

철근콘크리트 기둥의 좌굴거동에 관한 실험적 연구

Experiments for the Buckling Behavior of Reinforced Concrete Columns

조 성 찬* 장 정 수** 김 진 근*** 김 윤 용**** 김 광 석*****
Cho, Seong Chan Jang, Jeong Soo Kim, Jin Keun Kim, Yun Yong Kim, Kwang Suk

ABSTRACT

To analyze the effects of compressive strength of concrete and longitudinal steel ratio on buckling behavior of columns, 36 tied reinforced concrete columns with hinged ends were tested. The 100mm square cross section was used and the amount of eccentricity was 10mm. The compressive strengths of column specimens with slenderness ratios of 15, 30 and 50 were 202, 513 and 752 kg/cm². The longitudinal steel ratio of columns with bending about a section diagonal and about a principal axis were 2.85%(4-D10).

The ratio of ultimate load capacity to that of short column with the same eccentricity 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 for the same quantity of confining steel and level of axis load, there is little difference between the flexural strength for bending about a section diagonal and for bending about principal axis.

1. 서 론

철근콘크리트 기둥은 1931년 ACI 분과위원회에서 564개의 기둥에 대한 실험 결과⁽¹⁾를 발표한 이래 많은 연구가 이루어져 왔다⁽²⁻⁵⁾. 그러나 단주의 보통강도 콘크리트와 1축압축에 한하여 연구가 대부분을 이루고 있다. 한편, 실제 구조물에서 1축의 압축을 받는 부재보다는 2축압축을 받는 부재가 많다. 이러한 2축힘은 외축기둥에서 흔히 발생하며 일반적으로 근사적인 방법을 사용하여 2축힘의 거동을 1축힘강도와 관련시켜 해석한다⁽⁶⁾.

ACI 318-89 규준에서 2축힘을 받는 단주의 설계법으로서 하중궤적법을 제안하고 있다. 그러나 장주의 설계는 특별한 규준을 정하지 않고 있으며 1축힘을 받는 경우에 준하여 설계하도록 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 세장비, 콘크리트의 압축강도 및 주축과 중립축의 각도(0°, 45°) 등이 철근콘크리트 기둥의 좌굴거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 축력-모멘트 상관도

1축힘에 대한 축력-모멘트 상관도는 축력과 휨모멘트가 1개의 주축에 대하여 가하였을 때, 주축에 대한 축력-모멘트 관계를 나타낸다. 2축힘을 받는 기둥은 그림 1⁽⁸⁾과 같이 나타낼 수 있다. 주축과 중립축의 각도가 변함에

* 조선대학교 건축공학과 박사과정
** 조선대학교 건축공학과 교수
*** 한국과학기술원 토목공학과 부교수
**** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
***** 조선대학교 건축공학과 석사과정

따라 방사상으로 축력-모멘트 곡선이 변하여 3차원 곡선으로 표현할 수 있다.

그림 2는 주축과 중립축의 각도가 0° 및 45° 인 경우를 같은 평면에 도시한 것으로서 응력-변형도 곡선을 ACI 기준의 등가응력 직사각형으로 가정하여 강도감소계수를 1.0으로 취하였다. 실선을 주축방향으로 휨모멘트가 가하여진 경우이고 점선은 주축과 중립축의 각도가 45° 인 경우의 축력-모멘트 곡선이다.

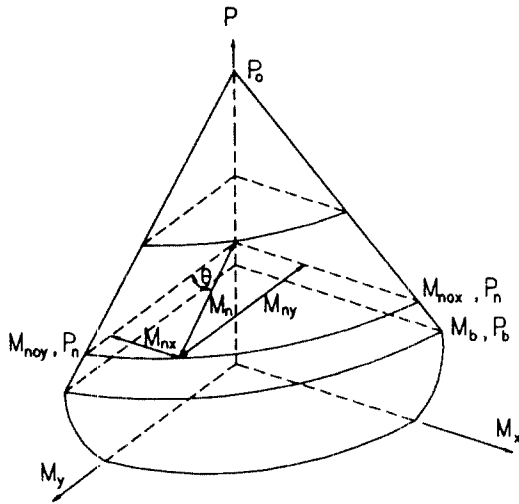


그림 1 2축압축에서의 축력-모멘트 곡선

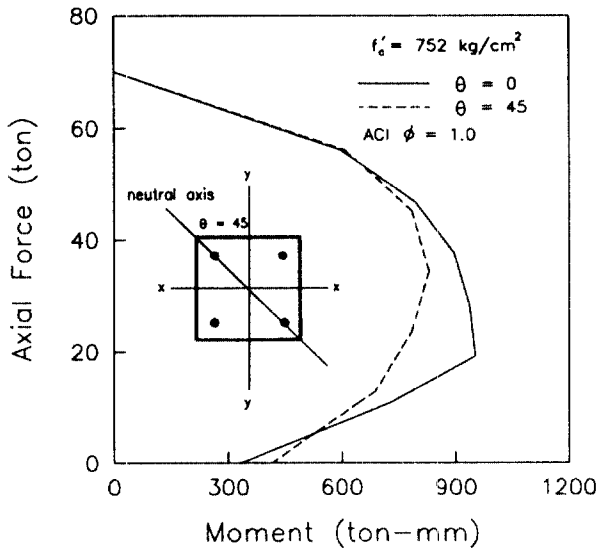


그림 2 주축과 중립축의 각도에 따른 축력-모멘트 곡선 (0° , 45°)

3. 실험

3.1 실험변수

세장비, 콘크리트의 압축강도, 주축과 중립축의 각도 등이 철근콘크리트 기둥의 좌굴 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 표 1에 나타난 바와 같이 콘크리트의 압축강도를 202, 513, 752 kg/cm^2 으로 하고, 주축과 중립축의 각도를 각각 0° 및 45° 으로 나누었다. 한편, 기둥의 세장비는 15, 30, 50이며 편심량은 1 cm로 고정하였다.

3.2 실험재료 및 시험체 제작

시멘트는 S사 제품의 제1종 포틀랜드 시멘트이며 고강도 콘크리트의 효과적인 강도 발현을 위하여 잔골재로서 조립율이 2.89인 금강 유역의 대평리산 강모래를 사용하였다.

표 1. 실험변수 및 실험결과

압축강도 (kg/cm^2)	세장비	주축-중립축 각도	최대하중 (ton)
201.54	15	0°	20.18
		45°	21.95
	30	0°	19.42
		45°	20.39
	50	0°	18.05
		45°	16.29
513.24	15	0°	47.74
		45°	45.38
	30	0°	41.69
		45°	35.50
	50	0°	32.35
		45°	34.13
751.84	15	0°	54.79
		45°	56.50
	30	0°	53.01
		45°	51.82
	50	0°	41.81
		45°	41.48

굵은골재로는 최대치수가 13mm인 쇄석을 사용하였고 적절한 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 type F의 규격을 만족하는 고성능감수제를 혼화제로 사용하였다. 또한 고강도 콘크리트를 제조할 시에는 혼화제로서 실리카흙을 사용하였으며 사용된 제품은 노르웨이산 Elkem Microsilica 분말제품이다. 한편, 시험체의 기호를 저장도(LS), 중간강도(MS), 고강도(HS)로 나누어 표 2과 같이 배합하였다.

표 2. 배합비 및 압축강도

시험체 기호	단위중량(kg/m ³)					SP제 (%)	슬럼프 (cm)
	C	W	S	A	S·F		
LS	290	232	764	934	0.0	0.0	17.9
MS	480	178	676	1014	0.0	0.6	7.2
HS	495	165	609	1037	55	1.3	10.2

표 3. 철근의 역학적 성질

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

3.3 실험방법

기둥에 축력을 가하기 위하여 250톤 용량의 Closed-Loop Servo-Hydraulic Dynamic Material Testing System (INSTRON 8506)을 사용하였고, 일정한 편심량을 주기 위하여 중심으로부터 편심 거리에 흙이 파여있는 철판을 제작하였다. 제작된 철판은 시험편 단부에 볼트를 사용하여 부착하고 knife-edge를 통하여 편심하중을 가하였다[(그림 3)참조]. 이 때, 볼트에 맞는 너트는 콘크리트 타설 전에 시험편 단부의 정확한 위치에 고정한 후, 콘크리트를 타설하여 시험편 단부의 콘크리트 속에 매립하였다. 시험체의 가력은 INSTRON 8506을 사용하여 변위제어로 이루어졌으며, 최대하중

에 이르는 시간이 약 10분이 되도록 하였다. 한편, 기둥 중앙부에서의 횡변위는 LVDT를, 콘크리트 및 철근의 변형도는 포일게이지를 사용하여 각각 측정하였다.

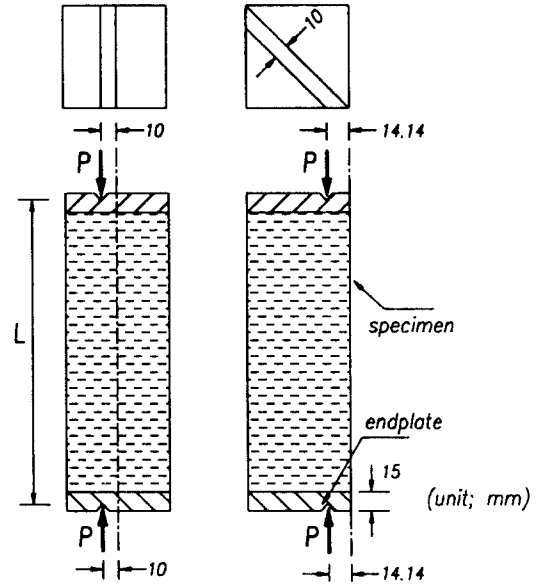


그림 3. 시험체의 가력방법

4. 실험결과 및 분석

4.1 일반적 파괴양상 및 최대하중의 비교

대부분 기둥의 중앙에서 파괴가 발생되었으나 세장비가 15인 기둥은 시험체의 일부가 단부에서 약 1/3 지점에서 파괴되었다. 세장비가 30과 50인 기둥에서는 초기 하중단계에서는 시편의 양단을 제외한 내부에서 균열이 거의 같은 간격으로 분포를 하다가 하중이 점차 증가됨에 따라 기둥의 중앙 부분 이외의 균열은 더 이상 진전되지 않고 중앙 부분의 균열이 계속적으로 진전되어 결국 파괴에 이르렀다. 또한 콘크리트의 강도수준이 높아질수록 최대하중 이후의 하중값이 급격히 감소되는 현상이 두드러지게 나타났고 주축과 중립축의 각도에 따라서는 좌굴거동이 큰 차이를 보이지 않았다. 표 1에 나타난 바와 같이 세장비가 큰 경우, 강도수준의 증가에 비하여 기둥의 극

한강도는 크게 증가하지 않음을 알 수 있으며 이는 장주의 극한강도는 주로 부재의 휨강성에 의해 좌우되기 때문이다. 한편, 그림 4에서 보는 바와 같이 기둥의 극한강도비(P_u/P_n)는 휨이 주축방향으로 가해지는 경우와 주축의 45° 방향으로 가해지는 경우가 별다른 차이를 보이지 않고 있다. 따라서 고강도 콘크리트를 단주에 사용하면 큰 단면의 감소를 가져올 수 있으나 장주에서는 단주에서와 같은 단면 감소효과를 볼 수 없으며 이는 주축과 중립축의 각도가 45°인 경우에도 동일하다.

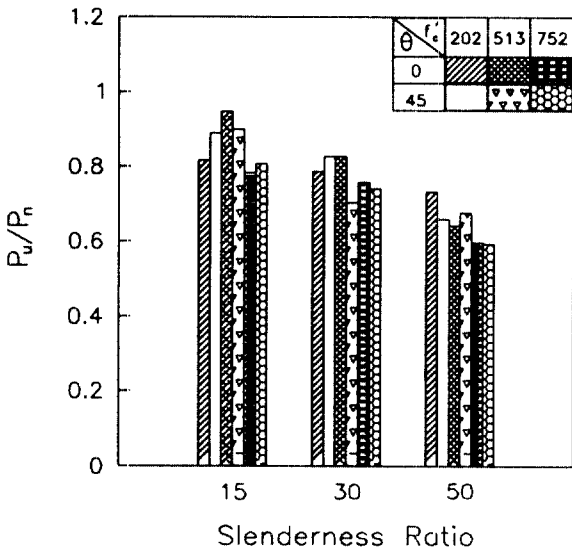


그림 4. 세장비에 따른 최대축력

4.2 축력-횡변위 관계

그림 5는 각 세장비 및 주축과 중립축의 각도에서 콘크리트의 강도에 따른 축력과 기둥 중앙에서의 횡변위 관계를 나타낸 것이다. 콘크리트의 강도가 커질수록 축력-횡변위 관계의 초기강성은 증가되며, 기둥의 극한강도 이후의 축력의 값은 더욱 급격하게 감소됨을 알 수 있다. 한편, 주축의 45° 방향에서 휨이 가해지는 경우도 일반적인 경향을 따른다.

4.3 축력-모멘트 관계

그림 6은 응력-변형도 곡선을 ACI 규준의 등가응력 직사각형으로 가정하여 강도감소계

수를 1.0으로 취한 축력-모멘트 상관곡선과 실험결과를 비교한 그림이다. 세장비가 15인 경우는 단주로서 축력-모멘트 곡선에 도달하기까지의 거동이 선형인 반면 세장비가 30, 50인 경우는 상당한 비선형 거동을 나타내고 있다. 즉 장주의 2차모멘트 효과를 보여준다. 또한 콘크리트의 강도수준이 증가할수록 축력-모멘트 거동의 기울기가 낮아지는 경향이 나타나는데 이를 통하여 콘크리트의 강도가 증가할수록 좌굴파괴 가능성이 커짐을 알 수 있다.

저강도 및 중간강도의 콘크리트 기둥은 축력-모멘트 곡선을 넘어 파괴가 일어났는데 이는 콘크리트의 응력-변형도 곡선을 등가응력 직사각형으로 가정하여 축력-모멘트 곡선을 도시한 이유에서 발생한 오차로 판단된다. 한편, 축력-모멘트 관계에 있어서도 휨이 주축방향으로 가해지는 경우와 주축의 45° 방향으로 가해지는 경우의 거동이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

5. 결 론

세장비, 콘크리트의 압축강도, 주축과 중립축의 각도 등이 철근콘크리트 기둥의 좌굴 거동에 미치는 영향에 관한 실험을 수행하여 실험결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단주(세장비=15)의 경우 콘크리트의 강도수준에 상관없이 P_u/P_n 값은 거의 차이를 보이지 않는다. 그러나 장주(세장비=30, 50)의 경우, 기둥은 2차모멘트의 영향을 받게 되어 휨강성에 지배되는 거동을 보이게 된다. 따라서 고강도 콘크리트 기둥의 세장비가 증가할수록 P_u/P_n 값이 급격히 감소한다.
- (2) 주축과 중립축의 각도가 45° 인 경우 주축방향으로 휨이 작용하는 경우와 유사한 경향이 나타나고 거의 동일한 극한휨강도를 갖는다.
- (3) 콘크리트의 강도수준이 증가할수록 기둥의 극한강도 이후의 축력의 값은 더욱 급격

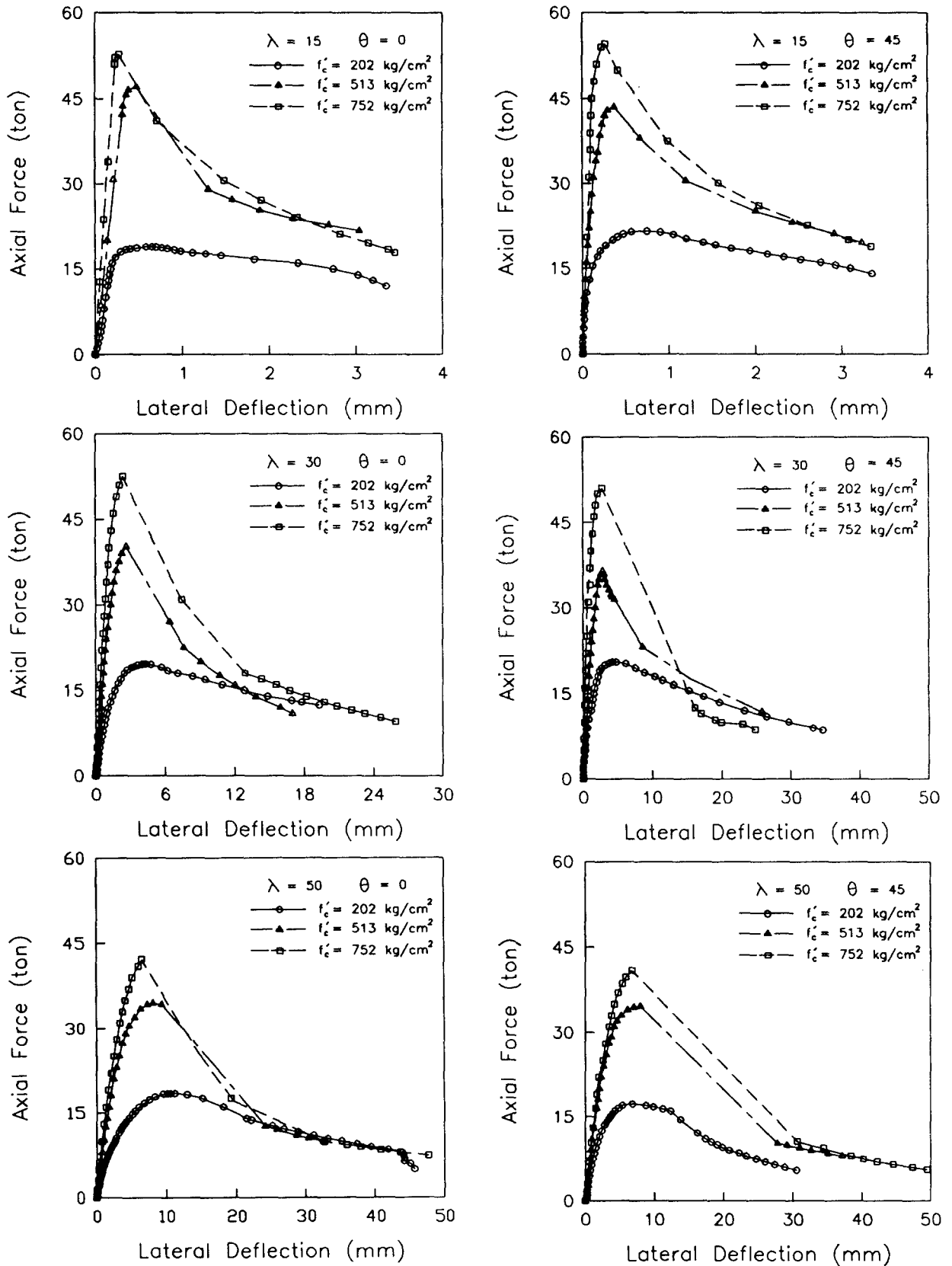


그림 5. 축력-횡처짐 관계

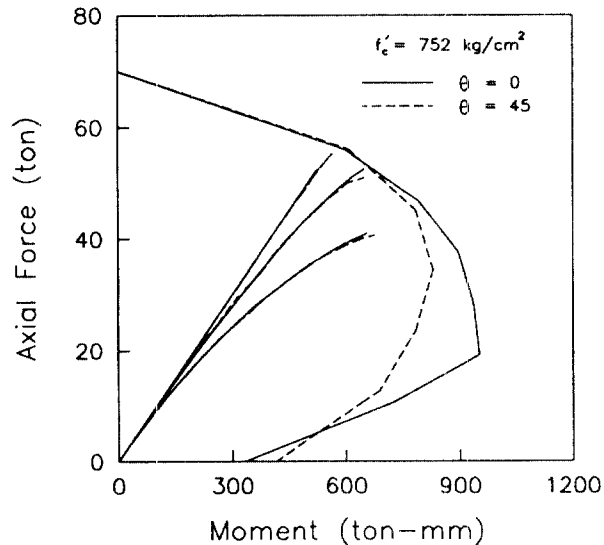
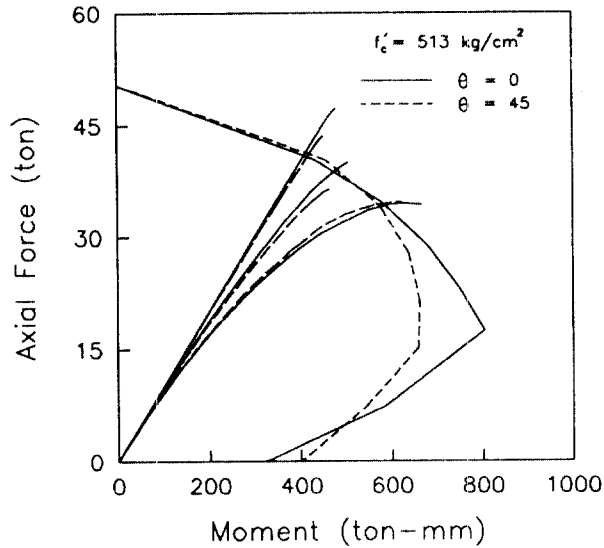
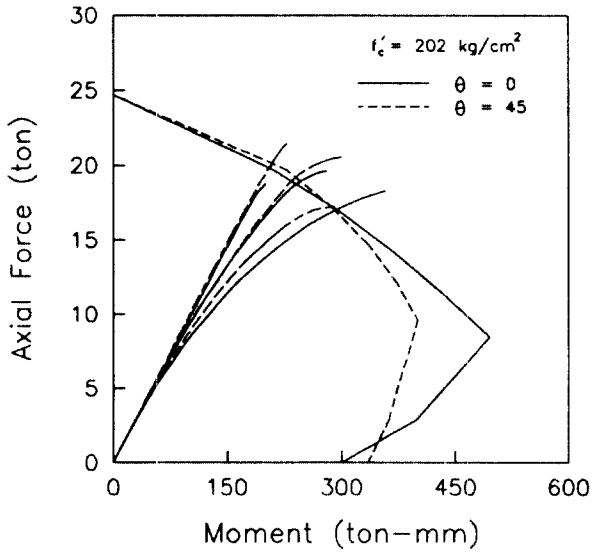


그림 6. 축력-모멘트 관계

하게 감소되며, 주축의 45° 방향에서 힘이 가해지는경우도 동일한 경향을 따른다.

- (4) 장주에서 콘크리트의 강도수준이 증가하더라도 최대축력시의 모멘트는 크게 증가하지 않는다. 한편, 축력-모멘트 곡선의 거동은 주축과 중립축의 각도(0°, 45°)에 상관없이 유사하다.

참고문헌

1. Committee 105, "Reinforced Concrete Column Investigation," ACI Journal, Proceeding, Vol. 27, 1931, pp.675-676.
2. 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
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Bresler, B., "Design Criteria for Reinforced Concrete Columns Under Axial Loads and Biaxial Bending," Journal of ACI, Vol. 57, November, 1960, pp.481-490.
7. 김진근, 양주경, "2축 힘을 받는 구형기둥의 축력-모멘트 상관곡선," 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol. 5, No. 1, 1993, pp.113-118.