



연속 횡방향 철근으로 횡구속된 사각 RC기둥의 일축압축 거동

Uniaxial Compression Behavior of Rectangular
Reinforced Concrete Columns Laterally Confined
By Continuous Transverse Reinforcement

토목공학과 구조공학전공
박사과정 조 경 훈
발표일: 2023.11.27.



충북대학교
CHUNGBUK NATIONAL UNIVERSITY



Contents

- 1 서론
- 2 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과 이론
- 3 횡방향 철근 보강 RC기둥의 일축압축실험
- 4 연속 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 일축압축거동 예측
- 5 결론



Contents

- 1 서론
- 2 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과 이론
- 3 횡방향 철근 보강 RC기둥의 일축압축실험
- 4 연속 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 일축압축거동 예측
- 5 결론

● 연구의 필요성 및 목적



철근콘크리트 구조물



기둥 붕괴 사례 (1995년 일본)

- 기둥은 상부 구조물의 하중을 기초로 전달하는 구조부재임
- 자하중(축력), 풍하중, 지진하중(전단력) 등에 저항할 수 있어야 함
- 기둥의 파괴는 구조물 전체의 붕괴를 야기하여 인명, 재산등의 피해가 발생

● 연구의 필요성 및 목적

Date	Magnitude	Location
2003.03.30	5.0	인천 백령도
2004.05.29	5.2	경북 울진군
2014.04.01	5.1	충남 태안군
2016.07.05	5.0	울산 동구
2016.09.12	5.1	경북 경주시
2016.09.12	5.8	경북 경주시
2017.11.15	5.4	경북 포항시

- AD 2년부터 1904년까지 한반도에서 총 2,113회의 지진이 발생함
- 2000년대 규모 5.0 이상 지진이 7차례 발생함 : 지진의 안전지대가 아님
- 피해 최소화 방안 : 철근콘크리트 구조물의 내진성능 확보

● 연구의 필요성 및 목적



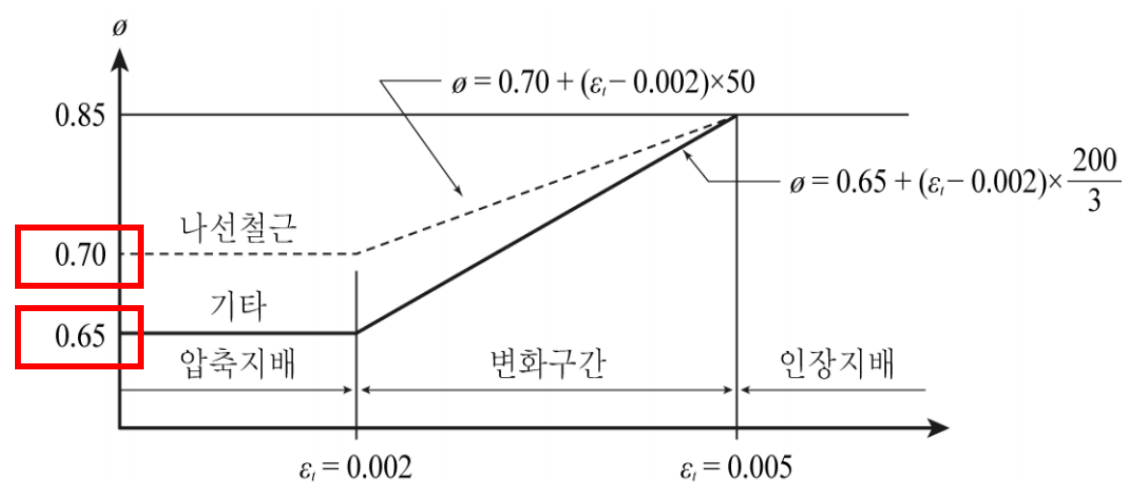
띠철근



나선철근

- 내진성능 확보 : 철근콘크리트에 횡방향철근을 배근하여 연성 부족을 보완
- 횡방향 철근으로는 띠철근과 나선철근(원형기둥)이 주로 사용됨

● 연속 횡방향 철근



콘크리트 부재의 강도감소계수

- 나선철근 : 주철근 방향으로 연속적 배근 – 기둥 전체에 균등한 구속력 부하
띠철근 : 불연속적 배근 – 불균등한 구속력
- 국부좌굴방지, 구속효과 : 나선철근 > 띠철근
- 콘크리트구조설계기준에서 콘크리트 부재의 횡방향 철근 종류에 따라 압축부재에서 강도감소 계수를 다르게 규정함

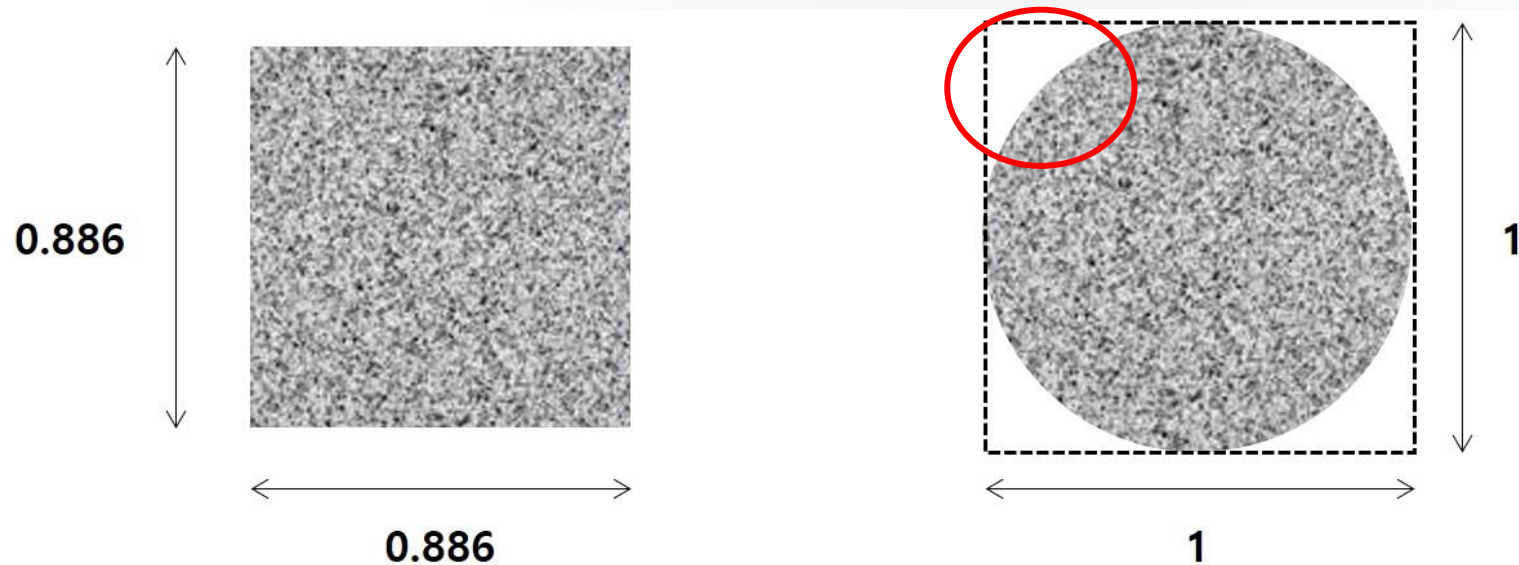
● 연속 횡방향 철근



경주 지진에 의한 콘크리트 기둥 파괴 사례

- 콘크리트 구조설계기준 : 띠철근 135° 로 굽혀 주철근 결속 규정하고있음.
- 띠철근의 사용은 시공상 어려우며, 과도한 하중 발생 시 횡구속 효과 상실

● 연속 횡방향 철근



사각 기둥과 원형 기둥의 공간효율성 비교

● 사각기둥은 원형기둥 대비 공간효율성이 약 13% 큼 : 높은 공간활용도 있음

➡ **사각기둥**의 횡구속 철근으로 **연속횡방향 철근**을 사용하기 위한 연구

● 횡방향 철근으로 구속된 콘크리트 기둥의 연성, 강도 증가 연구동향

◆ 국내 연구동향

1. 띠철근 시공성 개선 연구

▶ 박경언 : 띠철근 표준갈고리 상세 시공성 개선을 위한 연결장치 성능 평가.

2. 고성능 철근, 고성능 콘크리트 사용

▶ 최원호 : 콘크리트 충전 강관 기둥의 압축성능 평가.

▶ 고성현 : 중공 원형 RC 기둥의 일축압축성능 평가.

▶ 황선경 : 고강도 철근, 고강도 콘크리트 사용 RC 기둥의 이력특성 평가.

3. 강판, FRP등 이용하여 콘크리트 기둥 외부 보강

▶ 이경훈 : 탄소섬유시트 튜브로 구속된 콘크리트 기둥의 압축거동 평가.

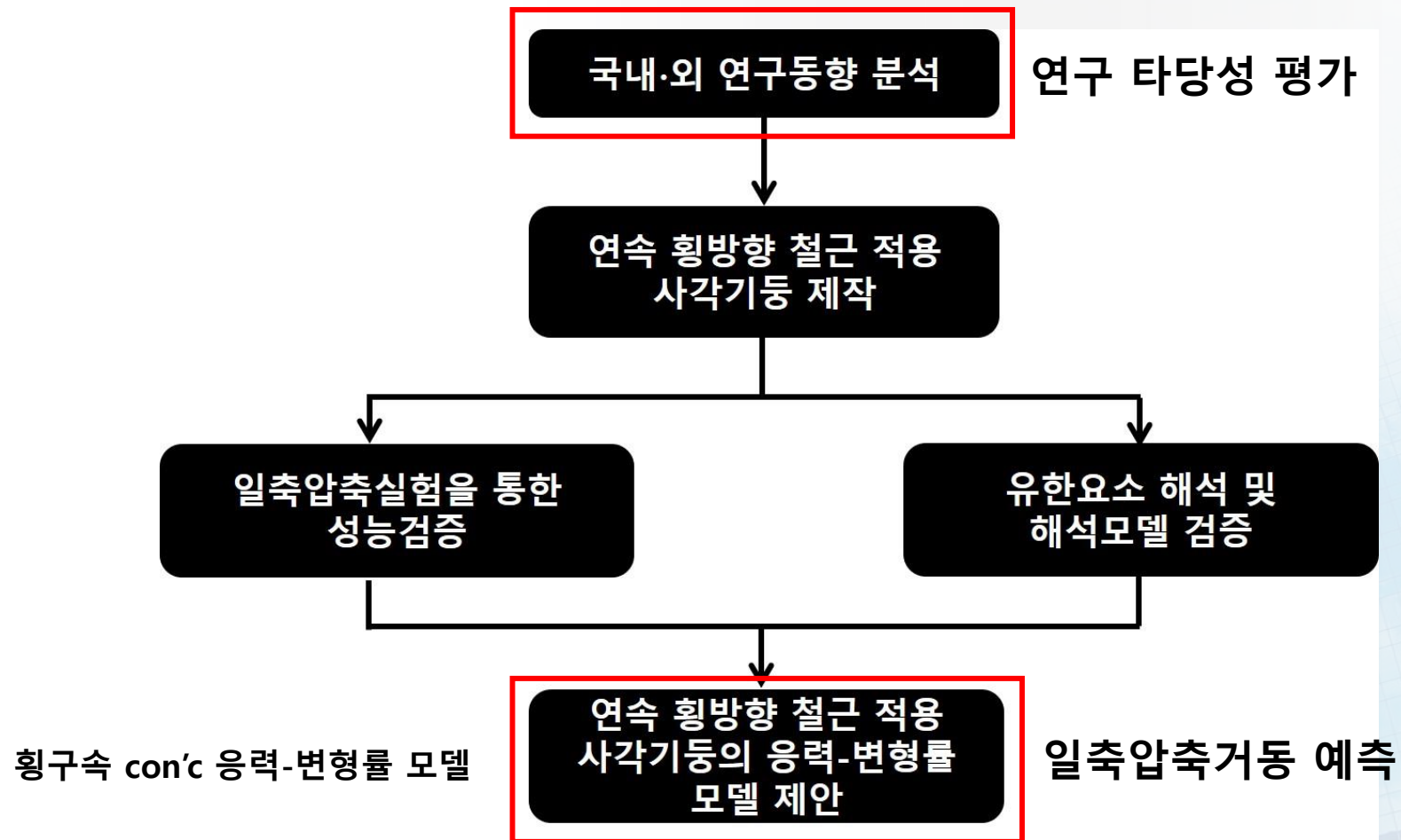
◆ 국외 연구동향

▶ Lim : FRP Sheet로 구속된 콘크리트의 구속효과 평가를 위한 실험적 연구.

▶ Sun : 다중 나선철근으로 구속된 RC 기둥의 일축압축거동 평가.

● 연속횡방향철근 보강된 사각기둥 성능 연구 극히 제한적임.

● 연구 방법 및 범위



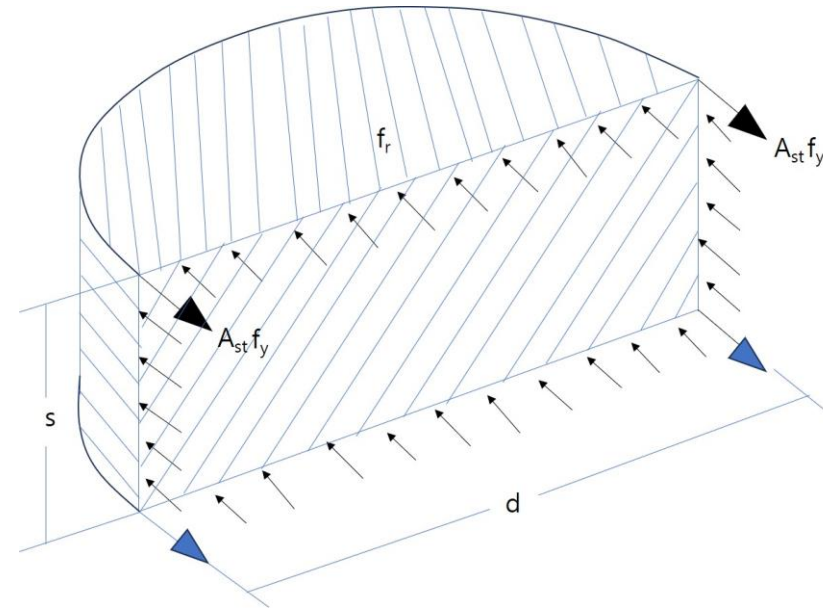
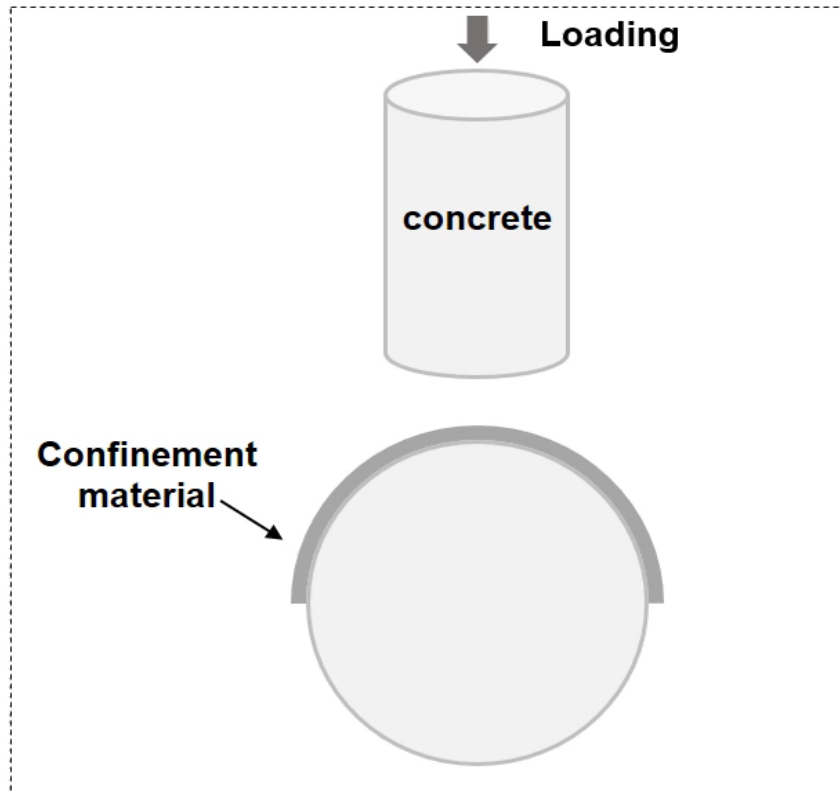


Contents

- 1 서론
- 2 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과 이론
- 3 횡방향 철근 보강 RC기둥의 일축압축실험
- 4 연속 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 일축압축거동 예측
- 5 결론

횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과

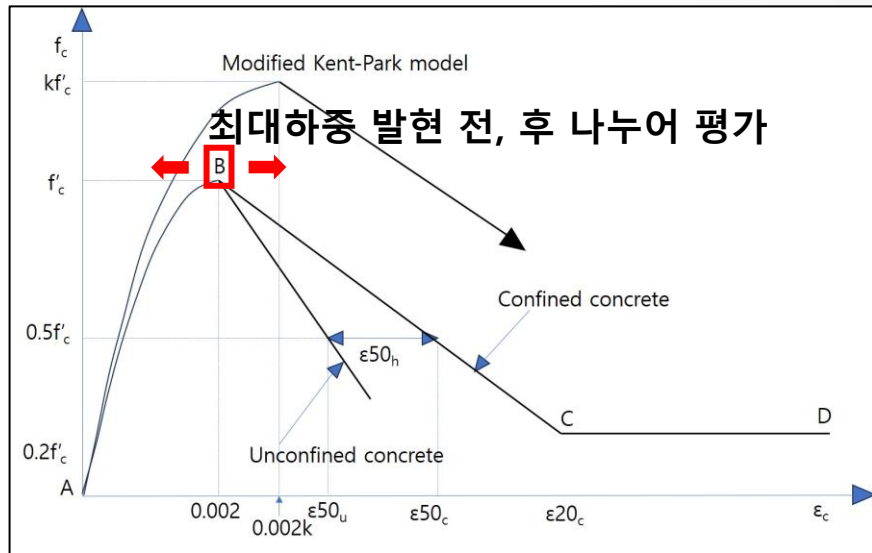
- 횡구속 효과 (1929, Richard) : 횡방향 철근 사용 - 강도, 연성 증진



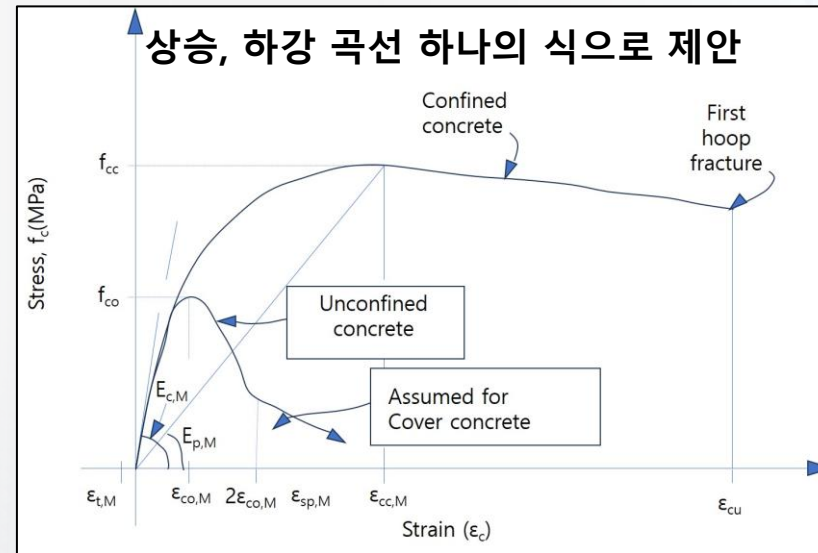
- 횡구속된 con'c 단면에서 횡방향 팽창력 = 횡방향 철근에 의한 구속력

횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과

- 횡방향 철근으로 구속된 콘크리트의 일축압축거동 예측 다수
그러나, 나선철근(사각)은 보고되지 않음.



Kent & Park 모델 (1982)



Mander 모델 (1982)

- 기존 연구들 고찰 – 본 연구에 적용 가능성 검토
- Kent & Park과 Mander에 의해 제안된 2가지 방법에서 파생됨.

횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과

● 철근콘크리트 기둥의 국내외 설계기준

미국

- 콘크리트 기둥 피복 탈락후에도 축방향 저항성능 확보할 수 있는 횡방향 철근비 규정

일본

- 비선형 해석을 수행 후 소요 횡철근량 산정.
- 횡철근 직경에 따라 최소 간격 제시

유럽

- 교량의 중요도에 따라 연성조건을 구분함

뉴질랜드

- 요구 곡률 연성도를 1.3으로 고정

한국

- 교량설계기준 (KDS 24 00 00)
- 미국과 동일

➡ 연속횡방향 철근으로 보강된 사각기둥에대한 설계기준 없음.



Contents

- 1 서론
- 2 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과 이론
- 3 횡방향 철근 보강 RC기둥의 일축압축실험
- 4 연속 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 일축압축거동 예측
- 5 결론

횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험체 제원

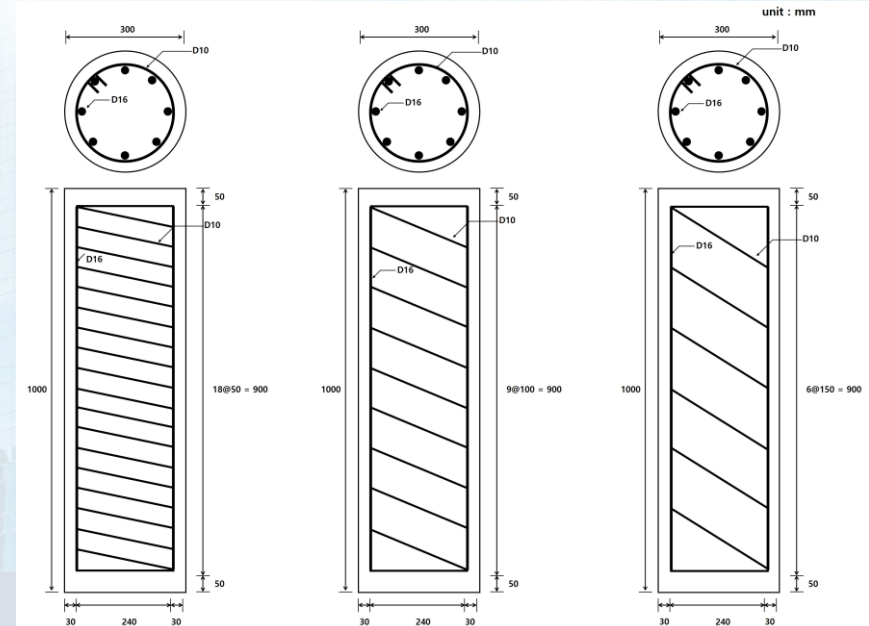
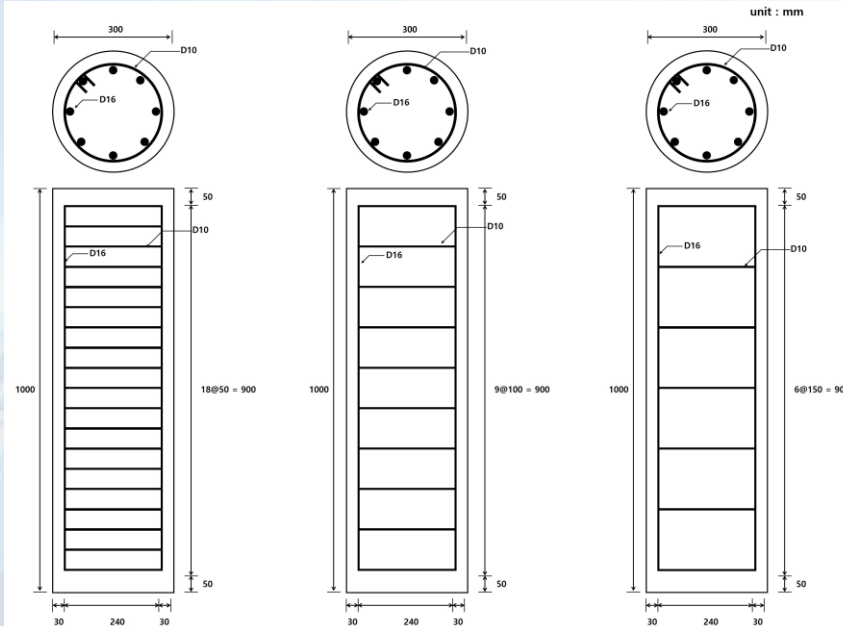
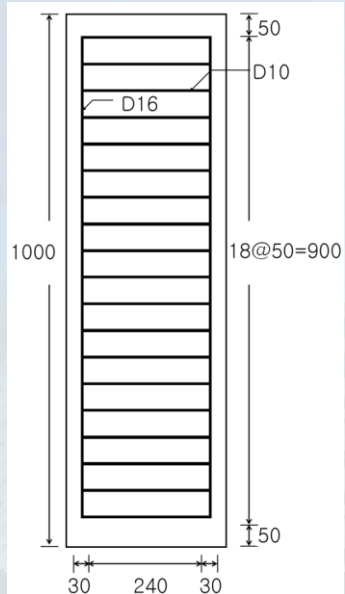
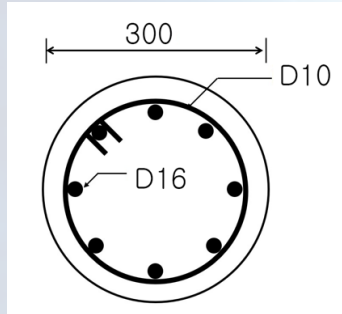
콘크리트구조기준(KCI2012)

• 주철근

- 철근비 : 1%이상, 8%이하 -> 2.2%
- 철근지름 : D13 이상 -> D16
- 띠철근기둥 최소개수 : 4개 이상
- 나선철근기둥 최소개수 : 6개 이상
- 피복두께 : 40mm이상 (단, 설계기준압축강도가 40MPa일 경우 10mm줄일수 있다. -> 30mm)

• 횡방향철근

- 주근직경 D32이하일 경우 D10 이상 -> D10



횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험체 제원

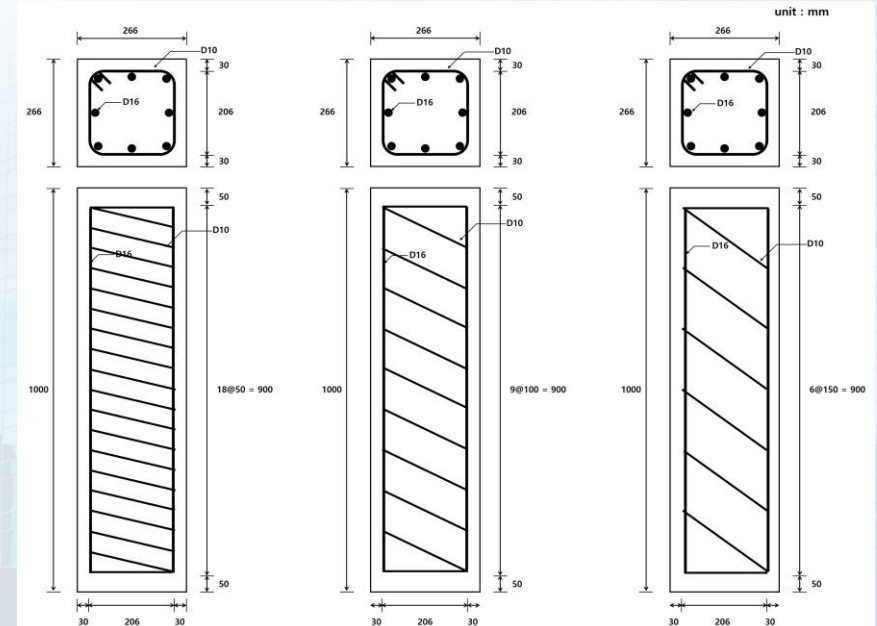
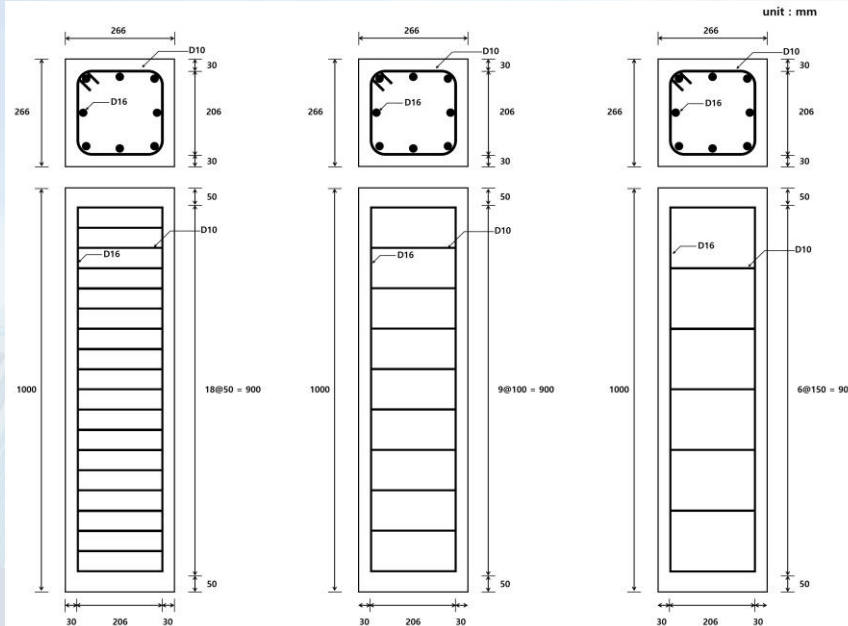
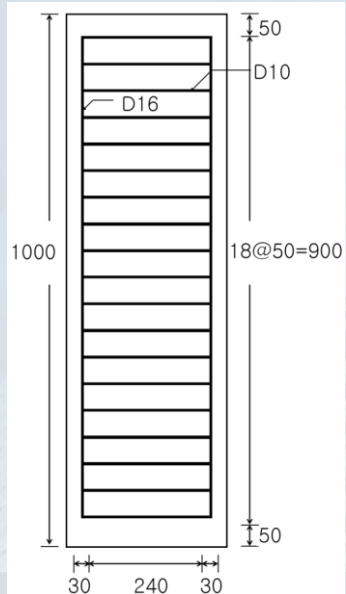
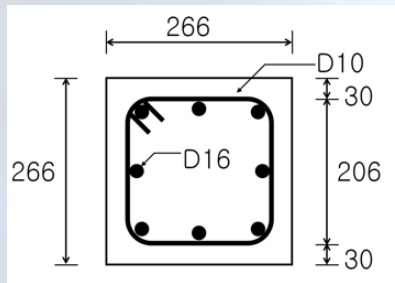
콘크리트구조기준(KCI2012)

• 주철근

- 철근비 : 1%이상, 8%이하 -> 2.2%
- 철근지름 : D13 이상 -> D16
- 띠철근기둥 최소개수 : 4개 이상
- 나선철근기둥 최소개수 : 6개 이상
- 피복두께 : 40mm이상 (단, 설계기준압축강도가 40MPa일 경우 10mm줄일수 있다. -> 설계강도 40Mpa -> 30mm)

• 횡방향철근

- 주근직경 D32이하일 경우 D10 이상 -> D10



횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 변수

Specimen	Shape of cross-section	Type of transverse reinforcement	Spacing of transverse reinforcement (mm)
SH50	Square	Hoops	50
SH100			100
SH150			150
SS50		Spiral	50
SS100			100
SS150			150
CH50	Circle	Hoops	50
CH100			100
CH150			150
CS50		Spiral	50
CS100			100
CS150			150

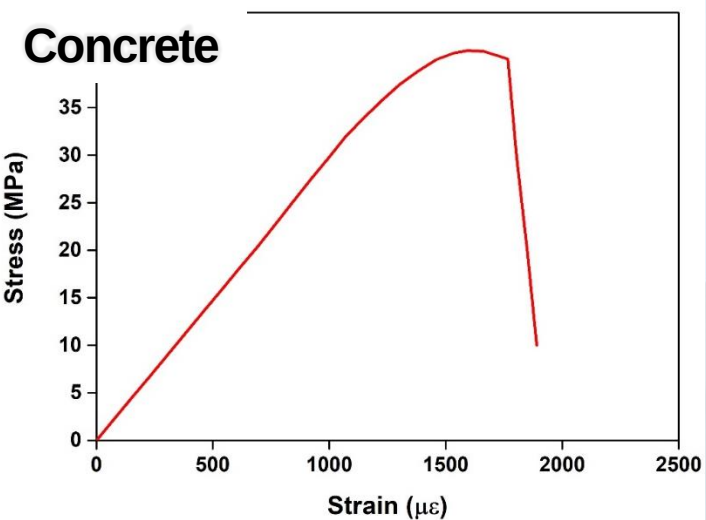
총 36개

횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험체 제원

설계기준강도 40MPa, 1종 보통 포틀랜드 시멘트

Slump (cm)	Air content(%)	W/B (%)	S/a (%)	Weight per unit volume (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AD
12	4.5	40	50.4	155.2	388	954	908	30



Φ100mm×200mm 공시체 6개 제작



압축강도 측정 (KS F 2405(KS,2017) 기준에 따라 수행)

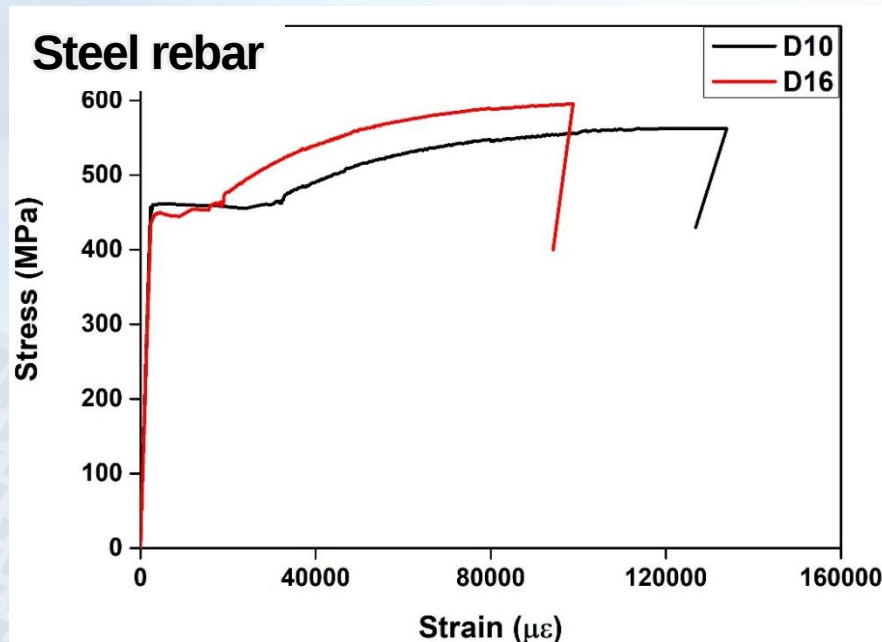


콘크리트 평균 압축강도 = 40.1MPa

횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험체 제원

Standard No.	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
D10	201.01	456.86	562.57	12.2
D16	192.22	435.63	595.54	9.88



기계적 특성파악



직접인장시험 수행

횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험체 제작



SD400 철근가공



철근 조립



설계강도 40MPa

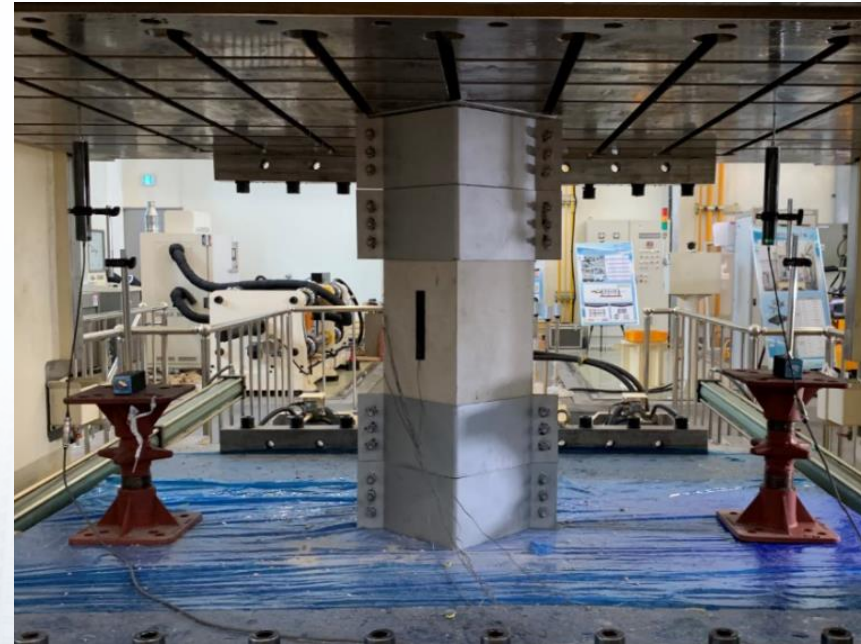


28일간 양생



횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 방법



- 10,000kN 용량의 액추에이터를 이용하여 일축압축시험 실시
- 하중 : 변위제어를 통해 0.01mm/min으로 가력
- 단부 파괴 방지 위하여 상하부 300mm 용량의 강제커플러로 구속 (50mm 1개는 사용안함)
- 편심방지를 위해 상단에 철판캡 사용
- LVDT를 이용하여 실험체 변위 처짐 측정
- 스트레인게이지를 부착하여 변형률 측정

횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 결과(파괴모드)



SH50

SS50



CH50

CS50

- 강제커플러를 사용한 실험체는 중앙부에서 균열 발생후 파괴
- 사각기둥에 발생한 균열은 기둥 4개의 면 중 1개의 면에서 집중되어 발생
- 원형 기둥은 모든 면에서 골고루 발생
- 나선철근으로 배근된 시편은 띠철근으로 배근된 시편에 비해 콘크리트 손상이 심함

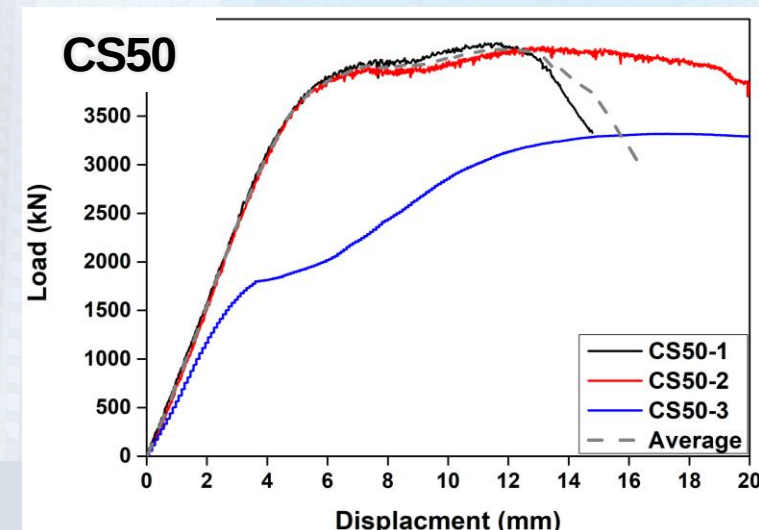
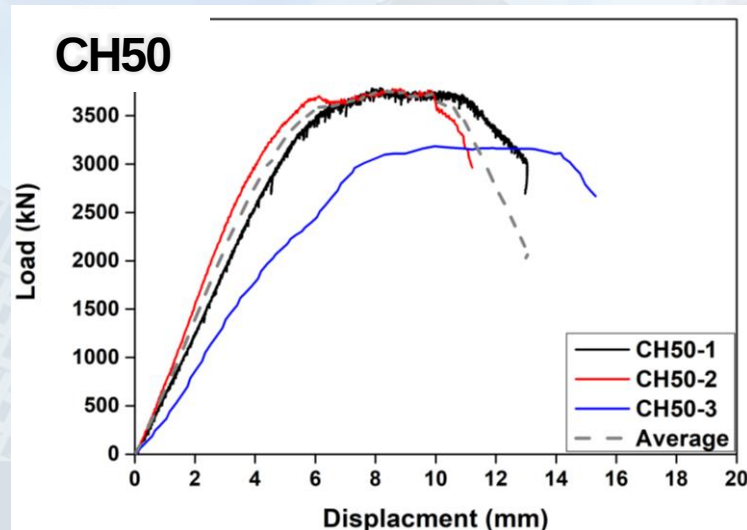
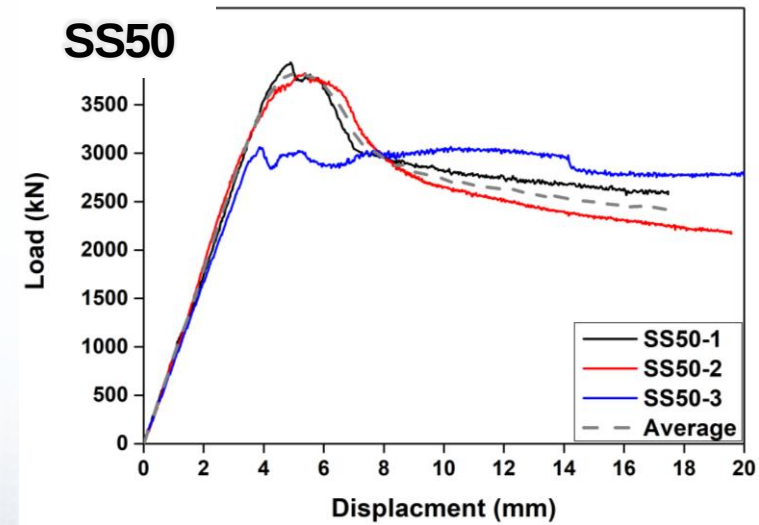
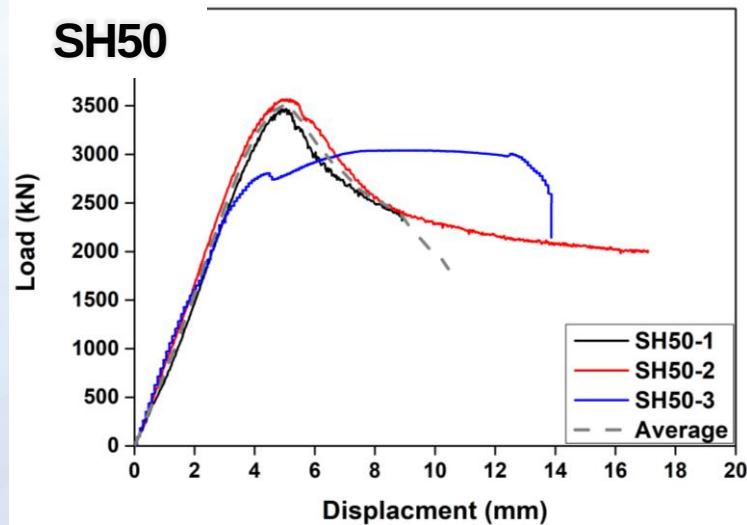
횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 결과(파괴모드)



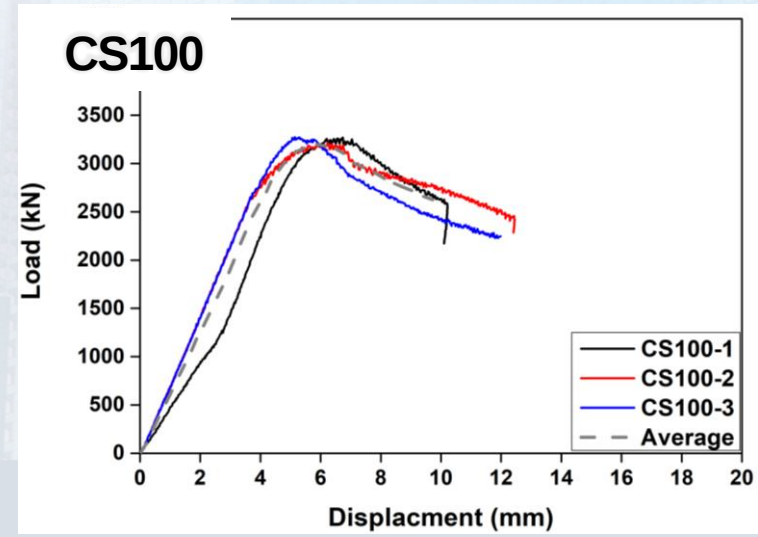
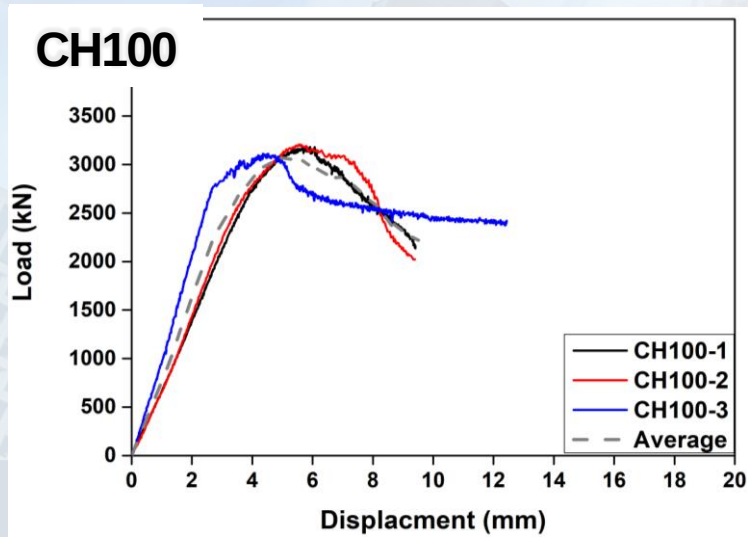
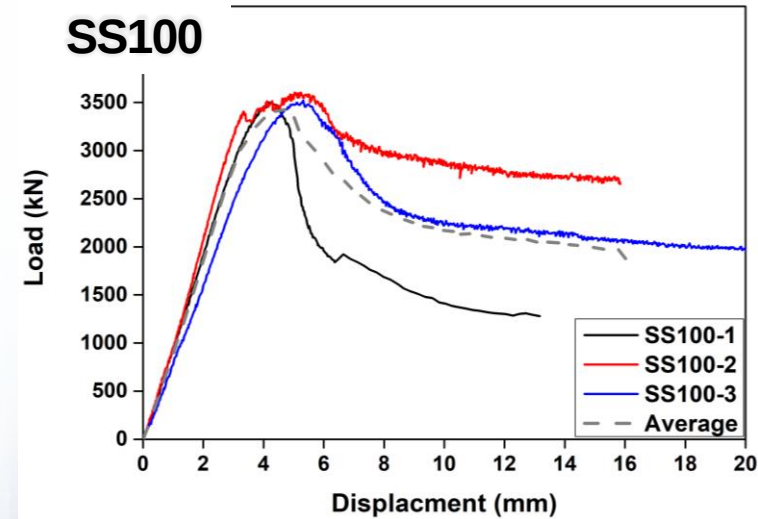
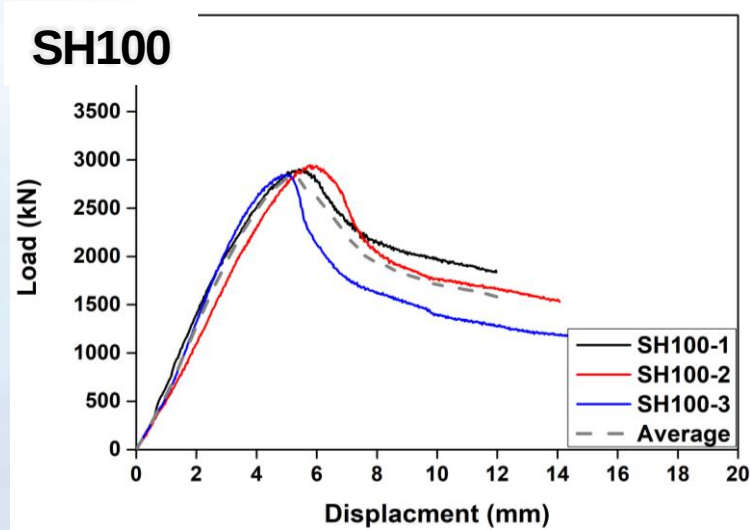
횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 결과(하중-변위 관계)



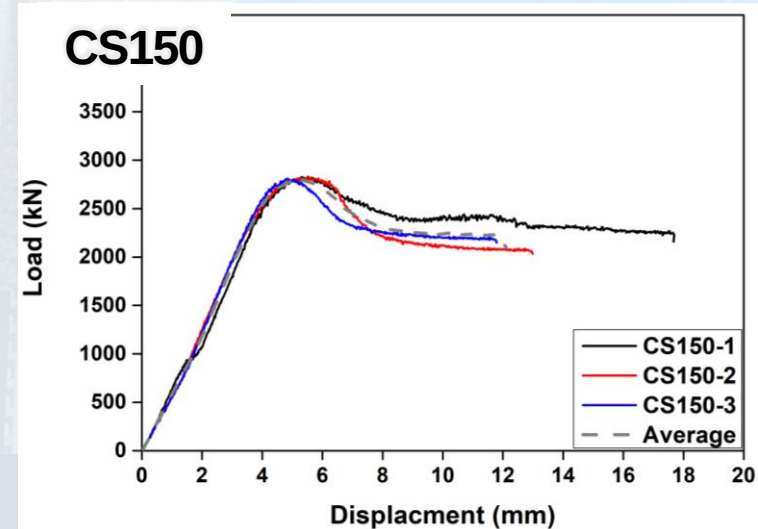
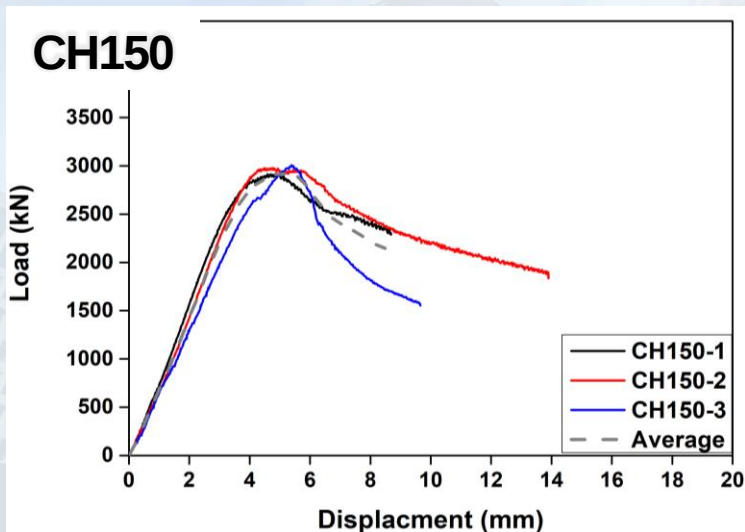
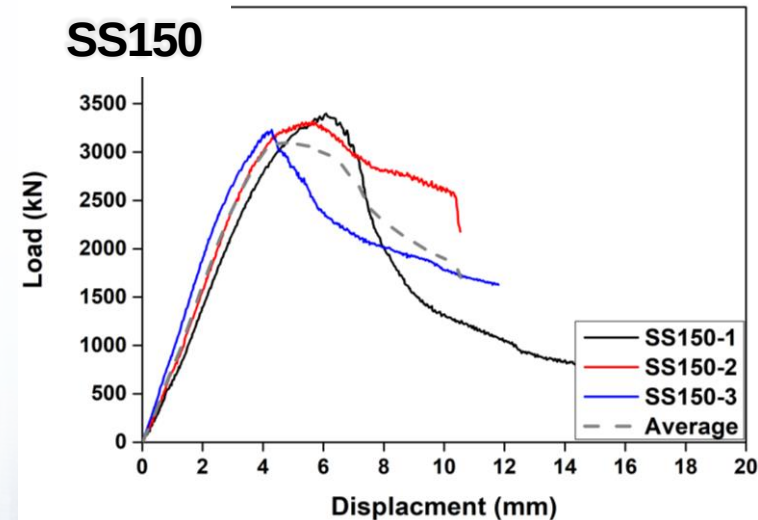
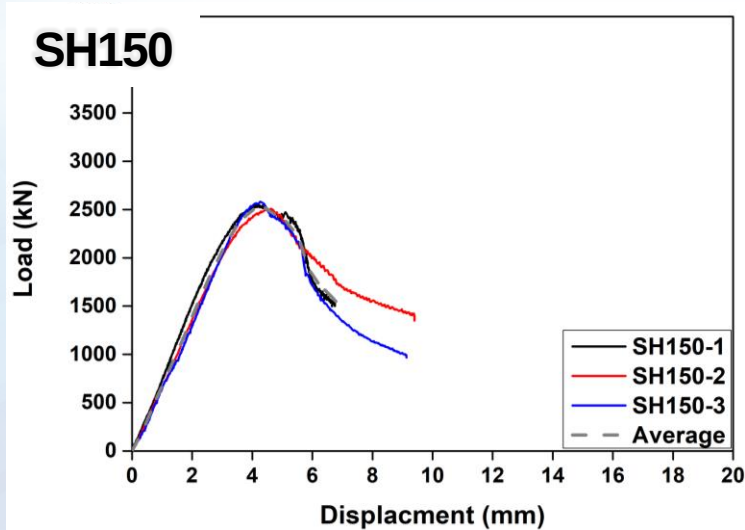
횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 결과(하중-변위 관계)



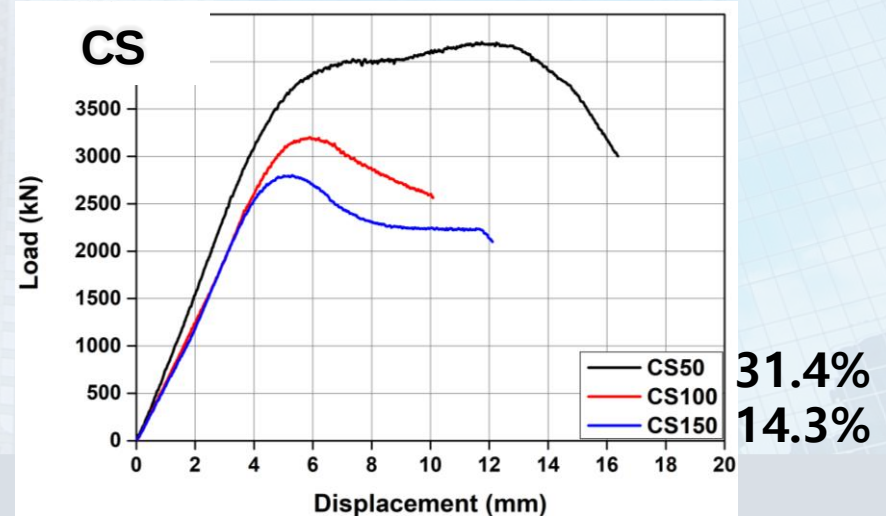
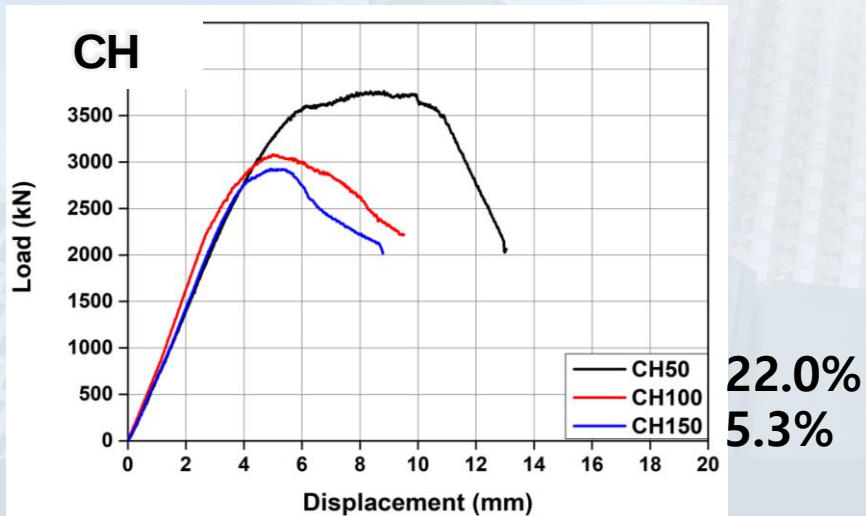
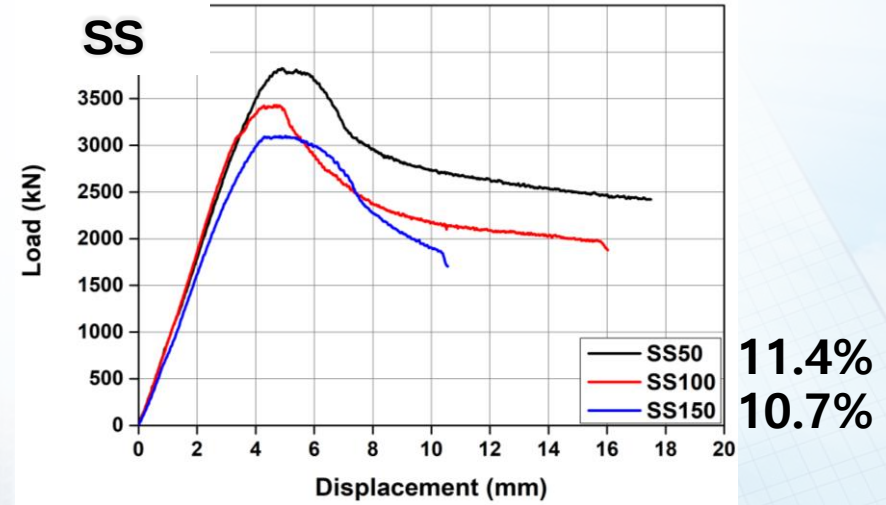
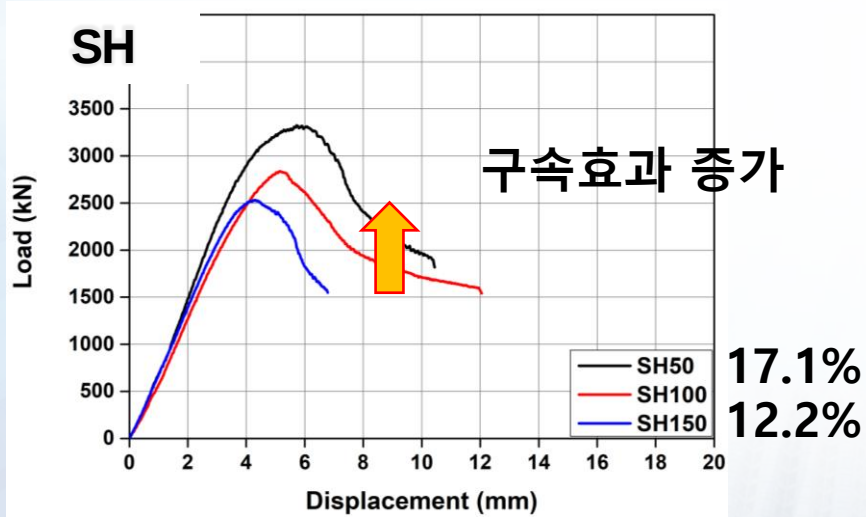
횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 결과(하중-변위 관계)



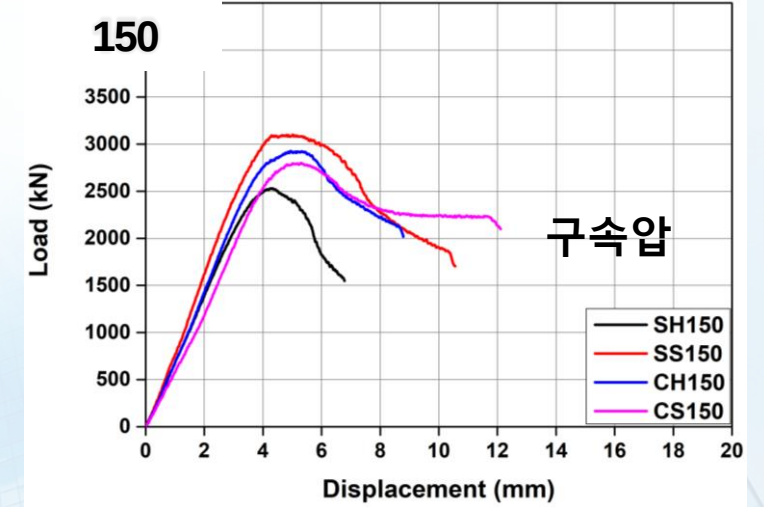
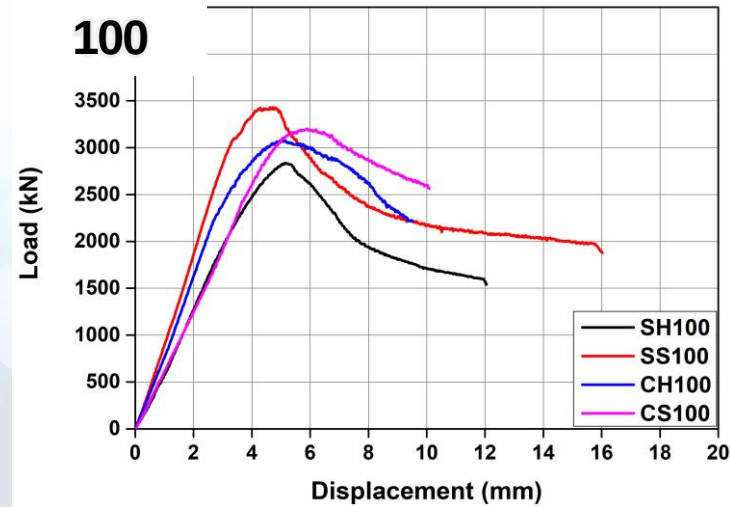
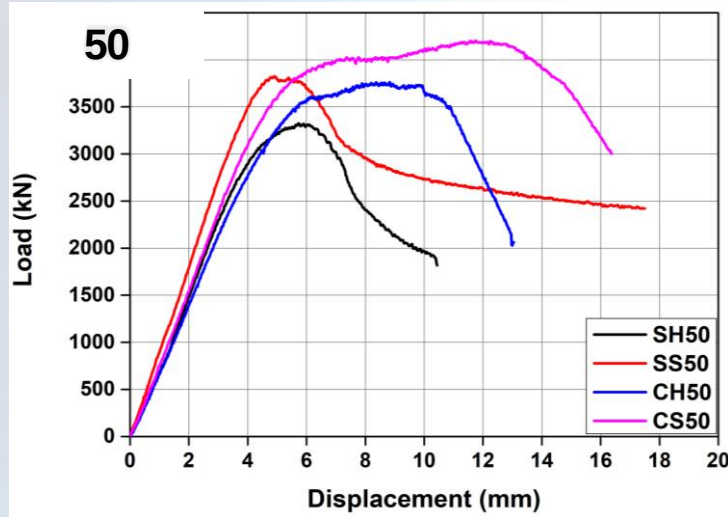
횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 결과(횡방향 철근 간격의 영향)



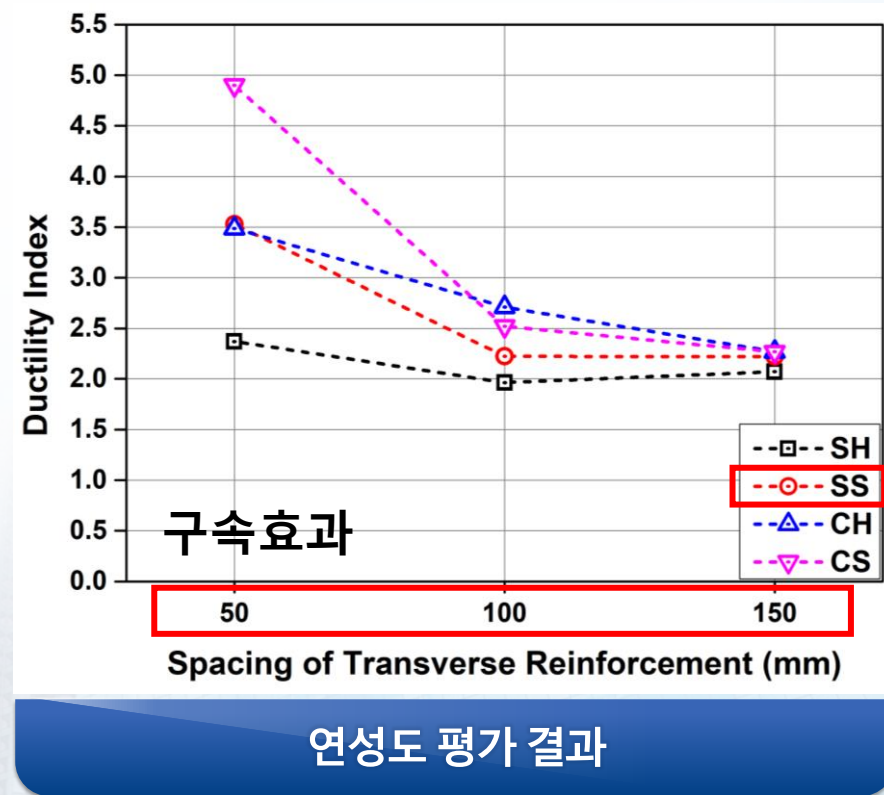
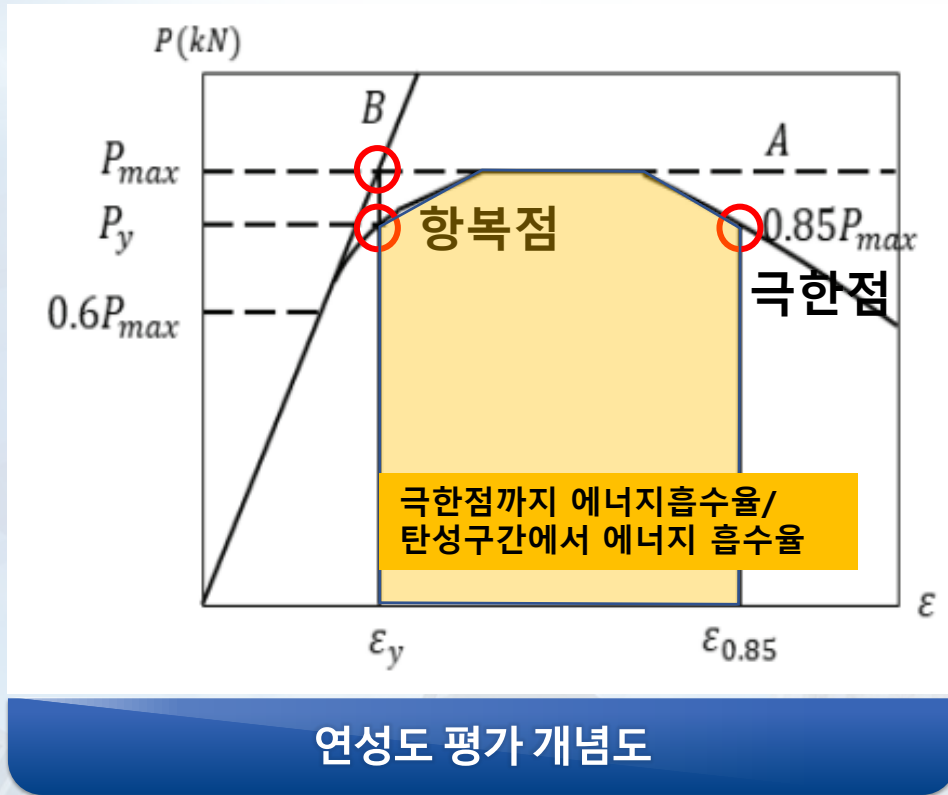
횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

● 실험 결과(기둥단면의 형태 및 횡방향 철근 종류의 영향)



횡방향 철근 보강 RC 기둥의 일축압축실험

- 연성도 평가 (구조물 안전성 측면에서 중요)



- Jang 등(1999)가 제안한 방법을 통해 실험체의 연성도 평가를 수행함.
- 탄성구간에서 에너지 흡수율에 대한 극한점까지 에너지흡수율의 비로 계산
- 연속 횡방향 철근으로 보강된 사각기둥 실험체의 연성지수는 띠철근으로 보강된 원형기둥과 유사한 수준의 연성 및 내하력을 확보할 수 있을것으로 판단.

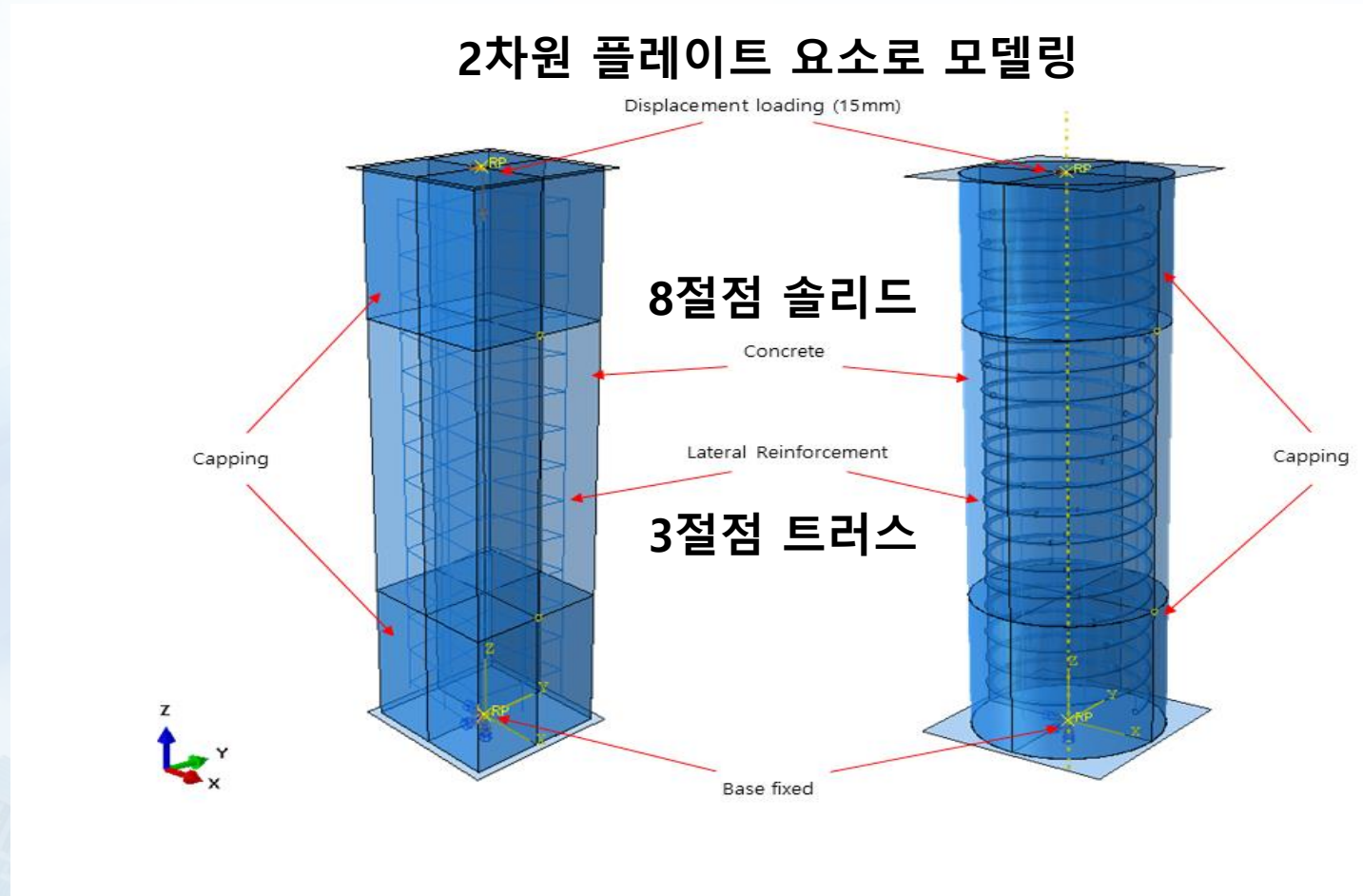


Contents

- 1 서론
- 2 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과 이론
- 3 횡방향 철근 보강 RC기둥의 일축압축실험
- 4 연속 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 일축압축거동 예측
- 5 결론

횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

3차원 유한요소 해석 (ABAQUS)



- 콘크리트와 철근이 완전 부착한것으로 가정.
- 하중은 가력판에 수직변위를 가하는 변위제어 방식으로 수행.

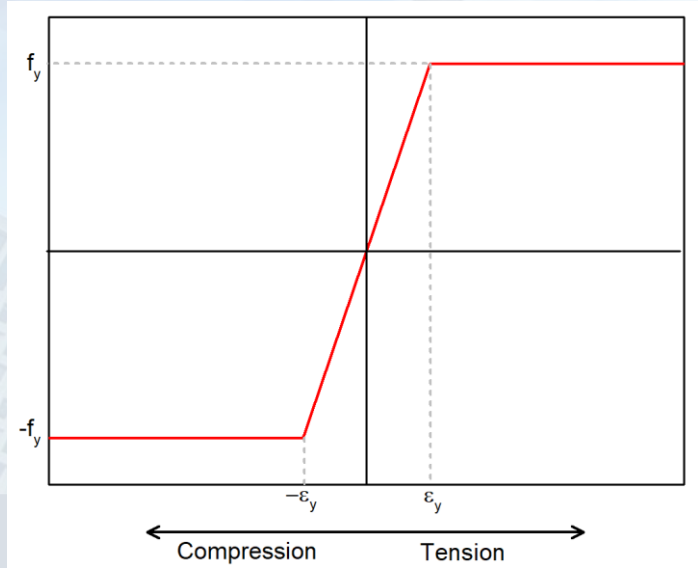
횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

● 재료모델

● 콘크리트 재료모델로 Concrete Damaged Plasticity(CDP) 사용 (재료 이방성 고려)

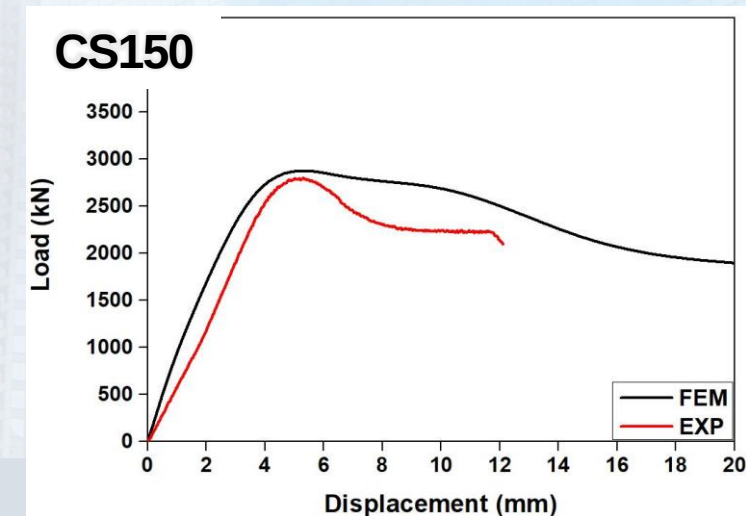
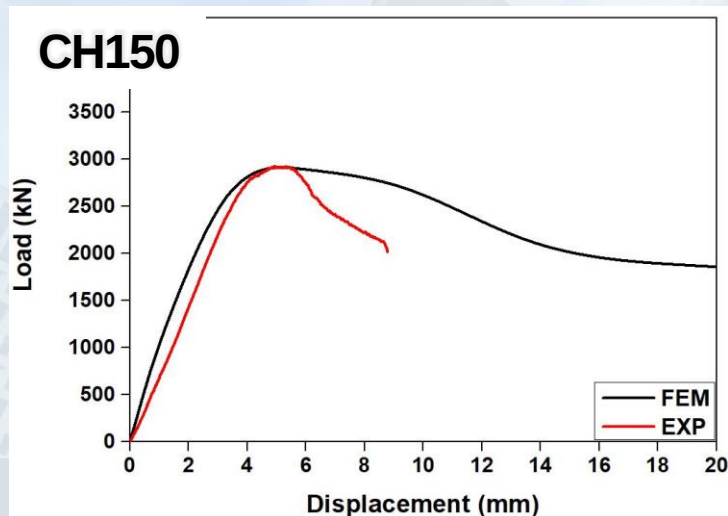
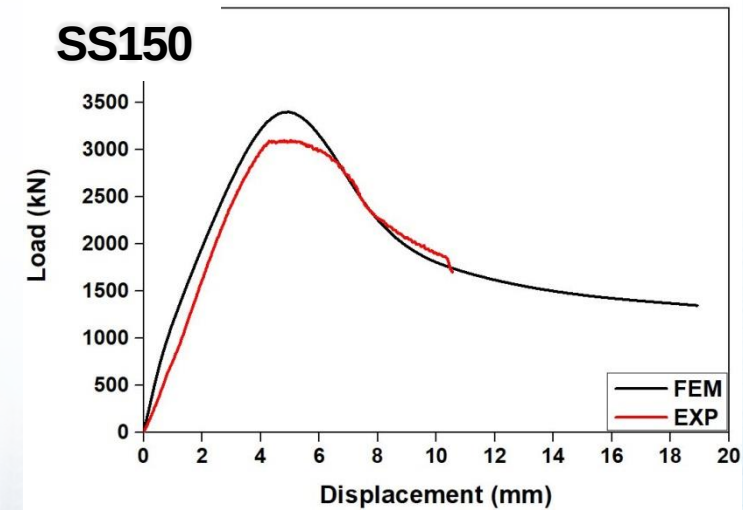
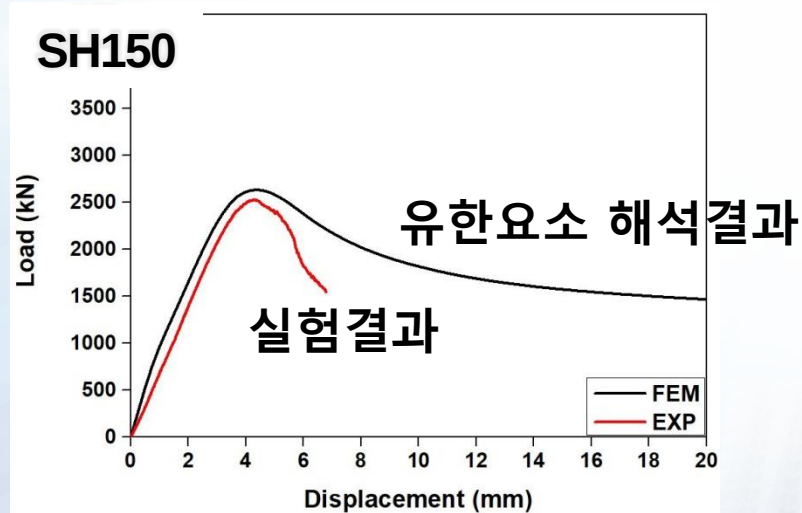
Density	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's ratio	ψ	ϵ	σ_{b0}/σ_{co}	K_c	μ
2,400	33,000	0.18	15	0.1	1.16	0.667	0.0005

● 철근 재료모델은 완전탄소성 거동하는 것으로 가정하여 모델링



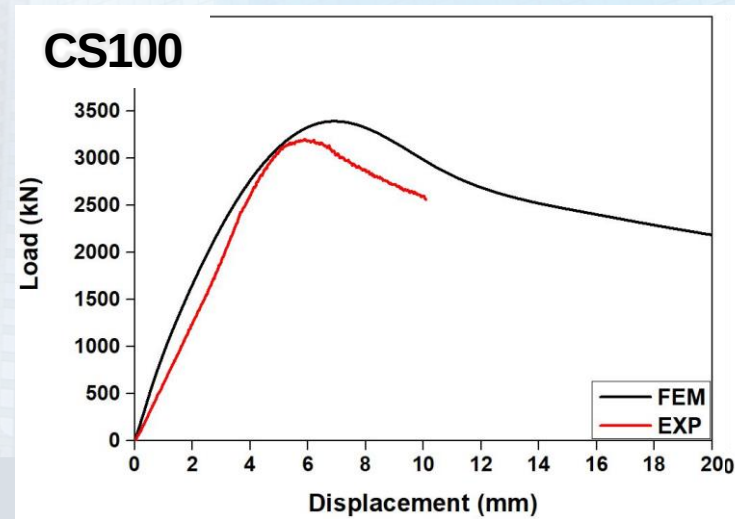
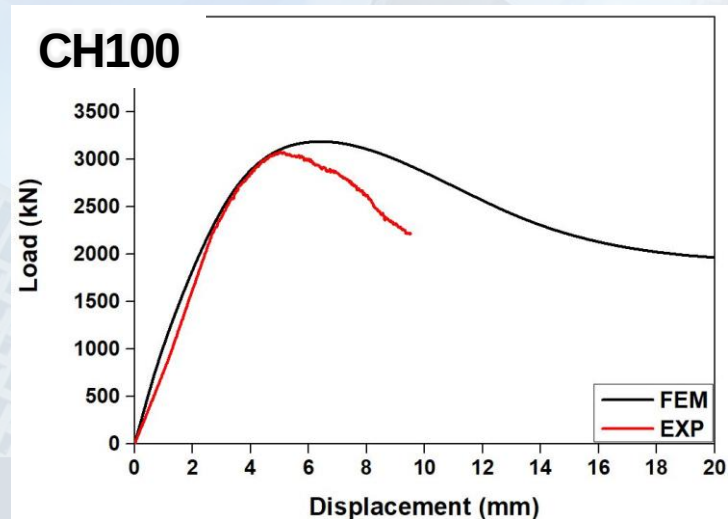
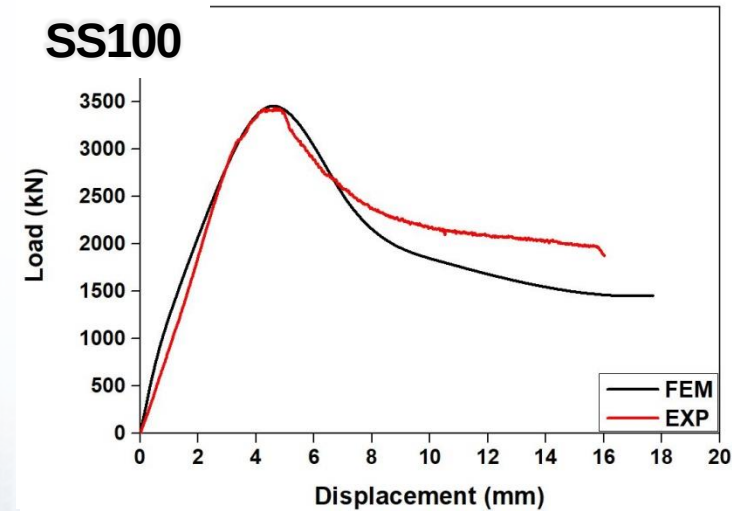
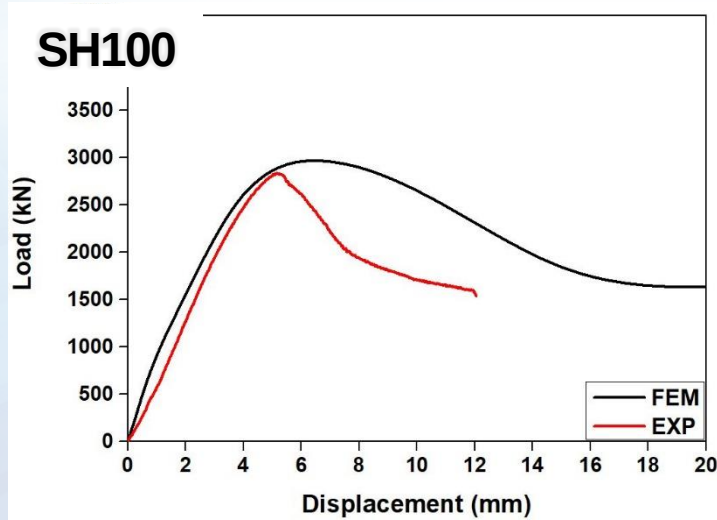
횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

해석결과(하중-변위 응답)



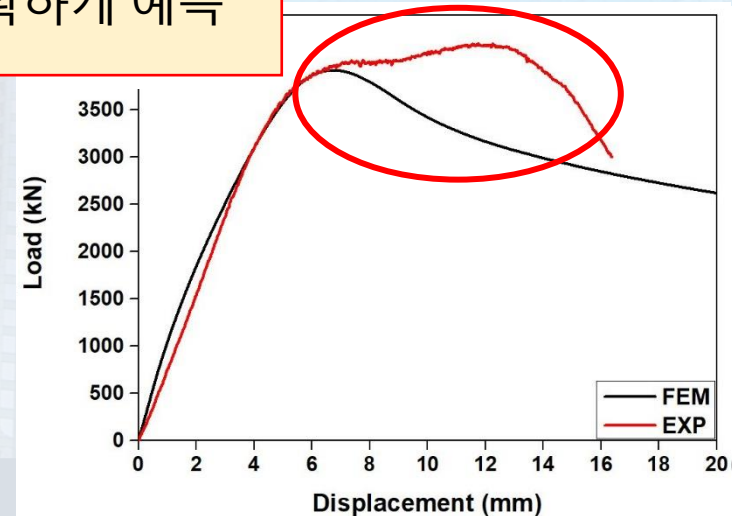
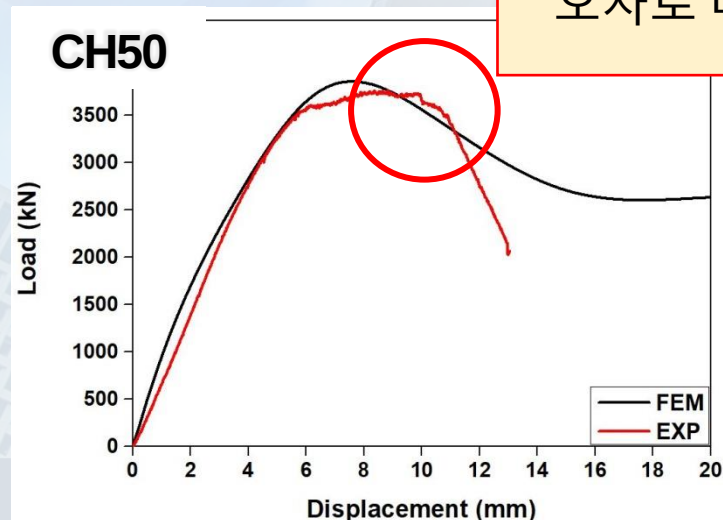
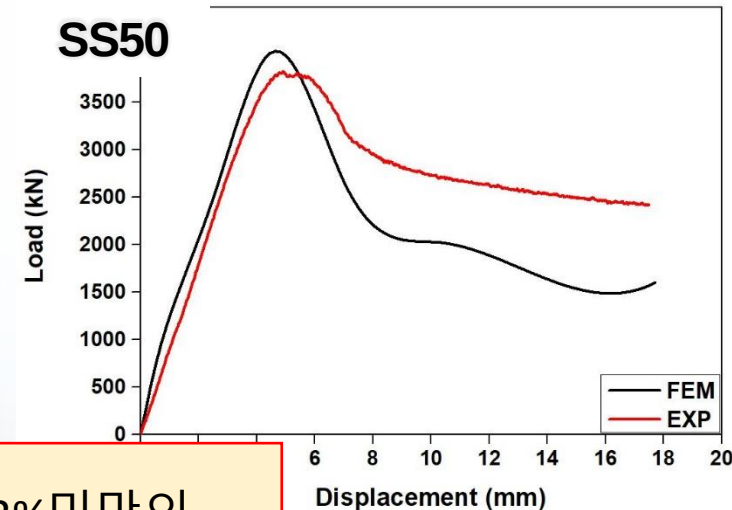
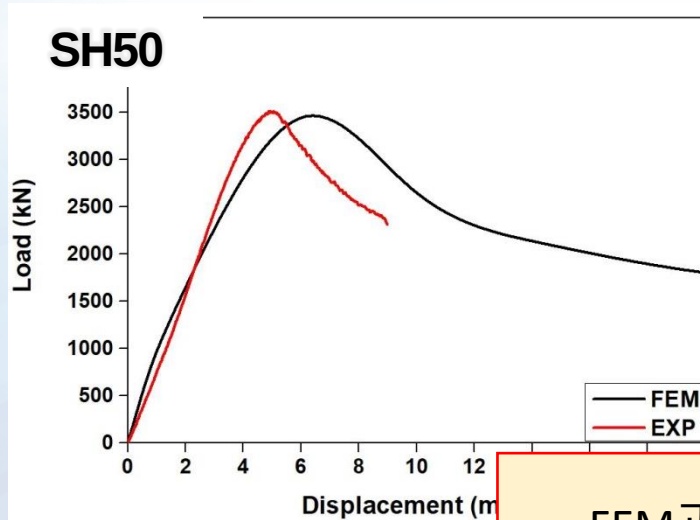
횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

해석결과(하중-변위 응답)



횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

해석결과(하중-변위 응답)



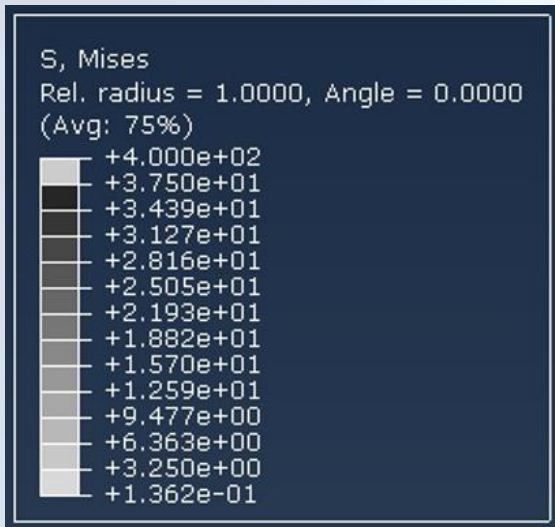
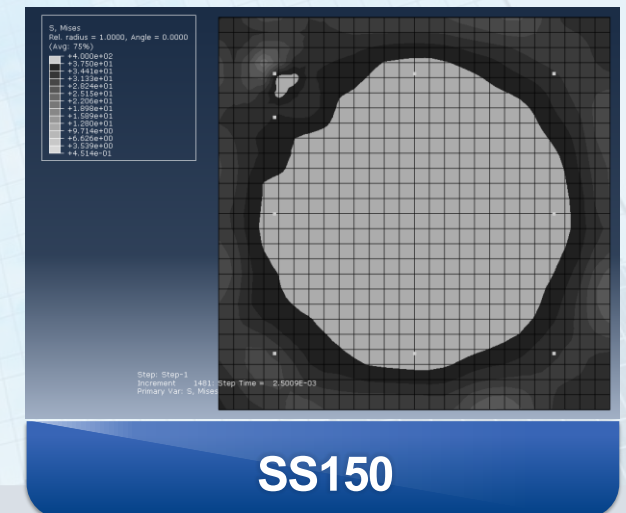
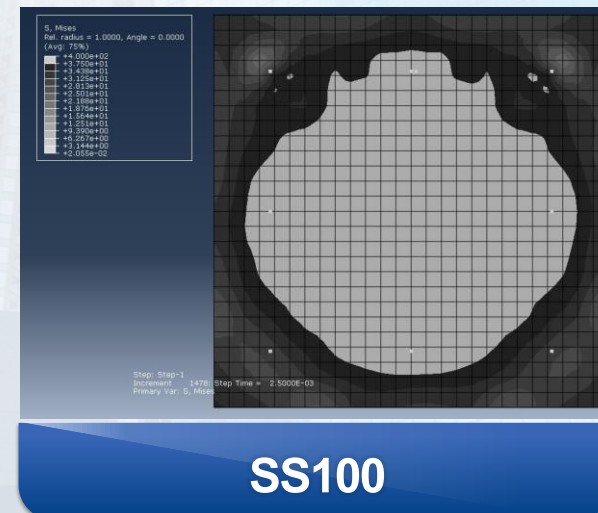
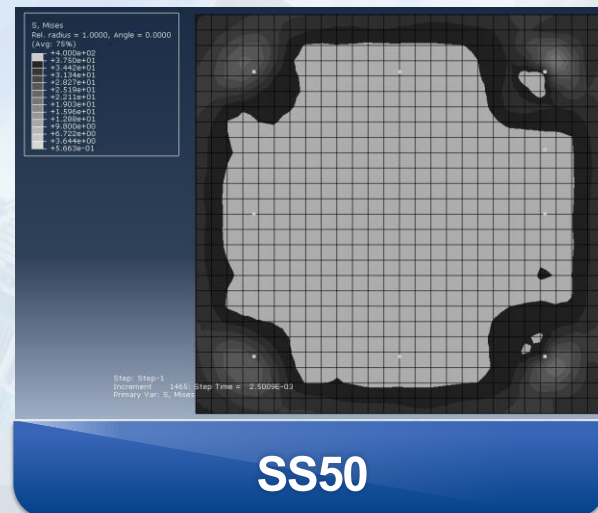
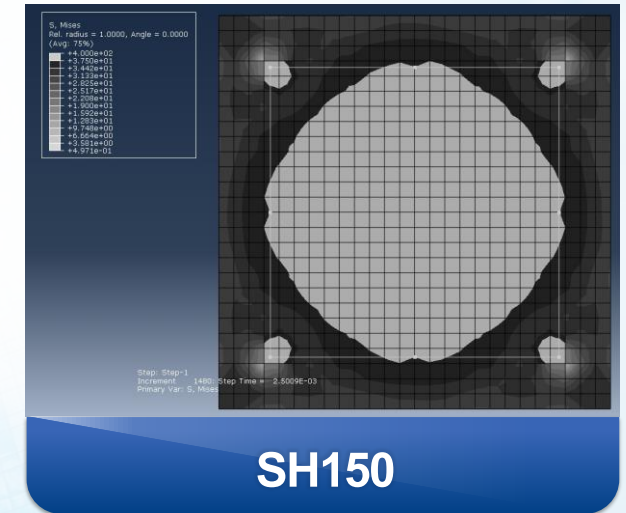
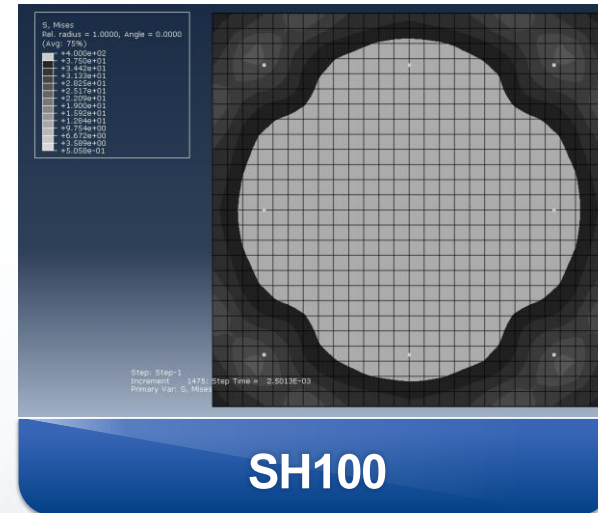
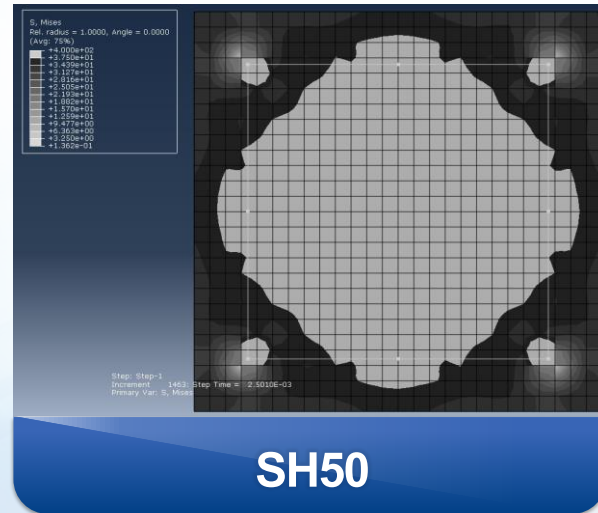
구속효과에

FEM과 EXP 평균 3%미만의
오차로 비교적 정확하게 예측

중경화현상 예측 한계

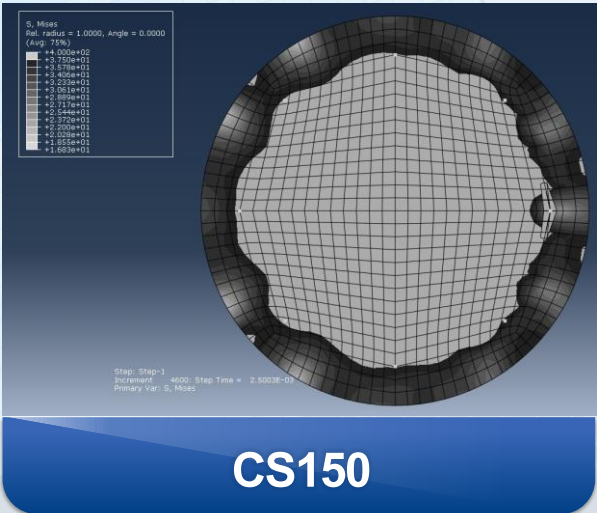
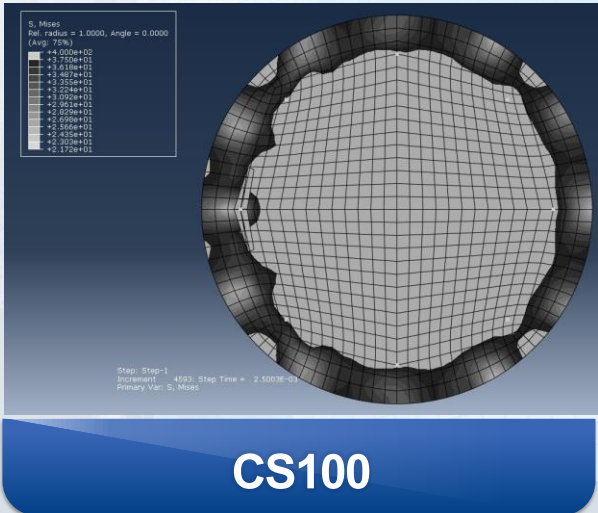
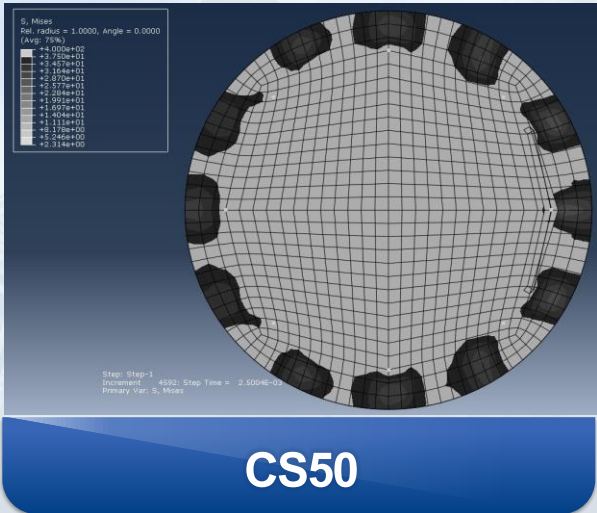
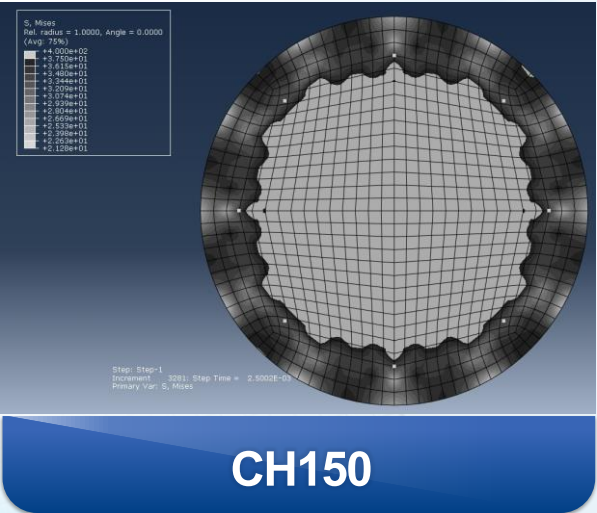
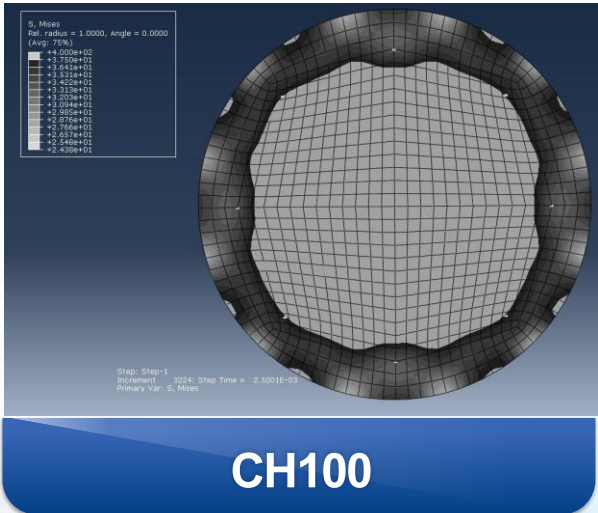
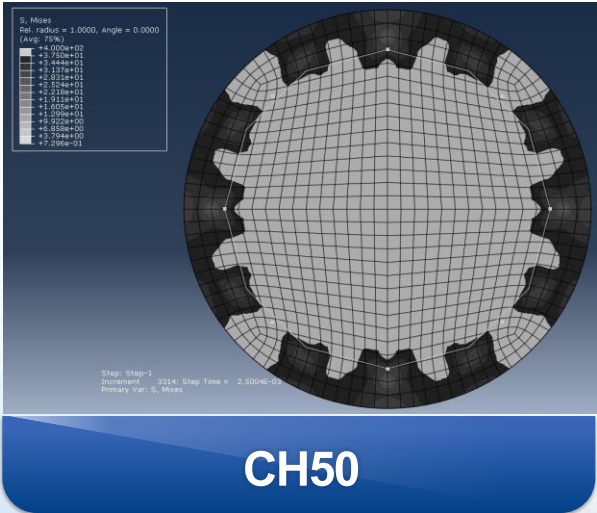
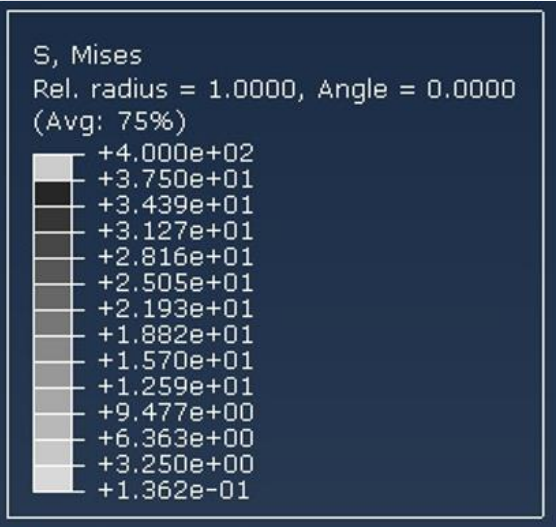
횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

● 해석결과 : 실험체 파괴단계에서 예측된 실험체들의 중앙 단면부의 Von-mises응력 분포



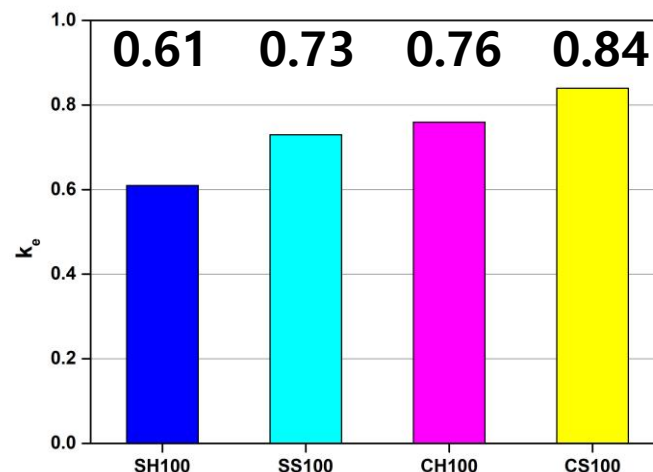
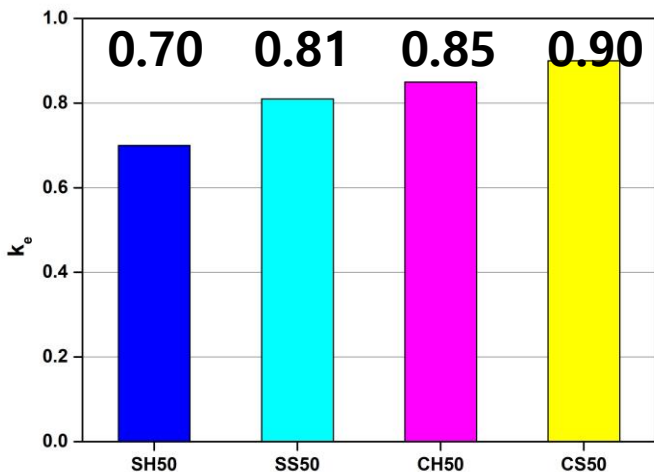
횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

● 해석결과 : 철근간격 감소에 따라 유효응력단면 증가



횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

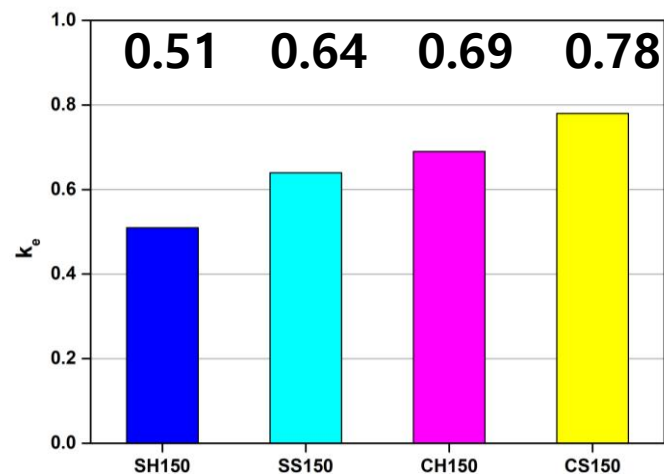
● 해석결과(유효응력단면)



유효횡구속 계수 (정량적 평가)

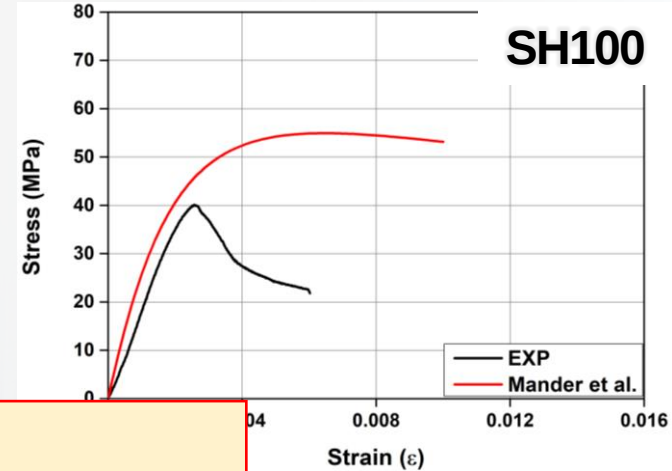
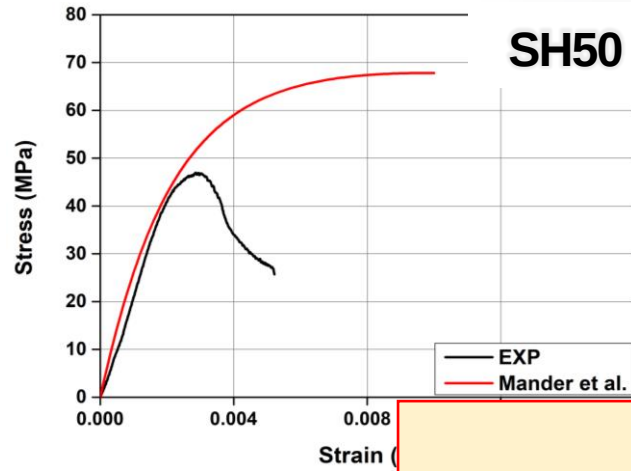
$$k_e = \frac{A_{c,FEM}}{A_g} \quad (5.3)$$

- 철근간격 50 > 100 > 150
- SH < SS < CH < CS
- SS와 CH의 유효횡구속계수 5%이내
- SS는 CH와 유사한 연성 및 강도확보 가능 판단



횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

● 기존 응력변형률 모델의 적용성 검토 (Mander 모델)

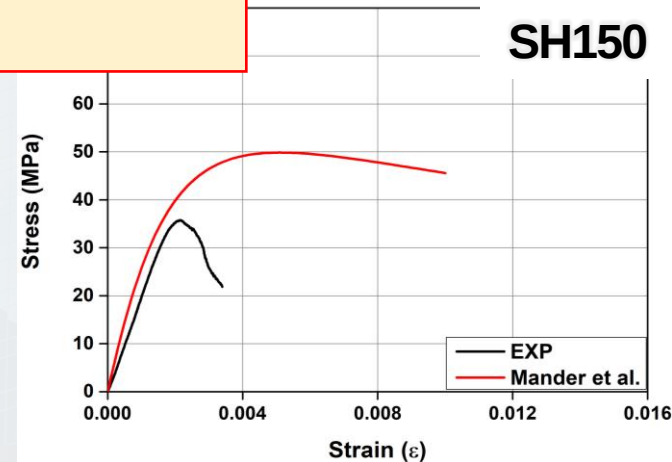


최대하중 40%이상 큰 오차

$$f_c = \frac{f_{cc} x^r}{r-1+x^r}, \quad x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}, \quad r = \frac{f_{cc}}{f_{co}}$$

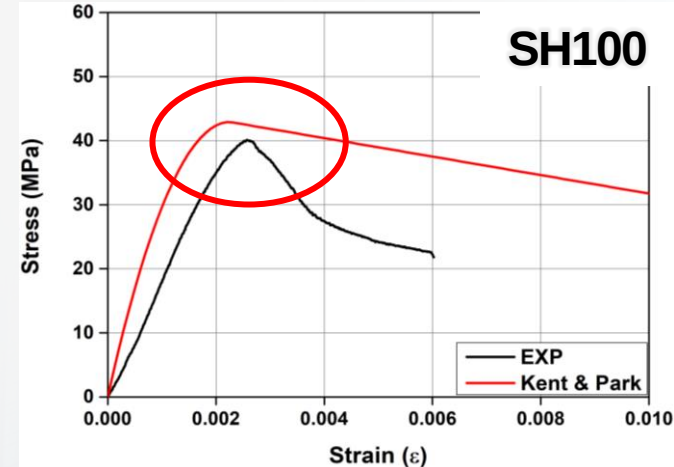
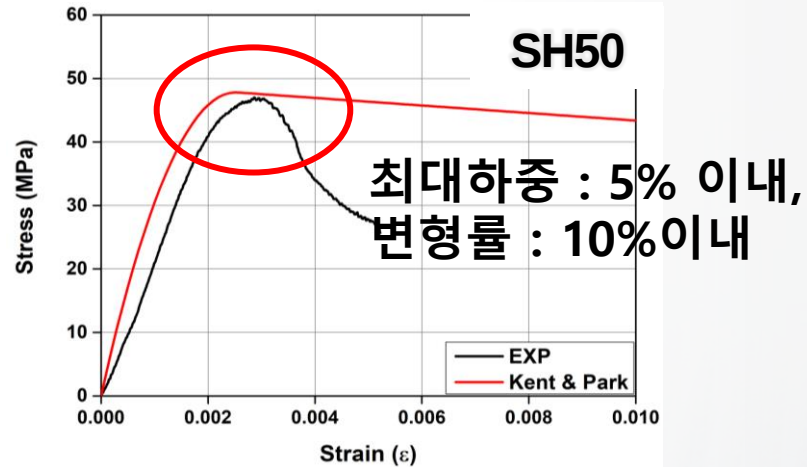
$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$$

$$f_{cc} = f_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.794 f_{reM}}{f_{co}}} - 2 \frac{f_{reM}}{f_{co}} \right)$$



횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

● 기존 응력변형률 모델의 적용성 검토 (Kent & Park 모델)

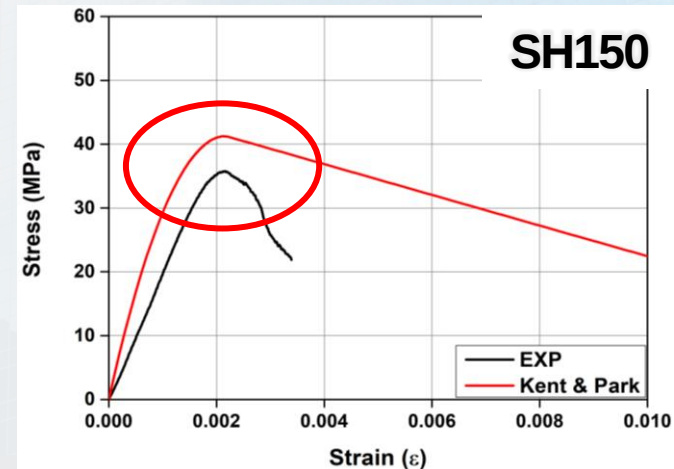


$$f_c = K f_{co} \left(\frac{2\epsilon_c}{0.002K} - \left(\frac{\epsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right)$$

$$= K f_{co} (1 - Z_m (\epsilon_c - 0.002K))$$

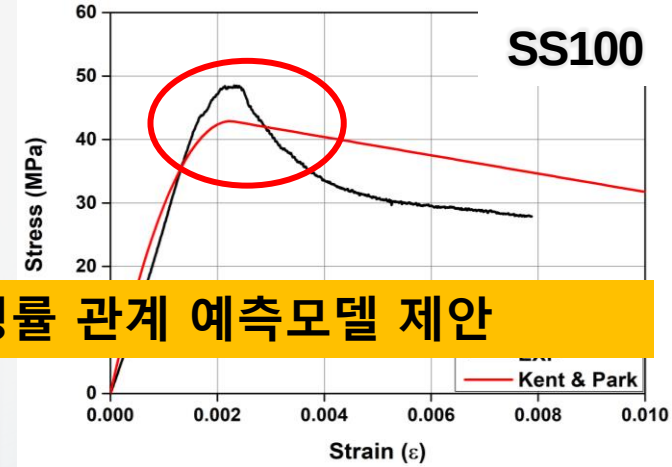
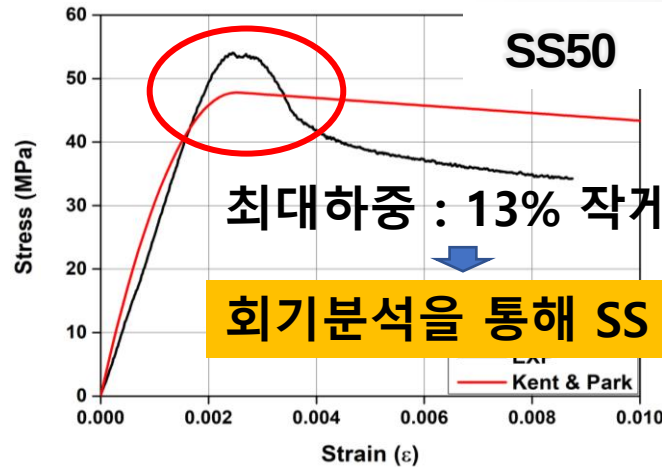
$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}}$$

$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3+0.29f_{co}}{145f_{co}-1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{d}{s}} - 0.002K}$$



횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

● 기존 응력변형률 모델의 적용성 검토 (Kent & Park 모델)



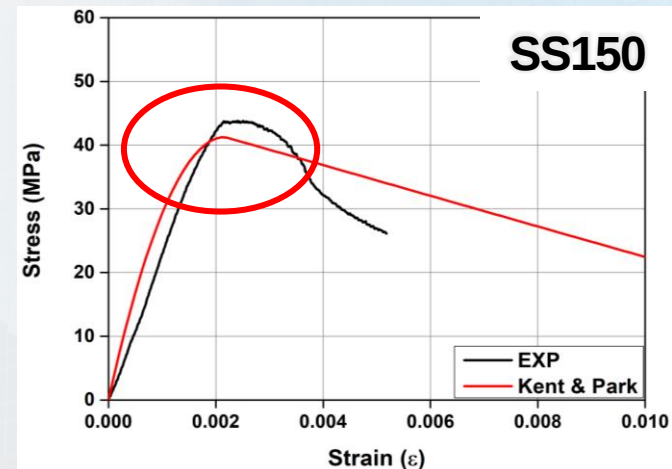
회기분석을 통해 SS 응력-변형률 관계 예측모델 제안

$$f_c = K f_{co} \left(\frac{2\epsilon_c}{0.002K} - \left(\frac{\epsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right)$$

$$= K f_{co} (1 - Z_m (\epsilon_c - 0.002K))$$

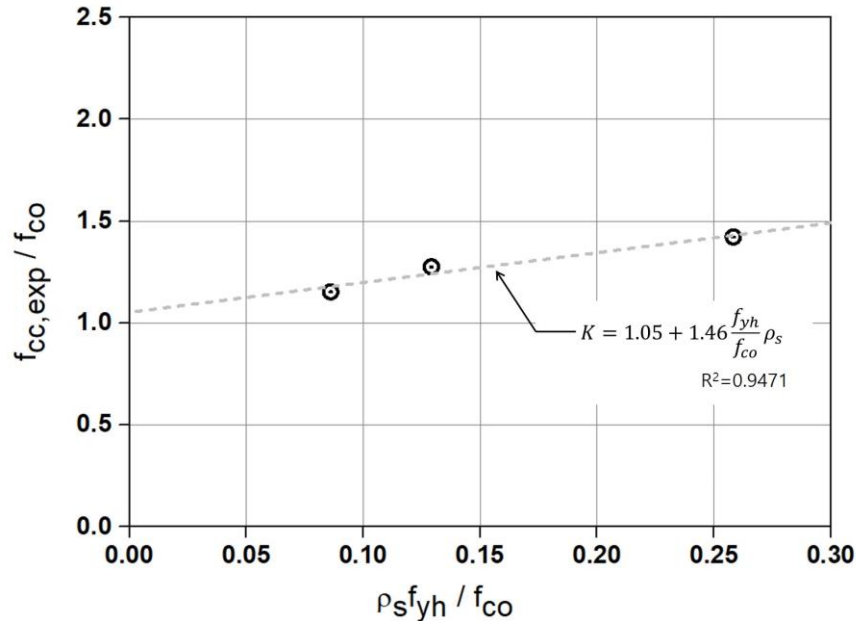
$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}}$$

$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3+0.29f_{co}}{145f_{co}-1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{d}{s}} - 0.002K}$$

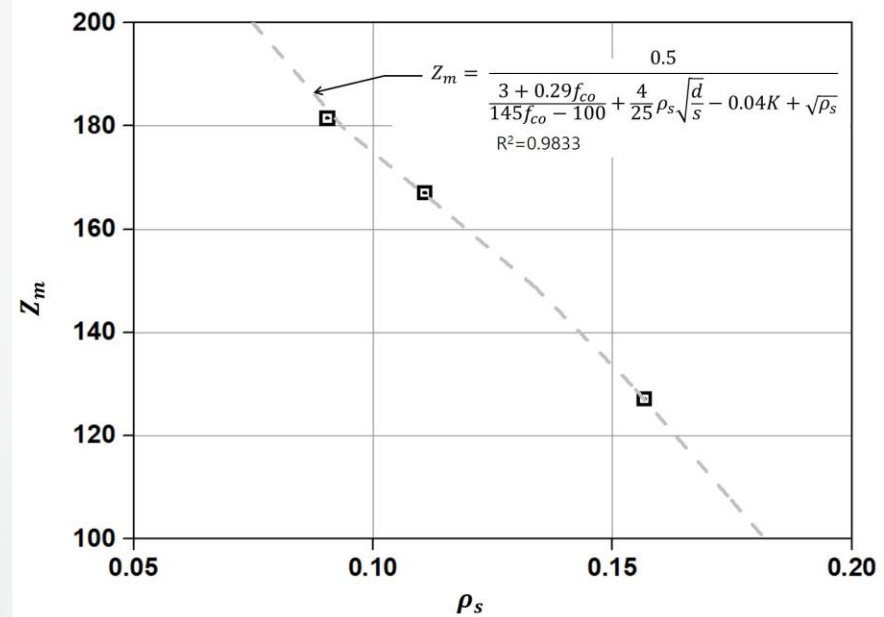


횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

● 연속 횡방향 철근으로 구속된 사각 콘크리트의 응력-변형률 모델 제안



K 도출을 위한 회귀분석 결과

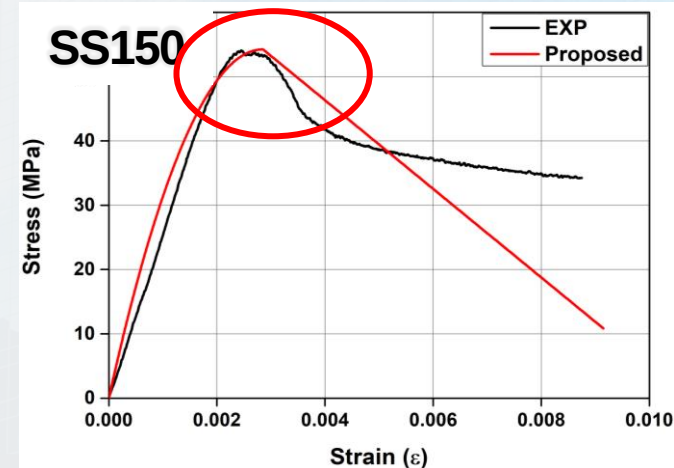
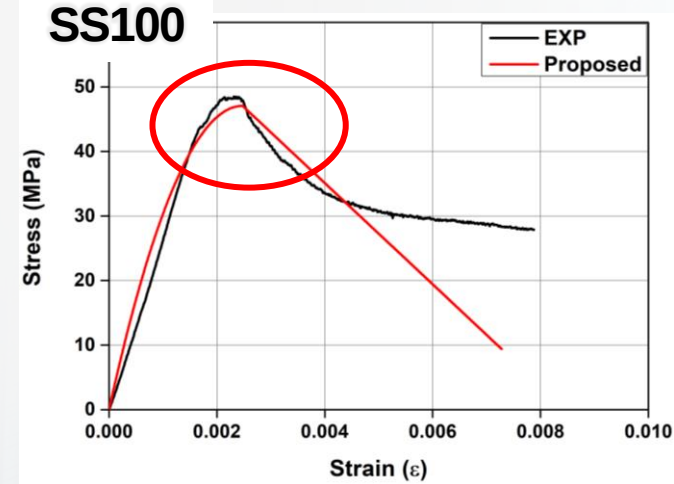
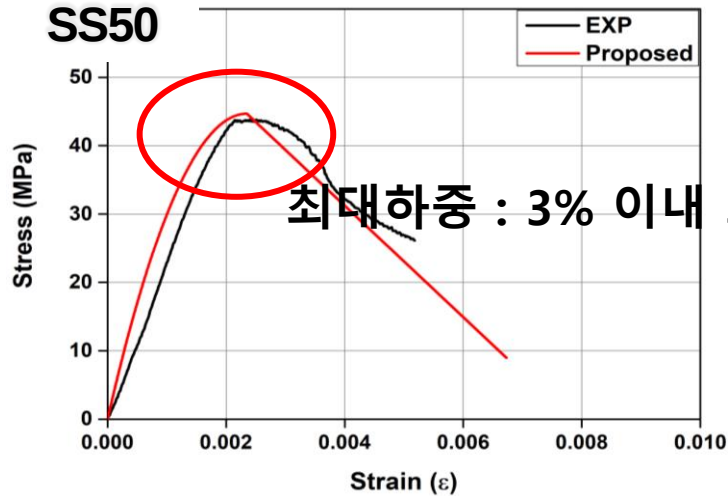


Z_m 도출을 위한 회귀분석 결과

- 기존 모델은 최대압축응력 평가 위해 K 제안, 압축강도 발현 이후 응력감소 Z_m 통해 계산
- 본 연구에서 동일한 콘크리트, 철근 사용하였으므로 독립변수 (압축강도, 항복강도, 횡방향 철근비)는 상수로 고려
- 실험결과에 대한 회귀분석을 통해 K와 Z_m 을 도출 : 상관지수는 각각 0.9471, 0.9833

횡방향 철근 보강 사각 RC 기둥의 일축압축거동 예측

● 연속 횡방향 철근으로 구속된 사각 콘크리트의 응력-변형률 모델 제안



$$f_c = Kp f_{co} \left(\frac{2\epsilon_c}{0.002Kp} - \left(\frac{\epsilon_c}{0.002Kp} \right)^2 \right)$$

$$= Kp f_{co} (1 - Z_{mp} (\epsilon_c - 0.002Kp))$$

$$Kp = 1.05 + 1.46 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}}$$

$$Z_{mp} = \frac{0.5}{\frac{3+0.29f_{co}}{145f_{co}-1000} + 0.16\rho_s \sqrt{\frac{d}{s}} - 0.04Kp + \sqrt{\rho_s}}$$



Contents

- 1 서론
- 2 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 구속효과 이론
- 3 횡방향 철근 보강 RC기둥의 일축압축실험
- 4 연속 횡방향 철근 보강 사각 RC기둥의 일축압축거동 예측
- 5 결론

결론

- 본 연구에서 지진하중에 저항하기 위한 방안으로 연속횡방향철근으로 횡구속된 사각기둥의 일축압축거동을 평가하기 위한 실험 및 해석적 연구를 수행.
- 횡방향 철근 간격이 50mm 감소함에 따라 최대하중은 5.3% ~ 22% 증가. 횡방향 철근의 간격이 같을 때 최대하중은 $SH < SS$, $CH < CS$ 로 나타남.
 - ➡ 구속압이 높기 때문으로 판단함.
- 연성지수 : $SS > SH$, $SS < CS$, SS 는 CH 와 비슷함.
횡구속계수 : $SH < SS < CH < CS$, SS 는 CH 와 비슷함.
 - ➡ SS 는 CH 와 유사한 수준의 연성 및 내하력을 확보할 수 있을 것으로 사료됨.
- 유한요소 해석모델의 경우 실험값과 최대하중이 5%미만의 오차를 가짐.
Kent&Park모델을 수정하여 SS모델식 제안 : 최대응력 평균 1.76%, 변형률 9.7%의 오차로 예측.
 - ➡ 횡방향 철근으로 구속된 기둥의 일축 압축거동을 예측하는데 사용가능.



경청해 주셔서 감사합니다