

지진하중을 받는 고강도 콘크리트 기둥의 휨강도와 연성

Flexural Strength and Ductility of High-Strength R/C Columns subjected to Earthquake Loadings

박관식* 황선경** 한병찬** 성수용** 윤현도*** 정수영***
Park, Kwan-Sik Hwang, Sun-Kyoung Han, Byung-Chan Sung, Soo-Yong Yun, Hyun-Do Chung, Soo-Young

ABSTRACT

With the increase in the use of High-Strength Concrete(HSC) despite the its weakness like brittle characteristic, it is important to improve the performance of HSC columns, nowadays. Therefore, it is common to use higher strength steel in HSC for the purpose of ductility and strength improvement. This experimental study was set up to investigate the inelastic behavior of HSC(700kg/cm³) columns subjected to combined axial and repeated lateral loads. Effects of key variables such as the volumetric ratio of transverse reinforcement, tie configuration and tie yield strength are studied in this research program. Test results indicate that inelastic response of HSC columns improve with proper confinement of core concrete. Increasing the amount of transverse reinforcement results in increased ductility.

1. 서론

구조물에 지진하중이 작용할 경우, 수평 및 상하진동에 의해 하부층 기둥은 큰 축방항력과 수평력을 경험하게 된다. 이러한 응력상태에서 철근콘크리트 기둥은 축력과 전단력에 의한 갑작스런 전단파괴 상태에 놓일 수 있다. 더욱이, 최근 건물이 고층화, 대형화, 특수화되어 가고 있는 추세에 따라 하부층 기둥에 고강도 콘크리트의 사용은 재료의 취성적 성질 때문에 기둥의 소성힌지 발생을 가속화 시키고 있다. 최근 지진에서도 알 수 있듯이 많은 구조물의 파괴는 비탄성 영역에서 기둥의 취약한 거동에 기인하고 있다.

이와 같은 기둥의 취성적인 파괴를 방지하기 위해 내진구조물은 “강한 기둥-약한 보”의 개념을 만족시킴으로써 기둥에서의 소성힌지 발생을 피하고 구조물에 흡수된 지진에너지는 보의 항복으로 인해 소산되도록 설계되고 있다. ACI 318규준에서는 기둥의 변형능력을 확보하기 위하여 횡보강근으로 심부콘크리트를 구속시키도록 의무화하고 있다.

한편, 기존 연구^{(1),(2)}에 의하면 횡보강근에 의한 기둥의 심부콘크리트 구속은 기둥의 강도와 연성을 증가시키는 것으로 나타

* 정회원, 충남대학교 대학원, 석사과정

*** 정회원, 충남대학교, 교수, 공박

** 정회원, 충남대학교 대학원, 박사과정

났다. 그리고, 1994년 Azizinamini⁽³⁾ 등은 ACI 318-89규준식이 고강도 콘크리트 기둥의 휨내력을 과대평가하고 있음을 지적하고 합리적인 휨내력 평가를 위해 등가응력블럭에 대한 새로운 값을 제안하였다. 이상과 같이 현행 설계규준은 보통강도 철근 콘크리트에 대한 연구를 근거로 하여 정립되었기 때문에 고강도 철근콘크리트 구조시스템에 현행규준을 적용함에 있어 고강도 콘크리트의 응력분포, 횡보강근의 구속효과 등 여러 가지 의문이 제기되고 있으므로 고강도 철근콘크리트 기둥에 대한 역학적 특성 및 거동에 대한 연구가 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 고강도 철근콘크리트 기둥에 있어 기둥의 연성능력에 중요한 요인인 횡보강근 형태, 체적비 그리고 항복강도를 변수로 하여 이러한 요인에 의한 영향을 규명하고, 고강도 철근콘크리트 기둥의 휨내력 산정시 기존 등가응력블럭 제안식에 의한 이론값과 실험값과의 비교분석을 통해 고강도 철근콘크리트 기둥의 합리적 설계에 필요한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 실험체 계획

실험체는 총 6개를 계획하였으며 실험체의 일람표는 표 2에 나타내었고, 실험체의 형상은 그림 1과 같이 상하부에 고정단효과와 가력을 위한 2개의 스텐브(Stub)를 두어 제작하였으며, 기둥 부분의 크기는 200mm×200mm×600mm로 하였다. 전단스팬비는 모든 실험체에 대하여 4.0으로 동일하게 하였으며, 실험체에 사용되는 주근은 SD40(KS D 3504)인 직경13mm의 이형철근을 사용하였다. 실험체의 상하단 스텐브는 실험시 파괴가 선행되지 않도록 충분한 강도를 갖도록 그림 1과 같이 500mm×400mm×400mm로 하였다. 또한, 실험체의 스텐브 부분은 상하단에 각각 6개의 $\phi 55$ mm의 구멍을 만들어 원형강봉을 끼워 반력 프레임에 고정할 수 있도록 제작하였다. 횡보강근의 후크 구부림 각도는 135°로 하였으며, 후크 길이는 모두 횡보강근 직경의 6배 이상으로 하였다.

2.2 재료실험

2.2.1 콘크리트 강도실험

실험체 제작시 사용된 콘크리트의 최대 골재직경은 19mm, 슬럼프는 21cm, 설계기준강도(f_{ck})는 700kgf/cm²으로 하였다. 콘크리트 압축강도시험은 KS F 2404규정에 따라 실시되었으며, 콘크리트 압축강도와 탄성계수는 표 1과 같다.

표 1 콘크리트 압축강도

Average strength						E_c (kgf/cm ²)
Age of concrete (days)	3	7	10	21	28	
strength (kgf/cm ²)	465	522.3	598.7	647	701.7	3.38×10^5

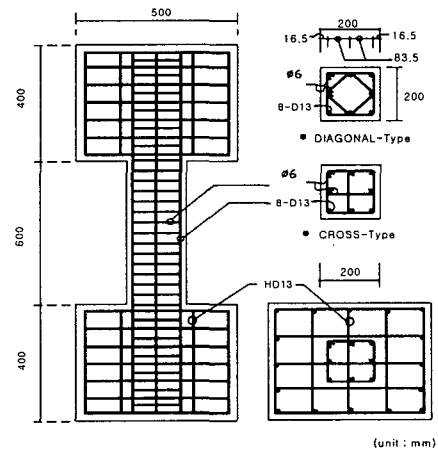


그림 1 실험체 단면상세

표 2 실험체 일람표

Specimen designation	Transverse reinforcement							Longitudinal Steel			f_{ck} (kgf/cm ²)	Set
	Bar size	S (cm)	Detail ¹⁾	ρ_s ²⁾ (%)	$\frac{\rho_s}{\rho_{s(ACI)}}$	f_{yh} (kgf/cm ²)	$\frac{\rho_s \cdot f_{yh}}{f'_{ck}}$	Bar size	f_y (kgf/cm ²)	Percent (%)		
C-S	φ6	5.7	C	1.58	1.00	7,950	17.94	8-D13	4,395	2.54	700	S-series
D-S	φ6	6.5	D	1.58	1.00	7,950	17.94	8-D13	4,395	2.54	700	
C-A	φ6	4.0	C	2.25	1.42	7,950	22.55	8-D13	4,395	2.54	700	A-series
D-A	φ6	4.6	D	2.25	1.42	7,950	22.55	8-D13	4,395	2.54	700	
L-C-S	φ6	4.0	C	2.25	1.00	5,600	18	8-D13	4,395	2.54	700	L-series
L-D-S	φ6	4.6	D	2.23	0.99	5,600	17.8	8-D13	4,395	2.54	700	

1)Details of transverse reinforcements (C ; Cross-Type, D ; Diagonal-Type)

2)Ratio of transverse reinforcement over spacing S to core volume of concrete confined by transverse reinforcement (measure out-to-out)

2.2.2 철근의 인장강도

본 연구에서는 D13, φ6의 고강도 철근을 사용하였으며, 사용된 철근의 재료특성을 파악하기 위하여 KS D 0801(금속재료 인장시험편 규정)의 규정에 따라 시험편을 제작하였으며, KS D 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 인장시험을 실시하였다. 철근 인장시험 결과는 표 3과 같다.

표 3 철근의 인장강도

Type	E_s ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	f_y (kgf/cm ²)	ϵ_y	f_u (kgf/cm ²)	ϵ_u
D13	1.78	4,395	0.0024	5764	0.1691
φ6	2.07	7,950	0.0047	-	-
φ6	2.10	5,600	0.0046	-	-

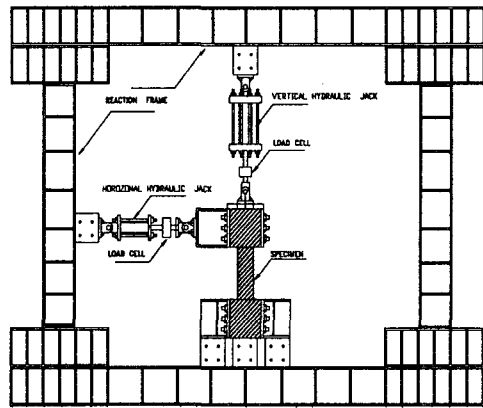


그림 2 실험체 설치 및 가력

2.3 실험 방법

실험은 지진하중시 저층부의 응력상태를 재현하기 위하여 그림 2와 같이 실험체를 가력프레임에 수직으로 설치하여 재하보에 상하 스티브를 고력강봉으로 연결한 후 실험체의 상부에 설치된 100t용량의 유압잭(Oil Jack)으로 일정축력을 가력하였다. 수평하중은 실험체 중앙부와 같은 높이의 프레임에 설치된 100t용량의 유압잭으로 그림 3과 같은 변위이력에 준하여 점증 반복가력하였다. 이력특성을 파악하기 위하여 2개의 SDT(Strain Type Displacement Transducer)에 의하여 횡변위와 축변위를 측정하였다.

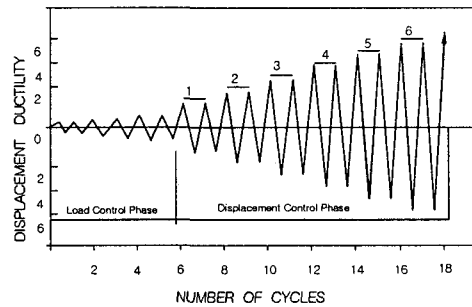


그림 3 변위이력

3. 실험결과 및 분석

3.1 균열 및 파괴상황

그림 4에서와 같이 실험체의 균열 및 파괴상황은 대체로 유사한 균열 및 파괴형태를 보이고 있다. 균열은 기둥 하단으로부터 5~20cm 부근의 인장측에서 초기 휨균열이 발생하였으며, 이러한 균열은 주근의 항복이후 기둥 중앙부로 진전되었다. 그 후, 연성비 1~2구간에서 최대 내력을 경험하면서 균열은 휨전단균열로 발전되었다. 이 후 실험체는 연성비 3에 이르러 전단균열이 급격히 진전되며 실험체의 횡하중 지지 능력은 저하되었으며 기둥 하단에서 피복콘크리트의 박리가 시작되어 연성비 4에 이르자 소성구간에서 휨전단 파괴되는 양상을 나타내었다.

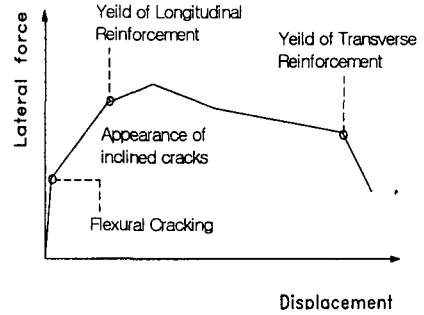
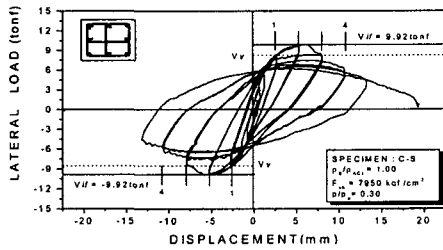
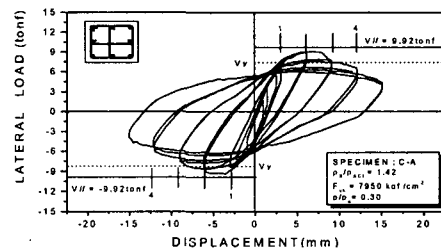


그림 4 실험체 균열진전 개념도

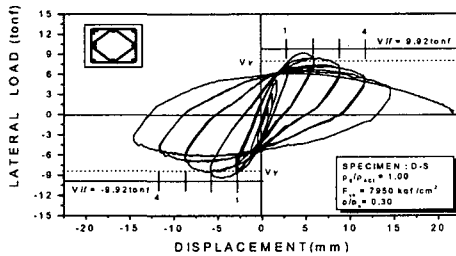
3.2 하중-변위 관계



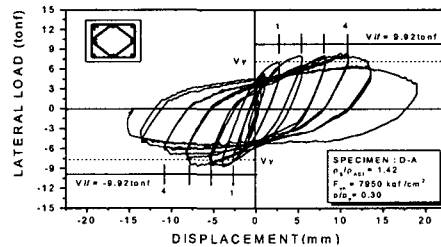
(a) 실험체 C-S



(b) 실험체 C-A



(c) 실험체 D-S



(d) 실험체 D-A

그림 5 하중-변위 관계 곡선

그림 5는 일정축력($0.3P_u/P_0$)하에 횡보강의 강도, 체적비 및 형태를 주요변수로 한 실험체의 하중-변위 곡선으로 V_{ir} 는 ACI 규준을 이용한 P-M곡선으로부터 산정된 휨강도를 기둥의 순길이(기둥 하단부에서 횡하중 가력점까지의 거리)로 나눈 이른값이며, V_y 는 횡하중 증가로 인해 주근이 최초로 항복한 시점에서의 항복내력이다.

횡보강근 체적비에 따른 이력거동을 살펴보면, ACI 기준보다 횡보강근 체적비를 42%증가시킨 A계열 실험체(C-A, D-A)가 ACI 기준에 준하여 보강된 S계열 실험체(C-S, D-S)보다 안정된 이력거동을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 횡보강근 비의 증가로 횡보강근이 주근의 조기좌굴을 방지하고, 주근과 콘크리트 사이의 정착성능을 향상시켜 효과적으로 심부콘크리트를 구속시키기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 동일한 체적비의 실험체에서 횡보강근 항복강도에 따른 이력거동을 분석한 결과, 본 연구의 범위내에서는 횡보강근 항복강도의 증가가 기둥의 이력거동에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

3.3 휨 내력 평가

실험체별 휨강도는 수직하중의 수평분력을 포함한 횡하중에 의한 모멘트와 $P \cdot \delta$ 효과를 고려한 2차모멘트를 합하여 산정하였고, 이를 기존의 제안식에 의해 계산된 이론값과 비교하여 표 4에 나타내었다. 그림 6과 같이 Azizinaminin et al.의 제안식⁽³⁾, Bing et al.의 제안식⁽⁵⁾, ACI 기준식 순으로 실험값에 근접하고 있었다. 한편, 본 연구에서 변수로 설정한 횡보강근 형태, 횡보강근 체적비 및 횡보강근 항복강도에 따른 기둥의 휨내력을 비교한 결과, 실험체간 큰 차이는 발견되지 않았다. 이 실험 결과를 토대로 700kgf/cm²급 고강도 콘크리트를 사용할 경우, 현행 ACI 기준식에 의해 계산된 기둥의 휨내력은 다소 과대평가되고 있는 것으로 판단된다.

표 4 실험체의 휨강도 및 변위연성 비교

Specimen designation	Transverse reinforcement			Flexural strength M _{EXP} tonf-m.	$\frac{M_{EXP}}{M_{ACI}}$		$\frac{M_{EXP}}{M_{Aziz}^{(3)}}$		Displacement ductility $\mu = \delta_{80} / \delta_y$	R _u (rad.)
	S (cm)	ρ_s (%)	$\frac{\rho_s}{\rho_{s(ACI)}}$		M _{Bing} ⁽⁴⁾	M _{Aziz} ⁽³⁾				
C-S	5.7	1.58	1.00	8.14	1.00	1.06	1.08	3.25	0.0108	
D-S	6.5	1.58	1.00	7.40	0.91	0.96	0.99	3.16	0.0103	
C-A	4.0	2.25	1.42	7.68	0.94	0.99	1.03	3.69	0.0118	
D-A	4.6	2.25	1.42	7.09	0.87	0.92	0.95	4.38	0.0170	
L-C-S	4.0	2.25	1.00	7.73	0.95	1.00	1.03	3.64	0.0131	
L-D-S	4.6	2.25	1.00	7.77	0.96	1.01	1.04	3.70	0.0137	

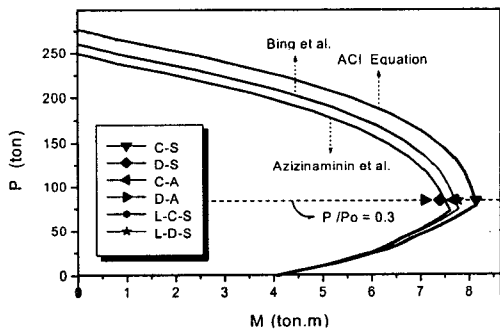


그림 6 실험체 휨내력 비교

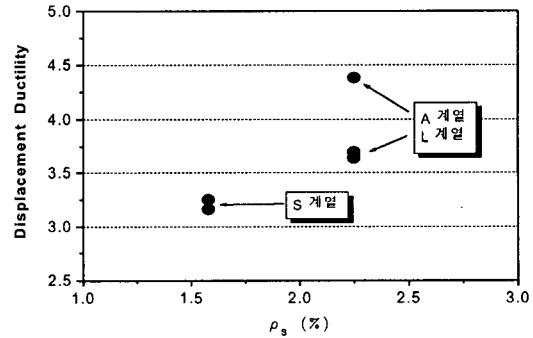


그림 7 횡보강근 체적비에 따른 변위연성 비교

3.4 연성능력 평가

구조부재가 파괴직전까지 경험할 수 있는 비탄성 변형능력을 평가하기 위하여 연성을 비교·분석하였다. 연성을 평가하는 방법에는 곡률연성과 변위연성이 있으나 본 연구에서는 Watson⁽⁵⁾ 등이 정의한 기둥의 종국상태(모멘트내력이 최대내력의 80%로 감소되었을 경우)에서의 변위연성을 평가하여 표 4에 나타내었다. 이 표에서 δ_{80} 는 최대내력의 80%점에서의 변위이고 $R_u(\text{rad})$ 는 한계부재각이다. 그림 7과 같이 횡보강근 체적비에 따른 변위연성을 비교해 보면, 체적비를 42%증가시킨 A계열 실험체가 규준에 따라 배근한 S계열 실험체보다 크로스형-실험체의 경우 13%, 다이아몬드형-실험체의 경우 38%만큼 증가된 변위연성을 보이고 있다. 이는 횡보강근의 체적비 증가로 심부콘크리트에 대한 구속효과가 증가되었기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 횡보강근의 항복강도가 고강도 콘크리트 기둥의 변위연성에 미치는 영향을 비교한 결과, 본 연구범위에서는 횡보강근의 항복강도 변화가 기둥의 변위연성에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 이상의 실험결과에서 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 기둥에 있어서 횡보강근 체적비는 기둥의 연성능력 향상에 중요한 변수임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

(1) 하중-변위관계에서 횡보강근의 체적비를 ACI규준보다 42%증가시킨 A계열 실험체가 최대내력 이후 완만한 하중저하를 보이고 있으나, ACI규준에 의한 S계열 실험체는 최대내력 이후 횡보강근의 박리 및 주근의 좌굴에 의해 다소 불안정한 이력거동 양상을 나타내었다.

(2) 고강도 콘크리트 기둥에 대한 실험결과 휨강도 M_{exp} 는 7.09~8.14tf.m으로 나타났으며, 이론적인 휨강도인 M_{ACI} , M_{Bing} , M_{Aziz} 은 각각 8.11tf.m, 7.70tf.m, 7.49tf.m으로 Azizinaminin et al.의 제안식이 실험값에 가장 근접하고 있었다. 따라서, 고강도 콘크리트를 사용할 경우, 현행 ACI규준식은 휨내력을 다소 과대평가하고 있음을 알 수 있으며, 적절한 휨내력 산정을 위해 고강도 콘크리트의 등가응력블럭에 대한 합리적인 기준이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

(3) 횡보강근 체적비에 따른 변위연성 비교에서는 A계열 실험체가 S계열 실험체보다 크로스형 실험체의 경우 13%, 다이아몬드형 실험체의 경우 38%만큼 증가된 변위연성을 보이고 있어 횡보강근 체적비가 고강도 콘크리트 기둥의 연성 증진에 중요한 영향을 끼치고 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Kent, Dudley Charles and Park, Robert, "Flexural Members with Confined Concrete", Proceeding, ASCE, V.97, ST7, July 1971, pp. 1969-1990.
2. Vallenias, J.; Berrtero, V. V.; and Popov, E.P., "Concrete Confined by Rectangular Hoops Subjected to Axial Loads, " Report No. UCB/EERC-77/13, Earthquake Engineering Rearch Center, University of California, Berkeley, Aug
3. Azizinamini, A., Kuska, S., Brungardt, P., and Hatfield, E., "Seismic Behavior of Square High-Strength Concrete Columns", ACI Jouranl, V.91, No.3, May-Jun. 1994, pp.336-345.
4. Bing, Li, Park, R., and Tanka, H., "Effect of Confinement on the Behavior of High-Strength Concrete Columns under Seismic Loading", Pacific Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, Nov.1991
5. Watson, S.; Zahn, F.A.; and Park, R. "Confining Reinforcement for Concrete Columns." Journal of Structural Engineering, ASCE, V.120, No.6, June 1994, pp.1798-1824.