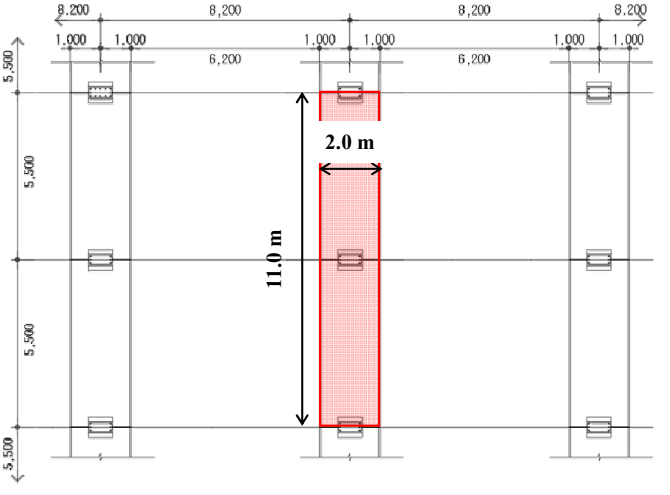
[그림 3-24] 1방향 무량판 2경간 골조 실험체 명명 상세

[표 3-11] 1방향 PC구조 반복하중 실험체 설계 요약

실험체 명	LR	LPD	LPN	LPS
기둥 단면 규격	0.3 m × 0.45 m			0.45 m × 0.3 m
보 단면 규격	1.1 m × 0.28 m			0.6 m × 0.28 m
실험체 길이	9.7 m			6.65 m
실험체 높이	1.765 m			
무량판 접합부 상세	RC 공법	PC 공법 180° 표준갈고리	PC 공법 150 mm 정착	PC 공법 강재형 합성보



(a) 8.2m × 5.5m type



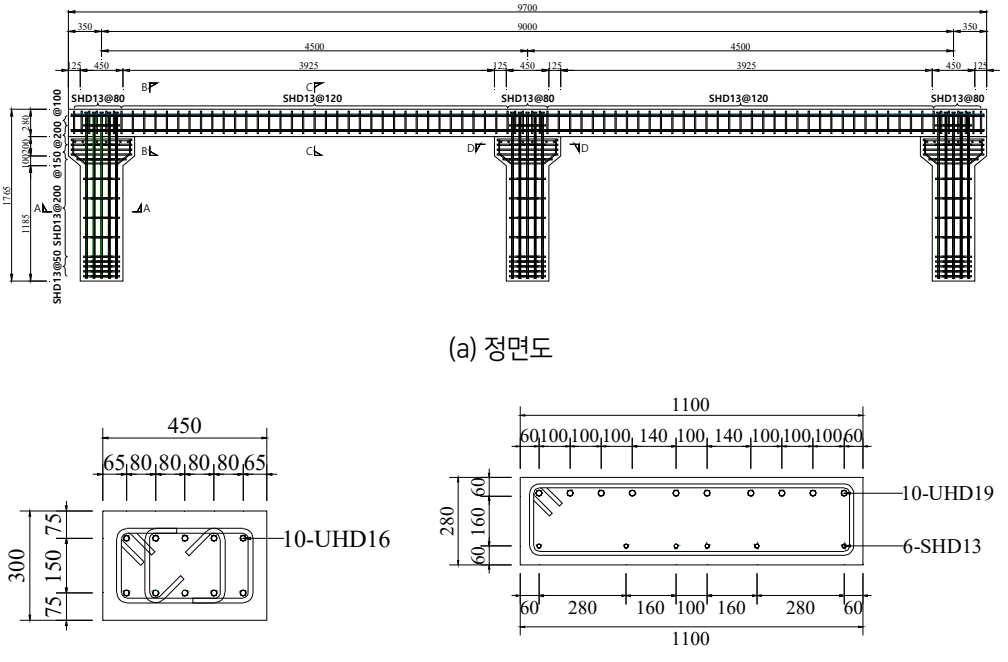
(b) 5.5m × 8.2m type

[그림 3-25] 주차장 모듈에 따른 실험체

LR 실험체 설계

○ LR는 1방향 보-기둥(W-PC) 공법 적용 실험체로, 8.2 m × 5.5 m 모듈에 적용된 상세이며, 재래식인 RC공법을 적용하였음

- RC기둥 단면의 치수는 폭 300mm, 높이 450mm이며, 길이방향 철근은 UHD16(항복강도 600MPa 등급) 철근 10개로 배근 되었음. 기둥 상단의 주철근은 정착길이 확보 및 시공성 향상을 위해 확대머리 철근으로 설계
- RC보 단면의 치수는 폭 1,000mm, 높이 280mm이며, 실제 구조물의 하중 분포를 고려하여 보 양단부(부방향 모멘트)와 중앙부(정방향 모멘트)의 철근 배근 상세가 상이하도록 설계하였음



(a) 정면도

(b) 기둥 단면

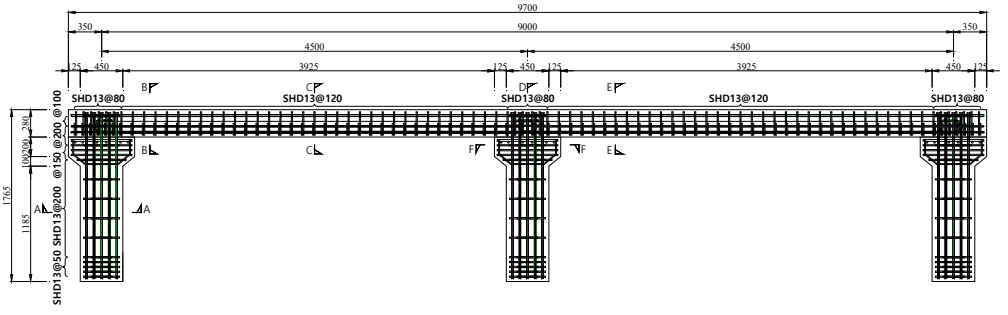
(c) 보 단면

[그림 3-26] LR 실험체 설계 상세

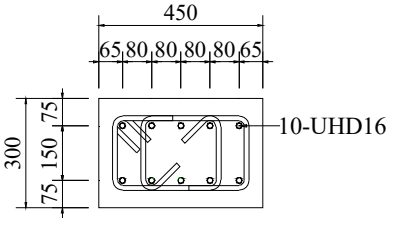
LPD 실험체 설계

○ LPD는 1방향 보-기둥(W-PC) 공법 적용 실험체로, 8.2 m × 5.5 m 모듈에 적용된 상세이며, PC공법을 적용하였음

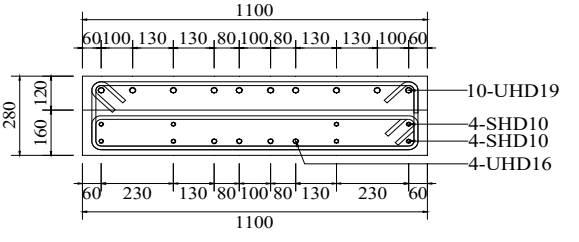
- PC보 및 PC기둥 단면의 치수 및 철근배근은 LR 실험체와 동일하며, 보-기둥 접합부 (즉, 패널존)에서 보 주철근을 180˚ 표준갈고리로 정착하여 요구 정착길이를 만족하도록 설계하였음



(a) 정면도



(b) 기둥 단면



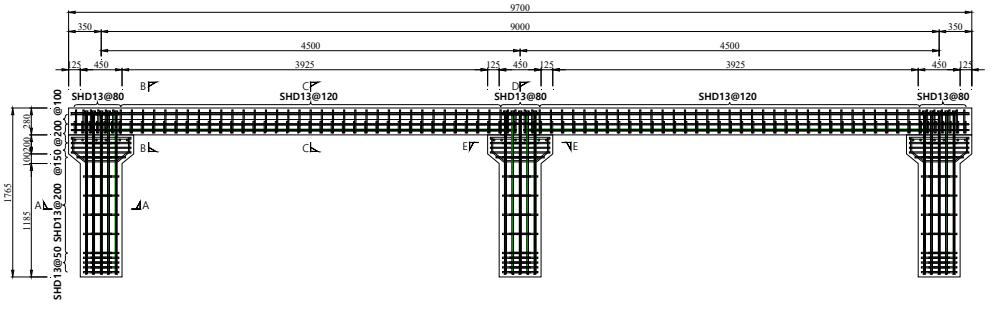
(c) 보 단면

[그림 3-27] LPD 실험체 설계 상세

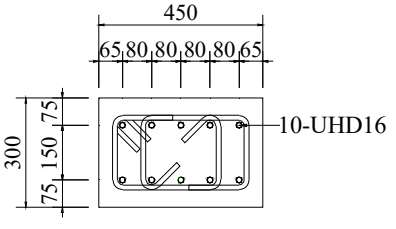
LPN 실험체 설계

○ LPN는 1방향 보-기둥(W-PC) 공법 적용 실험체로, 8.2 m × 5.5 m 모듈에 적용된 상세이며, PC공법을 적용하였음

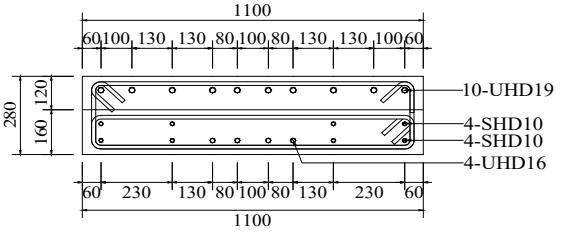
- PC보 및 PC기둥 단면의 치수 및 철근배근은 LPD 실험체와 동일하며, 보-기둥 접합부 (즉, 패널존)에서 보 주철근을 KDS 14 20 52 4.4.2(1)에 따라 최소 연장길이 (즉, 150 mm)로 배근하여 철근의 정착에 따른 구조거동을 평가하였음



(a) 정면도



(b) 기둥 단면



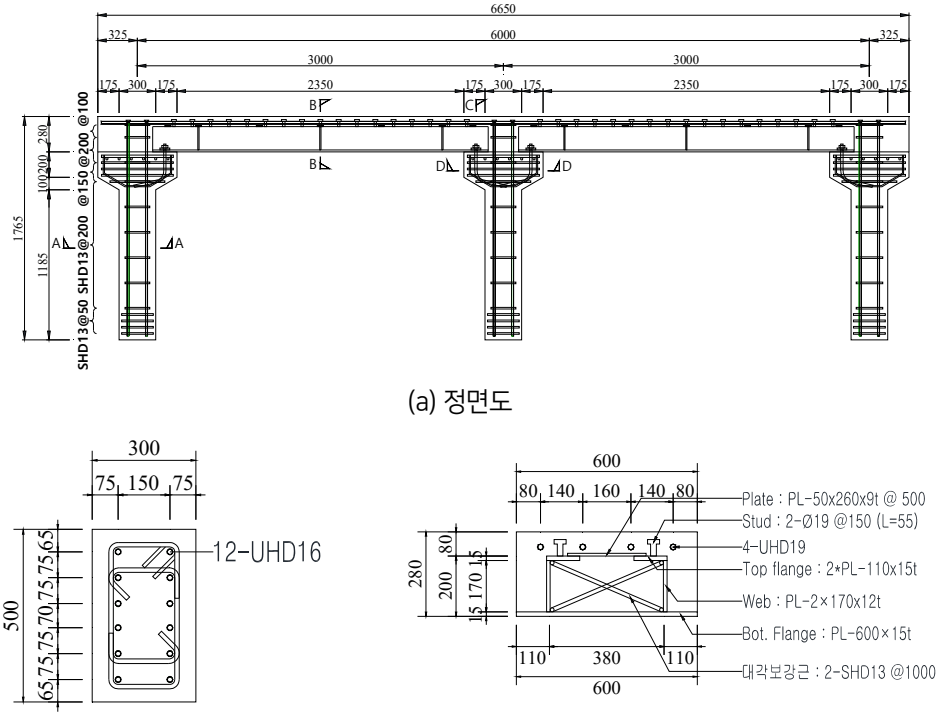
(c) 보 단면

[그림 3-28] LPN 실험체 설계 상세

LPS 실험체 설계

○ LPS는 1방향 무량판(H-PC) 공법 적용 실험체로, 5.5 m × 8.2 m 모듈에 적용된 상세이며, PC공법을 적용하였음

- 철골합성보와 PC기둥을 통하여 접합되며, 강재형 합성보는 'ㅁ'자 단면 형상으로 하부 플랜지의 폭은 브라켓 폭과 동일하게 설계하였음
- 철골합성보 상부에는 시공성을 고려하여 콘크리트 타설 간 간섭을 최소화할 수 있도록 500mm 간격으로 플레이트를 배치하였고, 내부에는 SHD13 2개의 대각 보강근을 1,000 mm 간격으로 배근하여 합성보의 변형을 방지
- 철골합성보는 PC기둥 상단에서 수직방향으로 돌출된 2-M19의 전산볼트와 기계식으로 연결되어 구조적 일체성을 확보하였으며, PC 브라켓과의 걸침 길이는 200mm로 계획함



(a) 정면도

(b) 기둥 단면

(c) 보 단면

[그림 3-29] LPS 실험체 설계 상세

반복하중 실험체 제작

○ 실험체는 각 시공 공법 및 도면에 따라 제작되었음

- LR 실험체는 RC기둥을 먼저 제작한 후, 보와 슬래브의 철근배근 및 거푸집 작업 후 콘크리트를 일체화 타설하여 제작
- PC실험체의 경우, 일반적인 PC부재 설치와 동일하게 PC기둥과 PC보를 각각 별도로 제작한 뒤, PC보 상부에 타설되는 덧침콘크리트와 PC부재 간의 일체성을 확보하기 위해, 보 상부면에는 거친면 처리를 수행하였음



(a) RC 기둥 철근 배근



(b) RC 기둥 콘크리트 타설



(c) RC 기둥 증기 양생



(d) RC 보 상·하부 철근 배근



(e) RC 보-기둥 접합부 상세



(f) RC 보 콘크리트 타설

[그림 3-30] LR 실험체 제작 과정



(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 상부철근 배근



(g) PC 보-기둥 접합부 상세



(h) 덧침콘크리트 타설

[그림 3-31] LPD 실험체 제작 과정



(a) PC 기둥 철근 배근



(b) PC 보 철근 배근



(c) PC 기둥 콘크리트 타설



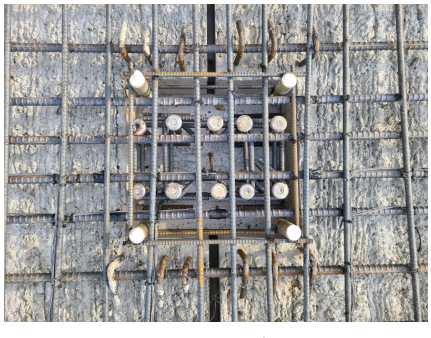
(d) PC 보 콘크리트 타설



(e) PC 기둥 및 보 조립



(f) 보 상부철근 배근



(g) PC 보-기둥 접합부 상세



(h) 덧침콘크리트 타설

[그림 3-32] LPN 실험체 제작 과정





(a) 강재형 합성보 제작



(c) PC 기둥 철근 배근



(d) PC 기둥 콘크리트 타설





(e) PC 기둥-강재형 합성보 조립



(g) 보 상부 철근 배근



(h) 덧침콘크리트 타설

[그림 3-33] LPS 실험체 제작 과정

반복하중 실험체 재료 물성

○ 실험체에 사용된 콘크리트는 현행 LH 및 PC공장에서 널리사용되는 강도를 적용하였음. 실험체 콘크리트 설계 압축강도는 40MPa, 실제 공시체 시험을 통해 얻은 압축강도는 39.5 ~ 42.9 MPa 수준으로 나타났음

○ 현행 LH기준에 맞추어 철근의 직경에 따른 항복강도를 적용하였으며, 인장시험 결과, 항복강도 및 인장강도가 설계항복강도를 상회하였음

[표 3-12] 반복하중 실험체 콘크리트 압축강도 실험결과

구분		시험 압축강도 (f_c', MPa)			
		LR	LPD	LPN	LPS
콘크리트 (PC/RC*)	보	- / 42.9	41.9 / 42.9	41.9 / 42.9	- / 42.9
	기둥	41.3	39.5	39.5	41.3

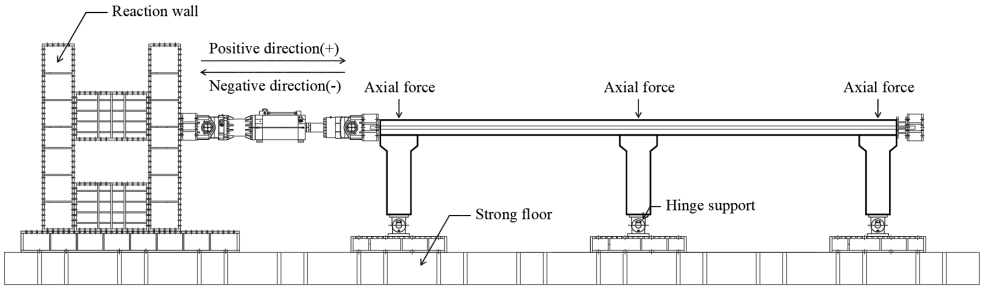
* PC 실험체의 경우, RC는 덧침콘크리트를 의미함.

반복하중 실험 방법 및 계측 계획

○ 반복하중 실험체의 횡력은 1,000 kN 용량의 액추에이터 (Actuator)를 이용하여 가력하였으며, 각 실험체 보 외부에 양방향 강봉을 연결해 반대편 실험체 면까지 연결하여 횡력이 실험체에 일정하게 전달받도록 함

○ 각 기둥의 하부에는 힌지 지점 철물을 체결하여 핀 지점을 구현하였으며, 총 3개의 힌지 철물을 배치하였음

○ 반복하중 실험체는 주차장 슬래브에서 발생하는 하중을 모사하기 위해 보 상부면에 약 54 ton의 축력을 오일 잭 (Oil jack)을 통해 가력하였음

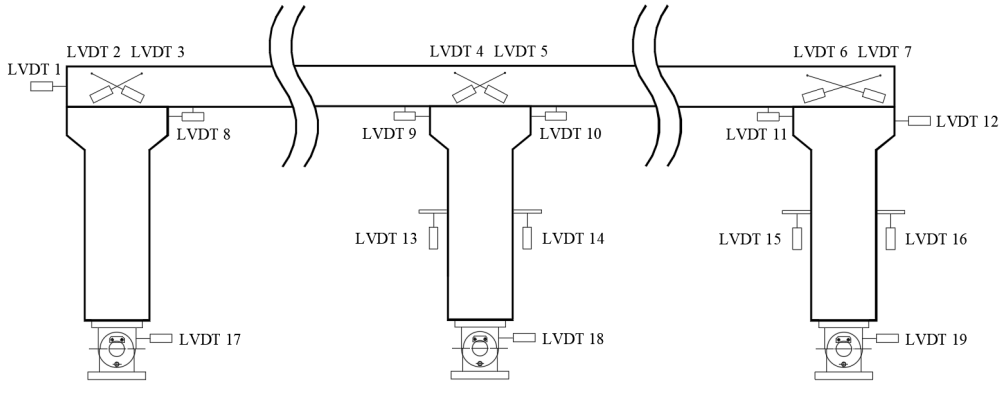


[그림 3-34] 1방향 PC구조 반복가력 실험체 세팅안



[그림 3-35] 1방향 PC구조 반복가력 실험체 세팅 사진

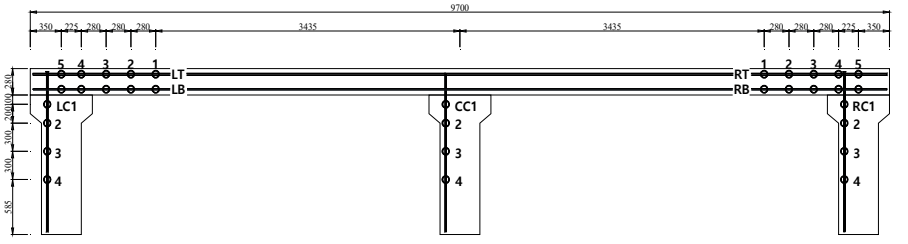
○ 반복하중 실험체의 횡변위 및 전단변위를 측정하기 위하여 실험체 내부 및 외부에 변위변환계(LVDT)를 설치하였음



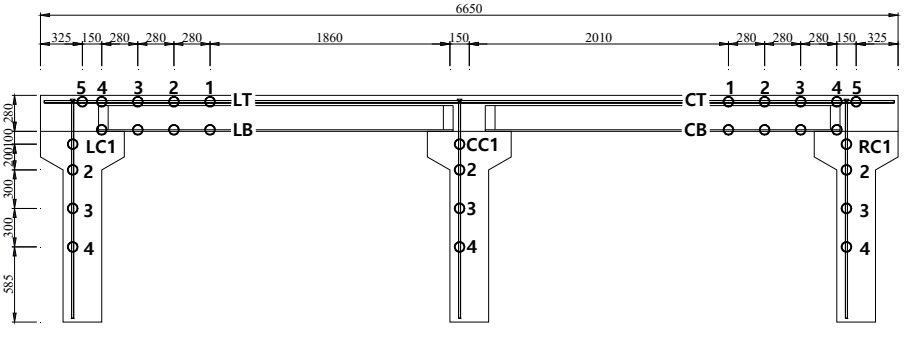
[그림 3-36] 실험체 변위 계측 계획

○ 반복하중 실험체는 철근 변형률 게이지를 철근을 부착하여 하중단계에 따른 철근의 변형률을 실시간으로 계측하였음

- 실험체의 항복여부와 주요 구조 파괴모드를 정량적으로 평가
- 기둥 및 보의 소성힌지 발생 예상 구간을 위주로 변형률 계측을 계획



(a) LR, LPD, LPN 실험체



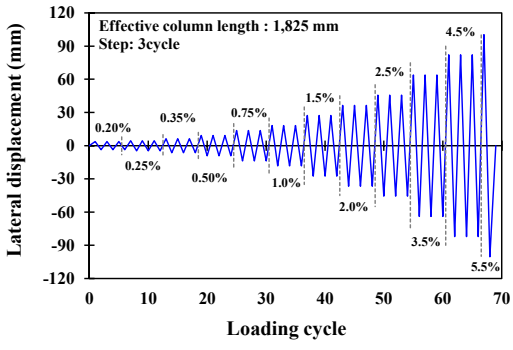
(b) LPS 실험체

[그림 3-37] 철근 변형률 계측 위치

○ 반복하중 실험체의 하중 가력은 변위 제어방식으로 층간변위비 0.2%부터 4.5%까지 총 11step에 대하여 정방향 (Push, +), 부방향 (Pull, -)으로 각각 3회씩 반복 가력 수행

$$\text{Story drift ratio} = \triangle / h_{eff} \tag{3.1}$$

- △는 실험체의 절대 수평변위를 의미하며, h_{eff}는 가력점에서부터 기둥 하부에 위치한 힌지까지의 거리이며, 유효높이는 1,825mm임

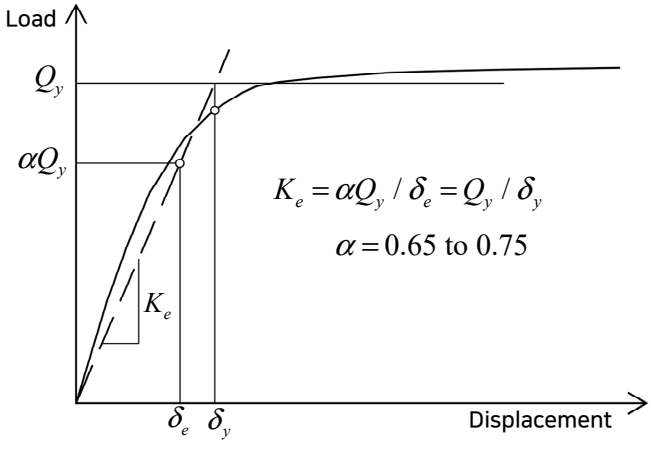


Step	Drift ratio (%)	Lateral Disp.
1	0.2	3.7
2	0.25	4.6
3	0.35	6.4
4	0.5	9.1
5	0.75	13.7
6	1.0	18.3
7	1.5	27.4
8	2.0	36.5
9	2.5	45.6
10	3.5	63.9
11	4.5	82.1
12	5.5	100.4

[그림 3-38] 실험체 가력 프로토콜

○ 반복하중 실험체의 항복점은 ACI 374.2R-13에 명시되어 있는 항복점 산정 방식으로 산정하였음

- 하중-변형 곡선 상에서 선형 (탄성) 응답에서 비선형 (소성) 응답으로 변화하는 점을 산정하는 방식
- 항복하중은 항복 부재의 공칭강도(Q_y)에 대해 αQ_y로 산정하며, 휨 부재의 경우 는 0.75로 산정
- 유효 탄성강성(K_e)을 갖는 기울기로 원점과 αQ_y 지점을 연결하는 직선을 통해 항복변형(δ_y) 산정

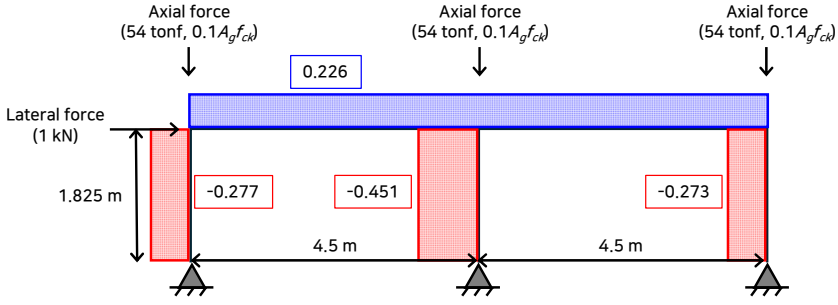


[그림 3-39] 항복하중과 항복변형 산정 근거

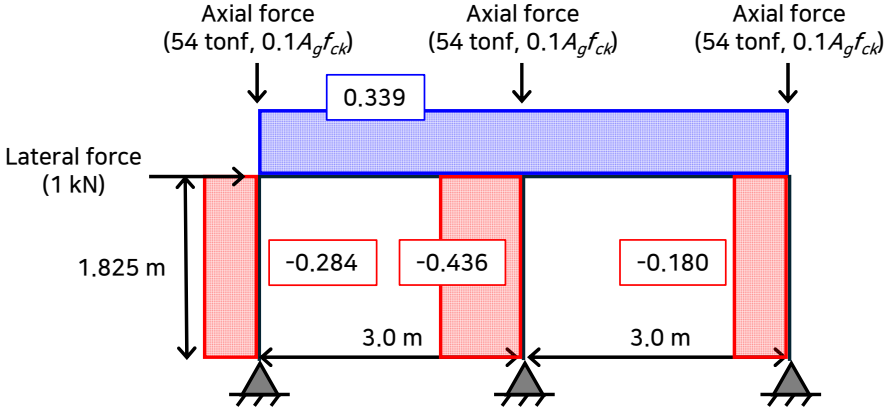
실험체 단면해석

○ 반복하중 실험체는 2경간의 3차 부정정 구조물로써, 축력과 횡력을 동시에 받는 하중상세를 고려하여 단면해석을 수행하였음

- 공칭강도를 산정하기 위하여 축력(단면의 10%)과 횡력(1kN)을 임의로 가력하여 전단력도와 휨모멘트도를 얻었음
- 단면해석결과, 2경간 골조 실험체 중앙부 기둥 상부의 휨 모멘트가 가장 큰 것으로 나타나, 실험체 파괴는 중앙부 기둥 상부에서 휨 파괴로 발생할 것으로 예측됨



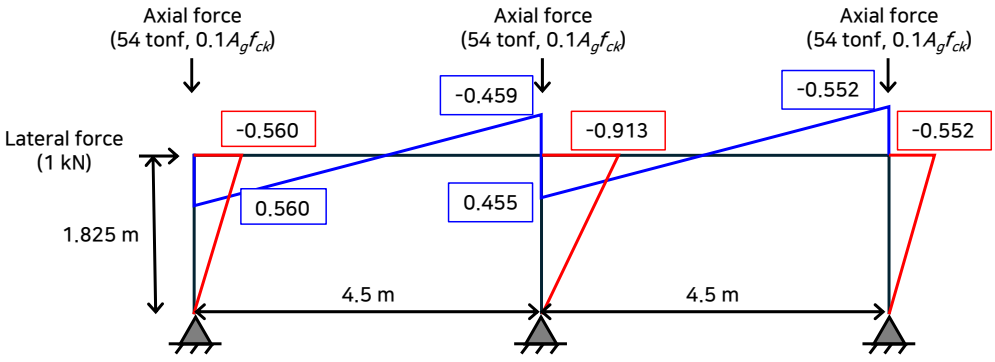
(a) 8.2 m × 5.5 m type



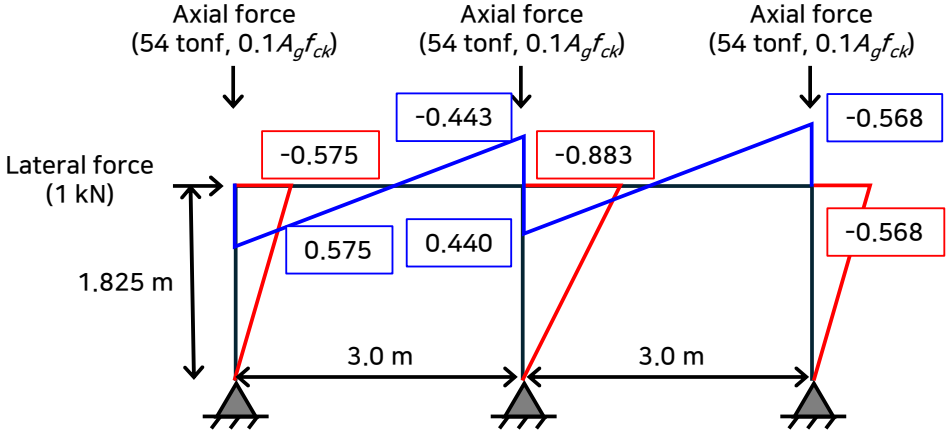
(b) 5.5 m × 8.2 m type

(a) 전단력도 (Shear force diagram, SFD)

[그림 3-40] 반복하중 실험체 전단력도(Shear force diagram, SFD)



(a) 8.2m × 5.5m type



(b) 5.5m × 8.2m type

[그림 3-41] 반복하중 실험체 휨모멘트도(Bending moment diagram, BMD)

2) 반복하중 실험 결과

LR 실험체 하중-변위 관계

○ 실험 결과, 하중 초기단계에서는 2경간의 중앙부 기둥에서 휨 균열이 발생하였으며, 실험체 철근이 항복점에 도달한 이후 최대하중에 도달 하여 파괴 예상지점인 중앙부 기둥에서 파괴가 발생

- 실험체는 층간변위비 정방향 0.80%, 부방향 -0.63%에서 항복점에 도달
- 실험체의 최대 하중은 층간변위비 정방향 1.94%에서 320.3kN, 부방향 -2.43%에서 338.9kN으로 나타났음. 이후 11 STEP(층간변위비 ±4.5%) 가력 중 층간변위비 정방향 3.76%, 부방향 -3.73%에서 파괴점에 도달



STEP 1 (층간변위비 0.2%)



STEP 2 (층간변위비 0.25%)



STEP 3 (층간변위비 0.35%)





STEP 4 (층간변위비 0.5%)





STEP 5 (층간변위비 0.75%)





STEP 6 (층간변위비 1.0%)





STEP 7 (층간변위비 1.5%)



STEP 8 (층간변위비 2.0%)



STEP 9 (층간변위비 2.5%)

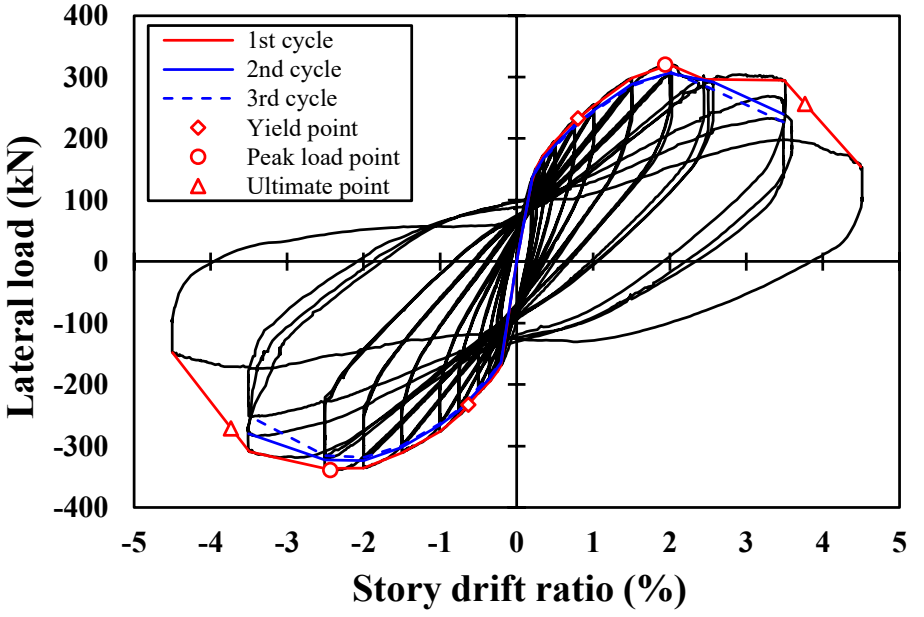


STEP 10 (층간변위비 3.5%)

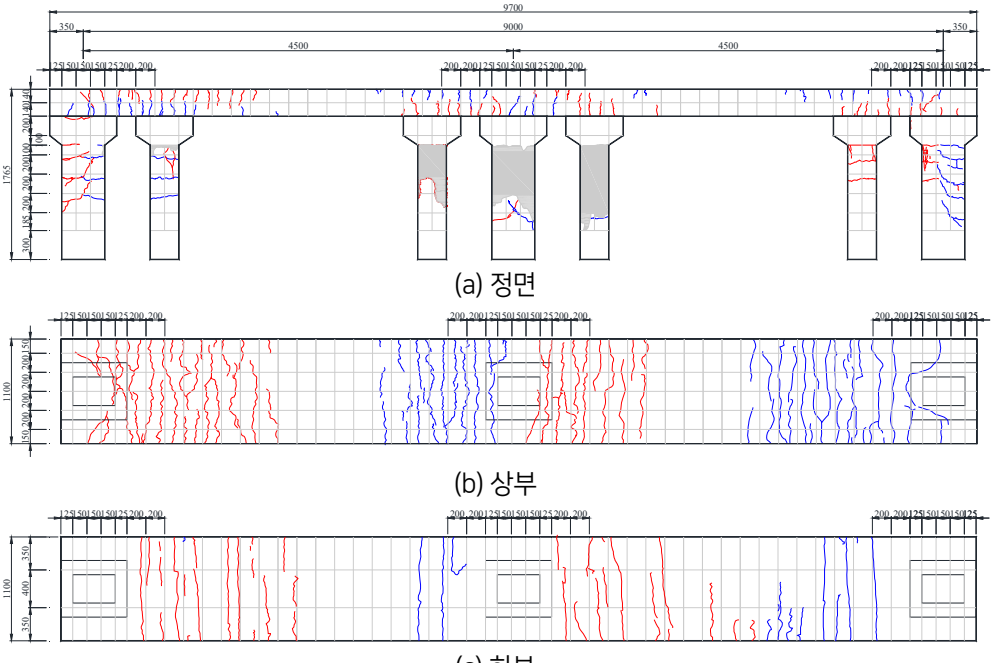


STEP 11 (층간변위비 4.5%)

[그림 3-42] LR 실험체 가력 단계별 균열 양상



[그림 3-43] LR 실험체 하중-층간변위비 이력곡선



(a) 정면

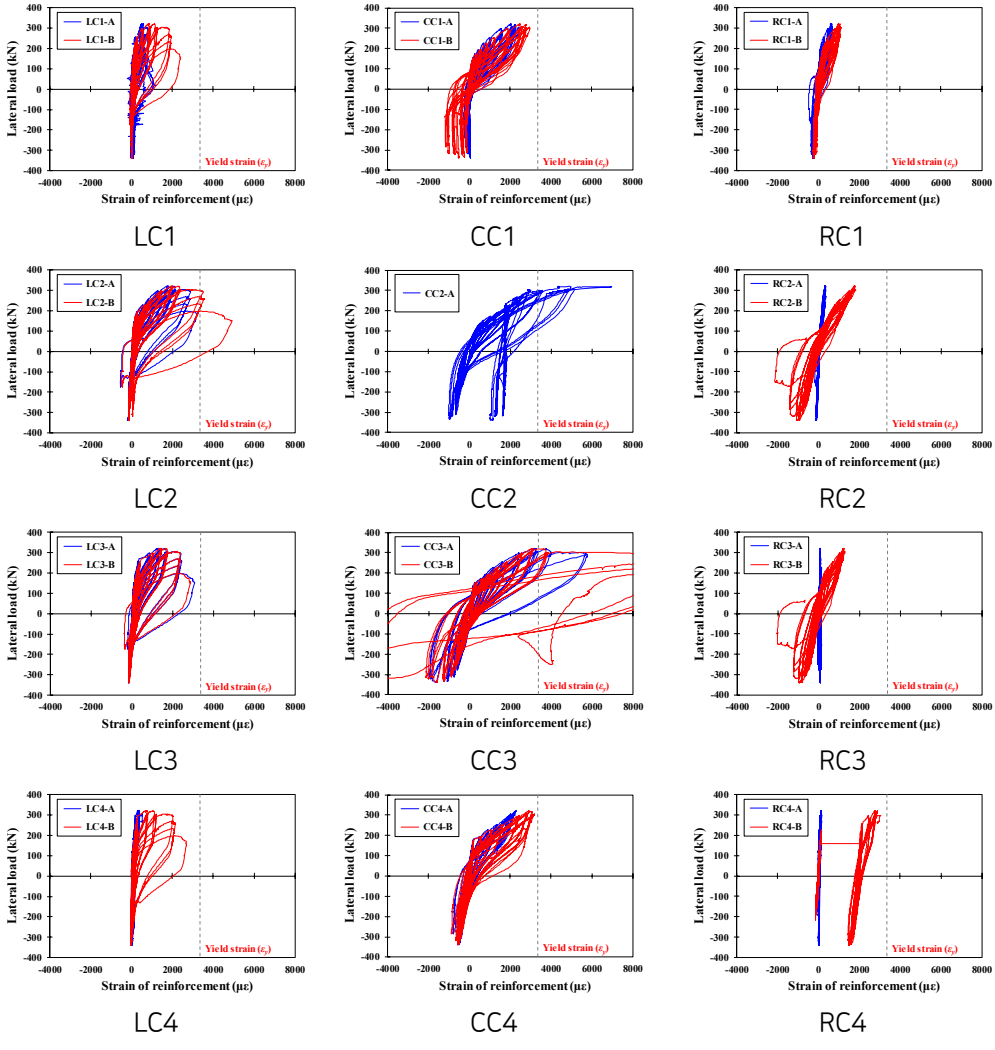
(b) 상부

(c) 하부

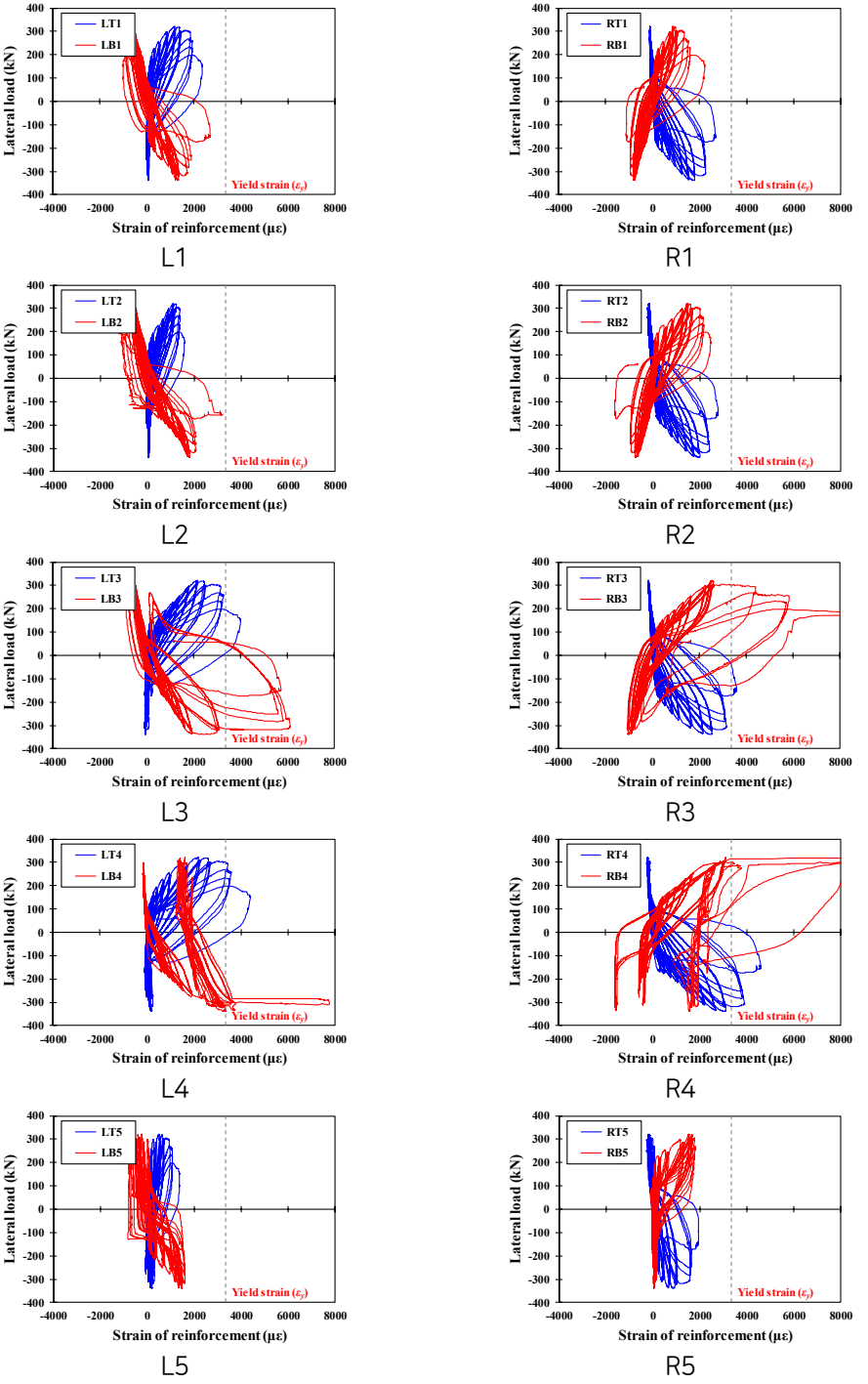
[그림 3-44] LR 실험체 최종 균열 양상

LR 실험체 변형률 관계

○ LR 실험체는 2경간 골조의 중앙부 기둥(CC), 특히 브라켓 하부 소성힌지 구간(CC 2, 3)의 주철근이 항복하였으며, 보-기둥 접합부 근처의(L, R의 3,4) 보 주철근의 변형률도 항복하는 것으로 나타났음



[그림 3-45] LR 실험체 철근 변형률 계측 결과(기둥)



[그림 3-46] LR 실험체 철근 변형률 계측 결과(보)

LPD 실험체 하중-변위 관계

○ 실험 결과, LR실험체와 유사하게 하중 초기단계에서는 2경간의 중앙부 기둥에서 휨 균열이 발생하였으며, 실험체 철근이 항복점에 도달한 이후 최대하중에 도달하여 파괴 예상지점인 중앙부 기둥에서 파괴가 발생

- 실험체는 층간변위비 정방향 0.67%, 부방향 -0.64%에서 항복점에 도달
- 실험체의 최대 하중은 층간변위비 정방향 3.10%에서 371.6kN, 부방향 -3.31%에서 -382.5kN으로 나타났음. 이후 11 STEP(층간변위비 ±4.5%) 가력 이후 중앙 기둥의 전단 손상이 집중되어 실험을 종료



STEP 1 (층간변위비 0.2%)



STEP 2 (층간변위비 0.25%)



STEP 3 (층간변위비 0.35%)





STEP 4 (층간변위비 0.5%)





STEP 5 (층간변위비 0.75%)





STEP 6 (층간변위비 1.0%)





STEP 7 (층간변위비 1.5%)



STEP 8 (층간변위비 2.0%)



STEP 9 (층간변위비 2.5%)

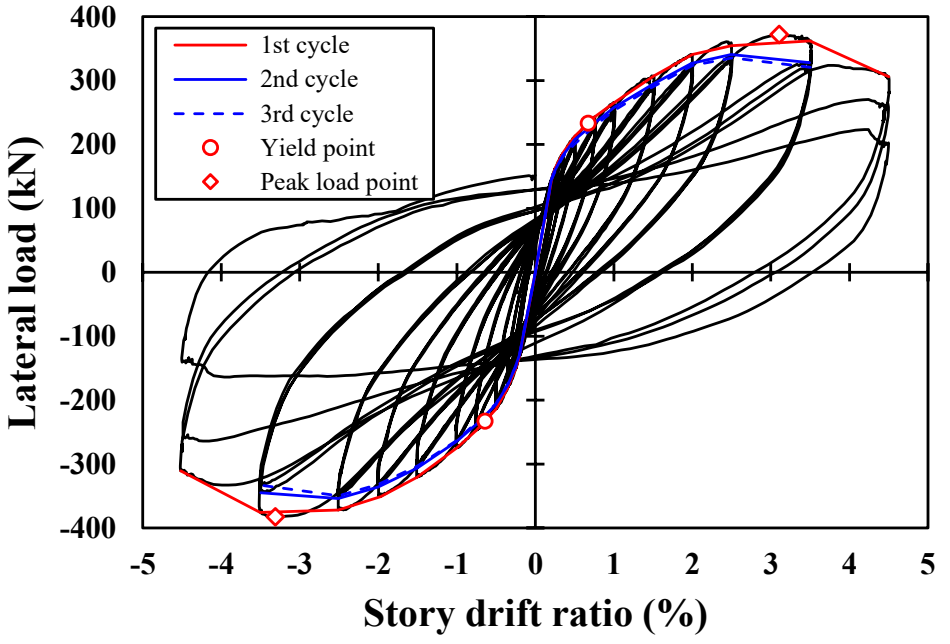


STEP 10 (층간변위비 3.5%)

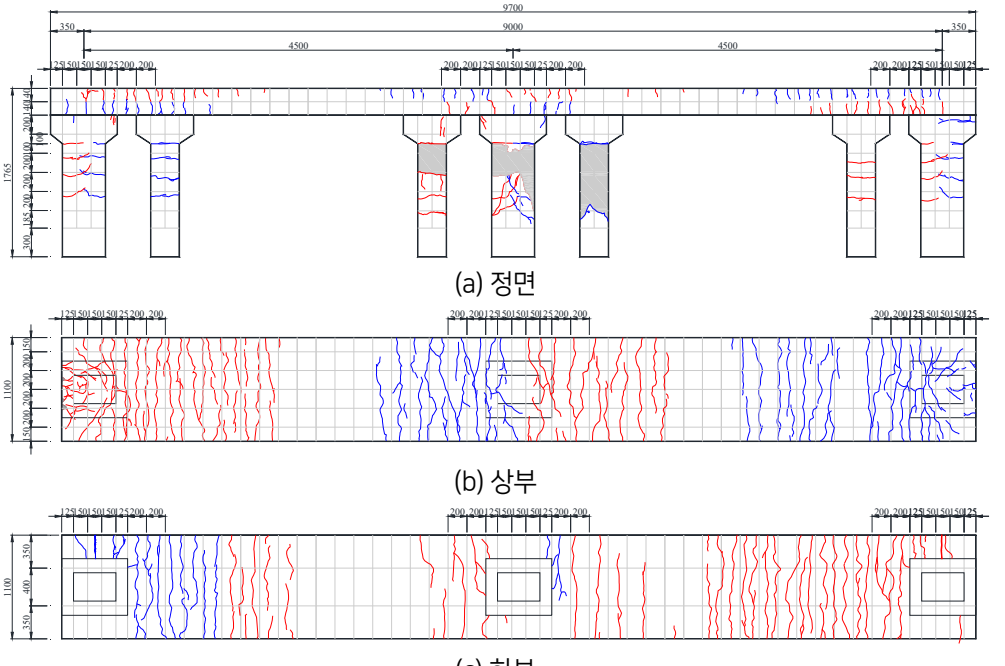


STEP 11 (층간변위비 4.5%)

[그림 3-47] LPD 실험체 가력 단계별 균열 양상



[그림 3-48] LPD 실험체 하중-층간변위비 이력곡선



(a) 정면

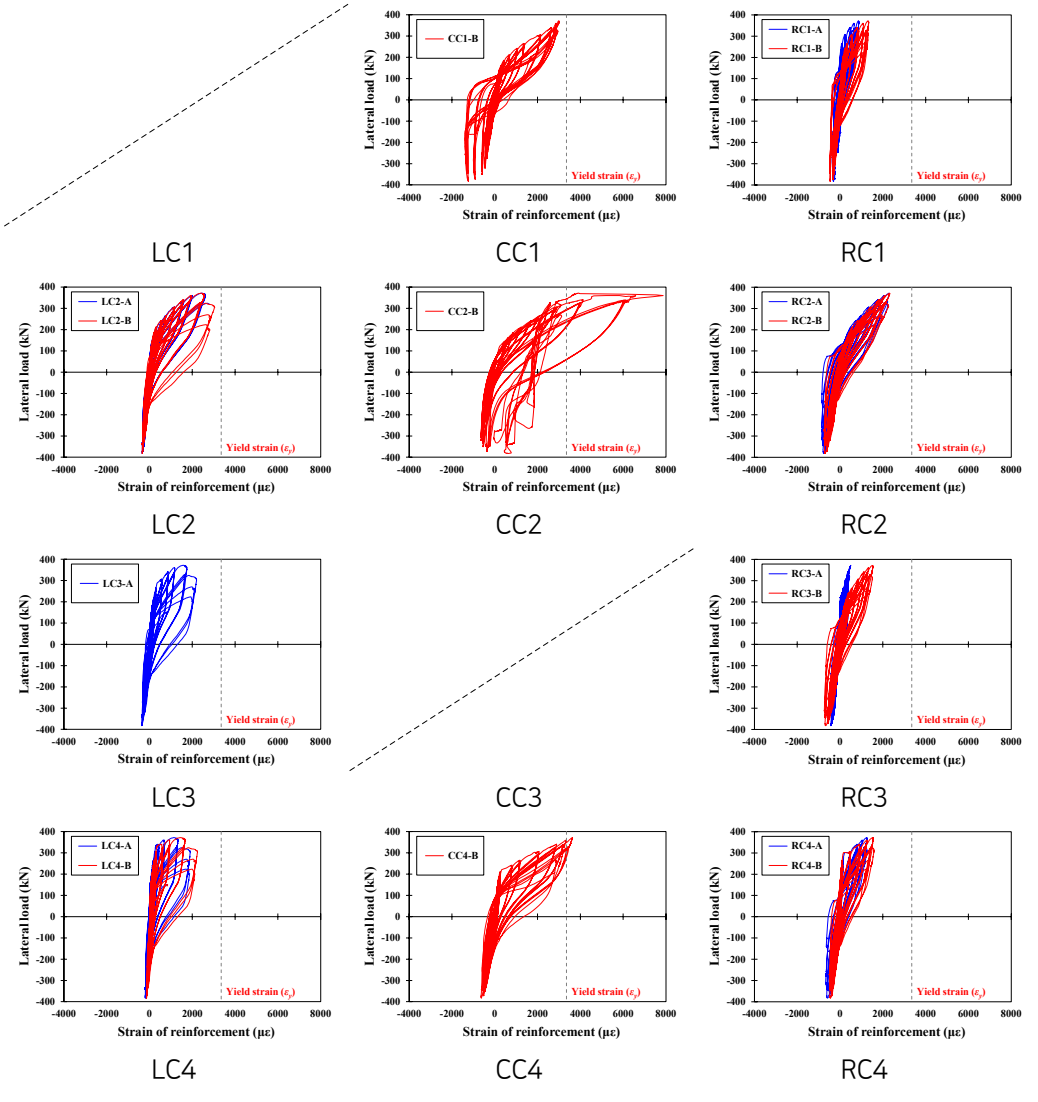
(b) 상부

(c) 하부

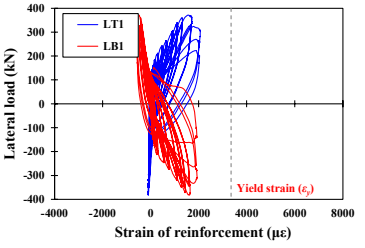
[그림 3-49] LPD 실험체 최종 균열 양상

LPD 실험체 변형률 관계

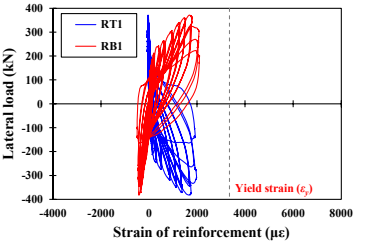
○ 실험체는 LR실험체와 유사하게 2경간 골조의 중앙부 기둥(CC), 특히 브라켓 하부 소성힌지 구간(CC 2, 4)의 주철근이 항복하였으며, 보-기둥 접합부 근처의 (L, R의 3,4) 보 주철근의 변형률도 항복하는 것으로 나타났음



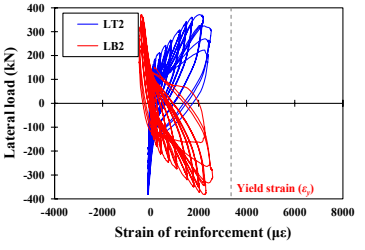
[그림 3-50] LPD 실험체 철근 변형률 계측 결과(기둥)



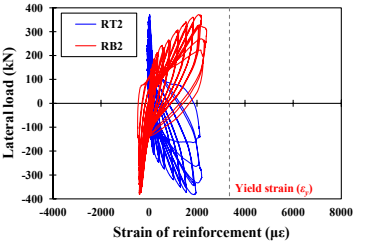
L1



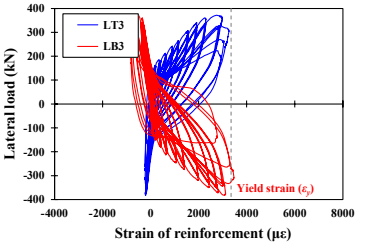
R1



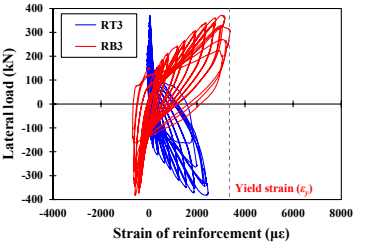
L2



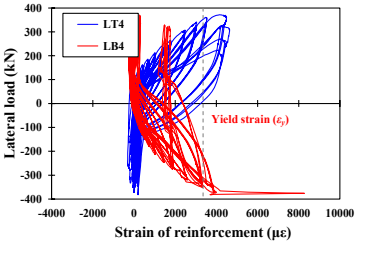
R2



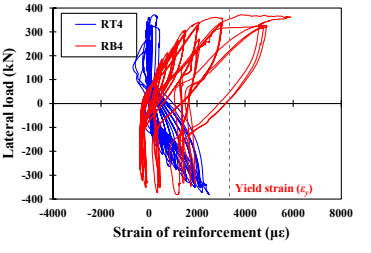
L3



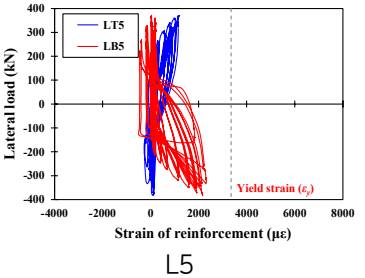
R3



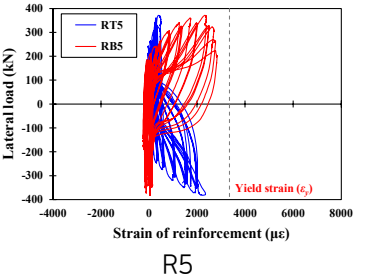
L4



R4



L5



R5

[그림 3-51] LPD 실험체 철근 변형률 계측 결과(보)

LPN 실험체 하중-변위 관계

○ 실험 결과, LPD실험체와 유사하게 하중 초기단계에서는 2경간의 중앙부 기둥에서 휨 균열이 발생하였으며, 실험체 철근이 항복점에 도달한 이후 최대하중에 도달하여 파괴 예상지점인 중앙부 기둥에서 파괴가 발생

- 실험체 층간변위비 정방향 0.72%, 부방향 −0.87%에서 항복점에 도달
- 최대 하중은 층간변위비 정방향 3.18%에서 353.2kN, 부방향 −3.36%에서 −320.8kN으로 나타났음. 이후 12 STEP(층간변위비 ±5.5%) 정방향 가력 종료 후 정방향 4.67%에서 실험체의 파괴점이 형성



STEP 1 (층간변위비 0.2%)



STEP 2 (층간변위비 0.25%)

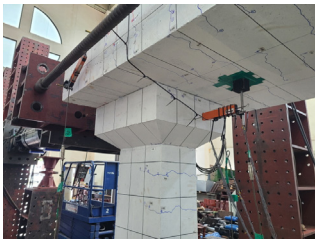


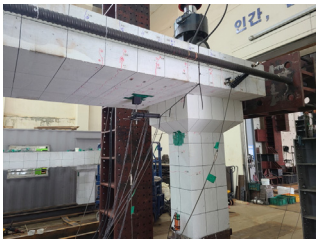
STEP 3 (층간변위비 0.35%)





STEP 4 (층간변위비 0.5%)





STEP 5 (층간변위비 0.75%)





STEP 6 (층간변위비 1.0%)





STEP 7 (층간변위비 1.5%)



STEP 8 (층간변위비 2.0%)



STEP 9 (층간변위비 2.5%)

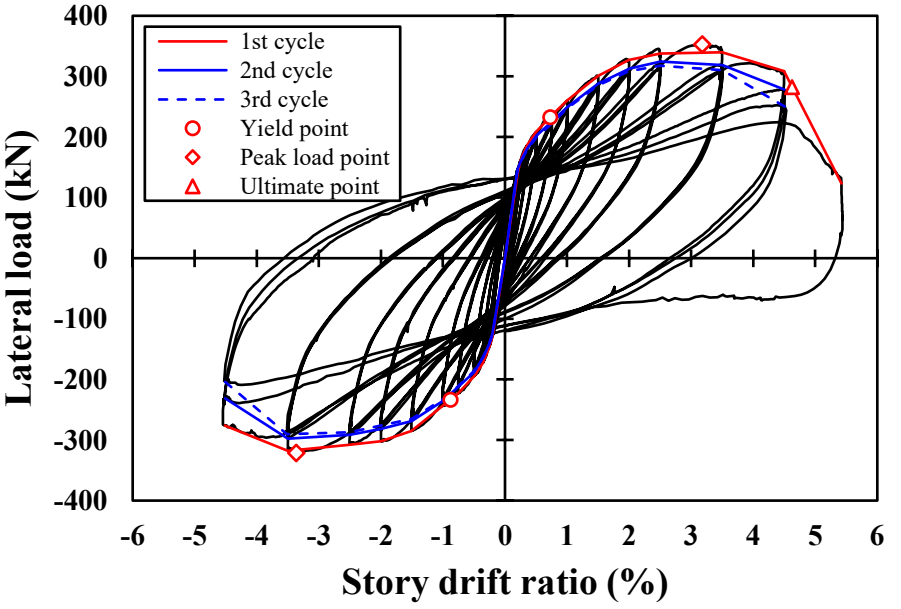


STEP 10 (층간변위비 3.5%)

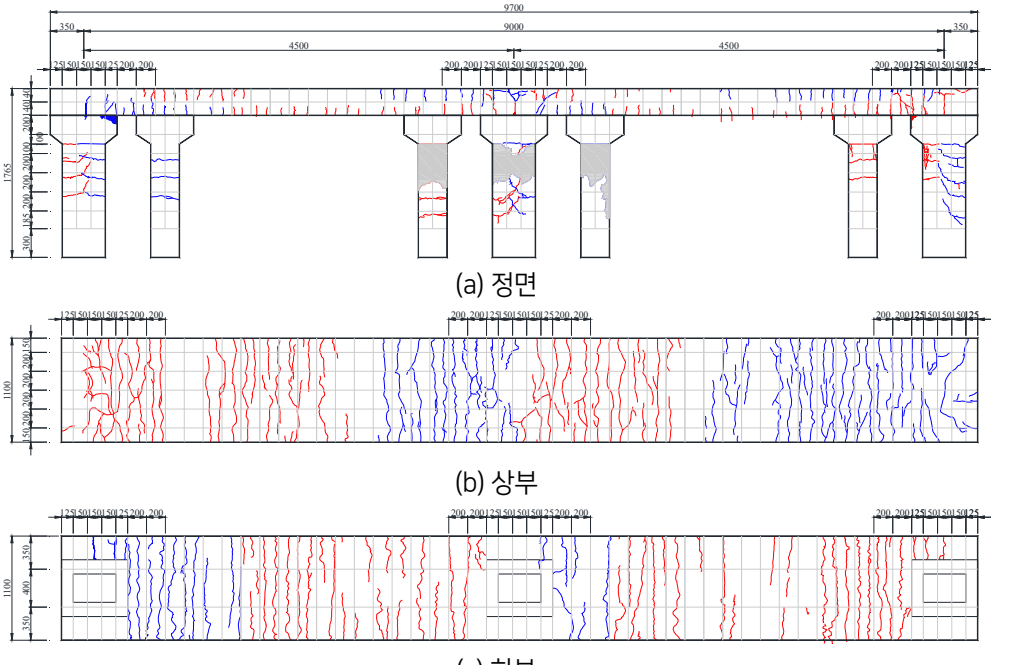


STEP 11 (층간변위비 4.5%)

[그림 3-52] LPN 실험체 가력 단계별 균열 양상



[그림 3-53] LPN 실험체 하중-층간변위비 이력곡선



(a) 정면

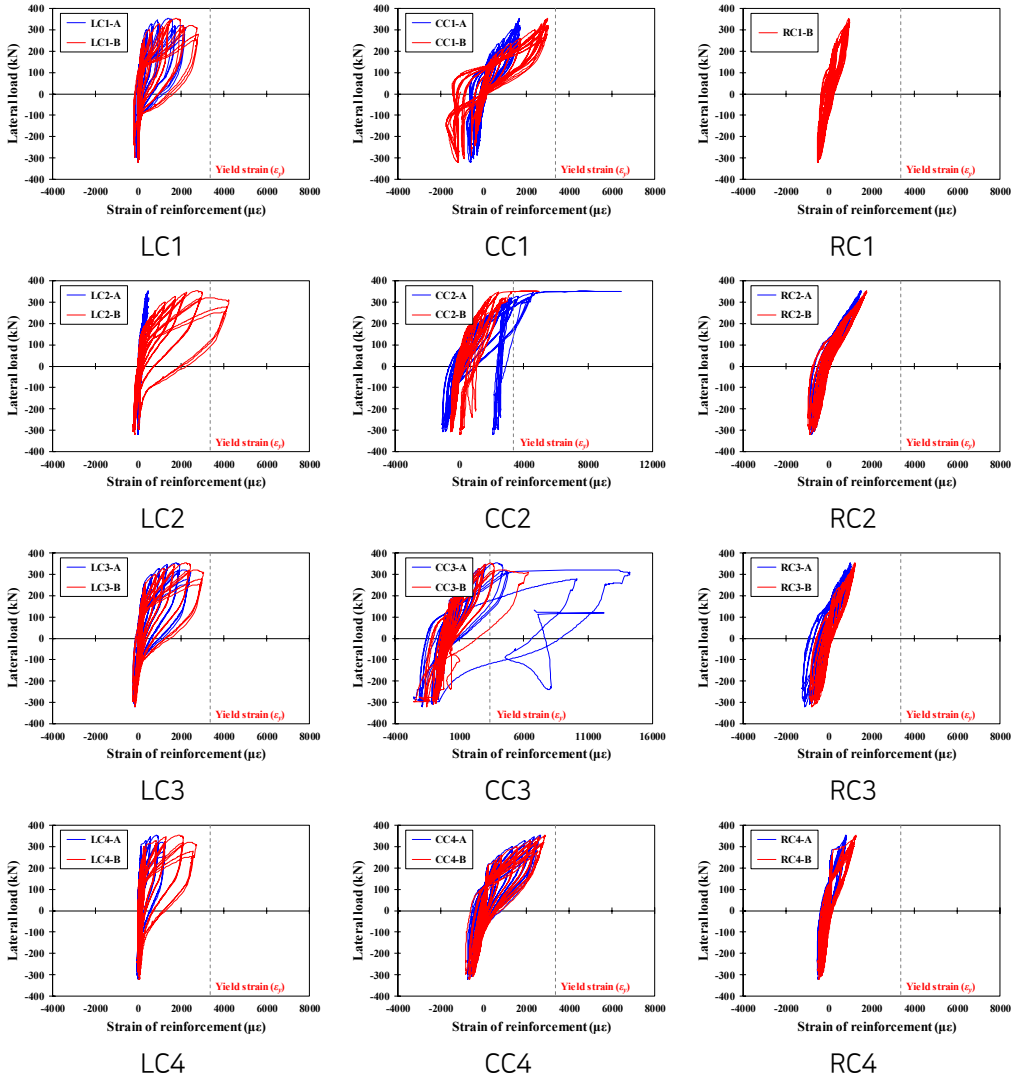
(b) 상부

(c) 하부

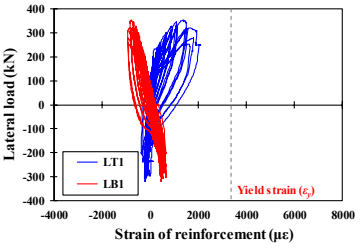
[그림 3-54] LPN 실험체 최종 균열 양상

LPN 실험체 변형률 관계

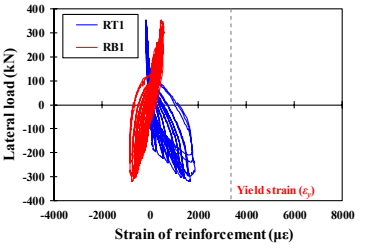
○ LPN 실험체는 2경간 골조의 중앙부 기둥(CC), 특히 브라켓 하부 소성힌지 구간(CC 2, 3)의 주철근이 항복하였으나, 보의 경우 LPD 실험체와 달리 보의 주철근 정착길이가 확보되지 않아 보의 위험단면 (Line 4)에서 항복하지 않았음



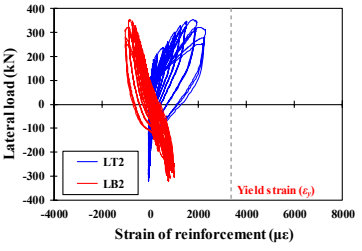
[그림 3-55] LPN 실험체 철근 변형률 계측 결과(기둥)



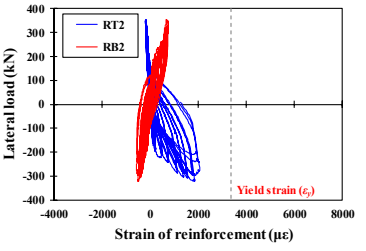
L1



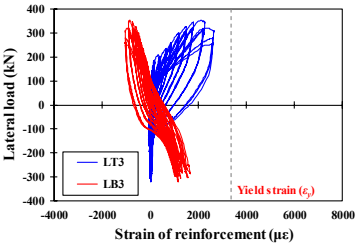
R1



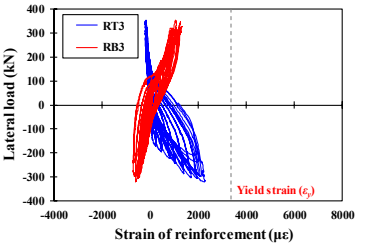
L2



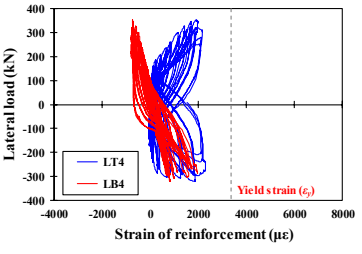
R2



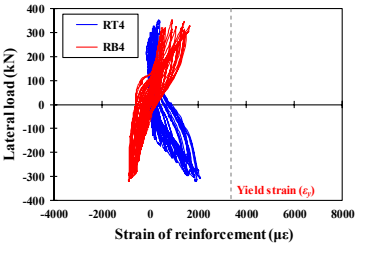
L3



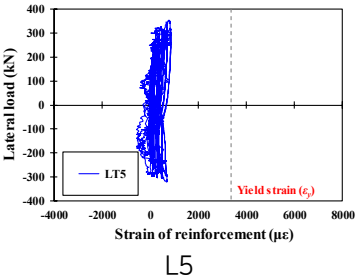
R3



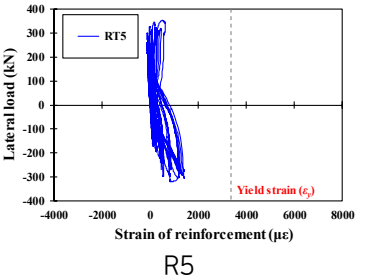
L4



R4



L5



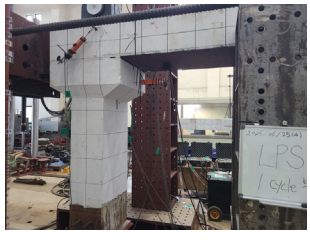
R5

[그림 3-56] LPN 실험체 철근 변형률 계측 결과(보)

LPS 실험체 하중-변위 관계

○ 실험 결과, 1방향 보-기둥 구조 실험체와 유사하게 하중 초기단계에서는 2경간의 중앙부 기둥에서 휨 균열이 발생하였으며, 실험체 철근이 항복점에 도달한 이후 최대하중에 도달하여 파괴 예상지점인 중앙부 기둥에서 파괴가 발생

- 실험체 층간변위비 정방향 0.44%, 부방향 −0.48%에서 항복점에 도달
- 최대하중은 층간변위비 정방향 2.43%에서 330.0kN, 부방향 −2.40%에서 −317.0kN으로 나타났음. 이후 11 STEP(층간변위비 ±4.5%) 1cycle 가력 이후 층간변위비 정방향 3.58%, 부방향 −3.77%에서 파괴점이 형성





STEP 1 (층간변위비 0.2%)





STEP 2 (층간변위비 0.25%)



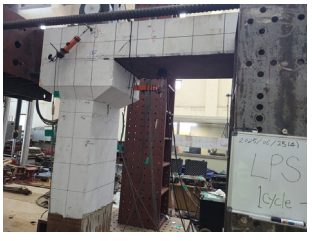


STEP 3 (층간변위비 0.35%)





STEP 4 (층간변위비 0.5%)






STEP 5 (층간변위비 0.75%)





STEP 6 (층간변위비 1.0%)





STEP 7 (층간변위비 1.5%)



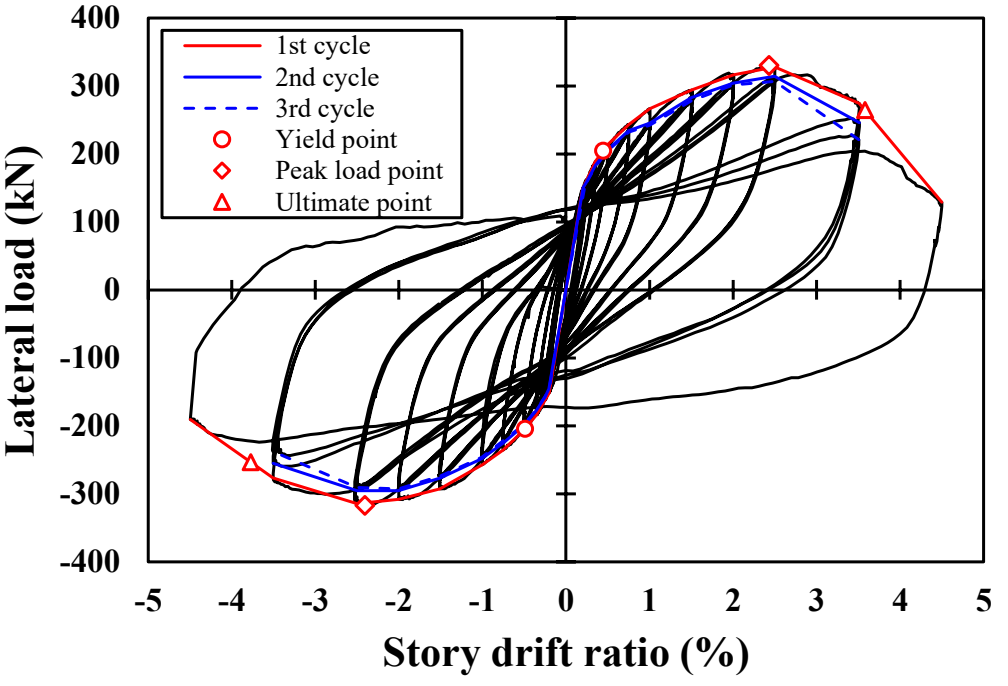
STEP 8 (층간변위비 2.0%)

STEP 9 (층간변위비 2.5%)

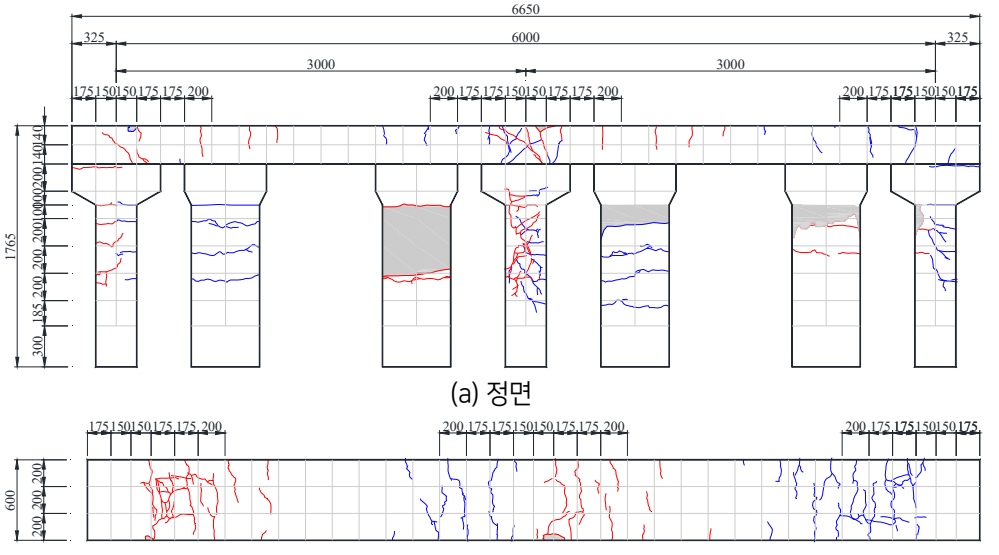
STEP 10 (층간변위비 3.5%)

STEP 11 (층간변위비 4.5%)

[그림 3-57] LPS 실험체 가력 단계별 균열 양상



[그림 3-58] LPS 실험체 하중-층간변위비 이력곡선



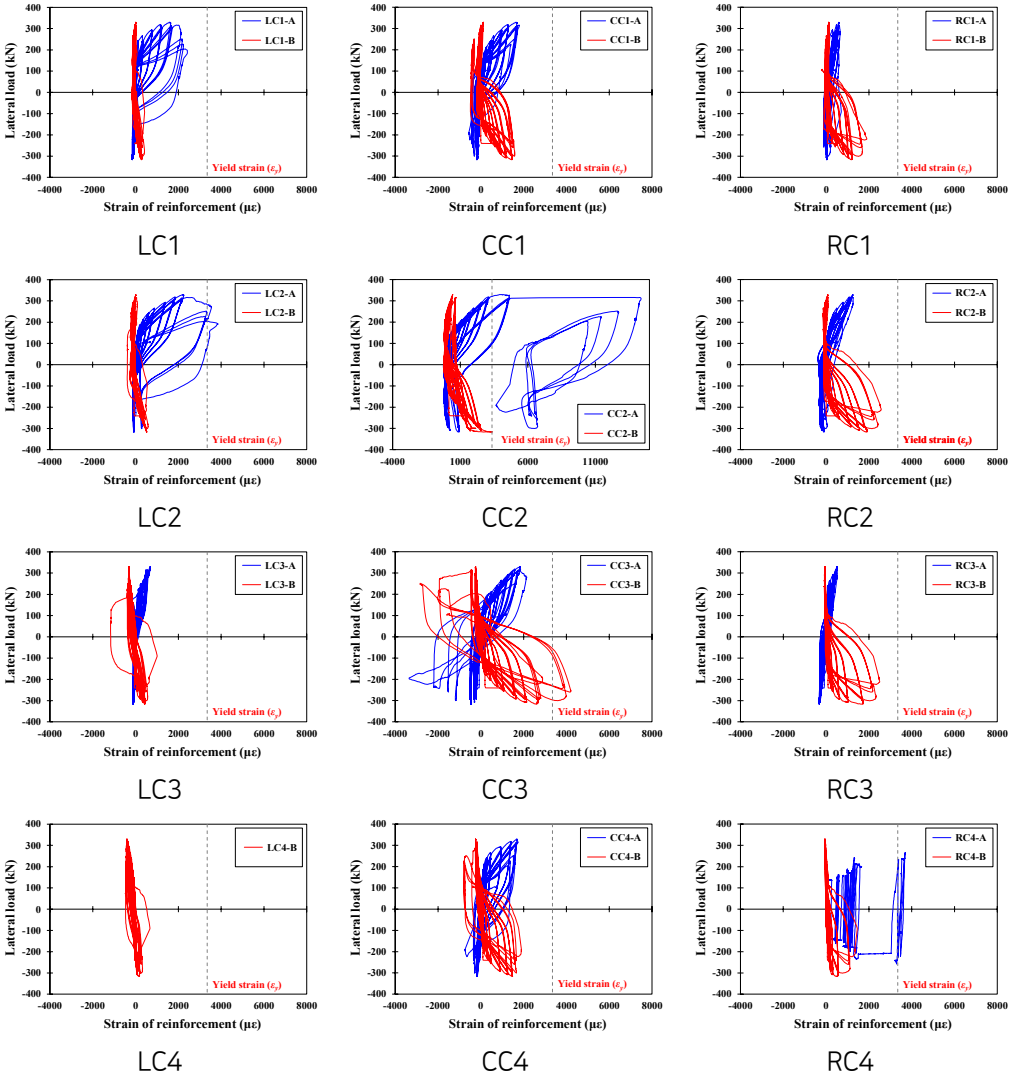
(a) 정면

(b) 상부

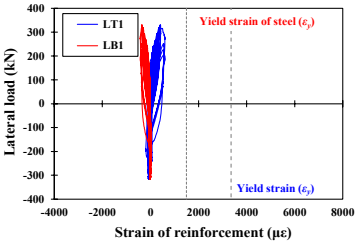
[그림 3-59] LPS 실험체 최종 균열 양상

LPS 실험체 변형률 관계

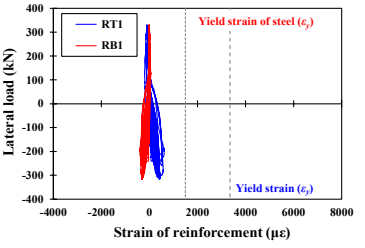
○ LPS 실험체는 2경간 골조의 중앙부 기둥(CC), 특히 브라켓 하부 소성힌지 구간(CC 2, 3)의 주철근이 항복하였으나, 보의 경우 상부 철근은 일부 항복하여 소성거동을 하였으나 합성보의 경우 실험 종료 시까지 탄성 상태로 나타났음



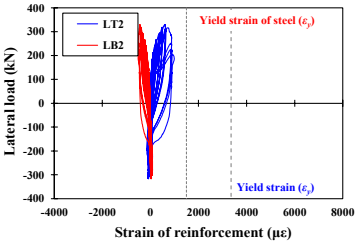
[그림 3-60] LPS 실험체 철근 변형률(기둥)



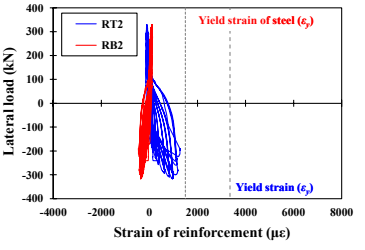
L1



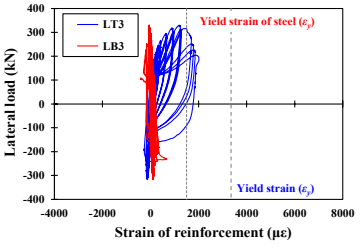
R1



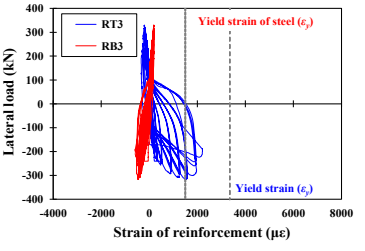
L2



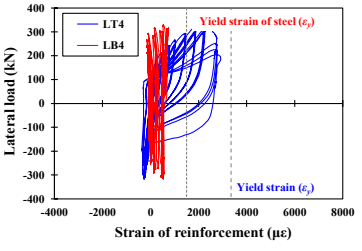
R2



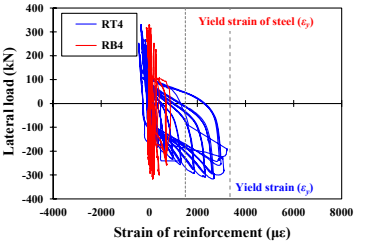
L3



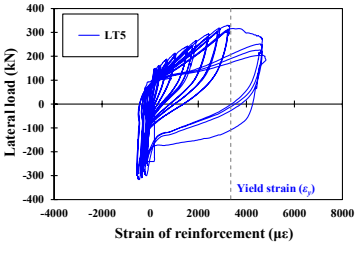
R3



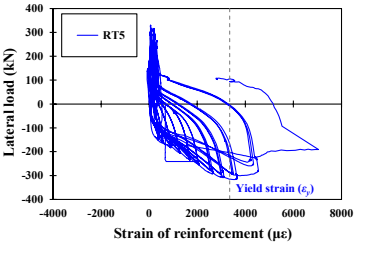
L4



R4



L5



R5

[그림 3-61] LPS 실험체 철근 변형률(보)

반복하중 실험결과 요약

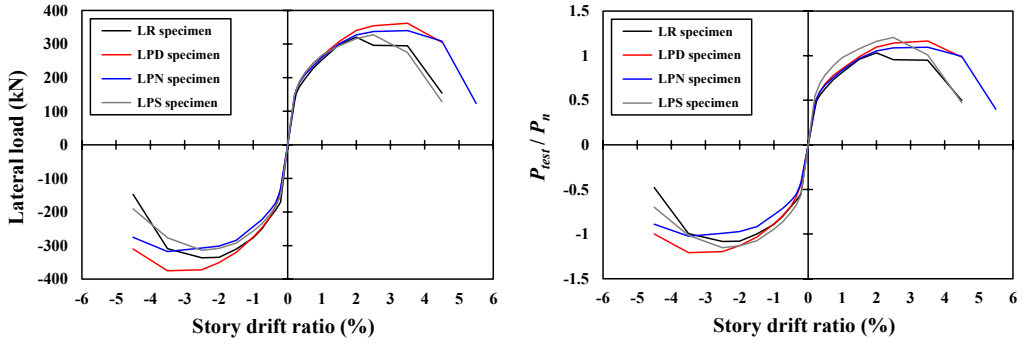
○ 반복하중 실험결과, 제안된 1방향 PC구조 공법은 RC공법과 비교하여 동등 이상의 최대하중 및 연성비를 나타내어 구조적으로 안전한 것으로 판단됨

○ 다만, 실험체 파괴모드가 2경간 골조 중앙부 기둥의 소성힌지 구간의 파괴로 나타나, 기둥의 소성힌지 구간의 철근 배근 상세(내진상세)에 대한 신중한 설계가 필요할 것으로 보임

[표 3-13] 반복하중 실험 결과 요약

실험체 명		LR	LPD	LPN	LPS
항복	층간변위(%)	0.80 (-0.63)	0.67 (-0.64)	0.72 (-0.87)	0.44 (-0.48)
최대하중	층간변위 (%)	1.94 (-2.43)	3.10 (-3.31)	3.18 (-3.36)	2.43 (-2.40)
	하중 (kN)	320.3 (-338.9)	371.6 (-382.5)	353.2 (-320.8)	330.0 (-317.0)
파괴	층간변위(%)	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



(a) 하중-층간변위비 이력곡선 (b) 초과강도-층간변위비 이력곡선

[그림 3-62] 반복하중 실험체 이력곡선 분석

실험체 내진성능

○ 지진하중을 받는 보-기둥(W-PC) 및 무량판(H-PC) 시스템의 비탄성 거동에 의한 에너지소산능력은 1방향 주차장 PC구조 시스템의 내진성능을 평가하는 중요한 지표임

- 소성힌지 영역의 에너지소산에 대한 평가가 이루어져야하며, 이를 통하여 주차장 시스템 레벨에서 내진성능을 판단
- 실험체의 에너지소산량은 각 목표 층간변위비에서 정방향 및 부바향의 이력곡선으로 둘러싸인 면적으로 산정

○ 실험체의 에너지소산능력을 내진성능(연성)으로 정량화 시키기 위하여 등가점성감쇠비를 계산하여 향후 1방향 주차장 PC구조 시스템의 성능기반 내진설계를 수행할 수 있는 기초자료를 제시

- 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비(ζ_{eq})는 구조물의 응답을 통해 소산되는 에너지를 의미하며, 선형 탄성 거동으로 계산된 정적 변형에너지(E_{so})를 사용하여 식(3-2)과 같이 산정

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi}\frac{E_I}{E_{so}} \tag{3-2}$$

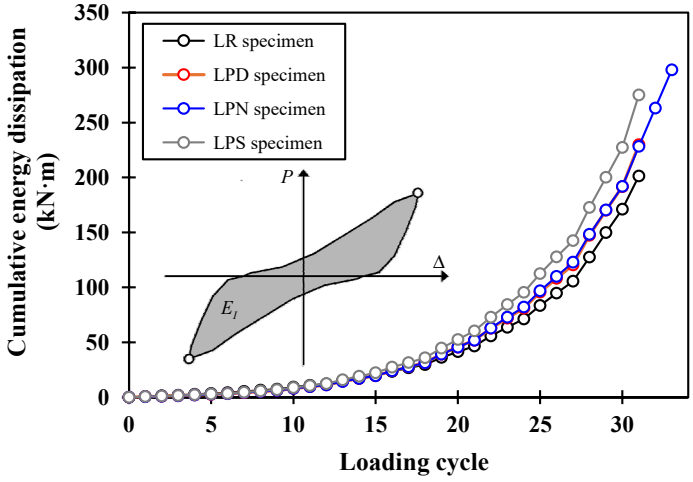
- E_I와 E_{so}는 각각 이력곡선에서 소산된 에너지 및 정적변형 에너지
- 등가점성감쇠에 의한 에너지소산능력은 실험체의 각 목표 층간변위비의 첫 번째 이력곡선에서 산정

○ [그림 3-65(a)]와 같이 PC구조 공법 실험체는 RC구조에 비하여 누적에너지 소산면적이 높은 것을 알 수 있었으며, 모든 실험체는 항복점 도달 이후, 소성거동을 하면서 층간변위비가 높아질 수록 등가감쇠비는 높게 산정됨

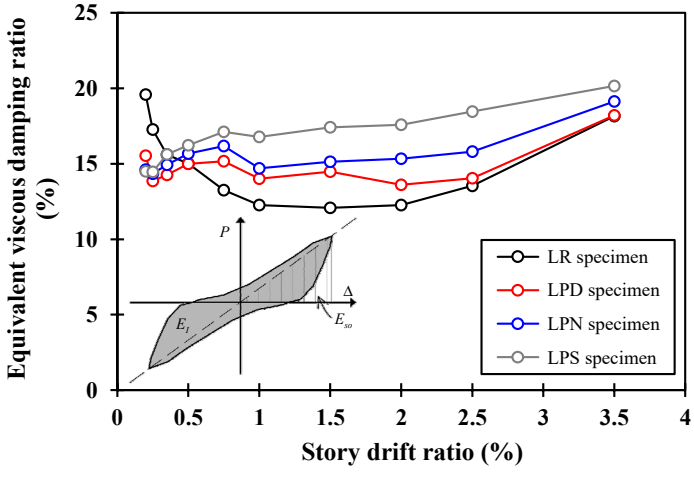
- 누적에너지소산면적이 클수록 지진에너지를 효과적으로 흡수 및 소산

○ 허용층간변위비 (IBC code, 내진등급 II: 2.0%)에서 LR, LPD, LPN, LPS의 등가감쇠비는 각각 12.2%, 13.6%, 15.3%, 17.5%로 나타남

- 등가감쇠비가 클수록 지진 시 변형 또는 손상도 저감



(a) 누적 에너지소산량 검토



(b) 등가점성감쇠비 검토

[그림 3-63] 반복하중 실험체 내진성능

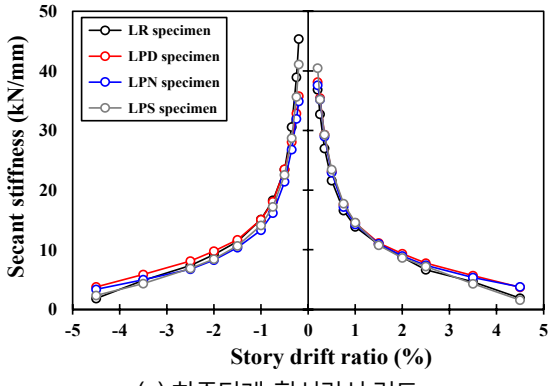
실험체 강성

○ 반복하중은 건축물의 구조안정성에 영향을 미치며, 구조손상을 야기함. 반복하중이 누적될 경우, 초기 강성에 비하여 점차 강성이 저하되는 현상이 나타남

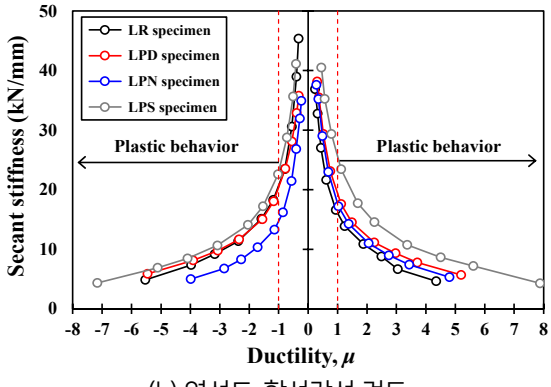
- 구조적 강성 특성을 분석하기 위해 할선강성 (Secant stiffness)을 산정하였으며, 각 층간변위비에 따른 첫 번째 가력 단계에서의 강도와 이에 대응되는 변위의 기울기로 할선강성을 평가하였음

○ [그림 3-66]에 나타낸 바와 같이 실험체는 초기 하중 단계 정방향 및 부방향에서 각각 LPS 실험체와 LR 실험체가 강성이 높게 나타났으며, 각 실험체의 항복점 도달 이후, 강성이 감소하는 경향으로 나타남

○ 특히, 180° 표준갈고리 정착 상세로 정착길이를 만족한 LPD 실험체는 LPN 실험체(보의 주철근이 150mm 정착)에 비하여 할선강성이 높아, 1방향 주차장 PC구조 설계 시 충분한 정착길이의 확보가 필요하다고 판단됨



(a) 하중단계-할선강성 검토



(b) 연성도-할선강성 검토

[그림 3-64] 반복하중 실험체 할선강성 검토

실험체 잔류변형

○ 지진 등 횡하중 경험 후 주차장 시스템의 잔류 변형량이 과도할 경우, 주차장 내부에 있는 구조 및 비구조 요소가 제 기능을 발휘하지 못하며, 수평 방향으로 발생된 잔류변형으로 인해 구조물의 취성적인 파괴가 유발됨

- 주요 층간변위비 1cycle에서 정·부방향 가력한 후 하중을 제거하였을 때의 평균 잔류변위를 계산

○ LPS 및 LPN 실험체는 항복 이후 LR 실험체보다 높은 잔류변형량이 측정되었음. 이는, PC 공법 특성 중 하나인 PC기둥과 PC보 사이에서의 락킹 (rocking) 거동으로 인해 높게 나타난 것으로 판단됨

- 모든 실험체가 하중 단계가 높아질수록 잔류변형이 증가하는 경향을 보임

○ 특히 LPS 실험체의 경우 PC기둥과 철골합성보가 2-M19만으로 일체 거동을 하여 잔류변형량이 높게 산정된 것으로 보임

○ LPD 실험체는 잔류변형이 가장 작았는데 이는 보 주철근의 정착길이를 확보했기 때문으로 판단됨

[표 3-14] 반복하중 실험체 주요 층간변위비에 따른 잔류변형

층간변위비	가력방향	잔류변형 변위 (mm)			
		LR	LPD	LPN	LPS
0.25%	정방향(+)	2.86	1.07	1.13	1.55
	부방향(-)	1.73	1.75	1.90	1.75
	평균	2.29	1.41	1.51	1.65
0.5%	정방향(+)	4.64	2.74	2.68	3.40
	부방향(-)	2.84	3.51	3.80	4.05
	평균	3.74	3.12	3.24	3.72
1.0%	정방향(+)	6.72	5.50	5.29	6.13
	부방향(-)	4.59	6.30	7.16	6.25
	평균	5.66	5.90	6.22	6.19
2.0%	정방향(+)	12.50	11.13	11.89	14.07
	부방향(-)	10.53	11.89	15.62	16.04
	평균	11.52	11.51	13.75	15.05
2.5%	정방향(+)	17.60	15.32	16.07	19.46
	부방향(-)	15.15	16.12	20.76	23.08
	평균	16.37	15.72	18.42	21.27
3.5%	정방향(+)	34.93	29.04	28.86	43.74
	부방향(-)	32.15	30.78	34.23	47.47
	평균	33.54	29.91	31.54	45.61

3 1방향 PC구조 공법의 해석적 검증

1) 해석적 검증 개요

1방향 PC구조 공법의 실험적 평가의 해석을 수행하여 실험의 신뢰성 입증

○ 전산해석은 콘크리트 해석에 특화된 범용 유한요소 해석 프로그램(ATENA GID)를 사용

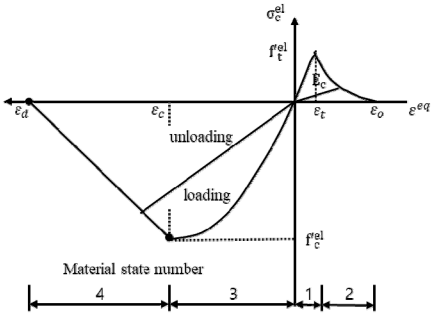
- 수치해석 기법으로는 Newton-Raphson 반복법을 적용
- 해석 모델의 재료 물성치와 경계조건은 재료 시험 결과 및 실험 조건을 기반으로 설정
- 콘크리트는 Solid 요소로 모델링하고, 철근은 embedded reinforcement 방식으로 콘크리트 내부에 별도로 정의
- 철근의 정착길이에 대한 성능 과대평가를 방지하기 위해, bond-slip 거동을 고려한 재료 모델을 적용
- RC실험체는 콘크리트 요소 간 일체 거동이 가능하도록 설정
- PC실험체는 PC보 요소와 덧침 콘크리트 간의 합성률을 고려

○ 콘크리트 모델은 중력하중과 반복하중으로 나누어 고려

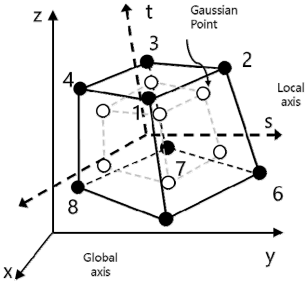
- 반복하중의 경우 unloading factor를 적용하여 잔류 변위를 모사
- 콘크리트 요소는 8절점 육면체 Solid 요소를 사용하였으며, 인장 경화 효과와 2축 압축 파괴 기준을 고려한 재료 모델을 사용
- 콘크리트의 균열은 Rankine 파괴 기준을 적용하여 인장 응력 상태에서 균열 발생 기준을 고려

○ 철근은 일반적인 철근-응력 변형률 관계인 trilinear 응력-변형률 모델을 사용

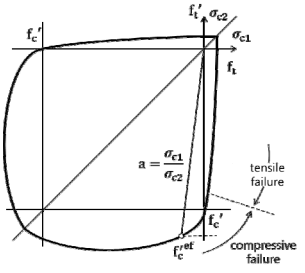
- 중력 하중 모델은 최대 부착응력의 크기를 횡하중 반복 가력 모델 대비 절반 수준으로 제한(철근 상세에 따라 휨성능에 기여하는 현상을 방지)
- 반복하중 실험체는 CEB-FIP의 Pull-out 부착 모델 적용 및 반복 가력에 따른 철근의 baushinger effect를 모사하기 위해 Menegotto-Pinto모델 적용



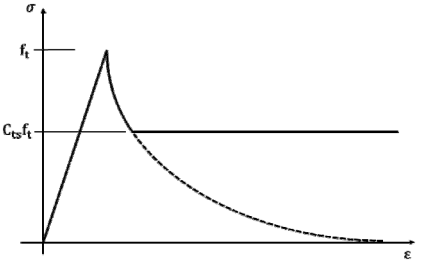
(a) 콘크리트 응력-변형률 관계 모델



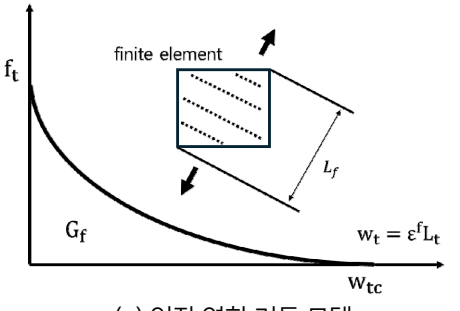
(b) Solid 요소



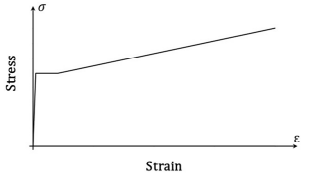
(c) 2방향 파괴 기준 모델



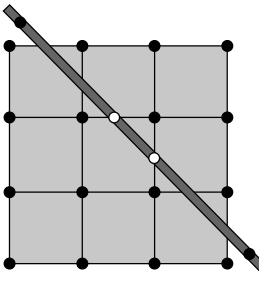
(d) 인장 경화 효과 모델



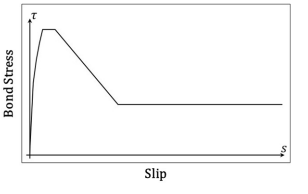
(e) 인장 연화 거동 모델



(f) 철근 응력-변형률 관계 모델



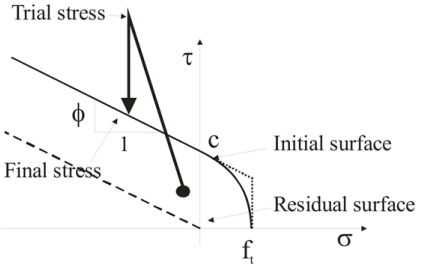
(g) embedded reinforcment



(h) 철근 Bond-Slip 모델

[그림 3-65] 유한요소해석에 사용된 콘크리트 및 철근 모델

○ PC실험체는 공장생산 된 Half-PC부분과 현장 덧침콘크리트의 접착이 완전 부착이 아니므로 ATENA 프로그램 내에 탑재된 Morh-Columb 조건에 의해 모델링하였음



[그림 3-66] 접착면 요소를 위한 Morh-Columb 파괴 기준 모델

[표 3-15] 해석에 사용된 콘크리트 및 철근의 재료 물성치

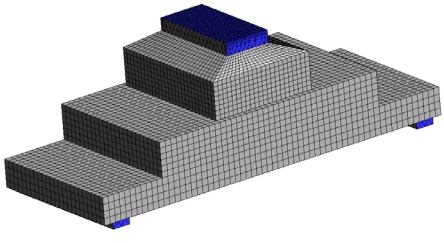
콘크리트		철근			
부재	f_c (MPa)	철근	E (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
덧침 콘크리트	32	SHD10	200,000	712	861
HCS	37	SHD13	200,000	608	725
PC 보	37	UHD16	200,000	686	794
주두 및 RC 실험체	37	UHD19	200,000	714	828

2) 실험체 해석 모델링

중력하중 실험체

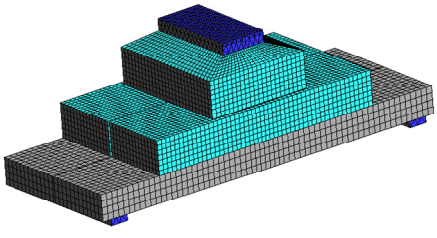
○ 해석 모델에서 RC 부재는 회색으로, PC 부재는 하늘색으로 구분하여 표현하였으며, 접착면 요소는 붉은색으로 나타내어 모델링을 수행

- GPD-WN을 제외한 모든 PC 부재 해석 모델에서 PC 보와 덧침 콘크리트 사이에 접착면 요소를 도입
- GR-D의 콘크리트 요소 크기는 모두 50mm × 50mm × 50mm로 설정
- PC 부재가 포함된 해석 모델의 콘크리트 요소 크기의 경우, 덧침 콘크리트는 50mm × 50mm × 50mm로 설정하였으며, PC 부재 요소는 모두 40mm × 40mm × 40mm로 설정
- 할로우 코어 슬래브는 단면의 비정형성을 고려하여 부재의 길이 방향으로만 40mm의 요소 크기를 적용
- 해석 모델의 경계조건은 실험과 동일하게 설정, 하중가력은 변위제어로 적용
- 각 콘크리트 요소의 국부적인 파괴 모드를 방지하기 위해 실제 실험 조건을 반영하여 할로우 코어 슬래브와 PC 보 부재 사이에 베어링 패드를 별도로 모델링 수행

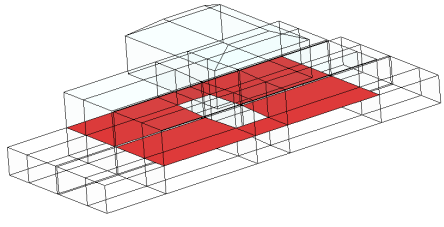


(a) GR-D 해석 모델

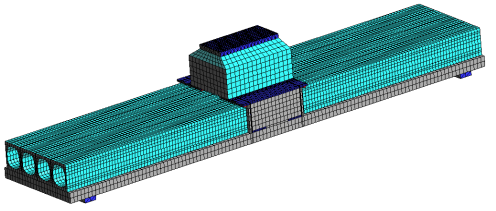
(b) GR-D 접착면 요소



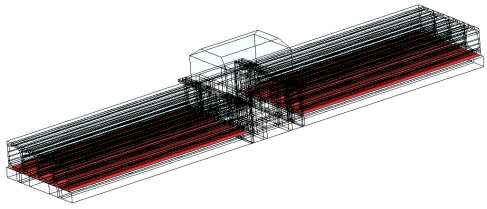
(c) GPN-D 해석 모델



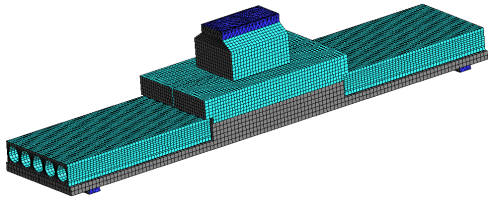
(d) GPN-D 접착면 요소



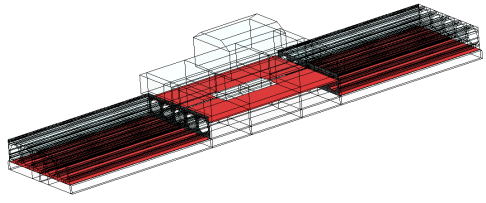
(e) GPS-H 해석 모델



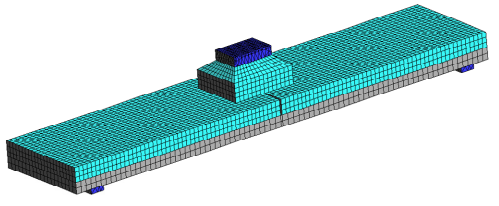
(f) GPS-H 접착면 요소



(g) GPN-H 해석 모델



(h) GPN-H 접착면 요소



(i) GPD-WN 해석 모델

-

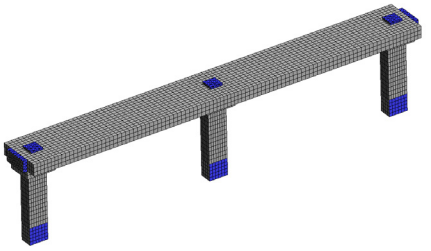
(j) GPD-WN 접착면 요소

[그림 3-67] 중력하중 실험체 유한요소해석 모델링

반복하중 실험체

○ 해석 모델에서 RC 부재는 회색으로, PC 부재는 하늘색으로 구분하여 표현하였으며, 접착면 요소는 붉은색으로 나타내어 모델링을 수행

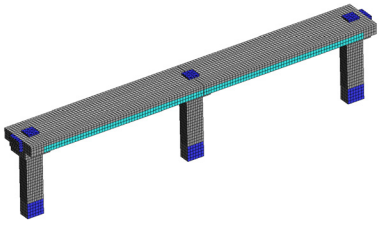
- 모든 실험체에서 PC 보 또는 철골 보와 덧침 콘크리트 간의 합성률이 충분하다고 판단하여 PC부재와 덧침 콘크리트의 충분한 합성 반영
- LR의 경우, 콘크리트 요소에 75mm × 75mm × 75mm의 크기를 적용
- LPD의 경우, 덧침 콘크리트 요소에 100mm × 100mm × 100mm의 크기 적용
- 실제 수행된 반복하중의 축력(하중제어)과 횡력(변위제어)을 모사하였으며, 경계조건을 동일하게 적용
- 횡력 가력 프로토콜은 실험체 층간 변위비 0.2%부터 4.5%까지 총 10단계에 걸쳐 해석을 수행(각 단계별 1회 반복)



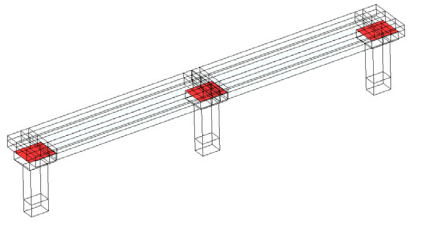
(a) LR 해석 모델

-

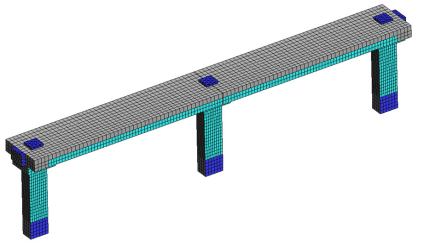
(b) LR 접착면 요소



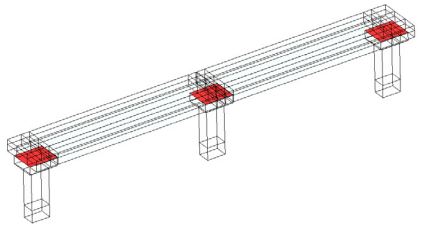
(c) LPD 해석 모델



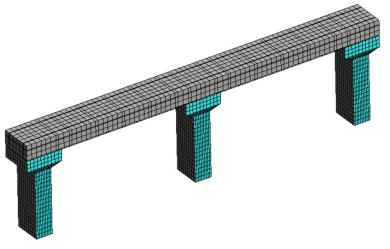
(d) LPD 접착면 요소



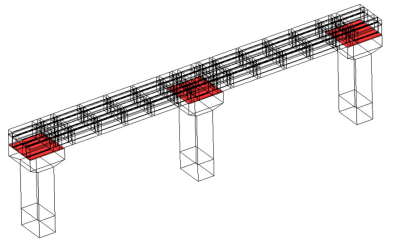
(e) LPN 해석 모델



(f) LPN 접착면 요소



(g) LPS 해석 모델



(h) LPS 접착면 요소

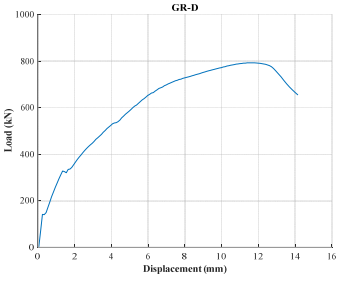
[그림 3-68] 반복가력 실험체 유한요소해석 모델링

3) 실험체 해석 결과

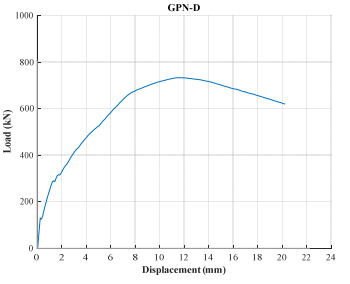
중력하중 실험체 하중-변위 해석 결과

○ 모든 해석 모델에서 초기 및 주철근 항복 이후의 거동은 유사한 경향을 보였으며, GR-D, GPN-D, GPD-WN 해석 모델에서, 실험과 해석에서 도출된 최대 하중 간의 오차율이 약 5% 이하로 나타났음

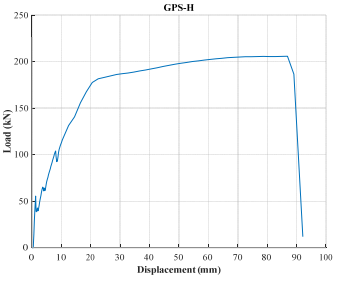
○ 할로우 코어 슬래브가 적용된 GPS-H와 GPN-H는 할로우 코어 슬래브와 덧침콘크리트 간의 접착 조건의 과대평가로 인하여 최대 하중에서의 오차율이 20% 이상으로 해석 결과가 실험보다 더 높게 나타났음



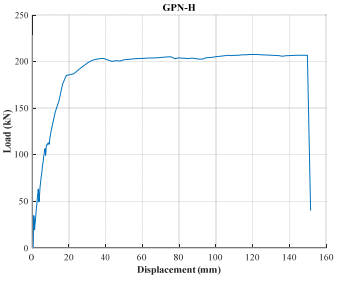
(a) GR-D



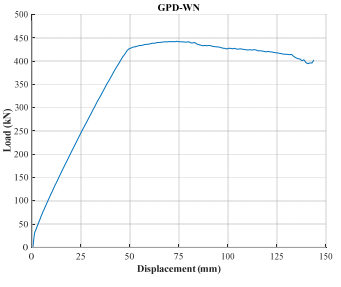
(b) GPN-D



(c) GPS-H



(d) GPN-H



(e) GPD-WN

[그림 3-69] 중력하중 해석 모델 하중-변위 관계

[표 3-16] 중력하중 실험체의 해석결과 비교

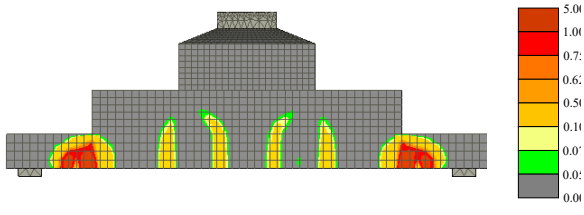
실험체 명	최대 하중			최대 하중에서의 변위		
	실험 결과 (kN)	해석 결과 (kN)	오차율 (%)	실험 결과 (mm)	해석 결과 (mm)	오차율 (%)
GR-D	785.3	793.1	1.0	10.4	11.6	11.5
GPN-D	708.7	732.8	3.4	12.7	11.7	7.9
GPS-H	150.2	205.8	37.0	104.3	86.91	16.7
GPN-H	169.2	208.7	23.3	65.1	120.5	85.1
GPD-WN*	-	442.8	-	-	73.9	-

* PC보-기둥 접합부 방향에 따른 경향을 알아보기 위한 해석 수행

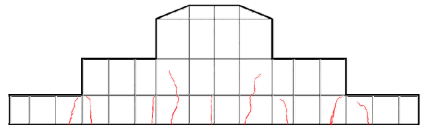
중력하중 실험체 변형률 및 균열 양상

○ 모든 해석 모델에서 실제 실험과 유사한 균열 분포를 보였으며, GPN-D, GPD-WN의 경우, 실험과 해석 모두 PC 부재와 덧침 콘크리트 부재에서 상당한 균열이 발생함을 확인하였음

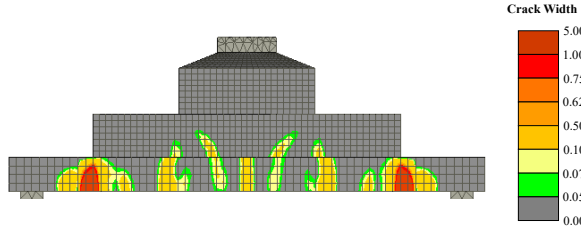
○ 할로우 코어 슬래브가 적용된 GPS-H와 GPN-H는 실제 실험에서는 덧침 콘크리트에 균열이 집중되었지만, 해석에서는 할로우 코어 슬래브에서까지 균열이 전이된 것을 확인할 수 있었음. 이를 통하여 할로우 코어 슬래브와 덧침 콘크리트의 접착이 충분하다면 구조적으로 안정성이 확보 되는 것으로 판단됨



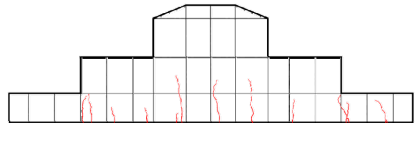
(a) GR-D 해석 균열 분포



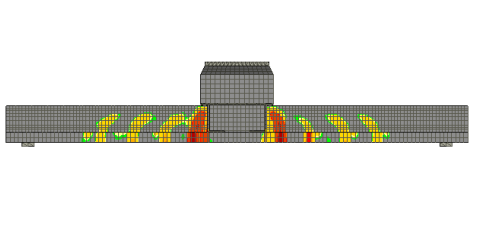
(b) GR-D 실험 균열 균포



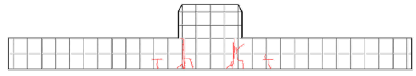
(c) GPN-D 해석 균열 분포



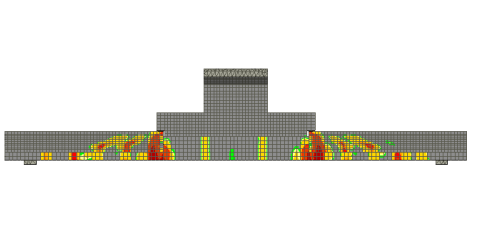
(d) GPN-D 실험 균열 분포



(e) GPS-H 해석 균열 분포



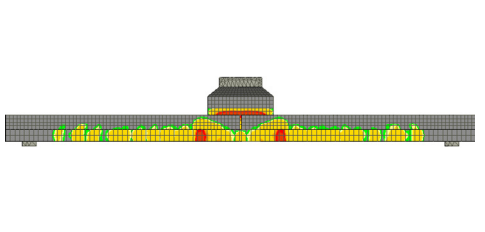
(f) GPS-H 실험 균열 분포



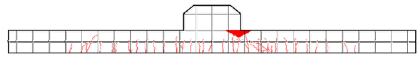
(g) GPN-H 해석 균열 분포



(h) GPN-H 실험 균열 분포



(i) GPD-WN 해석 균열 분포



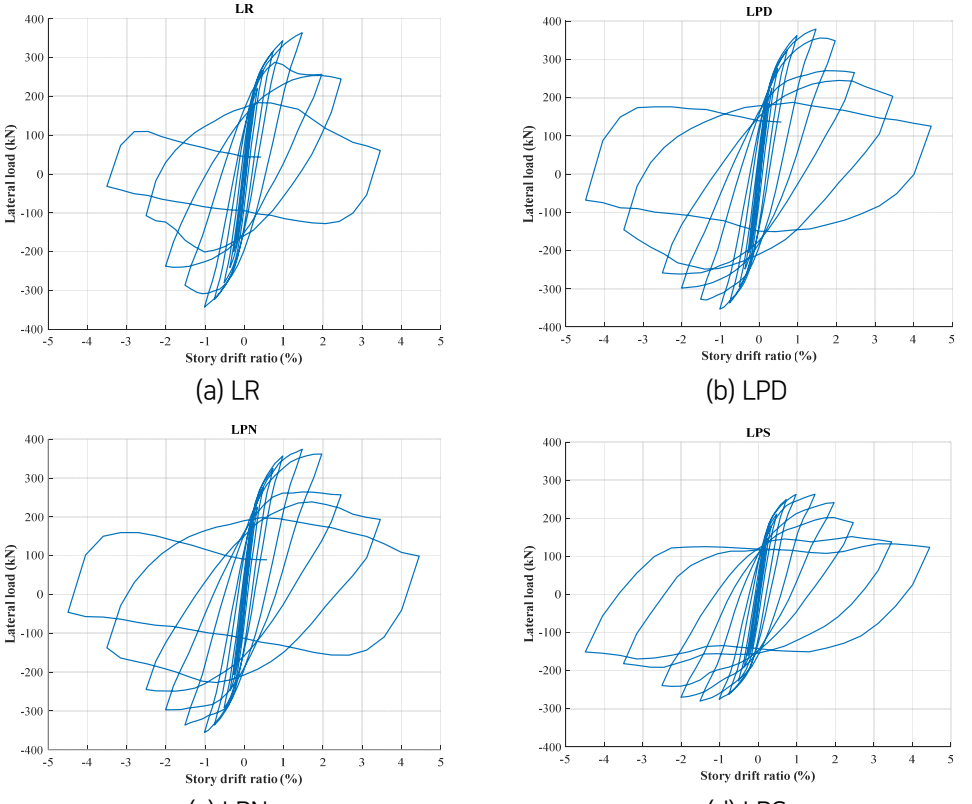
(j) GPD-WN 실험 균열 분포

[그림 3-70] 중력하중 실험 및 해석의 실험체 균열 분포 비교

반복하중 실험체 하중-변위 해석 결과

○ 모든 해석 모델에서 초기 및 주철근 항복 이후의 거동은 유사한 경향을 보였으며, 최대 하중 이후 변위가 증가함에 따라 하중이 감소하는 경향을 보였음

○ 실험결과와 해석결과의 오차율은 정방향에서 최대 약 20%, 부방향에서 약 12%가 나타났으며, 이는 Bauschinger effect가 실제 실험 조건을 충분히 반영하지 못한 데에 기인한 것으로 판단됨



(a) LR (b) LPD

(c) LPN (d) LPS

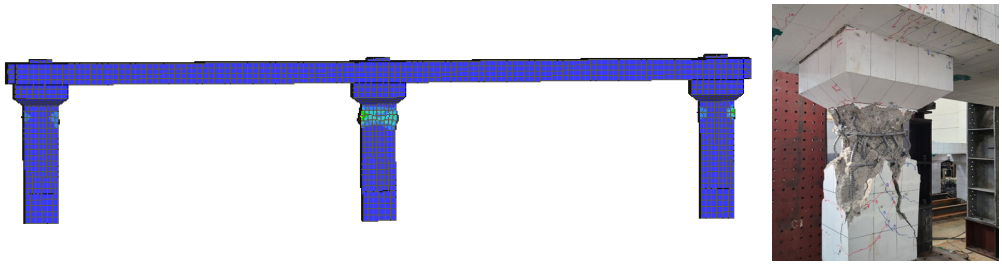
[그림 3-71] 횡하중 반복가력 해석 모델 하중-변위 관계

[표 3-17] 반복하중 실험체의 해석결과 비교

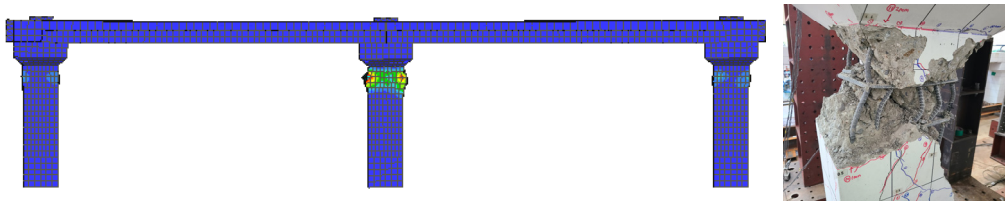
실험체 명	정방향			부방향		
	실험 결과 (kN)	해석 결과 (kN)	오차율 (%)	실험 결과 (kN)	해석 결과 (kN)	오차율 (%)
LR	320.3	363.6	13.5	338.9	342.8	1.2
LPD	371.6	379.6	2.2	382.5	352.9	7.7
LPN	352.2	374.2	6.2	320.8	355.5	10.8
LPS	330	263.2	20.2	317.0	280	11.7

반복하중 실험체 파괴모드

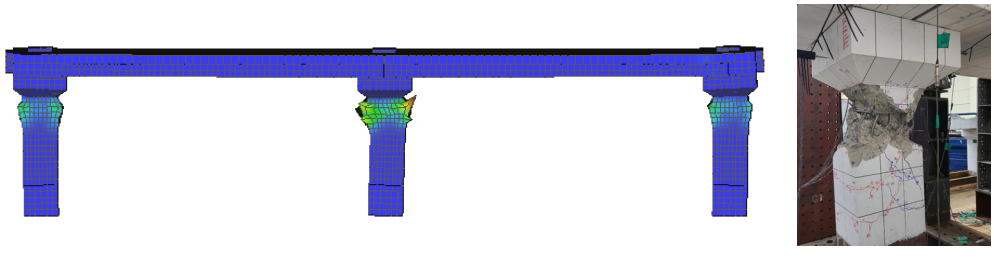
○ 반복하중 실험체 해석결과, 모든 해석모델은 실제 실험과 동일하게 보-기둥 접합부 브라켓 하부 상부에서 콘크리트의 파괴가 발생하였음을 확인하였음. 특히 중앙부 기둥은 파괴가 두드러짐을 확인하였음



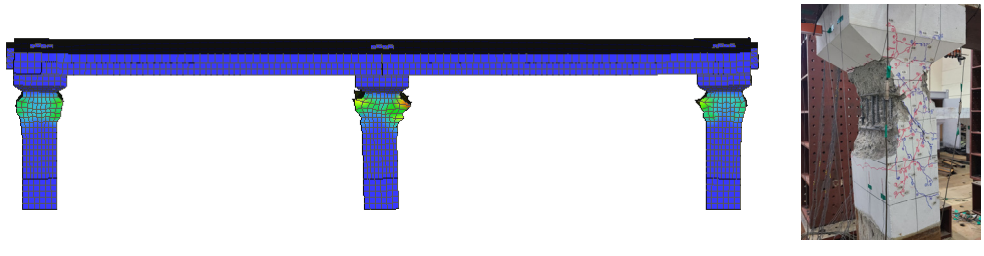
(a) LR 실험체 해석 및 실험결과 비교



(b) LPD 실험체 해석 및 실험결과 비교



(c) LPN 실험체 해석 및 실험결과 비교



(d) LPS 실험체 해석 및 실험결과 비교

[그림 3-72] 반복하중 실험 및 해석의 실험체 균열 분포 비교

Ⅳ 1방향 PC구조 공법의 실무적용성 검토

Key Point

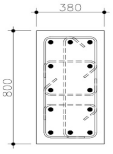
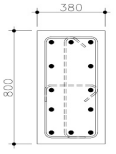
- 본 연구결과로부터 구조안정성이 입증된 1방향 PC구조 공법의 실무적용성 검토

1 1방향 PC구조 공법 실무 도면

1) 1방향 PC구조 공법 실무 도면

○ LH 실무부서로부터 제안받은 1방향 PC 보-기둥 구조(W-PC)의 실무적용을 위한 도면을 작성하였음

- 도면은 PC보, PC기둥, 접합상세, 경간의 단면 상세 등으로 구분하였으며, 철근 및 콘크리트 상세를 도면에 수록하였음

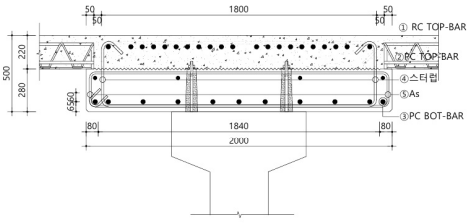
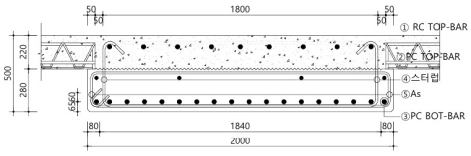
부 호	B1F	B2F	
PC11			
주 근	12- UHD22	12- UHD22	
대 근	SHD10 @200	SHD10 @200	
콘크리트 강도	fck = 35 MPa(PC)	fck = 35 MPa(PC)	

■ NOTE

1. 보조대근 간격은 대근(HOOP) 간격과 동일간격임.
2. 주근의 순간격이 150mm 이상인 경우 보조대근 설치할 것.

[그림 4-1] 1방향 PC구조 공법 실무도면(PC기둥)

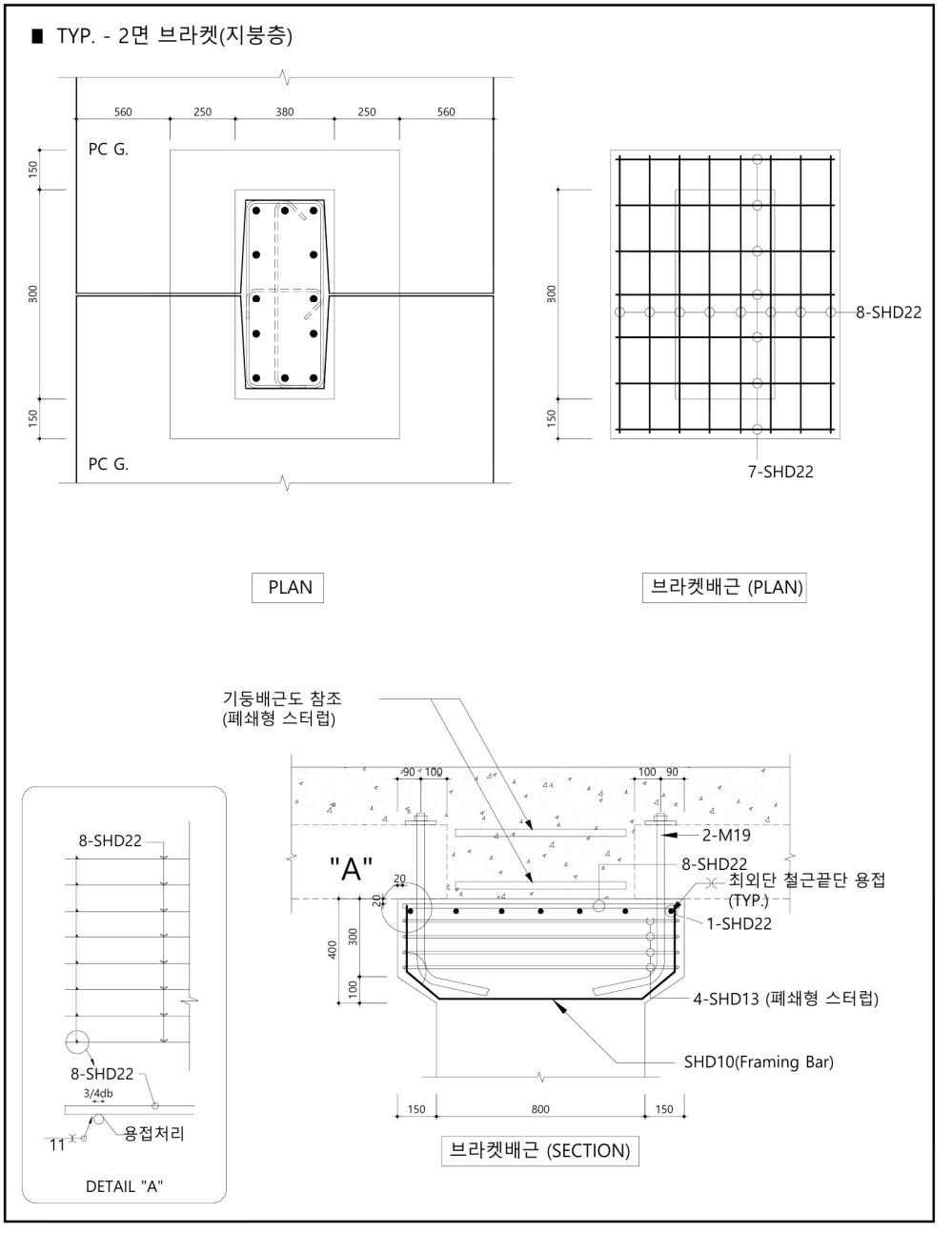
■ PG11 (L=8.2m)

BOTH. END	CEN.
	
① RC TOP BAR : 21-UHD22	① RC TOP BAR : 9 -UHD22
② PC TOP BAR : 4 -SHD13	② PC TOP BAR : 4 -SHD13
③ PC BOT BAR : 11 -UHD22	③ PC BOT BAR : 18 -UHD22
④ 스터럽 : SHD16@125	④ 스터럽 : SHD16@200
⑤ As : SHD13@150 (폐쇄형)	⑤ As : SHD13@150 (폐쇄형)
⑥ 정착철근 : 4-UHD25	

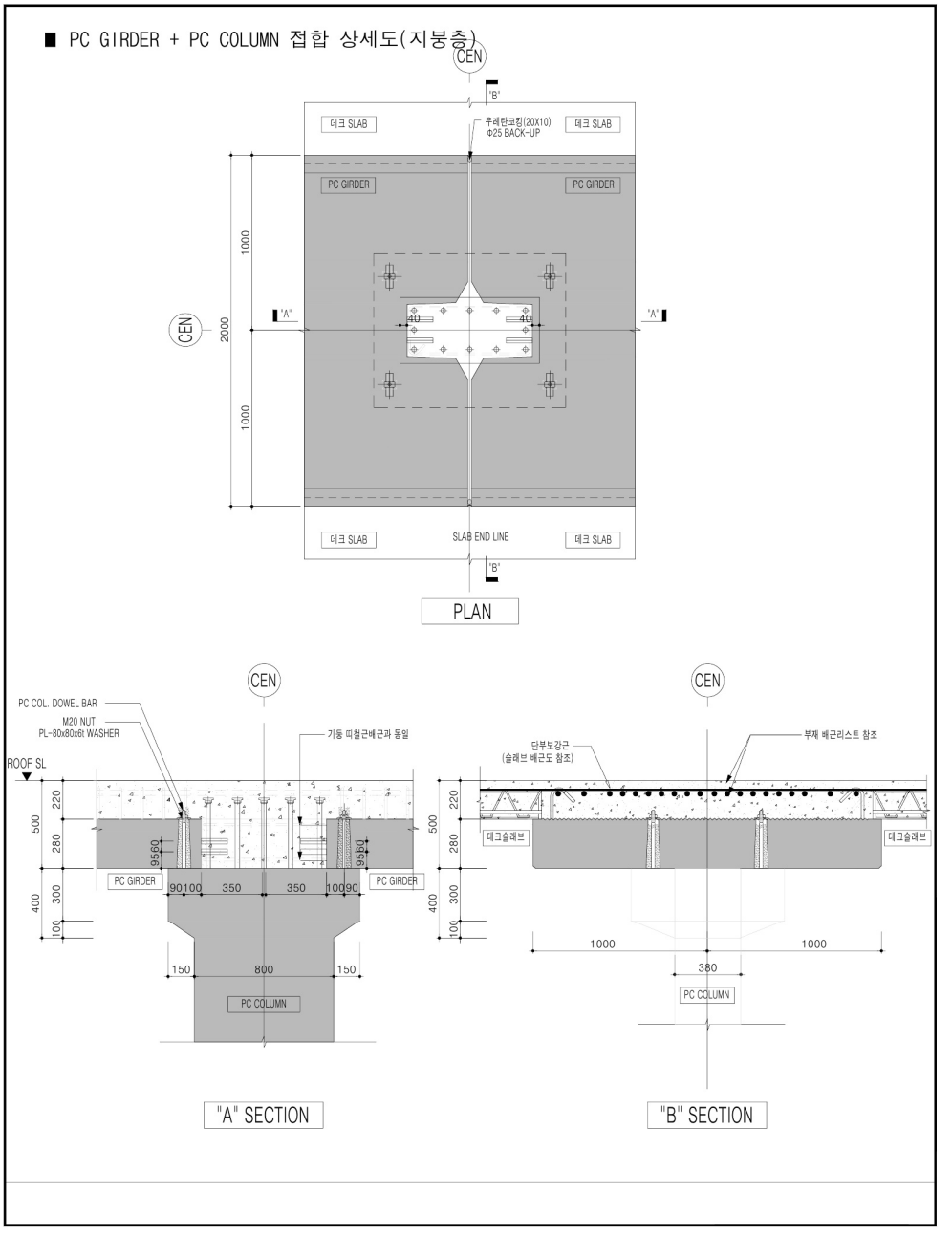
■ NOTE

1. fck = 35 MPa(PC) / 단, 탈형시 fck = 24 MPa 이상(PC), 조립시 fck = 35 MPa (PC) / fck = 30 MPa(Topping CON'C)
2. fy = 500 MPa (SHD) : D16이하, fy = 600 MPa (UHD) : D19이상
3. PC거더와 TOPPING이 접하는 면은 레이턴스가 없도록 깨끗이한후 거친면처리 할것 (6mm)
4. As철근 ( ) HOOK위치에 주의
5. = 스터럽철근 겹배근을 의미함.
6. 배근도와 동일하게 강선 1단, 2단 배치할것. (강선배치 임의 변경시 구조검토 필요함)
7. 시공시 부재 중앙부 잭서포트 2개소 설치.
8. PC부재 형태는 PC SHOP도면 참조 : PC슬래브 걸침 유무에 따라 PC부재 형태 다름.

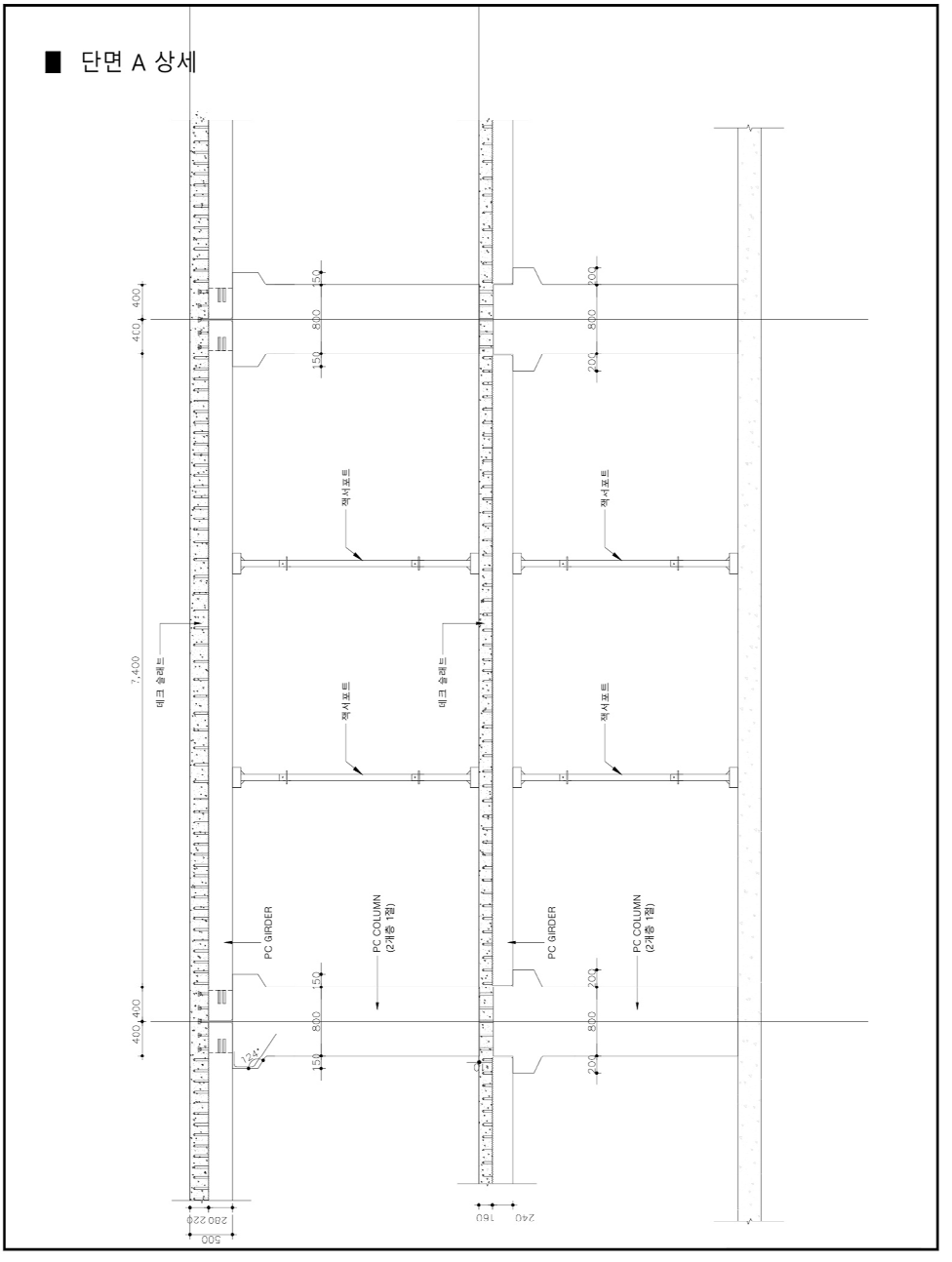
[그림 4-2] 1방향 PC구조 공법 실무도면(PC보)



[그림 4-3] 1방향 PC구조 공법 실무도면(브라켓)

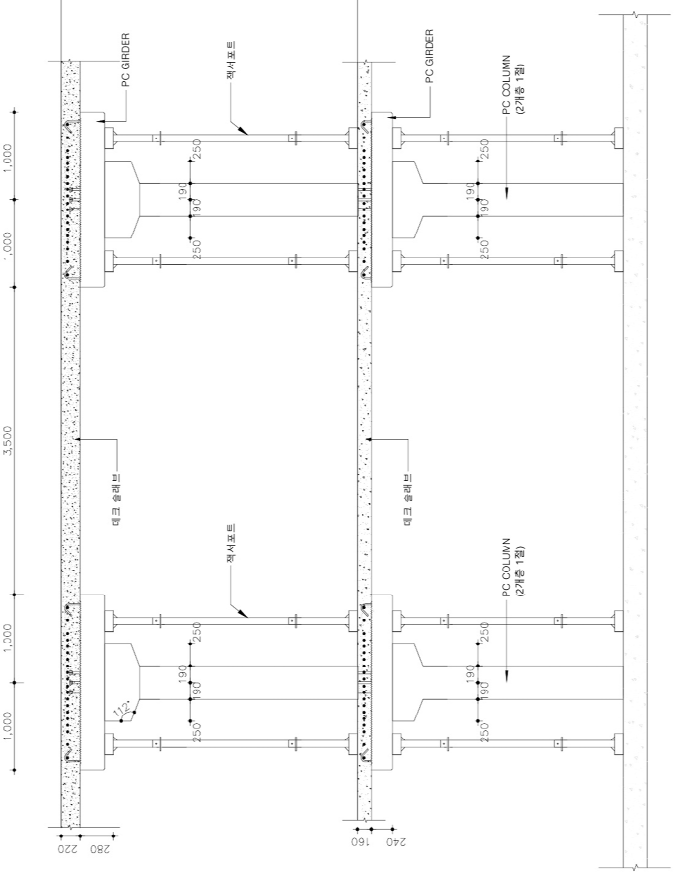


[그림 4-4] 1방향 PC구조 공법 실무도면(접합부 상세)



[그림 4-5] 1방향 PC구조 공법 실무도면(A단면 상세)

■ 단면 B 상세



[그림 4-6] 1방향 PC구조 공법 실무도면(B단면 상세)

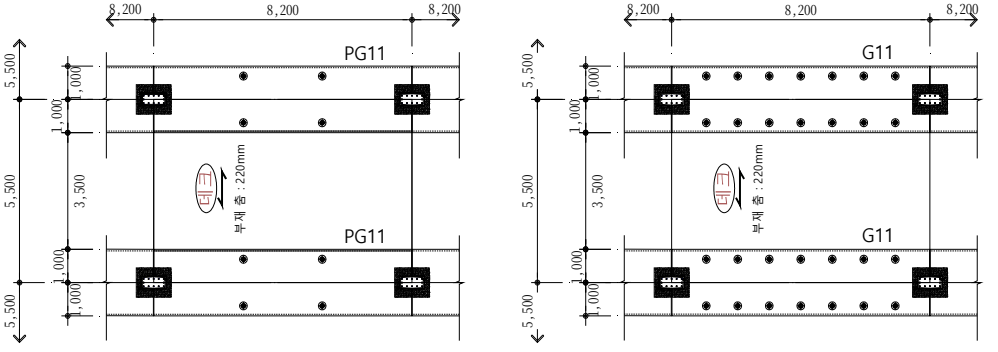
2 1방향 PC구조 공법의 현장 작업 물량 검토

1) 철근 및 콘크리트 현장 작업 물량 비교

보-기둥(W-PC) 구조를 대상으로 기존 RC공법과의 현장 작업 물량 비교

○ 물량 비교는 LH 공동주택 주차장 지붕층을 대상으로 수행하였으며, LH 실무 부서에서 제안한 보-기둥(W-PC) 구조의 프로토 타입을 대상으로 한정

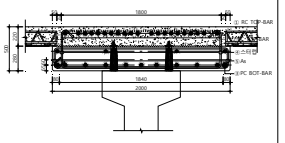
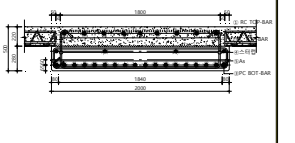
- 1방향 PC 보-기둥 구조를 1방향 RC 보-기둥 구조로 전환설계
- 보와 기둥 물량으로 구분하여 비교
- 슬래브의 경우 모두 데크 플레이트 슬래브 적용



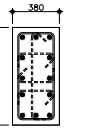
(a) 1방향 PC 보-기둥 공법 (b) 1방향 RC 보-기둥 공법

[그림 4-7] LH 공동주택 주차장 1개 모듈 도면

■ PG11 (L=8.2m)

BOTH. END	CEN.
	
① RC TOP BAR : 21-UHD22	① RC TOP BAR : 9 -UHD22
② PC TOP BAR : 4 -SHD13	② PC TOP BAR : 4 -SHD13
③ PC BOT BAR : 11 -UHD22	③ PC BOT BAR : 18 -UHD22
④ 스터럽 : SHD16@125	④ 스터럽 : SHD16@200
⑤ As : SHD13@150 (폐쇄형)	⑤ As : SHD13@150 (폐쇄형)
⑥ 정착철근 : 4-UHD25	

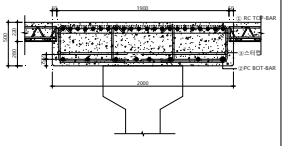
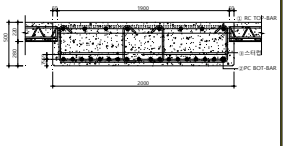
PC 보

부 호	B1F
PC11	
주 근	12- UHD22
대 근	SHD10 @200
콘크리트 강도	fck = 35 MPa(PC)

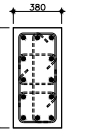
PC 기둥

(a) 1방향 PC 보-기둥 공법

■ G11 (L=8.2m) _ 내단부

BOTH. END	CEN.
	
① RC TOP BAR : 22-UHD22	① RC TOP BAR : 8 -UHD22
② PC BOT BAR : 8 -UHD22	② PC BOT BAR : 18 -UHD22
③ 스터럽 : 4-SHD13@150	③ 스터럽 : 4-SHD13@200

RC 보

부 호	B1F
PC11	
주 근	12- UHD22
대 근	SHD10 @200
콘크리트 강도	fck = 35 MPa(PC)

RC 기둥

(b) 1방향 RC 보-기둥 공법

[그림 4-8] 보 및 기둥 부재 상세

○ 물량 비교 결과, 동일 하중조건일 때 제안된 PC 보-기둥 공법은 RC 보-기둥 공법 대비 현장작업 철근 및 콘크리트 물량이 감소되는 것으로 나타남

- PC보의 현장배근 철근량이 RC보에 비하여 48% 절감
- PC기둥의 현장배근 철근량이 RC기둥에 비하여 98% 절감
- PC보의 현장타설 콘크리트량이 RC보에 비하여 58% 절감
- PC기둥의 현장타설 콘크리트량이 RC기둥에 비하여 96% 절감

○ 물량 비교로부터, PC공법은 현장 철근 및 콘크리트 작업이 현저히 줄어듬을 알 수 있었음

[표 4-1] PC공법과 RC공법의 물량 검토 결과

적용 공법 명		PC공법		RC공법	
		보	기둥	보	기둥
철근	현장배근 전체 철근량 (kg)	①615.8	②5.7	③1,184.1	④278.8
	단위면적 (m^2)	45.1	45.1	45.1	45.1
	현장배근 단위 철근량 (kg/m^2)	13.65	0.126	144.8	210.1
	RC공법 비교(감소량)	**①/③ (▽48.0%)**	**②/④ (▽98.0%)**	-	-
콘크리트	현장타설 전체 콘크리트량 (m^3)	⑤3.428	⑥0.060	⑦8.180	⑧1.327
	PC부재 전체 콘크리트량	4.752	1.267	-	-
	RC공법 비교(감소량)	**⑤/⑦ (▽58.0%)**	**⑥/⑧ (▽96.0%)**	-	-

* 슬래브는 모두 데크 플레이트 슬래브 적용

구조부호	층고	사이즈			철근종류		수량	길이(면적)	와이어쉬		강선			이형철근								비고
		보폭	보높이	길이					4-200X250	6-100X250	12.7	15.2	SHD10	SHD13	SHD16	SHD19	UHD22	UHD25	UHD29	UHD32		
PG11	지붕층	2000	280	8130																		
			날개 제외	7480	PC 상부근1	SHD13	4	8160						32.640								
					PC 하부근1	UHD22	10	8160									81.600					
					PC 하부근2	UHD22	1	7460									7.460					
					PC 하부근3	UHD22	7	5610									39.270					
					스터럽1	SHD16	52	2900							150.800							
					스터럽2	SHD13	51	4530						231.030								
					날개 보장근1	SHD13	16	2170						34.720								
					날개 보장근2	SHD16	4	2350							9.400							
					PC 정착 철근1	UHD25	8	2190										17.520				
					전체길이(면적)				0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	293.390	160.200	0.000	128.330	17.520	0.000	0.000		
					단위중량(kg/m', kg/m)				0.92	3.2	0.774	1.101	0.56	0.995	1.56	2.25	3.04	3.98	5.04	6.23		
					총중량(kg)				0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	296.898	249.912	0.000	390.123	69.730	0.000	0.000		

(a) PC 보 물량 산출

구조부호	층고	사이즈			철근종류		수량	길이(면적)	와이어쉬		강선			이형철근								비고
		가로	세로	길이					4-200X250	6-100X250	12.7	15.2	SHD10	SHD13	SHD16	UHD16	UHD22	SHD22	UHD29	UHD32		
PC11	4100	800	380	3810	주근1	UHD22	12	3700									44.400					
					HOOP근1	SHD10	17	2080					35.360									
					HOOP근2(슬리브)	SHD10	5	2280					11.400									
					보조대근1	SHD10	17	880					14.620									
					보조대근2	SHD10	51	440					22.440									
					보조대근3(슬리브)	SHD10	5	990					4.950									
					보조대근4(슬리브)	SHD10	15	570					8.550									
					브라켓주근1	SHD22	8	1060										8.480				
					브라켓주근2	SHD22	7	840										5.880				
					브라켓 배근1	SHD10	4	1580					6.320									
		지붕층			브라켓 배근2	SHD10	4	1500					6.000									
					브라켓 배근3	SHD10	5	1260					6.300									
					브라켓 배근4	SHD10	2	1200					2.400									
					브라켓 HOOP근	SHD13	4	3950						15.800								
					기둥 다월바	UHD19	4	1010								4.040						
					전체길이(면적)				0.000	0.000	0.000	0.000	113.340	15.800	0.000	4.040	44.400	14.360	0.000	0.000		
					단위중량(kg/m', kg/m)				0.92	3.2	0.774	1.101	0.56	0.995	1.56	2.25	3.04	6.23	5.04	7.51		
					총중량(kg)				0.000	0.000	0.000	0.000	66.270	15.721	0.000	9.090	134.976	43.654	0.000	0.000		

(b) PC 기둥 물량 산출

[그림 4-9] PC무량판 공법 물량 산출 근거

구조부호	위치	사이즈			철근종류		수량	길이(면적)	와이어메쉬		강선		이형철근							비고
		보폭	보 높이	길이					4-200X250	6-100X250	12.7	15.2	SHD10	SHD13	SHD16	UHD19	UHD22	UHD25	UHD29	UHD32	
G11	지붕층	2300	500	8180																	
					상부근1	UHD22	8	B160									65.280				
					상부근2	UHD22	14	6140									85.960				
					PC 하부근1	UHD22	8	B160									65.280				
					PC 하부근2	UHD22	10	6135									61.350				
					스터럽1	SHD13	51	2900						147.900							
					스터럽2	SHD13	51	1730						88.230							
					스터럽1 상부 캡버	SHD13	51	2070						105.570							
					전체 길이(면적)				0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	341.700	0.000	0.000	277.870	0.000	0.000	0.000	
					단위중량(kg/m', kg/m)				0.92	3.2	0.774	1.101	0.56	0.995	1.56	2.25	3.04	3.98	5.04	6.23	
					총중량(kg)				0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	339.992	0.000	0.000	844.725	0.000	0.000	0.000	

(a) RC 보 물량 산출

구조부호	층고	사이즈			철근종류		수량	길이(면적)	와이어메쉬		강선		이형철근							비고
		가로	세로	길이					4-200X250	6-100X250	12.7	15.2	SHD10	SHD13	SHD16	UHD16	UHD19	UHD22	SHD22	UHD29	UHD32	
C11	4100	800	380	3600	주근1	UHD22	12	3950										47.400				
					HOOP근1	SHD10	17	2080					35.360									
					HOOP근2(슬리브)	SHD10	5	2280					11.400									
					보조대근1	SHD10	17	860					14.620									
					보조대근2	SHD10	51	440					22.440									
					보조대근3(슬리브)	SHD10	5	990					4.950									
					보조대근4(슬리브)	SHD10	15	570					8.550									
					브라켓주근1	SHD22	8	1060											8.480			
					브라켓주근2	SHD22	7	840											5.880			
				지붕층	브라켓 바근1	SHD10	4	1580					6.320									
					브라켓 바근2	SHD10	4	1500					6.000									
					브라켓 바근3	SHD10	5	1260					6.300									
					브라켓 바근4	SHD10	2	1200					2.400									
					브라켓 HOOP근	SHD13	4	3950						15.800								
					기둥 다올바	UHD19	4	1010									4.040					
					전체길이(면적)				0.000	0.000	0.000	0.000	118.340	15.800	0.000	0.000	4.040	47.400	14.360	0.000	0.000	
					단위중량(kg/m', kg/m)				0.92	3.2	0.774	1.101	0.56	0.995	1.56	1.56	2.25	3.04	3.04	6.23	7.51	
					총중량(kg)				0.000	0.000	0.000	0.000	66.270	15.721	0.000	0.000	9.090	144.096	43.654	0.000	0.000	

(b) RC 기둥 물량 산출

[그림 4-10] RC무량판 공법 물량 산출 근거

3 1방향 PC구조 공법의 실무적용성 검토

1방향 PC구조 공법의 구조안정성 검증

○ LH에서 제안된 1방향 PC구조 공법은 구조성능평가 및 전산해석 결과, 국내 관련 구조기준을 만족하였으며, 이를 바탕으로 LH 공동주택 주차장 건설을 위한 구조평면 설계 가능

- LH 공동주택 주차장 하중조건, 재료강도 등을 검토하여 구조설계 수행
- 국가건설기준(KDS)를 만족하는 중력하중 및 반복하중 실험 수행
- 실험결과, 최종파괴 시까지 구조안정성 저하가 발생하지 않았음
- 실험체 설계 시 의도한 파괴모드가 나타나 실험의 유효성 검증

탈현장(OSC) 공장생산 방식의 PC공법을 적용하여 주차장 품질 확보 가능

○ 1방향 PC보-기둥 공법은 PC보 및 PC기둥의 적용으로 RC공법 대비 현장 철근 및 콘크리트 물량 절감 가능

- 현장작업 물량 절감으로 시공성 및 주차장 품질관리 용이

○ 데크 플레이트 슬래브 사용으로 시공용 가설재(서포트)의 최소화를 구현하여 시공성과 작업자 안전성 확보 가능

실무적용을 위한 1방향 PC보-기둥 공법의 도면 작성

○ LH 공동주택 주차장에 적용가능하도록 1방향 PC보-기둥 공법의 현장적용을 위한 실무 도면 작성

- 공동주택 주차장 특성에 부합하게 설계변경 가능
- PC보, PC기둥, 접합부 등의 프로토 타입 도면 제공

1방향 PC구조 공법의 구조품질 확보 방안

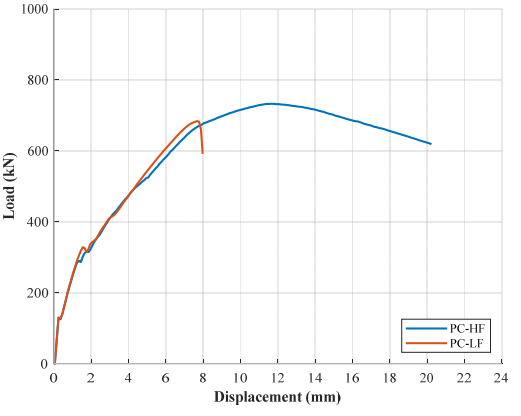
○ 구조성능평가 결과, 접합부에서 두드러진 파괴가 발생하므로 시공 시 이에 대한 품질관리 철저

- PC보-슬래브 접합부에서 중력하중에 의한 파괴가 발생할 수 있으므로 접합부 연결철근 배근 설계 및 시공관리에 중점을 두어야 함

- PC보-기둥 접합부 하부 소성힌지 구간에서 반복하중에 의한 휨 파괴가 발생할 수 있으므로 기둥 소성힌지 구간에 내진상세 적용

○ PC부재와 덧침 콘크리트 사이의 부착성능이 저하될 경우 일체화 구조거동에 영향을 줄 수 있으므로 시공 시 PC부재와 덧침 콘크리트 사이의 거친면 처리가 필요함

- PC부재와 덧침 콘크리트 사이의 부착에 따라 전산해석을 수행한 결과, 부착성능이 저하될 경우 최대하중 및 변위가 작아짐을 확인하였음



[그림 4-11] 접착면 요소의 마찰 계수에 따른 하중-변위 관계 변화

V 결론

Key Point

- 본 연구로부터 수행된 1방향 PC구조 공법의 구조설계, 구조성능평가, 실무적용성 등을 바탕으로 결론 도출

1) 1방향 주차장 PC구조 공법 제안

○ 본 연구에서 제안된 1방향 PC구조 공법은 PC보-기둥 구조와 PC무량판 구조로 제안되어 LH 공동주택 주차장 건설 특성에 맞게 적용할 수 있음

○ 특히, 제안된 1방향 PC구조 공법은 건설 현장에서 널리사용되는 데크 플레이트 슬래브 외에도 현장타설 콘크리트 슬래브, 할로우 코어 슬래브, 역리브 슬래브 등 다양한 슬래브가 적용 가능한 장점이 있음

2) 1방향 PC구조 공법별 특성

○ 1방향 PC보-기둥 구조는 폭 2,000mm의 PC보와 PC기둥을 골조시스템으로 적용하였으며, PC보-기둥 접합부에는 브라켓을 두어 PC부재 설치 시의 시공 안정성 및 구조 안정성을 확보하였음

○ 1방향 PC무량판 구조는 층고절감을 극대화시킬 수 있는 철골합성보 상세를 바탕으로 보가 돌출되지 않은 Slim 플로어 형태임

3) 중력하중 실험 결과

○ 주차장 지붕층 시공 및 적용 시 발생할 수 있는 중력하중(고정하중 및 활하중 등)을 고려하여 총 4개의 실물 가력 실험을 수행하였음

○ 실험결과, 모든 실험체는 현행 기준을 만족하면서 RC공법의 실험체와 동등 이상의 내력 및 연성능력을 보유한 것으로 나타났음

○ 실험체의 파괴모드는 설계시 의도한 바와 같이 PC보-슬래브 접합부의 위험 단면에서 휨 파괴로 나타났으며, 실험체에 부착된 철근게이지 값으로부터 PC보-슬래브 접합부의 연결철근은 충분한 성능을 보유한 것으로 나타남

4) 반복하중 실험 결과

○ 주차장의 기둥 사이 경간 및 횡하중에 따른 불균형 모멘트의 발생 시 구조 안정성을 평가하기 위하여 총 4개의 축소 모형 2경간 횡하중 반복실험을 수행하였음

○ 실험결과, 모든 실험체는 현행기준을 만족하면서 RC공법의 실험체와 동등 이상의 내력 및 연성능력을 보유한 것으로 나타났음(층간변위비 4.5% 이상)

○ 실험체의 파괴모드는 설계시 의도한 바와 같이 경간 사이 중앙부 PC기둥에서 휨 파괴로 나타났으며, PC기둥의 주철근도 항복하여 횡하중의 작용에 따른 구조안정성을 확보한 것으로 보임

5) 실험체 전산해석 결과

○ 본 연구에서 수행한 실험의 신뢰성을 검증하기 위하여 실제 실험체와 동일하게 범용 유한요소 해석프로그램(ATENA GID)를 사용하여 해석을 수행하였음

○ 해석결과, 중력하중 실험체는 모든 해석 모델에서 주철근 항복 전후 거동이 실험과 유사하였으며 최대 오차율은 약 5% 이내로 나타났음. 또한 실험체 파괴 단면 및 균열도 유사함을 확인하였음

○ 반복하중 실험체 해석결과로부터 초기탄성강성, 실험체 파괴모드가 유사함을 확인하였으나, 최대하중은 PC부재와 덧침 콘크리트와의 부착성능 및 Bauschinger effect에 따라 오차율이 발생하는 것으로 나타났음

6) LH 공동주택 주차장 실무적용성 검토

○ 1방향 PC보-기둥 공법은 동일 하중조건일 때 RC공법 대비 현장작업의 철근 및 콘크리트 물량이 감소되어, 현장작업이 감소될 것으로 기대됨

○ RC보-기둥 구조 공동주택 주차장 대비, 제안된 1방향 PC무량판 공법(H-PC)은 주차장의 보를 생략 가능하여 층고절감 효과 발생 가능

○ PC공법 특성 상 접합부에서 구조 성능저하가 발생할 수 있으므로 시공시 접합부 품질관리(철근배근, 거친면 처리)가 철저히 이루어져야 함

참고문헌

KDS 14 20 10 : 2021 콘크리트구조 해석과 설계 원칙, 국토교통부(2021)

KDS 14 20 20 : 2022 콘크리트구조 휨 및 압축 설계기준, 국토교통부(2022)

KDS 14 20 22 : 2022 콘크리트구조 전단 및 비틀림 설계기준, 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 14 20 80 : 2024 콘크리트 내진설계기준, 국토교통부(2021)

KDS 41 17 00 : 2022 건축물 내진설계기준, 국토교통부(2022)

KDS 41 20 10 : 2024 건축물 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준, 국토교통부(2024)

ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-25) and Commentary(ACI 318R-25),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI(2025)

ACI Committee 374, “Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary (ACI 374.1-05),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI(2005)

ACI Committee 374, “Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads (ACI 374.2R-13)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 18 pp.(2013)

Cervenka, V., Cervenka, J., and Pukl, R. “ATENA – A Tool for Engineering Analysis of Fracture in Concrete,” Sadhana Vol. 27, 2002, pp. 485-492.

Kim, S. H., Cho, J., Oh, H. K., Choi, S. D., Yeo, U. Y., and Lee, D. H. “Seismic Performance Evaluation of Dry Precast Concrete Beam-Column Connections with Intermediate Moment Frame Details,” EESK Journal of Earthquake Engineering, V. 27, No. 3, 2023, pp. 129–137. (In Korean)

LaFave, J. M.,and Wight, J. K. "Reinforced Concrete Wide-Beam Construction vs. Conventional Construction: Resistance to Lateral Earthquake Loads," Earthquake Spectra, Vol. 17, No. 3, 2001, pp. 479–500.

Wei, B., He, X., Chen, T., Wu, C., and Wang, H. "Experimental research on the flexural behavior of Basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) and steel bars hybrid reinforced concrete beams." Structural Concrete, 26(1), 2025, 837–855.

Li, J. W., Jiang, L. Z., An, J. H., and Zhang, X. "Experimental study on the bending performances of shear-resistant tightly keyway-assembled composite slab." Structural Concrete, 2025, 1–14.

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, 15, Article No. 7057, 2025.

Lim, D. K., and Choi, M. S. "Flexural behavior of CFRP bar-reinforced structures for deflection prediction." Preprint, SSRN, 2024.

Romanazzi, V., and Leone, M. "Analysis of flexural behaviour of steel reinforced cement-less concrete beam." Engineering Structures, 330, 119859, 2025.

Mohamad, M. E., et al. "Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond." Cement and Concrete Composites, 56, 2015, 1-14.