

2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 2계거동 해석

Second-Order Analysis of Reinforced Concrete Columns under Biaxial Loading



김진근*

Kim, Jin-Keun



이상순**

Lee, Sang-Soon



양주경***

Yang, Joo-Kyoung



장정수****

Jang, Jeong-Soo



조성찬*****

Cho, Seong-Chan

요 약

철근콘크리트 기둥의 2계거동 해석을 위한 기존의 연구는 대부분 대칭단면에 1축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에 한정되어 왔다. 그러나 일반적으로 기둥은 2축 휨과 축력을 동시에 받으며 이때 기둥의 거동을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려한 보다 일반적인 기둥의 강성행렬을 유도하였으며, 이를 이용하여 2축 휨을 받는 철근콘크리트 기둥의 2계거동 해석방법을 제안하였다.

제안된 해석방법을 이용하여 2축 휨과 축력을 동시에 받는 정사각형과 직사각형 기둥에 대하여 2계거동 해석을 수행하였다. 그리고 다양한 하중조건에 대한 기둥의 극한강도를 평가하고, ACI 설계규준의 모멘트 확대계수법에 의해 계산된 기둥의 극한강도와 해석결과를 비교하였다. 이러한 결과에 의하면 직사각형 기둥에서 모멘트 확대계수법에 의한 기둥의 극한강도가 해석결과보다 큰 경우도 있었다. 따라서 직사각형 단면 기둥에 2축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에는 모멘트 확대계수법을 이용하여 기둥의 극한강도를 평가하면 실제 기둥의 극한강도가 크게 평가될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 충남산업대학교 토목환경공학과 전임강사
**** 정회원, 조선대학교 건축공학과 교수
***** 정회원, 대한안전진단연구원(주)대표

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 6월 30일까지 학회로 보내주
시면 1997년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Abstract

Many studies on the second-order analysis of reinforced concrete columns have been dealt for symmetric sections under uniaxial loading. However, actual columns are practically subjected to biaxial loading. In order to more accurately predict the behavior of concrete columns under biaxial loading, the interaction between bending moments of major and minor axes should be considered.

In this paper, a stiffness matrix of columns under biaxial loadings was derived and a numerical method was proposed. Numerical analyses, based on the proposed method, were performed to predict behavior of concrete columns with square and rectangular sections under various loading conditions. The analytical results were compared to those using the moment magnifier method in ACI code. It was found that the ultimate strength of concrete rectangular columns, for some cases of biaxial loading conditions, calculated by the moment magnifier method was larger than the values based on the proposed method and therefore, may be overestimated.

Keywords : reinforced concrete column, second-order analysis, biaxial loading

1. 서 론

철근콘크리트 장주 해석을 위한 많은 연구가 이루어져 왔으나, 대부분 기존 연구⁽¹⁾는 기둥부재의 변형된 모양을 가정하여 선형미분방정식을 푸는 근사적인 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 실제 철근콘크리트 기둥은 길이방향으로 부재의 강성이 변하며 특히 탄성한계를 넘어서면 기둥의 변형모양은 처음에 가정한 변형모양과 상이하게 되는데, 이러한 방법은 균열로 인한 부재의 강성이 변하는 것을 고려하지 못한다. 이러한 문제점은 근래에 구조물을 해석하기 위하여 많이 이용되는 유한요소법을 적용하면 해결될 수 있다. El-Metwally와 Chen⁽²⁾은 기하학적 비선형을 고려하여 철근콘크리트 골조를 해석하는 데 유한요소법을 적용하였으나 장주에서는 같은 단면내에서도 단면의 어떤 점에서 제하(unloading)가 발생할 수 있음에도 불구하고 이를 고려하지 않았다. 최근에 참고문헌 (3)에서는 이를 고려한 기둥해석 기법이 개발되었다.⁽³⁾ 그러나 실제 대부분의 기둥은 2축 휨과 축력을 동시에 받고 있음에도 불구하고 개발

된 해석기법은 이러한 경우에 적용할 수 없다. 왜냐하면 2축 휨과 압축이 동시에 작용하는 경우에 일정 크기 이상의 하중이 부재에 작용하면 균열이 발생되고 이로 인하여 초기에 대칭인 단면이라 하더라도 비대칭이 되기 때문이다. 이러한 경우에는 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려하여 해석을 수행하여야 한다.

본 연구에서는 축력과 휨모멘트의 상호 연관성 및 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려한 보다 일반적인 공간뼈대요소의 강성행렬을 유도하였으며, 이를 이용하여 2축 휨을 받는 철근콘크리트 기둥의 해석기법을 제안하였다.

2. 재료의 응력-변형도 관계

콘크리트의 1축압축 응력-변형도 곡선에 대한 모델은 많은 연구자들에 의해 다양한 형태의 식으로 제안되었으나, 이들 모델식들은 각기의 고려조건 및 실험방법 등의 차이로 인하여 그 거동을 모델화하는데 있어서 서로 다르다. 본 연구에서는 비교적 최근에 제안된 아래의 모델식을 사용하였다.

$$\text{상승부분} : \sigma_c = f_o \left[A \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right) - (A-1) \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^{11.1} \right] \quad (1)$$

$$\text{하강부분} : \sigma = f_o e^{-B(\epsilon_c - \epsilon_o)^C} \quad (2)$$

여기서,

$$A = \frac{E_c \epsilon_o}{f_o}$$

$$B = \left(260 + \frac{100}{f_c'} \right) e^{-30 f_{ct} / f_c'}$$

$$C = 1.2 - 0.006 f_c'$$

$$E_c = 3320 \sqrt{f_c' + 6900}$$

$$f_o = f_c' + 4.2 f_{ct}$$

$$\epsilon_o = 7 \times 10^{-4} \sqrt{f_c'} + 0.06 \frac{f_{ct}}{f_c'}$$

$$f_{ct} = \frac{\rho_s f_w}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{s}{d}} \right)$$

위 식에서 E_c 는 탄성계수(MPa), f_o 와 ϵ_o 는 각각 횡보강된 콘크리트의 강도(MPa)와 그 때의 변형도, f_c' 은 콘크리트의 1축 압축강도(MPa), f_o 와 f_w 는 각각 횡보강응력(MPa)과 횡보강근의 항복강도(MPa)이며, ρ_s 는 횡보강 철근비, d_c 는 콘크리트 코아의 지름(mm), 그리고 s 는 횡보강근의 간격(mm)이다. 제하(unloading)와 재재하시(reloading)의 1축압축 응력-변형도 관계는 Ottor와 Naaman¹⁴이 제안한 모델을 사용하였으며, 1축인장상태의 콘크리트의 모델은 인장강성 증진효과를 고려한 Vebo와 Ghali¹⁵의 식을 사용하였다.

철근은 완전 탄소성 거동을 하며, 축방향으로만 저항하고 철근과 콘크리트 사이에는 부착슬립(bond slip)이 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

3. 해석 방법

3.1 부재의 강성행렬

만약 압축 및 인장에 대한 거동이 동일하고 균질한 재료로 만들어진 기둥부재에 단면의 도심에 축력이 작용하는 경우에는 곡률이 발생되지 않으며, 순수 휨이 작용하는 경우에는 단면의 도심에서 변형도가 발생되지 않는다. 기존의 대부분의 뼈대요소의 강성행렬은 위의 가정하에서 대칭단면에 대하여 유도된 것이다.

그러나 철근콘크리트 부재의 경우에는 콘크리트의 압축과 인장거동이 동일하지 않으며, 철근과 콘크리트의 합성작용으로 외력에 저항하므로 강재와 같이 압축거동과 인장거동이 동일한 등방성 재료와는 달리 단면의 도심에 축력만 작용하는 경우에도 곡률이 발생할 수 있으며, 순수 휨이 작용하는 경우에도 도심에서 변형도가 유발될 수 있다. 따라서 재료의 압축거동과 인장거동이 동일하다는 가정하에서 유도된 대부분의 강성행렬은 철근콘크리트 구조물의 해석에는 적합하지 않다. 최근에 Bazant 등¹⁶은 이러한 축력과 휨모멘트의 상호 연관성을 고려한 강성행렬을 유도하였다. 그러나 Bazant 등이 유도한 강성행렬은 단면이 대칭이 아닌 경우와 2축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에는 적용할 수 없다. 왜냐하면 단면이 대칭이 아닌 경우에는 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려하여야 하는데 Bazant 등은 이를 고려하지 않았기 때문이다. 그러나 2축 휨과 축력을 동시에 받는 대칭단면의 경우에도 일정 크기 이상의 하중이 부재에 작용하면 균열이 발생되고, 이로 인하여 단면이 비대칭이 되므로 이 경우에도 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 축력과 휨모멘트의 상호 연관성 및 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려한 보다 일반적인 공간 뼈대요소의 강성행렬을 유도하였다.

Fig. 1과 같은 공간 뼈대요소에서 단면내의 임의의 점에서 변형도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon(x_1, x_2, x_3) = & u_1'(x_1) - x_2 u_2''(x_1) - x_3 u_3''(x_1) \\ & + \frac{1}{2} ((u_2'(x_1))^2 + (u_3'(x_1))^2) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $u_1(x_i)$, $u_2(x_i)$, $u_3(x_i)$ 는 각각 비균열 단면의 도심에서 x_1, x_2, x_3 방향의 변위이며, 위첨자 '과 '는 각각 x_1 에 대한 1차와 2차 미분을 의미한다.

가상일의 법칙을 적용하면 Fig. 1에서와 같은 하나의 구조부재에 대하여 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_0^L \int_A \sigma \delta \epsilon dA dx = \sum_{i=1}^{12} (P_i \delta \bar{u}_i) \quad (4)$$

여기서 P_i 와 \bar{u}_i 는 각자 절점 하중 및 변위이다.

식 (3)을 식 (4)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$([K] + P_a [K_c]) \{U\} = \{P\} \quad (5)$$

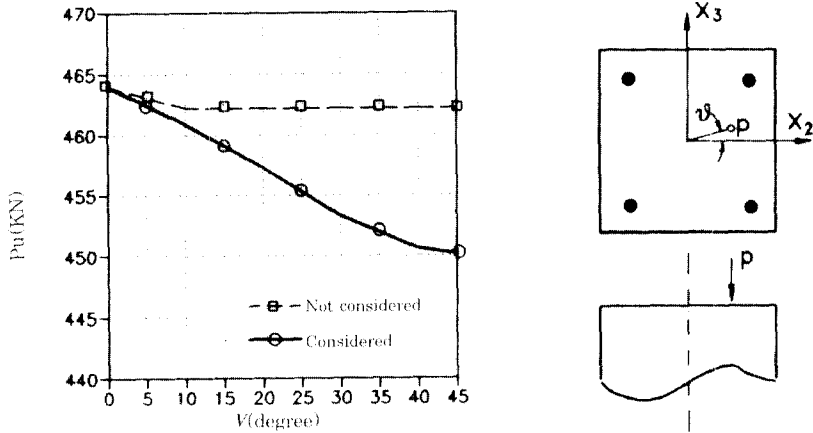


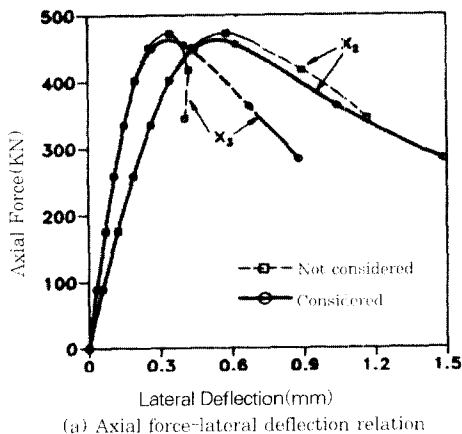
Fig. 3 Ultimate strength under various biaxial loading condition in square section

Fig. 4(a)는 편심각도가 30° 일 때 축력과 횡변위 관계를 나타낸 것이고, Fig. 4(b)는 x_2 축 방향과 x_3 축 방향의 횡변위 관계를 나타낸 것이다. 균열이 발생하기 이전에는 휨모멘트간의 상호연관성을 고려한 경우(\circ)와 고려하지 않은 경우(\square)의 횡변위가 동일하나, 균열이 발생되고 난 뒤부터 상당한 차이를 보인다. 전자의 경우가 후자에 비하여 동일한 축하중에 대하여 횡변위가 크며, 결과적으로 기둥의 극한강도가 더 작아진다.

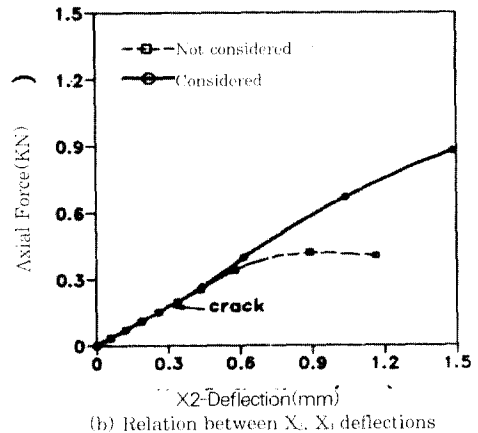
4.2 해석결과와 실험결과의 비교

본 절에서는 개발된 유한요소 해석 프로그램을 검증하기 위하여 실험결과와 해석결과를 비교하였다.

이를 위하여 $10 \times 10 \text{cm}$ 의 정사각형 기둥에 대하여 단면의 중심으로부터 1cm 떨어진 위치에 편심하중을 재하하여 실험을 실시하였다.¹⁸⁾ Table 1과 같이 콘크리트의 강도는 19.8, 53.7, 77.7MPa이고 편심각은 0° 와 45° 이며, 세장비는 15, 30, 50이다. Table 1의 마지막 열은 실험에 의한 극한강도와 해석에 의한 극한강도의 비 $P_u/P_{u,calc}$ 이다. $P_u/P_{u,calc}$ 는 0.8~1.01의 범위로 해석결과와 실험결과 사이에 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 콘크리트의 압축강도가 19.8MPa이고 세장비가 15인 정사각형 기둥에 대하여 편심에 따른 P_u/P_0 의 변화를 나타낸 것이다. P_0 는 편심이 0일 때 기둥의 극한강도이고 P_u 는 주어진 편심에서 기둥의 극한강도이다. 실험에서 e/h 는 0.1인



(a) Axial force-lateral deflection relation



(b) Relation between X_2 , X_3 deflections

Fig. 4 Behavior of column under biaxial loading ($\theta = 30^\circ$)

Table 1 해석 및 실험에 의한 최대하중 비교

specimen no.	f'_c	λ	θ	P_{cr}	P_{uo}	$\frac{P_{uo}}{P_{cr}}$	specimen no.	f'_c	λ	θ	P_{cr}	P_{uo}	$\frac{P_{uo}}{P_{cr}}$	specimen no.	f'_c	λ	θ	P_{cr}	P_{uo}	$\frac{P_{uo}}{P_{cr}}$			
15L 0-1	19.8	15	0	211	230	0.92	15M 0-1	53.7	15	0	465	465	1.00	15H 0-1	77.7	15	0	558	619	0.90			
15L 0-2*				185		0.80	15M 0-2				472		1.01	15H 0-2*				517		0.83			
15L 45-1			45	211	227	0.93	15M 45-1			45	463	451	1.02	15H 45-1			45	576	592	0.98			
15L 45-2						220	0.97						15M 45-2	428					0.95	15H 45-2	536	0.90	
30L 0-1			30	0	188	224	0.86			30M 0-1	30	0	424	444			0.89	30H 0-1	30	0	521	600	0.87
30L 0-2							192			0.86							30M 0-2	358					0.95
30L 45-1		45		198	216	0.92	30M 45-1		45	338		425	0.84	30H 45-1	45	516	563	0.92					
30L 45-2						201	0.93						30M 45-2	294				0.80		30H 45-2	500	0.89	
50L 0-1		50		0	180	201	0.90		50M 0-1	50		0	340	348	0.85	50H 0-1	50	0		378	464	0.81	
50L 0-2							174		0.86						50M 0-2	340						0.98	50H 0-2
50L 45-1			45	170	196	0.86	50M 45-1		45		330	337	0.98	50H 45-1	45	404		454	0.88				
50L 45-2						150	0.77						50M 45-2	340					1.00	50H 45-2	410	0.90	

*는 단피부파괴 시험재, f'_c 는 콘크리트의 압축강도(MPa)

P_{cr} 는 실험에 의한 기둥의 극한 강도(kN), P_{uo} 는 해석에 의한 기둥의 극한강도(kN)

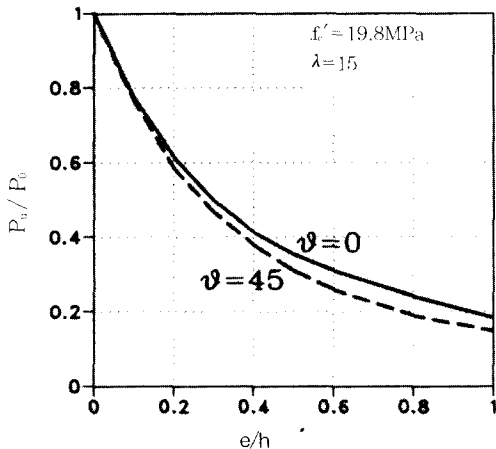


Fig. 5 Effect of eccentricity on the ultimate load of columns

데 이 경우에 약간의 편심의 변화에도 극한강도가 급격히 변하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 실험상의 오차를 고려할 때 본 연구에서 제안된 해석방법이 기둥의 극한강도를 비교적 잘 예측한다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 세장비가 30이며 편심각도가 0°와 45°일 때의 해석결과와 실험결과를 비교한 것이다. 제안된 해석방법이 기둥의 축력과 횡변위 관계를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다.

5. 해석결과와 모멘트 확대계수법과의 비교

ACI(318-95)에서는 세장비를 고려하여 기둥을 설계하기 위하여 모멘트 확대계수법을 제안하고 있

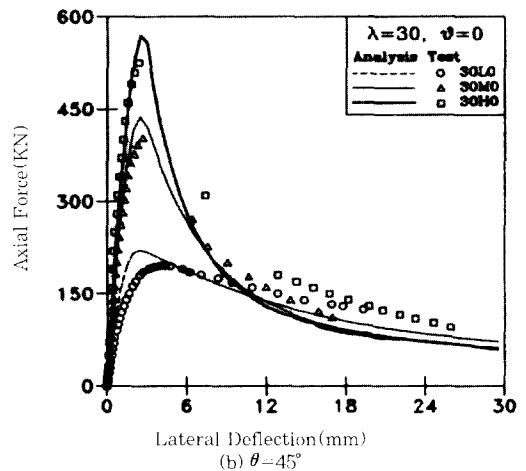
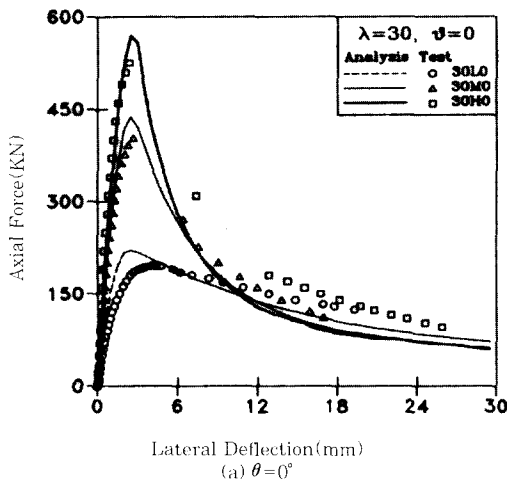


Fig. 6 Axial force-lateral deflection relation

다.⁽⁷⁾ 2축 휨과 축력을 동시에 받는 경우에는 각각의 주축에 대하여 모멘트 확대계수법을 적용하도록 제안하고 있다. 즉 각각의 주축방향의 좌굴하중으로부터 모멘트 확대계수를 계산하고 이를 1계탄성 해석을 통하여 계산한 모멘트에 곱하여 단면설계에 사용되는 확대 휨모멘트를 계산한다. 이때 모멘트 확대계수 δ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = \frac{C_m}{1 - P_u / 0.75P_{cr}} \geq 1 \quad (8)$$

여기서 C_m 은 부재의 변형형상을 고려한 계수(단곡률, 복곡률 등), $P_{cr} = \pi^2 EI / (kl_e)^2$, Euler의 좌굴하중, k 는 유효길이계수, l_e 는 기둥의 비지지장 그리고 EI 는 단면의 휨강성이다. 또한 ACI에서는 단면의 휨강성을 정확하게 모르는 경우에는 다음 식들 중에서 하나를 선택하여 사용하도록 권장하고 있다.

$$EI = \frac{0.4E_c I_g}{1 + \beta_d} \quad (9)$$

$$EI = \frac{0.2E_c I_g + E_s I_{sc}}{1 + \beta_d} \quad (10)$$

여기서 E_c 는 콘크리트의 탄성계수, I_g 는 철근을 무시한 콘크리트의 단면2차모멘트, E_s 는 철근의 탄성계수, I_{sc} 는 기둥의 도심축에 대한 철근의 단면2차모

멘트, β_d 콘크리트의 크리이프를 고려하기 위한 계수이다. 본 연구에서는 실험실에서 단기간에 하중을 가하여 크리이프의 영향을 고려하지 않아도 되므로 $\beta_d = 0$ 으로 하였다.

2축 휨과 축력을 동시에 받고 있는 경우를 해석하기 위하여 Fig. 7과 같이 중립축을 회전시켜서 1축 휨과 축력을 동시에 받는 경우로 치환하여 축력-모멘트 상관 곡선을 구하고, 편심각을 변화시켜 동일한 작업을 반복적으로 수행하여 Fig. 8과 같은 2축 축력-모멘트 상관도를 구할 수 있다. 여기서는 Whitney의 유효직사각형 응력분포를 사용하였다.

앞에서 언급한 2축 축력-모멘트 상관도와 모멘트 확대계수법을 사용하여 세장한 기둥의 극한강도를 계산하고 이를 본 연구에서 제안한 해석방법에 의해 계산한 극한강도와 비교하였다. 굽은 실선은 제안된 해석방법에 의한 계산 결과이며 파선과 실선은 ACI의 모멘트 확대계수법에 의해 계산된 값이다. 파선과 실선은 각각 단면의 휨강성을 식 (9)와 식 (10)에 의해 계산한 것이다. 그리고 편심 e 는 비균질단면에서 하중점까지의 거리를 의미하고, 편심 각 θ 는 집중하중이 작용하는 점과 비균질단면의 도심을 이은 선이 x_2 축과 이루는 각도이다.

예제해석을 위해 선택된 단면의 형상과 철근의 배근상태는 Fig. 9와 같다. 철근비는 2%이고 철근의 항복강도는 392MPa이며, 콘크리트의 압축강도는

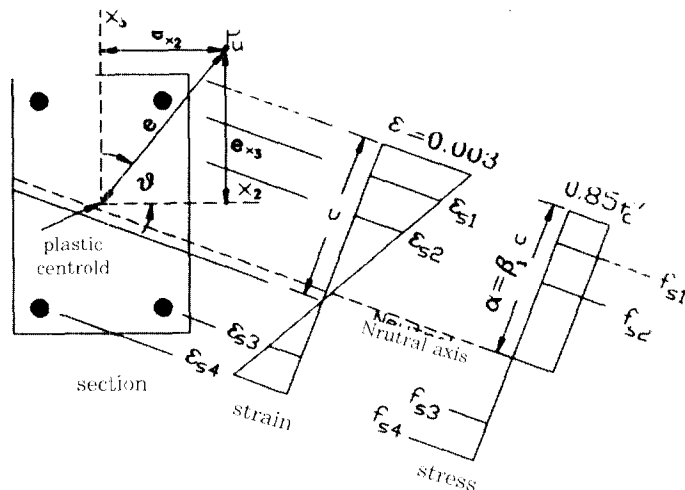


Fig. 7 Stress and strain distribution at a section

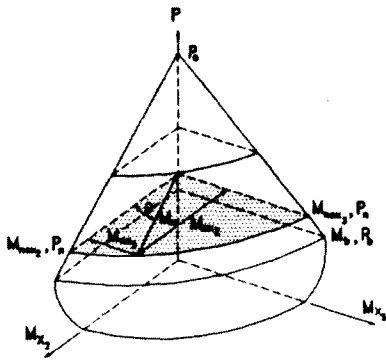
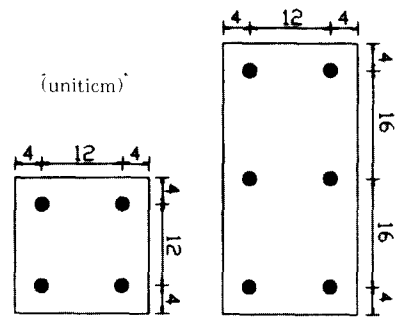
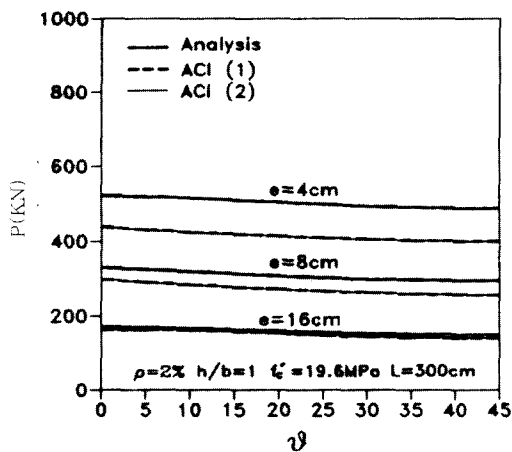


Fig. 8 Biaxial P-M interaction surface

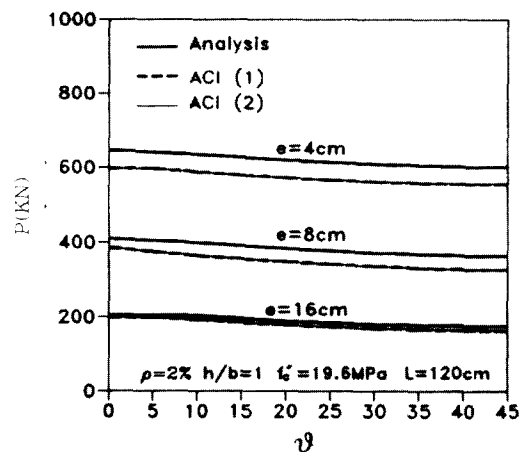


(a) $h/b=1$ (b) $h/b=2$

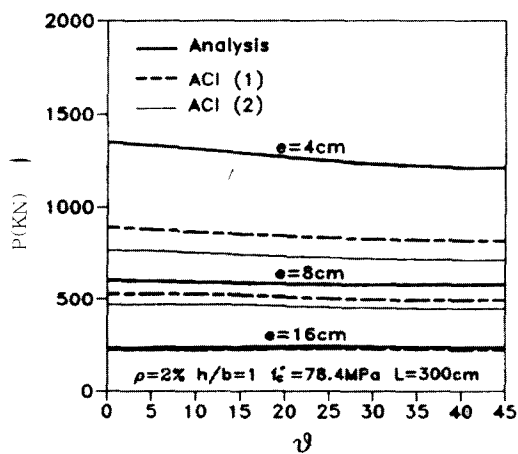
Fig. 9 Sections of column



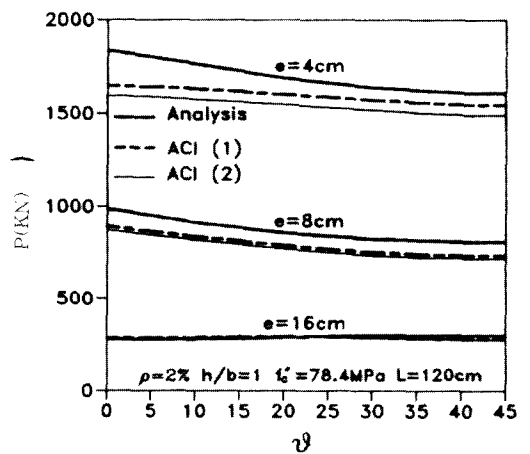
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 Comparison of ultimate load between analysis and ACI code in square section

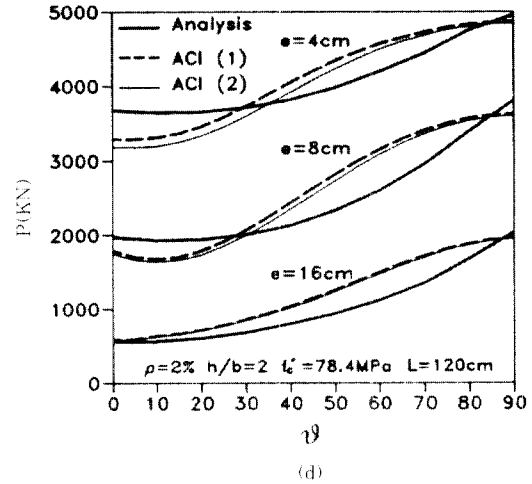
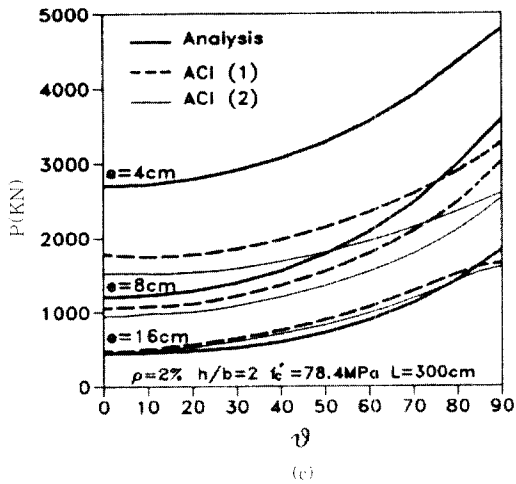
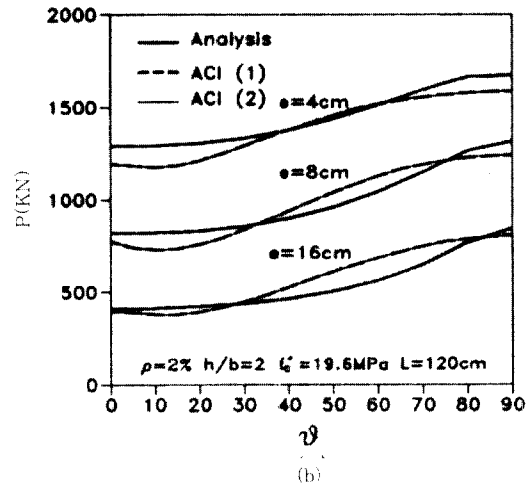
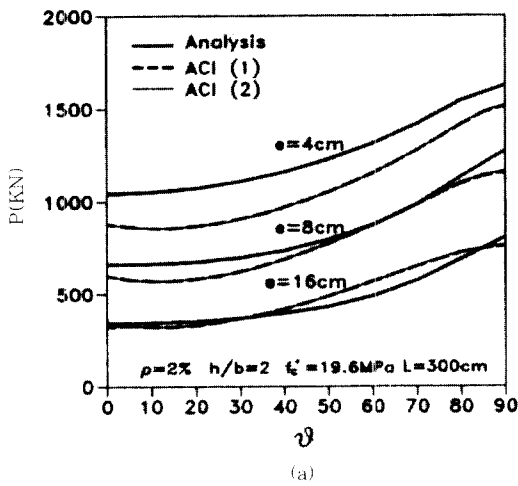


Fig. 11 Comparison of ultimate load between analysis and ACI code in rectangle section

19.6과 78.4MPa이고, 편심은 4, 8, 16cm로 변화시켰다. 그리고 부재의 길이 120cm의 단주기둥과 300cm의 장주기둥을 선택하였다. 편심각에 따른 극한 강도의 변화를 알아보기 위하여 편심각을 정사각형 단면에 대해서는 $0 \sim 45^\circ$ 까지 변화시켰으며, 직사각형 단면에 대해서는 $0 \sim 90^\circ$ 까지 변화시켰다.

Fig. 10은 정사각형 단면에 대한 해석결과이며, Fig. 10(a)와 (b)는 콘크리트의 압축강도가 19.6MPa인 저강도 콘크리트의 경우이고 Fig. 10(c)와 (d)는 콘크리트의 압축강도가 78.4 MPa인 고강도 콘크리트에 대한 해석결과이다.

저강도 콘크리트의 경우에는 모멘트 확대계수법에

의한 기둥의 극한강도가 해석에 의한 극한강도에 비하여 작게 나타났다. 반면에 고강도 콘크리트의 경우에는 편심이 4cm 일 때, 모멘트확대계수법이 작게 나타났으나 편심이 16cm일 때는 부분적으로 모멘트 확대계수법에 의한 기둥의 극한강도가 해석결과보다 크게 나타났다.

Fig. 11은 직사각형 단면에 대한 해석결과이며, Fig. 11(a)와 (b)는 콘크리트의 압축강도가 19.6MPa인 저강도 콘크리트의 경우이고, Fig. 11(c)와 (d)는 콘크리트의 압축강도가 78.4 MPa인 고강도 콘크리트에 대한 해석결과이다. 편심각이 0° 인 경우와 90° 인 경우에는 모멘트 확대계수법에 의해 기둥

의 극한강도가 해석결과보다 작다. 다만 콘크리트의 압축강도가 78.4MPa이며 편심이 16cm이고 편심각이 0°인 경우에 모멘트 확대계수법에 의한 기둥의 극한강도가 해석결과보다 약간 크게 나타났다. 해석결과는 대부분이 편심각이 90°인 부근에서 급격한 강도 변화가 있는 반면에 모멘트 확대계수법은 해석결과에 비하여 그 변화가 완만함을 볼 수 있다. 또한 편심각이 약 40°에서 70° 사이에서 모멘트 확대계수법에 의한 기둥의 극한강도가 해석결과보다 크게 나타남을 볼 수 있다. 따라서 직사각형 기둥에 2축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에 모멘트 확대계수법이 안전측이 아닐 수 있다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

1) 축력과 휨모멘트의 상호 연관성 및 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려한 보다 일반적인 공간뼈대요소의 강성행렬을 유도하였으며, 이를 이용하여 2축 휨을 받는 철근콘크리트 기둥의 2계거동 해석방법을 제안하였다.

2) 본 연구에서 제안된 해석방법은 실험결과와 비교할 때에 기둥의 극한강도와 거동을 비교 적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

3) 직사각형 기둥에서 모멘트 확대계수법에 의한 기둥의 극한강도가 해석결과보다 큰 경우도 있었다. 따라서 직사각형 단면 기둥에 2축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에는 모멘트 확대계수법을 이용하여 기둥의 극한강도를 평가하면 실제 기둥의 극한강도가 크게 평가될 수도 있다는 것이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 연구비 지원(STEPI)으로 한국기계연구원과 공동으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Bazant, Z.P., Cedolin, L. and Tabbara, M.R., "New Method of Analysis for Slender Columns," ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 4, July-Aug., 1991, pp. 391-401.
- (2) El-Metwally, S.E. and Chen, W.F., "Nonlinear Behavior of R/C Frames," Computers and Structures Journal, Vol. 32, No. 6, 1989, pp. 1203-1209.
- (3) Kim, Jin-Keun and Yang, Joo-Kyoung, "Buckling Behavior of Slender High-strength Concrete Columns," Engineering Structure, Vol. 17, NO 1, 1995, pp. 39-51.
- (4) Otter, D.E. and Naaman, A.E., "Model for Response of Concrete to Random Compressive Loads," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No 11, 1989, pp. 2794-2809.
- (5) Vebo, A. and Ghali, A., "Moment-curvature Relationship of Reinforced Concrete Slabs," Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 113, No ST3, 1977, pp. 515-531.
- (6) 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.
- (7) ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-95)," ACI, Detroit, 1995.
- (8) 조성찬, "철근콘크리트 기둥의 좌굴거동에 관한 연구," 박사학위논문, 조선대학교, 1995.
- (9) 이태규, "철근콘크리트 보와 골조의 비선형 파괴거동 해석," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1992.

(접수일자 : 1996. 12.7)