

고강도 콘크리트 기둥의 2계 거동에 관한 실험적 연구

Experiments on Second-Order Behavior
of High Strength Concrete Columns

김진근*
Kim, Jin Keun

양주경**
Yang, Joo Kyoung

ABSTRACT

To analyze the effects of compressive strength of concrete and longitudinal steel ratio on second-order moment of columns, 30 tied reinforced concrete columns with hinged ends were tested. The 80mm square cross section was used and the amount of eccentricity was 24mm. The compressive strengths of column specimens with slenderness ratios of 10, 60 and 100 were 250, 648 and 880kg/cm², and the longitudinal steel ratios were 1.98%(4-D6) and 3.95%(8-D6).

The ratio of ultimate load capacity to that of short column with the same eccentricity(P_u/P_n) was much decreased at high slenderness ratio with increasing the compressive strength of concrete. And the lateral displacement of slender column at the ultimate load was decreased as the strength was increased. These are due to that at high slenderness ratio, the load capacity and behavior of column are affected by flexural rigidity. And, it was also found that with increasing steel ratio, the value of P_u/P_n and the lateral displacement at the ultimate load were larger for the same slenderness ratio.

1. 서론

근래에 들어, 각종 특수, 대형 구조물의 출현으로 인하여 건설재료의 고강도화에 대한 요구가 증가되고 있다. 최근에는 1000kg/cm² 이상의 강도를 가진 고강도 콘크리트가 고층건물(1)과 프리스트레스트 부재 등에 사용되면서, 기둥 부재에 대한 연구의 필요성이 새삼 부각되고 있는 실정이다.

철근콘크리트 기둥에 대한 연구는 1931년 ACI 분과위원회에서 564개의 기둥부재에 대한 실험 결과(2)를 발표한 이래 많은 연구가 이루어져 왔으나(3-10) 대부분 단주의 보통강도 콘크리트에 한정되어왔다. 특히 세장한 고강도 콘크리트 기둥에 관한 실험은 거의 전무한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 세장비에 따른 콘크리트의 압축강도와 주철근비가 기둥의 2차모멘트에 미치는 영향을 파악하기 위하여 32개의 기둥을 시험, 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험변수

세장비의 변화에 따른 콘크리트의 압축강도와 주철근비가 기둥의 2차모멘트에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 표 1에 나타난 바와 같이 콘크리트의 압축강도를 250, 648, 880kg/cm²로 하고, 주철근비를 1.98%(4-D6), 3.95%(8-D6)로 하였으며, 기둥의 세장비는 10, 60, 100으로 하였다. 또한 편심량은 단면의 0.3배로 고정하였다.

2.2 실험재료 및 시험체 제작

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 조립율이 2.89인 금강 유역의 대평리산 강모래를 사용하였고, 굵은골재는 조립율 6.08, 최대크기 13mm인 곡성산 화강암 채석을 사용하였다. 고강도 콘크리트의 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 Type F의 규격을 만족시키는 고성능감수제를 사용하였다. 각 압축강도에 해당하는 배합은 표 2와 같다.

* 정희원, KAIST 토목공학과 부교수, 공학박사

** 정희원, KAIST 토목공학과 박사과정

표 1. 실험변수 및 최대하중

압축강도 (kg/cm ²)	세장비	철근비 (%)	최대하중 (ton)	
250	10	1.98	5.38	
			8.48	
		3.95	11.17	
			11.15	
	60	1.98	6.50	
			6.70	
		100	1.98	3.90
				3.80
3.95	5.0			
	4.8			
648	10	1.98	18.27	
			18.65	
		3.95	21.19	
			20.88	
	60	1.98	10.49	
			11.58	
		100	1.98	4.61
				4.86
	3.95		6.08	
			6.17	
	880	10	1.98	24.01
				24.53
3.95			26.1	
			26.3	
60		1.98	12.46	
			12.62	
		100	1.98	5.54
				5.60
3.95			6.8	
			6.6	

표 2. 배합비 및 압축강도

시멘트	단 위 중 량 (kg/m ³)				고성능 감수제 (%)	슬럼프 (cm)	압축강도 (kg/cm ²)
	물	잔골재	굵은골재	실리카흄			
290	232	764.3	934.25	0.0	0.0	15.0	250
520	182	627.5	1023.5	0.0	1.5	23.4	648
442	156	632.8	1032.25	78.0	2.0	7.2	880

시험체는 타설 후 비닐로 덮어 수분의 증발을 방지하고, 24시간이 지난 후에 탈형하여 양생실(온도 23±° C, 습도 99%)에서 습윤양생을 실시하였다. 시험체의 단면은 80×80mm로 하였으며, 주철근은 표 3과 같은 성질을 가진 D6을 사용하였고, 띠철근은 지름이 3mm인 철사를 사용하였다. 띠철근의 간격은 중앙에서는 60mm로, 단부 부근에서는 30mm로 하였으며, 단부는 지름이 1mm인 철사를 사용하여 보강하였다. 또한 콘크리트의 피복두께는 철근의 중심으로부터 15mm로 하였다.

표 3. 철근의 성질

탄성계수 (kg/cm ²)	항복응력도 (kg/cm ²)	항복변형도 (×10 ⁻⁶)	최대응력도 (kg/cm ²)
2.02×10 ⁶	3950	2150	5140

2.3 가력장치 및 재하방법

세장비가 10, 60인 기둥은 250ton 용량의 Closed-Loop Servo-Hydraulic Dynamic Material Testing System(INSTRON 8506)을 사용하여 실험하였으며, 세장비 100인 기둥은 INSTRON 8506 높이의 제한때문에 가력 프레임에 유압잭을 설치하여 가력하였다.

일정한 편심량을 주기 위하여 중심으로부터 편심 거리에 흄이 파여있는 철판을 제작한 후, 시험편 단부에 부착하여 knife-edge를 통해 편심 하중을 가하였다. 하중가력은 INSTRON 8506을 사용하는 경우에는 변위제어를 하였으며, 최대하중에 이르는 시간이 약 20분이 되도록 하였다. 유압잭을 사용하는 경우에는 하중제어를 하였으며, 하중중분은 예상극한하중의 약 45%까지는 예상극한하중의 15%, 75%까지는 10%, 그 이후에는 5%로 하였다.

각 하중단계마다 기둥 중앙부에서의 횡방향 처짐, 콘크리트의 변형도, 철근의 변형도를 측정

하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴양상 및 최대하중

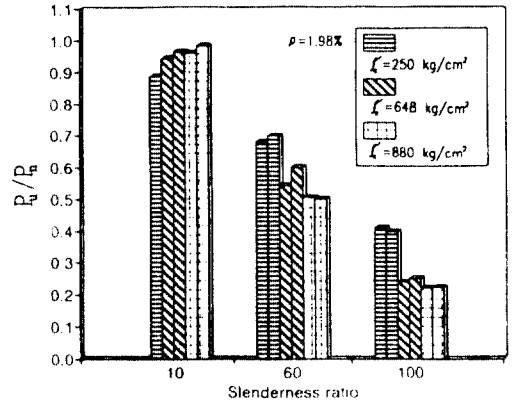
표 1에 각 시편의 최대하중이 나타나 있으며, 같은 압축강도를 사용한 기둥에서 세장비가 증가될수록 최대하중이 작아지며, 같은 세장비에 서는 콘크리트의 압축강도와 주철근비가 증가될수록 최대하중이 커짐을 알 수 있다.

세장비가 60 이상인 거의 모든 시편의 경우 초기하중 단계에서는 시편의 양단을 제외한 내부에서 균열이 분포를 하다가 하중이 점차 증가됨에 따라 시편의 중앙부분 이외의 균열은 더 이상 진전하지 않고 중앙부분의 균열이 계속적으로 진전되어 나가 결국 파괴에 이르렀다. 그러나 세장비 10인 시편의 일부는 최대하중 이전에 균열이 중앙부분에서 집중되지 않고 단부에서 집중되어 파괴에 이르는 경우도 발생하였다. 또한 콘크리트의 강도가 증가할수록 최대하중 이후의 하중값이 급격히 감소하는 현상이 두드러지게 나타났다.

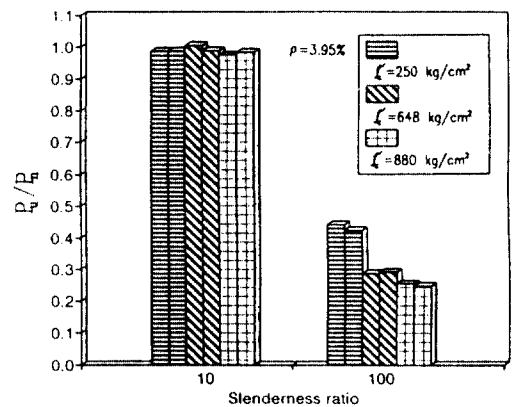
3.2 콘크리트의 압축강도의 영향

3.2.1 최대하중

그림 1은 콘크리트의 압축강도 변화에 따른 P_u/P_n 값의 변화를 나타내고 있다. 여기서 P_n 은 편심량 24mm일 때 단주가 저항할 수 있는 최대하중으로 해석적으로 구하였으며, P_u 는 같은 편심량에서 주어진 기둥의 최대하중을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 세장비가 10인 경우에는 콘크리트의 압축강도에 관계없이 P_u/P_n 값이 거의 차이를 보이지 않으나 세장비가 증가함에 따라 P_u/P_n 값이 콘크리트의 압축강도에 따라 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 그림 1의 (a)는 철근비가 1.98%인 경우이고, 그림 1의 (b)는 철근비가 3.95%인 경우이나 이러한 경향은 기둥의 철근비에 관계없이 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 그림 1의 (a)에서 세장비 10, $f_c' = 250\text{kg/cm}^2$ 인 경우의 P_u/P_n 값이 작은 이유는 이 시편이 최대하중에 이르기 전에 단부에서 파괴가 발생되었기 때문이다. 그림 1에서 알 수 있는 것은 단부에 고강도 콘크리트를 사용하면 단면의 크기를 크게 감소시킬 있을 것이나 장주에서는 그와 같은 큰 효과를 볼 수 없다는 것이다.



(a)



(b)

그림 1. 압축강도에 따른 최대하중의 변화

이와 같이 기둥의 세장비가 큰 경우 강도수준의 증가에 따라 P_u/P_n 값이 감소하는 이유는 세장비가 작은 기둥에 비하여 세장비가 큰 기둥이 2차모멘트의 영향을 크게 받기 때문이다. 즉 2차모멘트의 영향이 커지게 되면 장주의 극한하중은 휨강성에 의해 지배된다. 그런데, 고강도 콘크리트를 사용하더라도 저강도 콘크리트 기둥과 같은 단면을 사용하면 콘크리트의 탄성계수는 약간 증진되는 반면, 단면의 성질인 단면2차모멘트가 같은 값을 가지므로 단면의 휨강성은 크게 증가되지 않는다.

3.2.2 횡방향 변위

그림 2는 압축강도에 따른 각 세장비에서의

축력과 기둥 중앙에서의 횡방향 변위관계를 나타낸 그림으로, 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 축력-횡방향 변위 관계의 초기강성이 증가함을 알 수 있다. 압축강도가 증가함에 따라 세장비가 작은 경우에는 최대하중에 대응하는 횡방향 변위가 약간 증가되나, 세장비가 큰 경우에는 최대하중에 대응하는 횡방향 변위가 감소함을 알 수 있다. 이와 같이 세장비가 큰 경우, 압축강도가 증가함에 따라 최대하중에 대응하는 횡방향 변위가 감소되는 현상은 압축강도가 커지면 기둥의 초기강성이 커지고 따라서 하중 초기단계에서는 횡방향 변위의 증가가 적다가 점차 2차모멘트의 영향이 커지면서 횡방향 변위가 갑자기 증가되어 축력이 급격히 감소되기 때문이다.

3.95% 인 경우의 P_u/P_n 값이 1.98%인 경우보다 모든 세장비에서 크게 나타남을 알 수 있다. 세장비가 작은 경우, 콘크리트 압축부는 변형연화영역에 접어들어 그 이후에는 철근이 대부분의 하중을 지지하게 된다. 그리고 계속 변형도가 증가되어 결국 철근이 항복하게 되면 하중이 감소되는데, 철근비가 큰 기둥일수록 이러한 콘크리트 압축부의 변형연화 이후의 하중 증가가 크다. 따라서 철근비가 클수록 P_u/P_n 값은 커지게 된다. 또한 세장한 기둥은 2차모멘트의 영향을 크게 받게 되므로 철근비가 작으면 단면2차모멘트가 작아 휨강성이 감소되어 작은 극한하중에서 파괴되게 된다.

3.3 주철근비의 영향

3.3.1 최대하중

그림 3은 주철근비에 따른 P_u/P_n 값의 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 철근비가

3.3.2 횡방향 변위

그림 4는 주철근비에 따른 각 세장비에서의 축력-횡방향 변위 관계를 나타낸 그림이다. 모든 세장비에서 주철근비가 증가함에 따라 최대하중에 대응하는 횡방향 변위가 증가함을 알 수 있다. 이와같이 주철근비가 증가함에 따라 최대하

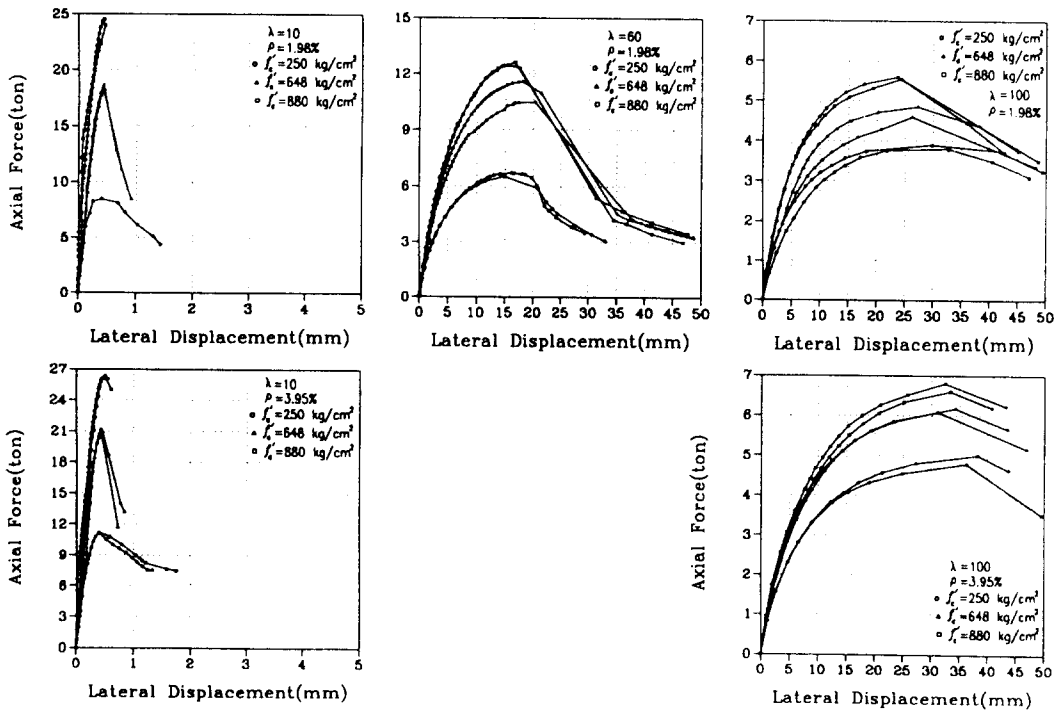


그림 2. 압축강도에 따른 횡방향 변위

중에 대응하는 횡방향 변위가 증가되는 이유는 철근비가 커지면 기둥의 축강성 뿐만 아니라 휨강성이 증대되기 때문이다.

4. 결 론

기둥의 2차모멘트에 영향을 미치는 인자인 콘크리트의 압축강도와 주철근비를 변수로 하여 실험을 실시하여, 실험결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 세장비가 작은 경우에는 콘크리트의 압축강도에 관계없이 P_u/P_n 값은 거의 차이를 보이지 않는다. 그러나 세장비가 큰 경우의 기둥은 2차모멘트의 영향을 크게 받고 따라서 기둥의 거동은 휨강성에 의해 지배되므로 고강도 콘크리트 기둥의 P_u/P_n 값은 크게 감소한다. 따라서 고강도 콘크리트를 단주에 사용하면 작은 단면으로도 저강도 콘크리트 기둥의 극한하중을 얻을 수 있으나, 장주에 사용하면 단주에서 얻을 수 있는 만큼의 단면감소 효과를 얻을 수 없다.
- (2) 세장비가 작은 경우에는 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 최대하중에 대응하는 횡방향 변위가 약간 증가되나, 세장비가 커지면 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 최대하중에

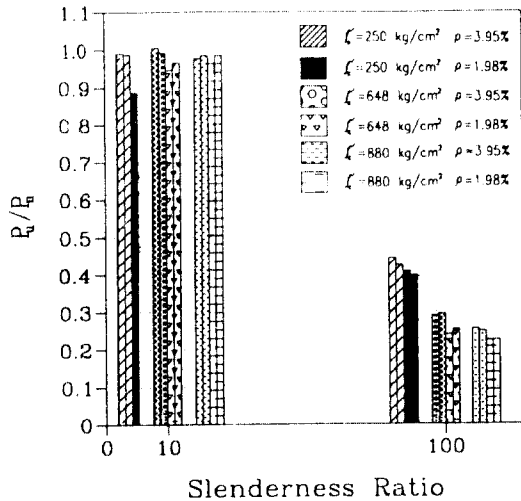


그림 3. 주철근비에 따른 최대하중의 변화

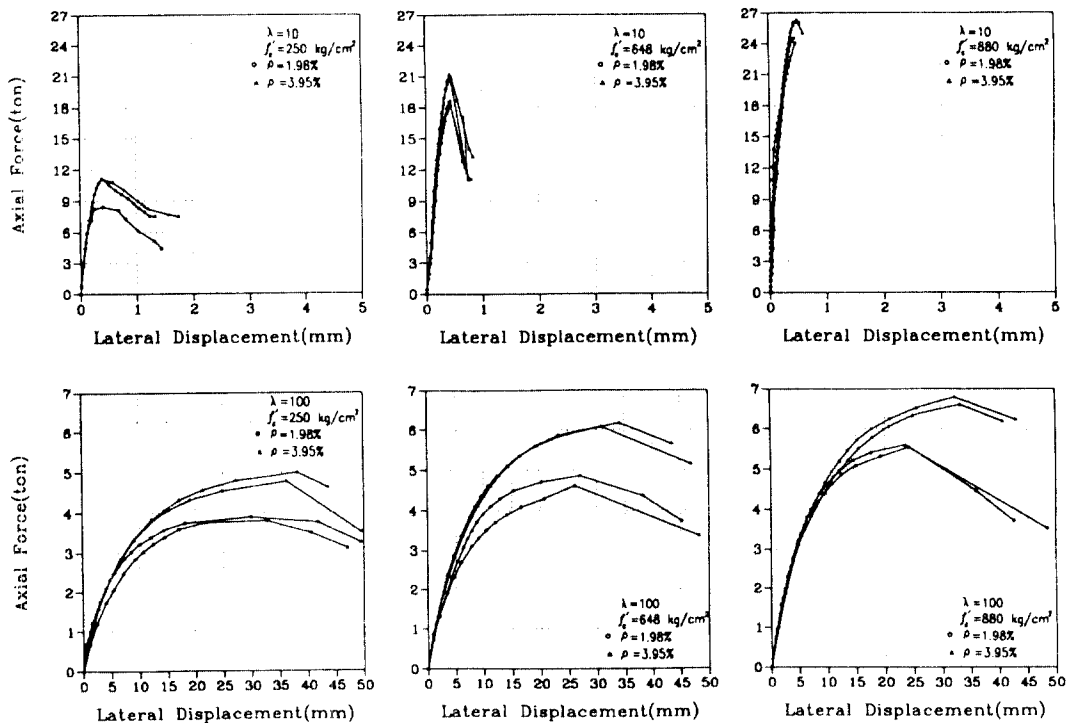


그림 4. 주철근비에 따른 횡방향 변위

대응하는 횡방향 변위가 감소한다.

- (3) 철근비가 클수록 기둥의 세장비에 관계없이 P_u/P_n 값은 증가한다.
- (4) 모든 세장비에서 주철근비가 증가되면 최대 하중에 대응하는 횡방향 변위는 증가한다.

감사의 글

본 연구는 1991년 과학재단 목적기초 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Ramdall, V.R., Foot, K.B., "High-Strength Concrete for Pacific First Center," Concrete International, Apr., 1989, pp. 14-16.
2. Committee 105, "Reinforced Concrete Column Investigation," ACI Journal, Proceeding, Vol. 27, 1931, pp.675-676.
3. Pfrang, E. O., and Siess, C. P. "Behavior of Restrained Concrete Columns," J. of ASCE, Proceedings, Vol. 90, No. ST5, Oct., 1964, pp.113-135
4. Furlong, R. W., and Ferguson, P. M., "Tests of Frames with Columns in Single Curvature," Symposium on Reinforced Concrete Columns, SP-13, ACI, Detroit, 1966, pp.55-74.
5. Breen, J. E., and Ferguson, P. M., "The Restrained Long Concrete Column as a Part of a Rectangular Frame," ACI Journal, Proceedings Vol. 61, No. 5, May, 1964, pp.563-587.
6. Martin, I., and Olivieri, E., "Tests of Slender Reinforced Concrete Columns Bent in Double Curvature," Symposium on Reinforced Concrete Columns, SP-13, ACI, Detroit, 1966, pp.121-138.
7. Aroni, S., "Slender Prestressed Concrete Columns," J. of ASCE, Proceedings, Vol. 94. No. ST4, Apr., 1968, pp.875-904.
8. Saenz, L., and Martin, I., "Tests of Reinforced Concrete Columns with High Slenderness Ratios," ACI Journal, Proceedings, Vol. 60, No. 5, May, 1963, pp.589-616.
9. Chang, W. F., and Fergusson, P. M., "Long Hinged Reinforced Concrete Columns," ACI Journal, Proceedings, Vol. 60, No. 1, Jan., 1963, pp.1-26.
10. Hognestad, E., "A Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members," Bulletin No. 339, Univ. of Illinois, Engineering Experiment Station, Urbana, Nov., 1951, 128 pp.