

2축 힘과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Behavior of Reinforced Concrete Columns Subjected to Axial Force and Biaxial Bending



김진근*

Kim, Jin-Keun



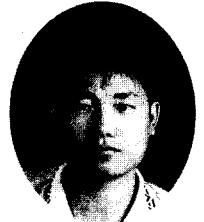
이상순**

Lee, Sang-Soon



이수곤***

Lee, Soo-Gon



김선영****

Kim, Sun-Young

ABSTRACT

When stress is beyond elastic limit or cracks occur in a reinforced concrete member subjected to axial force and biaxial bending, curvature about each principal axis of uncracked section is influenced by axial force and bending moments about both major and minor principal axes. It is mainly due to the translation and rotation of principal axes of the cross section after cracking. Recently, by considering these effects, a numerical method predicting the behavior of concrete columns subjected to axial force and biaxial bending was proposed.

In this study, in order to verify the proposed numerical method and investigate the effects of cracking on the behavior of reinforced concrete columns, a series of tests were carried out for 16 tied reinforced concrete columns with 100×100 mm square and 200×100 mm rectangular sections under various loading conditions. The angle between the direction of eccentricity and the major principal axis of uncracked section were $0, 30, 45^\circ$ for the square section and $0, 30, 45, 60, 90^\circ$ for the rectangular section, respectively.

A comparison between numerical predictions and test results shows good agreements in ultimate loads, axial force-lateral deflection relations, and lateral deflection trajectories. It is also found, in this limited investigation, that the ACI's moment magnifier method is conservative in both uniaxial and biaxial loading conditions.

Keywords : reinforced concrete column, biaxial bending, crack.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원, 한국도로공사 콘크리트 구조연구실

*** 정회원, 전남대학교 건축공학과 교수

**** 정회원, 전남대학교 건축공학과 박사과정

·본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로
보내 주시면 2000년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트 기둥의 비선형해석에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으나,⁽¹⁻³⁾ 주로 1축 휨과 축력을 받는 경우가 대부분이었다. 몇몇 연구자들에 의하여 2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥에 대한 연구가 수행되었으나^(4,5), 대부분 단면해석이나 단주의 극한강도의 예측에 국한되었다.

철근콘크리트 부재는 비선형적인 거동을 보이는 재료로 구성되어 있으며, 콘크리트는 인장강도가 낮아 사용하중에 의해서도 균열이 발생할 수 있기 때문에 그 거동이 매우 복잡하다. 만약 철근콘크리트 부재에서 단면내의 응력이 탄성한계를 초과하거나 균열이 발생하면, 비균열단면의 도심에 작용하는 축력이 곡률을 유발할 수 있으며 휨모멘트도 단면도심의 변형률에 영향을 준다. 따라서 재료의 압축거동과 인장거동이 동일하다고 가정하여 유도된 기존의 강성행렬은 철근콘크리트 부재의 비선형해석에 있어서 더 이상 적당하지 못하다. Bazant 등⁽³⁾은 이러한 축력과 휨모멘트간의 상호연관성(interaction)을 고려한 해석방법을 제안하였다. 그러나 Bazant 등은 단지 1축 휨과 축력을 동시에 받는 경우에 한정하여 강성행렬을 유도하였다. 만약 2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 부재에서 응력이 탄성한계를 넘어서거나 균열이 발생한다면, 비균열단면의 각 주축(principal axis)에 대한 곡률은 그 축에 작용하는 휨모멘트뿐만 아니라, 그 축에 수직인 휨모멘트에도 영향을 받는다.

최근에 김진근 등⁽⁶⁾은 축력과 휨모멘트의 상호연관성 뿐만 아니라 이러한 휨모멘트간의 상호연관성을 고려한 해석기법을 제안하였으며, 이를 2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 거동해석에 적용하였다. 그러나, 제안된 방법을 검증하기 위하여 선택된 기둥은 정사각형 단면에 한정하였으며, 가해진 축력도 단면의 핵(kern)에 작용하는 경우였다. 따라서 제안된 해석기법에 대한 충분한 검토가 이루어지지 못하였다. 그리고 지금까지 철근콘크리트 기둥에 대한

많은 실험적인 연구가 수행되었으나^(1,7,8), 대부분 1축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우이거나 2축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에도 정사각형 단면에 국한되었다.

이 연구에서는 2축 휨과 축력을 동시에 받는 정사각형 및 직사각형 단면의 띠철근 기둥에 대한 실험을 수행하고, 실험결과를 제안된 방법⁽⁶⁾에 의한 해석결과 및 ACI 모멘트 확대계수법⁽⁹⁾을 사용하여 추정된 결과와 비교·검토하였다.

2. 철근콘크리트 기둥부재에 대한 실험

2.1 실험변수 및 상수

이 실험에서는 단면형상과 편심각을 실험변수로 하였다. 여기서 편심각 θ 는 축하중이 가해진 점 및 단면의 도심을 지나는 직선과 단면의 주축 η 가 이루는 각도를 의미한다. 100×100mm의 정사각형 단면의 경우(SS series) 편심각을 0, 30, 45°로, 200×100mm의 직사각형 단면의 경우(RS series)는 0, 30, 45, 60, 90°로 변화시켰다. 편심거리 e 는 양단에서 동일하게 40mm로 하였다. 그리고 기둥의 길이는 재하판을 포함하여 1300mm이다.

2.2 사용재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 조립률이 2.38이고 비중이 2.56인 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 조립률이 6.23이고 비중이 2.58인 13mm의 쇄석을 사용하였다. 사용된 콘크리트의 배합은 Table 1과 같다.

Table 1 Mix proportion and test results of concrete

Proportions (kg/m ³)				Slump (cm)	f_{sp}^* (MPa)	f_{cu}^\dagger (MPa)	E_c^\ddagger (MPa)
C	W	S	G				
315	205	822	882	8	3.4	27	24300

* f_{sp} splitting tensile strength of concrete

† f_{cu} compressive strength of concrete cylinder

‡ E_c elastic modulus of concrete

각각의 배치로부터 1개의 기둥과 6개의 $\phi 100 \times 200$ 원주 공시체를 제작하였으며, 3개의 원주 공시체로부터 압축강도와 탄성계수를 측정하였으며, 나머지 3개의 원주 공시체로부터 조깅인장강도를 측정하였다. Table 1에서 압축강도, 탄성계수, 조깅인장강도는 각각 48개의 공시체로부터 얻은 평균값이다. 주철근으로는 항복강도가 436 MPa인 HD10을 사용하였으며, 띠철근으로 항복강도가 165MPa인 $\phi 4.7$ mm 철선을 사용하였다.

2.3 실험체

단면의 형상과 철근의 배근상태는 Fig. 1과 같으며 철근비는 정사각형 단면의 경우 2.85% (4-HD10)이고 직사각형 단면인 경우는 2.14% (6-HD10)이다.

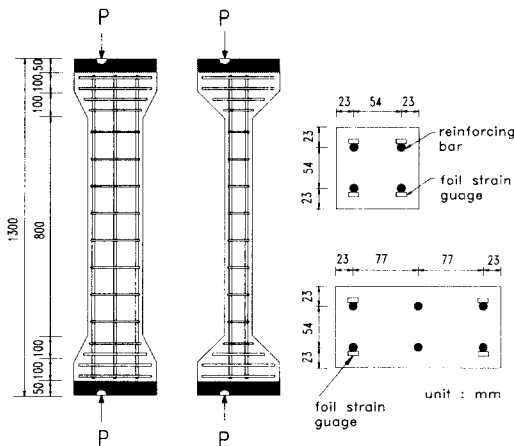


Fig. 1 Details of specimens and loading

편심하중 재하를 용이하게 하고, 단부 파괴를 방지하기 위하여 Fig. 1과 같이 단부의 단면을 300×150 mm로 확대하였다. 그리고 철근의 좌굴을 방지하고 단부를 보강하기 위하여 띠철근을 중앙부에는 100mm 간격으로, 단부에는 50mm 간격으로 배근하였다. 콘크리트를 타설 전에 기둥의 중앙에 철근 게이지를 부착하였으며, 단부에는 가압판을 부착하는데 필요한 너트를 매립하였다. 24시간이 지난 후에 탈형을 하고 실험전까지 양생실(온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$)에서 수중양생을 하였다.

2.4 가력장치 및 재하방법

편심하중을 가하기 위하여 편심거리가 40mm 이고, 편심각이 0, 30, 45, 60, 90°인 위치에 Fig. 2와 같이 홈이 파여 있는 가압판을 제작하여 이를 시험체 단부에 볼트로 고정하였다.

250ton 용량의 만능시험기(INSTRON 8506)를 사용하여 변위제어법으로 하중을 가하였으며, 하중재하속도는 극한하중에 이르는 시간이 약 20분이 되도록 하였다. 기둥 중앙부에 Fig. 3에서 보는 바와 같이 3개의 LVDT를 설치하여 횡변위를 측정하였다.

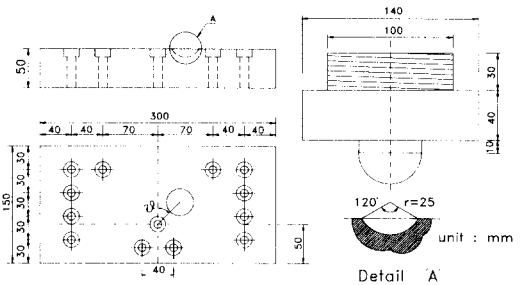


Fig. 2 Details of steel end plate

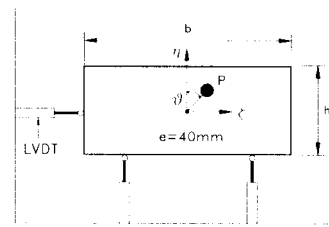


Fig. 3 LVDT details

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴양상

대부분의 기둥은 중앙부에서 파괴되었으나 SS0-2와 RS30-1은 현치부근에서 파괴되었는데, 이는 양단의 편심이 정확하게 일치하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 모든 기둥은 극한하중 이전에는 균열이 부재 내부에 고르게 분포하다가 극한하중을 전후하여 기둥의 중앙부에서 압축 콘크리트가 파괴(crushing)되면서 인장측에 균열이 집중되는 현상을 보였다.

3.2 곡률집중길이

Fig. 4는 기둥 SS0에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 극한하중 이후에 횡변위는 증가되나 하중은 감소하는 변형연화 현상을 보이고 있다. 이러한 변형연화 문제에서 해석결과는 유한요소의 크기에 민감한 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

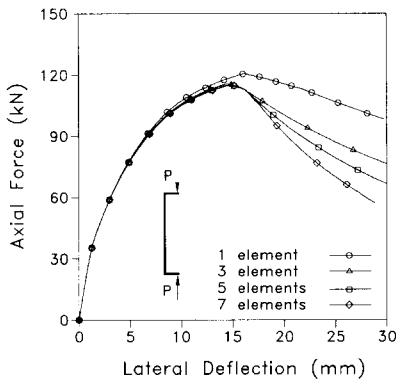


Fig. 4 Mesh sensitivity of axial force-lateral deflection behavior

유한요소의 크기가 해석결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 기둥 SS0에 대하여 요소를 1, 3, 5, 7개로 균등하게 분할하여 해석을 수행하였다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 제안된 방법도 유한요소의 크기에 매우 민감함을 알 수 있다. 유한요소의 크기가 감소함에 따라 극한하중 이후에 축력-횡변위 관계의 기울기가 급해지는 데, 이는 유한요소 해석에서는 파괴가 곡률집중길이 l_b (curvature localization length)내에서 발생하는 것이 아니라 선택된 유한요소의 크기 내에서 발생하기 때문이다.⁽³⁾ 즉, 유한요소의 크기에 따라 파괴에너지가 달라짐을 의미한다.

신뢰할 수 있는 해석결과를 얻기 위해서는 먼저 곡률집중길이를 파악할 필요가 있다. 곡률집중화길이는 단면의 형상과 치수, 재료의 강도, 휨모멘트의 분포, 골재의 크기 등에 영향을 받는다. Corley⁽¹⁰⁾, Sawyer⁽¹¹⁾ 등은 연성거동을 보이는 부재의 곡률집중화길이에 대한 실험식을 제안하였다. 그러나 변형연화현상을 보이는 부재의 곡률집중화길이에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하였다.

철근콘크리트 기둥의 강도가 콘크리트의 압축으로 지배되는 경우, 압축연단에서 콘크리트의 파괴된 길이를 곡률집중길이이라고 볼 수 있다. Fig. 5는 실험으로부터 얻은 곡률집중길이를 나타낸 것이다. 정사각형 단면의 경우에 l_b 는 편심각도에 관계없이 일정한 값(약 20mm)을 갖는 반면에 직사각형 단면에서는 많은 차이를 보이고 있으며 편심각이 60°인 경우에 l_b 가 가장 큰 것을 알 수 있다.

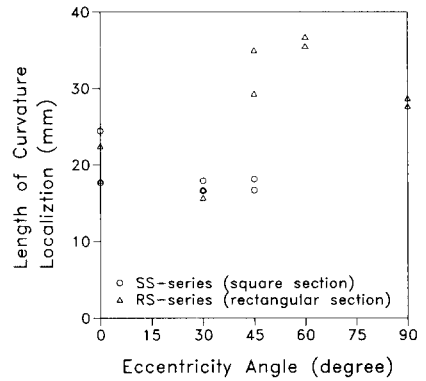


Fig. 5 Length of curvature localization with eccentricity angle

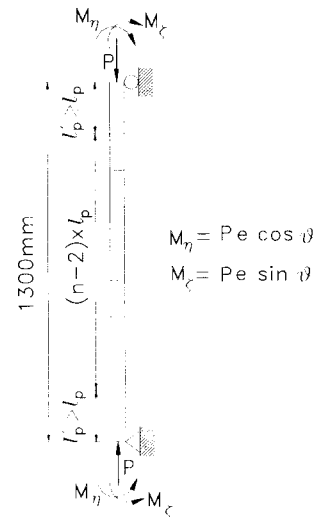


Fig. 6 Finite element mesh of column

이 연구에서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 기둥 중앙부에서 유한요소의 크기가 실험으로부터 얻은 곡률집중길이 l_b 가 되도록 요소를 분할하여 해석을 수행하였다.

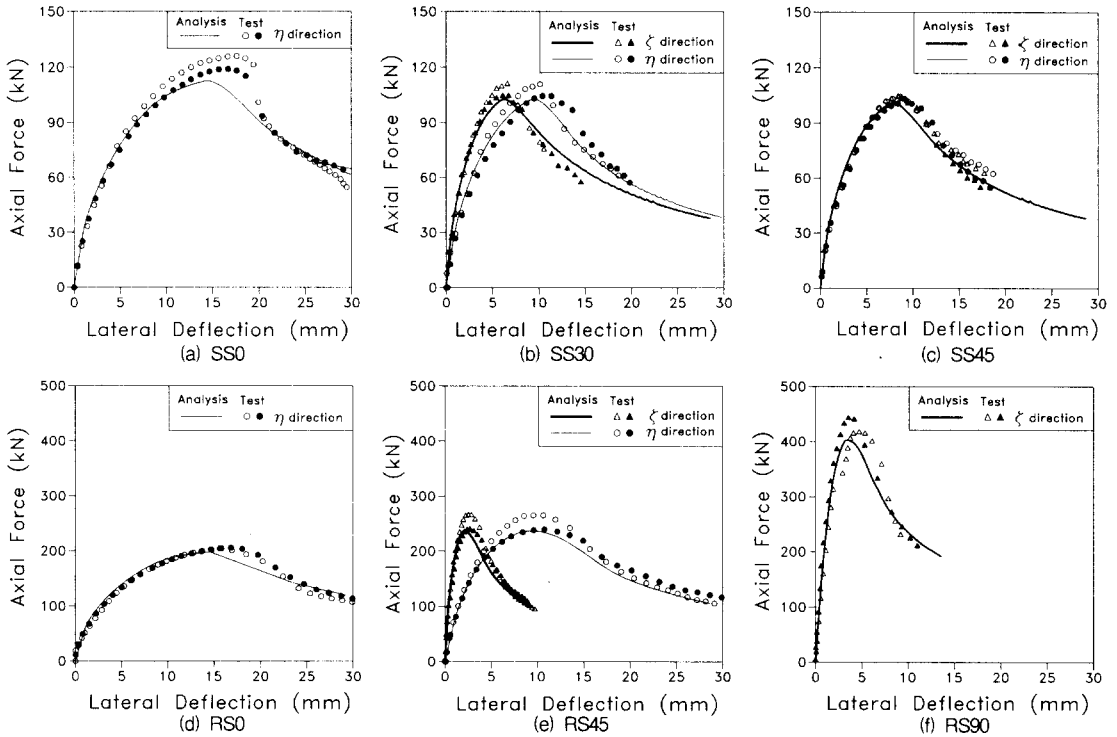


Fig. 7 Axial force-lateral deflection behavior of columns

3.3 축력-휨변위 관계

Fig. 7은 축력-휨변위 관계를 나타낸 것이다. 제안된 해석방법은 철근콘크리트 기둥의 극한강도 및 거동을 잘 예측함을 알 수 있다. Fig. 8은 철근콘크리트 기둥에 2축 휨과 축력이 작용할 때 휨모멘트간의 상호연관성을 고려한 경우(실선)와 고려하지 않은 경우(파선)를 비교하여 나타낸 것이다. 휨모멘트간의 상호연관성을 고려하지 않은 경우는 고려한 경우에 비하여 기둥의 극한강도를 과대 평가하는 경향을 나타내고 있으며, 단면내에 균열이 발생한 이후에 거동도 많은 차이가 남을 알 수 있다.

3.4 ACI의 모멘트 확대계수법과의 비교

ACI 318-95⁽⁹⁾에서는 세장비를 고려하기 위하여 모멘트 확대계수를 제안하고 있다.

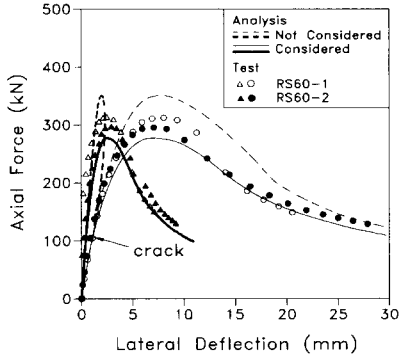
$$\delta = C_m / (1 - P_u / 0.75P_{cr}) \geq 1 \quad (1)$$

여기서 C_m 은 단부의 구속조건과 부재의 변형 형상에 관계된 계수이고, $P_{cr} (= \pi^2 EI / (kl_u)^2)$ 은 Euler의 좌굴하중이다. 그리고 k 는 유효길이계수, l_u 는 기둥의 비지지장, 그리고 EI 는 단면의 휨강성이다. 단면의 휨강성은 균열, 크리프, 콘크리트의 응력-변형률 관계 등에 영향을 받기 때문에 정확하게 산정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 ACI에서는 다음 식을 사용하여 단면의 휨강성을 추정하고 있다.

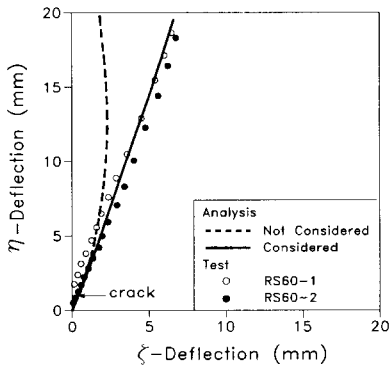
$$EI = 0.4E_c I_g / (1 + \beta_d) \quad (2a)$$

$$EI = (0.2E_c I_g + E_s I_{se}) / (1 + \beta_d) \quad (2b)$$

여기서 E_c 는 콘크리트의 탄성계수, I_g 는 철근을 제외한 콘크리트의 단면2차모멘트, I_{se} 는 단면의 도심에서 철근의 단면2차모멘트, β_d 는 콘크리트의 크리프를 고려하기 위한 계수이다. 본 연구에서는 양단에 가해진 모멘트가 같으므로 C_m 은 1이고, 단기하중에 대한 실험이므로 β_d 는 0이다.



(a) Axial force-lateral deflection behavior



(b) Lateral deflection trajectory

Fig. 8 Influence of the interaction between bending moments about both major and minor principal axes

ACI 318-95에서는⁽⁹⁾ 2축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에 해석의 간편성을 위하여 각각의 주축에 대해 모멘트 확대계수를 계산하도록 제안하고 있다. 이 절에서는 실험으로부터 얻은 모멘트 확대계수와 ACI의 모멘트 확대계수를 비교하고자 한다. Table 2의 마지막 열에서 $\delta_{\eta,a}$ 와 $\delta_{\zeta,a}$ 는 각각 η 축과 ζ 축에 작용하는 모멘트에 대한 모멘트확대계수이며, 식(1), 식(2a) 및 $P_{u,t}$ 를 사용하여 계산한 값이다. $\delta_{\eta,t}$ 와 $\delta_{\zeta,t}$ 는 극한하중 상태에서 기둥의 횡변위로부터 계산된 값이다.

$$\delta_{\eta,t} = (e_{\zeta} + \Delta_{\zeta,t})/e_{\zeta} \quad (3a)$$

$$\delta_{\zeta,t} = (e_{\eta} + \Delta_{\eta,t})/e_{\eta} \quad (3b)$$

여기서 $e_{\zeta} = e \cos \theta$, $e_{\eta} = e \sin \theta$, e 는 편심 거리, $\Delta_{\eta,t}$, $\Delta_{\zeta,t}$ 는 각각 극한하중 상태에서 η 및 ζ 축 방향으로의 측정된 횡변위이다.

1축 휨과 축력을 동시에 받는 경우 뿐만 아니라 2축 휨과 축력을 동시에 받는 경우에도 ACI의 모멘트 확대계수가 실험으로부터 얻은 모멘트 확대계수보다 큰 값을 보이고 있다. 즉 ACI의 모멘트 확대계수법이 비록 휨모멘트간의 상호연관성을 고려하지 않음에도 불구하고 안전측이었다.

Table 2 Results of test and analysis

Specimen	b×h	θ	P _{u,t} *	P _{u,a} **	P _{u,t} /P _{u,a}	Lateral deflections at ultimate load (mm)		Moment magnification factor			
								about ζ axis		about η axis	
						Δ _{η,t}	Δ _{ζ,t}	δ _{ζ,t}	δ _{ζ,a}	δ _{η,t}	δ _{η,a}
SS0-1	100×100	0°	119	113	1.05	16.0	-	1.40	1.51	-	-
SS0-2			126		1.11	18.1	-	1.45	1.56	-	-
SS30-1		30°	112	103	1.09	10.0	6.6	1.29	1.47	1.33	1.47
SS30-2			104		1.01	10.4	6.5	1.30	1.42	1.33	1.42
SS45-1		45°	103	101	1.01	9.5	9.4	1.34	1.41	1.33	1.41
SS45-2			106		1.05	8.4	8.6	1.30	1.43	1.30	1.43
RS0-1	200×100	0°	204	200	1.02	15.6	-	1.39	1.41	-	-
RS0-2			206		1.03	17.3	-	1.43	1.41	-	-
RS30-1		30°	208	212	0.98	14.0	1.1	1.40	1.42	1.06	1.08
RS30-2			217		1.02	13.3	2.3	1.38	1.45	1.08	1.08
RS45-1		45°	266	235	1.13	9.6	2.5	1.34	1.61	1.09	1.10
RS45-2			239		1.02	11.3	2.8	1.40	1.51	1.10	1.09
RS60-1		60°	313	275	1.14	7.8	2.4	1.39	1.80	1.07	1.13
RS60-2			295		1.07	7.8	2.8	1.38	1.72	1.08	1.12
RS90-1		90°	418	403	1.04	-	4.8	-	-	1.12	1.17
RS90-2			443		1.10	-	4.0	-	-	1.10	1.19

* P_{u,t} measured ultimate load by test

** P_{u,a} calculated ultimate load by proposed numerical method

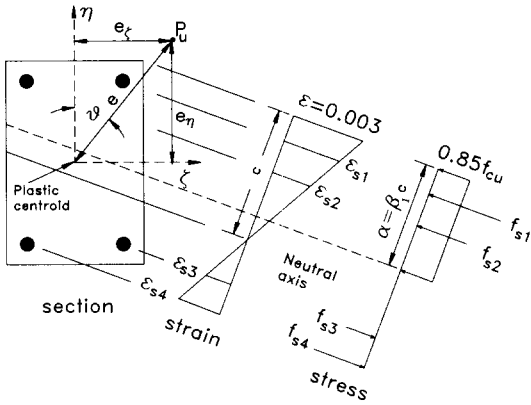


Fig. 9 Strain and stress distributions

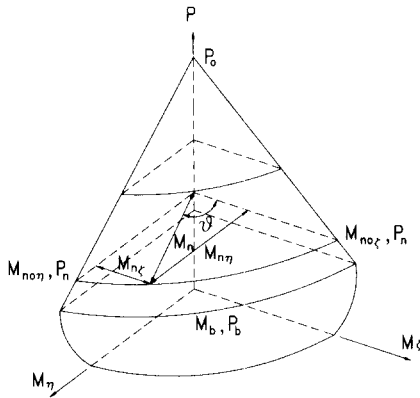
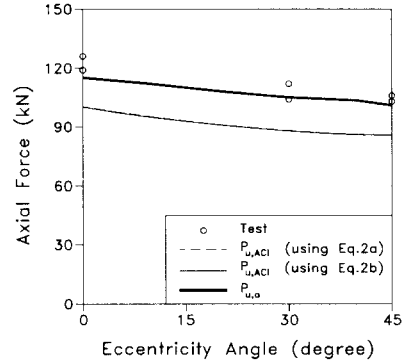


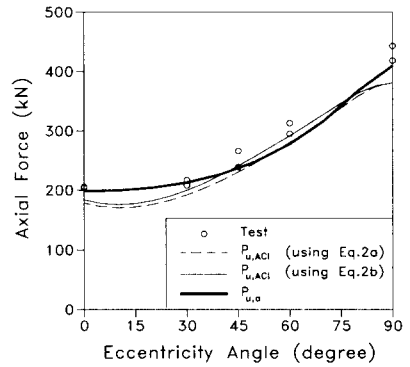
Fig. 10 Biaxial interaction surface

3.5 극한강도

Fig. 11은 실험결과, 제안된 방법에 의해 추정 한 극한강도($P_{u,a}$) 및 ACI의 모멘트 확대계수와 기동 상관도(biaxial interaction surface)로부터 구한 극한강도($P_{u,ACI}$)를 비교하여 나타낸 것이다. 기동 상관도는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 등가직사각응력블록을 사용하여 계산하였다. 제안된 방법은 1축 휨뿐만 아니라 2축 휨를 받는 철근콘크리트 기둥의 극한강도를 잘 예측함을 알 수 있다. 그리고 $P_{u,ACI}$ 는 정사각형 단면의 경우에는 편심각에 관계없이 $P_{u,a}$ 보다 약 20%정도 작다. 반면에 직사각형 단면의 경우에는 편심각이 0° 와 90° 인 경우에는 약 10%정도 작으나 그 외의 경우에는 거의 차이가 나지 않았다.



(a) SS series (square section)



(b) RS series (rectangular section)

Fig. 11 Ultimate loads with eccentricity angle

4. 결론

2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 거동에 대한 연구로부터 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 부재에 있어서는 축력과 휨모멘트의 상호연관성뿐만 아니라 휨모멘트간의 상호연관성을 고려하여야 한다.

(2) 제안된 해석방법은 유한요소의 크기에 매우 민감하였다. 이는 유한요소의 크기에 따라 파괴에너지가 달라지기 때문이며, 신뢰할 수 있는 해석결과를 얻기 위하여 본 연구에서는 요소의 크기를 실험으로부터 얻은 곡률집중길이를 분할하여 해석하였다.

(3) 실험결과와 비교할 때 제안된 해석방법은

2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 극한강도와 거동을 잘 예측하였다.

(4) 2축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에서로 수직인 두 주축에 작용하는 모멘트는 독립적이지 못한데도 불구하고 ACI 318-95에서는 해석의 간편성을 위하여 이러한 영향을 고려하지 않고 있다. 그러나 본 연구에서 수행된 실험결과에 의하면 ACI의 모멘트확대법이 비록 휨모멘트 간의 상호연관성을 고려하지 않음에도 불구하고 안전측이었다.

참고문헌

1. Kim, J. K. and Yang, J. K., "Buckling Behavior of Slender High-Strength Concrete Columns," Engineering Structures, Vol. 17, No. 1, 1995, pp.39-51.
2. El-Metwally, S. E. and Chen, W. F., "Nonlinear Behavior of R/C Frames," Computers and Structures, Vol. 32, No. 6, 1989, pp.1203-1209.
3. Bazant, Z. P., Pan, J. and Cabot, G. P., "Softening in Reinforced Concrete Beams and Frames," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 12, 1987, pp.2333-2347
4. Horowitz, B., "Design of Columns Subjected to Biaxial Bending," ACI Structural Journal, Vol. 86, S71, 1989, pp.717-722.
5. Bresler, B., "Design Criteria for Reinforced Concrete Columns under Axial Load and Biaxial Bending," ACI Journal, Vol. 57, No. 5, 1960, pp.481-490.
6. 김진근, 이상순, 양주경, 장정수, 조성찬, "2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근 콘크리트 기둥의 2계 거동 해석", 콘크리트학회 논문집, 제9권, 2호, 1997.4
7. Froster, S. J. and Attard, M. M., "Experimental Tests on Eccentrically Loaded High-Strength Concrete Columns," ACI Structural Journal, Vol. 94, S27, 1997, pp.295-303.
8. Zahn, F. A., Park, R. and Priestley, M. J. N., "Strength and Ductility of Square Reinforced Concrete Column Sections Subjected to Biaxial Bending," ACI Structural Journal, Vol. 86, S13, 1989, pp.123-131.
9. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95), ACI, Detroit, 1995.
10. Corley, W. G., "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams," Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 92, ST5, 1966, pp.85-142.
11. Sawyer, H. A., "Design of Concrete Frames for Two Failure States," Preceedings of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, ASCE-AC . Miami, 1964, pp.401-431.

요 약

2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥에서 단면내의 응력이 탄성한계를 넘어서거나 균열이 발생하면, 각각의 주축에 대한 곡률은 그 축에 대한 모멘트뿐만 아니라 축력과 그 축에 수직인 모멘트에도 영향을 받는다. 이는 주로 균열로 인하여 단면의 주축이 이동하거나 회전하기 때문이다. 최근에 이를 고려한 해석프로그램을 개발하였다.

이 연구에서는 개발된 해석프로그램을 검증하고 균열이 2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 100×100mm 정사각형 및 200×100 직사각형 단면의 철근콘크리트 기둥에 대하여 실험을 수행하였다. 편심각은 각각 정사각형 단면의 경우 0, 30, 45° 로, 직사각형 단면에 대해서는 0, 30, 45, 60, 90°로 변화시켰다.

제안된 해석프로그램은 2축 휨과 축력을 받는 철근콘크리트 기둥의 극한강도 및 거동을 잘 예측하였다. 그리고 실험결과에 의하면, ACI의 모멘트 확대계수법이 비록 휨모멘트간의 상호연관성을 고려하지 못함에도 불구하고 안전측이었다.

(접수일자 : 1999. 2. 25)