

반복 횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 이력거동

Hysteretic Behavior of High-Strength R/C Columns Subjected to Lateral Load Reversals

이 리 형¹⁾ 김 성 수²⁾ 이 원 호³⁾ 이 재 연⁴⁾ 이 용 택⁵⁾ 오 강 대 훈⁶⁾
Lee, L. H. Kim, S. S. Yi, W. H. Lee, J. Y. Lee, Y. T. Kang, D. H.

ABSTRACT

This experimental study is aiming to investigate the hysteretic behavior of high-strength R/C columns subjected to axial load and lateral load reversals. The five 1/4 scaled specimens were made of high-strength concrete with the design strength of 600kg/cm^2 . The main variables of specimens were the ratios of axial load ($n=0.2f'cA_g$, $n=0.4f'cA_g$) and type of transverse reinforcement. From the test results, strength and stiffness degradation of columns under higher axial load is much more serious than that under lower axial load. Ductility of columns is enhanced with increasing amount of transverse reinforcement, shear strength is depended on the level of axial load.

1. 서 론

오늘날 건축구조물이 초고층화 및 대형화 됨에 따라 콘크리트 재료의 고강도화가 절실히 요구되므로 이에 대한 기술축적 및 해외 건설시장에서의 경쟁력 향상을 고려할 때, 고강도 콘크리트에 대한 연구가 시급하다. 그러나 우리나라는 고강도 콘크리트에 대한 연구가 외국에 비하여 매우 미흡한 실정에 있으며, 실용화 또한 외국과는 비교할 수 없을 정도로 낙후된 것이 국내의 현실이다. 따라서, 고강도 콘크리트의 실용화에 선행하여 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 이력특성과 변형능

력을 파악하는 것은 매우 중요하다고 판단된다.

일반적으로 건물이 고층화 됨에 따라 지진이나 풍하중과 같은 수평하중에 의하여 고층건물의 하부층 기둥에는 고전단력 및 고전도모멘트가 발생하여 복합적인 하중을 받게되며, 이로 인하여 기둥이 취성 파괴 되어 건물이 붕괴되고 재산 및 인명피해를 초래하게 되므로 이와 같은 복합하중을 받는 기둥에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 횡보강근 형태 및 횡보강근량, 축력크기에 따른 반복 횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 거동을 파악하고, 현행규준식 및 전단강도 제안식들의 적용 가능성을 검토함과 아울러 횡보강근 설계에 대한 합리적인 설계 지침을 정립하는 데 기초자료를 제공하고자 한다.

- 1) 정희원, 한양대 건축공학과 교수
- 2) 정희원, 청주대 건축공학과 부교수
- 3) 정희원, 광운대 건축공학과 조교수
- 4) 정희원, 목원대 건축공학과 전임강사
- 5) 정희원, 한양대 대학원 박사과정
- 6) 정희원, 한양대 대학원 석사과정

2. 실험

2.1 시험체 계획

표 1 시험체 일람표

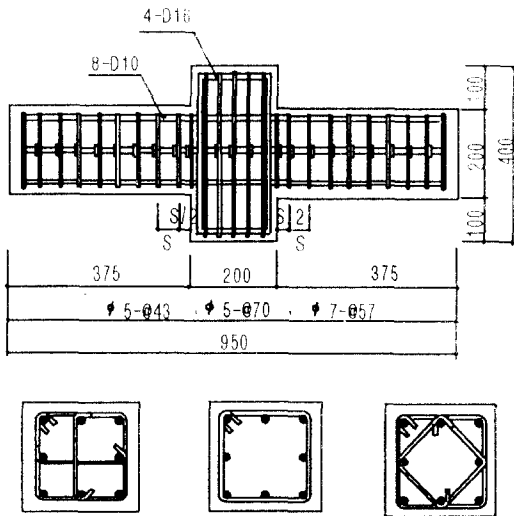
시험체	축력비 $N/A_p f'c$	콘크리트 강도 (kg/cm^2)	주 근			형 보 강 근				
			사용 철근	f_y (kg/cm^2)	ρ_s^{*1} (%)	간격 (mm)	사용 철근	단면 형태	$A_v f_y/s$	ρ_s^{*2} (%)
A 2	0.2	600	8-D10	4000	1.43	70	Φ5	A	551.8	0.7
A 4	0.4	600	8 D10	4000	1.43	70	Φ5	A	551.8	0.7
A 4S		600	8 D10	4000	1.43	43	Φ5	A	898.3	1.1
C 4		600	8 D10	4000	1.43	43	Φ5	C	712.3	0.7
R 4		600	8-D10	4000	1.43	57	Φ7	R	533.3	0.7

A 2 S

ACI 특별규준
 축력비 : 2 : $0.2f'cA_p$, 4 : $0.4f'cA_p$
 단면형태 : A-조립식 마름모형, C Crosstie형, R Rectangular형

*1 : 주근비
 *2 : 형보강근비 (A_v/bs)

시험체는 고층건물의 하부층에서 상·하 모멘트 변곡점 사이에 있는 기둥을 모델링한다. 총 5개의 1/4축소 모형 시험체를 주근비가 전체단면적의 1.43%가 되게 하며 콘크리트 압축강도는 $600kg/cm^2$ 으로 한다. 그림 1은 시험체의 배근상황이며, 시험체의 특성은 표 1과 같다. 시험체 제작에 사용된 철근은 HD16, HD10, Φ5, Φ7로서 주근은 8 HD10, 형보강근은 Φ5, Φ7, 시험체 중앙의 스토퍼에는 HD16, HD10을 사용하며, 특히 이 부분은 실험시 충분한 강도를 갖도록 단면치수를 정한다.



(a)Crosstie형 (b)Rectangular형 (c)조립마름모형
 그림 1. 시험체 배근상황

2.2 재료시험

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 슬럼프 20 cm, 굵은 골재의 최대 치수 13 mm, 설계계기준강도 $600 kg/cm^2$ 등의 배합설계 조건에 따라 강제 진동믹서를 이용하여 비법 사용한다. 철근의 재료시험 결과는 표 2, 콘크리트 재료시험 결과는 표 3과 같다.

표 2 철근의 인장강도 시험결과

종 류	단 성 계 수 (t/cm^2)	항 복 강 도 (t/cm^2)	항 복 변 형 율 ($\times 10^{-3}$)	인 장 강 도 (t/cm^2)
HD10	1880	3.83	0.0020	5.40
Φ5	1785	4.00	0.0022	6.04
Φ7	1995	5.53	0.0028	7.28

표 3 콘크리트의 압축강도 시험결과

압 축 강 도(kg/cm^2)				탄 성 계 수 (t/cm^2)	슬 럽 프 (cm)
7일	21일	28일	63일*		
401.6	538.4	649.1	670.9	338.4	20

* 실험시 압축강도(Φ10x20 공시체 강도)

2.4 실험 방법

시험체의 설치상황은 그림 2와 같다. 그림에서 보는 것과 같이 시험체는 단순보 형태로 설치하여 축력은 시험체의 하중 도임부와 같은 높이의 반력 프레임(Reaction Frame)에 설치된 200ton 유압잭

크(Oil Jack)에 의하여 축력비 ($0.2f'cA_p = 48t$, $0.4f'cA_p=96t$)에 따라 실험 종료시까지 일정하게 가력한다. 또한 횡력은 시험체 상부 프레임에 설치된 100ton 유압잭크(Oil Jack)을 이용하여 그림 3과 같은 변위이력에 따라 반복가력한다.

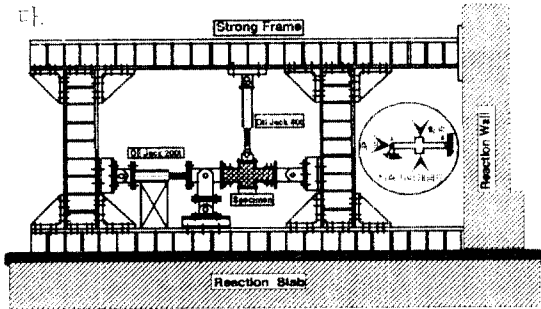


그림 2 시험체 설치상황

실험은 축력비에 따라 축력을 일정하게 가력한 상태에서 횡방향 적용하중과 하중적용점에 부착된 D.G(Dial Gage)로 변위를 연속적으로 도식(Plotting) 하면서 진행한다.

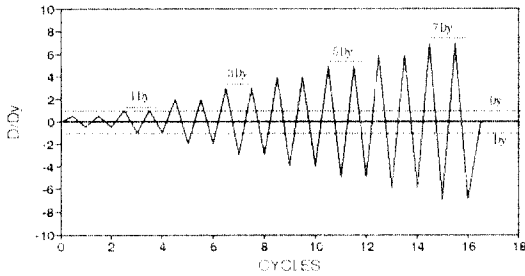


그림 3. 변위이력

실험이 진행되는 동안 모든 자료는 그림 4와 같이 설치된 다이얼 게이지로 측정하여 Data Logger의 디스켓에 저장되도록 한다.

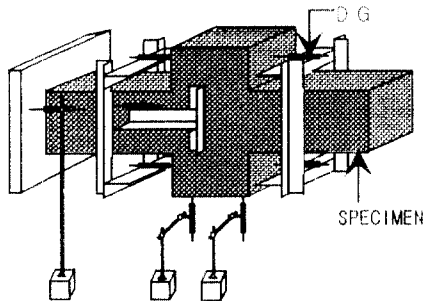


그림 4. Dial Gage 설치상황

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 파괴상황

그림 5는 각 시험체의 최종파괴상황을 나타낸 것으로써 파괴진행상황은 다음과 같다.

A 2 시험체의 초기힘균열은 1사이클일때 스테브의 하부 경계면에서 발생하였으며, 초기진단균열은 5사이클에서 발생하였으며, 할렬균열과 피복박리현상은 7사이클일때 스테브 좌측상부와 우측하부에서 나타났다. 주근 좌굴현상은 상부근의 경우 우측단부로부터 10cm지점에서, 하부근의 경우에는 5cm지점에서 발생하였다.

A 4 시험체는 5사이클일때 +32ton에서 할렬균열과 피복박리현상이 동시에 발생하였으며, 주근 좌굴현상은 상부철근이 스테브 좌측단부로부터 7cm 지점에서 하부로 휘어졌으며 가운데 주근은 상부로 약간 휘었다. 스테브 좌측단부로부터 세번째 횡보강근(17cm)이 상부주근 위치에서 절단 되면서 내력이 급격하게 저하 되어 실험을 종료하였다.

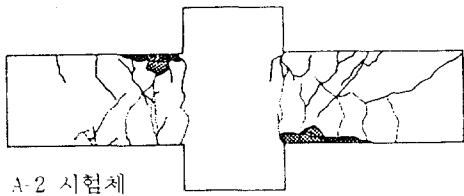
A 4S 시험체는 5사이클에서 +29.8일때 초기진단균열과 할렬균열, 피복박리현상이 스테브 좌측단부로부터 0.5d 이내에서 다수 발생하였다. 상부주근은 스테브 좌측단부로부터 세번째와 네번째 횡보강근 사이(1d지점)에서 하부로 약간 휘어졌으며, 최종적인 파괴양상은 피복콘크리트가 스테브 좌측단부로부터 1d 이내에서 잘게 부서지면서 박리되어 횡보강근과 주근이 노출되었다.

C 4 시험체의 초기힘균열은 1사이클일때 발생하였으며, 5사이클일때 초기진단균열, 할렬균열, 피복박리현상이 거의 동시에 좌측단부로부터 1d지점에서 상부와 하부에서 일어났으며 최종파괴양상은 스테브 좌측단부로부터 두번째(6cm) 횡보강근이 상부주근 부분에서 횡보강근의 후크가 끊어지면서 내력이 저하되어 실험을 종료하였다.

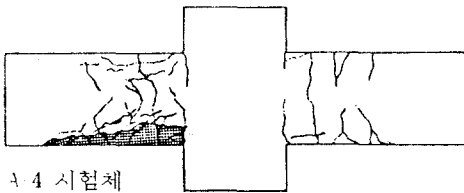
R 4 시험체는 초기진단균열이 5사이클일때 +29.4ton에서 할렬균열과 피복박리가 동시에 스테브 좌측단부로부터 1d지점에서 발생하였으며, 주근좌굴은 상부철근이 스테브 좌측단부로부터 두번째 후프근과 세번째 후프근 사이(10 cm지점)에서 일어났다.

표 4. 실험결과 일람표

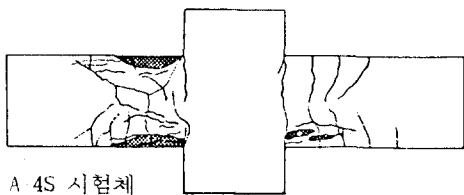
시험체	휨균열		전단균열		할렬균열		피복박리		최대내력	
	하중 (t)	부재각 (rad.)	하중 (t)	부재각 (rad.)	하중 (t)	부재각 (rad.)	하중 (t)	부재각 (rad.)	하중 (t)	부재각 (rad.)
A 2	13.5	1/375	24.0	1/128	26.7	1/95	26.7	1/95	26.9	1/94
A 4	16.0	1/333	32.0	1/114	32.0	1/114	32.0	1/114	32.2	1/114
A-4S	15.6	1/333	29.8	1/119	29.8	1/119	29.8	1/119	29.8	1/119
C 4	19.0	1/375	31.5	1/153	31.5	1/153	31.5	1/153	35.6	1/107
R 4	19.7	1/316	29.4	1/153	29.4	1/153	29.4	1/153	34.4	1/112



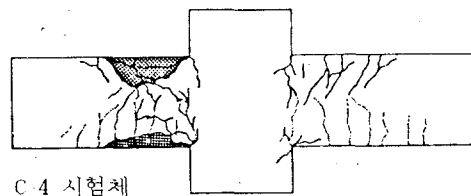
A-2 시험체



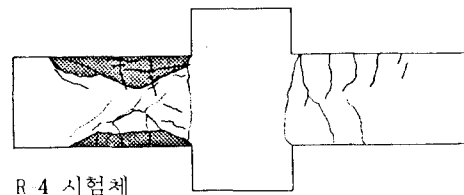
A-4 시험체



A-4S 시험체



C-4 시험체

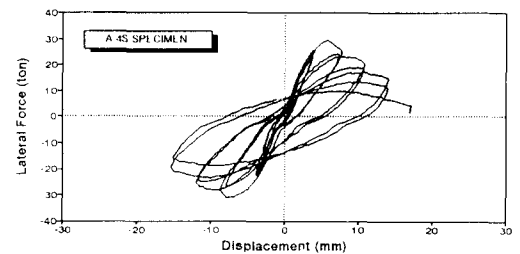
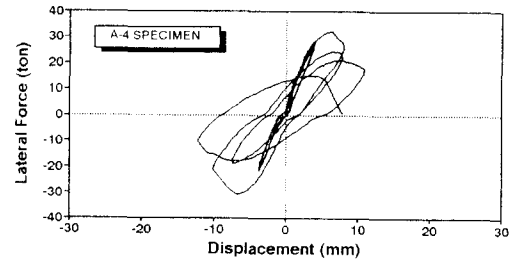
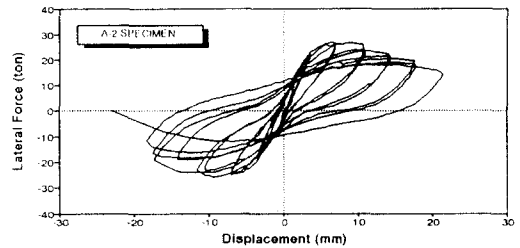


R-4 시험체

그림 5. 최종파괴상황

3.2 하중 변위 곡선

시험체에 적용된 하중과 중앙부 스테르브에 설치된 D.G(Dial Gage)로 얻어진 변위의 관계곡선을 그림 5에 나타내었다. 대체로 저축력이 적용된 A 2 시험체는 고축력이 적용된 A 4, A-4S, C 4, R-4 시험체들보다 다소 안정된 이력거동을 보이고 있으며, 또 약간의 핀칭현상을 보이고 있다. 반면에 고축력이 적용된 시험체들은 강도저하가 급하게 일어나고 있다. 이러한 하중 변위 관계 곡선으로 부터 시험체의 강도 및 강성변화와 에너지 소산능력에 대한 비교 및 평가를 하였다.



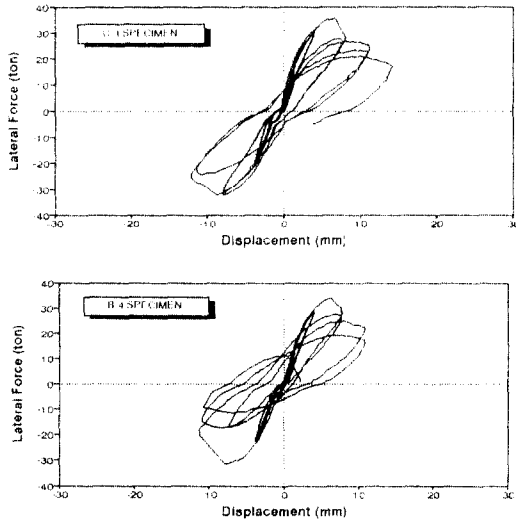


그림 6. 하중 변위곡선

3.3 최대강도의 변화

그림 7은 각시험체의 사이클별 최대강도 변화를 비교하여 나타낸 것으로 최대강도는 A 2, A 4, A-4S, C-4, R-4 시험체 각각 36.5ton, 54.4ton, 50.8ton, 53.5ton, 51.7ton으로, 저축력(0.2f'cAg)을 받는 A 2 시험체는 고축력(0.4f'cAg)을 받는 시험체보다는 최대강도가 67%~72% 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 Sugano가 제안한 최대강도의 80%일때의 한계부재각으로 변형능력을 평가할때 저축력을 받는 A 2 시험체의 부재각은 1/43rad.으로 일본건축학회에서 규정하고 있는 한계허용부재각 1/50rad. 이내이므로 소정의 변형능력을 확보하는 것으로 판단된다. 그러나 고축력을 받는 시험체들은 1/86rad.~1/75rad.으로 취성적인 거동특성을 나타내고 있다.

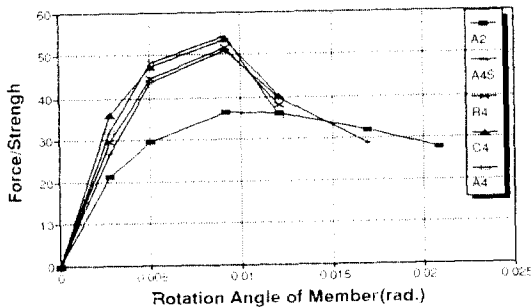


그림 7. 강도변화

3.4 강성의 변화

그림 8은 각 시험체의 강성변화를 나타낸 것으로 각 시험체의 초기강성은 8.4t/mm~12.4t/mm, 으로 나타났으며 저축력을 받는 A 2 시험체는 부재각 0.011rad.에서 초기강성의 37%로 나타났고, 고축력을 받는 시험체들은 초기강성의 27%~37%로 나타났다. 즉 부재각 0.01rad. 이전에는 거의 비슷하게 강성저하가 일어났다. 부재각 0.01rad. 이후 고축력을 받는 R 4, C 4, A 4 시험체는 강성저하로 파괴되었으나, A 4S 시험체는 부재각 0.015rad.에서 초기강성의 19%를 유지하는 것으로 나타났다. 저축력을 받는 A 2 시험체는 부재각 0.021rad.에서도 초기강성의 16%를 유지하는 것으로 나타나 강성저하는 횡보강근량과 축력의 크기에 영향을 받는 것으로 판단된다.

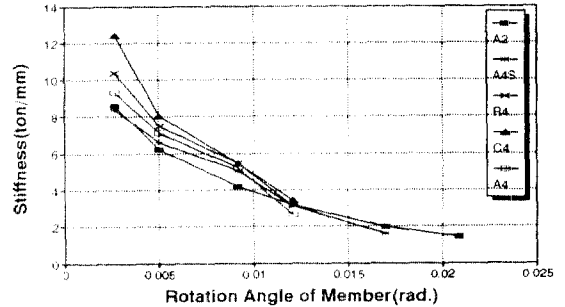


그림 8. 강성변화

3.5 에너지 소산능력

그림 9는 각 시험체의 에너지 소산능력을 나타낸 것이다. 하중 변위곡선으로 둘러싸인 면적으로 평가된 시험체의 에너지소산능력은 그림에서 나타낸 것과 같이 저축력을 받는 A 2 시험체는 부재각 0.021rad.일때 2236t.mm로 가장 높게 나타났으며, 고축력을 받는 시험체들의 최대 에너지소산능력은 저축력을 받는 A 2 시험체의 에너지소산능력의 36%~67%,로 나타났다. 부재각 0.015rad.일때 A 4S 시험체는 1490t.mm의 에너지소산능력을 나타내고 있으나, A-4, R-4, C-4, 시험체는 적용하중을 견디지 못하고 파괴되었다. 따라서, 에너지소산량은 축력의 크기와 횡보강근량에 영향을 받는 것으로 나타났으며 횡보강근의 형태에 따른 차이는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.

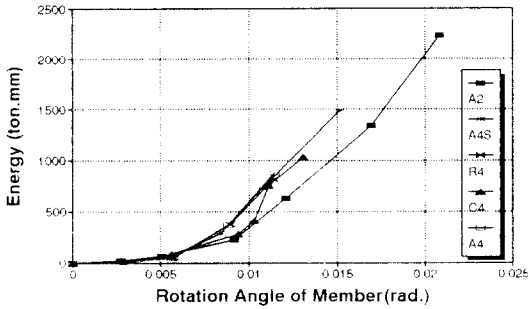


그림 9. 에너지소산량

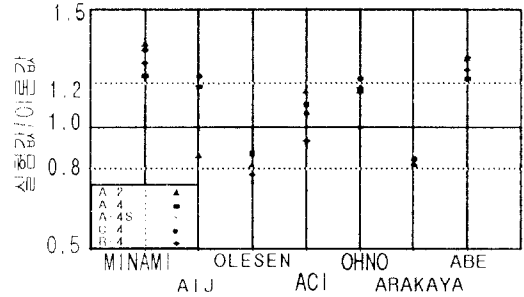


그림 10. 전단강도 비교

4. 계산값과 실험값의 비교

4.1 평균열강도 및 최대강도 비교

표 5는 각 시험체의 평균열강도 및 최대강도의 실험값과 계산값을 비교하여 나타낸 것이다. 표에서 보는 것과 같이 평균열강도는 실험값이 계산값보다 12%~57% 높게 나타났으며, 최대강도는 실험값이 계산값보다 37%~58% 높게 나타났다. 따라서, 기존의 이론식은 다소 과소평가하고 있음을 알 수 있으므로 이에 대한 계속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

표5. 각 시험체의 내력 계산값과 실험값의 비교

시 험 체	실험 값		계 산 값			
	P_{avg} (t)	P_{max} (t)	일본건축학 회식		Sugano & Koreish	
			P_u (t)	P_{max} (t)	P_{avg} (t)	P_{avg} (t)
A 2	13.5	26.9	17.0	1.58	10.9	1.24
A 4	16.0	32.2	21.8	1.48	13.9	1.57
A 4S	15.6	29.8	21.7	1.37	13.9	1.12
C 4	19.0	35.6	23.1	1.55	14.3	1.33
R 4	19.7	34.1	23.0	1.48	14.3	1.38

P_{avg} * : 평균열강도(실험) P_u : 최대강도
 P_{max} * : 최대강도(실험) P_{avg} : 평균열강도

4.2. 전단강도 비교

그림 10은 반복횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥 설계 및 강도 예측에 현행규준 및 기제안식의 적용 가능성을 검토 하기 위하여 각 규준 및 제안식에 의한 계산값과 실험값을 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 제안식들은 20%~40%의 오차를 나타내고 있으며, 특히, 일본건축학회 규준식과 ACI 규준식, Ohno식은 20%이내인 것으로 나타나 반복횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 설계 및 강도 예측에 적용 가능한 것으로 판단된다.

5. 결 론

이상과 같은 반복 횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 실험으로 부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 축력비가 클수록 강도와 강성저하율은 커지나, 에너지소산량은 작아지는 것으로 나타났으며, 고축력(0.4f_{cA_p})을 받는 시험체는 저축력(0.2f_{cA_p})을 받는 시험체보다 변형능력이 우수하지 못하므로 작용축력의 제한 또는 횡보강근량의 증가와 같은 새로운 설계법이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 고축력(0.4f_{cA_p})과 반복 횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥에서 횡보강근 형태는 강도, 강성 및 에너지소산량과 같은 구조적인 성능에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 횡보강근량은 강성, 에너지소산량에는 효과적인 것으로 나타났다.

(3) 기존에 제안된 전단강도식으로 계산한값과 실험값의 오차가 20%이내인 ACI 규준식과 일본건축학회 규준식, Ohno식은 반복횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 설계 및 강도 예측에 적용 가능한 것으로 판단된다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(KOSEF 92 92 00 12)의 일부로써 과학재단 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌.

- 이리형 외5인 "축력 및 반복횡하중을 받는 철근콘크리트기둥의 변형능력에 관한 연구", 한국콘크리트학회화술발표논문집, 제5권 제1호 1993. 5. pp.107-112
- 이리형 외4인, "축력 및 반복횡하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 강도와 변형능력에 관한 연구", 건축학회는문집 10권 3호 통권 65호 1994. 3