

고품질 PC공동주택 접합부 품질확보를 위한
구조성능 고도화

연구관리 2025-067호

고품질 PC공동주택 접합부 품질확보를 위한 구조성능 고도화

지은이	김민준, 전명훈, 권석민, 오정민, 노준오
발행인	정창무
발행처	한국토지주택공사 토지주택연구원
주 소	(34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99
홈페이지	http://lhri.lh.or.kr

이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로서 공사나 정부의 공식적인 견해와 관계가 없습니다.

우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

연구관리 2025-067

고품질 PC공동주택 접합부 품질확보를 위한 구조성능 고도화

Enhancement of structural performance to ensure the quality of joint for LH PC apartment

김민준·전명훈·권석민·오정민·노준오

LH토지주택연구원

참여연구진

연구책임

김민준 LH 토지주택연구원 수석연구원

연구진

전명훈 LH 토지주택연구원 연구위원

권석민 LH 토지주택연구원 수석연구원

오정민 LH 토지주택연구원 전임연구원

노준오 LH 공공주택본부 주거혁신처 차장

연구심의위원

전주영 LH 토지주택연구원 건설기술연구실장(심의위원장)

김승훈 한밭대학교 교수

신지욱 경상국립대학교 교수

정동혁 고려대학교 교수

노태극 LH 공공주택본부 주거혁신처 팀장

송상훈 LH 토지주택연구원 연구위원

박시현 LH 토지주택연구원 수석연구원

이동건 LH 토지주택연구원 수석연구원

이수규 LH 토지주택연구원 수석연구원

자문위원 (가나다순)

문일환 대전대학교 교수

배기선 (주)한국신소재융합시험연구원 부원장

위탁연구기관

(사)한국지진공학회

주현진 환경국립대학교 교수

최인섭 계명대학교 교수

■ OSC PC공법의 공동주택 적용 필요

국내 건설환경변화에 대응하고 주택의 품질 확보를 위해서는 탈현장(Off Site Construction, 이하 OSC) 공법을 통한 건설 생산성 고도화를 이루어야하나, 다양한 OSC 공법의 특성에 따른 LH 주택 형식의 적용방안에 대한 연구 필요

LH에서는 2024년 LH OSC주택 2030 로드맵을 발표하고 프리캐스트 콘크리트(이하 PC) 공법을 포함한 OSC주택의 활성화를 위한 실행 방안을 도출하였음

■ PC공법의 접합부 품질확보 필요

PC공법은 고층 및 대규모 단지 형태로 건설이 가능하여 공동주택의 생산성 향상 및 공급에 유리하나, 필연적으로 발생하는 PC접합부의 구조 및 시공 품질에 따라 구조 안전성 및 건설 현장 안전성 저하 우려가 있음

특히, 국내 PC접합부는 습식의 스플라이스 슬리브를 대부분 이용하고 있으며, 이에 대한 품질 검사는 관련 기준(국내: KCS, EXCS, 국외: PCI, JASS10)에 따라 대부분 육안으로 이루어져, PC접합부의 정량적 측정 방법을 통한 PC공법 품질의 고도화 방안 도출이 요구됨

■ LH의 PC접합부 품질확보 방안 연구 수행 결과

LH에서는 연구(2024, 고품질 PC공동주택 공급을 위한 품질관리 시스템 고도화)를 통하여 그라우트 압축강도 및 초음파 탐상법을 이용한 PC접합부의 품질관리 방안을 제시하였음

연구결과, PC접합부에 사용되는 그라우트의 강도와 스플라이스 슬리브 내 충전결합에 따라 구조적 성능이 저하될 수 있다는 결론을 얻었으며, 초음파 탐상법을 이용하여 충전결합의 발생 여부를 판단할 수 있는 기초 데이터를 얻었음

■ 2024년 수행된 연구의 한계 및 연구 필요성

2024년 수행된 연구는 PC접합부의 요소를 제작 후 인발시험을 진행하여 그라우트 강도 및 충

전결함에 따른 품질관리 지표를 제시하였으나, PC부재 단위(기초-기둥, 기둥-기둥 등)의 구조성능을 검증하지 못한 한계를 가짐

따라서, 기 연구를 통하여 제시된 PC접합부 품질관리 지표를 LH의 PC공동주택에 적용하기 위해서는 구조성능평가(실험)를 통한 검증이 반드시 필요하며, 구조적 품질관리 방안 제시가 필요함

■ 연구목적 및 범위

(연구목적) PC공동주택 접합부 품질 확보를 위한 구조성능 고도화를 구현하기 위하여 기존 연구 결과로 제시한 PC접합부 품질관리 지표를 토대로, PC접합부 축소모형을 제작하여 구조성능 평가를 수행하고 PC접합부 구조적 품질관리 방안 제시를 목적으로 함

(연구범위) 수직 PC접합부에 일반적으로 사용되는 이음철물(스플라이스 슬리브)을 대상으로 그라우트 강도, 충전결함에 따른 구조성능평가 수행

■ 주요 연구내용

PC공동주택 접합부 구조성능평가 관련 선행연구 문헌조사

PC접합부 구조품질 저하 시나리오 제안

PC접합부 구조성능평가 수행

PC접합부 구조적 품질관리 방안 제시

■ 선행연구 및 관련기준 분석

- 선행연구 분석

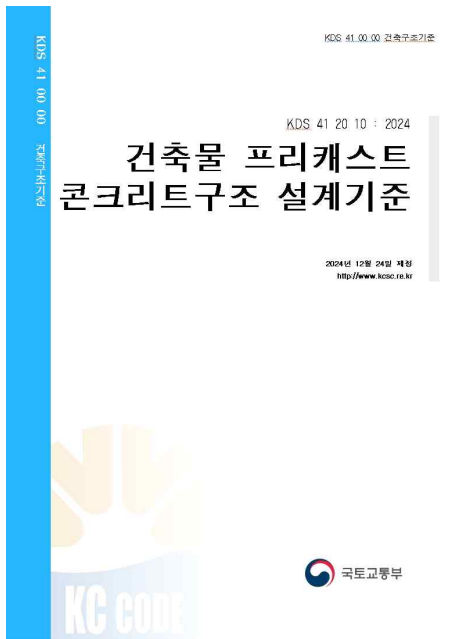
- 선행연구를 조사한 결과, 대부분의 기존 연구는 스프라이스 슬리브의 인발 실험에 집중
- 스프라이스 슬리브 내부 그라우트 충전 결함의 형태, 정착길이, 그라우트 강도 등 다양한 변수가 PC접합부의 강도 및 파괴모드에 영향을 미친다고 보고하였음

- 연구의 차별성

- 본 연구는 기존 연구에서 미수행된 PC접합부(기초-기둥, 기둥-기둥)의 PC부재 단위의 구조시스템 거동과, PC접합부의 충전 결함의 보강을 통한 구조성능을 평가하는 것으로부터 이 연구의 차별성 있음

- 관련기준 분석

- 2024년에 제정된 건축물 프리캐스트 콘크리트 구조 설계기준(KDS 41 20 10, 이하 PC 구조설계 기준)은 PC건축물의 제작부터 현장시공 단계에 이르는 모든 과정에서 구조적 안정성, 사용성, 내구성을 확보하는 것을 목적으로 함
- PC구조설계 기준은 PC접합부의 접합방식, 습식 접합부에 사용되는 그라우트의 강도 및 물성에 대한 내용과 PC건축물의 내진설계 등을 다루고 있음
- PC구조설계 기준 중 내진설계 부분에서는 구조형식 및 내진설계범주에 따라 높이 제한을 둔 특징이 있으며, 내진설계의 평가는 PC부재의 구조 거동에 기반한 “동등성 평가”를 기준으로 수행하고 있음



기준 적용대상 시스템	구조기준		내진설계기준(동등성 기준)			
	분할수평 계수	A외장부 계수	변위영률 계수	내진설계 영구하중	내진설계 명세 C	내진설계 명세 D
1. 내벽계 시스템						
프리캐스트 콘크리트	5	4.5	5	-	-	-
- 습식 구조보형						
프리캐스트 콘크리트	4	2.5	4	-	-	4B
- 중강구조보형						
2. 기둥연속시스템						
프리캐스트 콘크리트	5	2.5	5	-	-	-
- 특수구조보형						
프리캐스트 콘크리트	5	2.5	4.5	-	-	4B
- 중간구조보형						
3. 강골콘크리트-강골철거시스템						
프리캐스트 콘크리트	5	2	5.5	-	-	-
- 특수연성 구조물						
프리캐스트 콘크리트	5	2	1.5	-	-	-
- 중간연성 구조물						
프리캐스트 콘크리트	5	2	2.5	-	-	불가
- 보통연성 구조물						
4. 특수강골콘크리트-강-강골철거시스템						
프리캐스트 콘크리트	7	2.5	5.5	-	-	-
- 특수구조보형						
프리캐스트 콘크리트	5	2.5	5	-	-	-
- 중간 구조보형						
5. 중-중간-중골콘크리트-강-강골철거시스템						
프리캐스트 콘크리트	5.5	2.5	5	-	-	-
- 특수구조보형						
프리캐스트 콘크리트	5.5	2.5	4.5	-	-	4B
- 중간 구조보형						

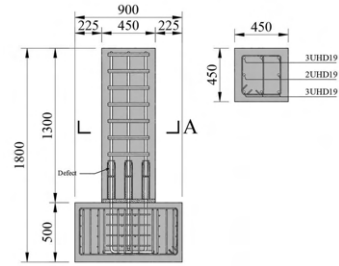
[그림] PC구조설계 기준

■ PC접합부 구조 품질관리 방안 제안

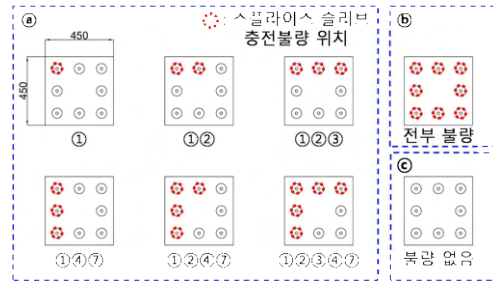
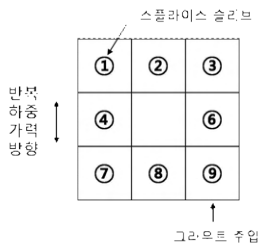
- 그라우트 주입방식에 따른 PC접합부 충전결함 시나리오
 - 현행 반중력식 스플라이스 슬리브 그라우트 주입방식은 주입구 쪽에서 거리가 떨어진 위치의 스플라이스 슬리브에 충전결함이 발생할 수 있음
 - 이 연구에서는 현행 주입방식으로 그라우트를 주입 할 경우에 발생 할 수 있는 충전 결함 시나리오를 PC부재 내 주철근의 위치에 따라 도출



(a) 충전결함 발생



(b) PC접합부 단면



(c) 주철근 위치에 따른 충전 결함 시나리오

[그림] PC접합부 충전 결함 시나리오

- 충전 결함을 시나리오

- 기존 연구에서 스플라이스 슬리브의 중앙부 아래에 위치한 하부 연결철근(다우얼 바)에서는 충전결함이 없었으므로(Mock-up 실험결과), 본 연구에서는 기존연구와 동일하게 스플라이스 슬리브의 중앙부를 기준으로 상부 연결철근을 대상으로 충전 결함을 산정하였음
- 기존 연구에서 충전 결함이 50%(스플라이스 슬리브 상부 기준)일 경우 PC접합부 인발 성능이 저하되었으므로 본 연구에서는 PC접합부의 충전 결함율을 50%로 가정하였음

- PC접합부 시공성 향상 방안

- 기존 연구에서는 시공하중으로부터 산정된 하중비 η_r 을 바탕으로 시공된 PC 수직 부재의 가설재 해체가 가능한 그라우트의 최소 압축강도를 20MPa로 제시함
- 본 연구에서는 시공성 확보가 가능한 그라우트의 최소 압축강도 20MPa를 토대로 충전결함을 고려한 구조성능을 검증하였음

- PC접합부 충전결함 사후 보강방안

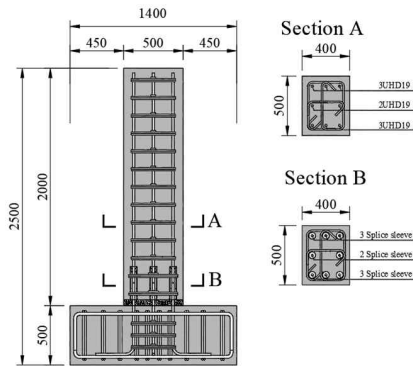
- 그라우트 충전 결함이 발생한 PC접합부를 사후 보강하기 위하여 현행 콘크리트 구조물의 보수 및 보강에 널리 사용되는 에폭시 주입제(강도 60MPa 이상)를 선정하였음
- 에폭시 주입제는 경화전 액체 상태로 스플라이스 슬리브의 토출구에 직접 주입이 가능하며 시공성 확보가 가능하며, 콘크리트와 철근에 대한 접착강도 우수, 경화 후 부피 수축이 적어 장기 내구성에 효과적일 것으로 판단하였음

■ PC접합부 구조 품질 관리 방안 검증

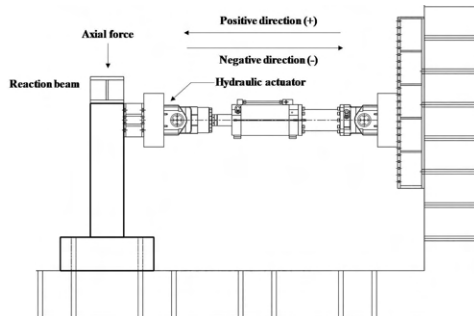
- PC접합부 구조 품질 관리 방안 제안을 바탕으로 PC접합부 구조 품질 관리 방안 검증을 위한 구조성능평가를 수행
 - PC접합부 충전결함 시나리오 반영: 그라우트 강도, 충전결함을
 - PC접합부 시공성 확보 방안 반영: 하중비 η_r 을 바탕으로 20MPa 그라우트 적용
 - PC접합부 충전결함 보강: 에폭시 주입제 적용
 - PC접합부의 구조성능 및 내진성능을 평가하기 위한 반복하중 가력 수행

[표] PC접합부 실험체 실험 변수 요약

실험내용 및 변수	개수
①-1 접합부 위치별 충전 결함 (그라우트압축강도 : 20 MPa)	5EA
①-2 접합부 위치별 충전 결함 (그라우트압축강도 : 60 MPa 이상)	5EA
②-1 모든 접합부 충전 결함 후 에폭시 보강(그라우트 압축강도 60 MPa 이상)	1EA
②-2 모든 접합부 충전 결함 (그라우트 압축강도 60 MPa 이상, 100 MPa)	2EA
③ 접합부 충전 결함 없음 (그라우트압축강도 : 20 MPa, 60 MPa 이상, 100 MPa)	2EA
④ RC	1EA
변수에 따른 실험체 총계 (①+②+③+④)	16EA



(a) 실험체 단면 및 형상

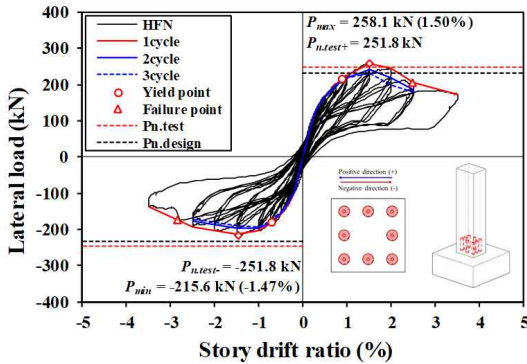


(b) 실험체 세팅 및 가력

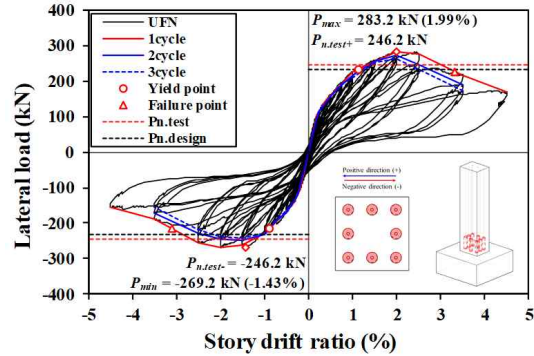
[그림] PC접합부 구조성능평가 실험

- 구조성능평가 결과

- PC접합부 충전 결함 시나리오에 따른 결과 : PC접합부 충전 결함 개소가 증가할수록 강도 및 초기강성의 저하가 발생하여 구조성능 저하가 나타남. 그라우트 압축강도가 100MPa일 경우, 그라우트 압축강도 60MPa일 때에 비하여 동일변수에서 구조성능이 향상됨
- PC접합부 시공성 확보 방안에 따른 결과 : 그라우트 압축강도가 20MPa일 경우, 모두 기준 강도를 만족하는 것으로 나타났으며, 시공단계에서는 큰 변위를 요구하지 않아 시공성 확보에 구조적인 문제가 없는 것으로 판단됨
- PC접합부 충전결함 보강에 따른 결과: 에폭시 주입제를 적용한 실험체가 에폭시 주입제를 미적용한 실험체에 비하여 강도가 약 1.12배 높게 나타나 에폭시 주입제의 보강효과를 확인함
- PC접합부의 충전율, 그라우트 강도, 에폭시 보강 등 실험 변수를 토대로 현행 PC구조설계 기준에 따라 동등성을 평가한 결과, PC접합부 충전결함이 적을수록 그라우트 강도가 증가할수록 동등성 기준을 만족하였음

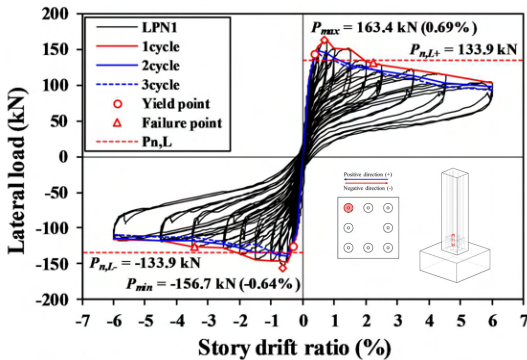


그라우트 압축강도 60MPa

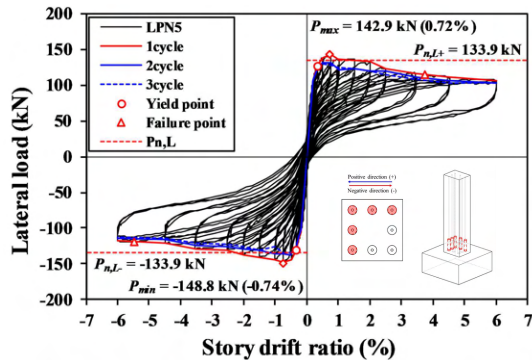


그라우트 압축강도 100MPa

(a) 그라우트 압축강도 확보에 따른 구조거동 비교

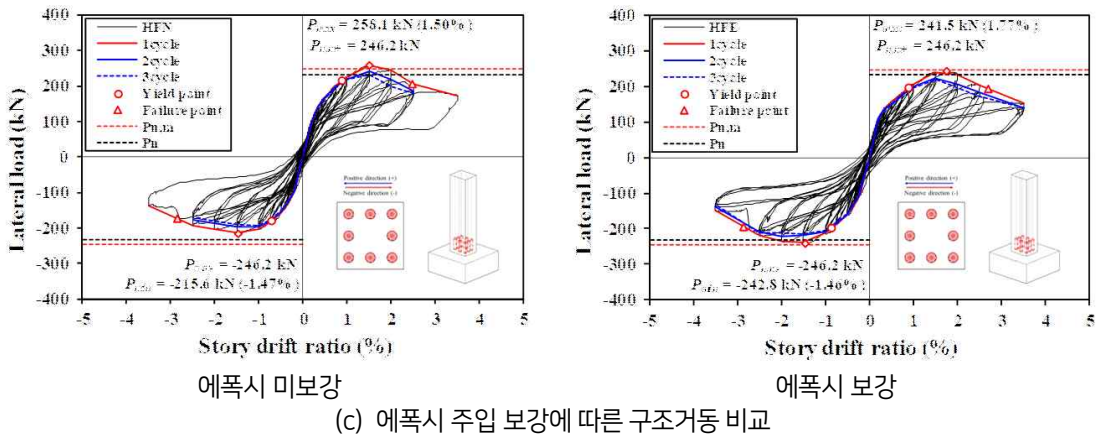


충전 결함 개소 1개



충전 결함 개소 5개

(b) 시공성 확보에 따른 구조거동 비교



[표] 동등성 평가 최종 판정

실험체명	강도 평가	강성 평가		에너지소산성능 평가		동등성 최종 판정
		상대적	절대적	상대적	절대적	
HNN	만족	불만족	만족	만족	불만족	합격
HFN	불만족	불만족	만족	만족	만족	불합격
HFE	불만족	불만족	만족	만족	만족	불합격
HPN1	만족	불만족	만족	만족	만족	합격
HPN2	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
HPN3	불만족	불만족	만족	불만족	불만족	불합격
HPN4	불만족	불만족	만족	불만족	불만족	불합격
HPN5	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
UFN	만족	불만족	만족	만족	만족	합격
LNN	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN1	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN2	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN3	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN4	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN5	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격

■ PC접합부 구조 품질관리 및 보강 방안

- PC접합부 구조 품질 관리 방안 제안 및 검증을 토대로 PC접합부 구조 품질관리 및 보강 방안을 도출하였음
 - 사전 품질 관리 방안 : PC건축물 구조설계 시 PC접합부에 사용되는 그라우트 압축강도를 상향 설계하여 구조품질 확보
 - 사후 품질 보강 방안 : PC접합부 시공 후 충전 결함이 발생할 경우에 대비하여 에폭시 수지 보강 방안과 시방서(안) 도출

- 사전 품질 관리 방안
 - 그라우트는 제품 매뉴얼 상의 28일 강도를 확보할 수 있으며 PC접합부에 주입하기 용이한 유동성을 확보한 제품과 공인성적서를 득한 제품을 사용하여야 함
 - 그라우트 사용 시 제품 매뉴얼에 제시된 작업온도, 가사시간, 물 사용량 등을 준수하여야 하며, 제품에 표기된 MSDS를 토대로 안전에 유의하여야 함
 - 그라우트 강도 시험은 KS F2426에 준하여 시험하되 관련 기준을 만족시켜야 함

[표] PC접합부 사전 품질 관리 방안

부재위치	접합부 종류	콘크리트 강도	그라우트 강도		비고
			현행	상향	
PC기둥	스플라이스 슬리브	35MPa 이상 (28일강도)	모재강도 1.5배 또는	모재강도 1.5배 또는	제품 매뉴얼을 준수하여야 함
PC벽체			65MPa 이상	80MPa 이상	

- 사후 품질 보강 방안
 - 에폭시 주입제의 재료의 성분, 특성, 기술자료, 사용지침서 등이 구비된 제품을 사용해야하며, 특히 경질형 에폭시 수지의 경우 KS F 4923의 품질규정을 따라야 함
 - 에폭시 주입제의 강도는 PC접합부에 사용한 그라우트 강도와 유사하거나 동등이상의 제품을 사용하여야 함
 - 에폭시 주입제 사용 시 제품 매뉴얼에 제시된 작업온도, 가사시간 등을 준수하여야 하며, 제품에 표기된 MSDS를 토대로 안전에 유의하여야 함

■ 기대성과 및 활용방안

- 접합부 품질관리 지침 작성 및 관리를 통한 구조적으로 안전한 PC공동주택 공급 가능
- 건설분야 최대 공기업으로서 탈현장(OSC)공법 현장 연착륙을 위한 선도적 역할 가능

주제어

탈현장, PC공동주택, PC접합부, PC부재, 구조성능

차례 Contents

제1장 서론

1. 연구 배경	1
2. 연구의 목적 및 범위	3
3. 연구 내용	4

제2장 선행연구 및 관련기준 분석

1. 선행연구 고찰	6
1.1 습식 PC접합부 관련 연구동향	6
1.2 습식 PC접합부 구조실험 분야 선행연구 분석	7
2. 선행연구 분석 소결	11
2.1 PC접합부 구조성능평가에 대한 고찰	11
2.2 선행 연구와의 차별성	11
3. 현행 건축물 PC구조설계 기준	12
3.1 개요	12
3.2 PC건축물의 내진설계	13
3.3 동등성 평가	14
3.4 중간모멘트골조 기준	16

제3장 PC접합부 구조 품질관리 방안 제안

1. 스플라이스 슬리브 품질 저하 요인	21
2. PC접합부 구조 품질 저하 시나리오	22
3. PC접합부 시공성 향상 방안	25
4. PC접합부 충전결함 보강방안	26

제4장 PC접합부 구조 품질 관리 방안 검증

1. 구조성능평가 실험체	27
1.1 개요	27
1.2 실험변수	27
1.3 PC접합부 실험체 설계 상세	30
1.4 PC접합부 실험체 제작	33
2. 구조성능평가 실험	35
2.1 실험계획	35
2.2 재료시험	39
2.3 실험결과	42
2.4 실험결과 분석	67

제5장 PC접합부 구조 품질관리 방안

1. 개요	86
2. PC접합부 구조 품질관리 방안	86
2.1 사전품질관리	86
2.2 사후 품질관리	88
2.3 PC접합부 에폭시 주입제 보강 시방서(안)	94

제6장 결론

표 차례 List of Tables

[표 2-1] 국내 선행연구 사례 분석 요약	7
[표 2-2] 국외 선행연구 사례 분석 요약	9
[표 2-3] 지진력저항시스템에 대한 설계계수	13
[표 4-1] PC접합부 실험체 실험 변수 요약	28
[표 4-2] PC접합부 구조성능평가 가력계획 상세	37
[표 4-3] 콘크리트 압축강도 실험 결과	39
[표 4-4] 그라우트 압축강도 실험 결과	39
[표 4-5] 철근 인장 시험 결과	40
[표 4-6] 스플라이스 슬리브 인장 시험 결과	41
[표 4-7] 실험체 최대하중	79
[표 4-8] 한계변위비 최대강도	80
[표 4-9] 강성 절대적 동등성 평가	81
[표 4-10] 강성 상대적 동등성 평가	82
[표 4-11] 에너지 절대적 동등성 평가	83
[표 4-12] 에너지 상대적 동등성 평가	84
[표 4-13] 동등성 평가 최종 판정	85
[표 5-1] PC접합부 사전 품질 관리 방안	87

그림 차례 List of Figures

[그림 1-1] 국내외 건설 생산성 지수	1
[그림 1-2] PC습식접합방식의 품질 저하	2
[그림 2-1] 최근 10년간 스플라이스 슬리브 관련 논문 수	6
[그림 2-2] PC구조설계 기준	12
[그림 3-1] 그라우트 압축강도에 따른 품질 저하	21
[그림 3-2] PC접합부 그라우트 주입 현황	22
[그림 3-3] PC접합부 그라우트 충전결함	22
[그림 3-4] PC부재 단면 및 스플라이스 슬리브 위치	23
[그림 3-5] 스플라이스 슬리브 위치에 따른 충전불량 시나리오	23
[그림 3-6] 그라우트 충전율에 따른 품질 저하	24
[그림 3-7] PC접합부 시공성 확보를 위한 최소 그라우트 압축강도	25
[그림 4-1] 실험체 명명 상세	28
[그림 4-2] 그라우트 충전결함 변수 상세	29
[그림 4-3] 그라우트 충전율 상세	30
[그림 4-4] PC 기둥-기초 접합부 실험체 상세	31
[그림 4-5] RC 기둥-기초 실험체 상세	31
[그림 4-6] PC접합부 실험체 제작과정	34
[그림 4-7] RC 실험체 제작과정	34
[그림 4-8] PC접합부 구조성능평가 실험체 세팅 상세	35
[그림 4-9] PC접합부 구조성능평가 실험체 세팅 사진	35
[그림 4-10] PC접합부 구조성능평가 실험체 계측 상세	36
[그림 4-11] PC접합부 구조성능평가 실험체 가력계획	37
[그림 4-12] 항복점 및 파괴점 근거산정	38
[그림 4-13] 철근 인장 시험 결과	40
[그림 4-14] 스플라이스 슬리브 시편 인장 시험 결과	41

[그림 4-15] HNN 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	43
[그림 4-16] HFN 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	44
[그림 4-17] HFE 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	46
[그림 4-18] HPN1 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	47
[그림 4-19] HPN2 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	49
[그림 4-20] HPN3 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	51
[그림 4-21] HPN4 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	52
[그림 4-22] HPN5 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	54
[그림 4-23] LNN 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	55
[그림 4-24] LPN1 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	57
[그림 4-25] LPN2 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	58
[그림 4-26] LPN3 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	60
[그림 4-27] LPN4 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	61
[그림 4-28] LPN5 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	63
[그림 4-29] UFN 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	64
[그림 4-30] RC 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상	66
[그림 4-31] 실험체 게이지 부착위치	67
[그림 4-32] H 실험체 변형률 계측 결과(계속)	68
[그림 4-32] H 실험체 변형률 계측 결과(계속)	69
[그림 4-32] H 실험체 변형률 계측 결과(계속)	70
[그림 4-32] H 실험체 변형률 계측 결과(계속)	71
[그림 4-33] L 실험체 변형률 계측 결과(계속)	72
[그림 4-33] L 실험체 변형률 계측 결과(계속)	73
[그림 4-33] L 실험체 변형률 계측 결과(계속)	74
[그림 4-34] UFN 실험체 및 RC 실험체 변형률 계측 결과(계속)	75
[그림 4-35] H 실험체 각 가력방향 별 최대강도	76
[그림 4-36] L 실험체 최대강도	78
[그림 4-37] U 실험체 최대강도 및 에너지 소산량 비교	78
[그림 5-1] 그라우트 압축강도 확보에 따른 구조거동 비교	87
[그림 5-2] 에폭시 주입에 따른 구조거동 비교	88

제1장 서론

1. 연구 배경

■ 공동주택 건설 생산성 향상 및 품질 고도화 방안 수립 필요

[그림 1-1]과 같이 건설생산성 저하를 극복할 수 있는 대표적인 OSC건설 방식인 PC공법은 현장타설(RC) 공법과 사용 재료 및 구조 형식이 동일하여 공동주택의 고층화·단지화에 유리한 특징이 있으나, 경제성·시공성·품질 확보에 대한 다각적 연구가 필요함

LH는 대규모 공동주택을 공급하는 공공기관으로 건설생산성 향상을 위한 노력을 기울이고 있으며, 특히 2024년 3월 「2030 LH OSC 주택 로드맵」을 발표하고 이를 실행하기 위한 구체적인 방안을 연구하고 있음(PC표준 평면개발, PC접합부 관련 연구, PC공법을 활용한 지하주차장 개발 등)

또한, 김포한강(벽식구조, 2021년 준공), 아산탕정(라멘구조, 2022년 준공), 평택고덕(라멘구조, 2025년 준공) 등 PC공법을 적용한 공동주택을 공급하였음

위와 같은 노력의 결과물을 통하여 PC공법을 LH 공동주택에 널리 적용한다면, 건설 생산성 향상과 동시에 적기에 대규모(고층 및 단지)의 고품질 주택을 공급할 수 있을 것으로 판단됨



Source: REINVENTING CONSTRUCTION: A ROUTE TO HIGHER PRODUCTIVITY, McKinsey Global Institute, 2017

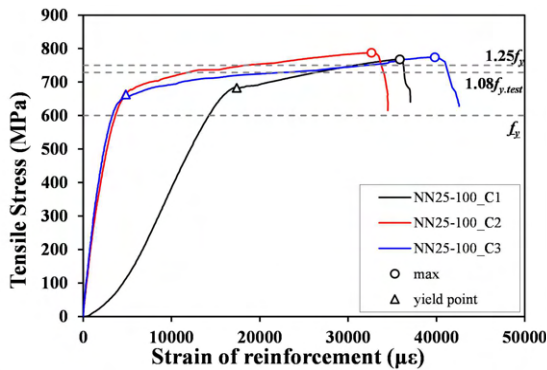
[그림 1-1] 국내외 건설 생산성 지수

■ PC공법 접합부 구조품질관리 필요

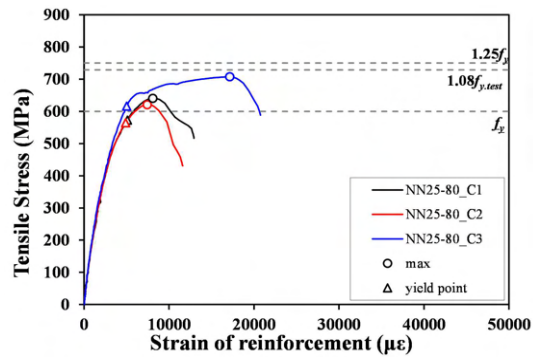
PC공동주택은 공장에서 생산된 PC부재의 반입·조립 절차가 반복되어 건설되므로 필연적으로 PC부재의 접합부가 발생함. 현재 현장에서의 PC접합부는 습식접합(그라우트 충전 슬리브)이나 건식접합(커플러, 나사식 철근 등)을 사용하고 있으나, 시공의 편의성에 의하여 습식접합이 대부분 이루어지고 있음

[그림 1-2]와 같이 2024년 LH에서는 PC접합부 스플라이스 슬리브를 대상으로 인발 시험을 수행하였으며, 그라우트 강도에 기반한 PC접합부 품질관리 지표를 제시하였음. 연구결과에 따르면 스플라이스 슬리브를 이용한 PC접합방식은 그라우트 강도 및 충전율, 현장 시공 정밀도에 따라 품질 저하가 발생 할 수 있는 것으로 나타났음

[그림 1-2]의 연구는 요소실험(스플라이스 슬리브)만 수행된 결과로 실제 부재단위의 실험을 통한 정량적인 구조성능평가가 이루어져야 하며, 이를 통하여 PC접합부 구조 성능 지표와 보수 및 보강 방안을 제시하여야 함



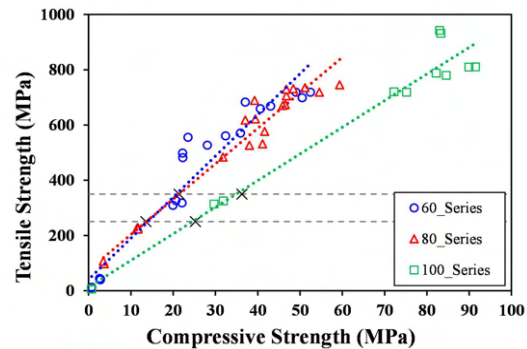
(a)그라우트 충전율 100%



(b)그라우트 충전율 80%



(c)그라우트 현장 시공 정밀도



(d)그라우트 압축강도-인발강도 관계

[그림 1-2] PC습식접합방식의 품질 저하

■ PC접합부 품질확보를 통한 PC공법의 시공성 및 안전성 확보 필요

습식접합을 사용하는 PC부재는 설치 후 그라우트 경화 전까지 가설재(서포트)를 이용하여 임시 고정하고 있으며, 가설재의 고정이나 PC접합부 그라우트 충전 품질이 불량할 경우, PC조립 중 전도발생의 위험이 있음. 설치된 PC부재는 접합부 그라우트 강도에 따라 가설재 존치 기간이 정해지나, 접합부 품질확보가 이루어지지 않을 경우 가설재 존치 기간이 길어져 시공성 확보가 어려움

OSC공법의 이점은 건설 생산성 향상, 즉 시공성 향상에 있으므로 PC접합부 품질 확보를 통하여 가설재 존치 기간을 단축 시킬 수 있다면 공기단축에 효과적일 것으로 판단됨

국토교통부는 25년 1월 국토교통 소 분야의 안전관리 강화를 발표하여 건설현장의 사망 사고를 줄이기 위한 대책을 마련하고 있으며, LH는 대형 건설현장이 많으므로, 본 연구에서 PC접합부 품질 관리 방안을 제시한다면 향후 PC공동주택 건설현장의 시공 중 안전성을 확보할 수 있을 것임

2. 연구의 목적 및 범위

■ 연구 목적

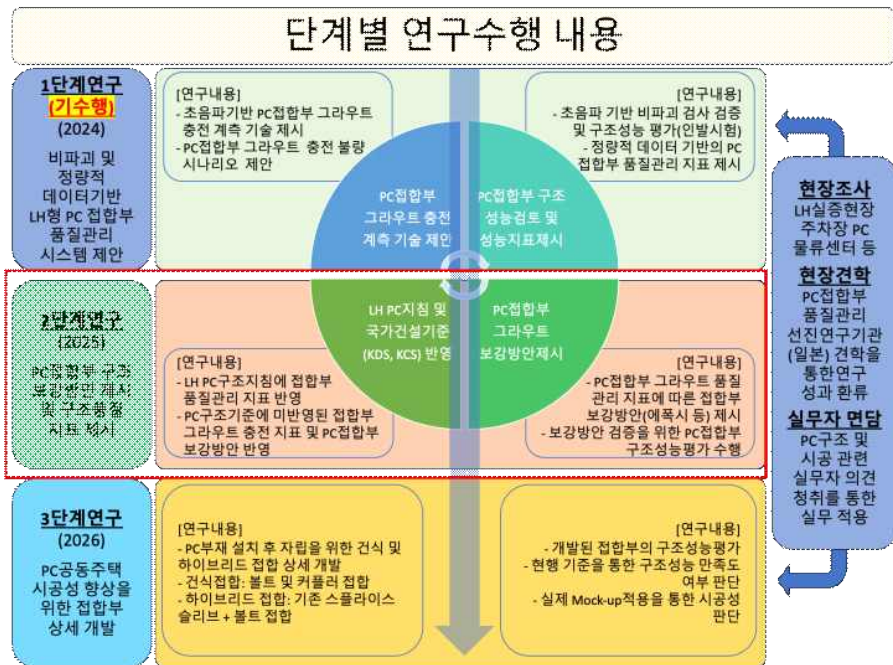
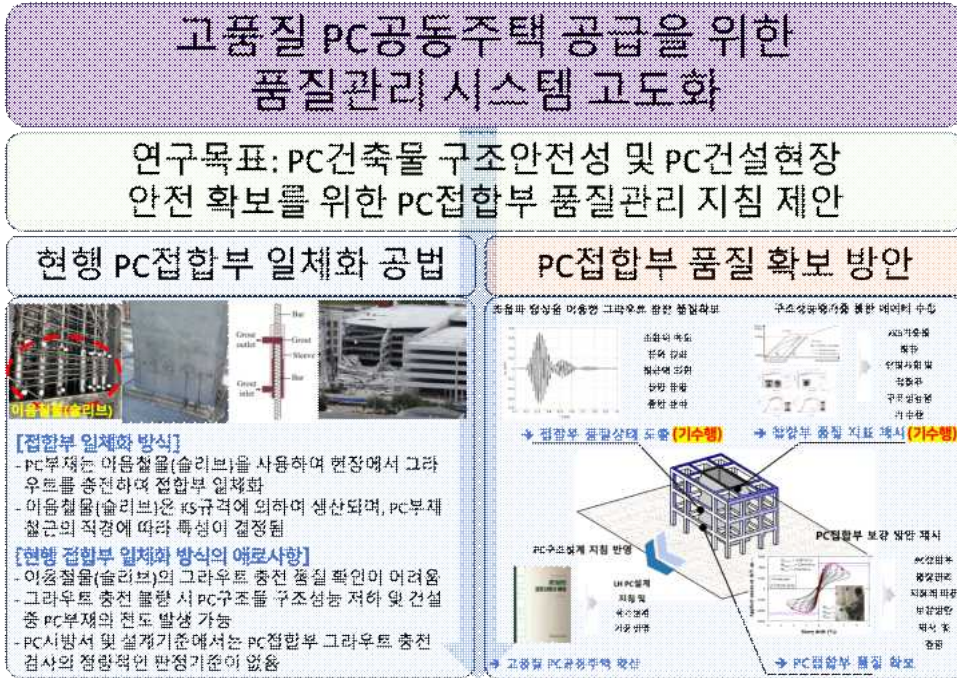
본 연구에서는 PC공동주택 접합부 품질 확보를 위한 구조성능 고도화를 구현하기 위하여 기존연구 결과로 제시한 PC접합부 품질관리 지표를 토대로, PC접합부 축소모형을 제작하여 구조성능 평가를 수행하고 PC접합부 구조적 품질관리 방안 제시를 목적으로 함

■ 연구 범위

본 연구에서는 LH PC공동주택과 PC건축물의 수직 접합부를 대상으로 습식접합 방식인 스플라이스 슬리브로 한정하여 연구를 수행하였음. 또한 PC부재 실험은 PC 중간모멘트골조를 대상으로 수행하였음

3. 연구 내용

■ 최종연구목표 달성을 위한 연구수행 방법



[그림 1-3] 연구수행 로드맵

4. 고품질 PC공동주택 접합부 품질확보를 위한 구조성능 고도화

■ PC접합부 구조 품질관련 국내외 연구 검토

PC접합부 특성 조사

PC접합부 구조 및 보수·보강 관련 선행 연구조사

PC접합부 구조 및 품질관련 기술개발 자료 수집

■ PC접합부 현장조사

PC공동주택 접합부 시공관련 현장조사

PC공동주택 구조설계기관 방문

■ PC접합부 구조 품질 관리 방안 제시

PC접합부 구조 품질 저하 시나리오 제안

PC접합부 시공성 향상(가설재 선 해체)을 위한 최적 그라우트 강도 검토

PC접합부 구조 품질 저하의 보수·보강방안 제시

■ 제안된 PC접합부 구조 품질 관리 방안 검증

PC접합부 구조 품질 저하 시나리오 및 시공성 향상을 위한 변수 연구

PC접합부 그라우트 충전 보수·보강방법에 따른 변수 연구

PC부재 구조성능평가

■ PC접합부 구조 품질관리 지표 수립

PC접합부 구조 품질 저하 시나리오 및 실험결과에 근거한 품질관리 지표 제시

PC접합부 시공성 향상을 위한 최소 그라우트 강도 제시

제2장 선행연구 및 관련기준 분석

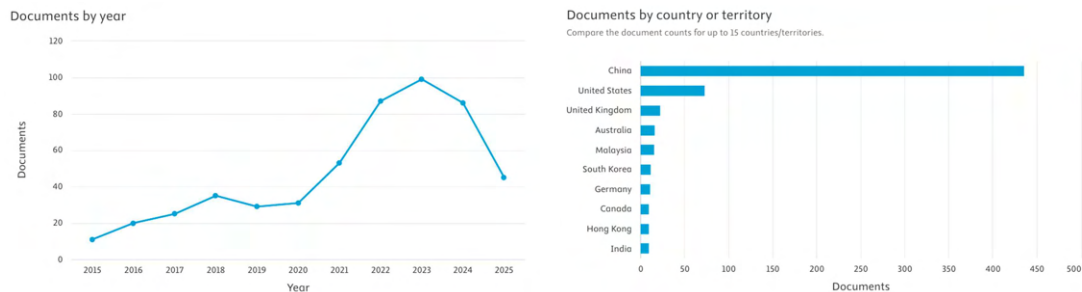
1. 선행연구 고찰

1. 1 습식 PC접합부 관련 연구동향

[그림 2-1]의 연구결과와 같이 전 세계 PC공법에 대한 연구는 주거·물류·데이터센터 수요와 공기 단축 요구를 배경으로 꾸준히 확대되었고, 특히 아시아태평양은 대규모 주택공급과 산업화된 생산체계를 바탕으로 연구를 활발히 진행하였음

그 결과 최근 10년 사이 관련 학술논문은 약 540편에 달할 정도로 급증하여 재료 성능, 정착 거동, 저사이클 반복하중 내진성능, 시공 품질관리 등으로 연구 주제가 다변화되었음. 특히 슬리브 내부의 충전결함·공극·편심 등 결함 시나리오의 허용도 평가와 비파괴검사, 디지털 기반의 주입·양생 관리 체계 등 현장 적용성 강화를 겨냥한 연구가 두드러짐

국가별로는 중국을 중심으로 미국·영국·호주 등이 연구를 선도하고 있는 반면 한국은 발표 편수와 데이터 축적이 상대적으로 부족하여 국제 비교가 가능한 기준과 표준화된 절차 측면에서 아직 미진한 실정으로, 향후 PC공법의 시장 확대에 부합하는 실증 연구와 표준화 노력이 요구됨



[그림 2-1] 최근 10년간 스플라이스 슬리브 관련 논문 수

1. 2 습식 PC접합부 구조실험 분야 선행연구 분석

이 연구에서는 그라우트 슬리브의 충전 결함이 접합부의 구조 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해, 국내·외 선행연구를 체계적으로 검토하였음. 이를 통해 결함 유형(부분 미충전, 공극분리, 편심 등)과 주요 변수(결함율, 슬리브 및 철근 치수, 그라우트 강도, 구속 조건)를 도출·정리하였으며, 강도·강성·연성·에너지 소산 등 주요 성능 지표의 변화량을 비교·분석하여 결함 허용도와 주요 파괴 모드를 규명하는 것을 목표로 하였음. 이러한 분석 결과를 바탕으로, PC접합부 구조품질 확보를 위한 지표를 제시하고자 하였음

■ 국내 선행연구 사례 분석

[표 2-1]은 PC접합부 그라우트 슬리브 충전결함 및 구조성능평가에 대한 국내의 선행연구 사례를 요약하여 나타내었음

[표 2-1] 국내 선행연구 사례 분석 요약

저자	년도	선행연구명	연구 내용 및 시사점	출판저널
서수연 외 3인	2020	수평접합부 수직보강철근 이음상세에 따른 프리캐스트 콘크리트 벽체의 내진성능	<ul style="list-style-type: none"> ○ 반복가력 결과, 모든 실험체가 공칭강도 이상 내력과 약 2%의 변형능력을 확보함 ○ KCI 2017-ACI 318-19 기준으로 설계된 PC 벽체는 충분한 내진성능을 확보할 수 있음을 시사함 ○ 볼트형은 체결 품질에 민감하며, 주름관 겹침 1.5배 설계는 변형-에너지 성능 향상에 유리함을 시사함 	한국콘크리트 학회 논문집, 제32권 제 6호, pp. 541-551
이상섭 외 2인	2020	프리캐스트 콘크리트 전단 벽체 수평 접합부의 이력 거동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 슬리브 접합부는 일체식과 동등한 내력·안정적 이력거동을 확보함 ○ 벽체의 접합은 용접부 파괴로 성능이 제한되고, 슬리브는 횡·전단 영향과 그라우트 품질에 좌우됨 ○ 슬리브 기반 설계로 PC 수평접합부가 일체식 수준 내진성능을 가질 수 있음을 시사함 ○ 성능 확보 위해 디테일·그라우트 충전 품질 관리 및 보수적 휨내력 설계가 필요함을 시사함 	대한건축학회 논문집, 36(7), 155-162.
신덕환 외 2인	2017	중공 PC기둥-Half PC보 외부 접합부의 이력거동에 대한 실험적 연구	<ul style="list-style-type: none"> ○ 중공 PC기둥-Half PC보 접합부는 약 1% 변위 각에서 항복하며 RC와 동등 이상의 내력·변형능력을 확보함 ○ HPC가 가장 높은 최대내력을 보였고, 정·부방향 내력차는 보 지점의 부분 미끄러짐에서 기인함. ○ PC 외부 접합부가 RC와 동등 이상의 이력거동을 가질 수 있음을 시사함 ○ 지점 미끄러짐 제어 및 보 주근 정착 위치 선정 등 접합부 디테일 최적화가 필요함을 시사함 	한국콘크리트 학회 논문집, 제29권 제 5호, pp. 515-524

김형기	2013	고강도 그라우트를 충전한 기계식 철근이음의 강도	<ul style="list-style-type: none"> ○ ACI/AIJ 요구강도 만족을 위한 최소조건을 $fg \times (L/d)$ 지표로 제시함. ○ 고강도 그라우트 충전형 이음은 충분한 정착길이·슬리브 구속 확보 시 국제 기준을 충족할 수 있음을 시사함 ○ 설계·품질관리는 fg와 L/d 기반 임계값 적용 및 슬리브 형상·제작결함 관리가 핵심임을 시사함 	대한건축학회 연합논문집, 15(5), 215-223.
오영훈 외 1인	2013	SD500 철근용 충전식 슬리브 철근이음에 대한 해석 및 실험적 연구	<ul style="list-style-type: none"> ○ SD500(HD25/32) 슬리브 18체 인장시험·해석 결과 전체가 ACI 125% 요건을 초과(평균 1.34배), 다수가 AIJ SA 등급 확보. ○ 그라우트 75/95 MPa·정착길이(7.0d/6.5d vs 6.5d/6.0d)는 강도 영향이 작고, 짧은 정착은 연산을 저하(A등급 경향)·변형은 주로 철근에서 발생 ○ 따라서 SD500용 충전식 슬리브는 적절한 형상·정착 확보 시 국제 기준을 안정적으로 충족하며, 설계·품질관리는 강도보다는 연성 확보 중심이 바람직함을 시사함 	한국콘크리트 학회 논문집, 제25권 제 2호, pp. 165-173
천성철 외 2인	2012	굽힌 후 편 철근의 겹침이음 및 기계적 이음을 갖는 벽·슬래브 접합부의 반복하중에 대한 거동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 굽힌 후 편 철근 겹침이음 대비 기계적 이음 접합부는 공칭휨강도 초과·안정적 이력거동을 보였고, 겹침이음은 강도·변형능력 저하와 피복 박리·부착균열이 조기 발생함. ○ 기계적 이음 및 무이음체는 큰 변위까지 에너지 소산과 강도 유지가 우수했으나, 굽힘·펴기 철근 겹침이음은 강성 저하가 빠르고 지름·강종이 커질수록 강도 저하가 확대됨. ○ 따라서 코어벽·슬래브 지면 접합 등에서는 기계적 이음 채택과 굽힌 후 편 철근 겹침이음의 제한 및 관련 시공·설계기준 보완이 필요함을 시사함. 	한국콘크리트 학회 논문집, 제24권 제 3호, pp. 275-283

■ 국외 선행연구 사례 분석

[표 2-2]는 PC접합부 그라우트 슬리브 충전결함 및 구조성능평가에 대한 국외의 선행연구 사례를 요약하여 나타내었음

[표 2-2] 국외 선행연구 사례 분석 요약

저자	년도	선행연구명	연구 내용 및 시사점	출판저널
Shun Xiao 외 5인	2021	Study of effects of sleeve grouting defects on the seismic performance of precast concrete shear walls	<ul style="list-style-type: none"> ○ 무결함 슬리브 PC 전단벽은 내력-에너지소산은 일체식과 동등하고 강성-연성은 소폭 낮게 나타남 ○ 슬리브 그라우트 결함은 인장축에서 성능 저하를 유발하며 Me 유지율이 ≥ 0.92이면 영향이 작고 ≤ 0.85이면 저하가 뚜렷하게 나타남 ○ 설계-평가에서 결함을 인장철근 유효강도 저감으로 반영하고 경계요소 연속성-그라우트 품질 관리를 강화할 필요를 시사함 	Engineering Structures 236 (2021): 111833.
Hongtao Liu 외 3인	2020	Seismic performance of precast column connected with grouted sleeve connectors	<ul style="list-style-type: none"> ○ 축력비 0.2/0.5/0.85에서 슬리브 접합 PC 기둥은 CIP와 동등한 내력-변형능력을 보였고, 소성힌지는 슬리브 상단으로 이동하며 전단 변형은 중-상단층에 집중되는 결과가 나타남. ○ 슬리브 단면 휨강도는 일반단면보다 크고 실험값이 계산값을 상회했으며, 축력비가 커질수록 연성이 저하됨 ○ 설계 시 슬리브 압축기여와 소성힌지 모델을 반영하고, 축력비 증가에 따른 연성 저하-전단변형 분포를 고려한 디테일링이 필요함을 시사함 	Journal of Building Engineering 31 (2020): 101410.
Wei Zhang 외 1인	2024	Effect of Mechanical Splice to Seismic Performance of Precast Column-Foundation Connection	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비선형 FE-매크로 모델을 통해 기계식 이음의 국부 강성으로 소성힌지 길이가 단축되고 거동을 정확히 재현하는 결과가 나타남. ○ 잔류 슬립(RS)이 클수록 강성-에너지소산이 감소하고 핀칭이 심화되며, $RS \leq 0.3\text{mm}$는 모사성, $0.3 \sim 2.4\text{mm}$는 준모사성, $\geq 2.4\text{mm}$는 비모사성으로 구분됨. ○ 설계 시 커플러 강성과 RS를 반영하고, 이음을 Lp 밖에 배치하거나 RS를 0.3mm 이하로 관리할 필요가 있음을 시사함. 	ACI Structural Journal 121. 5 (2024).
Jun Yang 외 3인	2022	Experimental investigation on seismic behaviors of precast concrete shear walls with sleeve grouting defects	<ul style="list-style-type: none"> ○ 슬리브 충전 결함 수준을 변수로 한 4체 실험에서, 결함이 커질수록 벽체 하단 개구 폭이 커지고 파괴모드가 철근 인장파괴에서 부착 파괴로 전환되며, 항복-최대-극한 내력이 저하되는 결과가 나타남. ○ 결함이 균열하중에는 큰 영향을 주지 않았지만, 강성저하-연성-에너지 소산 성능을 유의하게 악화시키는 결과가 나타남. ○ 설계-평가 시 슬리브 결함을 고려한 내력 저감 반영과 함께, 그라우트 충전 품질관리 및 경계요소 연속성 확보가 핵심임을 시사함. 	Advances in Structural Engineering 26.2 (2023): 258-271.

Kahama Espoir 외 2인	2022	Experimental and numerical assessment of the location-based impact of grouting defects on the tensile performance of the fully grouted sleeve connection	<ul style="list-style-type: none"> ○ 22체 인장시험·해석에서 결함 위치·크기에 따라 성능 차이가 크며, 3d 결함은 위치에 따라 용량이 0~20% 저하되고 파괴모드가 인장파단→인발로 바뀌는 결과가 나타남 ○ 구속비(ds/d) 영향이 커서, 중간부 3d 결함 시 ds/d=2.66에서 3.55 증가에 따라 용량 저하가 19%에서 44%로 확대됨 ○ 설계·점검은 결함 위치와 구속을 반영해 위험도를 평가하고, 작은 ds/d 유사·대칭 결함 방지·NDT 진단 및 보수 관리가 필요함을 시사함 	Fracture and Structural Integrity 16. 61 (2022): 437-460.
Qisheng Long 외 4인	2025	Research Status and Prospects of Grouted Sleeve Connections in Prefabricated Structures	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국제·국내 기준 비교와 슬리브 유형·그라우팅 공법·성능시험·영향요인·하중전달 메커니즘을 최신 동향으로 체계 정리한 결과가 나타남. ○ 성능이 정착깊이·철근 지름/강도·그라우트 강도·슬리브강성(OD/WT·내벽형상)·온도·결함/누출·편심 등 요인과 그라우팅 방식에 좌우됨 ○ 국제 통일 성능기준과 fg-L/d 등 성능지표 도입, 고품질 그라우팅·NDT 기반 결함관리, 장기·내화·피로까지 포괄하는 시험체계 구축이 필요함을 시사함 	Buildings (2075-5309) 15.10 (2025).
Giovanni Metelli 외 2인	2011	Cyclic behaviour of a column to foundation joint for concrete precast structures	<ul style="list-style-type: none"> ○ 부분 비부착 나사철근·슬리브 기둥·기초 접합부는 6% 변위각까지 안정적 이력거동을 보이며 PF와 유사한 내력·에너지소산을 나타냄 ○ 약 1.2%에서 항복 후 2.5% 부근에서 최대 모멘트에 도달하고, 6%에서도 내력의 80% 이상을 유지해 재센터링과 균열 제어에 유리하게 나타남 ○ 따라서 GS 접합부는 CIP/포켓기초 대안이 될 수 있으며, 설계 시 회전 기여와 핀칭 저감을 고려한 디테일링이 필요함을 시사함 	European Journal of Environmental and Civil Engineering 15.9 (2011): 1297-1318.
Song Lei 외 5인	2023	Seismic performance of short precast columns with UHPC grouted sleeve connections: An experimental and numerical study	<ul style="list-style-type: none"> ○ 하단 슬리브(PCGS1)는 소성힌지 상향으로 전단파괴·용량/변형 저하, 상단 슬리브(PCGS2)는 CIP와 유사한 거동을 보이는 것으로 나타남 ○ 임계 높이 $h_{crit} \approx 565\text{mm}$ ($h \geq 600\text{mm}$ 시 위치 영향 미미), 축력비·철근강도 증가는 내력↑/연성↓으로 나타남 ○ 슬리브를 소성힌지 밖($\geq h_{crit}$)에 배치하고 축력비 관리·부착/슬립 반영으로 연성 확보가 필요함을 시사함 	Structures. Vol. 55. Elsevier, 2023.

2. 선행연구 분석 소결

2.1 PC접합부 구조성능평가에 대한 고찰

선행연구를 조사한 결과, 대부분의 기존 연구는 철근과 그라우트의 단순결합, 즉 스플라이스 슬리브의 단품시험 실험에 집중한 것으로 나타났다. 해당 연구들은 스플라이스 슬리브 내부 그라우트 충전 결함의 형태, 정착길이, 그라우트 강도 등 다양한 변수가 PC접합부의 강도 및 파괴모드의 전환을 어떻게 유발하는지 정량화하여 분석하였음

특히, 정착 중간부의 국부 충전결함은 가장 취약함을 확인하였으나, 이러한 연구결과는 부재단위에서 이루어지지 않아 PC부재 전체의 연성적인 거동에 어떠한 영향을 유발하는지에 대한 분석은 상대적으로 부족하였음

PC부재 단위 실험에 대한 연구에서는 스플라이스 슬리브의 결함 증가에 따른 부착 파괴, 강도저하, 강성 및 에너지소산 악화를 보여주고 있지만 표본과 결함 시나리오 수가 충분하지 않았음. 이에 따라, PC접합부의 충전결함을 PC부재 단위로 확대하여 연구를 수행하는 것은 PC부재 품질확보를 위하여 필요하다고 판단하였음

2.2 선행 연구와의 차별성

기존의 PC접합부 품질관리에 대한 선행연구는 스플라이스 슬리브의 단순 인발시험에 의존하여 그라우트의 충전결함에 대한 영향과 파괴모드 전환을 규명했으나, 이 연구의 주요 목적인 PC접합부 충전 불량 시나리오를 채택한 PC부재 단위의 구조적 검증은 이루어지지 않았음

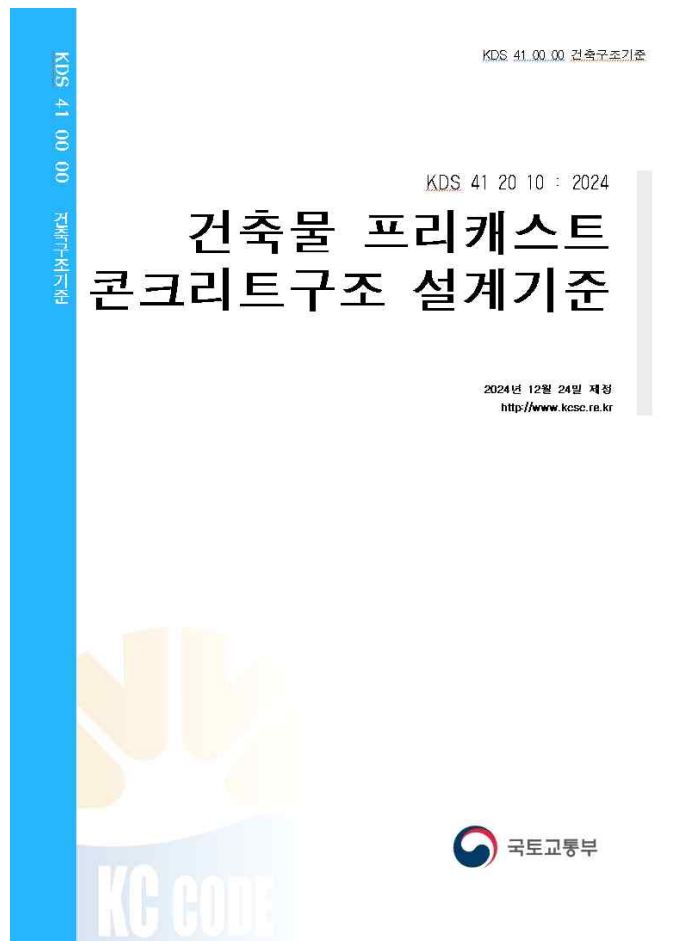
PC접합부(기동-기초, 기동-기동)의 충전결함에 대한 거동과, 스플라이스 슬리브 충전 결함의 보강을 통한 구조성능을 평가하는 것으로부터 이 연구의 차별성이 있다고 보여지며, 특히 시공성 확보를 위한 그라우트 강도 지표를 수립하기 위하여 기존 현장에서 사용되는 그라우트 강도 이외에 저강도 그라우트(20MPa)를 적용한 구조성능평가를 함께 진행한 것으로부터 기존 연구와 큰 차별성을 가짐

3. 현행 건축물 PC구조설계 기준

3.1 개요

[그림 2-2]와 같이 2024년에 제정된 건축물 프리캐스트 콘크리트 구조 설계기준 (KDS 41 20 10, 이하 PC구조설계 기준)은 PC공동주택을 건설하기 위한 구조관련 내용을 수록하고 있음

PC구조설계 기준에서는 PC구조 건축물의 공장 제작부터 현장시공 및 완공단계에 이르는 모든 과정에서 안정성 확보와 극한상태에서 안전성, 사용성 및 내구성을 확보하는 것을 목적으로, PC접합부의 접합방식, 습식 접합부에 사용되는 그라우트의 강도 및 물성에 대한 내용과 PC건축물의 내진설계 등을 다루고 있음



[그림 2-2] PC구조설계 기준

3.2 PC건축물의 내진설계

PC건축물의 내진설계는 현장타설(RC)건축물과 유사하게 [표 2-3]과 같은 지진력 저항시스템에 근거하여 수행됨. PC건축물의 지진력저항시스템은 구조형식에 따라 구조벽체와 모멘트골조(보-기둥) 시스템으로 나뉘며, 내진설계범주에 따라 건축물 높이 제한이 있음. 특히 PC건축물의 내진설계는 “동등성 평가”를 기준으로 수행하고 있으며, “동등성평가”는 PC부재의 강성, 강도, 에너지 소산의 역학적 특성이 RC부재의 성능과 동등 이상이 되기 위하여 PC접합부의 적절한 위치 선정과 RC부재 대비 동등 이상의 구조 성능을 확보하는 것임

[표 2-3] 지진력저항시스템에 대한 설계계수

기본 지진력저항시스템	설계계수			시스템의 제한과 높이(m) 제한		
	반응수정 계수	시스템 초과강도 계수	변위증폭 계수	내진설계 범주 A 또는 B	내진설계 범주 C	내진설계 범주 D
1. 내력벽시스템						
프리캐스트 콘크리트 특수구조벽체	5	2.5	5	-	-	-
프리캐스트 콘크리트 중간구조벽체	4	2.5	4	-	-	48
2. 건물골조시스템						
프리캐스트 콘크리트 특수구조벽체	6	2.5	5	-	-	-
프리캐스트 콘크리트 중간구조벽체	5	2.5	4.5	-	-	48
3. 모멘트 - 저항골조 시스템						
프리캐스트 콘크리트 특수모멘트 구조물	8	3	5.5	-	-	-
프리캐스트 콘크리트 중간모멘트 구조물	5	3	4.5	-	-	-
프리캐스트 콘크리트 보통모멘트 구조물	3	3	2.5	-	-	불가
4. 특수모멘트골조를 가진 이중골조시스템						
프리캐스트 콘크리트 특수구조벽체	7	2.5	5.5	-	-	-
프리캐스트 콘크리트 중간구조벽체	6	2.5	5	-	-	-
5. 중간모멘트골조를 가진 이중골조시스템						
프리캐스트 콘크리트 특수구조벽체	6.5	2.5	5	-	-	-
프리캐스트 콘크리트 중간구조벽체	5.5	2.5	4.5	-	-	48

3.3 동등성 평가

현행 PC건축물 구조설계 기준에 따르면 “동등성 평가”는 중간구조벽체 또는 중간모멘트골조, 특수구조벽체 또는 특수모멘트골조에 따라 평가 방법이 다르며, 그 평가 방법은 아래와 같음

■ 건축물 프리캐스트 콘크리트구조 설계기준 (KDS 41 20 10)

4.6.2 동등성 평가

(1) 프리캐스트 콘크리트 부재는 다음의 기본 동등성을 만족하여야 한다.

① 프리캐스트 콘크리트 부재의 강성, 강도, 에너지 소산의 역학적 특성이 현장타설 콘크리트 부재의 성능과 동등 이상이 되기 위하여 프리캐스트 콘크리트 접합부의 적절한 위치 선정과 현장타설 콘크리트 부재 대비 동등 이상의 구조 성능을 확보하여야 한다.

② 프리캐스트 콘크리트 부재는 현장타설 콘크리트 부재의 성능 대비 동등 이상의 균열폭, 처짐, 진동에 대한 사용성을 확보하여야 한다.

③ 프리캐스트 콘크리트 부재의 접합면에서는 과도한 잔류변형이 발생해서는 안 된다.

(2) 구조실험에 의해 동등성을 평가하고자 하는 경우 다음 조건을 따라야 한다.

① 프리캐스트 콘크리트 모멘트골조는 보와 기둥이 교차하는 부위를 대표할 수 있는 형상별로 최소 하나 이상의 모듈을 실험하여야 한다. 실험체에는 프리캐스트 부재와 부재를 연결하는 연결부가 포함되어야 한다. 구조벽체의 경우에도 부재와 부재의 접합부를 대표할 수 있는 형상별로 최소 하나 이상의 모듈을 실험하여야 한다.

② 실험체는 실제 구조물의 거동을 반영할 수 있을 만큼의 크기로 하여야 하며, 1/3 미만으로 축소해서는 안 된다.

③ 하중은 변위제어방식으로 동일 변위에서 2회 이상 반복하중을 가력하여야 한다. 이 때 초기 변위비는 선형탄성 응답 범위 내에 있어야 하며, 이어지는 변위비는 이전 변위비의 1.25배 이상이며 1.5배 이하가 되어야 한다.

④ 실험체의 강도 평가는 실험에 사용된 재료의 실제 강도를 사용하여 계산해야 한다.

⑤ 실험은 다음의 한계변위비를 초과할 때까지 실시한다.

- 중간모멘트골조: 2.0 퍼센트

- 특수모멘트골조: 3.5 퍼센트

- 중간구조벽체:

$$0.5 \leq \frac{h_w}{l_w} \leq 1.0 \text{인 벽체}$$

$$0.9\% \leq 0.8 \left(\frac{h_w}{l_w} \right) + 0.5 \leq 1.3\% \quad (4.6.2.1)$$

$$1.0 < \frac{h_w}{l_w} \text{인 벽체}$$

$$1.3\% < 0.1 \left(\frac{h_w}{l_w} \right) + 1.2 \leq 1.5\% \quad (4.6.2.2)$$

- 특수구조벽체:

$$0.5 \leq \frac{h_w}{l_w} \text{인 벽체}$$

$$0.9\% \leq 0.8 \left(\frac{h_w}{l_w} \right) + 0.5 \leq 3.0\% \quad (4.6.2.3)$$

- (3) 중간모멘트골조와 특수모멘트골조는 다음 성능조건을 만족하여야 한다.
- ① 프리캐스트 콘크리트 실험체의 최대 횡강도 E_{\max} 는 $1.0E_{nt}$ 이상이어야 한다.
 - ② (2) ⑤의 한계변위비의 2번째 반복하중을 받을 때의 프리캐스트 콘크리트 실험체의 도달 하중은 같은 가력 방향 최대 하중의 80 퍼센트 이상이 되어야 한다.
 - ③ 프리캐스트 콘크리트 실험체는 (2) ⑤의 한계변위비의 2번째 반복하중을 받을 때의 강성(하중-변위비 응답곡선에서 $0.75E_{nt}$ 일때의 값과 원점을 연결한 기울기)이 현장타설 콘크리트 실험체 강성의 90 퍼센트 이상이어야 한다. 또는, 프리캐스트 콘크리트 실험체는 (2) ⑤ 한계변위비의 2번째 반복하중을 받는 이력 곡선에서 중간모멘트 골조의 경우에는 한계변위비의 $-1/7$ 과 $+1/7$ 에서의 강성, 특수모멘트골조의 경우에는 한계변위비의 $-1/10$ 과 $+1/10$ 에서의 강성이 초기 변위비 강성의 0.05배 이상이어야 한다.
 - ④ 프리캐스트 콘크리트 실험체는 (2) ⑤의 한계변위비의 2번째 반복하중을 받을 때의 에너지소산이 현장타설 콘크리트 실험체의 에너지 소산의 90 퍼센트 이상이어야 한다. 또는, 프리캐스트 콘크리트 실험체는 (2) ⑤ 한계변위비의 2번째 반복하중을 받을 때의 이력 곡선의 상대에너지소산률(β)이 $1/8$ 이상이어야 한다.

3.4 중간모멘트골조 기준

이 연구에서 수행된 PC부재의 구조성능평가는 중간모멘트골조를 대상으로 수행되었으며, 현행 구조기준인 콘크리트 내진설계기준(KDS 14 20 80), 콘크리트구조 정착 및 이음 설계기준 (KDS 14 20 52)에서는 중간모멘트골조의 설계법을 아래와 같이 규정하고 있음

■ 콘크리트 내진설계기준(KDS 14 20 80)

4.3 중간모멘트골조 요구사항

4.3.5 기둥

- (1) 기둥은 KDS 14 20 50(4.4.2)에 따라 나선철근을 배치하거나, 다음 (2), (3) 및 (4)의 규정을 따라야 한다. (5)는 모든 기둥에 적용하여야 한다.
- (2) 부재의 양단부에는 후프철근을 접합면부터 길이 l_0 구간에 걸쳐서 s_0 이내의 간격으로 배치하여야 한다. 간격 s_0 는 후프철근이 감싸게 될 종방향 철근의 최소 지름의 8배, 띠철근 지름의 24배, 골조 부재 단면의 최소 치수의 1/2, 300mm 중에서 가장 작은 값 이하이어야 한다. 그리고 길이 l_0 는 부재의 순경간의 1/6, 부재 단면의 최대 치수, 450mm 중 가장 큰 값 이상이어야 한다.
- (3) 첫 번째 후프철근은 접합면부터 거리 $s_0/2$ 이내에 있어야 한다.
- (4) 길이 l_0 이외의 구간에서 횡보강철근의 간격은 KDS 14 20 50(4.4.2)와 KDS 14 20 22(4.3.2(1))을 따라야 한다.
- (5)접합부 횡보강철근은 KDS 14 20 22(4.10(2))에 따라야 한다.

■ 콘크리트구조 정착 및 이음 설계기준 (KDS 14 20 52)

4.1 철근의 정착

4.1.2 인장 이형철근 및 이형철선의 정착

- (1) 인장 이형철근 및 이형철선의 정착길이 l_d 는 다음 (2)와 같이 기본정착길이에 보정계수를 고려하는 방법 또는 다음 (3)에 의한 방법 중에서 어느 하나를 선택하여 적용할 수 있다. 다만, 이렇게 구한 정착길이 l_d 는 항상 300mm 이상이어야 한다.
- (2) 인장 이형철근 및 이형철선의 기본정착길이 l_{db} 는 다음 식 (4.1-1)에 의해 구하여야 한다. 그리고 배근 위치, 철근표면 도막 혹은 도금 여부 및 콘크리트의 종류에 따른 보정계수는 표 4.1-1에 의해 구하여야 한다.

$$l_{db} = \frac{0.6d_b f_y}{\lambda \sqrt{f_{ck}}} \quad (4.1-1)$$

표 4.1-1 보정계수

조건	철근지름	D19 이하의 철근과 이형철선	D22 이상의 철근
	정착되거나 이어지는 철근의 순간격이 d_b 이상이고, 피복 두께도 d_b 이상이면서 l_d 전 구간에 이 기준에서 규정된 최소 철근량 이상의 스테럽 또는 띠철근을 배치한 경우 또는 정착되거나 이어지는 철근의 순간격이 $2d_b$ 이상이고 피복 두께가 d_b 이상인 경우		$0.8\alpha\beta$
기타		$1.2\alpha\beta$	$1.5\alpha\beta$

그리고 표 4.1-1에 수록된 α , β 는 다음과 같이 구할 수 있다.

① α = 철근배치 위치계수

- 가. 상부철근(정착길이 또는 겹침이음부 아래 300mm를 초과되게 굳지 않은 콘크리트를 친 수평철근) 1.3
- 나. 기타 철근 1.0

② β = 도막계수

- 가. 피복 두께가 $3d_b$ 미만 또는 순간격이 $6d_b$ 미만인 에폭시 도막 혹은 아연-에폭시 이중 도막 철근 또는 철선 1.5
- 나. 기타 에폭시 도막 혹은 아연-에폭시 이중 도막 철근 또는 철선 1.2
- 다. 아연도금 혹은 도막되지 않은 철근 또는 철선 1.0

③ 에폭시 도막철근이 상부철근인 경우에 상부철근의 위치계수 α 와 도막계수 β 의 곱, $\alpha\beta$ 가 1.7보다 클 필요는 없다.

④ λ 는 KDS 14 20 10(4.4)에 따른다.

(3) 인장 이형철근 및 이형철선의 정착길이 l_d 는 다음 식 (4.1-2)에 따라 구할 수 있다.

$$l_d = \frac{0.90d_b f_y}{\lambda \sqrt{f_{ck}}} \left(\frac{\alpha\beta\gamma}{\frac{c + K_{tr}}{d_b}} \right) \quad (4.1-2)$$

식 (4.1-2)에서 $(c + K_{tr})/d_b$ 은 2.5 이하이어야 한다. 그리고 식 (4.1-2)의 계수 γ , c 와 K_{tr} 은 다음과 같다.

- ① γ = 철근 또는 철선의 크기계수
 - 가. D19 이하의 철근과 이형철선 0.8
 - 나. D22 이상의 철근 1.0
- ② c = 철근 간격 또는 피복 두께에 관련된 치수

철근 또는 철선의 중심부터 콘크리트 표면까지 최단거리 또는 정착되는 철근 또는 철선의 중심간 거리의 1/2 중 작은 값을 사용하여 mm 단위로 나타낸다.

③ K_{tr} = 횡방향 철근지수 = $\frac{40A_{tr}}{sn}$

횡방향 철근이 배치되어 있더라도 설계를 간편하게 하기 위해 $K_{tr} = 0$ 으로 사용할 수 있다.

(4) 힘부재에 배치된 철근량이 해석에 의해 요구되는 소요철근량을 초과하는 경우는

계산된 정착길이에 $\left(\frac{\text{소요 } A_s}{\text{배근 } A_s}\right)$ 를 곱하여 정착길이 l_d 를 감소시킬 수 있다. 다만,

이때 감소시킨 정착길이 l_d 는 300 mm 이상이어야 한다. 또한 f_y 를 발휘하도록 정착을 특별히 요구하는 경우에는 이를 적용하지 않는다.

(5) 설계기준항복강도가 550 MPa을 초과하는 철근에 대해서는 다음을 만족하여야 한다.

- ① 횡방향 철근을 배치하지 않는 경우에는 c/d_b 이 2.5 이상이어야 한다.
- ② 횡방향 철근을 배치하는 경우에는 $K_{tr}/d_b \geq 0.25$ 와 $(c + K_{tr})/d_b \geq 2.25$ 을 만족하여야 한다.

4.1.5 표준갈고리를 갖는 인장 이형철근의 정착

(1) 단부에 표준갈고리가 있는 인장 이형철근의 정착길이 l_{dh} 는 다음 (2)의 기본정착 길이 l_{hb} 에 다음 (3)의 적용 가능한 모든 보정계수를 곱하여 구하여야 한다. 다만, 이렇게 구한 정착길이 l_{dh} 는 항상 $8d_b$ 이상, 또한 150 mm 이상이어야 한다.

(2) 기본정착길이 l_{hb} 는 다음 식 (4.1-4)에 의해 구할 수 있다. β 는 에폭시 도막 혹은 아연-에폭시 이중 도막 철근의 경우 1.2, 아연도금 또는 도막되지 않은 철근의 경우 1.0이며, λ 는 KDS 14 20 10(4.4)에 따라 구한다.

$$l_{hb} = \frac{0.24\beta d_b f_y}{\lambda \sqrt{f_{ck}}} \quad (4.1-4)$$

(3) 표준갈고리를 갖는 인장 이형철근의 기본정착길이 l_{hb} 에 대한 보정계수는 다음과 같다.

① D35 이하 철근에서 갈고리 평면에 수직방향인 측면 피복 두께가 70 mm 이상이며, 90° 갈고리에 대해서는 갈고리를 넘어선 부분의 철근 피복 두께가 50 mm 이상인 경우 0.7

② D35 이하 90° 갈고리 철근에서 정착길이 l_{dh} 구간을 $3d_b$ 이하 간격으로 띠철근 또는 스테럽이 정착되는 철근을 수직으로 둘러싼 경우 또는 갈고리 끝 연장부와 구부림부의 전 구간을 $3d_b$ 이하 간격으로 띠철근 또는 스테럽이 정착되는 철근을 평행하게 둘러싼 경우 0.8

③ D35 이하 180° 갈고리 철근에서 정착길이 l_{dh} 구간을 $3d_b$ 이하 간격으로 띠철근 또는 스테럽이 정착되는 철근을 수직으로 둘러싼 경우 0.8

④ 전체 f_y 를 발휘하도록 정착을 특별히 요구하지 않는 단면에서 휨철근이 소요철근량 이상 배치된 경우 $\left(\frac{\text{소요 } A_s}{\text{배치 } A_s} \right)$

다만, 상기 ②와 ③에서 첫 번째 띠철근 또는 스테럽은 갈고리의 구부러진 부분 바깥면부터 $2d_b$ 이내에서 갈고리의 구부러진 부분을 둘러싸야 한다.

(4) 갈고리는 압축을 받는 경우 철근정착에 유효하지 않은 것으로 보아야 한다.

(5) 부재의 불연속단에서 갈고리 철근의 양 측면과 상부 또는 하부의 피복 두께가 70 mm 미만으로 표준갈고리에 의해 정착되는 경우에 전 정착길이 l_{dh} 구간을 $3d_b$ 이하 간격으로 띠철근이나 스테럽으로 갈고리 철근을 둘러싸야 한다. 이때 첫 번째 띠철근 또는 스테럽은 갈고리의 구부러진 부분 바깥 면부터 $2d_b$ 이내에서 갈고리의 구부러진 부분을 둘러싸야 한다. 이때 상기 (3)의 ②와 ③의 보정계수 0.8을 적용할 수 없다.

(6) 설계기준항복강도가 550 MPa을 초과하는 철근을 사용하는 경우에는 상기 (3)의 ②와 ③의 보정계수 0.8을 적용할 수 없다.

4.1.1 표준갈고리

- (1) 주철근의 표준갈고리는 다음과 같이 180° 표준갈고리와 90° 표준갈고리로 분류되며, 각 표준갈고리는 다음 규정을 만족하여야 한다.
 - ① 180° 표준갈고리는 구부린 반원 끝에서 $4d_b$ 이상, 또한 60mm 이상 더 연장되어야 한다.
 - ② 90° 표준갈고리는 구부린 끝에서 $12d_b$ 이상 더 연장되어야 한다.
- (2) 스테럽과 띠철근의 표준갈고리는 90° 표준갈고리와 135° 표준갈고리로 분류되며, 다음과 같이 제작하여야 한다.
 - ① 90° 표준갈고리
 - 가. D16 이하의 철근은 구부린 끝에서 $6d_b$ 이상 더 연장하여야 한다.
 - 나. D19, D22 및 D25 철근은 구부린 끝에서 $12d_b$ 이상 더 연장하여야 한다.
 - ② 135° 표준갈고리
 - D25 이하의 철근은 구부린 끝에서 $6d_b$ 이상 더 연장하여야 한다.

4.1.2 구부림의 최소 내면 반지름

- (1) 주철근의 180° 표준갈고리와 90° 표준갈고리의 구부림 최소 내면 반지름은 표 4.1-1의 값 이상으로 하여야 한다.

표 4.1-1 구부림의 최소 내면 반지름

철근 크기	최소 내면 반지름
D10 ~ D25	$3d_b$
D29 ~ D35	$4d_b$
D38 이상	$5d_b$

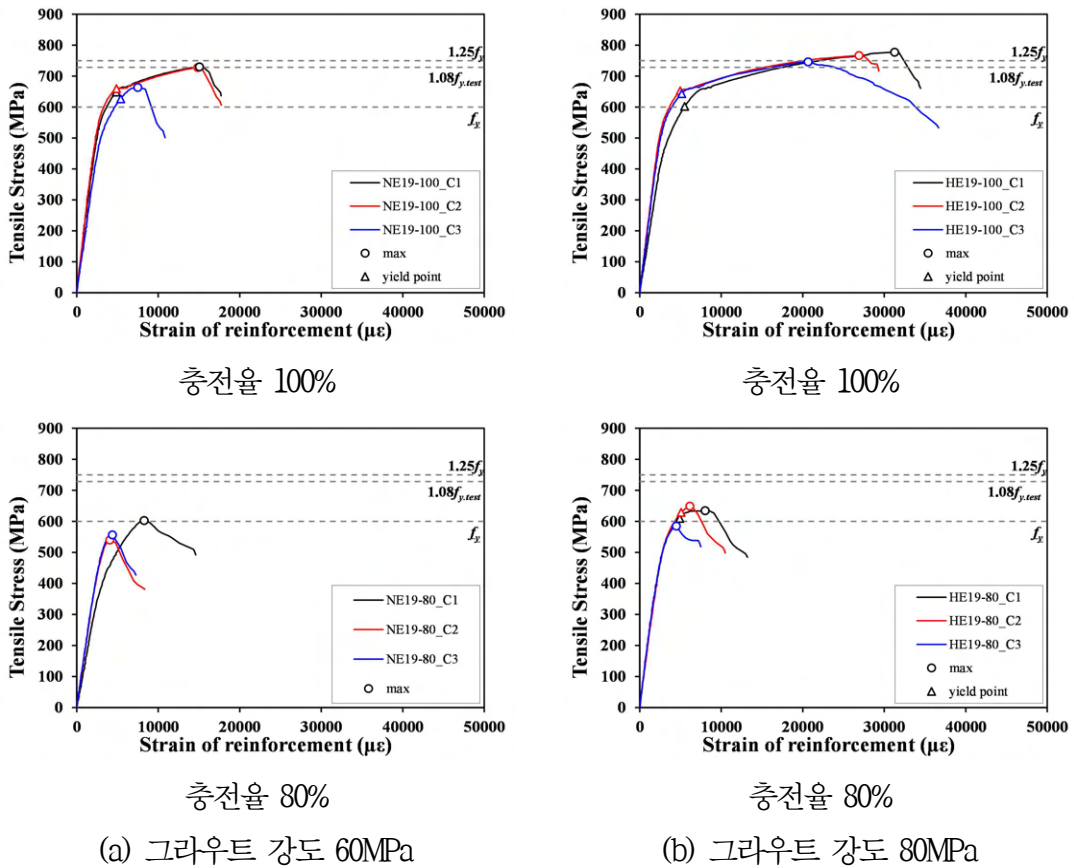
- (2) 스테럽과 띠철근용 표준갈고리의 내면 반지름은 다음 규정을 따라야 한다.
 - ① D16 이하의 철근을 스테럽과 띠철근으로 사용할 때, 표준갈고리의 구부림 내면 반지름은 $2d_b$ 이상으로 하여야 한다.
 - ② D19 이상의 철근을 스테럽과 띠철근으로 사용할 때, 표준갈고리 구부림 내면 반지름은 표 4.1.1에 따라야 한다.
- (3) 스테럽 또는 띠철근으로 사용되는 용접철망(원형 또는 이형)에 대한 표준갈고리의 구부림 내면 반지름은 지름이 7mm 이상인 이형철선은 $2d_b$, 그 밖의 철선은 d_b 이상으로 하여야 한다. 또한 $4d_b$ 보다 작은 내면 반지름으로 구부리는 경우에는 가장 가까이 위치한 용접 교차점부터 $4d_b$ 이상 떨어져서 철망을 구부려야 한다.
- (4) 표준갈고리 외의 모든 철근의 구부림 내면 반지름은 표 4.1-1의 값 이상이어야 한다.

제3장 PC접합부 구조 품질관리 방안 제안

1. 스플라이스 슬리브 품질 저하 요인

2024년 기 수행된 연구 결과와 같이 스플라이스 슬리브의 충전 품질 저하 요인은 스플라이스 슬리브 내 충전되는 그라우트의 강도, 충전율이었으며, [그림 3-1]과 같이 그라우트의 압축강도가 가장 큰 인자임을 확인하였음

이에, 스플라이스 슬리브 품질 저하 요인인 그라우트 강도, 충전결함율을 기초로 PC 접합부 구조 품질저하 시나리오를 도출하였음



[그림 3-1] 그라우트 압축강도에 따른 품질 저하

2. PC접합부 구조 품질 저하 시나리오

■ 그라우트 주입방식에 따른 충전결함

현행 PC공동주택 건설현장에서 사용하는 PC접합부 그라우트 충전은 [그림 3-2]와 같이 반중력식 주입방식을 이용하고 있으며, 1개의 주입구를 이용하여 PC접합부 내 스플라이스 슬리브에 그라우트를 주입하고 있음. 이와 같은 주입 방식은 주입구 쪽에서 상대적으로 멀리 떨어진 스플라이스 슬리브에 충전결함이 발생 할 수 있는 것을 보여주며, 이는 [그림 3-3]과 같음

따라서 이 연구에서는 현행 주입방식으로 그라우트를 주입 할 경우에 발생 할 수 있는 충전 결함 시나리오를 PC부재 내 주철근의 위치에 따라 도출하였음



[그림 3-2] PC접합부 그라우트 주입 현황

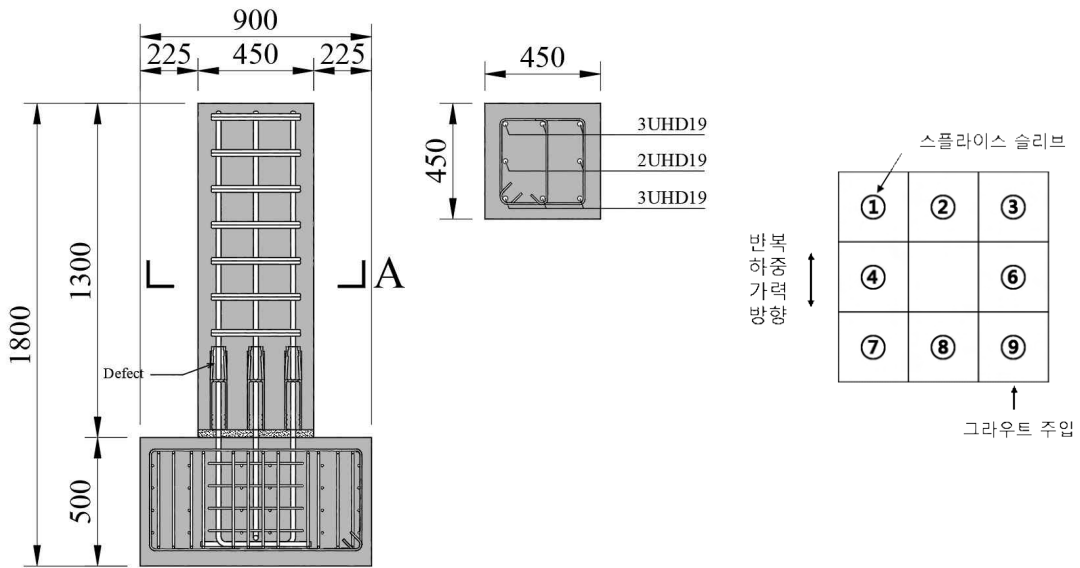


[그림 3-3] PC접합부 그라우트 충전결함

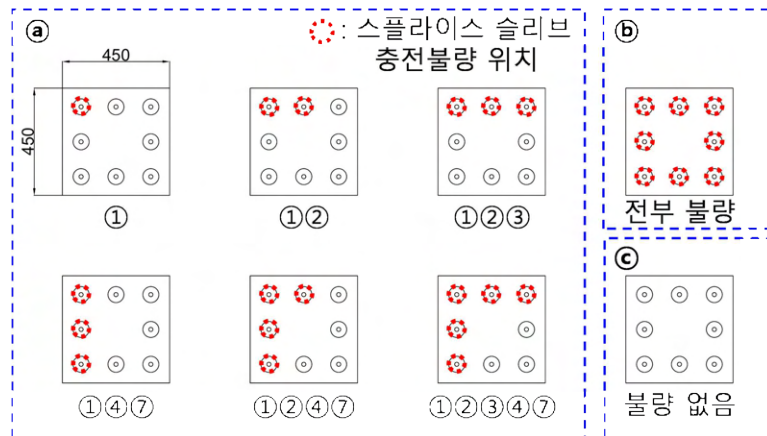
■ PC부재 주철근의 위치에 따른 충전결함 시나리오

[그림 3-4]는 PC부재(기둥)의 입면을 보여주는 그림이며, 기둥-기초 또는 기둥-기둥 접합부를 모사한 것임. 기둥 단면에서 주철근은 ①~⑨ 까지 총 9대이며, 주입은 ⑨위치의 주철근에 배치된 스플라이스 슬리브에서 진행된다고 가정하였음

충전결함 시나리오는 [그림 3-5]에 나타난 바와 같이 “결함 없음”에서 모든 주철근이 결함이 있는 “전부 결함”을 도출하였으며, 주입구쪽에서 가장 멀리 떨어진 ①위치의 주철근이 가장 불리하다는 조건을 입력하였음



[그림 3-4] PC부재 단면 및 스플라이스 슬리브 위치

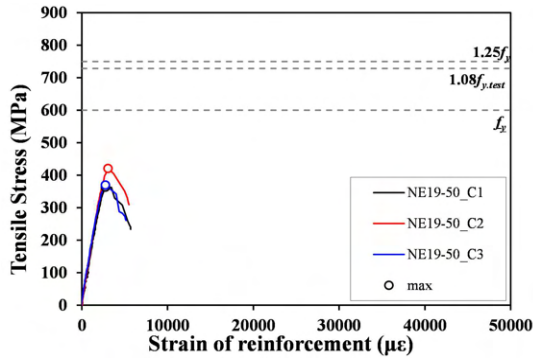


[그림 3-5] 스플라이스 슬리브 위치에 따른 충전불량 시나리오

■ 충전결함에 따른 구조 품질 저하

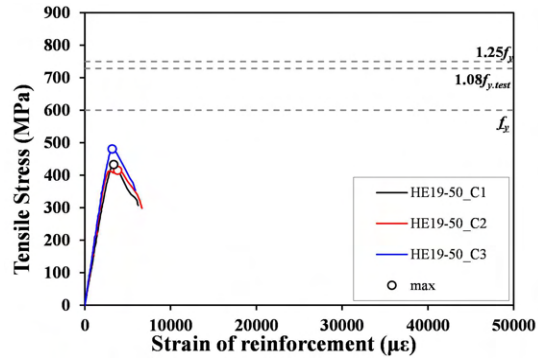
[그림 3-3]과 같이 기존 연구에서 스플라이스 슬리브의 중앙부 아래에 위치한 하부 연결철근(다우얼 바)에서는 충전결함이 없었으므로(Mock-up 실험결과), 본 연구에서는 기존연구와 동일하게 스플라이스 슬리브의 중앙부를 기준으로 상부 연결철근을 대상으로 충전 결함을 산정하였음

기존 연구에서 충전 결함이 50%(스플라이스 슬리브 상부 기준)일 경우 [그림 3-6]과 같이 PC접합부 인발 성능이 저하되었으므로 본 연구에서는 PC접합부의 충전 결함율을 50%로 가정하였음



충전율 50%

(a) 그라우트 강도 60MPa



충전율 50%

(b) 그라우트 강도 80MPa

[그림 3-6] 그라우트 충전율에 따른 품질 저하

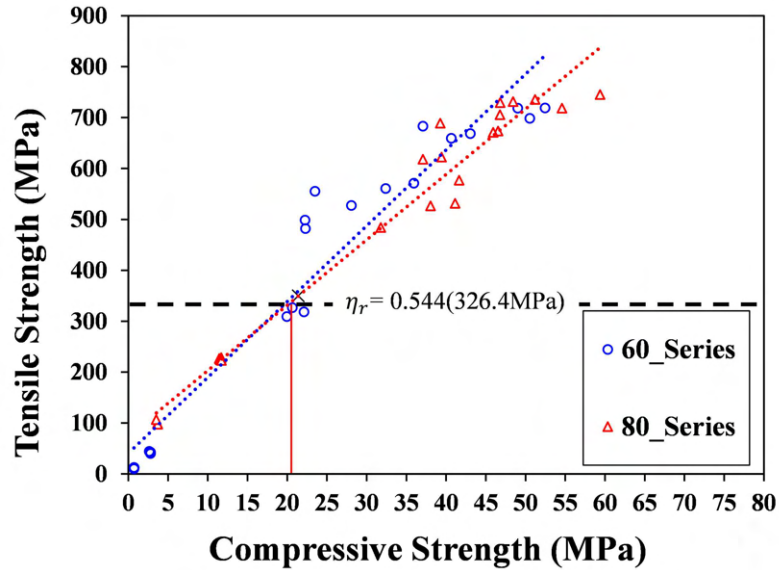
3. PC접합부 시공성 향상 방안

2024년 연구를 통하여 PC부재의 가설재 해체가 가능한 최소 그라우트 압축강도를 20MPa로 정의하였음. 이는 인발시험에 의한 결과로, PC부재 시공하중으로부터 산정된 식 3-1의 하중비 η_r 로 정의할 수 있음

$$\eta_r = \frac{M_c}{M_n} = \frac{1.2C_D + 1.4C_M + 1.6C_P + 1.6C_H}{(1.2D + 1.6L)/\phi} \quad \text{식 (3-1)}$$

철근의 항복강도에 영향을 받는 하중비 η_r 은 스플라이스 슬리브 내 묻힌 주철근의 인발하중에 의하여 계산할 수 있으므로, 스플라이스 슬리브 충전결함을 고려한 주철근의 인발하중에 대한 규명이 필요함

이에, 이 연구에서는 [그림 3-7]과 같이 하중비 η_r 로부터 계산된 최소 그라우트 압축강도 20MPa을 대상으로 시공성 확보에 대한 검증을 수행하였음



[그림 3-7] PC접합부 시공성 확보를 위한 최소 그라우트 압축강도

4. PC접합부 충전결함 보강방안

■ 에폭시 수지 주입제의 재료적 특성

현재 콘크리트 구조물의 균열 및 누수 등 보수 및 보강에 널리 사용된 에폭시 수지 주입제(이하 에폭시 주입제)는 제품에 따라 경화 후 그라우트 압축강도와 유사한 70MPa 이상의 압축강도를 나타냄

에폭시 주입제는 콘크리트와 철근에 대한 접착강도가 우수한 특징이 있으며, 경화 과정에서 발생하는 부피 수축이 적어 스플라이스 슬리브 충전결함에 효율적으로 대응할 수 있는 장점이 있음. 또한, 내습성 및 내후성이 우수하여 스플라이스 슬리브 내 보강 시 장기 내구성에 효과적임

에폭시 주입제는 경화전 액체 상태로 건축용 주사기 등을 이용하여 좁은 공간에 효율적으로 보강이 가능하므로, 주입구가 상대적으로 작은 스플라이스 슬리브의 충전결함부에 주입하여 보강하기 용이함

■ 에폭시 수지 주입제를 이용한 PC접합부 충전결함 보강 방안

PC접합부 그라우트 충전 후 발생하는 충전결함은 스플라이스 슬리브의 토출구를 통하여 육안으로 확인 가능하며, 충전결함이 발생하였을 경우 [그림 3-8]과 같이 토출구에 에폭시 주입제 직접 주입 하여 보강 할 수 있을 것으로 판단됨. 이 연구에서는 스플라이스 슬리브 내 충전되는 그라우트 압축강도와 유사한 60MPa 이상의 에폭시 주입제를 이용하여 보강하는 방안을 도출하였으며, 실제 구조성능평가를 수행하여 이를 검증하고자 하였음



[그림 3-8] 에폭시 주입제를 이용한 보강

제4장 PC접합부 구조 품질 관리 방안 검증

1. 구조성능평가 실험체

1.1 개요

본 연구에서는 제3장에서 제시한 PC접합부 구조 품질 관리 방안 제안을 바탕으로 PC접합부 구조 품질 관리 방안 검증을 위한 구조성능평가를 수행하였음

■ PC접합부 충전결합 시나리오 반영

PC기둥-기초, PC기둥-기둥 접합부를 대상으로 현행 그라우트 주입방식을 반영한 충전결합 시나리오를 바탕으로 지진하중을 모사한 횡하중 반복가력 실험 수행

■ PC접합부 시공성 확보

PC접합부 시공 후 가설재 해체를 위한 최소 그라우트 강도인 20MPa의 구조적 검증을 위하여 그라우트 강도 20MPa를 대상으로 충전결합 시나리오를 결합한 횡하중 반복가력 실험 수행

■ PC접합부 충전결합 보강 방안 도출

PC접합부 충전결합 보강 방안인 에폭시 주입제의 구조적 안정성을 검증하기 위하여 스플라이스 슬리브 내 에폭시 주입제 보강 후 횡하중 반복가력 실험 수행

1.2 실험변수

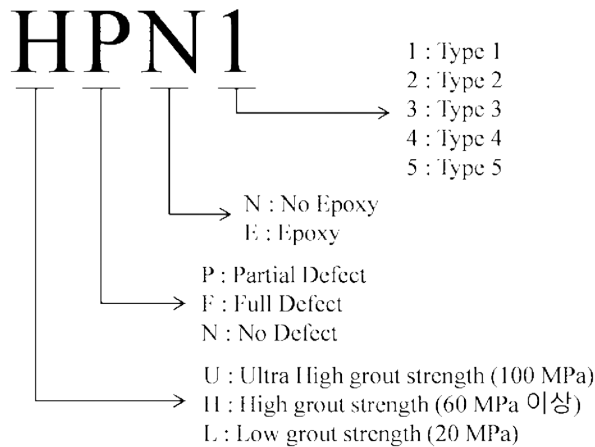
이 연구에서는 PC 공동주택에 적용된 수직 접합부를 모사하기 위해 동일한 철근비의 60% 축소된 실험체를 총 16개 (PC-15개, RC-1개) 계획하였으며, 실험체의 주요 변수는 [표 4-1]과 같이 그라우트 강도, 에폭시 보강 유무, 충전결합 위치임

[그림 4-1]은 PC 수직 접합부 실험체의 명명상세로 여기서, 'H'는 일반적인 구조물의 접합부에 적용되는 60 MPa 그라우트 적용 실험체, 'L'은 시공하중에 따른 후속 공정 진행을 고려하여 재령 1일차에 발현되는 그라우트 강도를 모사한 20 MPa 이

상의 그라우트 적용 실험체를 나타내음. 'U'는 기 수행한 고강도 그라우트 추가 인발 시험에 따라 100 MPa 고강도 그라우트를 적용한 실험체를 나타내었음

[표 4-1] PC접합부 실험체 실험 변수 요약

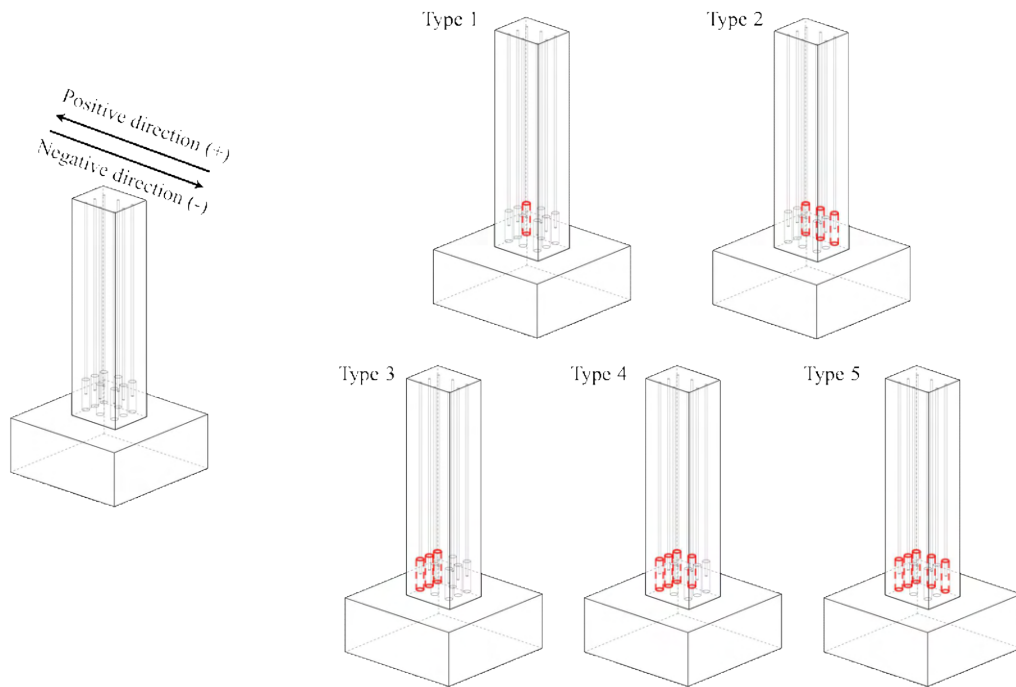
주요 연구내용	실험내용 및 변수	개수	비고
PC접합부 충전결함 시나리오 검증	①-1 접합부 개소(위치)별 충전 결함 (그라우트 압축강도 : 60 MPa)	5EA	
	①-2 접합부 모든 개소 충전 결함 없음 (그라우트 압축강도 : 20 MPa, 60 MPa 이상)	2EA	
	①-3 접합부 모든 개소 충전 결함 (그라우트 압축강도 60 MPa 이상, 100 MPa)	2EA	
PC접합부 시공성 향상 방안 검증	② 접합부 개소(위치)별 충전 결함 (그라우트 압축강도 : 20 MPa)	5EA	
PC접합부 충전결함 사후 보강방안 검증	③ 접합부 모든 개소 충전 결함 후 예폭시 보강 (그라우트 압축강도 60 MPa)	1EA	
동등성 평가 비교 실험체	④ RC	1EA	
변수에 따른 실험체 총계 (①+②+③+④)		16EA	



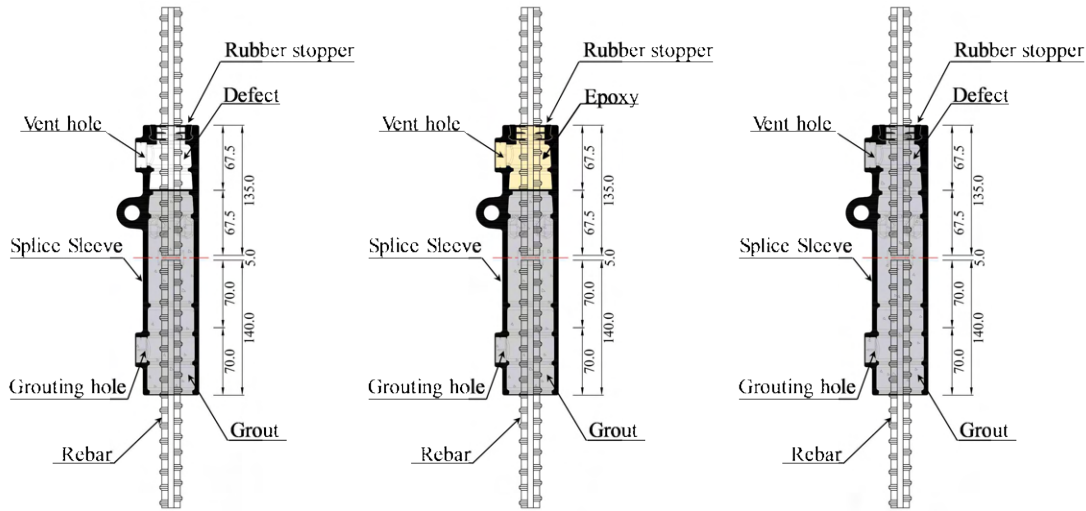
*일체식 콘크리트 공법 실험체는 별도로 RC로 표기

[그림 4-1] 실험체 명명 상세

또한 실험체 명에서 'P'는 [그림 4-2]와 같이 실제 시공현장에서 발생할 수 있는 시나리오에 따라 그라우트 충전결함의 변수를 Type 1~5으로 설정하여 나타내었음 [그림 4-3]은 그라우트 충전을 상세를 나타내었음. 'F'와 'N'은 각각 충전결함 위치 및 여부에 따라 위치별 충전결함이 있는 실험체, 모든 슬리브에 충전결함이 있는 실험체, 모든 슬리브에 충전결함이 없는 실험체로 나누었으며, 각 슬리브의 충전결함은 충전결함에 대한 구조성능을 극대화하여 분석하고자 [그림 4-3 (a)]와 같이 슬리브 상부 기준으로 50%가 채워졌을 경우로 설정하였음. 'E'는 [그림 4-3 (b)]와 같이 실험체 제작 후 구조 보강용 에폭시를 주입하여 제작한 실험체임



[그림 4-2] 그라우트 충전결함 변수 상세



(a) 그라우트 충전율 50% (b) 그라우트 충전율 50% +에폭시 주입 (c) 그라우트 충전율 100%

[그림 4-3] 그라우트 충전율 상세

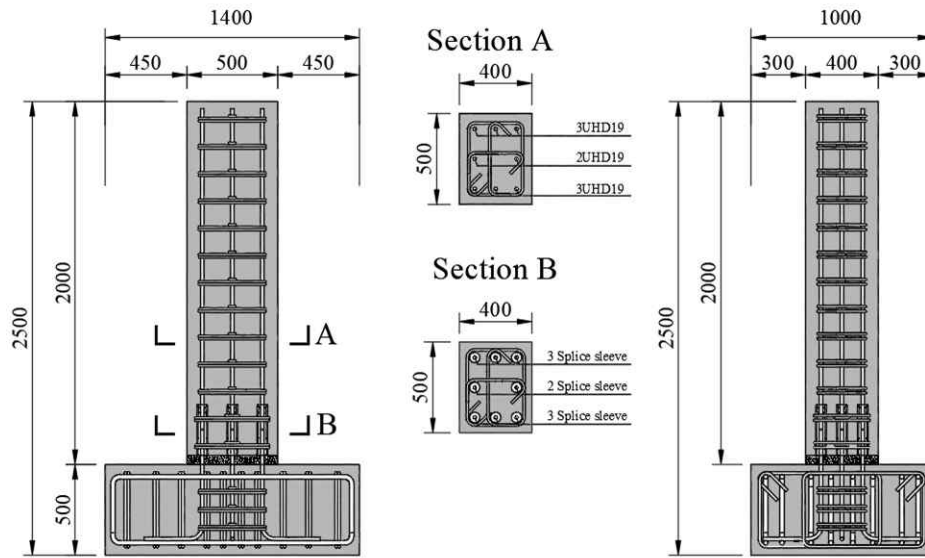
1.3 PC접합부 실험체 설계 상세

이 연구에서는 국내 현행구조기준(KDS 14 20 80 콘크리트 내진설계기준)에서 제시하는 지진력저항시스템(중간모멘트골조)의 요구사항을 만족하는 실험체를 설계하였음

■ PC접합부 실험체 상세

[그림 4-4]와 같이 PC접합부 실험체는 PC공동주택에 적용된 기둥을 60% 축소한 상세임. 기둥 단면은 0.4 m × 0.5 m 이며, 기둥의 높이는 2.0 m로 설계하였음. 기둥 주철근은 8-UHD19를 배근하였으며, 전단철근은 SHD13을 기둥 최하단에서 부터 75 mm 이격 후 150 mm 간격으로 배근하였음.

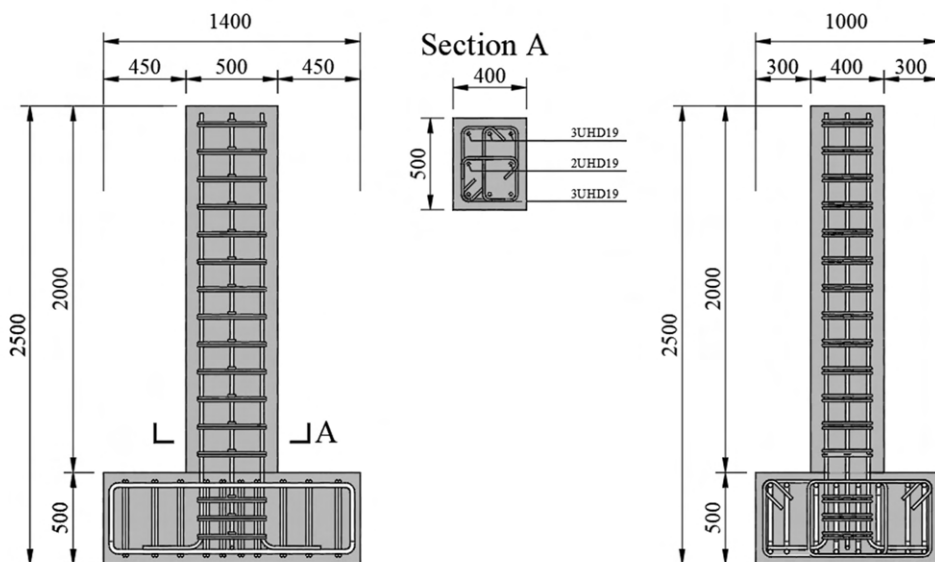
기초와 기둥의 접합부는 현행 PC공동주택 현장에서 사용하고 있는 스플라이스 슬리브로 사용하였음. 기초의 규격은 1.0 m × 1.4 m × 0.5 m 이며, 기둥의 휨 파괴 이전에 기초의 조기 풀림전단을 방지하고자 기초에 추가 전단철근을 배치하였음



[그림 4-4] PC 기둥-기초 접합부 실험체 상세

■ RC 실험체 상세

[그림 4-5]는 RC 기둥-기초 실험체 상세를 나타내었음. RC 실험체는 PC 실험체의 구조성능을 평가하기 위한 비교군 실험체로써, PC 실험체와 동등한 휨강도를 보유하기 위해 기둥의 단면 및 높이, 철근 배근 상세는 동일하게 설계하였음



[그림 4-5] RC 기둥-기초 실험체 상세

■ PC접합부 실험체 설계 검토

이 연구에서는 국내 현행구조기준(KDS 14 20 80 콘크리트 내진설계기준)에서 제시하는 지진력저항시스템(중간모멘트골조)의 요구사항을 만족하는 실험체를 설계하였으며, 다음과 강도를 산정하였음

① 기둥 휨강도 설계

$$M_c = 407.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$P_n = \frac{M_c}{H_{eff}} = \frac{407.1}{1.75} = 232.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

여기서, M_c 는 기둥의 휨강도, H_{eff} 는 기둥의 유효높이를 의미함

② 기둥 전단강도 검토

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{vy} \cdot d}{s} = \frac{126.7 \times 3 \times 500 \times 415}{150} \times 10^{-3} = 525.8 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{1}{6} \cdot \left(1 + \frac{N_u}{14A_g}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot bwd \\ &= \frac{1}{6} \times \left(1 + \frac{800,000}{14 \times 400 \times 500}\right) \times 1 \times \sqrt{40} \times 400 \times 415 \times 10^{-3} = 224.97 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$V_n = V_s + V_c = 525.8 + 224.97 = 750.8 \text{ kN} < \text{O.K} >$$

여기서, V_n 은 단면의 공칭전단강도 (kN), V_s 는 전단철근에 의한 단면의 공칭전단강도(kN), V_c 는 콘크리트에 의한 단면의 공칭전단강도 (kN), A_v 는 간격 s 이내에 있는 전단철근의 단면적 (mm^2), f_{vy} 는 전단철근의 설계항복강도, d 는 부재의 유효 깊이 (mm), s 는 종방향 철근에 평행한 방향으로 전단철근의 간격 (mm), N_u 는 V_u 와 동시에 발생하는 단면에 수직인 크리프와 건조수축으로 인한 인장의 영향을 포함하는 계수축력 (N/mm^2), A_g 는 전체 단면적(mm^2), λ 는 경량 콘크리트 계수, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준압축강도 (MPa), b_w 는 복부폭 (mm)을 의미함

1.4 PC접합부 실험체 제작

[그림 4-6]과 [그림 4-7]은 각각 PC접합부 실험체와 RC 실험체의 제작과정을 순서대로 정리하여 나타내었음

PC접합부 실험체는 슬리브 내부 그라우트 충전율을 확인하고자 접합부 및 슬리브 내부 그라우팅을 한 후 기둥을 타설하였으며 RC 실험체는 일체식 콘크리트 공법을 고려하여 기초와 기둥을 동시에 타설하였음



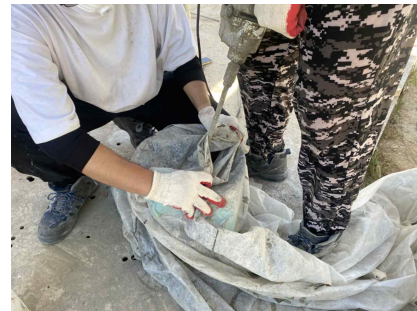
(a) 기초 철근 배근



(b) 기초 콘크리트 타설



(c) 기초 타설 완료



(d) 그라우트 믹싱



(e) 접합부 그라우팅



(f) 슬리브 내부 그라우트 주입



(g) 기둥 철근 배근



(h) 기둥 타설

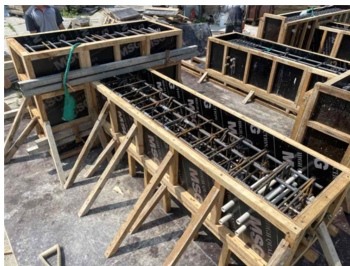


(i) 기둥 상부 인서트 설치



(j) 기둥 타설 완료

[그림 4-6] PC접합부 실험체 제작과정



(a) RC 철근 배근



(b) RC 콘크리트 타설



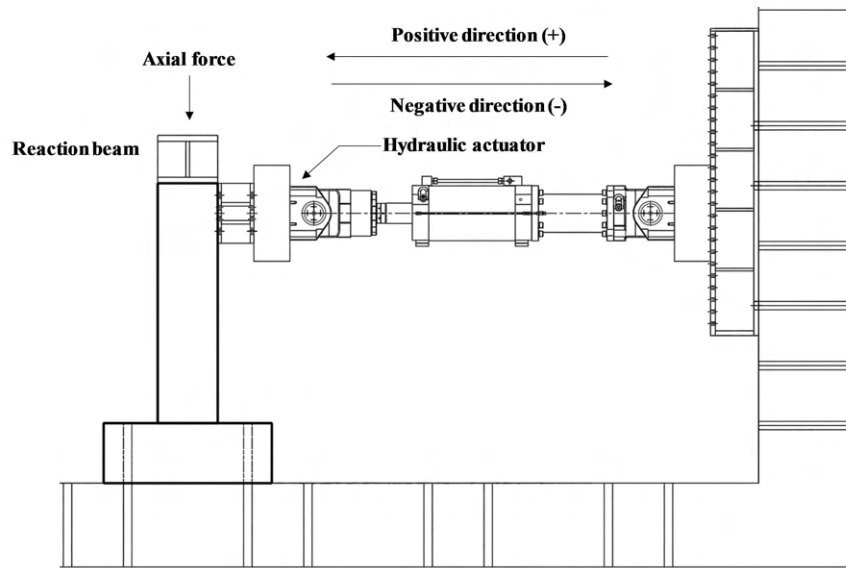
(c) RC 타설 완료

[그림 4-7] RC 실험체 제작과정

2. 구조성능평가 실험

2.1 실험계획

[그림 4-8]과 [그림 4-9]는 각각 실험체 세팅 상세와 실제 실험체 세팅 모습을 나타 내었음. 실험체는 1,500 kN 용량의 액추에이터를 이용하여 기둥의 장변방향으로 횡하중을 가력하였음. 이 실험에서는 실제 건물에서 발생하는 중력하중을 모사하고 자 실험체 상부에 프레임을 연결하여 오일잭을 이용하여 약 800 kN의 축력을 도입 하였으며, 이는 기둥 설계 축 강도의 10% 수준임

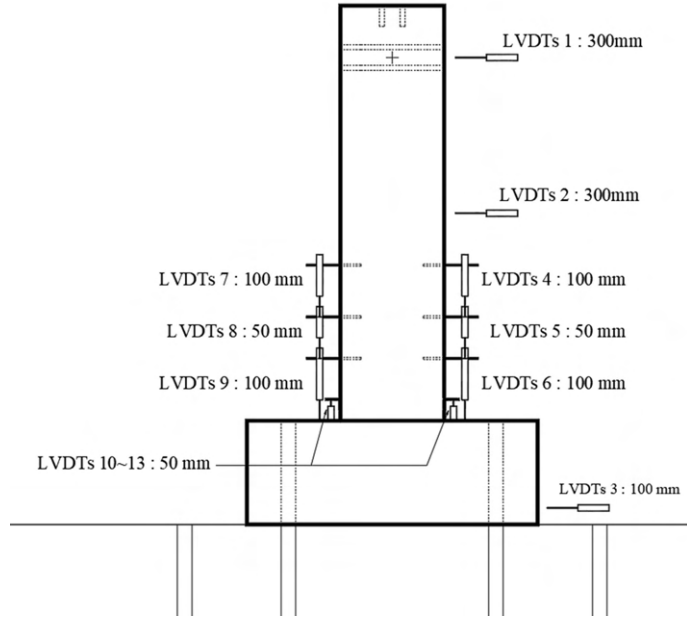


[그림 4-8] PC접합부 구조성능평가 실험체 세팅 상세



[그림 4-9] PC접합부 구조성능평가 실험체 세팅 사진

[그림 4-10]은 실험체 계측계획을 나타내었음. LVDT 1은 가력중심의 수평변위를, LVDT 2는 기둥의 절대 횡변위를, LVDT 3은 실험체 하부의 기초 및 스토퍼 슬립량을 측정하였음. LVDT 4~9는 실험체 양 측면의 소성변형각 및 기둥 계면에서 발생하는 균열폭을 측정하였음



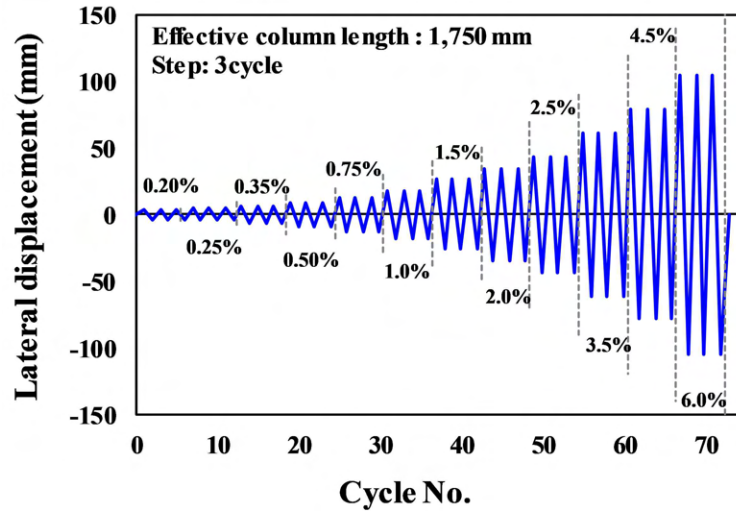
[그림 4-10] PC접합부 구조성능평가 실험체 계측 상세

[그림 4-11]와 [표 4-2]는 실험체 가력 계획을 나타내었음. 실험체는 변위제어 방식으로 층간변위비 0.2%부터 4.5%까지 각 step 별로 정 (Push, +), 부 (Pull, -) 방향으로 3회씩 횡하중을 가력하였으며, 실험하중이 최대하중의 80% 이하로 저하될 시점을 파괴점으로 산정하고 실험을 종료하였음. 층간변위비 4.5% 도달 시 까지 하중이 80% 아래로 떨어지지 않을 경우에는 층간변위비 6%까지 가력을 진행하였으며, 실험체 각 하중단계에서 목표 층간변위비에 정확히 도달하기 위해 LVDT 3 측정값을 통해 기초의 수평 슬립량을 측정하여 실시간 보정을 하여 가력을 진행하였음

실험체의 층간변위비는 다음의 식 (4.1)과 같이 정의하였음

$$Story\ drift\ ratio = \frac{\Delta}{h_{eff}} \times 100 (\%) \quad (4.1)$$

여기서, Δ 는 실험체의 절대 수평변위를 의미하며, h_{eff} 는 기초면부터 가동 상부 가력점까지의 거리이며, 유효높이는 1,750 mm임



[그림 4-11] PC접합부 구조성능평가 실험체 가력계획

[표 4-2] PC접합부 구조성능평가 가력계획 상세

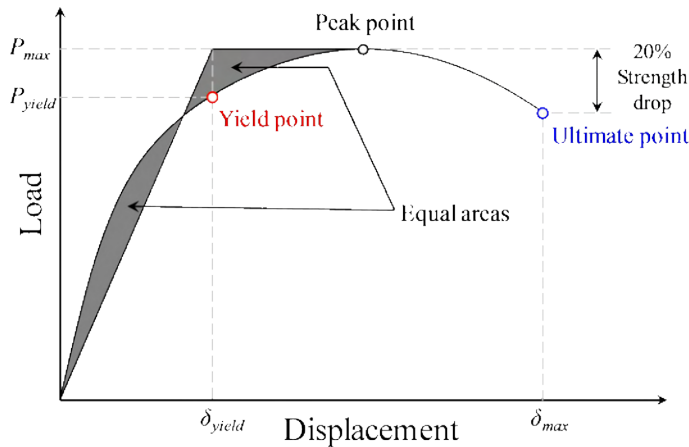
STEP	Drift ratio (%)	Lateral Disp. (mm)
1	0.2	3.5
2	0.25	4.4
3	0.3	6.1
4	0.5	8.8
5	0.75	13.1
6	1.0	17.5
7	1.5	26.3
8	2.0	35
9	2.5	43.8
10	3.5	61.3
11	4.5	78.8
12	6.0	105

기둥-기초 접합부 실험체의 공칭강도 (P_n)은 다음의 식 (4.2)와 같이 기둥 최하단 부에서 발생하는 모멘트가 기둥 단면의 공칭 휨강도에 도달했을 때로 정의하였음

$$P_n = \frac{M_c}{h_{eff}} \quad (4.2)$$

H 실험체 (60 MPa 이상 그라우트), U 실험체 (100 MPa 그라우트), 그리고 RC 실험체의 경우, 일반적으로 사용하는 공칭강도 (P_n)와 재료실험 결과 값을 적용하여 계산한 ($P_{n,m}$) 값을 함께 이력곡선에 표기하였음. 설계강도 값은 설계 단계에서 요구되는 강도 수준까지 발현되었는 지를 확인하고자 하였음. L 실험체 (20 MPa)는 KDS 41 12 00 (건축물 설계하중)에 명시되어 있는 시공하중의 하중조합을 적용하여 계산한 하중 $P_{n,L}$ 을 표기하였음

[그림 4-12]는 실험 결과 하중-변위 이력곡선 상에서의 항복점 및 파괴점 산정 근거를 나타내었음. 항복점 (Yield point)은 동등 에너지 이론에 근거하여 산정하였으며, 파괴점은 최대 하중 도달 이후 하중이 80% 감소하였을 때로 산정하였음. 실험체 파괴형상에 대한 균열도는 부록 2에 첨부하였음



[그림 4-12] 항복점 및 파괴점 근거산정

2.2 재료시험

[표4-3]와 [표 4-4]는 각각 콘크리트와 그라우트 압축강도 재료시험 결과를 나타내었음. PC 및 RC 실험체의 콘크리트 설계 압축강도는 40 MPa, 그라우트 설계 압축강도는 각각 60 MPa 이상, 100 MPa, 20 MPa이며, 타설한 실험체 별로 압축강도 시편을 제작하여 압축강도 시험을 진행하였음

기초, 기둥 및 RC 실험체의 콘크리트 압축강도는 공시체 시편의 평균값으로 나타내었으며, PC 실험체 기초의 압축강도는 42.9 MPa, 기둥은 43.5 MPa로 설계 압축강도를 상회하였음. RC 실험체의 경우 PC 기둥과 동일한 콘크리트를 사용하였음

그라우트 시험 압축강도는 H 실험체 73.7 MPa, U 실험체 90.6 MPa, L 실험체 20.3 MPa로 나타났으며, U 실험체를 제외하고 모두 설계 압축강도를 상회하는 강도로 나타났음

[표 4-3] 콘크리트 압축강도 실험 결과

구분		설계 압축강도 (f_c' , MPa)	시험 압축강도 (f_c' , MPa)
PC	기초	40	42.9
	기둥		43.5
RC			43.5

[표 4-4] 그라우트 압축강도 실험 결과

구분	설계 압축강도 (f_c' , MPa)	시험 압축강도 (f_c' , MPa)
H* 실험체	60 이상	73.7
U* 실험체	100	90.6
L* 실험체	20	20.3

* High grout strength (60 MPa 이상)

** Ultra High grout strength (100 MPa)

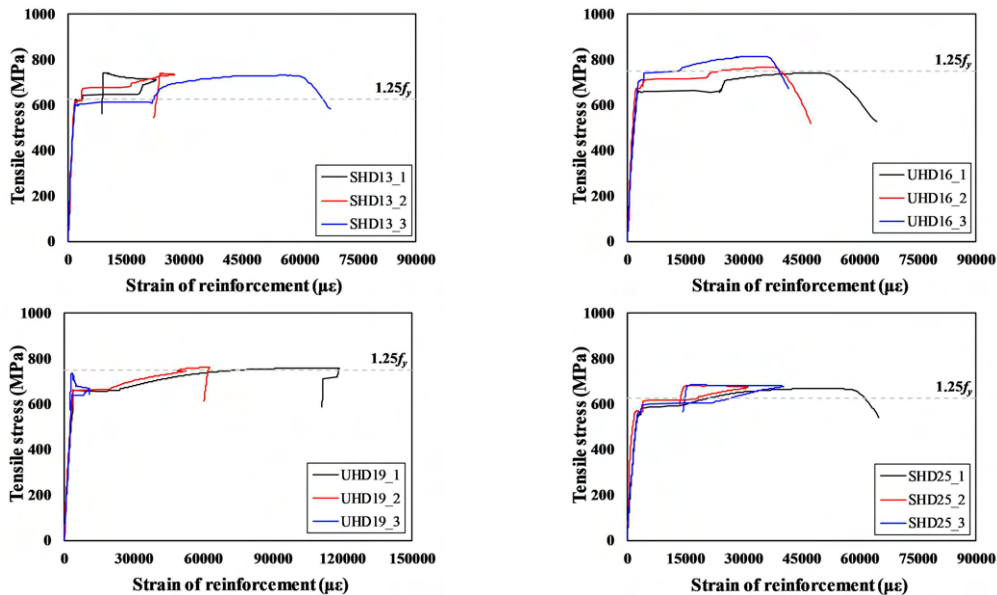
*** Low grout strength (20 MPa)

[표 4-5]와 [그림 4-13]은 실험체에 배근된 철근의 인장 시험 결과를 나타내었음. 인장 시험 결과, 철근의 시험 항복 및 인장강도는 각각 규격 항복강도와 인장강도를 상회하는 수준으로 나타났음

[표 4-6]와 [그림 4-14]는 스플라이스 슬리브 시편의 인장 시험 결과를 나타내었음. 충전율 100% 시편을 제외한 이외의 시편의 경우 모두 항복강도에 도달하지 못하였으며, 항복강도 도달 이전에 슬리브에서 철근이 뽑히는 파괴로 나타났음. 충전율 100% 시편은 규격 항복강도 및 인장강도를 상회하는 강도로 나타났음

[표 4-5] 철근 인장 시험 결과

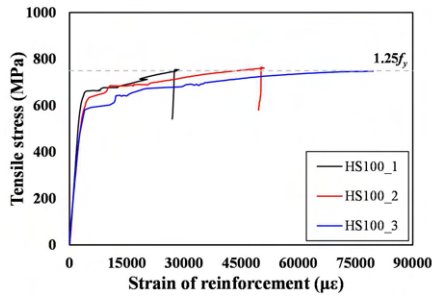
구분	규격 항복강도 (MPa)	시험 항복강도 (f_y , MPa)	시험 인장강도 (f_u , MPa)
SHD13	500	614.3	738.2
UHD16	600	681.8	774.4
UHD19	600	650.5	752.7
SHD25	500	560.8	678.3



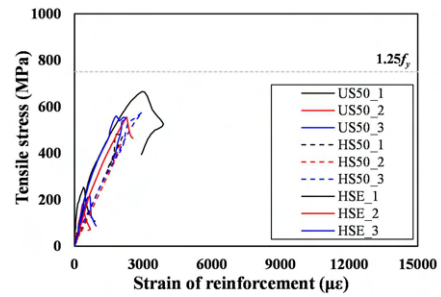
[그림 4-13] 철근 인장 시험 결과

[표 4-6] 스플라이스 슬리브 인장 시험 결과

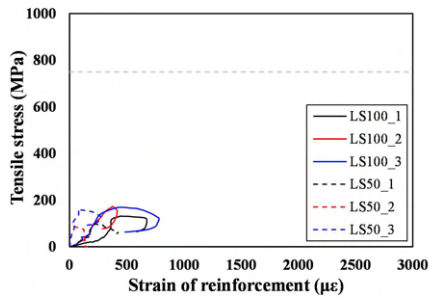
구분	그라우트 강도	충전결합 변수	항복강도 (f_y , MPa)	인장강도 (f_u , MPa)	비고
HS50	60 MPa 이상	50%	-	524.2	
HS100		100%	626.2	769.4	
HSE		Epoxy	-	649.3	
US50	100 MPa	50%	-	272.5	
LS50	20 MPa	50%	-	154.1	
LS100		100%	-	210.2	



(a) 충전율 100% 그라우트 시편



(b) 충전율 50% 그라우트 시편



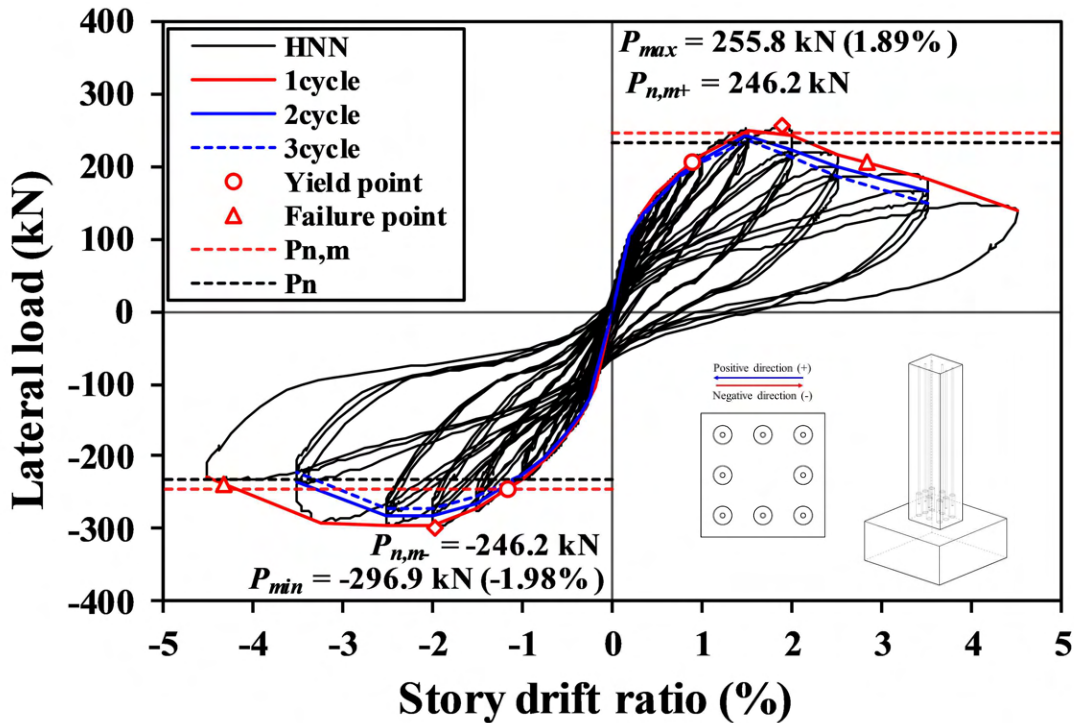
(c) 20 MPa 그라우트 시편

[그림 4-14] 스플라이스 슬리브 시편 인장 시험 결과

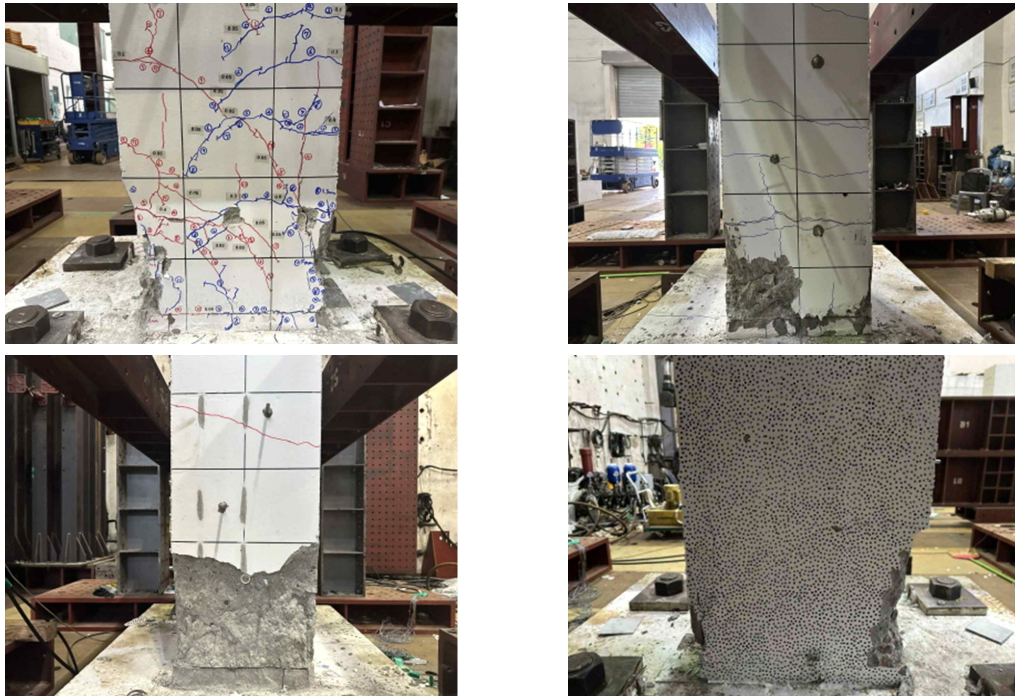
2.3 실험결과

■ HNN 실험체 (PC, 60 MPa 이상 그라우트, 충전결함 없음)

[그림 4-15]는 HNN 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. HNN 실험체는 층간변위비 $\pm 0.20\%$ 에서 기동 휨균열이 발생하였으며, $\pm 0.75\%$ 에서 기동 전단균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.94% , 부방향은 1.11% 에서 항복점에 도달하였음. 정방향 층간변위비 1.5% 에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm)에 균열이 집중되어 균열의 크기가 점차 증가하였으며, 부방향은 층간변위비 2.0% 에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에 균열이 집중되어 균열의 크기가 점차 증가하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 1.89% 에서 255.8 kN , 부방향 1.98% 에서 296.9 kN 으로 나타났음. 층간변위비 4.5% 에서 정·부 방향 콘크리트가 압괴로 인해 국부 탈락하면서 하중이 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) HNN 실험체 하중-변위비 곡선

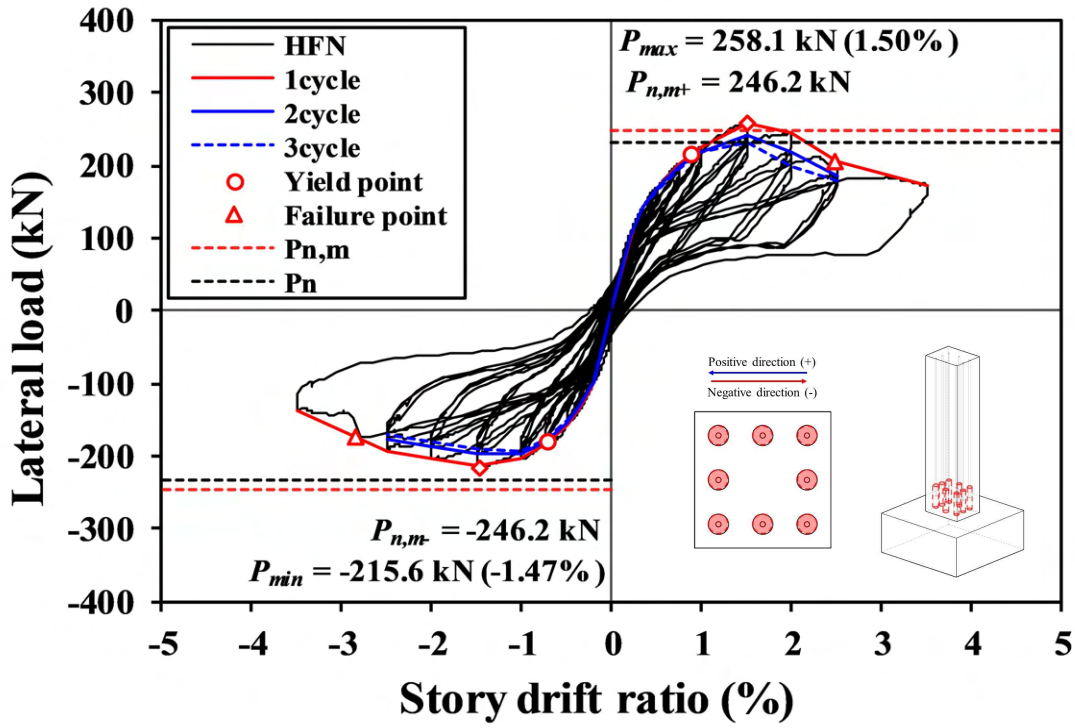


(b) HNN 실험체 최종 파괴형상

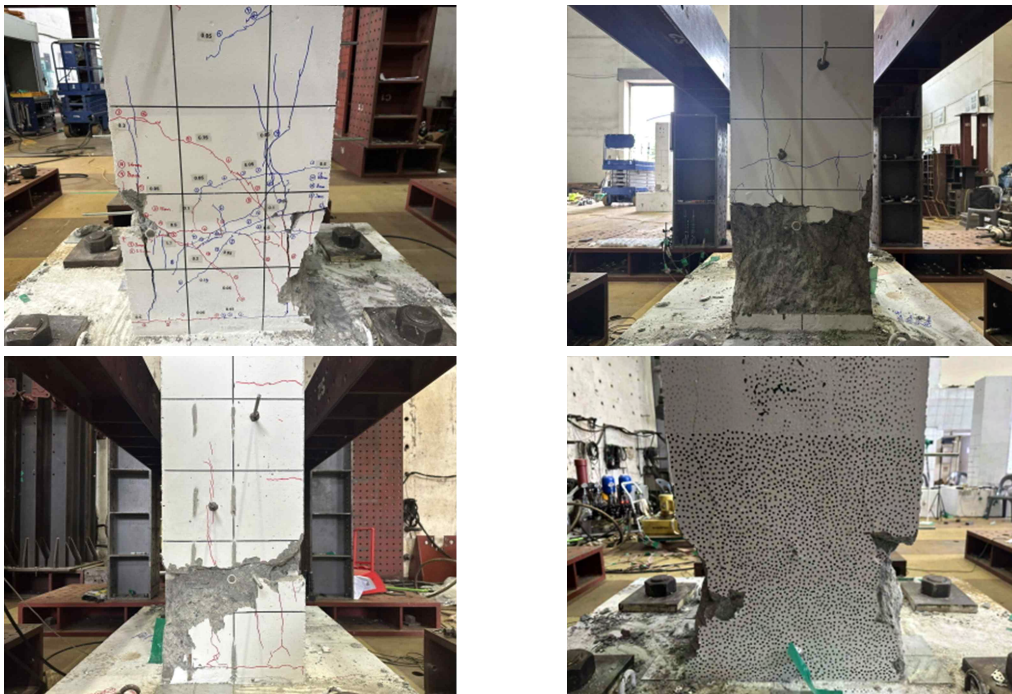
[그림 4-15] HNN 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ HFN 실험체 (PC, 60 MPa 이상 그라우트, 모든 슬리브 결함)

[그림 4-16]은 HFN 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. HFN 실험체는 층간변위비 $\pm 0.35\%$ 에서 기동 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 정방향 1.0%, 부방향 0.75%에서 기동 전단균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.84%, 부방향은 0.77%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 정방향 층간변위비 1.77%에서 241 kN, 부방향 층간변위비 1.46%에서 250.7 kN으로 나타났음. 실험체는 정방향 층간변위비 2.5%, 부방향 층간변위비 2.0%에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에서 균열이 점차 증가하며 하중이 감소하였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) HFN 실험체 하중-변위비 곡선

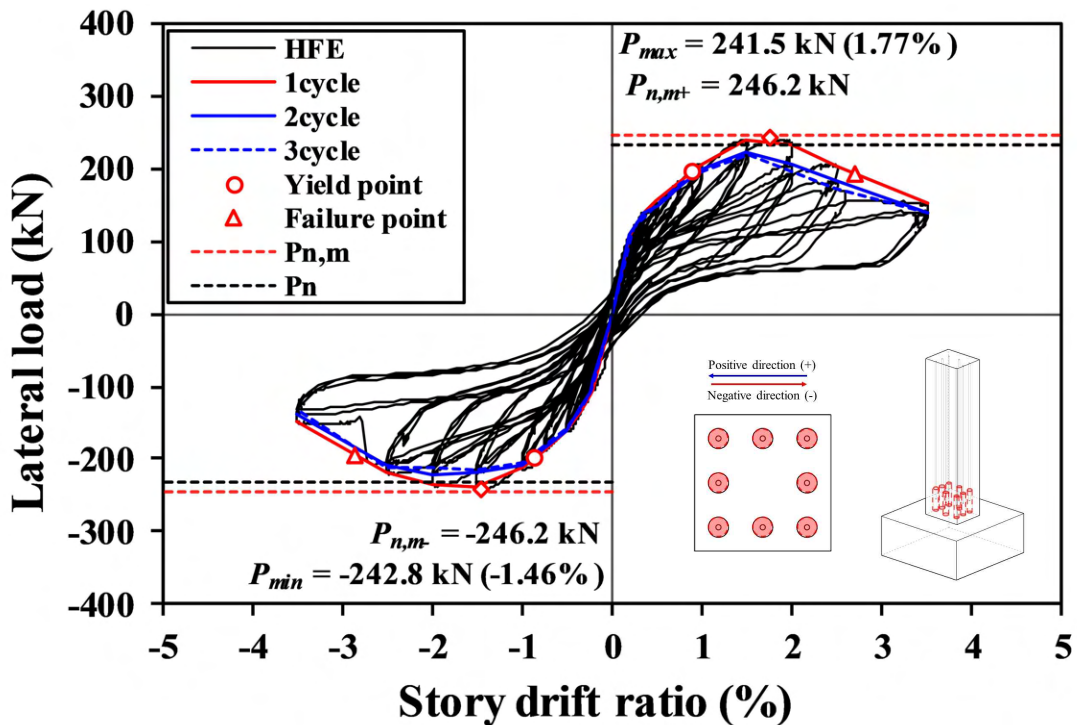


(b) HFN 실험체 최종 파괴형상

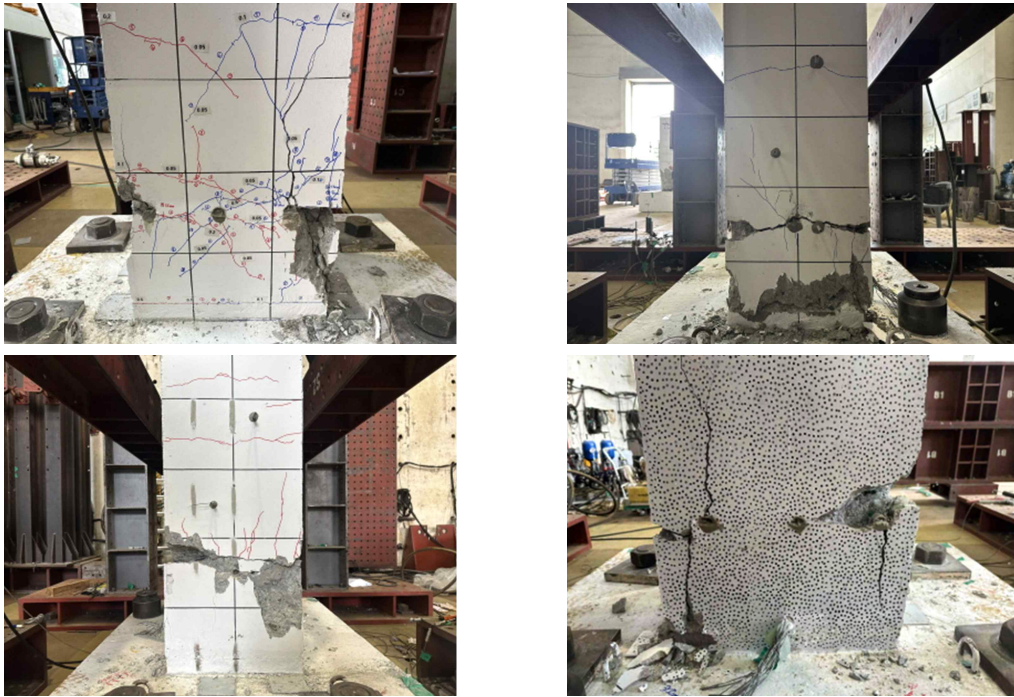
[그림 4-16] HFN 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ HFE 실험체 (PC, 60 MPa 이상 그라우트, 모든 슬리브 결함, 에폭시 보강)

[그림 4-17]은 HFE 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. HFE 실험체는 층간변위비 $\pm 0.25\%$ 에서 기동 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 $\pm 1.0\%$ 에서 기동 전단균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.87%, 부방향 0.86%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 1.77%에서 241.5 kN, 부방향 1.46%에서 242.8 kN으로 나타났음. 실험체는 정방향 층간변위비 2.0%, 부방향 층간변위비 1.5%에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에서 균열이 점차 증가하며 하중이 감소하였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 가력면 콘크리트가 압괴에 의해 국부적으로 탈락하였으며, 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음.



(a) HFE 실험체 하중-변위비 곡선

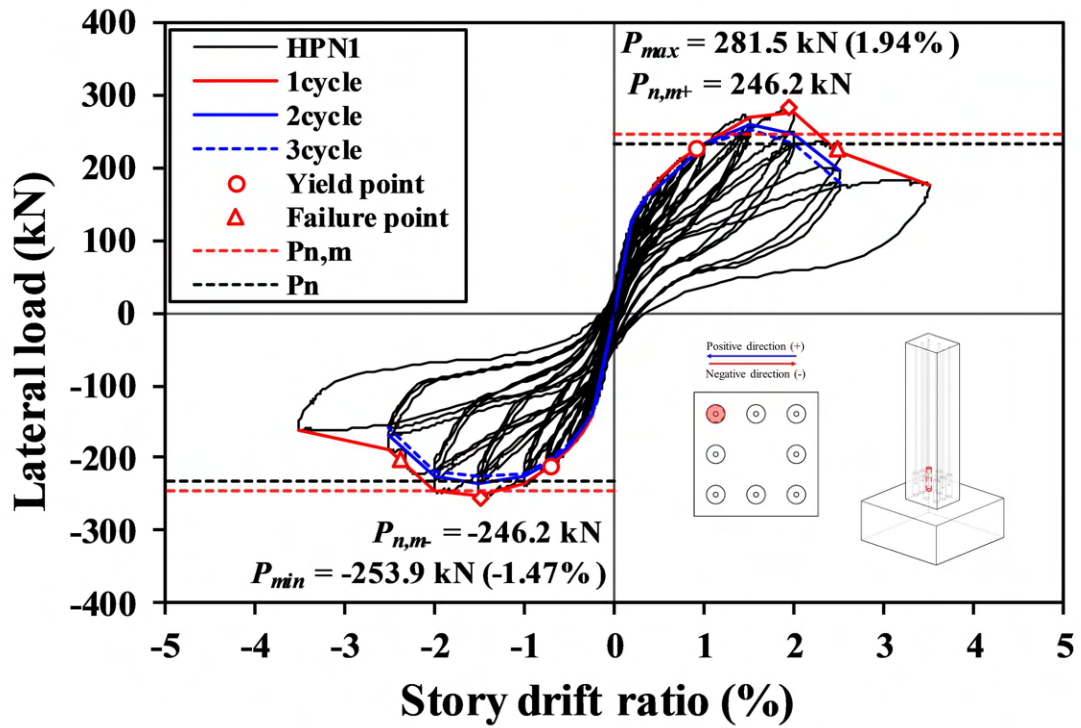


(b) HFE 실험체 최종 파괴형상

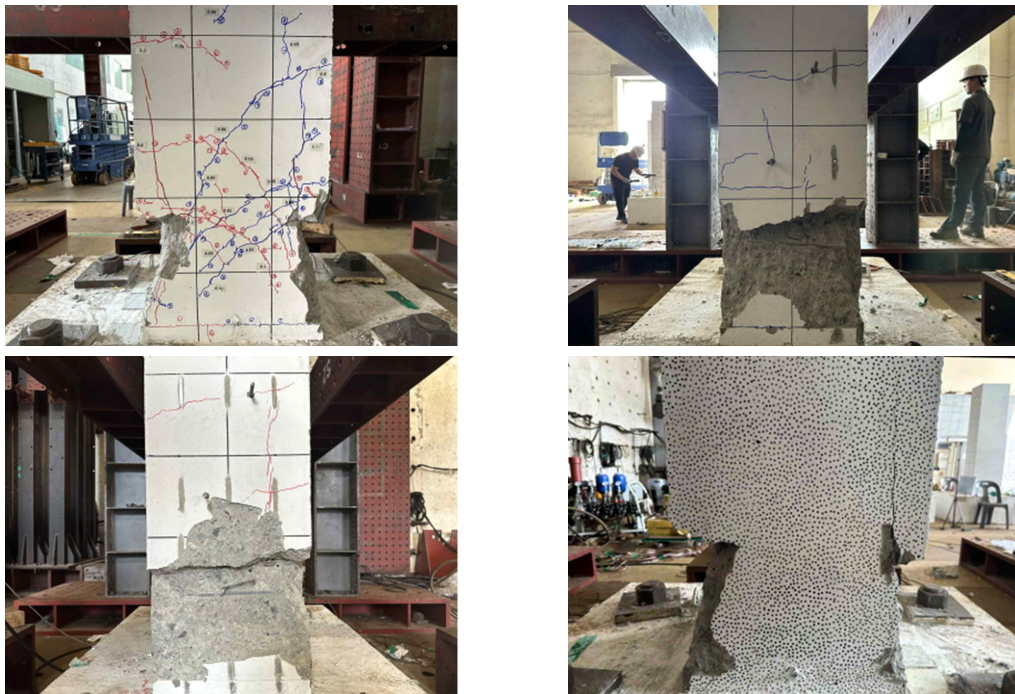
[그림 4-17] HFE 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ HPN1 실험체 (PC, 60 MPa 이상 그라우트, 1번 슬리브 결함)

[그림 4-18]은 HPN1 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. HPN1 실험체는 층간변위비 $\pm 0.2\%$ 에서 기동 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 $\pm 0.75\%$ 에서 기동 전단균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.93% , 부방향 0.69% 에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 1.94% 에서 281.5 kN , 부방향 1.47% 에서 253.9 kN 으로 나타났음. 실험체는 정방향 층간변위비 1.5% , 부방향 층간변위비 1.0% 에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에서 균열이 점차 증가하며 하중이 감소하였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 2.5\%$ 에서 가력면 콘크리트가 압괴에 의해 국부적으로 탈락하였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음.



(a) HPN1 실험체 하중-변위비 곡선

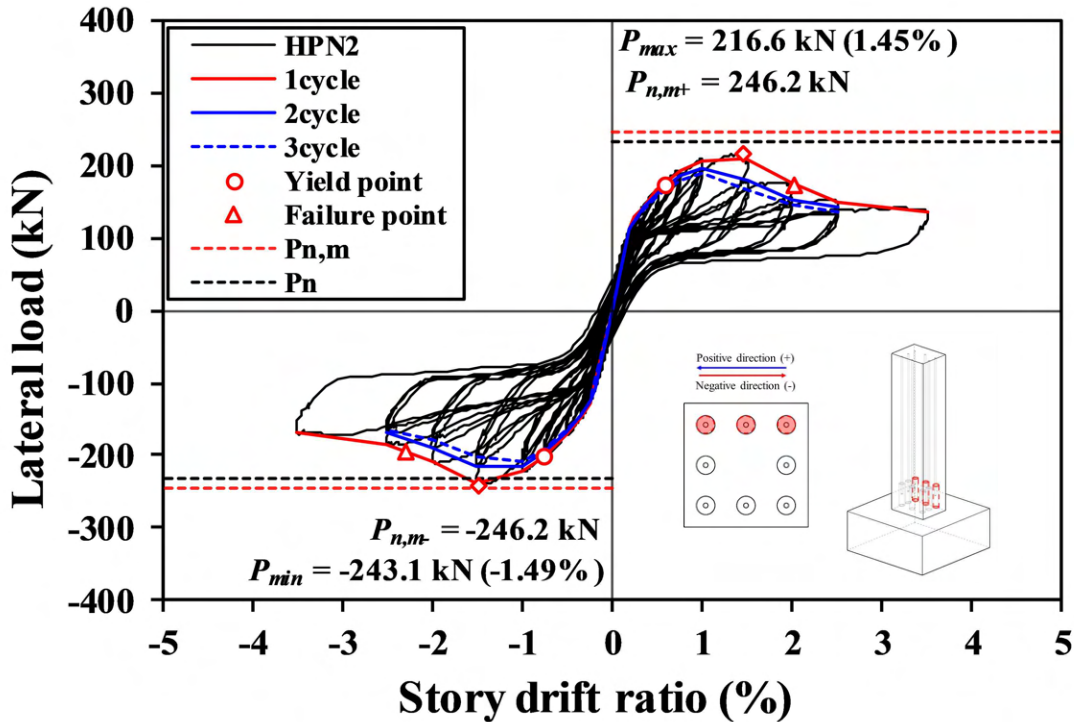


(b) HPN1 실험체 최종 파괴형상

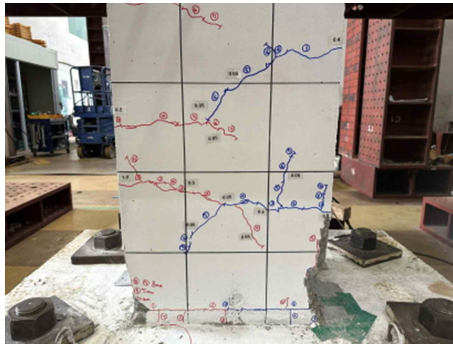
[그림 4-18] HPN1 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ HPN2 실험체 (PC, 60 MPa 이상 그라우트, 1번, 2번, 3번 슬리브 결합)

[그림 4-19]는 HPN2 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. HPN2 실험체는 층간변위비 $\pm 0.25\%$ 에서 기동 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 정방향 0.75%, 부방향 1.5%에서 기동 전단균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.6%, 부방향 0.72%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대 하중은 층간변위비 정방향 1.45%에서 216.6 kN, 부방향 1.49%에서 243.1 kN으로 나타났음. 실험체는 정방향 층간변위비 $\pm 1.5\%$ 에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm)에서 균열이 점차 증가하며 회전 구속(락킹) 거동을 보였으며, 그 이후 하중이 감소하였다. 실험체는 층간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 기동 계면 오프닝이 증가하며 계면 콘크리트가 국부적으로 탈락하였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) HPN2 실험체 하중-변위비 곡선

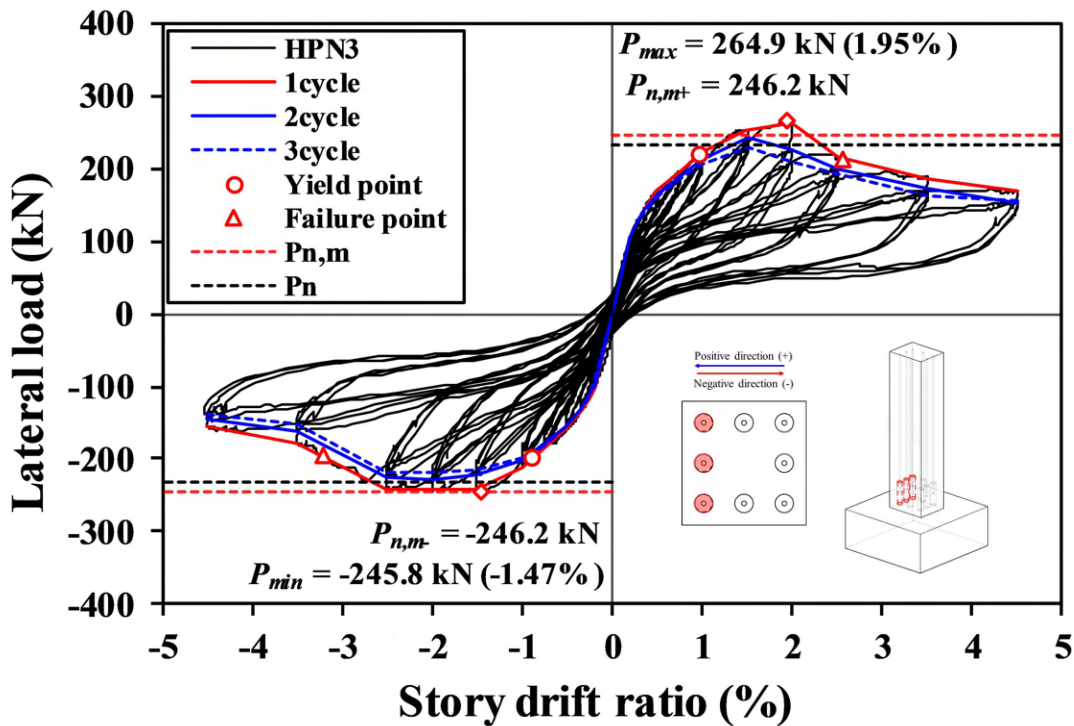


(b) HPN2 실험체 최종 파괴형상

[그림 4-19] HPN2 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ HPN3 실험체 (PC, 60 MPa 이상 그라우트, 1번, 4번, 7번 슬리브 결합)

[그림 4-20]은 HPN3 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. HPN3 실험체는 층간변위비 $\pm 0.25\%$ 에서 기동 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 $\pm 1.0\%$ 에서 기동 전단균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.94%, 부방향 0.91%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 1.95%에서 264.9 kN, 부방향 1.47%에서 245.8 kN으로 나타났음. 실험체는 정방향 층간변위비 1.5%에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm) 구간에서 균열이 점차 증가하였으며, 부방향 층간변위비 2.0%에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에서 균열이 점차 증가하며 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 정방향 층간변위비 3.5%에서 기동 계면 오프닝이 증가하며 계면 콘크리트가 국부적으로 탈락하였으며, 부방향 층간변위비 3.5%에서 슬리브 상부 구간에서 콘크리트 압괴에 의하여 국부적으로 탈락하였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 4.5\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) HPN3 실험체 하중-변위비 곡선

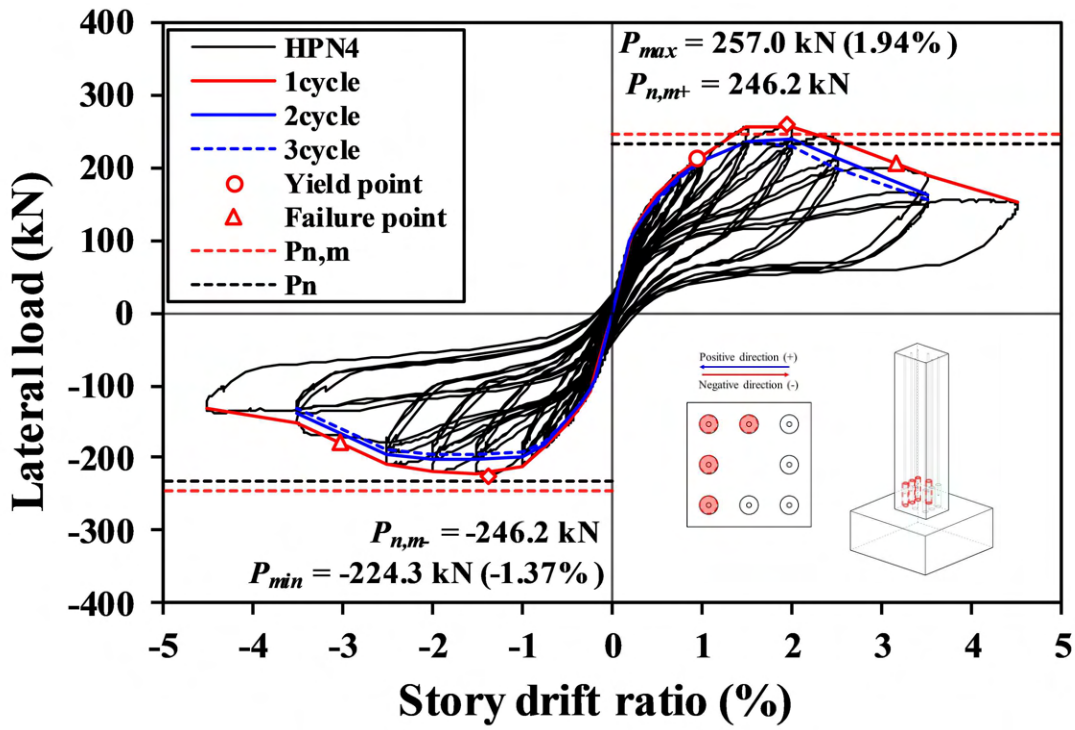


(b) HPN3 실험체 최종 파괴형상

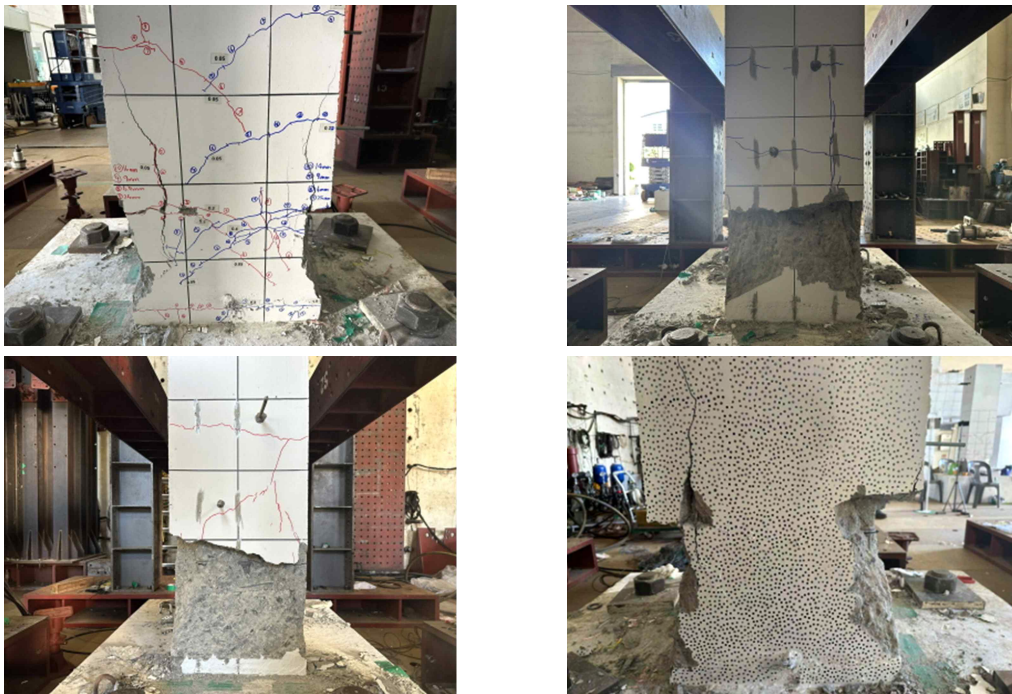
[그림 4-20] HPN3 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ HPN4 실험체 (PC, 60 MPa 이상 그라우트, 1번, 2번, 4번, 7번 슬리브 결함)

[그림 4-21]은 HPN4 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. HPN4 실험체는 층간변위비 $\pm 0.25\%$ 에서 기둥 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 $\pm 0.75\%$ 에서 기둥 전단균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.92% , 부방향 0.79% 에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 1.94% 에서 257.0 kN , 부방향 1.37% 에서 224.3 kN 으로 나타났음. 실험체는 정방향 층간변위비 1.5% 에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm) 구간에서 균열이 점차 증가하였으며, 부방향 층간변위비 1.0% 에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에서 균열이 점차 증가하며 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 정방향 층간변위비 3.5% 에서 기둥 계면 오프닝이 증가하며 계면 콘크리트가 국부적으로 탈락하였으며, 부방향 층간변위비 3.5% 에서 슬리브 상부 구간에서 콘크리트 압괴에 의하여 국부적으로 탈락하였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) HPN4 실험체 하중-변위비 곡선

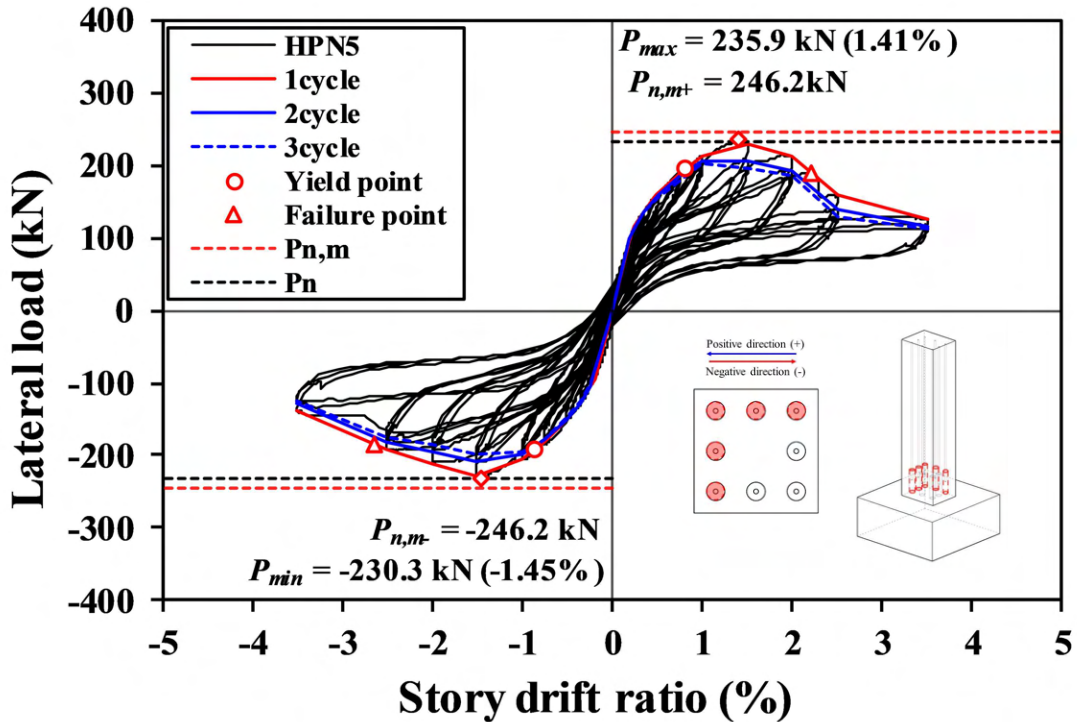


(b) HPN4 실험체 최종 파괴형상

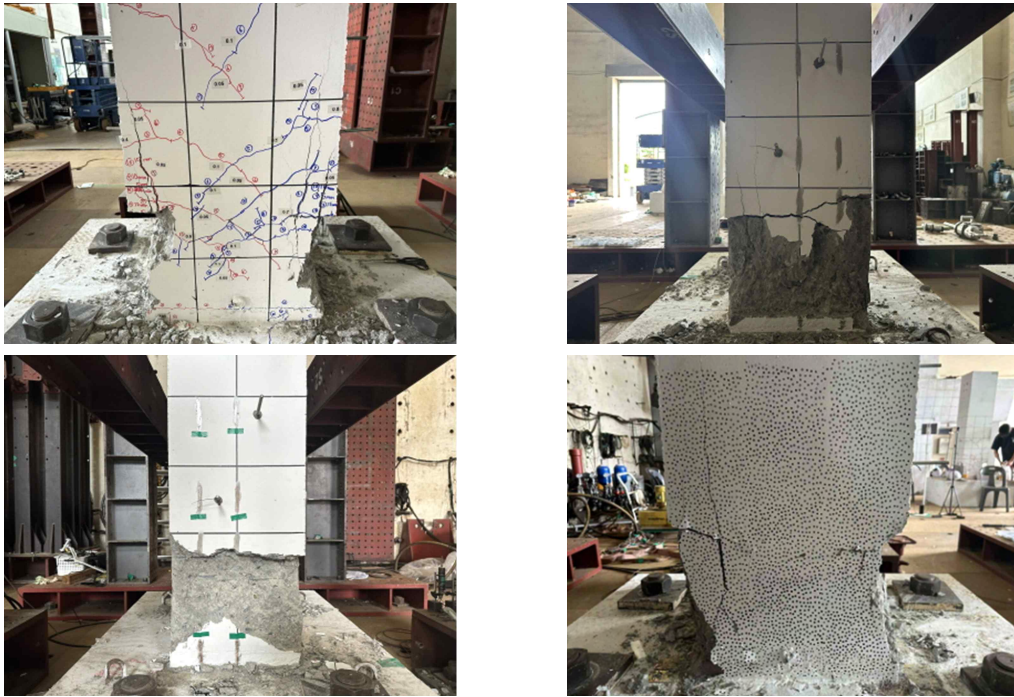
[그림 4-21] HPN4 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ HPN5 실험체 (PC, 60 MPa 이상 그라우트, 1번, 2번, 3번, 4번, 7번 슬리브 결함)

[그림 4-22]는 HPN5 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. HPN5 실험체는 층간변위비 $\pm 0.25\%$ 에서 기동 힘균열이 발생하였으며, 층간변위비 정방향 1.0%, 부방향 0.75%에서 기동 전단균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.79%, 부방향 0.86%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 1.41%에서 235.9 kN, 부방향 1.45%에서 230.3 kN으로 나타났음. 실험체는 층간변위비 $\pm 1.5\%$ 에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm) 구간에서 균열이 점차 증가하였으며 회전 구속(탁킹) 거동을 하였음. 실험체는 정방향 층간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 기동 계면 오프닝이 증가하며 계면 콘크리트가 국부적으로 탈락하였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) HPN5 실험체 하중-변위비 곡선

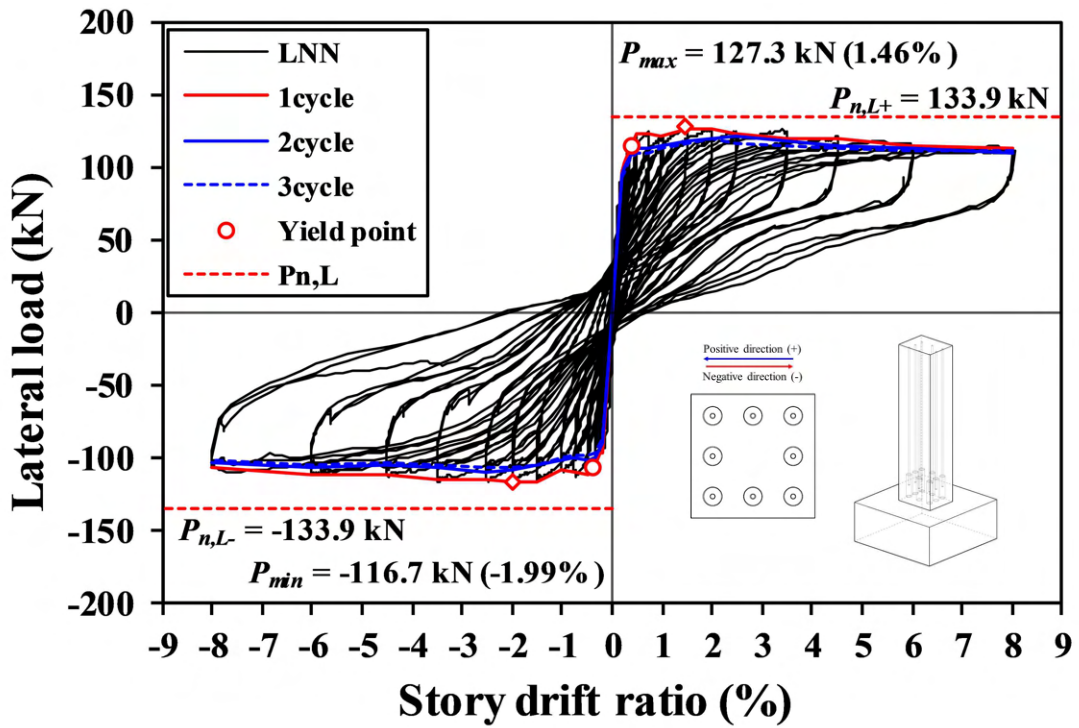


(b) HPN5 실험체 최종 파괴형상

[그림 4-22] HPN5 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ LNN 실험체 (PC, 20 MPa 그라우트, 충전결함 없음)

[그림 4-23]은 LNN 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. LNN 실험체는 층간변위비 정방향 0.5%, 부방향 0.35%에서 기동 휨균열이 발생하였음. 층간변위비 $\pm 0.75\%$ 부터 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm) 균열이 점차 증가하였으며, 층간변위비 $\pm 1.0\%$ 이후 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 0.38\%$ 에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대 하중은 층간변위비 정방향 1.46%에서 127.3 kN, 부방향 1.99%에서 116.7 kN으로 나타났음. 실험체는 층간변위비 $\pm 6\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어지지 않아 층간변위비 8%까지 가력 후 실험을 종료하였음



(a) LNN 실험체 하중-변위비 곡선

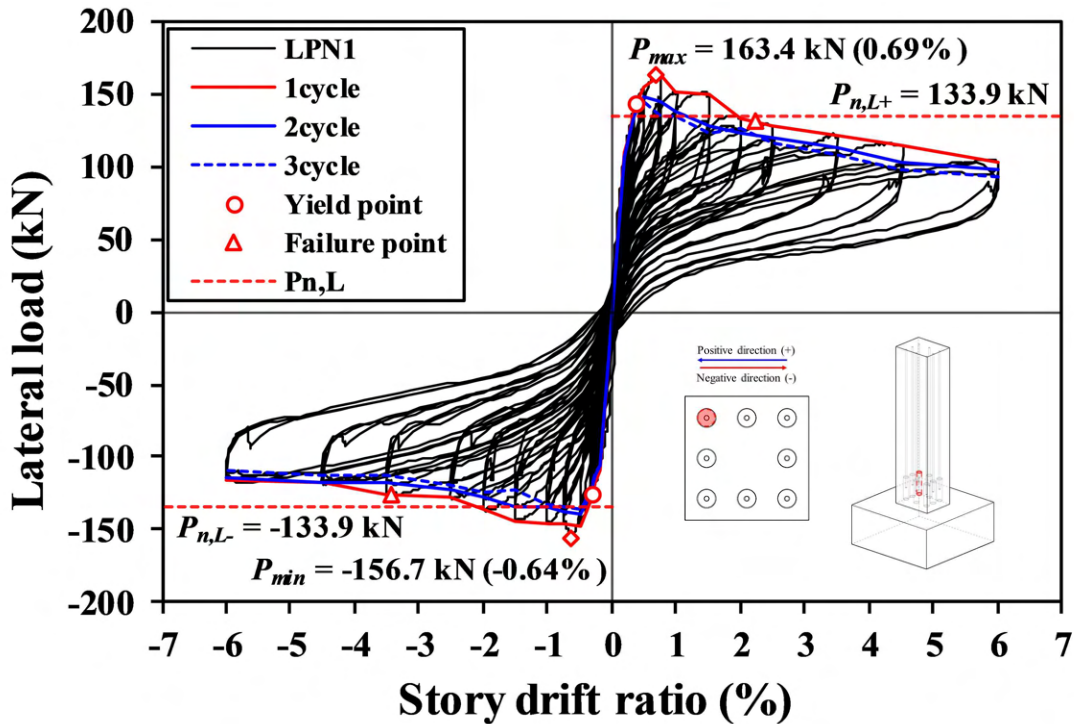


(b) LNN 실험체 최종 파괴형상

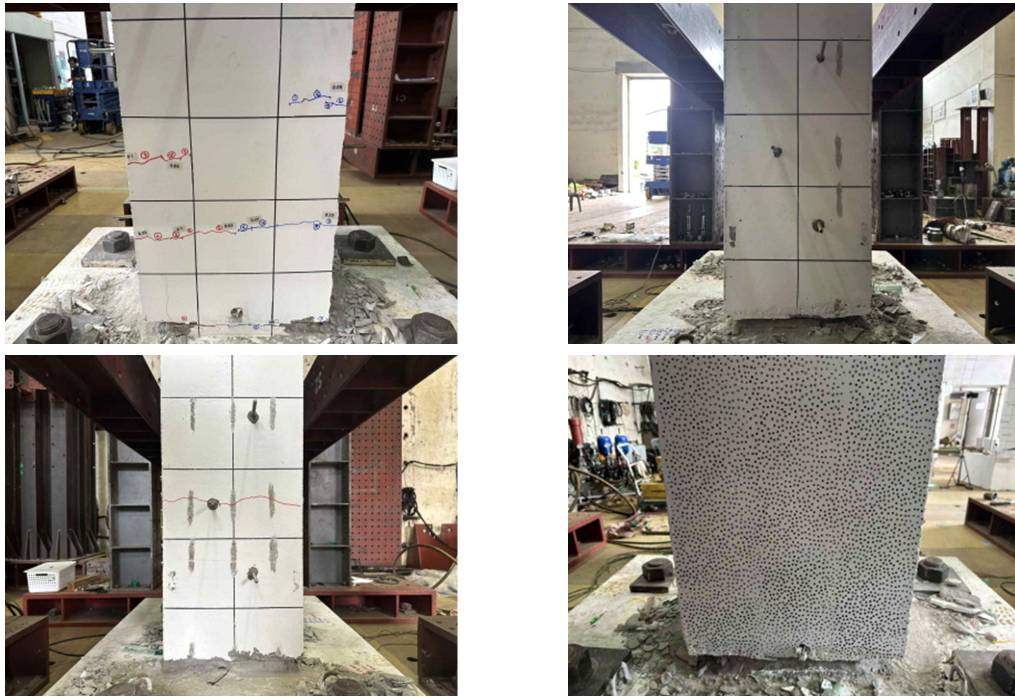
[그림 4-23] LNN 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ LPN1 실험체 (PC, 20 MPa 그라우트, 1번 슬리브 결함)

[그림 4-24]는 LPN1 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. LPN1 실험체는 층간변위비 정방향 0.35%, 부방향 0.25%에서 기동 휨균열이 발생하였음. 층간변위비 $\pm 0.75\%$ 부터 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm) 균열이 점차 증가하였으며, 층간변위비 $\pm 1.0\%$ 이후 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.38%, 부방향 0.31%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 0.69%에서 163.4 kN, 부방향 0.64%에서 156.7 kN으로 나타났음. 실험체는 층간변위비 $\pm 6\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) LPN1 실험체 하중-변위비 곡선

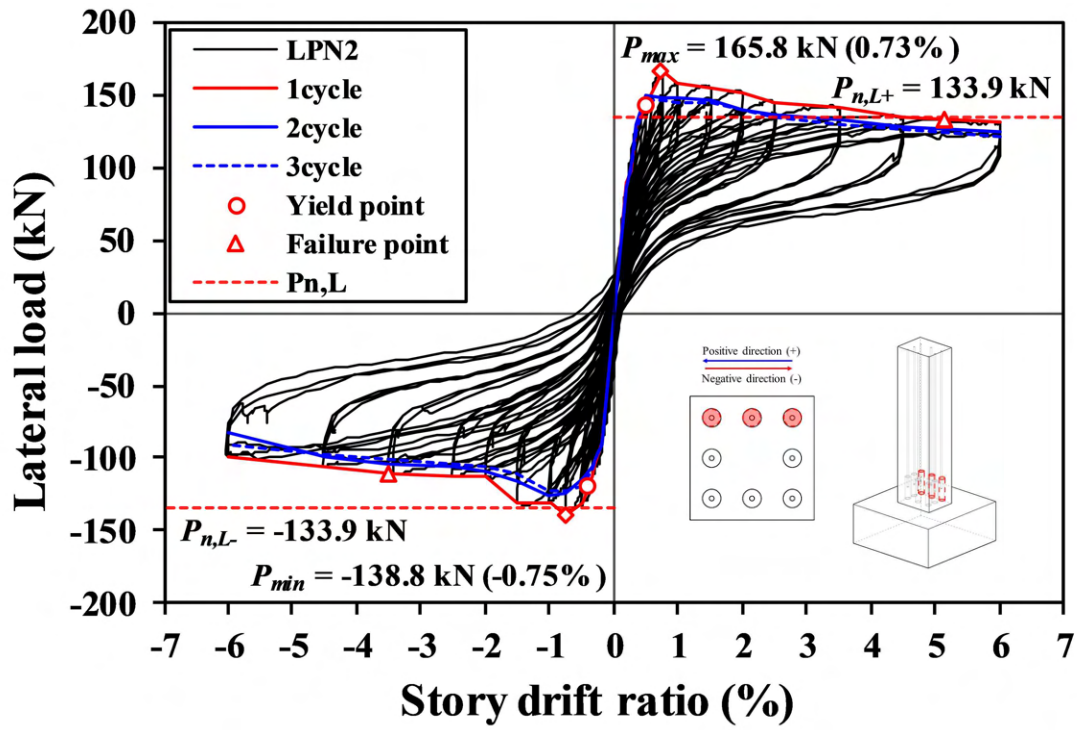


(b) LPN1 실험체 최종 파괴형상

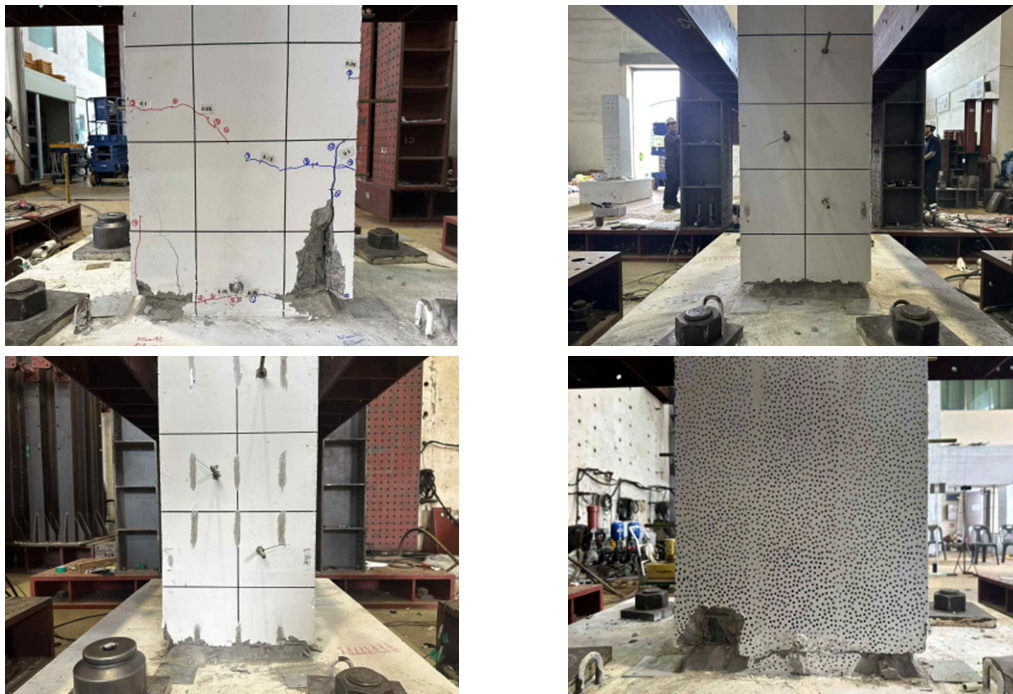
[그림 4-24] LPN1 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ LPN2 실험체 (PC, 20 MPa 그라우트, 1번, 2번, 3번 슬리브 결합)

[그림 4-25]는 LPN2 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. LPN2 실험체는 층간변위비 정방향 0.5%, 부방향 0.20%에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm)과 층간변위비 정방향 0.5%, 부방향 0.35%에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에서 기둥 휨 균열이 발생하였으며, 부방향 층간변위비 0.75% 기둥 전단 균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.48%, 부방향 0.41%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 0.73%에서 165.8 kN, 부방향 0.75%에서 138.8 kN으로 나타났음. 층간변위비 $\pm 2.0\%$ 부터 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm) 균열이 점차 증가하며 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 6\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) LPN2 실험체 하중-변위비 곡선

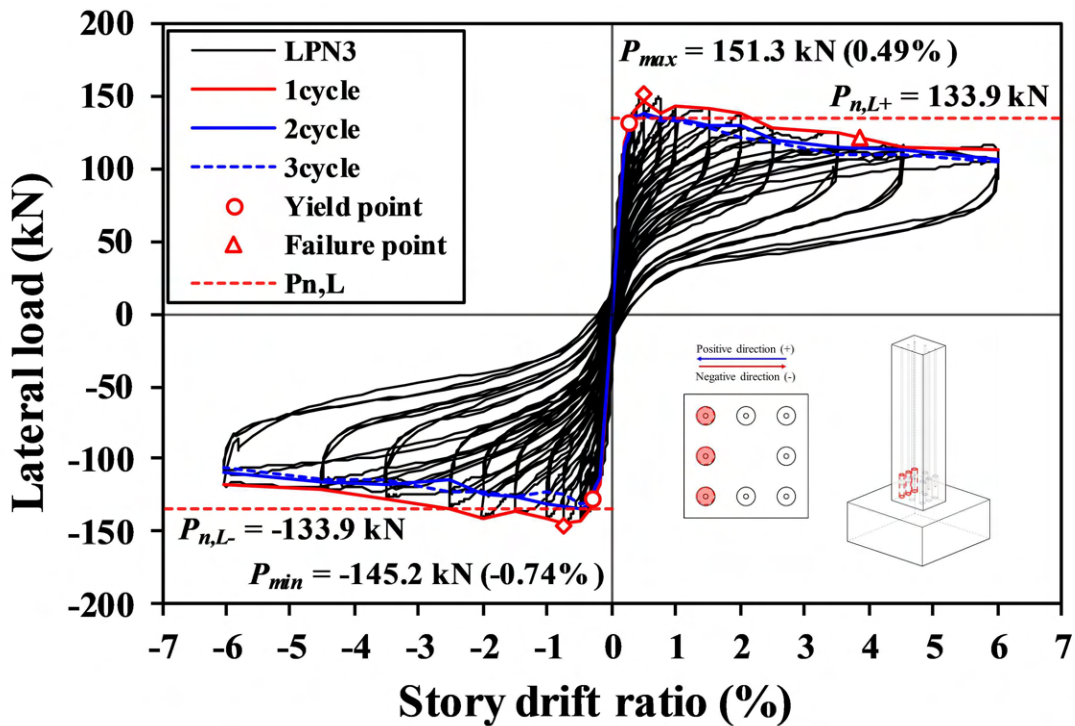


(b) LPN2 실험체 최종 파괴형상

[그림 4-25] LPN2 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ LPN3 실험체 (PC, 20 MPa 그라우트, 1번, 4번, 7번 슬리브 결함)

[그림 4-26]은 LPN3 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. LPN3 실험체는 층간변위비 $\pm 0.25\%$ 에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)과 층간변위비 정방향 0.75%, 부방향 0.5%에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm)에서 기동 휨 균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.28%, 부방향 0.3%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 0.49%에서 151.3 kN, 부방향 0.74%에서 145.2 kN으로 나타났음. 층간변위비 $\pm 1.0\%$ 부터 슬리브 하부 구간에서 균열이 점차 증가하며 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 6\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) LPN3 실험체 하중-변위비 곡선

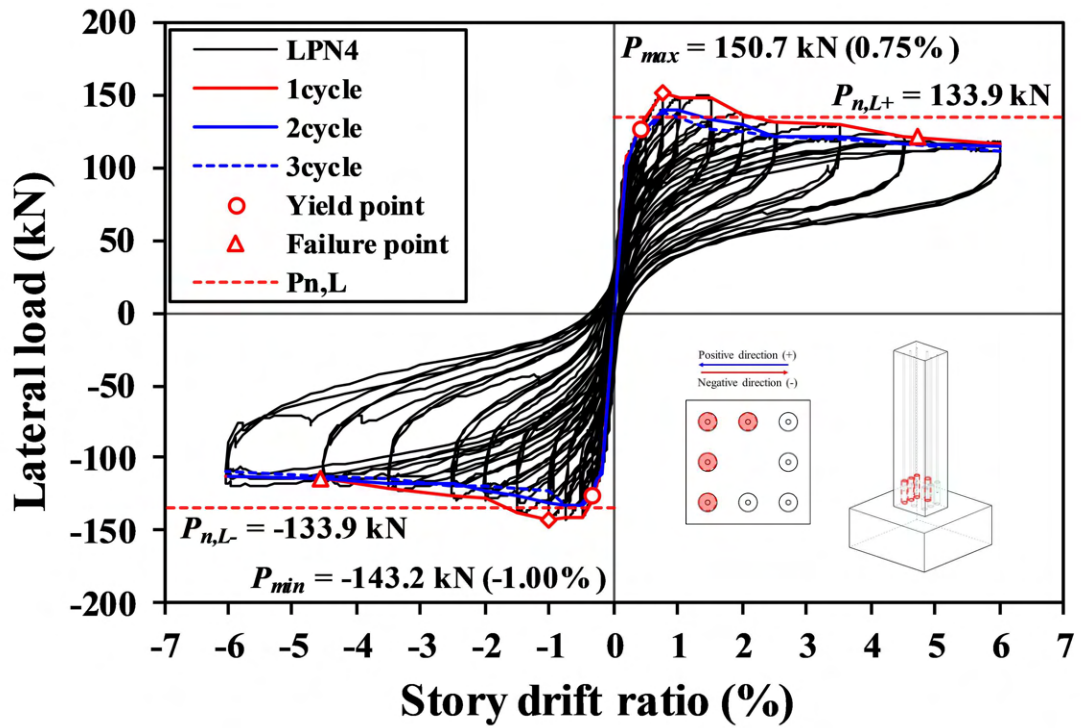


(b) LPN3 실험체 최종 파괴형상

[그림 4-26] LPN3 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ LPN4 실험체 (PC, 20 MPa 그라우트, 1번, 2번, 4번, 7번 슬리브 결함)

[그림 4-27]은 LPN4 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. LPN4 실험체는 층간변위비 $\pm 0.2\%$ 에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm)과 층간변위비 정방향 0.75%, 부방향 0.35%에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에서 기동 휨 균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.4%, 부방향 0.33%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 0.75%에서 150.7 kN, 부방향 1.0%에서 143.2 kN으로 나타났음. 층간변위비 $\pm 0.75\%$ 이후 슬리브 하부 구간에서 균열이 점차 증가하며 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 6\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) LPN4 실험체 하중-변위비 곡선

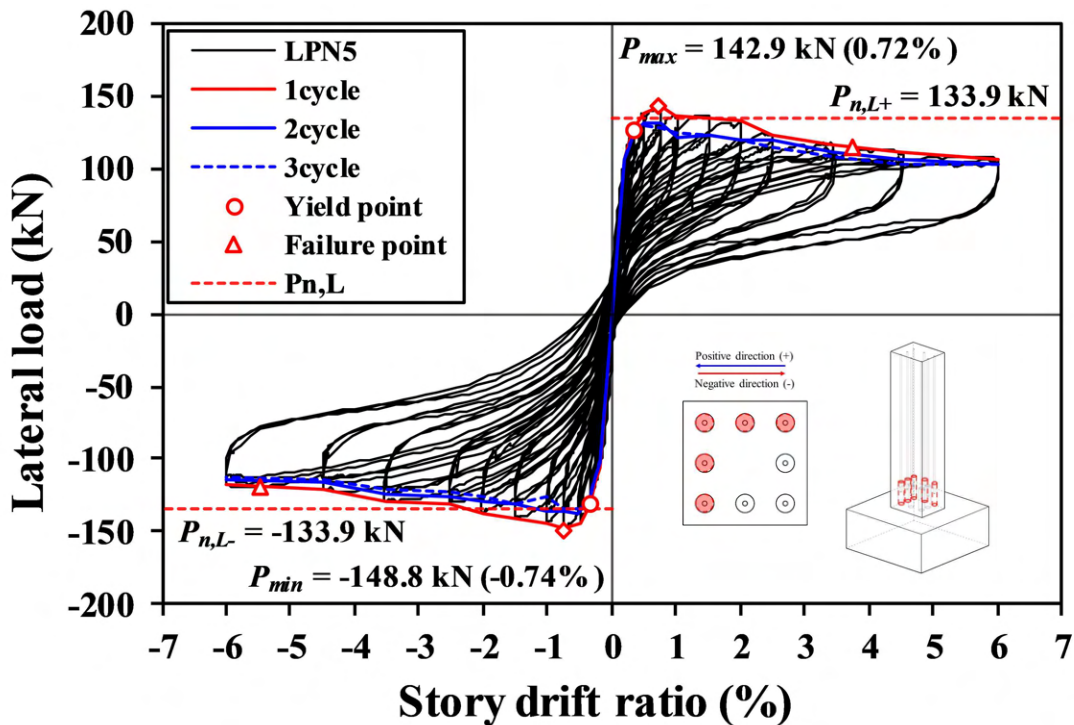


(b) LPN4 실험체 최종 파괴형상

[그림 4-27] LPN4 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ LPN5 실험체 (PC, 20 MPa 그라우트, 1번, 2번, 3번, 4번, 7번 슬리브 결함)

[그림 4-28]은 LPN5 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. LPN5 실험체는 층간변위비 $\pm 0.25\%$ 에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm)과 층간변위비 정방향 0.35%, 부방향 0.5%에서 슬리브 상부 구간(기초 상부면으로부터 330mm)에서 기동 힘 균열이 발생하였으며, 정방향 층간변위비 0.5%에서 기동 전단 균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.32%, 부방향 0.35%에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 0.72%에서 142.9 kN, 부방향 0.74%에서 148.8 kN으로 나타났음. 층간변위비 $\pm 0.75\%$ 이후 슬리브 하부 구간에서 균열이 점차 증가하며 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 층간변위비 $\pm 6\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음.



(a) LPN5 실험체 하중-변위비 곡선

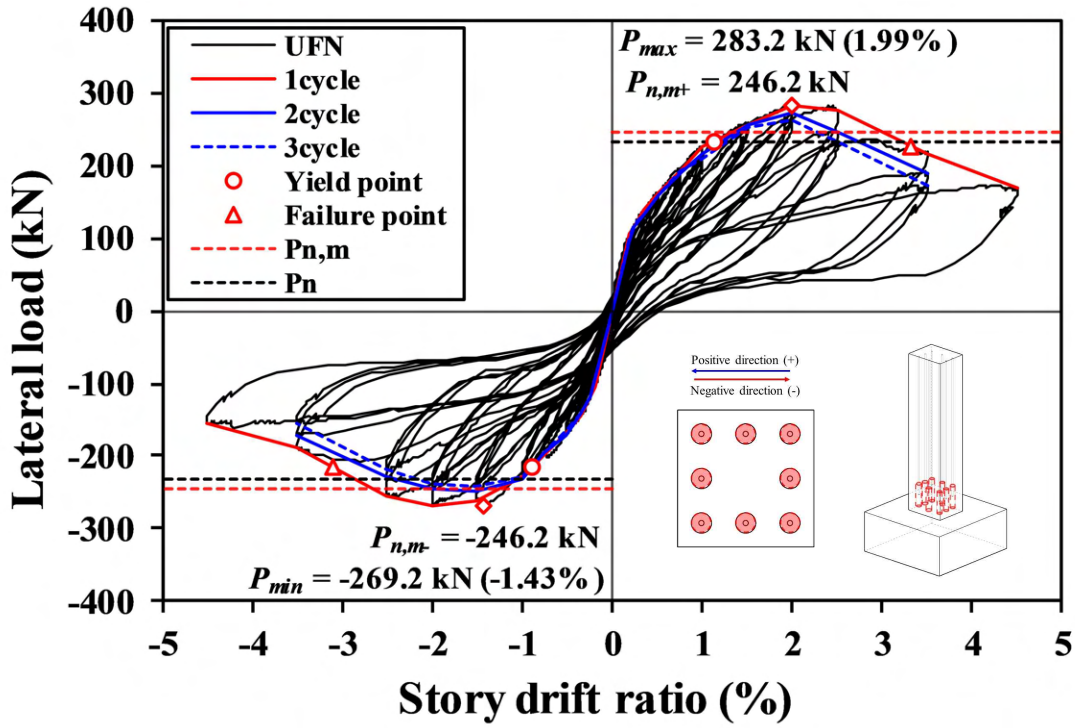


(b) LPN5 실험체 최종 파괴형상

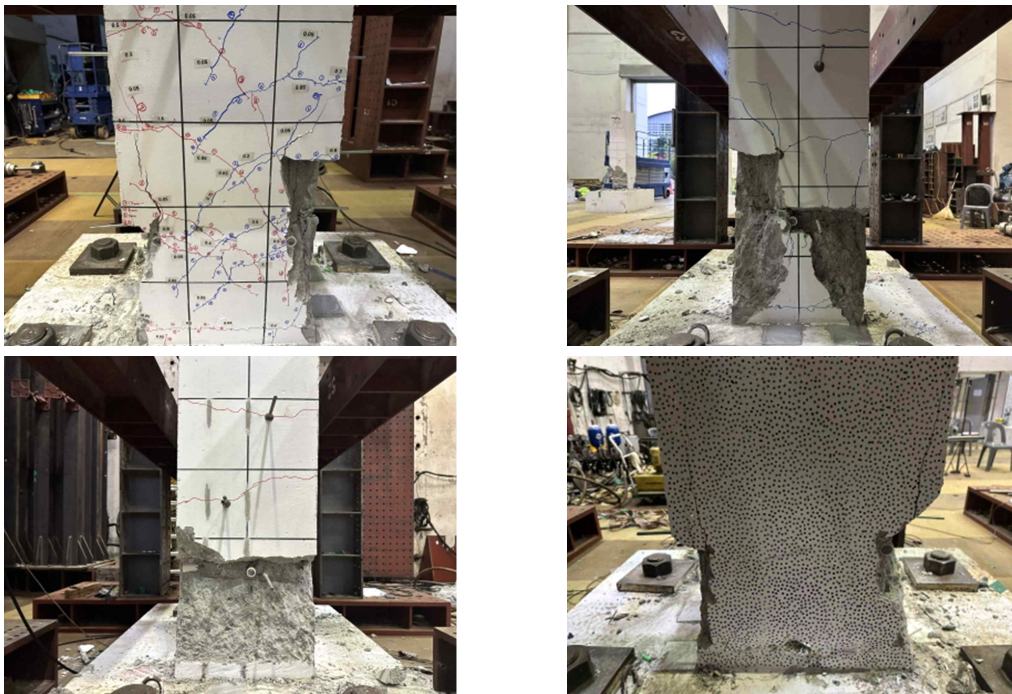
[그림 4-28] LPN5 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

■ UFN 실험체 (PC, 100 MPa 그라우트, 모든 슬리브 충전결함)

[그림 4-29]는 UFN 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. UFN 실험체는 층간변위비 $\pm 0.25\%$ 에서 기동 휨 균열이 발생하였으며, 층간변위비 0.75% 에서 기동 전단 균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.92% , 부방향 0.87% 에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 1.99% 에서 283.2 kN , 부방향 1.43% 에서 269.2 kN 으로 나타났음. 실험체는 층간변위비 정방향 2.0% , 부방향 1.5% 이후 슬리브 상부구간에서 균열이 점차 증가하며 회전 구속(락킹) 거동을 보였음. 실험체는 층간변위비 정방향 4.5% , 부방향 3.5% 에서 가력면 콘크리트가 압괴에 의해 국부적으로 탈락하였으며, 층간변위비 $\pm 4.5\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) UFN 실험체 하중-변위비 곡선

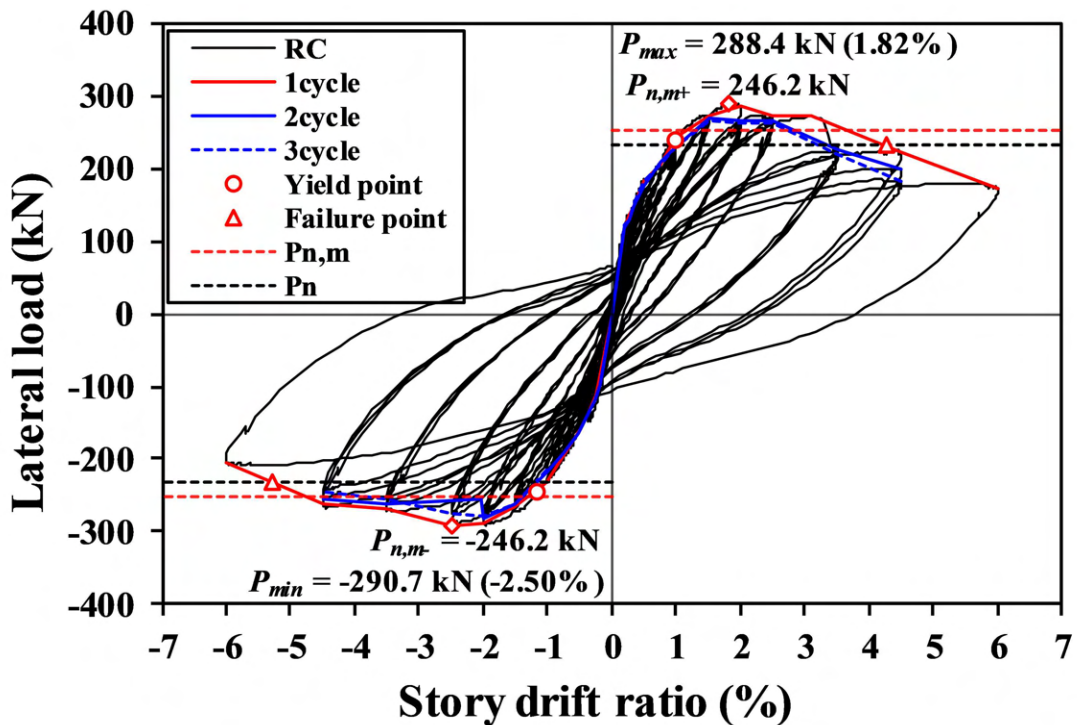


(b) UFN 실험체 최종 파괴형상

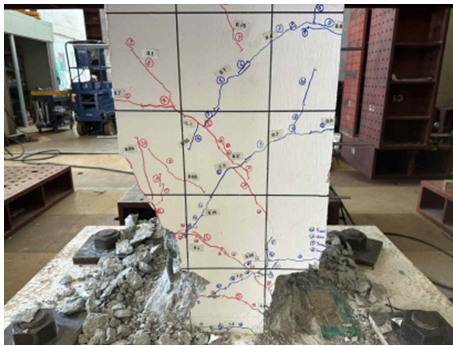
[그림 4-29] UFN 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

RC 실험체

[그림 4-30]은 RC 실험체의 하중-변위비 곡선과 실험체 최종 파괴형상을 나타내었음. RC 실험체는 층간변위비 $\pm 0.2\%$ 에서 기동 휨 균열이 발생하였으며, 층간변위비 정방향 0.5% , 부방향 0.75% 에서 기동 전단 균열이 발생하였음. 실험체는 층간변위비 정방향 0.98% , 부방향 1.19% 에서 항복점에 도달하였음. 실험체 최대하중은 층간변위비 정방향 1.82% 에서 288.4 kN , 부방향 2.5% 에서 290.7 kN 으로 나타났음. 실험체는 층간변위비 정방향 3.5% , 부방향 2.5% 에서 가력면 콘크리트가 압괴에 의해 국부적으로 탈락하였으며, 층간변위비 $\pm 6\%$ 에서 최대하중의 80% 아래로 떨어져 실험을 종료하였음



(a) RC 실험체 하중-변위비 곡선



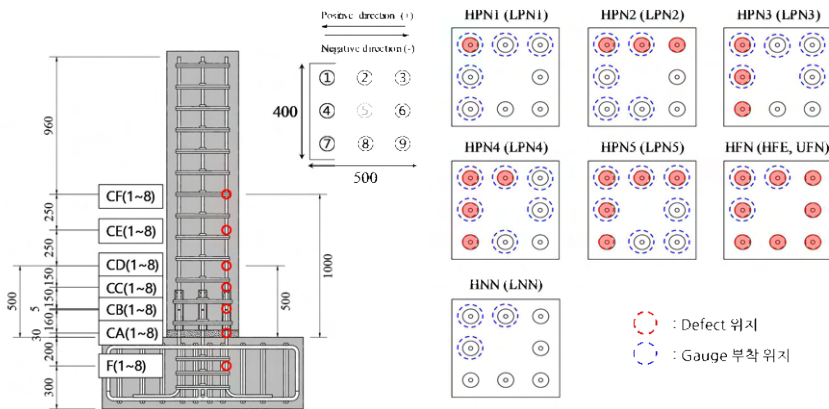
(b) RC 실험체 최종 파괴형상

[그림 4-30] RC 실험체 하중-변위비 곡선 및 최종 파괴형상

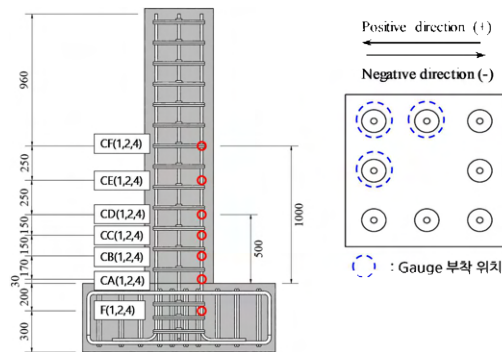
2.4 실험결과 분석

1) 주철근 변형률 추이

주철근의 변형률을 계측하는 것은 부재 단면 내력 발현 과정에서 철근이 실제로 부담하는 응력을 정량적으로 파악할 수 있으며, 하중 증가에 따른 인장·압축 변형의 분포를 명확히 분석할 수 있음. 이러한 변형률 데이터는 철근의 항복 여부와 위치를 판단하는 근거가 되며, 단면의 응력 분담 및 거동 특성을 검증하는 데 필수적임. [그림 4-31]은 PC 실험체 및 RC 실험체의 철근 변형률 계측 위치를 나타내었음



(a) PC 실험체

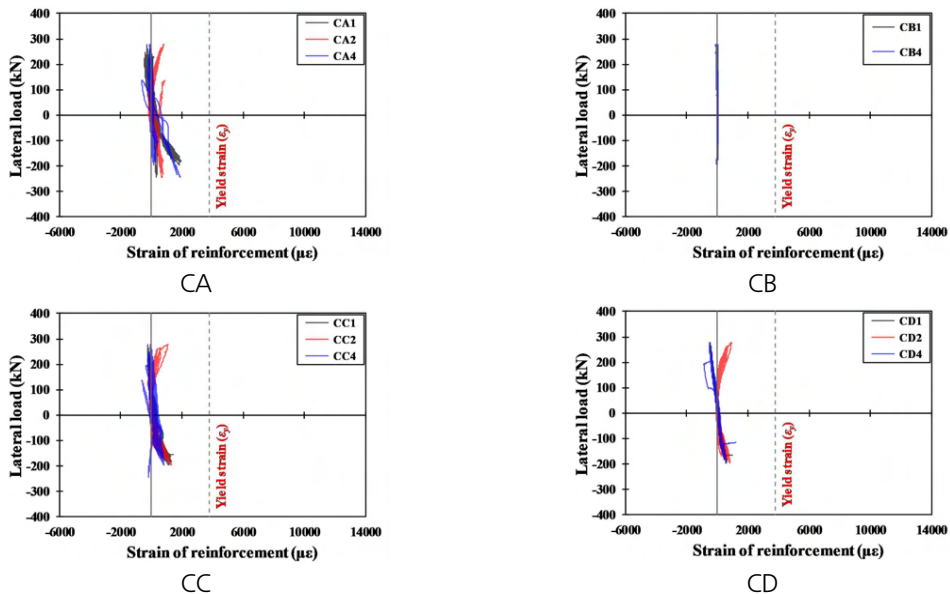
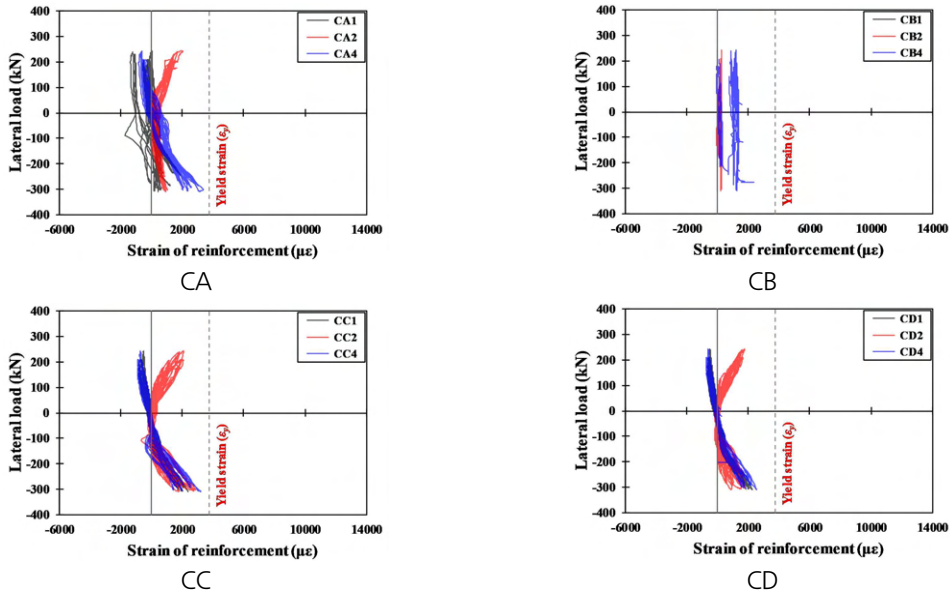


(b) RC 실험체

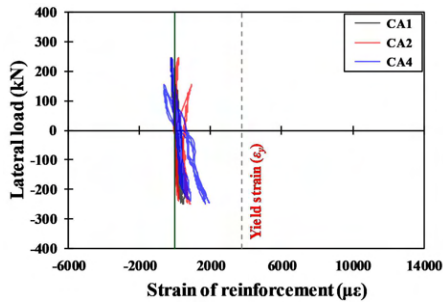
[그림 4-31] 실험체 게이지 부착위치

■ H (60 MPa 이상) 실험체

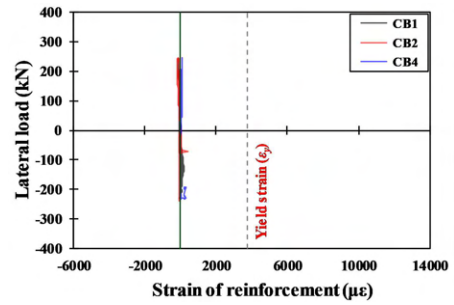
[그림 4-32]는 H 실험체의 기둥 주철근의 변형률 계측 결과를 나타내었음. 기초와 기둥 최하단으로부터 500mm 위 구간은 변형이 크게 일어나지 않았으며, 모든 주철근은 항복하지 않았으나 기계적 이음 장치 상·하부 (CC, CA)에서 항복에 가까운 변형률이 계측되었음.



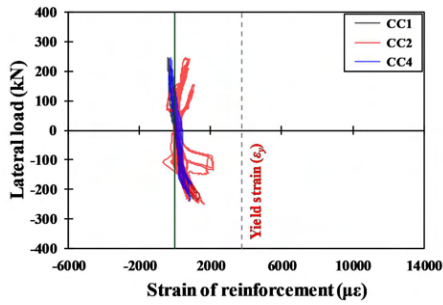
[그림 4-32] H 실험체 변형률 계측 결과(계속)



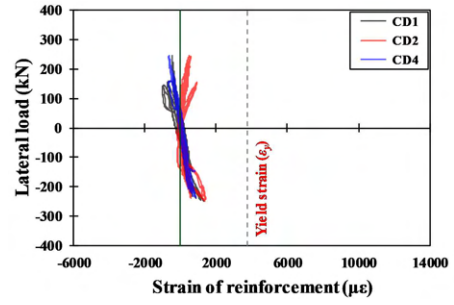
CA



CB

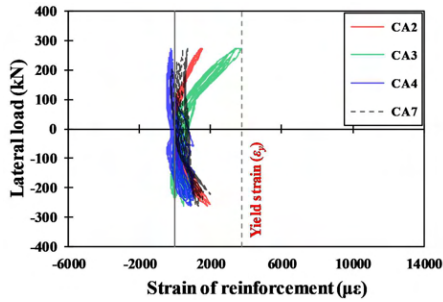


CC

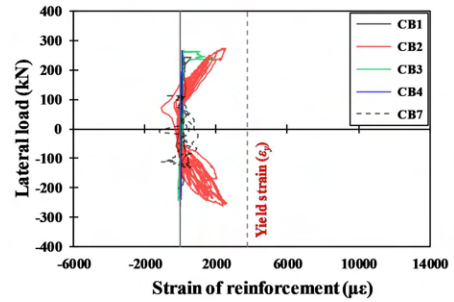


CD

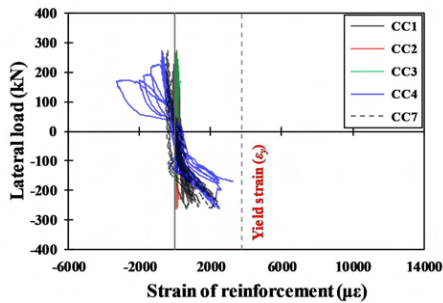
(c) HFE 실험체



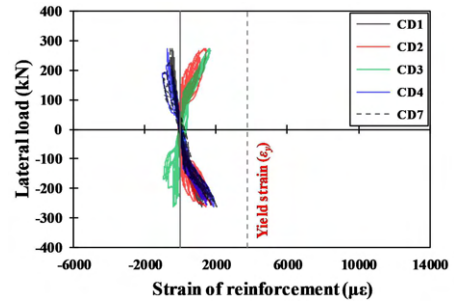
CA



CB



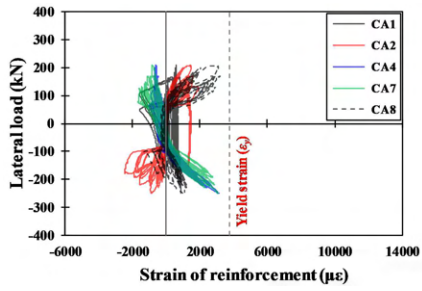
CC



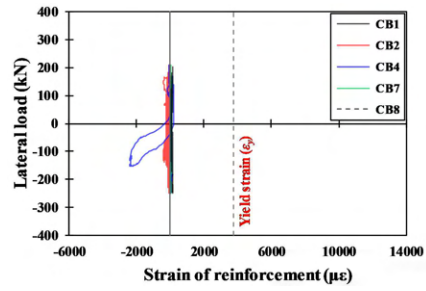
CD

(d) HPN1 실험체

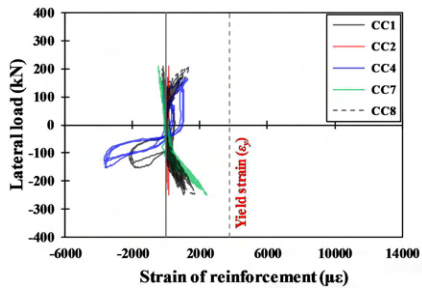
[그림 4-32] H 실험체 변형률 계측 결과(계속)



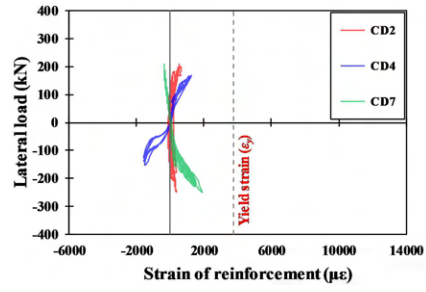
CA



CB

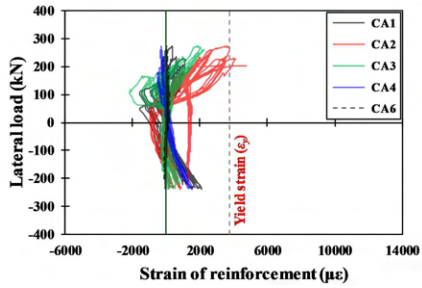


CC

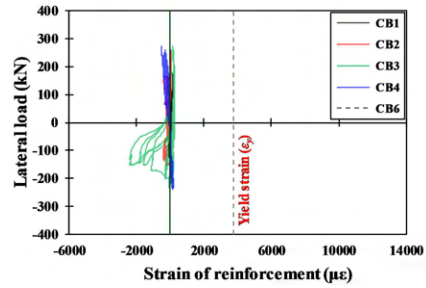


CD

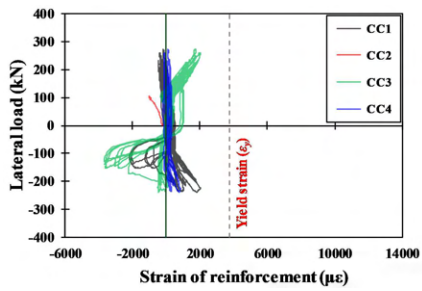
(e) HPN2 실험체



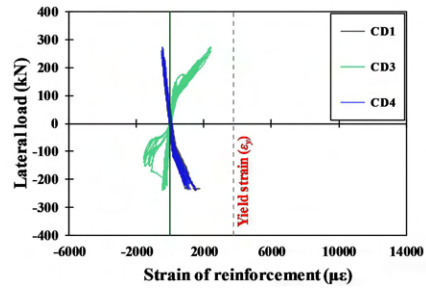
CA



CB



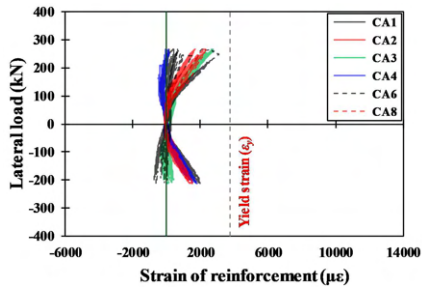
CC



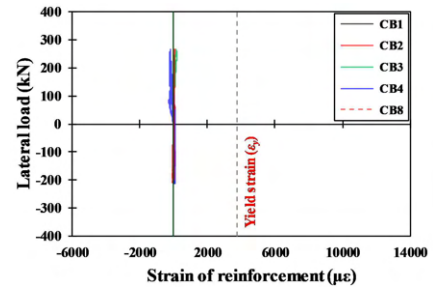
CD

(f) HPN3 실험체

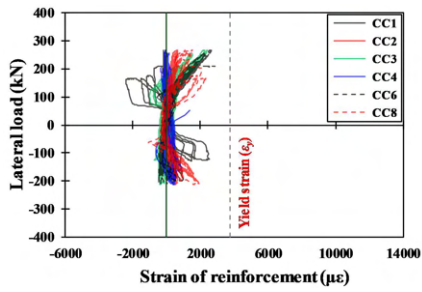
[그림 4-32] H 실험체 변형률 계측 결과(계속)



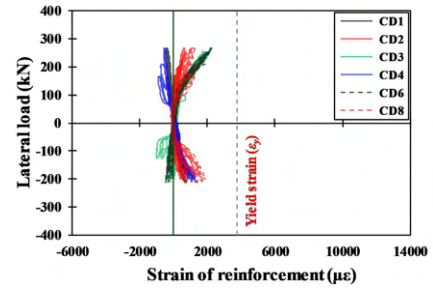
CA



CB

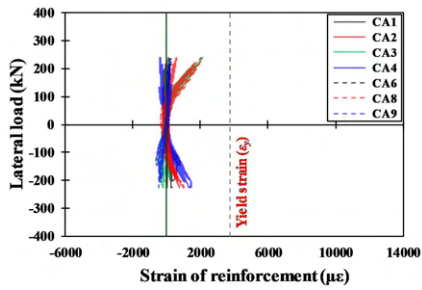


CC

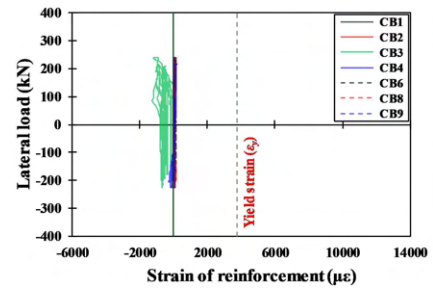


CD

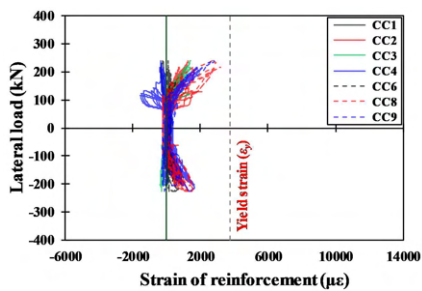
(g) HPN4 실험체



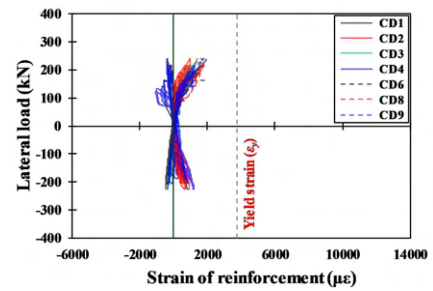
CA



CB



CC



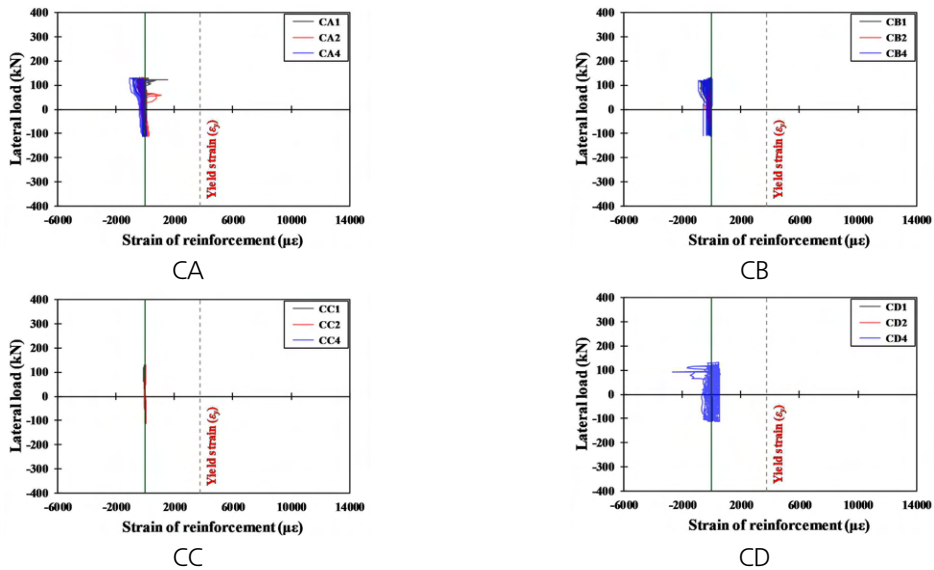
CD

(h) HPN5 실험체

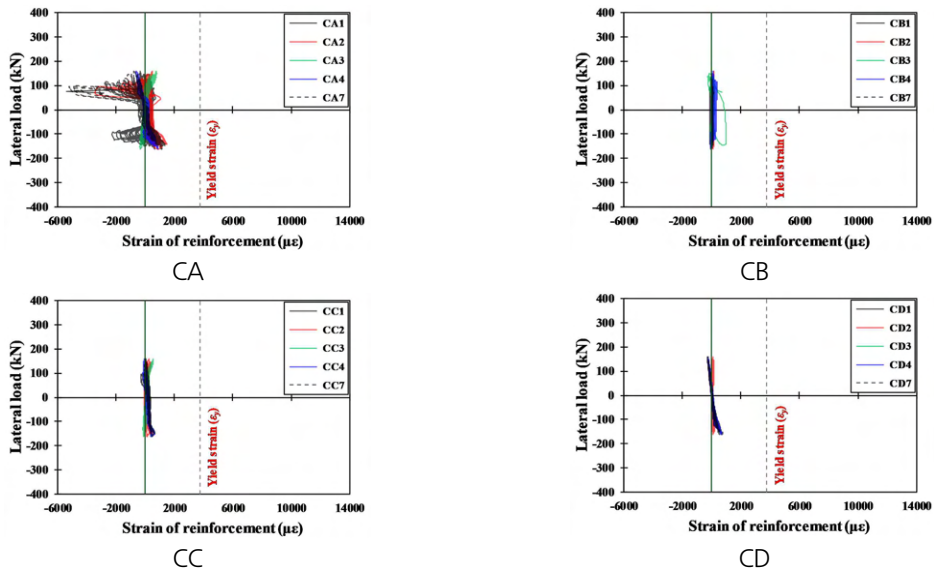
[그림 4-32] H 실험체 변형률 계측 결과(계속)

■ L (20 MPa) 실험체

[그림 4-33]은 L 실험체의 기초 및 기둥 주철근의 변형률 계측 결과를 나타내었음. L 실험체는 실험 초기변위비 (0.5~0.75%)에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm)에서 균열이 집중되어 회전 구속(락킹) 거동을 하였으며, 이에 따라 슬리브 내의 철근과 그라우트의 부착성능이 부족하여 전반적으로 보 주철근의 변형률이 낮게 계측된 것으로 판단됨

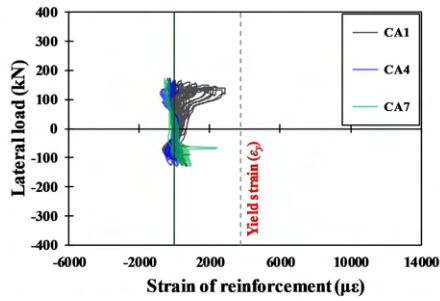


(a) LNN 실험체

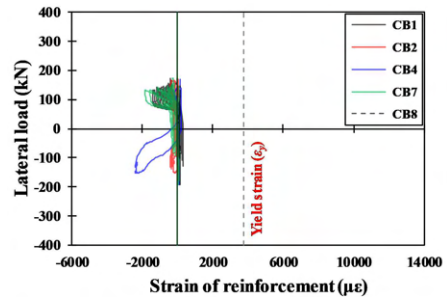


(b) LPN1 실험체

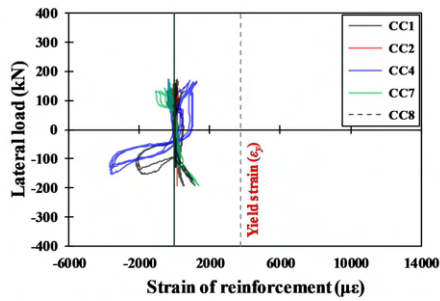
[그림 4-33] L 실험체 변형률 계측 결과(계속)



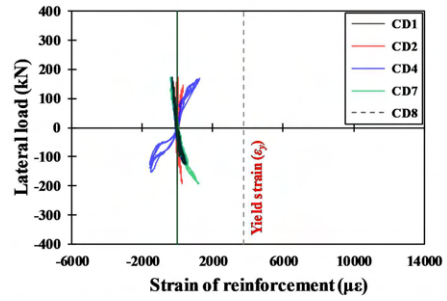
CA



CB

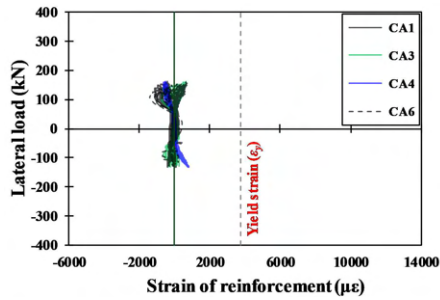


CC

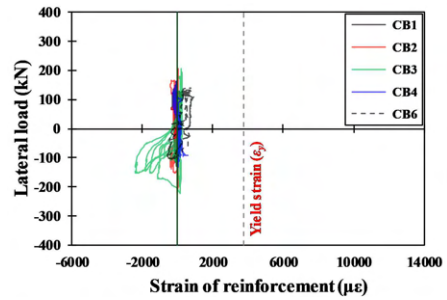


CD

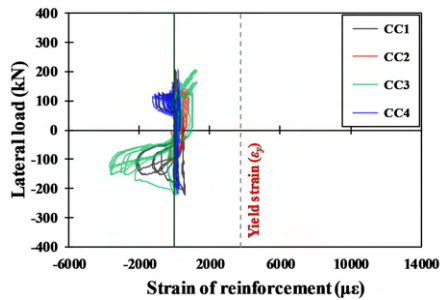
(c) LPN2 실험체



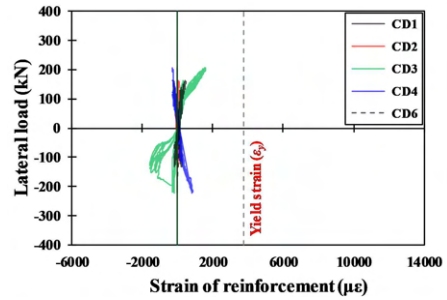
CA



CB



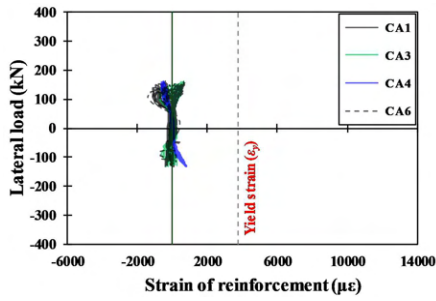
CC



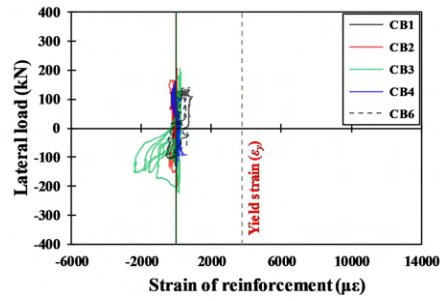
CD

(d) LPN3 실험체

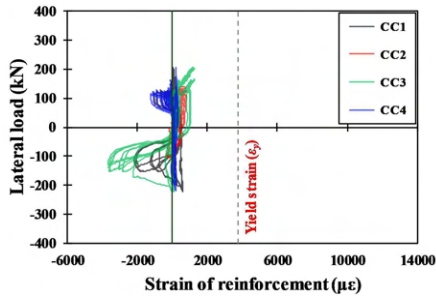
[그림 4-33] L 실험체 변형률 계측 결과(계속)



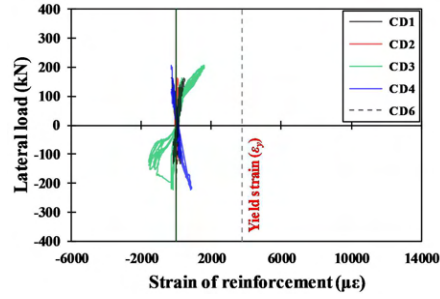
CA



CB

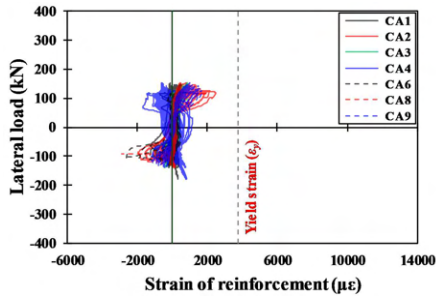


CC

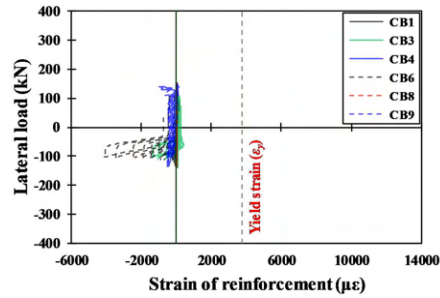


CD

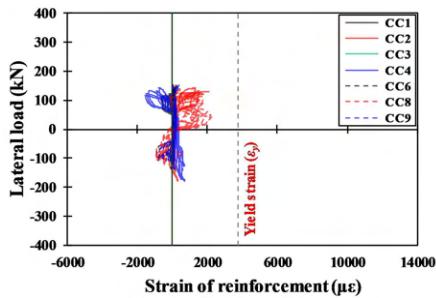
(e) LPN4 실험체



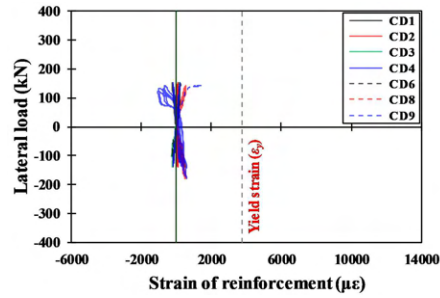
CA



CB



CC



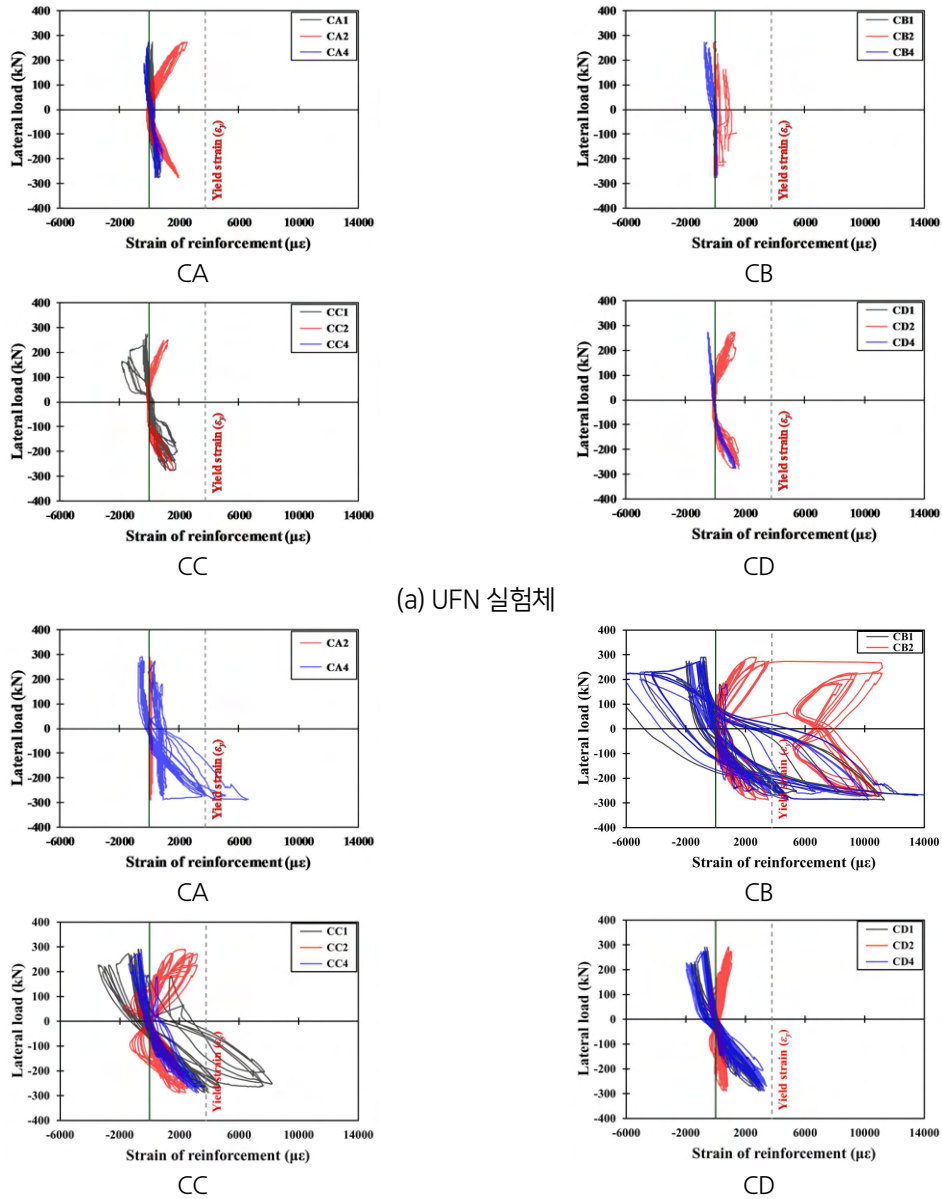
CD

(f) LPN5 실험체

[그림 4-33] L 실험체 변형을 계측 결과(계속)

■ UFN (100 MPa) 실험체, RC

[그림 4-34]는 UFN 실험체 및 RC 실험체의 기초 및 기둥 주철근의 변형률 계측 결과를 나타내었음. UFN 실험체는 모든 슬리브에 결합이 있어 조기에 기둥 주철근이 슬립현상이 발생하여 변형률이 다소 낮게 계측되었음. RC 실험체의 경우 주철근이 연속적으로 배근되어 있어 충분히 항복하여 소성힌지가 형성된 것으로 판단됨



(a) UFN 실험체

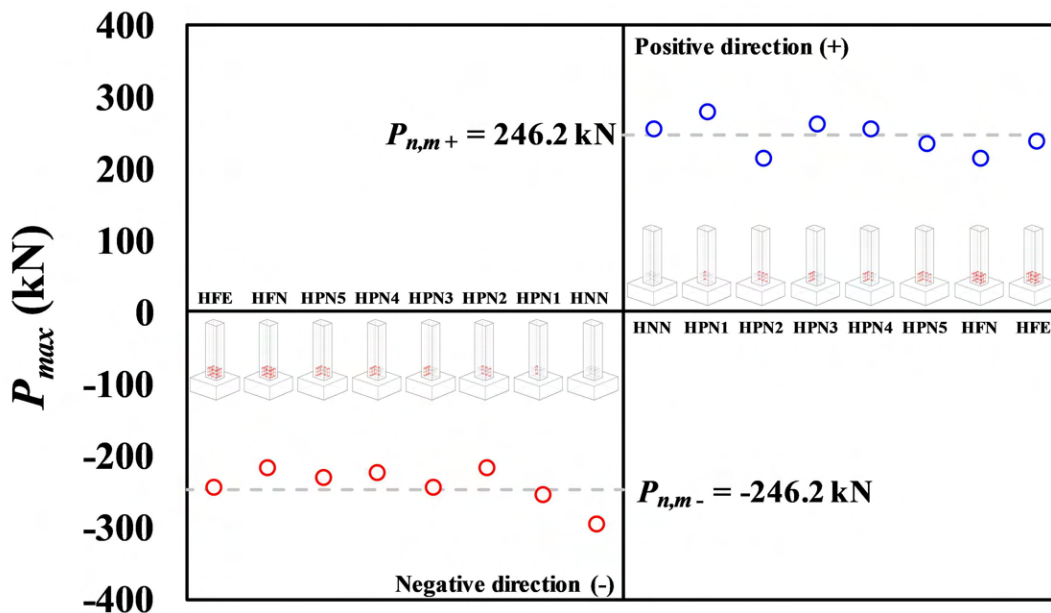
(b) RC 실험체

[그림 4-34] UFN 실험체 및 RC 실험체 변형률 계측 결과(계속)

2) 실험체 강도 비교

■ H (60 MPa 이상) 실험체

[그림 4-35]는 H 실험체의 각 가력 방향에 따른 실험체 최대강도를 실험체 순서대로 나타내었으며, 그림의 세로축은 최대강도를 공칭강도로 나눈 초과강도를 나타내었음. 정방향 가력 시, 기둥 단면의 인장측에 결함이 위치 하지 않은 HNN, HPN1, HPN3 실험체와 추가로 중립축 부근 슬리브 내부에 충전결함이 있는 HPN4 실험체는 공칭강도를 상회하는 값으로 나타났으며, 그 외 충전결함의 비율이 높은 실험체는 공칭강도를 만족하지 못하였음. 부방향 가력 시, 슬리브 내부 충전결함이 없는 HNN 실험체와 결함의 개소가 가장 적은 HPN1 실험체가 공칭강도를 만족하였으며, 그 외 인장측에 충전결함의 개소가 다수인 실험체는 공칭강도를 만족하지 못하였음. HFN 실험체와 비교하였을 때, 에폭시 보강을 적용한 HFE 실험체는 강도가 약 1.12배 증가된 것으로 나타나 에폭시 보강에 따른 부착성능을 발휘할 수 있는 것으로 판단됨



[그림 4-35] H 실험체 각 가력방향 별 최대강도

■ L (20 MPa) 실험체

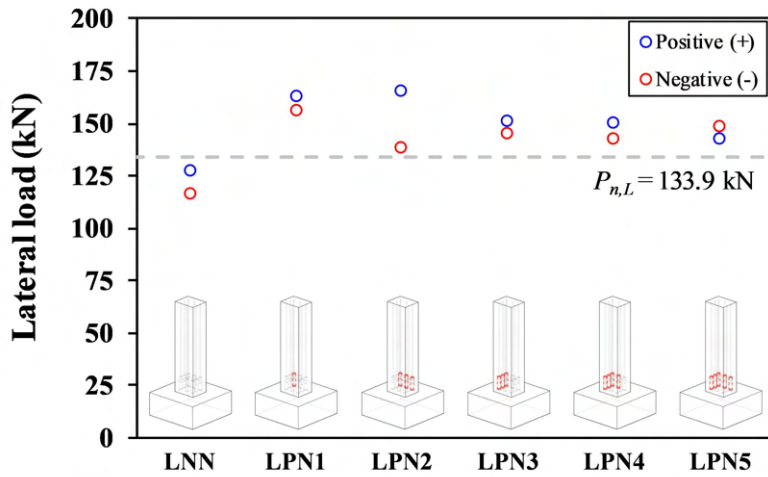
L 실험체는 다음의 식 (4.3)과 같이 2024년도 연구에서 산정한 시공하중에 대한 하중비 η_f 를 적용하여 식 (4.4)와 같이 $P_{n,L}$ 을 산정하여 후속 공정 진행 가능 여부에 대한 평가를 수행하였음

$$\eta_f = \frac{1.2C_D + 1.4C_m + 1.6C_P + 1.6C_H}{(1.2D + 1.6L)/\Phi} = 0.544 \quad (4.3)$$

$$P_{n,L} = P_{n,m} \times \eta_f = 133.9 \text{ kN} \quad (4.4)$$

여기서, C_D 는 경화된 콘크리트 등 시공 고정하중, C_H 는 시공수평하중으로 총 수직 하중의 2%, C_M 은 시공 자재하중(이 연구에서는 0.2 kN/m^2), C_P 는 시공 작업원 및 장비 하중(이 연구에서는 2.5 적용)임

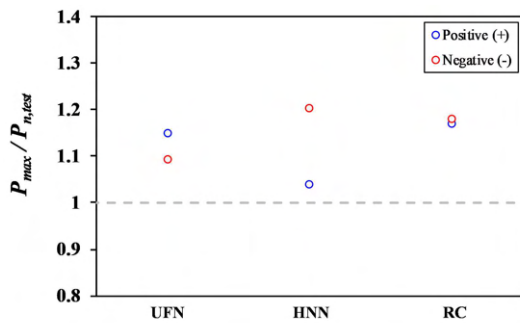
[그림 4-36]은 각 실험체의 최대강도를 나타내었음. 슬리브 내부 충전결함이 없는 LNN 실험체를 제외한 모든 실험체는 $P_{n,L}$ 강도를 만족하였음. LNN 실험체를 제외한 모든 실험체는 변위비 초기 단계(층간변위비 1.0% 미만)에서 슬리브 하부 구간(기초 상부면으로부터 50mm)에서 철근이 뽑히며 회전 구속(락킹) 거동을 보였으며, 이에 따라 동일한 파괴형상을 보였음. LNN 실험체의 경우 충전결함이 있는 실험체보다 낮은 변위비 (층간변위비 0.5% 미만)에서 회전 구속(락킹) 거동을 하여 강도가 더 낮게 측정된 것으로 판단됨



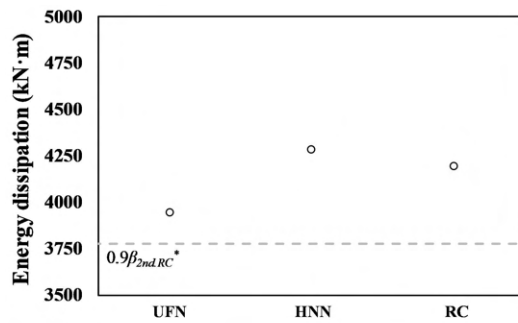
[그림 4-36] L 실험체 최대강도

■ U (100 MPa) 실험체

[그림 4-37]은 U 실험체와 비교 대상 실험체의 최대강도와 에너지 소산량을 나타내었다. 모든 슬리브에 결합이 있는 UFN 실험체는 공칭강도를 상회하는 것으로 나타났으며, 60 MPa 이상 그라우트를 사용한 HNN 실험체와 동등한 수준의 강도를 보여주는 것으로 나타났음. 에너지 소산량을 비교하였을 때 HNN 실험체보다는 낮은 에너지소산을 보였으나 상대적 동등성을 만족하는 우수한 성능을 보여주는 것으로 나타났음



(a) 실험체 최대강도



(b) 에너지 소산량

[그림 4-37] U 실험체 최대강도 및 에너지 소산량 비교

3) 동등성 평가

[표 4-7] 및 [표 4-8]은 실험 결과 요약을 나타내었음

[표 4-7] 실험체 최대하중

실험체명		실험 최대하중 [kN]	$P_{n,m}$ [kN]	기준 만족 여부	
중간 모멘트 골조	HNN	정방향	256.1	만족	
		부방향	-296.6		
	HFN	정방향*	258.1	246.2	불만족
		부방향*	-215.6		
	HFE	정방향*	241.5	246.2	불만족
		부방향*	-242.8		
	HPN1	정방향	281.5	246.2	만족
		부방향*	-253.9		
	HPN2	정방향*	216.6	246.2	불만족
		부방향*	-243.1		
	HPN3	정방향	264.9	246.2	불만족
		부방향*	-245.8		
	HPN4	정방향*	257.0	246.2	불만족
		부방향*	-224.3		
	HPN5	정방향*	235.9	246.2	불만족
		부방향*	-230.3		
	UFN	정방향*	283.2	246.2	만족
		부방향*	-269.2		
	LNN	정방향	127.3	246.2	불만족
		부방향	-116.7		
LPN1	정방향	163.4	246.2	불만족	
	부방향*	-156.7			
LPN2	정방향*	165.8	246.2	불만족	
	부방향*	-138.8			
LPN3	정방향	151.3	246.2	불만족	
	부방향*	-145.2			
LPN4	정방향*	150.7	246.2	불만족	
	부방향*	-143.2			
LPN5	정방향*	142.9	246.2	불만족	
	부방향*	-148.8			

* 가력방향의 인장측 슬리브 내부 충전결함이 있는 경우

[표 4-8] 한계변위비 최대강도

실험체명		한계변위비* 최대하중 [kN]	$0.8E_{max}$ [kN]	기준 만족 여부	$P_{n,m}$ 만족 여부	
중간 모멘트 골조	HNN	정방향	221.5	204.9	만족	만족
		부방향	-280.9	-237.3		
	HFN	정방향	218.5	206.5	만족	불만족
		부방향	-184.9	-172.5		
	HFE	정방향	204.5	193.2	만족	불만족
		부방향	-221.9	-194.3		
	HPN1	정방향	245.6	225.2	만족	만족
		부방향	-226.1	-203.2		
	HPN2	정방향	153.3	173.3	불만족	불만족
		부방향	-187.0	-194.5		
	HPN3	정방향	226.8	218.5	만족	불만족
		부방향	-228.2	-190.1		
	HPN4	정방향	239.8	205.6	만족	불만족
		부방향	-203.3	-179.4		
	HPN5	정방향	192.9	188.7	만족	불만족
		부방향	-194.3	-184.2		
	UFN	정방향	272.6	226.6	만족	만족
		부방향	-244.9	-215.3		
	LNN	정방향	119.7	101.8	만족	불만족
		부방향	-108.6	-93.4		
LPN1	정방향	123.4	130.7	만족	불만족	
	부방향	-127.9	-125.3			
LPN2	정방향	139.7	132.7	불만족	불만족	
	부방향	-108.7	-111.1			
LPN3	정방향	128.6	121	만족	불만족	
	부방향	-124.9	-116.2			
LPN4	정방향	128.6	120.6	만족	불만족	
	부방향	-121.8	-114.5			
LPN5	정방향	119.7	114.3	만족	불만족	
	부방향	-129.5	-119			

* 한계변위비는 중간모멘트골조로 2.0%로 고려함

[표 4-9]에서 [표 4-12]까지는 강성 및 에너지 동등성 평가를 나타내었으며, [표 4-13]은 동등성 평가 최종 판단을 나타내었음

[표 4-9] 강성 절대적 동등성 평가

실험체명		절대적 동등성 평가		기준 만족 여부	
		K_{2nd}^* [kN/mm]	$0.05K_i^{**}$ [kN/mm]		
중간 모멘트 골조	HNN	정방향	10.45	1.47	만족
		부방향	7.74	1.48	
	HFN	정방향	10.96	1.43	만족
		부방향	10.02	1.42	
	HFE	정방향	10.55	1.52	만족
		부방향	9.79	1.49	
	HPN1	정방향	12.84	1.77	만족
		부방향	12.04	1.76	
	HPN2	정방향	13.91	1.61	만족
		부방향	13.13	1.58	
	HPN3	정방향	10.99	1.44	만족
		부방향	9.67	1.44	
	HPN4	정방향	10.48	1.37	만족
		부방향	10.29	1.35	
	HPN5	정방향	10.31	1.36	만족
		부방향	9.91	1.36	
	UFN	정방향	9.74	1.51	만족
		부방향	9.47	1.52	
	LNN	정방향	3.35	1.36	만족
		부방향	3.33	1.35	
	LPN1	정방향	10.35	1.54	만족
		부방향	9.87	1.54	
	LPN2	정방향	9.19	1.27	만족
		부방향	8.81	1.28	
	LPN3	정방향	10.99	1.64	만족
		부방향	10.12	1.67	
LPN4	정방향	9.396	1.54	만족	
	부방향	9.45	1.52		
LPN5	정방향	9.59	1.49	만족	
	부방향	8.49	1.50		

* 한계변위비에서의 층간변위비 할선강성을 의미함. (중간모멘트골조 : $\pm 1/7$)

** 각 실험체의 초기강성의 0.05배를 의미함.

[표 4-10] 강성 상대적 동등성 평가

실험체명			상대적 동등성 평가		기준 만족 여부
			$K_{2nd,s}^*$ [kN/mm]	$0.9K_{2nd,RC}^{**}$ [kN/mm]	
중간 모멘트 골조	HNN	정방향	7.20	8.23	불만족
		부방향	9.21	9.16	
	HFN	정방향	7.07	8.23	불만족
		부방향	-	9.16	
	HFE	정방향	6.48	8.23	불만족
		부방향	6.89	9.16	
	HPN1	정방향	8.50	8.23	불만족
		부방향	7.35	9.16	
	HPN2	정방향	-	8.23	불만족
		부방향	-	9.16	
	HPN3	정방향	7.30	8.23	불만족
		부방향	6.87	9.16	
	HPN4	정방향	7.74	8.23	불만족
		부방향	6.34	9.16	
	HPN5	정방향	6.00	8.23	불만족
		부방향	5.93	9.16	
	UFN	정방향	8.78	8.23	불만족
		부방향	7.97	9.16	
	LNN	정방향	-	8.23	불만족
		부방향	-	9.16	
LPN1	정방향	-	8.23	불만족	
	부방향	-	9.16		
LPN2	정방향	-	8.23	불만족	
	부방향	-	9.16		
LPN3	정방향	-	8.23	불만족	
	부방향	-	9.16		
LPN4	정방향	-	8.23	불만족	
	부방향	-	9.16		
LPN5	정방향	-	8.23	불만족	
	부방향	-	9.16		

* 한계변위비에서의 활선강성을 의미함.

** 중간모멘트골조 상세를 갖는 RC 실험체의 활선강성의 0.9배를 의미함.

[표 4-11] 에너지 절대적 동등성 평가

실험체명	절대적 동등성 평가		기준 만족 여부	
	β_{2nd}^*	β		
중간 모멘트 골조	HNN	0.122	0.125	불만족
	HFN	0.137		만족
	HFE	0.128		만족
	HPN1	0.127		만족
	HPN2	0.139		만족
	HPN3	0.117		불만족
	HPN4	0.121		불만족
	HPN5	0.137		만족
	UFN	0.109		만족
	LNN	0.202		만족
	LPN1	0.151		만족
	LPN2	0.145		만족
	LPN3	0.141		만족
	LPN4	0.173		만족
	LPN5	0.146		만족

* 한계변위비에서의 에너지소산비를 의미함.

[표 4-12] 에너지 상대적 동등성 평가

실험체명	상대적 동등성 평가		기준 만족 여부	
	β_{2nd}^* [kN·mm]	$0.9\beta_{2nd,RC}^{**}$ [kN·mm]		
중간 모멘트 골조	HNN	4284.42	3773.16	만족
	HFN	3879.98		만족
	HFE	3830.02		만족
	HPN1	4184.76		만족
	HPN2	3315.51		불만족
	HPN3	3734.58		불만족
	HPN4	3765.02		불만족
	HPN5	3721.24		불만족
	UFN	3943.67		만족
	LNN	3229.19		불만족
	LPN1	2663.03		불만족
	LPN2	2508.09		불만족
	LPN3	2506.52		불만족
	LPN4	3052.25		불만족
	LPN5	2551.57		불만족

* 한계변위비에서의 에너지 소산량을 의미함.

** 한계변위비에서의 RC실험체의 에너지 소산량의 0.9배를 의미함.

[표 4-13] 동등성 평가 최종 판정

실험체명	강도 평가	강성 평가		에너지소산성능 평가		동등성 최종 판정
		상대적	절대적	상대적	절대적	
HNN	만족	불만족	만족	만족	불만족	합격
HFN	불만족	불만족	만족	만족	만족	불합격
HFE	불만족	불만족	만족	만족	만족	불합격
HPN1	만족	불만족	만족	만족	만족	합격
HPN2	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
HPN3	불만족	불만족	만족	불만족	불만족	불합격
HPN4	불만족	불만족	만족	불만족	불만족	불합격
HPN5	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
UFN	만족	불만족	만족	만족	만족	합격
LNN	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN1	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN2	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN3	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN4	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격
LPN5	불만족	불만족	만족	불만족	만족	불합격

제5장 PC접합부 구조 품질확보 방안

1. 개요

본 연구에서는 제 3장 및 제 4장에서 수행된 PC접합부 구조 품질 관리 방안 제안 및 검증을 토대로 PC접합부 구조 품질 방안을 도출하였음. 도출방안은 PC건축물 설계 및 시공 전 품질을 확보할 수 있는 1)사전관리 방안 과 시공 후 구조 품질을 보강할 수 있는 2)사후보강 방안을 제시하였음

사전관리 방안은 PC접합부 그라우트 압축강도 상향을 통하여 제시하였으며, 사후 보강방안은 에폭시 수지 보강방안을 제시하였음

2. PC접합부 구조 품질확보 방안

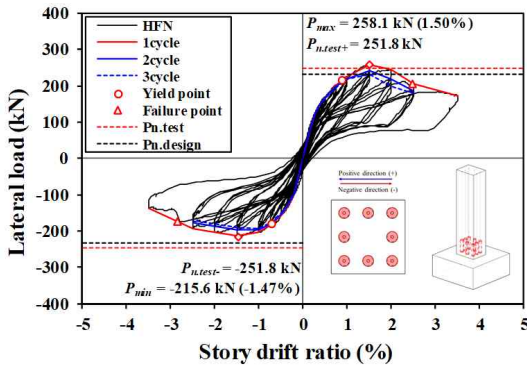
2.1 사전품질관리

■ PC접합부 충전 그라우트 강도를 통한 사전 품질관리

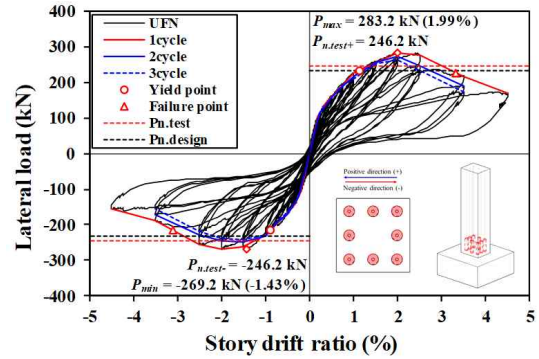
본 연구를 통하여 PC접합부 구조 품질은 PC접합부 그라우트 압축강도에 영향을 받는 것을 확인하였음. 따라서 PC접합부 그라우트 압축강도의 기준을 바탕으로 사전품질관리 방안을 제시하고자 함

■ 그라우트 압축강도 확보에 따른 구조거동 비교

[그림 5-1]은 본 연구에서 수행된 구조실험결과로 모든 PC접합부의 충전 결함이 있으며, 그라우트 압축강도 60MPa와 100MPa을 비교한 것임. [그림 5-1]에 나타난 바와 같이 그라우트 압축강도가 60MPa에서 100MPa로 상향될 경우, 관련 기준의 구조강도를 확보하며 에너지소산능력 등이 향상되는 안정적인 구조거동을 나타내는 것을 확인하였음. 이를 통하여 그라우트 압축강도의 상향은 PC접합부 구조품질 을 확보하는 방안이 될 수 있음을 확인하였음



(a) 그라우트 압축강도 60MPa



(b) 그라우트 압축강도 100MPa

[그림 5-1] 그라우트 압축강도 확보에 따른 구조거동 비교

■ PC접합부 그라우트 압축강도

현행 LHCS 기준에서는 PC접합부 그라우트 압축강도를 모재강도의 1.5배 또는 65MPa를 확보하도록 되어있음. 현재 대부분 공장에서 생산되는 PC부재의 경우 35MPa 이상을 상회하므로 현행 LHCS의 기준의 문제는 없음. 그러나 PC접합부 충전 결함이 발생할 경우 구조적 안정성 저하가 발생 할 수 있으므로, 향후 PC접합부 그라우트 압축강도 기준을 80MPa로 상향한다면 PC접합부 설계단계부터 구조 품질을 확보 할 수 있을 것으로 판단됨

■ PC접합부 그라우트 품질관리 방안

PC접합부의 사전품질관리를 위하여 그라우트 압축강도를 상향하는 방안을 제시하였으며, 그라우트의 압축강도 확보를 위해서는 다음과 같은 방법을 따라야 함

- 그라우트는 제품 매뉴얼 상의 28일 강도를 확보할 수 있으며 PC접합부에 주입하기 용이한 유동성을 확보한 제품과 공인성적서를 득한 제품을 사용하여야 함
- 그라우트 사용 시 제품 매뉴얼에 제시된 작업온도, 가사시간, 물 사용량 등을 준수하여야 하며, 제품에 표기된 MSDS를 토대로 안전에 유의하여야 함
- 그라우트 강도 시험은 KS F2426에 준하여 시험하되 관련 기준을 만족시켜야 함

[표 5-1] PC접합부 사전 품질 관리 방안

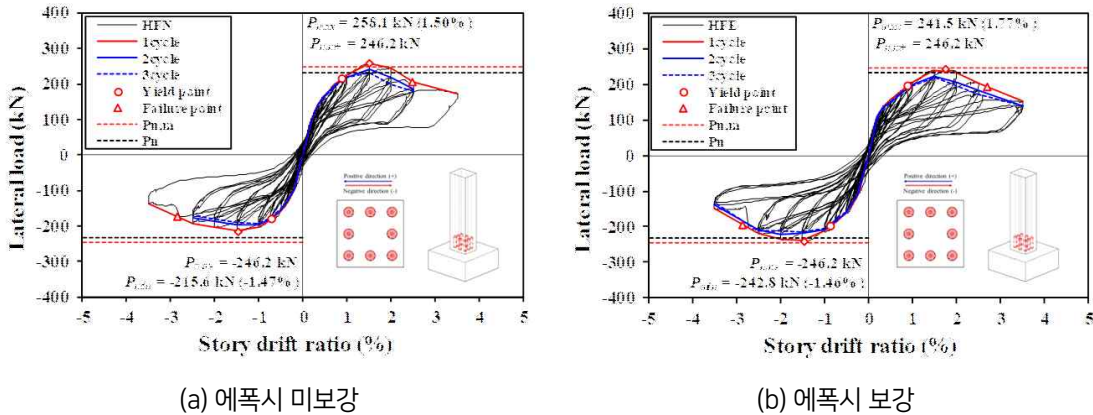
부재위치	접합부 종류	콘크리트 강도	그라우트 강도		비고
			현행	상향	
PC기둥	스플라이스 슬리브	35MPa 이상 (28일강도)	모재강도 1.5배 또는 65MPa 이상	모재강도 1.5배 또는 80MPa 이상	제품 매뉴얼을 준수하여야 함
PC벽체					

2.2 사후 품질관리

본 연구를 통하여 PC접합부의 그라우트 충전 결함이 발생 할 경우 에폭시를 주입하여 충전을 보완하는 것이 효과적인 대책임을 확인할 수 있었음. 따라서 PC접합부의 시공 후 사후 품질관리 방안으로 에폭시 주입 방안을 제시하고자 함

■ 에폭시 주입에 따른 구조거동 비교

[그림 5-2]는 본 연구에서 수행된 구조 실험결과로 모든 PC접합부의 충전 결함이 있으며, 에폭시 미보강과 보강 실험체의 결과를 비교한 것임. [그림 5-2]에 나타난 바와 같이 에폭시를 보강할 경우, 미보강된 실험체에 비하여 관련 기준의 구조강도를 확보하며 에너지소산능력 등이 향상되는 안정적인 구조거동을 나타내는 것을 확인하였음. 이를 통하여 에폭시 보강은 시공 후 PC접합부 구조품질을 확보할 수 있음을 확인하였음



[그림 5-2] 에폭시 주입에 따른 구조거동 비교

■ 에폭시 주입제의 특성

① 강도 특성

- 순수 에폭시 수지의 기계적인 강도 특성은 다음과 같음

구분	일반적 범위(MPa)	비고
인장강도	40 ~ 120	고성능 시스템은 130 MPa를 초과
압축강도	90 ~ 120	에폭시 모르타르 등은 546 MPa 이상 가능
휨강도	55 ~ 100	
접착강도	18 ~ 24	폴리에스터수지보다 훨씬 뛰어난 접착력

② 에폭시 수지의 강도에 영향을 미치는 요인

- 수지 및 경화제의 유형 : 사용되는 에폭시 수지 및 경화제의 화학적 조성비와 비율이 최종 기계적 특성을 결정
- 경화 과정(온도 및 시간): 적절한 온도 제어와 충분한 경화 시간은 최적의 가교 결합을 달성하는 데 필수적, 후경화(post-cure) 과정을 통해 잔여 반응을 완결하여 기계적 강도 향상
- 첨가제 및 충전재: 유리 섬유, 탄소 섬유, 실리카 등의 충전재를 첨가하여 강도, 내충격성, 전기적 특성 등을 보강할 수 있음

③ 에폭시 수지의 유동성(점도) 범위

- 에폭시 수지는 물처럼 묽은 것부터 걸쭉한 페이스트 형태까지 광범위한 점도
- 점도의 단위 : 주로 센티푸아즈(cP) 또는 mPa·s를 사용하며, 1 cP = 1 mPa·s
- 참고 : 물은 약 1 cP, SAE 30 모터 오일은 약 250 cP, 꿀은 약 10,000 cP 정도

점도 범위 (cP)	유동성 수준	일반적인 용도
100 ~ 500 cP	초저점도 (매우 묽음)	침투, 함침(인퓨전), 주형(Casting), 아주 미세한 틈새 채우기
500 ~ 1,500 cP	저점도 (묽음)	일반적인 코팅, 붓이나 롤러 도포, 유리섬유 적층
1,500 ~ 5,000 cP	중점도 (보통)	필라멘트 와인딩, 진공 성형, 어느 정도의 막 두께가 필요한 코팅
5,000 cP 이상	고점도 (걸쭉함)	접착제, 실링, 퍼티 대응, 흘러내림이 없어야 하는 수직면 작업
1,500,000 cP 이상	페이스트/비흐름성	틱소성(Thixotropic) 접착제 (수직면 시공 시 흘러내리지 않음)

④ 유동성에 영향을 미치는 주요 요인

- 온도: 온도가 상승하면 에폭시의 점도가 현저히 낮아져 유동성 향상, 작업성 개선
- 배합비 및 화학적 조성: 사용되는 특정 에폭시 수지 및 경화제의 화학적 유형(예: 비스페놀 A형, 노볼락형 등)에 따라 기본 점도가 결정됨
- 경화 시간 (시간 경과): 혼합 후 시간이 지남에 따라 경화 반응이 진행되면서 점도가 서서히 증가하고 최종적으로 겔화(gelation)되어 경화됨
- 첨가제 및 충전재
 - 반응성 희석제 : 점도를 낮추기 위해 첨가될 수 있으며, 이는 유동성을 크게 개선
 - 충전재/증점제 : 이산화규소(fumed silica) 같은 충전재를 추가하면 점도가 높아져 페이스트 형태로 만들 수 있음

⑤ 가사시간에 영향을 미치는 주요 요인

- 온도 (가장 중요): 온도가 높을수록 화학 반응 속도가 빨라져 가사 시간이 현저하게 짧아짐. 이상적인 작업 온도는 보통 20~30℃ 범위
- 혼합량 (질량): 많은 양의 에폭시를 한꺼번에 혼합 용기에 담아두면, 경화 반응 시 발생하는 열(발열 반응)이 축적되어 내부 온도가 상승하고, 이로 인해 가사 시간이 예상보다 훨씬 짧아질 수 있음
- 용기 형태: 넓고 얇은 용기에 혼합하면 열 방출이 잘 되어 가사 시간이 길어지는 반면, 좁고 깊은 용기에 담으면 열이 갇혀 더 빨리 경화됨
- 배합 비율: 제조사에서 권장하는 주제와 경화제의 정확한 배합 비율을 지켜야 합니다. 비율이 맞지 않으면 적절한 경화가 이루어지지 않거나 가사 시간이 변동될 수 있음
- 첨가제 유무: 촉매제(경화 촉진제)를 추가하면 가사 시간을 단축할 수 있음

■ 관련 시방서 및 산업규격

PC접합부의 사후보강용으로 사용할 수 있는 에폭시 주입제와 관련된 산업규격 및 시방서 등을 검토한 결과는 다음과 같음

① KCS 41 30 10 건축물 프리캐스트 콘크리트

- PC접합부의 에폭시 충전 작업의 시험 및 기준으로 활용 가능하며, 관련 항목으로는 사용기한, 배합온도, 시공연도, 압축강도, 충전도가 있음

표 6-12 철근이음용 그라우트의 시험 및 검사

품목	시험방법	시기 및 횟수	판정기준
종류·종목·제조년월일	그라우트재의 포장지에 표시된 날짜 확인	그라우트 사용 시 전수	사용기한이 지나지 않을 것
사용수량	배합표 및 시공관리 기록에 의한 확인	배합 시 전수	설계도서 및 제조사 상세
배합온도	온도계	첫 배합 시	주입 및 충전에 지장이 없을 것
시공연도	KS F 4044	첫 배합 시	공사 시방에서 정한 범위 내의 값으로 하되 주입 및 충전에 지장이 없을 것
압축강도	KS F 4044 현장 양생	그라우트 시공 전 및 사용재료가 변화했을 때	설계도서 및 제조사 상세
충전도	외관관찰	타설 시	밀실하게 충전되어 있는지 확인 가능할 것

1) 검사방법은 담당원과 협의하여 정할 수 있으며, 담당원이 확인 가능한 경우 드론 등을 이용한 영상촬영 데이터를 검사에 활용 할 수 있다.

2) KS F 4923 콘크리트 구조물 보수용 에폭시 수지

- PC접합부에 사용되는 에폭시의 품질 기준으로의 활용성이 가장 큰 산업규격으로, 에폭시 수지의 신장율, 점성, 시공시기등을 나타내었음

3. 종류 및 기호

에폭시 수지는 그 경화물의 인장 파괴 시의 신장, 점성 및 시공시기에 따라 표1, 표2 및 표3과 같이 구분한다.

표-1 신장률에 따른 에폭시 수지의 구분

종류	기호	구분 내용
경질형	I	인장파괴 시 신장률이 10% 이하인 것
연질형	II	인장파괴 시 신장률이 50% 이상인 것

표 2 점성에 따른 에폭시 수지의 구분

종류	기호	구분 내용
저점도형	L	주로 균열의 보수에 사용되는 저점도인 것
중점도형	M	주로 균열, 들뜸의 보수에 사용하고 중점도로 유연성을 부여한 것
고점도형	H	주로 큰 균열, 들뜸의 보수에 사용하고 높은 유연성을 부여한 것. 앵커핀의 고정에는 경질형을 사용한다.

표 3 시공 시기에 따른 에폭시 수지의 구분

종류	기호	구분 내용
일반용	R	주로 봄, 여름 및 가을에 사용하는 것
겨울용	W	주로 겨울에 사용하는 것

4 품질

- 에폭시 수지는 균질해야 하며, 접착에 유해하다고 인정되는 이물질의 혼입이 있어서는 안 된다.
- 에폭시 수지는 균열부나 들뜸부에 주입할 수 있어야 하고, 경화 후 균질한 경화물이 되어야 한다.
- 에폭시 수지의 성능은 5절에 의해서 시험하고, 표 4 또는 표 5의 규정에 적합해야 한다.
- 에폭시 수지는 상온 상습 상태에서 유효 기간 또는 유효기간까지 보존하며, a) ~ c) 규정에 적합해야 한다.

표 4 경질형 에폭시 수지의 품질

시험항목		시험조건	저점도형		중점도형		고점도형		
			일반용	겨울용	일반용	겨울용	일반용	겨울용	
점성	점도 mPa · a	(23±0.5)℃	100~1000		5000~20000		-		
	텍스트로픽 인덱스	(23±0.5)℃	-		5±1		-		
	슬럼프 mm	(15±2)℃	-		-		-	5 이하	
(30±2)℃						5 이하	-		
접착강도 N/mm ²		표준 조건	6.0 이상		6.0 이상		6.0 이상		
		특수 조건	저온 시	-	3.0이상	-	3.0이상	-	3.0이상
			습윤 시	3.0 이상		3.0 이상		3.0 이상	
			건습반복 시	3.0 이상		3.0 이상		3.0 이상	
경화 수축률 %		표준조건	3 이하		3 이하		3 이하		
가열 변화	질량 변화율 %	-	5 이하		5 이하		5 이하		
	부피 변화율 %	-	5 이하		5 이하		5 이하		
인장강도 N/mm ²		표준조건	15 이상		15 이상		15 이상		
인장 파괴시 신장률 %		표준조건	10 이하		10 이하		10 이하		
압축강도 N/mm ²		표준조건	-		-		50 이상		

③ KCS 14 20 53 프리스트레스트 콘크리트

- 프리캐스트 부재에 사용되는 에폭시 주입제의 품질관리 항목이 제시됨

3.8.3 프리캐스트 부재의 접합에 쓰이는 재료의 품질검사

(2) 프리캐스트 부재의 접합에 KSF 4923의 에폭시 수지계 접착제를 사용하는 경우의 시험 항목은 경화되기 전 접착제는 외관, 밀도, 점도, 사용가능 시간 등을, 경화한 접착제는 인장 강도, 압축강도, 접착강도 등을 표준으로 한다. 또한 콘크리트가 습윤상태에 있을 때 부득이 접합작업을 할 경우에는 수중경화할 때의 인장강도를 확인해 두어야 한다.

■ PC접합부 사후보강에 사용될 수 있는 에폭시 주입제의 특성

PC접합부에 사용할 수 있는 에폭시는 경질형으로 판단되며, 이는 스플라이스 슬리브 내 그라우트(콘크리트)의 파괴강도가 강재의 강도 보다 작거나 같아야 한다는 연성 설계기준을 충족하기 위함임

에폭시 주입제의 점성 기준은 스플라이스 슬리브의 충전구를 이용하여 충전작업을 진행하므로 고점도형이 적합한 것으로 판단됨

PC접합부에 보강에 사용되는 에폭시 주입제의 강도는 그라우트와 동등 이상의 것이 필요하다고 판단됨. 이는 에폭시 주입제와 그라우트의 강도 차이가 클 경우, 그라우트와 에폭시가 일체화된 거동을 하지 않고 내부에서 발생하는 응력장의 분포가 달라져 강도가 작은 쪽에서 먼저 파괴가 발생할 우려가 있음

■ PC접합부 에폭시 주입제 품질관리 방안

PC접합부의 사후품질관리를 위하여 에폭시 주입제 보강방안을 제시하였으며, 에폭시 주입제의 품질을 확보하기 위해서는 다음과 같은 방법을 따라야 함

- 에폭시 주입제의 재료의 성분, 특성, 기술자료, 사용지침서 등이 구비된 제품을 사용해야하며, 특히 경질형 에폭시 수지의 경우 KS F 4923의 품질규정을 따라야 함
- 에폭시 주입제의 강도는 PC접합부에 사용한 그라우트 강도와 유사하거나 동등이상의 제품을 사용하여야 함
- 에폭시 주입제 사용시 제품 매뉴얼에 제시된 작업온도, 가사시간 등을 준수하여야 하며, 제품에 표기된 MSDS를 토대로 안전에 유의하여야 함

2.3 PC접합부 에폭시 주입제 보강 시방서(안)

1. 일반사항

1.1 적용 범위

이 기준은 한국토지주택공사(이하 LH라 한다)에서 발주하는 공사로서 프리캐스트 콘크리트(이하 PC라 한다) 공사 현장에서 스플라이스 슬리브를 사용하는 PC접합부의 충전 결함 부위를 보완하는 공사에 관하여 적용한다.

1.2 참고 기준

1.2.1 관련 법규

내용 없음

1.2.2 관련 기준

- ① LHCS 10 10 05 01 공사 일반
- ② LHCS 10 10 10 05 제출물 관리
- ③ KS F 4923 콘크리트 구조물 보수용 에폭시 수지

1.3 용어의 정의

- (1) 수동식 주입공법 : 미충전 부위에 연질의 주입관 등을 삽입하고 그리스 펌프 등의 수동식 펌프를 사용하여 주입 재료를 인력으로 주입하는 균열 보수공법
- (2) 기계식 주입공법 : 수동식 주입공법의 수동식펌프 대신 자동혼합장치 및 주입기계를 이용하여 보수재를 주입 하는 균열 보수공법

1.4 제출물

1.4.1 제출물 일반사항

다음 사항은 LHCS 10 10 10 05에 따라 제출한다.

1.4.1.1 착공 전 제출물

시공계획서

1.4.1.2 제품자료

- ① 재료의 성분, 특성 등
- ② 제조사의 생산현황, 기술자료, 사용지침서, 사용실적 등
- ③ 성능항목을 확인 할 수 있는 시험성적서 등

1.5 관리기준

수급인은 시공하고 있는 구조물의 충전 확인 대장을 작성·관리하여야 한다.

1.6 운반, 보관 및 취급

- (1) 모든 제품 또는 자재는 부식, 변형 등의 손상으로부터 보호되어야 하며 제조사의 취급 설명서에 따라 취급, 운반한다.
- (2) 현장에 반입된 에폭시 수지는 직사광선을 피하고 온도 5 ~ 35 ℃, 습도 45 ~ 85 %인 상태에서 보관하여야 한다.
- (3) 승인된 제조사의 제품자료에 별도의 명시가 없는 한 주위의 기온이 5 ℃ 미만일 경우에는 작업을 할 수 없다.

2. 자재

2.1 에폭시 수지

2.1.1 일반조건

- (1) 에폭시 수지는 균질해야 하며, 접촉에 유해하다고 인정되는 이물질의 혼입이 있어서는 안 된다.
- (2) 에폭시 수지는 콘크리트 바탕체의 상태(건조 및 습윤) 및 계절별로 당해 환경에 적합하게 제조된 제품을 사용하여야 한다.

2.1.2 주입형 에폭시 수지

경질형 에폭시 수지는 KS F 4923(표 4)의 품질규정에 적합한 제품으로 압축강도 기준은 그라우트의 강도 이상으로 하되 과다하게 크지 않도록 한다.

3. 시공

3.1 보수 시기

- (1) 후속공정의 구조 안정성 검토에서 영향이 없는 경우에는 충전 그라우트가 충분히 경화된 이후에 실시한다.
- (2) 부재의 자립이나 다음 층의 후속공정의 구조 안전성에 영향을 미치는 경우 후속작업을 중단하고 최대한 신속하게 보수 작업을 진행하여야 하며 이 경우에는 그라우트의 잔여 수분에 의한 부착저하 등을 고려한 자재를 사용하여야 한다.

3.2 작업준비

- (1) 수급인은 보수시행 시기마다 작업 착수 15일 전에 다음 각 호의 사항을 포함하는 시공계획서를 작성하여 공사감독자의 승인을 받아야 한다.
 - ① LHCS 10 10 05 01(1.19)에 명시된 내용
 - ② 보수일정
 - ③ 보수계획
 - ④ 보수공법 및 재료
- (2) 보수계획서 작성은 보수의 양이 미미하거나 보수내용이 단순하여 시공계획서를 작성하지 아니하여도 된다고 공사감독자와 협의된 경우에는 예외로 할 수 있다.

3.3 보수방법

(1)재료 혼합

주입용 에폭시 수지의 주제와 경화제를 규정량대로 정확히 계량하고 균일하게 될 때까지 충분히 혼합한다.

(2)주입

- ① 바탕 준비를 위해 주입구 부위를 와이어 브러시 등으로 표면을 청소하고 슬리브 내부의 이물질이 없도록 압축공기 등을 사용하여 청소 하여야 한다.
- ② 주입
 - 가. 주입구 내부에 연질의 주입관을 삽입하고 주입관과 주입장치를 연결하여 주입을 개시한다.
 - 나. 주입을 진행하면서 주입관을 서서히 올려 주입구로 주입재가 차오르는 것을 확인한 후 주입을 중단하고 주입관을 제거한다.

(3)청소 및 양생

- ① 청소: 충전 부위의 오염물질을 제거하고 청소한다.
- ② 양생: 주입 후 하절기는 24 시간, 동절기는 48 시간 이상 경과할 때까지는 유해한 진동이 가해지지 않도록 관리한다.

제6장 결론

이 연구에서는 PC공동주택 접합부 품질 확보를 위한 구조성능 고도화를 구현하기 위하여 기존연구 결과로 제시한 PC접합부 품질관리 지표를 토대로, PC접합부의 충전 결함 시나리오, 시공성확보 방안, 에폭시 사후 보강 방안을 제안하고 이를 검증하기 위한 구조성능 평가를 수행하였음

구조성능평가의 변수는 그라우트 압축강도, 충전 결함 위치, 에폭시 보강유무이며 가력은 지진하중을 모사한 횡하중 반복가력을 수행하였음. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같음

1. 일반적인 PC 구조물 시공 시 사용되는 60 MPa 그라우트를 사용한 H 실험체는 충전결함이 없는 HNN 실험체와 충전결함 개소가 가장 적은 HPN1 실험체가 공칭 강도를 상회하는 것으로 나타났으며, 슬리브 내부의 그라우트 충전결함 비율이 증가할수록 강도 및 초기강성이 저하되는 경향을 보였음. 이는 슬리브 내부 충전결함이 부재의 구조성능에 영향을 미치는 것으로 판단됨
2. 후속공정 가능 여부를 판단하기 위해 20 MPa 강도의 그라우트를 사용한 L 실험체는 시공하중비를 통해 기준강도 134 kN을 산정하였으며, LNN 실험체를 제외하고 모두 기준강도를 만족하였음. 시공단계에서는 큰 변위를 요구하지 않아 강도를 만족하였으므로 후속공정 진행의 타당성을 뒷받침할 수 있을 것으로 판단됨
3. PC접합부의 충전율, 그라우트 강도, 에폭시 보강 등 실험 변수를 토대로 현행 PC 구조설계 기준에 따라 동등성을 평가한 결과, PC접합부 충전결함이 적을수록 그라우트 강도가 증가할수록 동등성 기준을 만족하였음
4. 스플라이스 슬리브의 충전결함을 에폭시 주입제로 보강한 결과, 보강하지 않은 실험체(HFN)에 비하여 에폭시 보강을 적용한 HFE 실험체는 강도가 약 1.12배 증가된 것으로 나타나 에폭시 보강에 따른 효과가 나타난 것으로 판단됨
5. 본 연구에서는 제 3장 및 제 4장에서 수행된 PC접합부 구조 품질 관리 방안 제안 및 검증을 토대로 PC접합부 구조 품질 방안을 도출하였음. 도출방안은 PC건축물

설계 및 시공 전 품질을 확보할 수 있는 1)사전관리 방안 과 시공 후 구조 품질을 보강할 수 있는 2)사후보강 방안을 제시하였음. 사전관리 방안은 PC접합부 그라우트 압축강도 상향(60MPa → 80MPa)을 통한 구조품질 확보이며, 사후보강방안은 에폭시 주입제를 사용하여 PC접합부의 충전 결함을 보강하는 방안임. 특히 사후보강 방안은 시방서(안)을 제시하여 실무활용성을 극대화 하였음

본 연구결과를 종합하여 볼 때, PC접합부의 구조 품질에 영향을 미치는 강도 및 초기강성 저하를 유발하는 주요 요인은 그라우트 압축강도와 충전 결함 개소로 나타났음. 따라서 PC접합부 시공 단계에서의 철저한 품질관리와 그라우트 충전성 확보를 통하여 PC접합부의 결함 발생을 최소화하는 것이 구조성능 확보의 핵심이라 할 수 있음. PC접합부의 고강도 그라우트의 적용은 실험결과로부터 충전 결함으로 인한 PC접합부의 성능 확보할 수 있고, 접합부의 내진성능과 장기 내구성을 향상시키는 데 효과적인 것으로 나타났으므로 PC접합부의 구조품질을 향상시키는 가장 합리적인 방법으로 판단됨. 에폭시 주입제를 이용한 사후 보강 방안은 시공 후 결함에 적용할 수 있을 것으로 판단되나, 추후 실무적용성을 확대하기 위해서는 에폭시 주입제의 강도의 다양화에 근거한 연구가 필요할 것으로 보임

참고문헌 Reference

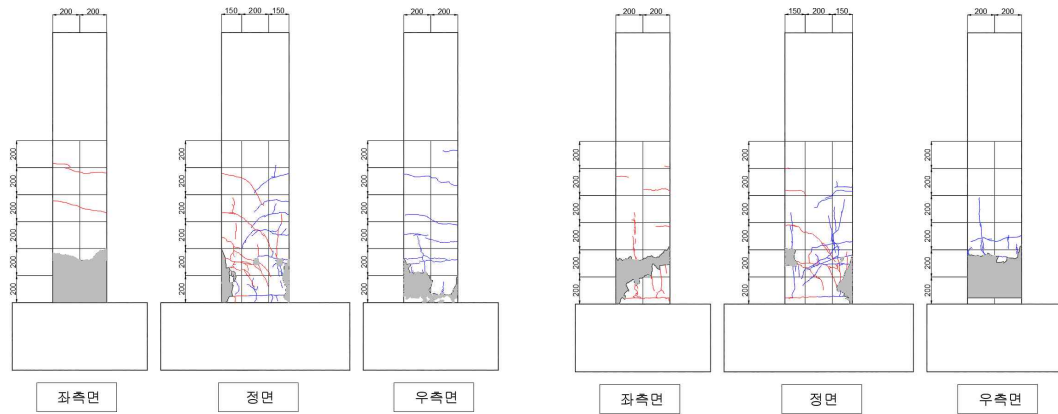
- KCS 41 30 10 : 2023 건축물 프리캐스트 콘크리트, 국토교통부, 2023.
- KCS 14 20 53 : 프리스트레스트 콘크리트, 2021, 국토교통부, 2021.
- KDS 14 20 10 : 2021 콘크리트구조 해석과 설계 원칙, 국토교통부, 2021.
- KDS 14 20 20 : 2022 콘크리트구조 휨 및 압축 설계기준, 국토교통부, 2022.
- KDS 14 20 22 : 2022 콘크리트구조 전단 및 비틀림 설계기준, 국토교통부, 2022.
- KDS 14 20 52 : 2024 콘크리트구조 정착 및 아암 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.
- KS F 4923 : 2005 콘크리트 구조물 보수용 주입 에폭시 수지, 국가기술표준원, 2005.
- 김형기. (2013). 고강도 그라우트를 충전한 기계식 철근이음의 강도. 대한건축학회연합논문집, 15(5), 215-223.

- 안성룡, 성한석, & 강현구. (2023). 비가새 자립식 PC 기둥 접합부의 시공 중 구조성능 연구. *콘크리트학회 논문집*, 35(3), 265–276.
- 이상섭, 홍성엽, & 배규웅. (2020). 프리캐스트 콘크리트 전단 벽체 수평 접합부의 이력 거동. *대한건축학회논문집*, 36(7), 155–162.
- Zhang, W., & Lee, D. (2024). Effect of Mechanical Splice to Seismic Performance of Precast Column–Foundation Connection. *ACI Structural Journal*, 121(5).
- Pul, S., Senturk, M., Ilki, A., & Hajirasouliha, I. (2021). Experimental and numerical investigation of a proposed monolithic-like precast concrete column–foundation connection. *Engineering Structures*, 246, 113090.
- Li, X., Xiao, S., Gao, R., Harries, K. A., Wang, Z., & Xu, Q. (2021). Effects of grout sleeve defects and their repair on the seismic performance of precast concrete frame structures. *Engineering Structures*, 242, 112619.
- Metelli, G., Beschi, C., & Riva, P. (2011). Cyclic behaviour of a column to foundation joint for concrete precast structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(9), 1297–1318.
- Qiao, Q., Wang, X., Liu, W., & Yang, H. (2024). "Defect Detection in Grouting Sleeve Grouting Material by Piezoelectric Wave Method". *Buildings*, 14(3), 629.
- Yang, J., Guo, T., Wang, W., & Zhu, R. (2023). Experimental investigation on seismic behaviors of precast concrete shear walls with sleeve grouting defects. *Advances in Structural Engineering*, 26(2), 258–271.

- Xu, L., Pan, J., & Cai, J. (2019). Seismic performance of precast RC and RC/ECC composite columns with grouted sleeve connections. *Engineering Structures*, 188, 104–110.
- Long, Q., Ding, M., Huang, Z., Ke, W., & Hu, Z. (2025). Research Status and Prospects of Grouted Sleeve Connections in Prefabricated Structures. *Buildings* (2075–5309), 15(10).
- Kahama, E., Fuzhe, X., Lu, C., & Offei, I. (2022). Experimental and numerical assessment of the location-based impact of grouting defects on the tensile performance of the fully grouted sleeve connection. *Fracture and Structural Integrity*, 16(61), 437–460.
- Xiao, S., Wang, Z., Li, X., Harries, K. A., Xu, Q., & Gao, R. (2021). Study of effects of sleeve grouting defects on the seismic performance of precast concrete shear walls. *Engineering Structures*, 236, 111833.

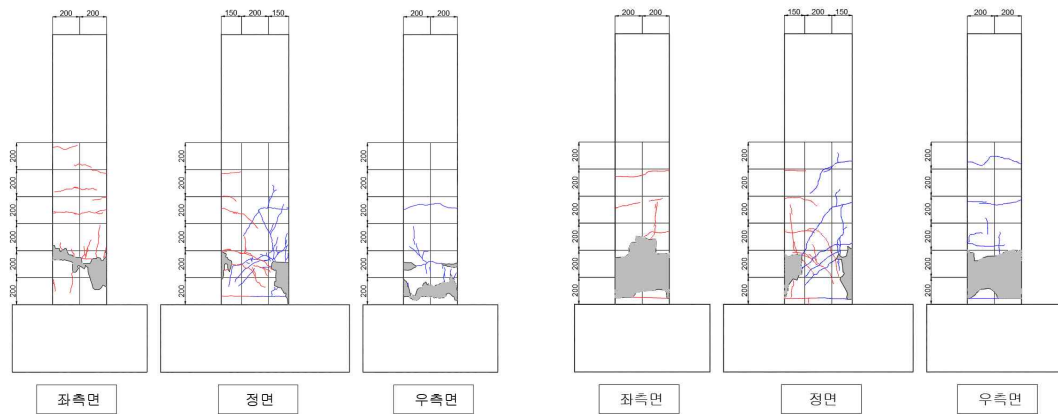
부 록 Appendix

부록 A1. PC접합부 실험체 최종 균열 양상



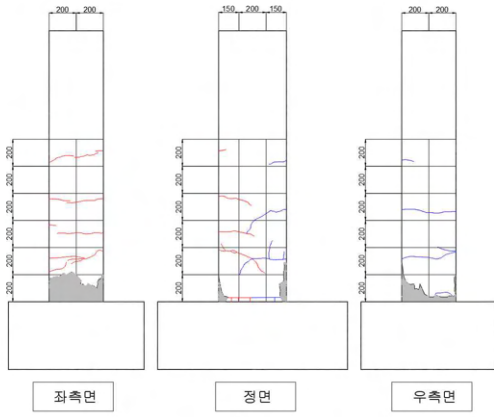
(a) HNN

(b) HFN

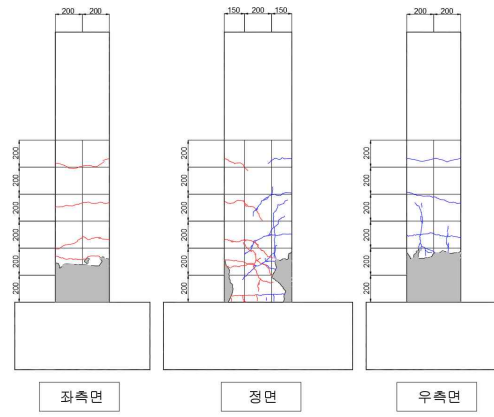


(c) HFE

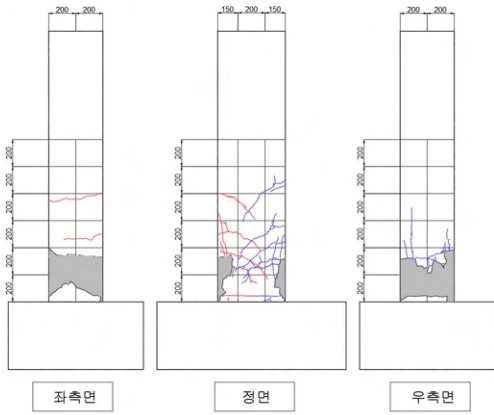
(d) HPN1



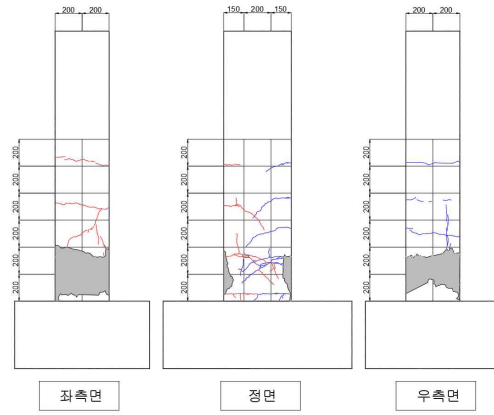
(e) HPN2



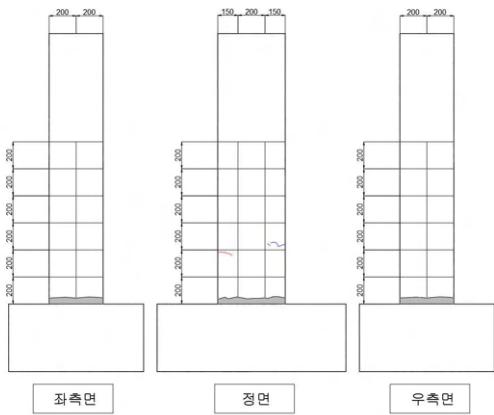
(f) HPN3



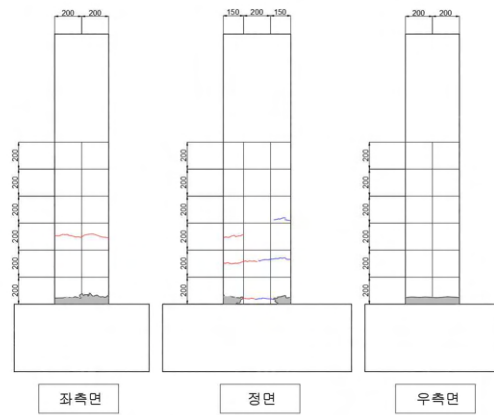
(g) HPN4



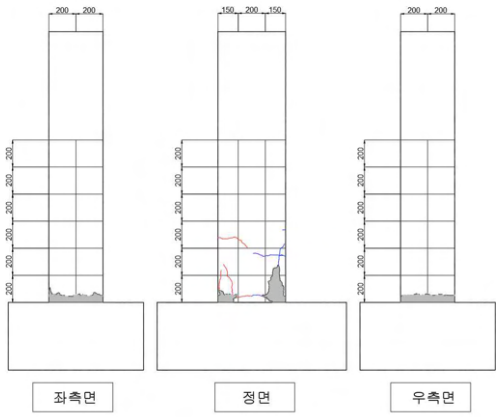
(h) HPN5



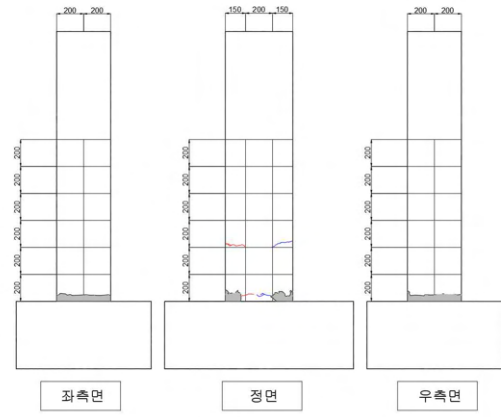
(i) LNN



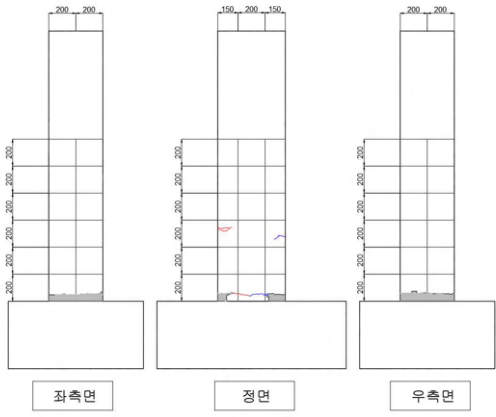
(j) LPN1



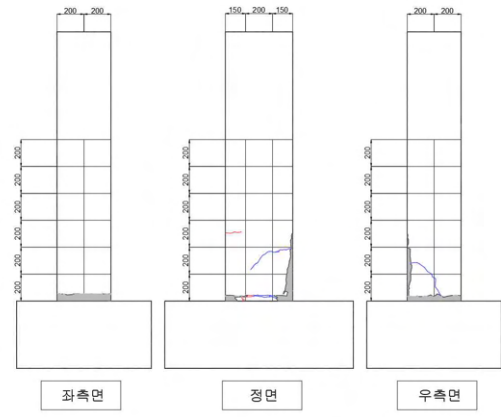
(k) LPN2



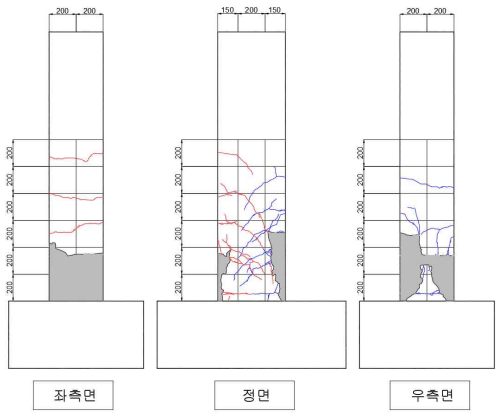
(l) LPN3



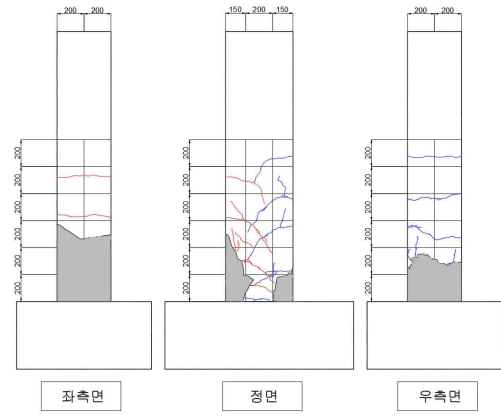
(m) LPN4



(n) LPN5



(o) UFN



(p) RC