

2018 KEPIC Week

철근콘크리트 부재의 전단마찰 거동에 대한 연구

2018. 08

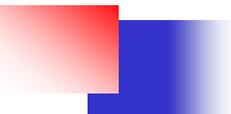
김 호 영, 권 동 욱, 이 재 훈



한국수력원자력



영남대학교

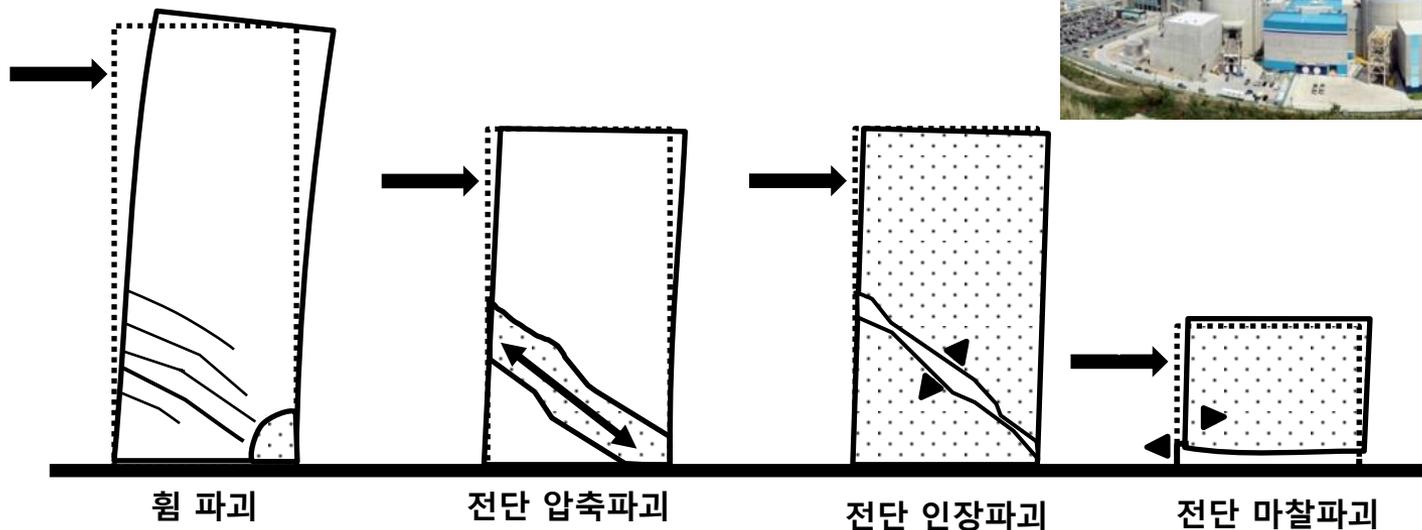


목 차

- 연구배경 및 연구목적
- 국·내외 설계기준
- 주요 실험변수
- 실험결과
- 실험결과 분석
- 결론

연구배경 및 연구목적

- 전단력이 한 면에서 직접 전달되는 경우, 전단응력이 큰 면을 따라 전단 파괴면이 형성됨. (원자력발전소 구조물, 교량의 코벨, 프리캐스트 교량 등)
- 원자력발전소 구조물과 같이 높은 강도 및 안전성을 요구 할 경우 철근량 증가로 인한 재료비 상승 및 시공성 저하와 같은 문제 발생.
- 현재 전단마찰에 대한 설계기준의 경우 전단마찰 철근의 최대 항복강도를 제한하고 있음. (ACI-318: 420MPa, KCI: 500MPa)

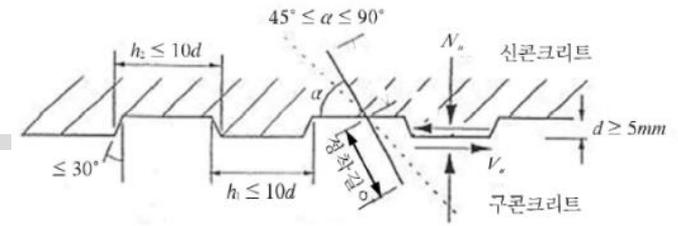


국내 · 외 설계기준

설계기준	계산식	철근항복강도 한계
ACI 318-14	$V_n = uA_v f_y \leq 0.2 f_{ck} A_c$ $v_n = u \rho f_y \leq 0.2 f_{ck}$	$f_y \leq 420MPa$
콘크리트구조기준 2012	ACI 318-14와 동일	$f_y \leq 500MPa$
AASHTO-LRFD	$V_{ni} = cA_{cv} + \mu A_s f_y \leq K_1 f_{ck} A_{cv}$ or $K_2 A_{cv}$ $v_{ni} = c + \mu \rho f_y \leq K_1 f_{ck}$ or K_2	$f_y \leq 420MPa$

표면상태	점착계수	마찰계수		
	AASHTO c	AASHTO μ	ACI μ	KCI μ
일체로 친 콘크리트	1.0	1.4	1.4	1.4
표면을 약 6mm 깊이로 요철을 거칠게 만든 굳은 콘크리트에 새로 친 콘크리트	0.7	1.0	1.0	1.0
일부러 거칠게 하지 않은 굳은 콘크리트에 새로 친 콘크리트	0.52	0.6	0.6	0.6
전단연결재에 의하거나 철근에 의해 구조용 강재에 정착된 콘크리트	0.17	0.7	0.7	0.7

국내 · 외 설계기준

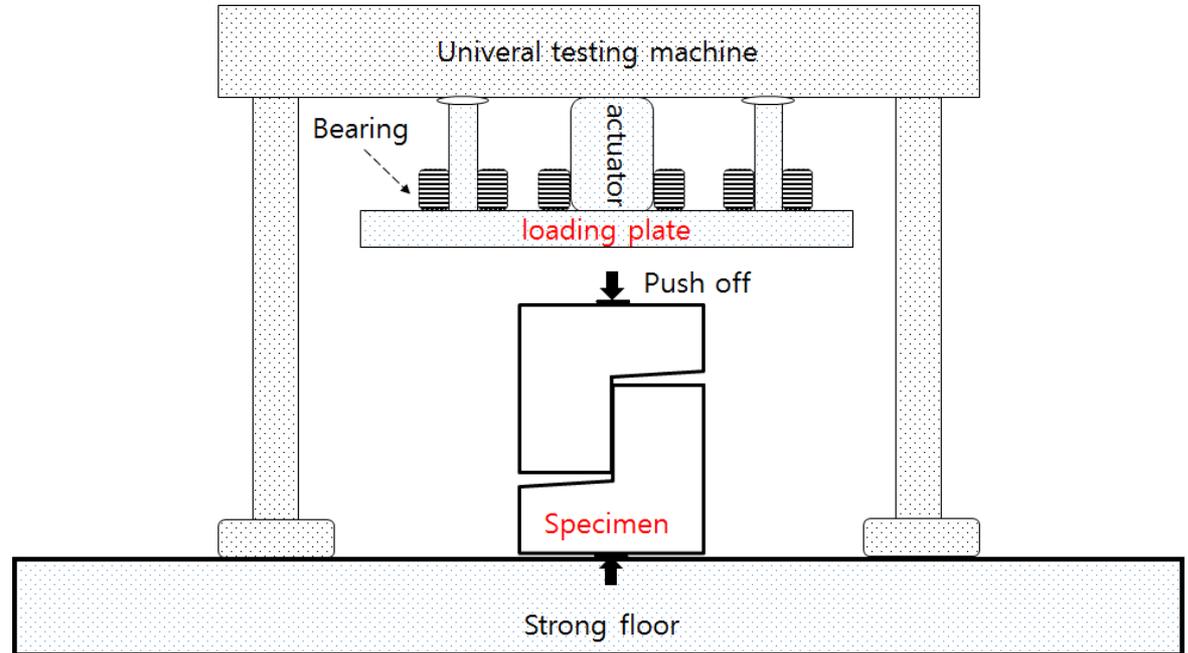
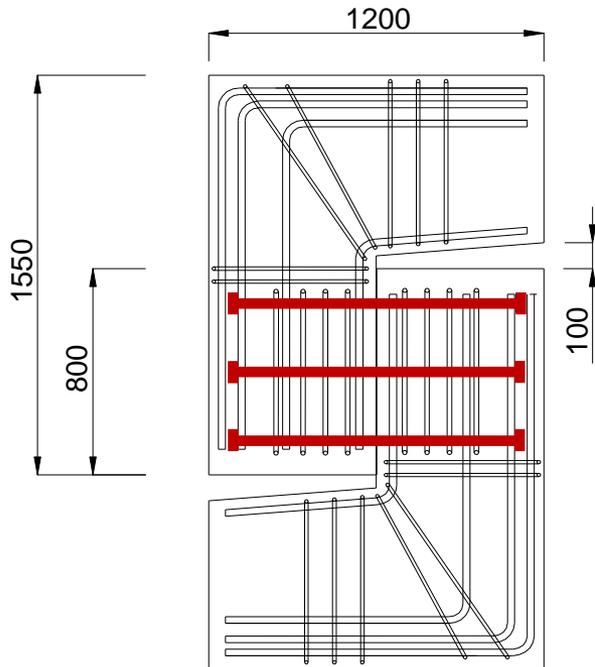


설계기준	계산식	철근항복강도 한계
Eurocode 2	$v_{Rdi} = cf_{ctd} + \mu\sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5v f_{cd}$	$f_y \leq 600MPa$
KHBDC-LSD 2015	$v_d = \phi f_{ctk} + \mu_2 f_n + \phi_s \rho f_y (\mu_2 \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5\phi_c v f_{ck}$	$f_y \leq 600MPa$

표면상태	점착계수 (MPa)		마찰계수	
	Eurocode2 c	KHBDC(LSD) μ_1	Eurocode2 μ	KHBDC(LSD) μ_2
요철 표면 (5mm 이상의 깊은 요철을 가지면서 제시된 그림에 맞게 사전 제작된 표면)	0.50	0.5	0.9	0.9
거칠 (표면을 긁어 거칠게 하거나 골재를 노출시키거나 또는 기타방법을 통해 약 40mm 간격에 적어도 3mm 거침이 있는 표면)	0.40	0.45	0.7	0.7
매끄러움 (슬립폼 또는 사출성형 거푸집에 타설한 표면 및 진동 다짐 후 더 이상의 표면처리하지 않은 자유표면)	0.20	0.35	0.6	0.6
매우 매끄러움 (강재, 플라스틱 또는 특별히 제작된 목재 거푸집에 타설한 표면)	0.025~0.10	0.25	0.5	0.5

1차 연구

주요 실험변수

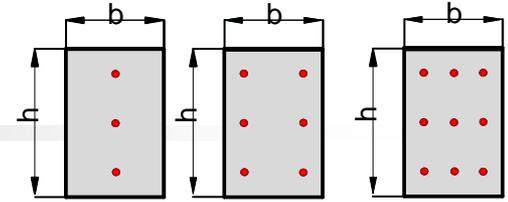


주요 실험 변수:

- 전단마찰 철근 직경 (d_b): 25, 36, 43mm
- 전단마찰 철근의 설계기준 항복강도 : 420, 550MPa
- 전단마찰면의 상태: 일체타설, 요철의 유무에 따른 부분타설
- 전단마찰면의 면적
- 전단마찰 철근량(철근비)



주요 실험변수



• Total Specimen : 26EA

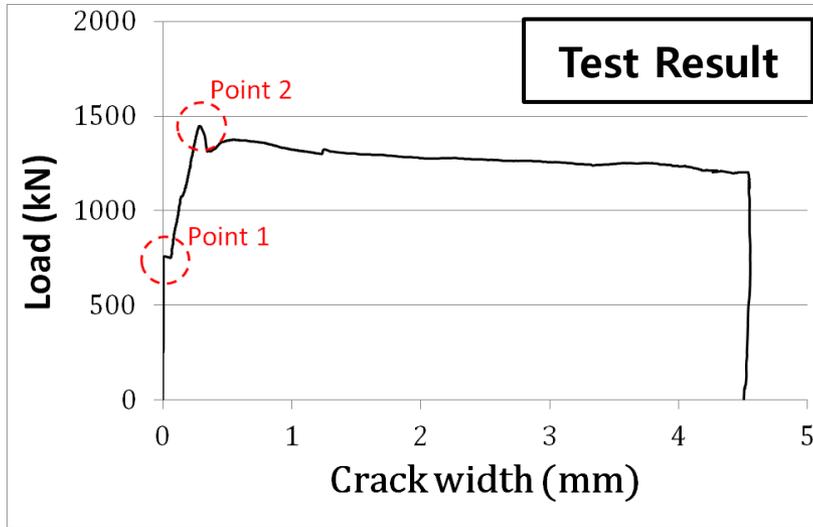
$$475MPa \leq f_y \leq 698MPa$$

Group	Specimen	Materials		Reinforcement Ratio $\frac{A_{vf}}{bd}$ (%)	Coefficient of Friction (ACI 318-14)		Shear Friction Section		Shear Friction Section Area (mm ²)
		f_y (MPa)	Bar (d_b)		μ	타설 방법	b (mm)	h (mm)	
1	60-08-1.0-1.0-C ₁	474	D25 - 6EA	1.0	1.0	요철: 6 mm 부분타설	400	800	3.2×10 ⁵ (C ₁)
	60-11-1.0-1.0-C ₁	516	D36 - 3EA						
	60-14-1.0-1.0-C ₁	483	D43 - 2EA						
	80-08-1.0-1.0-C ₁	632	D25 - 6EA						
	80-11-1.0-1.0-C ₁	698	D36 - 3EA						
	80-14-1.0-1.0-C ₁	675	D43 - 2EA						
2	60-08-0.5-1.0-C ₁	474	D25 - 3EA	0.5	1.0	요철: 6 mm 부분타설	400	800	3.2×10 ⁵ (C ₁)
	60-08-1.5-1.0-C ₁	474	D25 - 9EA	1.5					
	60-14-0.5-1.0-C ₁	483	D43 - 1EA	0.5					
	60-14-1.5-1.0-C ₁	483	D43 - 2EA	1.5					
	80-08-0.5-1.0-C ₁	632	D25 - 3EA	0.5					
	80-08-1.5-1.0-C ₁	632	D25 - 9EA	1.5					
	80-14-0.5-1.0-C ₁	675	D43 - 1EA	0.5					
	80-14-1.5-1.0-C ₁	675	D43 - 2EA	1.5					
3	60-08-0.5-1.0-C ₂	474	D25 - 6EA	0.5	1.0	요철: 6 mm 부분타설	600	1200	7.2×10 ⁵ (C ₂)
	60-14-0.5-1.0-C ₂	483	D43 - 2EA						
	80-08-0.5-1.0-C ₂	632	D25 - 6EA						
	80-14-0.5-1.0-C ₂	675	D43 - 2EA						
4	60-08-0.5-1.4-C ₁	474	D25 - 6EA	0.5	1.4	일체타설	400	800	3.2×10 ⁵ (C ₁)
	60-14-0.5-1.4-C ₁	483	D43 - 2EA						
	80-08-0.5-1.4-C ₁	632	D25 - 6EA						
	80-14-0.5-1.4-C ₁	675	D43 - 2EA						
5	60-08-0.5-0.6-C ₁	474	D25 - 6EA	1.0	0.6	요철: 0 mm 부분타설	400	800	3.2×10 ⁵ (C ₁)
	60-14-0.5-0.6-C ₁	483	D43 - 2EA						
	80-08-0.5-0.6-C ₁	632	D25 - 6EA						
	80-14-0.5-0.6-C ₁	675	D43 - 2EA						

실험결과

Point 1: 전단마찰면

Point 2: 전단마찰면+전단마찰 철근



설계기준	설계식
ACI 318-14	$V_n = \mu A_s f_y$
AASHTO LRFD	$V_{ni} = cA_{cv} + \mu(A_s f_y + p)$

Point 1

Point 2

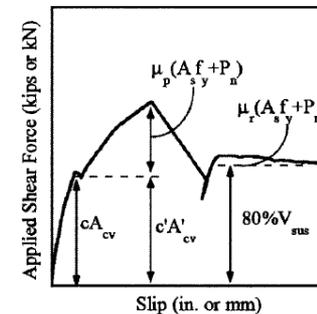
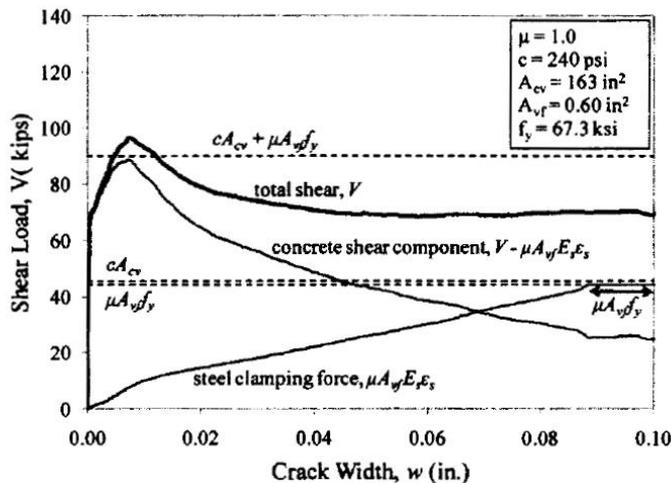
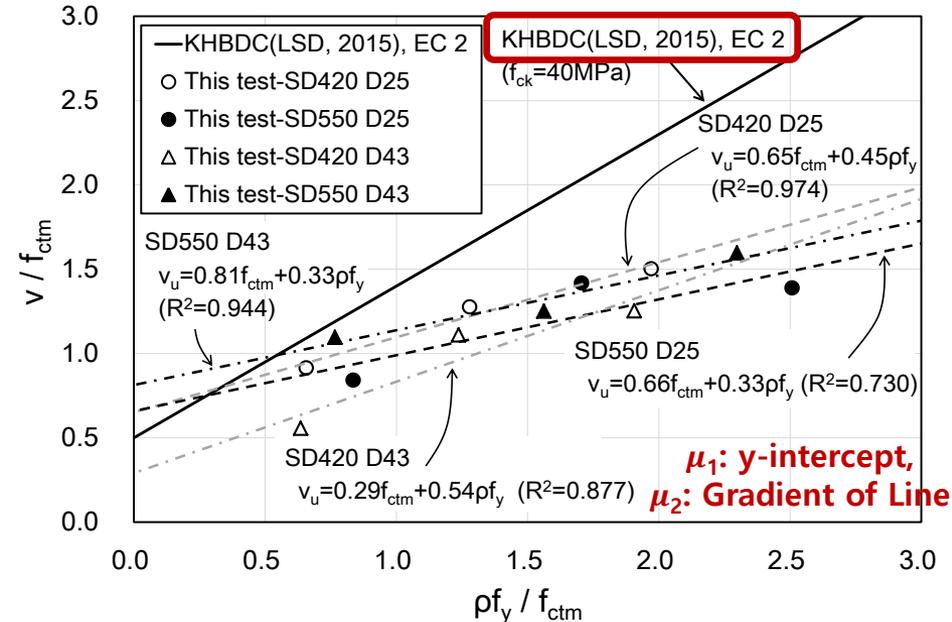
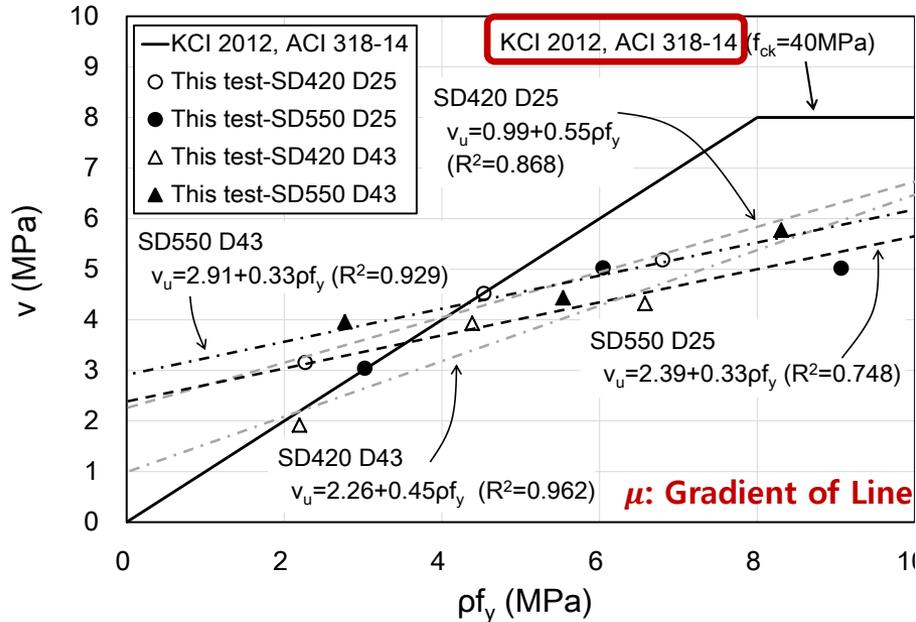


Fig. 14—Shear force-slip plot showing where equations are derived.

$$\begin{aligned}
 V_{loss} &= cA_{cv} = c'A'_{cv} \dots\dots\dots(a) \\
 V_{peak} &= c'A'_{cv} + \mu_p(\sum A_{sc} \cdot f_y + P_n) \dots\dots\dots(b) \quad (3) \\
 V_{sus} &= \mu_r(\sum A_{sc} \cdot f_y + P_n) \dots\dots\dots(c)
 \end{aligned}$$

실험결과분석 (철근비)



$$V_n = \mu(A_s f_y + P)$$

마찰계수

SD420 > SD550

계면의 요철크기가 6mm 이상인 경우 μ 는 1.0이므로 실제 0.33~0.55의 범위를 보이는 것 보다 1.8~3.0배 과대평가

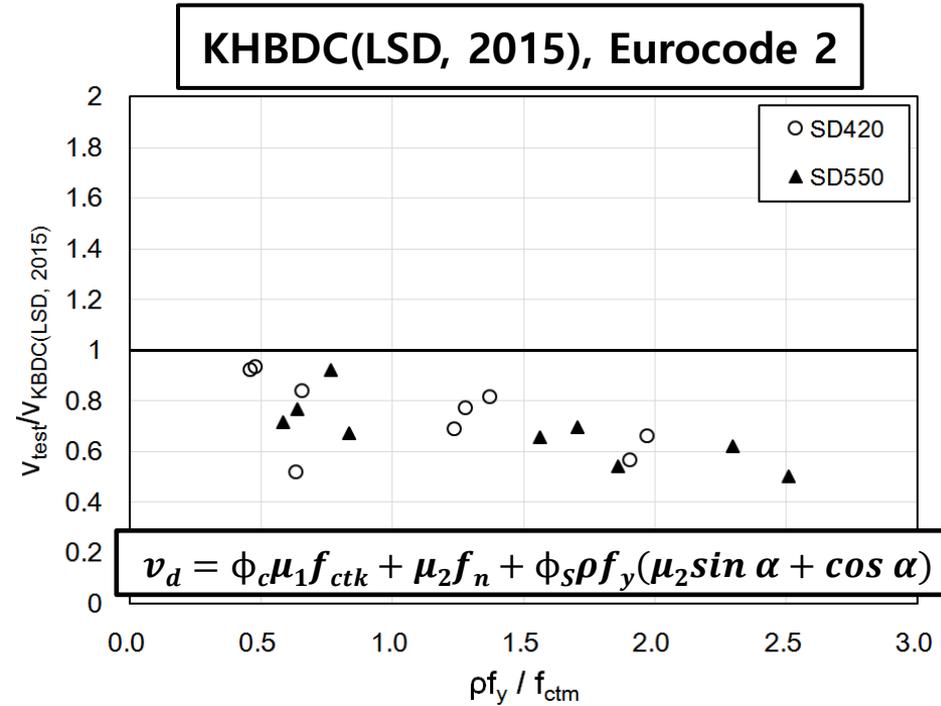
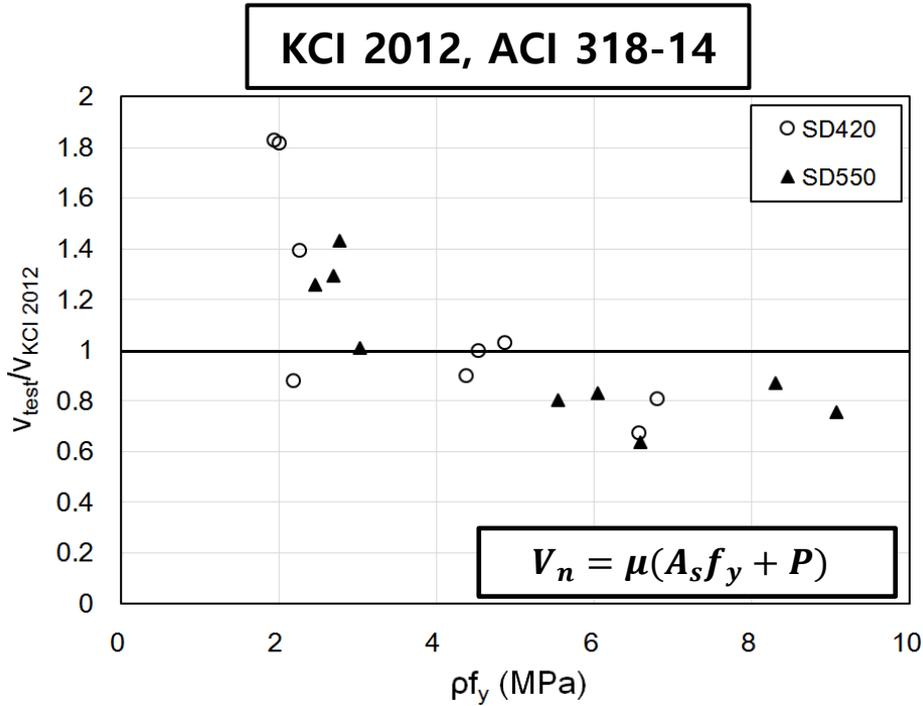
$$v_d = \phi_c \mu_1 f_{ctk} + \mu_2 f_n + \phi_s \rho f_y (\mu_2 \sin \alpha + \cos \alpha)$$

마찰계수

SD420 > SD550

계면의 요철크기가 5mm 이상인 경우 μ_2 는 0.9이므로 실제 0.33~0.54의 범위를 보이는 것 보다 1.7~2.7배 과대평가, μ_1 은 0.29~0.81의 범위로 설계기준의 0.5와 유사함

실험결과분석 (철근비)

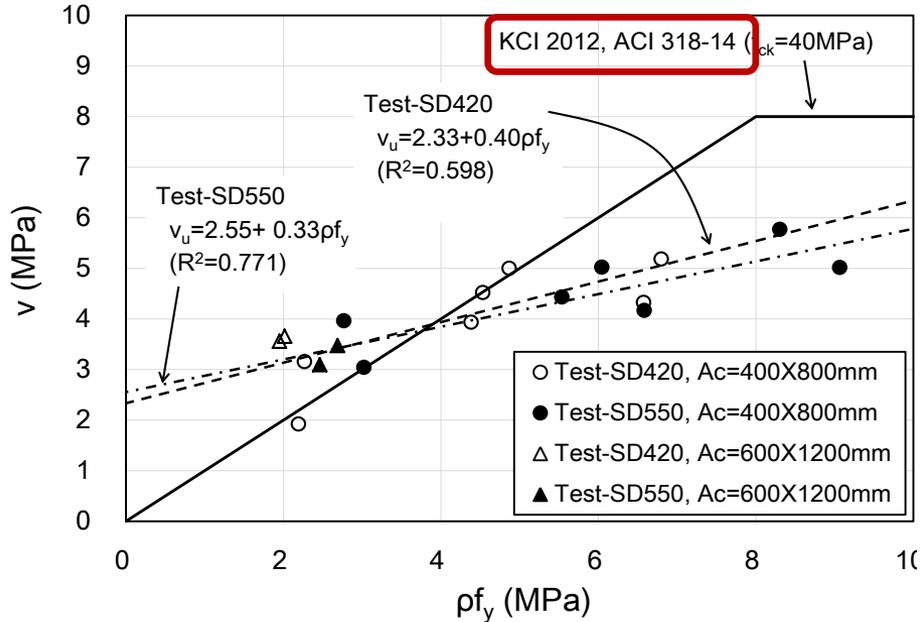


KCI와 ACI 설계식은 콘크리트 점착력과 골재 맞물림 작용을 적용하지 않고 있다.

결과적으로 KCI와 ACI 설계식은 철근비가 작을수록 전단마찰 강도를 과소평가 하고 철근비가 증가함에 따라 점차적으로 전단마찰강도를 과대평가하는 것으로

나타남

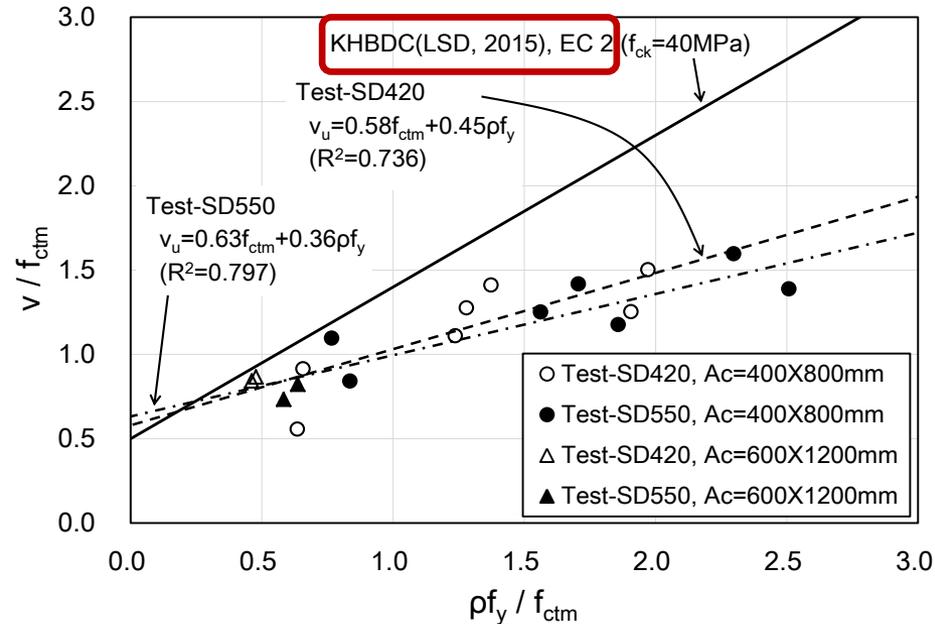
실험결과분석 (철근 항복강도)



$$V_n = \mu(A_s f_y + P)$$

마찰계수
SD420 > SD550

SD420과 SD550의 μ 값 각각 0.40과 0.33이다. SD550을 사용했을 때 마찰계수가 SD420보다 17.5% 감소

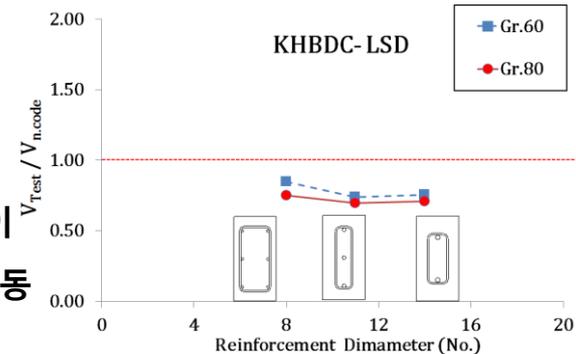
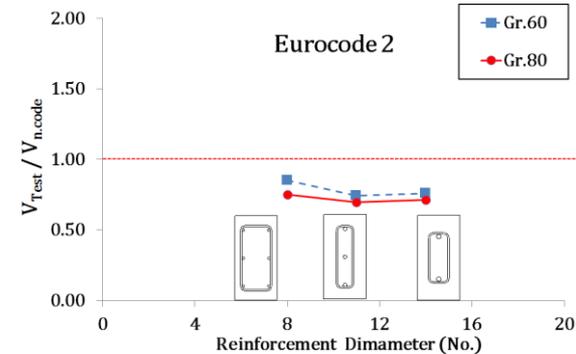
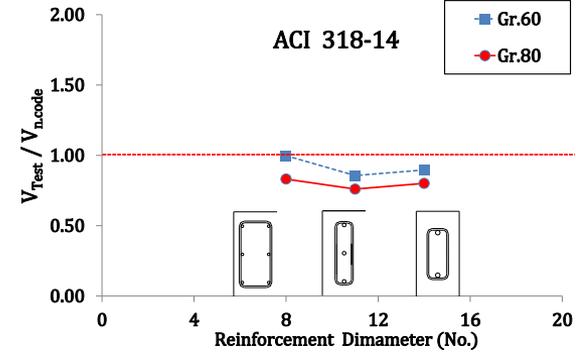
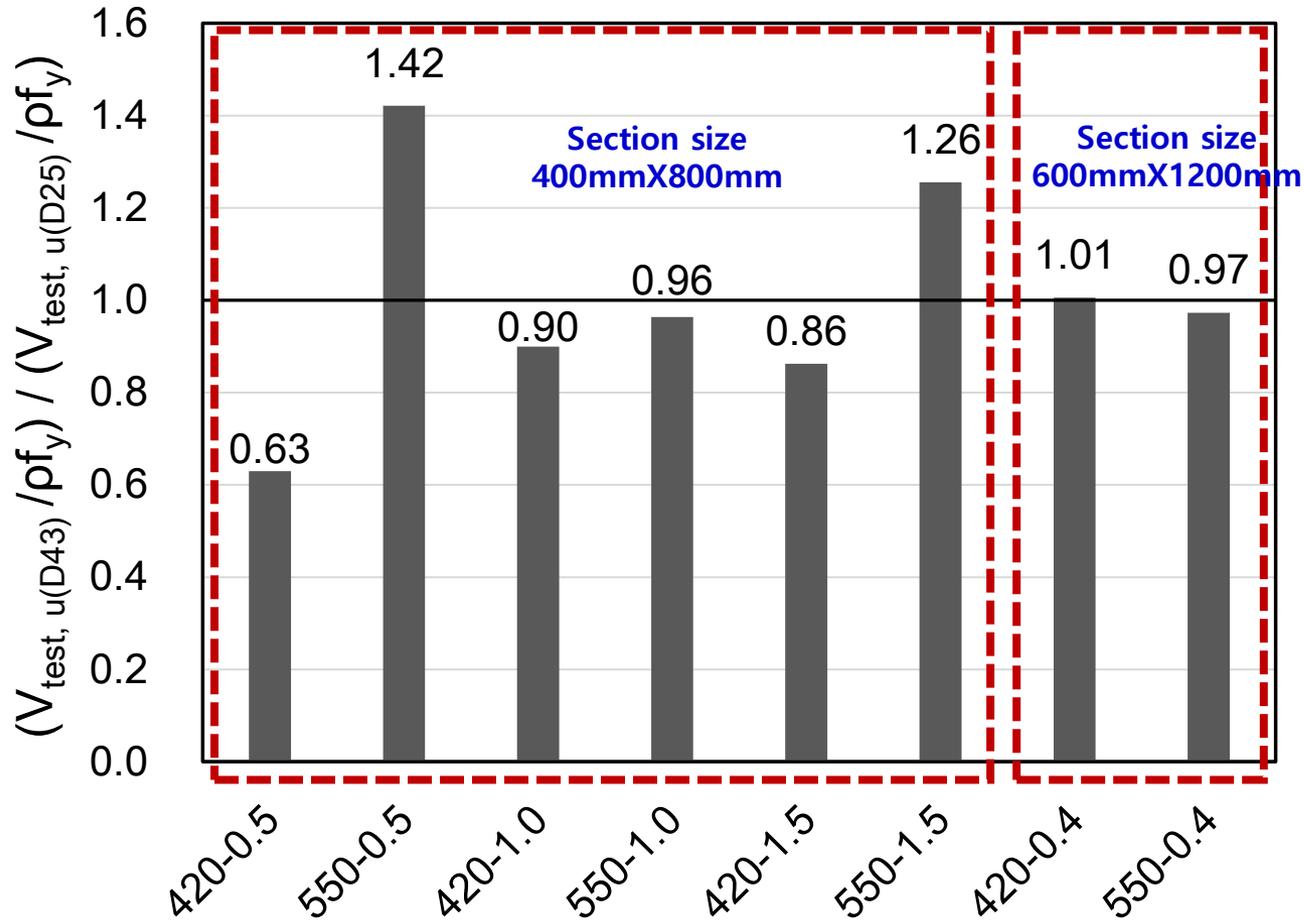


$$v_d = \phi_c \mu_1 f_{ctk} + \mu_2 f_n + \phi_s \rho f_y (\mu_2 \sin \alpha + \cos \alpha)$$

마찰계수
SD420 > SD550

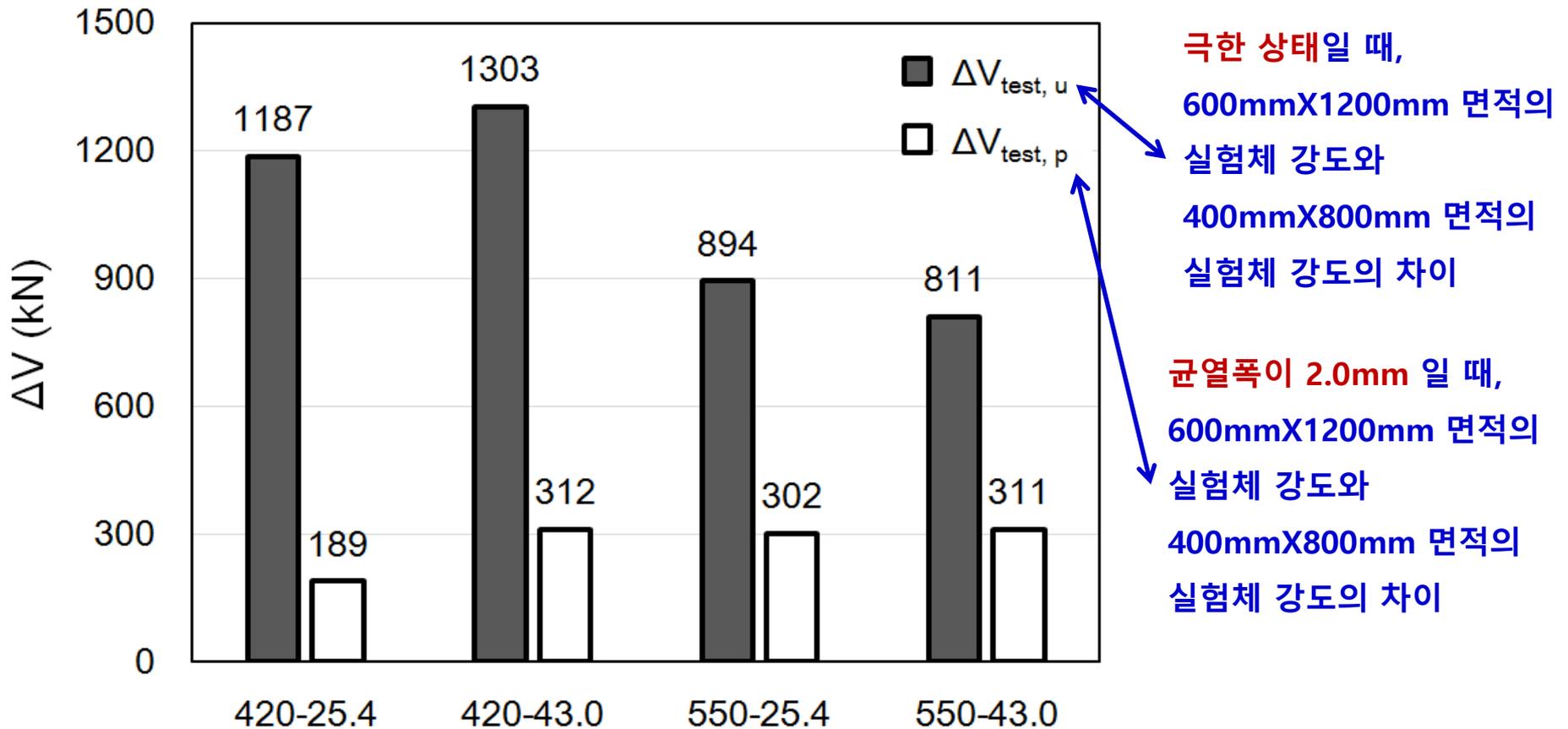
SD420과 SD550의 μ 값 각각 0.45과 0.36이다. SD550을 사용했을 때 마찰계수가 SD420보다 20% 감소

실험결과분석 (철근 지름_철근비 동일)



전단마찰면적과 철근의 단면적이 작아질 경우 철근의 SD420과 SD550의 강도 비율이 차이가 크게 나타났다. 이런 차이는 마찰면과 철근의 단면적이 작아서 실험결과의 변동성이 큰 것이 원인으로 철근지름은 전단마찰 강도에 큰 영향이 없는 것으로 판단됨.

실험결과분석 (전단마찰 단면적)

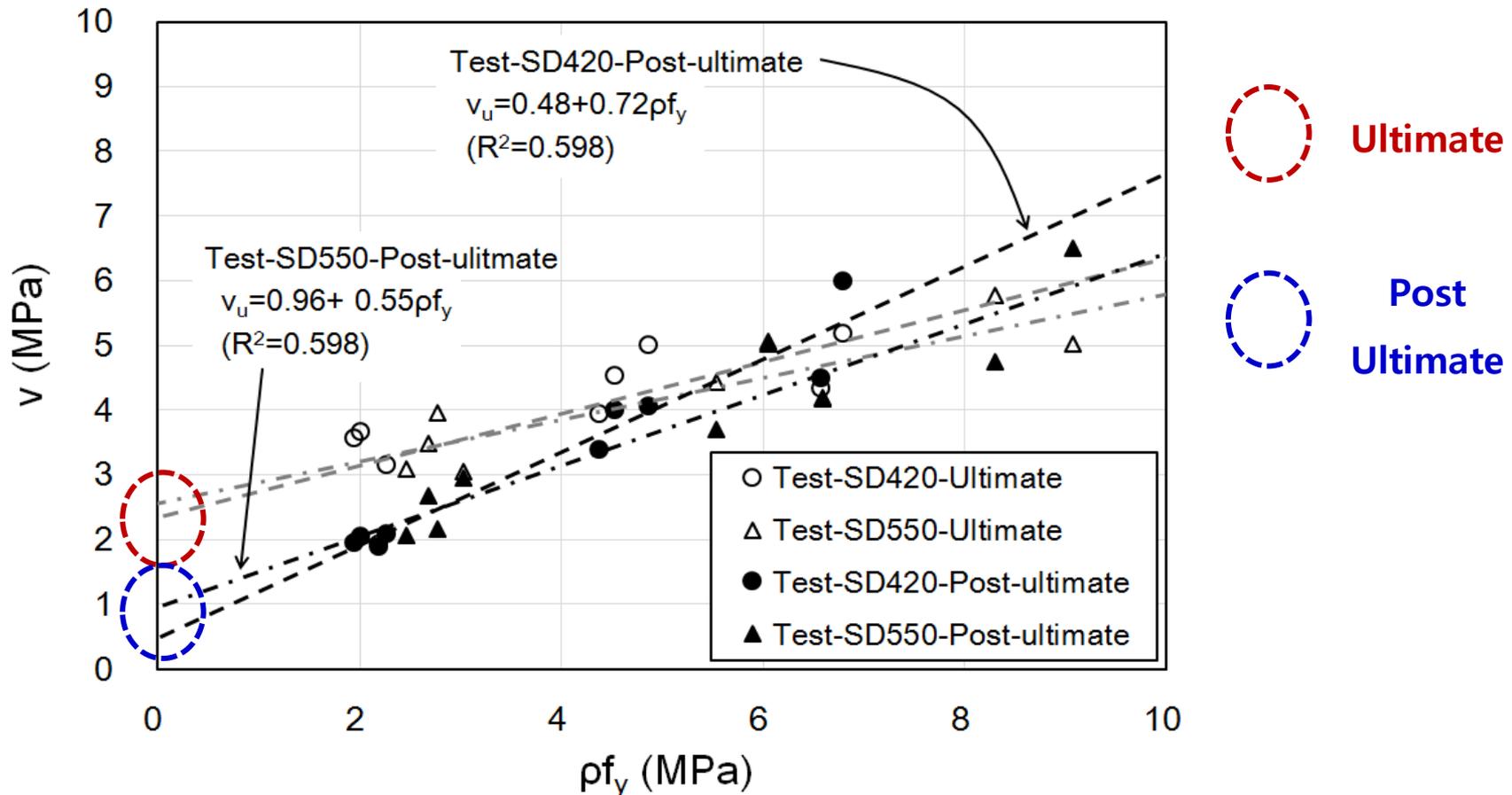


극한 상태일 때,
600mmX1200mm 면적의
실험체 강도와
400mmX800mm 면적의
실험체 강도의 차이

균열폭이 2.0mm 일 때,
600mmX1200mm 면적의
실험체 강도와
400mmX800mm 면적의
실험체 강도의 차이

균열이 발생하기 전에는 전단마찰면의 단면적이 증가할 수록 전단마찰강도는 증가하는 것으로 나타남. 이후 균열폭이 2.0mm 일 때 ΔV 는 극한상태의 ΔV 보다 현저히 작게 나타났는데 이는 콘크리트의 점착력과 골재의 맞물림 작용이 떨어졌기 때문인 것으로 판단됨.

실험결과분석 (전단마찰 단면적)



Y축 절편은 극한상태일 때, SD420과 SD550이 각각 2.33과 2.55로 나타난 반면 균열폭이 2.0mm 발생했을 때, 각각 0.48과 0.96으로 더 작게 나타났고 마찰계수를 나타내는 기울기는 오히려 증가한 것으로 봐서 **콘크리트의 점착력과 골재 맞물림에 의해 전달되는 전단력이 감소하고 철근에 의해 전달되는 전단력이 증가하는 것으로 나타남.**

2차 연구

주요 실험변수

* 2차실험변수 (전단마찰면의 조건, 전단마찰철근의 항복강도, 피복두께)

f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	B (mm)	H (mm)	Cover (mm)	A_c (mm ²)	d_b (mm)	A_{st} (mm ²)	A_s (mm ²)	ρ	ρf_y	면처리	면방향
30	300	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	2.28	25mm 골재노출	수평
30	500	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	3.80	25mm 골재노출	수평
30	700	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	5.32	25mm 골재노출	수평
30	300	500	800	50 (2 d_b)	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	2.28	6mm 요철	수직
30	300	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	2.28	Chipping	수직
30	300	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	3.80	6mm 요철	수직
30	500	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	3.80	6mm 요철	수직
30	700	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	5.32	6mm 요철	수직
70	300	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	2.28	6mm 요철	수직
70	500	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	3.80	6mm 요철	수직
70	700	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	5.32	6mm 요철	수직

주요 실험변수

* 2차실험변수 (전단마찰면의 조건, 전단마찰철근의 항복강도, 피복두께)

f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	B (mm)	H (mm)	Cover (mm)	A_c (mm ²)	d_b (mm)	A_{st} (mm ²)	A_s (mm ²)	ρ	ρf_y	면처리	면방향
30	300	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	2.28	매끈한면	수직
30	500	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	3.80	매끈한면	수직
30	700	500	800	100	400,000	25.4	506.7	3040.24	0.0076	5.32	매끈한면	수직

* 실험변수 설정 (총 14EA)

- 전단마찰면의 조건 : 25mm 골재노출, 6mm 요철, 매끈한면, Chipping
- 콘크리트 압축강도 : 30MPa, 70MPa
- 철근의 항복강도 : 300, 500, 700MPa
- 피복두께 : $2d_b$, $4d_b$

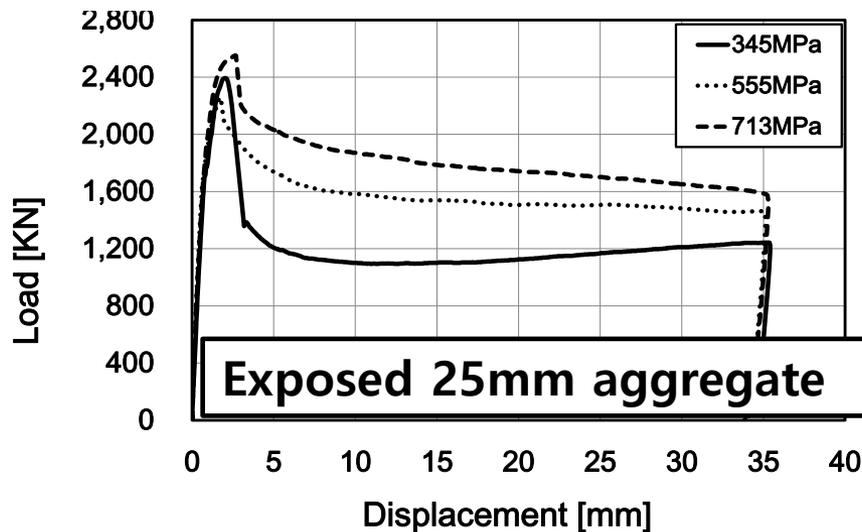
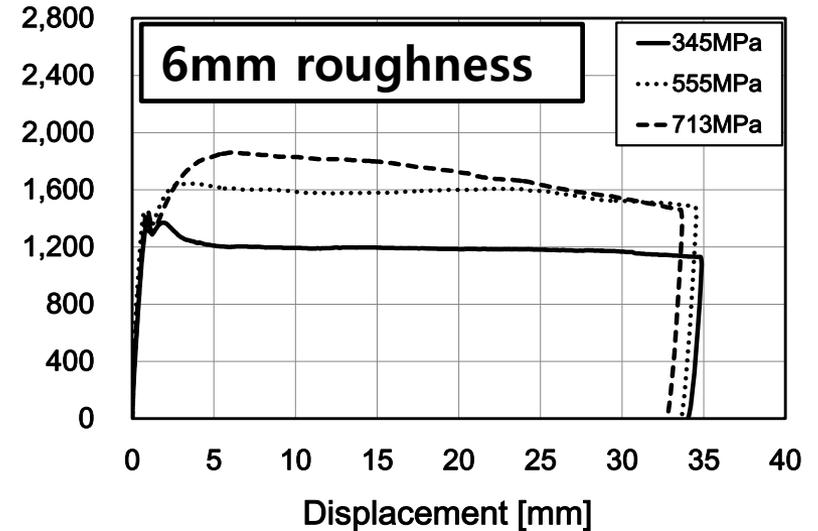
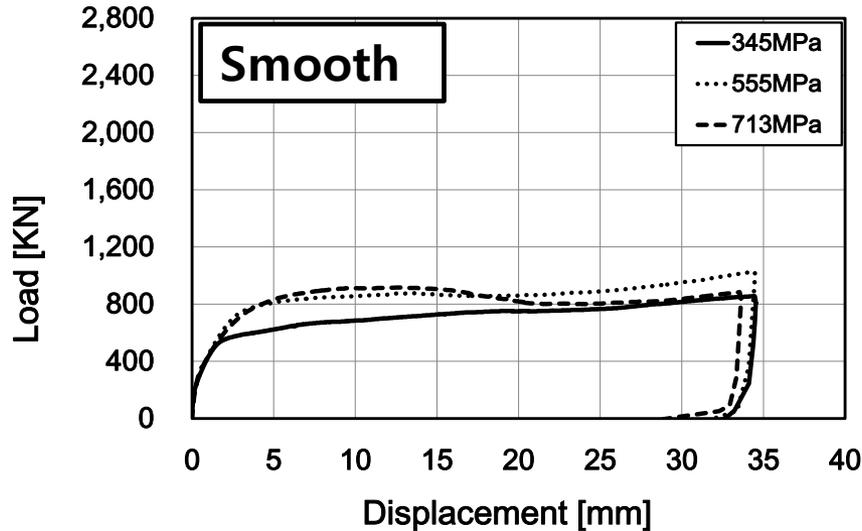
주요 실험변수

* 전단마찰면



주요 실험변수

* 실험결과 (마찰면의 상태_345MPa, 555MPa, 713MPa)

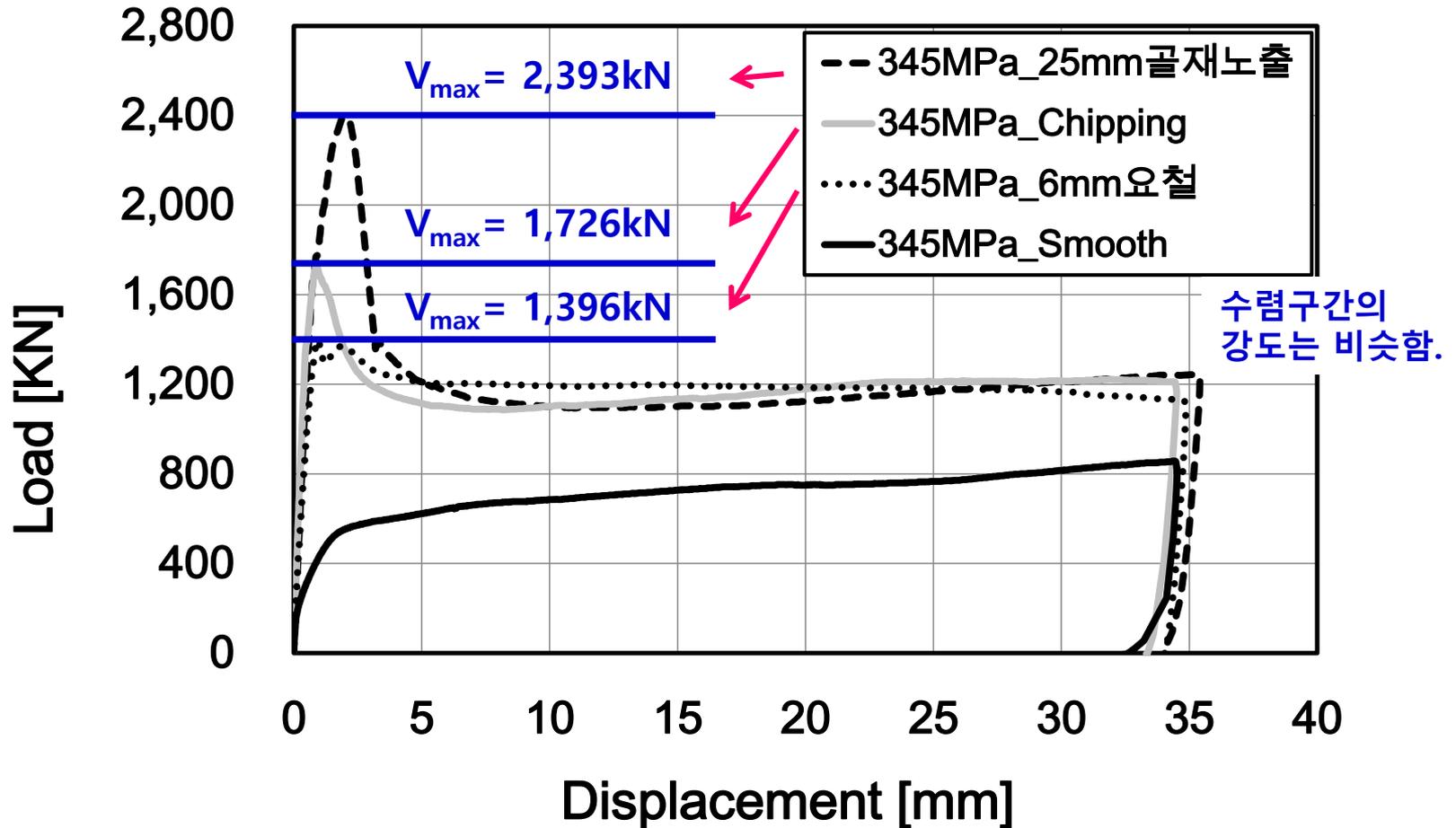


- 마찰면의 상태에 따라 전단마찰강도의 차이를 보임.
- 요철이 있는 경우 (6mm 요철, 골재노출) 최대강도는 차이가 있지만 수렴하였을 때의 강도는 철근의 항복강도에 따라 거의 유사함.

주요 실험변수

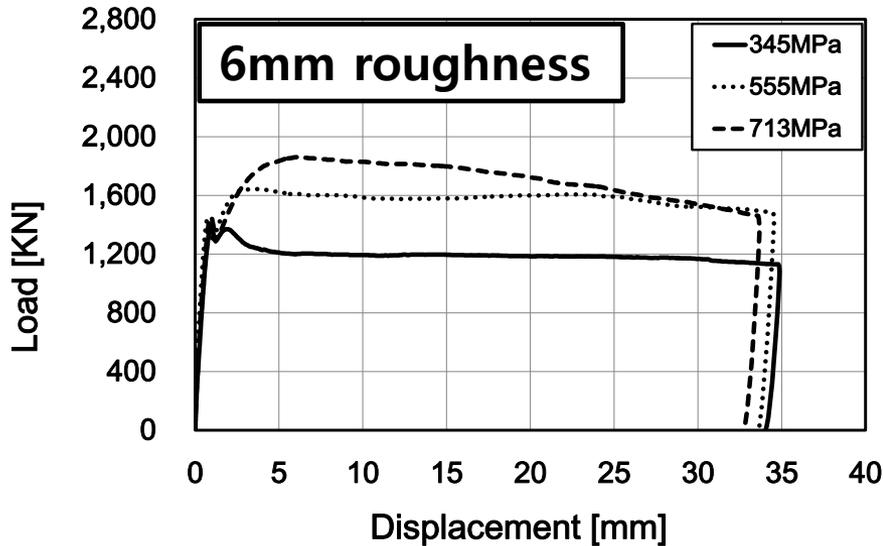
- 최대하중은 골재노출, 치핑, 6mm요철순서로 크게 나타났고 수렴구간의 하중은 비슷함.

* 실험결과 (마찰면의 상태, 철근비 동일)

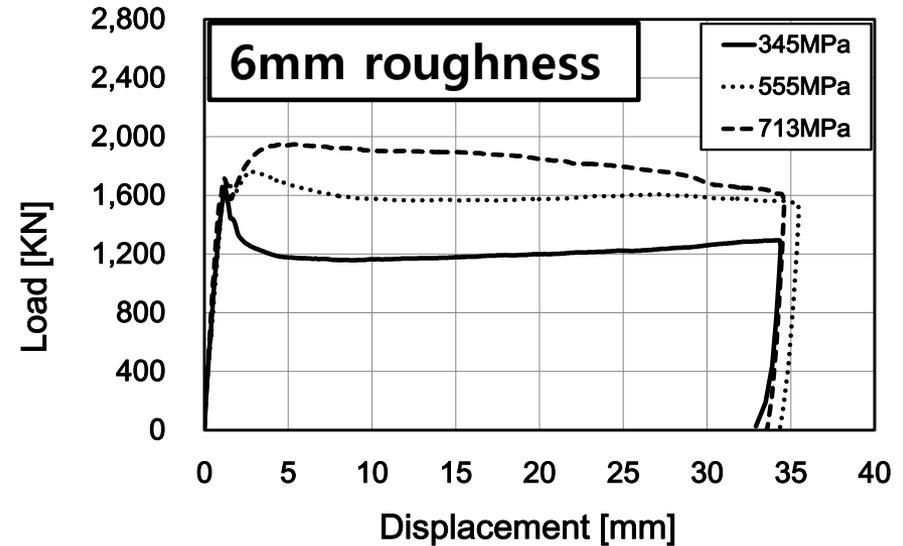


주요 실험변수

* 실험결과 (콘크리트 강도)



- 33MPa -

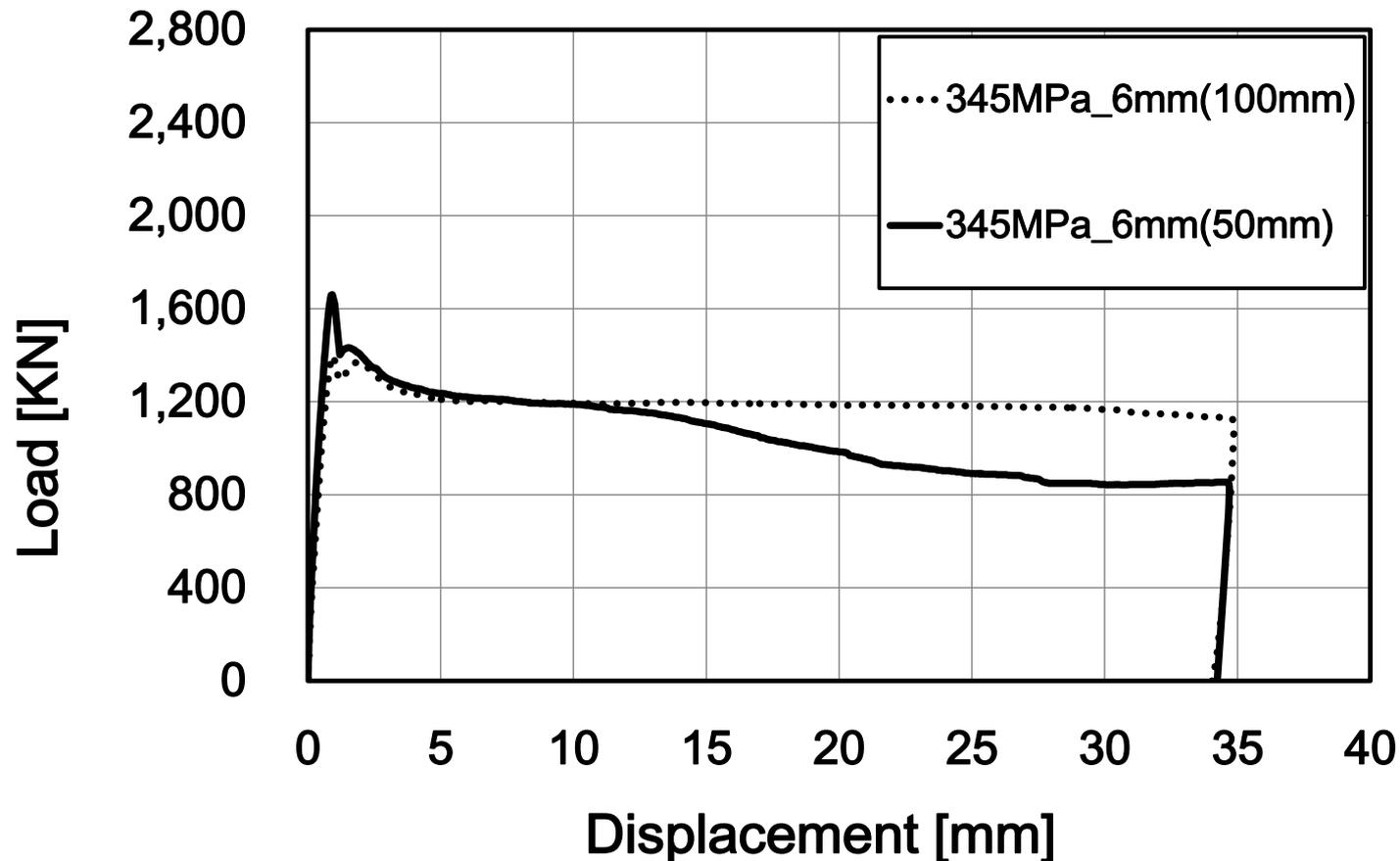


- 64MPa -

- 콘크리트의 강도에 따른 영향은 크게 없는 것으로 판단됨.
- 345MPa 실험체의 경우 최대 강도가 약간 차이를 보이고 있음.

주요 실험변수

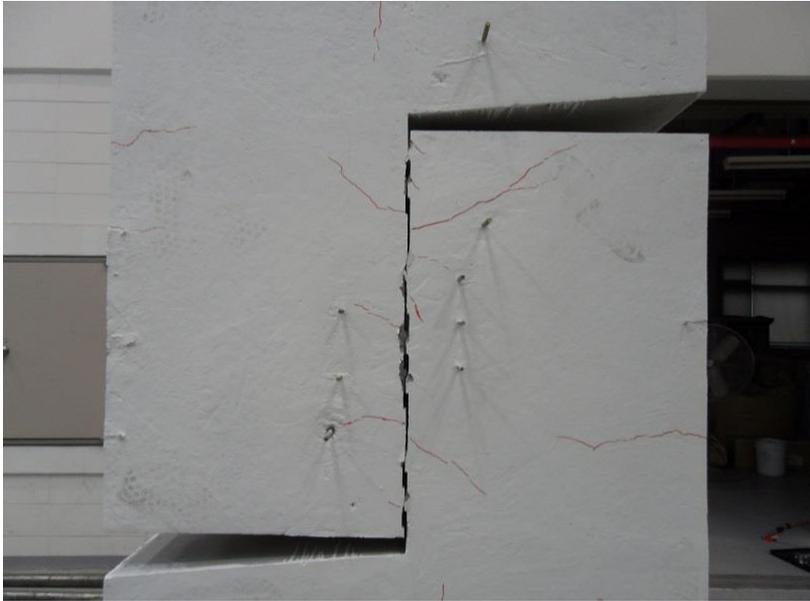
* 실험결과 (피복두께 $2d_b=50\text{mm}$, $4d_b=100\text{mm}$)



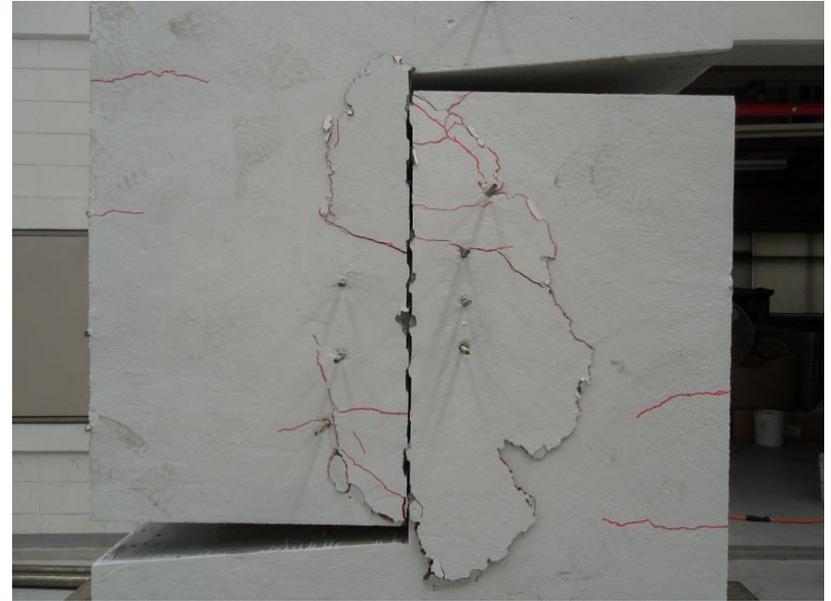
- 피복두께가 $2d_b$ 일 때, 최대하중 이후 피복이 벗겨지고 부풀어오름.

주요 실험변수

* 실험결과 (피복두께 $2d_b=50\text{mm}$, $4d_b=100\text{mm}$)



30-300-6mm($4d_b$)



30-300-6mm($2d_b$)

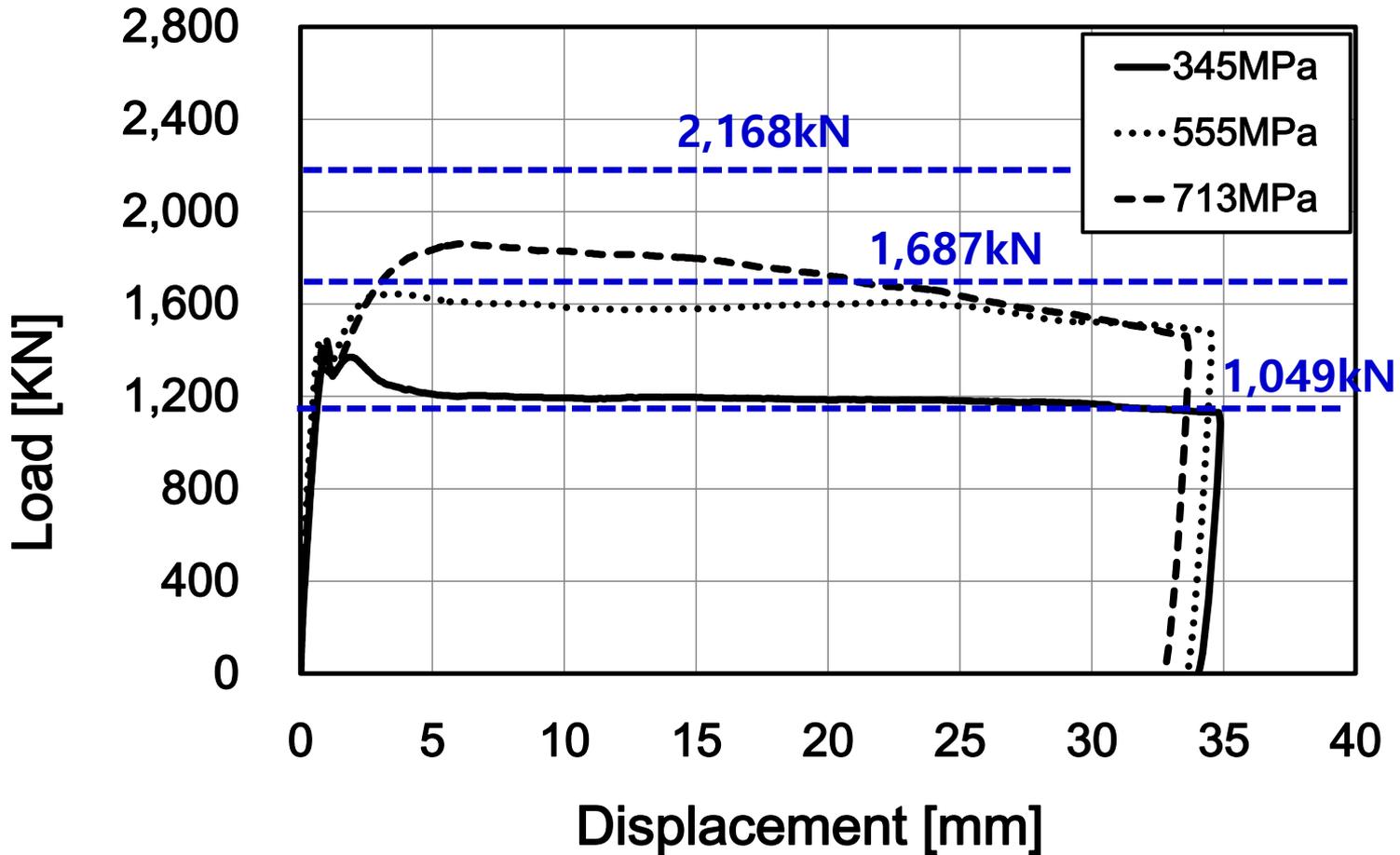
주요 실험변수

$$A_s f_y = (506.7 \times 6 \times 345) / 1,000 = 1,049 \text{ kN}$$

$$A_s f_y = (506.7 \times 6 \times 555) / 1,000 = 1,687 \text{ kN}$$

$$A_s f_y = (506.7 \times 6 \times 713) / 1,000 = 2,168 \text{ kN}$$

* 실험결과 (수렴구간 분석 $f_{cu} = 33 \text{ MPa}$)



- 철근의 강도가 클수록 하중수렴구간의 강도는 실제 철근의 강도보다 낮게 나타남.

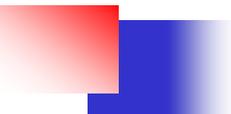
결론

1. 현행 설계기준(KCI, ACI, KHBDC, EC2)은 철근에 의해 전달되는 **전단마찰강도를 과대 평가**하는 것으로 나타남.
2. 전단마찰철근의 항복강도가 증가할수록 **마찰계수는 감소**하는 것으로 나타남. 이는, 항복강도가 증가할수록 항복변형률이 증가하기 때문에 전단마찰강도의 발휘 시점의 균열폭이 큰 것으로 판단된다.
3. 전체 전단마찰 철근의 단면적이 동일할 때, 대구경 철근을 전단마찰 철근으로 사용하더라도 **전단마찰강도에 미치는 영향은 크지 않은 것**으로 판단됨.
4. 마찰면의 상태에 따라 전단마찰강도가 다르게 나타남.
(25mm 골재노출 -> Chipping -> 6mm 요철 -> 매끈한면)
5. 철근의 항복강도가 같을 때, **최대하중 이후 수렴구간에서의 하중은 마찰면의 상태와 관계없이 유사하게 나타남**. 이는 최대하중 이후 전단마찰면 사이의 균열폭이 커지면서 콘크리트의 점착력과 골재의 맞물림작용이 줄어들면서 발생하는 현상으로 판단됨.
6. 콘크리트의 영향은 크게 없는 것으로 판단됨.

추가 실험변수 [실험체 제작중..]

* 실험변수 (전단마찰면 상태, 철근의 항복강도, 철근비)

f_{ck} [MPa]	f_y [MPa]	B [mm]	H [mm]	d_b [mm]	EA	A_s [mm ²]	ρ	ρf_y [MPa]	Surface
30	300	500	800	25.4	4	2,027	0.00507	1.52	Chipping
	500							2.53	
	700							3.55	
	300							2.28	
	500							3.80	
	700							5.32	
	300							3.80	
	500							6.33	
	700							8.87	
	300	500	800		4	2,027	0.00507	1.52	6mm 요철
	500							2.53	
	700							3.55	
	300							3.80	
	500							6.33	
	700							8.87	
	300	500	800		4	2,027	0.00507	1.52	20mm 골재노출
	500							2.53	
	700							3.55	
300	2.28								
500	3.80								
700	5.32								
300	500	800	6	3,040	0.0076	2.28	20mm 골재노출		
500						3.80			
700						5.32			



질문 및 토론

Thank You !

Any Questions or Comments ?

