

편심하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 역학적 특성

Mechanical Characteristics of Eccentrically Loaded High Strength Reinforced Concrete Columns

김 인 식*
Kim, In Sik

최 봉 섭**
Choi, Bong Seob

권 영 웅***
Kwon, Young Wung

ABSTRACT

This paper are the mechanical characteristics of eccentrically loaded normal strength and high strength reinforced concrete columns based on the test results. The columns are 120×120mm at the mid-section and are haunched at the ends to apply the eccentric loading and prevent premature failure. Variables are concrete strengths(361, 672, 974 kgf/cm²), longitudinal reinforcement ratios(1.98, 3.54, 5.53%), spacing of lateral reinforcement(30, 60, 120mm), and eccentricities(24, 40mm). As a results, the main conclusions obtained from the comparison and analysis for the strength tendency, deformation and ductility of high strength reinforced concrete columns with variables are as follows:

As the concrete compressive strength and spacing of lateral reinforcement increases, the ductility index of high strength reinforced concrete columns decrease, but it increase with the increase of eccentricity and longitudinal reinforcement ratio. The confinement ratio must be greater than 20 percent in order for the level of ductility between high strength reinforced concrete columns and normal strength reinforced concrete columns to be almost equal.

1. 서론

콘크리트공학의 발달과 더불어 건물이 고층화됨에 따라 구조재료의 역학적 성능을 최대한 이용하기 위하여 고강도 콘크리트를 많이 사용하고 있다. 고강도 콘크리트는 휨모멘트가 큰 보에 적용하는 것보다 상대적으로 축력을 많이 받는 기둥에 적용하는 것이 역학적으로 유리하다.⁽¹⁻³⁾

그러나, 고강도 콘크리트 기둥에서 가장 큰 문제점은 취성적인 파괴성향이다. 따라서, 고강도 철근콘크리트 기둥은 연성확보가 무엇보다 중요하며, 오늘날의 연구는 고강도 철근콘크리트 기둥의 연성확보에 집중되고 있다. 특히, 고강도 철근콘크리트 기둥의 급격한 취성파괴를 방지하고 보다 연성적인 파괴로 유도하기 위하여 주철근량, 횡보강근 채적비, 횡보강근 간격, 횡보강근 형상등에 대하여 연구가 많이 진행되고 있다.⁽⁴⁻¹¹⁾

본 연구에서는 실제구조물의 용력에 가까운 편심하중을 가력하여 고강도 철근콘크리트 기둥의 역학적 특성에 영향을 미치는 요인을 실험변수로 하여 강도 특성을 파악하고, ASTM C1018-92에 제시된 축하중과 복합변형을 곡선 이하의 면적을 바탕으로 하는 연성 지수를 통하여 고강도 철근콘크리트 기둥의 연성을 정량화하여 평가하고자 하였다.⁽⁴⁾

*정회원, 인천대학교 건축공학과 대학원, 석사

**정회원, (주) 합 건설방재기술단 전문위원, 공학박사,

*** 정회원, 인천대학교 건축공학과 교수, 공학박사

2. 실험

2.1 실험변수

본 연구는 콘크리트 목표강도 L(300kgf/cm²), H(600kgf/cm²), V(900kgf/cm²), 횡보강근 간격 120mm, 60mm, 30mm, 주철근비는 120mm×120mm단면에 4-D10(1.98%), 4-D13(3.54%), 4-D16(5.53%) 및 편심거리 40mm, 24mm를 실험변수로 하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 철근

표 1 사용철근 특성

Bar	Diameter (mm)	Area (cm ²)	Yield strength (kgf/cm ²)	Modulus of elasticity (kgf/cm ²)
SD6	6	0.32	4242	1.768×10 ⁹
SD10	10	0.71	4104	1.79×10 ⁹
SD13	13	1.27	4220	1.87×10 ⁹
SD16	16	1.99	4327	1.24×10 ⁹

표 2 콘크리트 배합표

f _{cu} (kgf/cm ²)	C	W	S.F.	S	A	S.P.	Slump (cm)
	(kg/m ³)						
361	300	135	-	716	1026 (13mm)	-	8
672	506.3	162	50.6	676	1014 (13mm)	11.14	13
974	600	138	72	620	1025 (9.5mm)	13.44	5

철근콘크리트 기둥 시험체에 사용된 철근은 D6, D10, D13, D16으로 SD40 국내산을 사용하였다. D6은 횡보강근으로 D10, D13, D16은 기둥의 주철근으로 사용하였으며, KS B0801과 KS B0802에 따른 인장시험편을 제작하여 인장시험을 실시하였다. 철근에 대한 재료적 특성은 표 1에 제시하였다.

2.2.2 콘크리트

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 고강도 콘크리트의 작은 단위수량을 대체하기 위해서 고성능 감수제를 사용하였고 단위시멘트량이 증가함에 따라 작업성이 떨어지고 단위수량이 증가하여 오히려 강도를 떨어뜨리므로, 최대 단위시멘트량을 600kgf/m³으로 하였다. 또한, 실리카흙의 미분말입자를 시멘트 혼합 결합재로 사용하여 시멘트 페이스트의 미세한 조구조를 치밀화 시켰다.

2.3 시험체의 제작

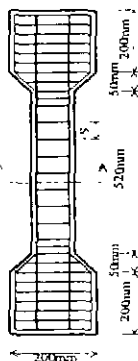


그림 1 시험체 배근 상세

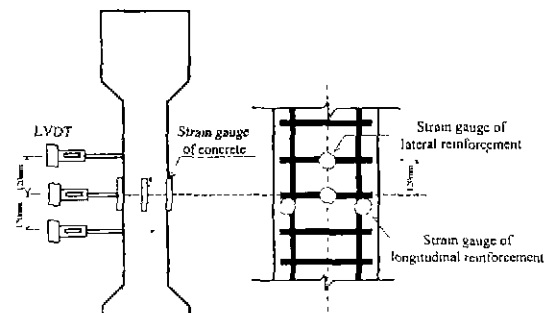


그림 2 LVDT와 게이지의 위치

총 15개의 시험체를 제작하였으며, 시험체 중앙부의 크기는 120(b)×120(h)×520(L)mm이고 세장비(λ)

는 15로 하였다. 기둥 양단부에 편심가력과 응력집중방지 및 조기파괴 방지를 위해서 횡보강간 간격을 30mm로 한 현치를 제작하였다.

2.4 시험방법

기둥에 편심하중을 가력하기 위해서 최대하중 250 tonf 용량의 만능시험기를 사용하였다. 기둥 양단부에 하중이 시험체에 직접적으로 작용하지 않도록 단면이 200mm×120mm×60mm인 가력판과 현지역할을 하는 강봉을 설치하였다. 가력강판의 평활정도에 따른 응력집중을 방지하고 시험체에 축력이 균일하게 작용할 수 있도록 구면좌를 함께 사용하였다. 가력속도는 초기에 0.28mm/min, 변형증가부분은 0.14mm/min으로 변위제어를 실시하였으며 시험체에 가력하기 전에 예상 최대강도의 5%를 미리 가하여 시험체를 안정화 시켰다.

횡방향 변위를 측정하기 위하여 변위계(LVDT)를 기둥의 중앙과 중앙에서 상·하 12cm 떨어진 지점에 설치하였으며 콘크리트의 변형률과 철근의 변형률을 측정하기 위해 스트레인 게이지를 부착하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴 성향

콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 취성파괴를 일으키고, 주철근비가 증가할수록 압축측 피복면의 박리현상이 현저하게 발생하였다. 횡보강간 간격이 작고 편심거리가 증가할수록 연성적인 거동을 나타내고 압축측의 압파가 두드러지며, 인장측의 균열 개수가 증가하는 경향을 나타낸다.

3.2 축력-횡변위 관계

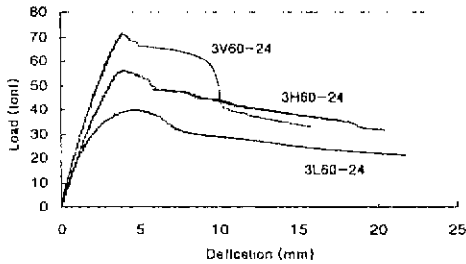


그림 3 콘크리트 압축강도에 따른 축력-횡변위 관계

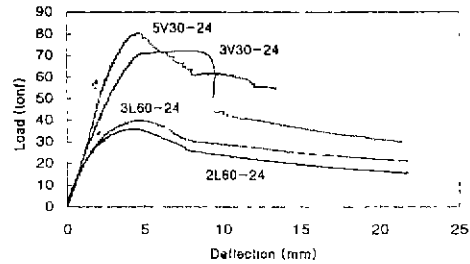


그림 4 주철근비에 따른 축력-횡변위 관계

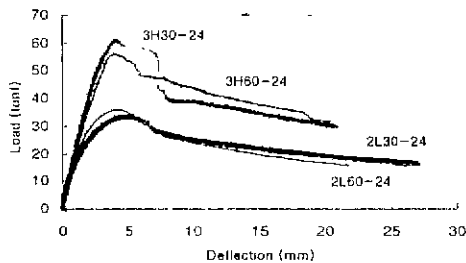


그림 5 횡보강간 간격에 따른 축력-횡변위 관계

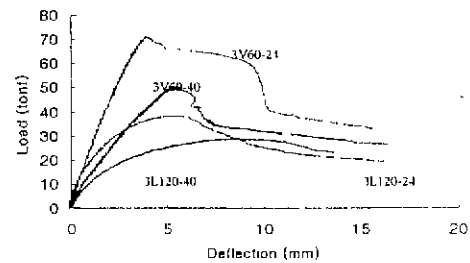


그림 6 편심거리에 따른 축력-횡변위 관계

그림 3은 콘크리트 압축강도에 따른 축력-횡변위 관계를 나타낸 것이다. 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 철근콘크리트 기둥의 강성이 증가하여 초기 횡변위는 작으며, 최대하중이후 하향 이력곡선 기울기가 급격히 떨어

어짐을 알 수 있다.

그림 4는 주철근비가 증가할수록 철근콘크리트 기둥의 최대강도가 증가하고 최대강도 이후 연성이 증가하는 경향을 보이고 있다.

그림 5는 횡보강근 간격이 작을수록 철근콘크리트 기둥은 최대하중에서 횡변위가 증가하는 경향을 보이고 있으며 연성적인 거동을 나타낸다.

그림 6은 편심거리가 증가할수록 최대하중에서 횡변위가 증가하고 최대하중이후의 하향 이력곡선 기울기가 감소하는 연성거동을 나타낸다.

3.3 철근콘크리트 기둥의 연성 평가

표 3 시험체에 대한 연성 지수 결과

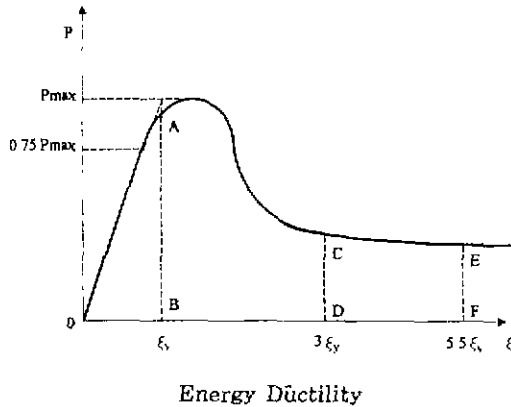


그림 7 편심하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 연성

Series	Specimen	P _{max} (tonf)	Eccentricity at maximum load (mm)	Ductility Index I ₅
L	3L60-24	39.97	28.46	4.53
	3L120-40	28.65	48.36	-
	3L120-24	38.5	29.40	4.20
	2L30-24	33.52	28.84	4.59
	2L60-24	35.93	28.10	-
H	3H30-24	60.98	28.10	3.884
	5H60-24	67.32	29.07	3.66
	2H60-40	34.93	47.43	4.17
	3H60-24	56.47	28.03	-
	2H60-24	54.44	27.66	3.43
V	3V60-24	71.67	27.88	4.18
	5V30-24	80.78	28.50	-
	3V30-24	71.32	28.79	3.70
	3V60-40	50.39	45.69	-
	3V120-24	68.25	28.36	-

본 연구에서는 철근콘크리트 기둥의 연성평가를 위해 ASTM C1018-92에 제시된 축하중과 복합변형률 곡선 이하의 면적을 바탕으로 하는 연성 지수를 채택하였다.

철근콘크리트 기둥 단면에 하중을 가한 후에도 기둥 단면이 평면을 유지하면, 단면 도심에서의 평균 변형률 ϵ_{av} 과 곡률 κ 로 변형률 분포를 정의한다. 변형을 일으키는 하중은 축력과 휨모멘트이므로, 철근콘크리트 기둥의 연성은 모멘트-곡률과 축력-평균변형률로 각각 특성화시켰다.

철근콘크리트 기둥의 연성수준을 비교할 수 있는 연성 지수는 편심거리 e 에서 작용하는 하중 P 에 의해 수행된 일로 유도하였다. 철근콘크리트 기둥에서 수행된 일은 다음과 같다.

$$\int_R (P \epsilon_{av} + P e \kappa) dx = \int_R P (\epsilon_{av} + \kappa e) dx \quad (1)$$

여기서, R 은 적분구간이며, $\xi = (\epsilon_{av} + \kappa e)$ 를 복합변형률이라 정의한다. 철근콘크리트 기둥의 연성 지수를 구하는 방법은 그림 7에 도식하였다.

ξ_y 는 3/4 rule을 적용하고 P - ξ 곡선 이하의 면적을 바탕으로 구한다. 본 연구에서는 I_5 를 측정하였다. I_5 는 면적 OCD와 OAB의 비로 구하며, B, D의 복합변형률은 각각 ξ_y , $3\xi_y$ 이다. ξ_y 는 $0.75P_{max}$ 에 해당하는 ξ 를 구하여 $0.75P_{max}$ 와 P_{max} 의 삼각형비로 구하였다.

그림 8 ~ 그림 11은 실험변수에 따른 축력-복합변형률 곡선을 나타내며, 이것을 바탕으로 각 시험체에 대한 연성 지수를 표 3에 나타내었다.

콘크리트 압축강도가 증가할수록, 주철근비가 작을수록, 횡보강근 간격이 클수록, 편심거리가 작을수록 연성 지수는 떨어지는 것으로 나타났다.

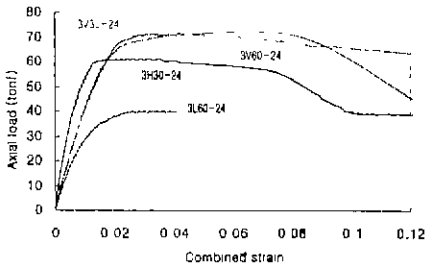


그림 8 콘크리트 압축강도에 따른 축력-복합변형률 관계

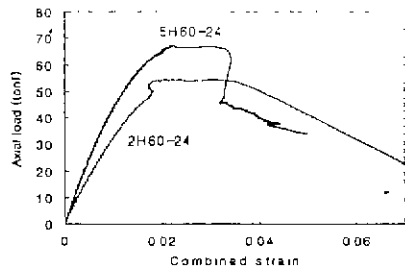


그림 9 주철근비에 따른 축력-복합변형률 관계

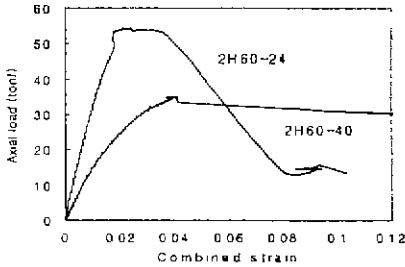


그림 11 편심거리에 따른 축력-복합변형률 관계

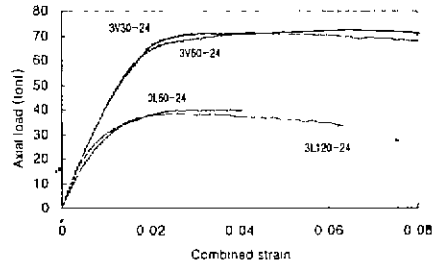


그림 11 횡보강근 간격에 따른 축력-복합변형률 관계

3.4 횡보강근의 구속효과

철근콘크리트 기둥의 연성은 횡보강근에 의한 구속효과에 좌우된다. 철근콘크리트 기둥의 연성은 횡보 강근 체적비와 횡보강근 항복강도에 비례하고 콘크리트 압축강도에 반비례한다. 그러므로, 횡보강근에 의한 구속지수는 $\rho_s \cdot f_{yt}/f_{ck}$ 로 나타낼 수 있다. 그림 12는 횡보강근의 구속지수에 대한 철근콘크리트 기둥의 연성지수를 나타내고 있다.

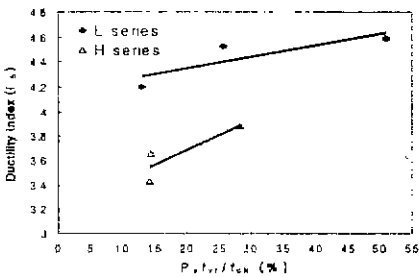


그림 12 편심거리 24mm인 L-H 시험체의 연성지수-구속지수 관계

그림 12를 통하여 고강도 철근콘크리트 기둥의 연성수준이 보통강도 철근콘크리트 기둥의 연성수준과 유사하리면, 구속지수가 약 20% 이상 증가해야 하는 것을 알 수 있다.

3.5 횡보강근의 변형률

그림 13은 시험체 3L60-24와 3V60-24의 축하중과 횡보강근 변형률에 대한 그래프이다. 3L60-24와 3V60-24의 횡보강근은 최대하중에서 항복하지 않는 것을 알 수 있다. 특히, 각 시험체의 상부 횡보강근은 최대하중 이후에도 항복하지 않았다.

시험체 3L60-24와 3V60-24의 중앙 횡보강근은 최대하중 이후 항복한다. 최대하중 이후 시험체 3V60-24의 중앙 횡보강근 변형률은 0.002634까지 증가하지만, 3L60-24의 중앙 횡보강근 변형률은 0.005804까지 증가하며 코어 콘크리트를 구속하고 있다. 이것은 콘크리트 압축강도가 증가할수록 프야송비가 감소하므로 횡변형이 줄어들어 횡보강근의 변형률과 구속효과가 떨어지는 것으로 판단된다.

이러한 고강도 콘크리트의 재료적 특성으로 인하여 동일한 구속지수, 편심거리를 받는 고강도 철근콘크리트 기둥은 보통강도 철근콘크리트 기둥보다 횡보강근의 구속효과가 떨어짐으로써 연성이 저하되는 것을 알 수 있다.

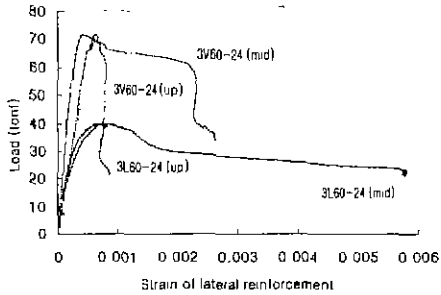


그림 13 시험체 3L60-24, 3V60-24에 대한 횡보강근의 축력-변형을 관계

- (3) 철근콘크리트 기둥은 동일한 콘크리트 압축강도, 주철근비, 편심거리에서 횡보강근 간격이 작을수록 연성적인 거동을 보이지만 최대강도에는 큰 영향을 미치지 않으며, 압축축 압괴 면적이 증가하고 인장축의 균열도 증가한다.
- (4) 철근콘크리트 기둥은 동일한 콘크리트 압축강도, 주철근비, 횡보강근 간격에서 편심거리가 증가함에 따라 압축연단에서 중립축까지의 거리가 감소하고 압축용력을 받는 면적이 줄어들며, 인장축의 균열발생률이 증가하고 압축축의 압괴현상이 두드러진다.
- (5) 콘크리트 압축강도와 횡보강근 간격이 증가할수록 연성지수는 작아지고 편심거리와 주철근비가 증가할수록 연성지수는 증가한다.
- (6) 고강도 철근콘크리트 기둥의 연성수준을 보통강도 철근콘크리트 기둥의 연성수준과 같게 하려면, 구속지수를 약 20% 이상 증가시켜야 한다.
- (7) 고강도 철근콘크리트 기둥은 고강도 콘크리트의 재료적 특성으로 인하여 동일한 구속지수, 편심거리를 받을 경우, 보통강도 철근콘크리트 기둥보다 횡보강근의 구속효과가 떨어짐으로 연성이 저하된다.

참고문헌

1. ACI 318-95, Building Requirements for Reinforcement Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1995.
2. American Concrete Institute Committee 363, "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete," ACI 363P-92, American Concrete Institute, Detroit, September 1992, 55pp.
3. S. Ali Mirza, Atorod Azizinamini, and Perry E Adebare et al., "High Strength Concrete Columns State of the Art," ACI Structural Journal, May-June 1997, pp. 323-335.
4. Stephen J Foster, Mario M. Attard, "Experimental Tests on Eccentrically Loaded High Strength Concrete Columns," ACI Structural Journal, V. 94, No. 3, May-June 1997, PP 295-303.
5. Hisham H H. Ibrahim, James G MacGregor, "Tests of Eccentrically Loaded High Strength Concrete Columns," ACI Structural Journal, V. 93, No.5, September- October 1996.
6. Razvi, S. R., and Saatcioglu, M., "Strength and Deformability of Confined High Strength Concrete Columns," ACI Structural Journal, Vol. 91, 1994, pp. 678-687.
7. Natalie Anne Lloyd, and B. Vijaya Rangan, "Studies on High Strength Concrete Columns under Eccentric Compression," ACI Structural Journal, V 93, No. 6, November-December 1996, pp. 631-638.
8. Sofia M. C. Diniz, and Dan M. Frangopol, "Strength, Ductility, and Reliability of High Strength Concrete Columns," High Strength Concrete, Proceeding of First International Conference, Hawaii, July 13-18, 1997, pp. 187-200.
9. Christina Claesson, and Kent Gylltoft, "Slender High Strength Concrete Columns Subjected to Eccentric Loading," Journal of Structural Engineering, March 1998, 233-240.
10. 김인식, "편심하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 역학적 특성", 시험인천대학교 석사학위 논문, 2000, 5
11. 이리형, 윤승조, 김성수, 이용택, "편심하중을 받는 고강도 콘크리트 기둥의 거동에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 11권 5호, 1995, 5., pp. 133-142.
12. 이영인, 박노현, 이영호, 은희창, 정현수, "띠철근 배근형태에 따른 고강도 철근콘크리트 기둥의 거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 10권 2호, 1998, pp. 565-570.