

장방형 철근 콘크리트 기둥의 띠철근량에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Amount of Transverse Steel in Square Reinforced Concrete Columns.

이리형* 김성수** 이용택*** 김승훈****
Lee, Li-Hyung Kim, Sung-Su Lee, Yong-Taeg Kim, Seung-Hun

Abstract

In reinforced concrete structure, it is very important to secure ductile performance of column because the columns become brittle failure and cause the collapse of an entire structure and the damage of human life. This study is intending to seek the quantity of transverse steels in square reinforced concrete columns which is derived from moment-curvature analysis of cross section about various arrangements of transverse steel and the ratio of axial force and to propose the design method to secure the sufficient ductile behavior subjected to complex loading.

1. 서 론

1.1 연구배경

철근콘크리트 구조물에서 지진에 대해 안전하고 경제적인 구조물을 설계하기 위해서는 대지진시 건물에 입력되는 에너지를 부재의 소성변형에 의해 건물전체에 균등하게 분산시킬 필요가 있다. 지진시 철근콘크리트 구조물의 비탄성범위에서 입력된 지진에너지를 건물전체에 균등히 소산시키기 위해서는 기둥보다 보에서 소성힌지가 발생되도록 하는 것이 안전하고 경제적이지만, 지진하중은 건물의 2개 주축방향으로 동시에 작용하기 때문에 강진시 기둥에서 소성힌지 발생은 피할 수 없으며, 기둥 단부에는 높은 전단력이 발생된다.

* 정회원, 한양대 건축공학부 교수
** 정회원, 청주대 건축공학과 교수
*** 정회원, 한양대 초대형구조시스템 연구센터 연구조교수
**** 한양대 건축공학과 석사과정

그러므로 강진시 기둥에서 소성힌지가 발생된 후, 기둥의 연성적인 거동을 확보하는 것은 구조물의 붕괴방지 및 인명구조라는 측면에서 매우 중요한 요소로 등장하게 된다.

이에 대하여 ACI 318규준에서는 기둥의 변형능력 확보를 위하여 횡보강근으로 코아 콘크리트를 구속시키도록 의무화(ACI 21-3, 21-4)하고 있지만, ACI 규준의 횡보강근 설계식은 배근상세(Steel Detailing), 하중조건(Type of Load), 기둥의 거동(Performance of Columns)에 대해서는 고려하지 않고 있어서 높은 연성을 요구하거나 고축력과 같은 약조건에 대해서는 안전하지 못한 문제점이 있다.

1.2 연구목적 및 내용

최근에 제안되어 사용하고 있는 구속콘크리트의 응력-변형도 모델들을 기존의 실험결과와 비교, 분석하며, 횡보강근량과 배근방법에 따라 최대강도 이후의 기울기를 고려한 수정된 Kent와 Park의 응력-변형도 곡선을 이용하여 횡보강근 형태 및 간격, 축력크기 등을 변수로 하여 정밀한 단면의 모멘트-곡률 해석을 한다. 이러한 단면의 모멘트-곡률 해석을 통하여 Park⁽²⁾와 Samra⁽⁶⁾가 제안한 단면의 곡률연성계수(ϕ_u/ϕ_y)에 근간하여 유도된 소요의 변형능력을 확보할 수 있는 횡보강근량을 산출하여 장방형 철근 콘크리트 기둥에 있어서 축력비와 띠철근 형태를 고려한 띠철근량의 합리적인 설계법을 제시한다.

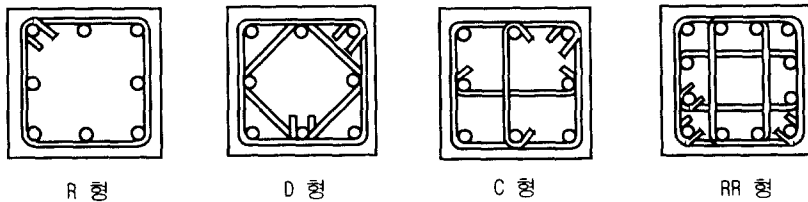


그림 1 띠철근 형태

2. 구속철근에 대한 ACI 규준의 검토

● 나선기둥

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} \quad (1)$$

그리고

$$\rho_s \geq 0.12 \frac{f'_c}{f_y} \cdot s \cdot h \quad (2)$$

● 장방형 기둥

$$A_{sh} = 0.3S \cdot h_c \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (3)$$

그리고

$$A_{sh} = 0.09S \cdot h_c \frac{f'_c}{f_y} \quad (4)$$

이상의 ACI 규준식에서 기둥의 거동은 철근의 항복강도보다 횡보강근 간격과 횡보강근비에 더 크게 영향을 받는다는 Cohn과 Ghosh의 연구를 볼때, 철근의 항복강도 f_y 가 과대평가되어 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 식 (1)~(4)는 반복 횡하중이나 편심 하중을 받는 기둥의 변형능력에 영향을 미치는 횡보강근 형태, 간격의 효과를 고려하지 않고 중심축력을 받는 기둥에서 피복콘크리트 박리후, 코아 콘크리트만의 내력이 박리전의 내력이상을 유지하여야 한다는 측면으로 부터 유도된 설계식이므로 반드시 충분한 곡률연성계수를 확보한다고 볼 수 없다.

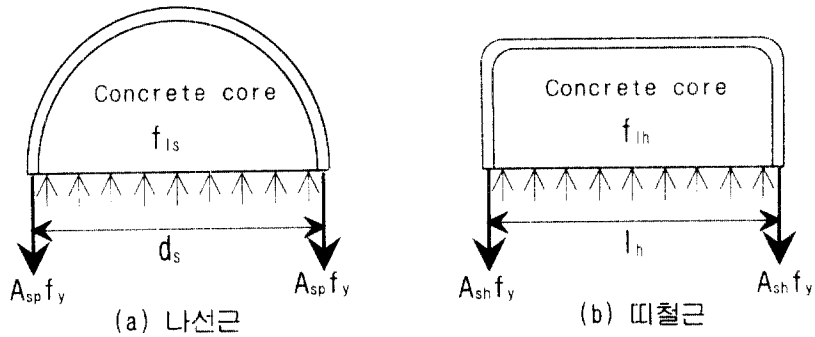


그림 2 기둥의 횡보강근에 의한 콘크리트의 구속

그리고 규준에서는 주근비가 증대됨에 따라 상당한 축력을 허용하고 있으며, 이와 같은 축력의 증가는 중립축의 거리를 크게 하여 더 많은 횡보강근을 요구하지만 횡보강근량은 축력의 크기에 관계없이 일정하다는 문제점이 있다(그림 3 참조).

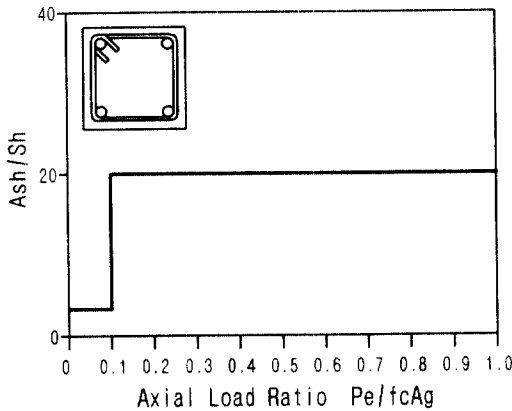


그림 3 ACI 규준의 축력비와 횡보강근량

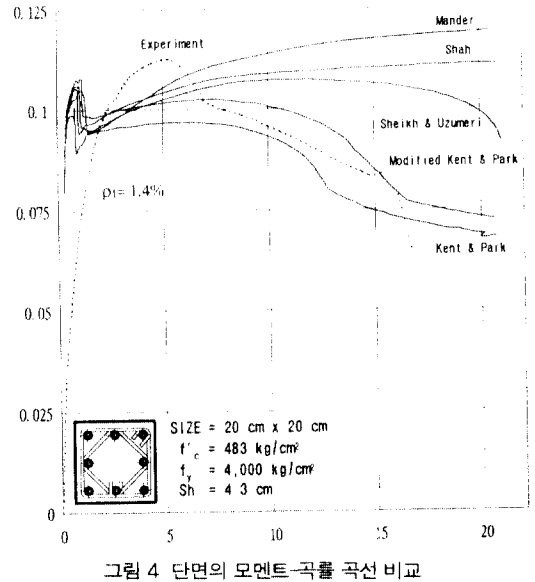


그림 4 단면의 모멘트-곡률 곡선 비교

3. 단면의 모멘트-곡률 곡선 비교

최근에 제안된 5개의 대표적인 구속 콘크리트 응력-변형도 모델을 이용한 축력과 모멘트를 동시에 받는 기둥 단면의 모멘트-곡률 곡선을 실제 실험체의 실험결과와 비교한다(그림 4 참조). 그림에서 보는 것과 같이 수정된 Kent와 Park의 모델이 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 응력-변형도 모델보써 수정된 Kent와 Park의 모델을 이용한다.

4. 단면의 모멘트-곡률 해석

총 56개의 시험체(Park의 3개, penzen의 12개, Sheikh의 20개, 이리형의 21개 시험체)에 대하여 축력의 크기, 주근비, 띠철근비, 띠철근 배근형태를 변수로 하여 단면의 모멘트-곡률곡선을 해석한다.

4.1 수정된 Kent와 Park의 응력-변형도 곡선

단면의 모멘트-곡률 해석에 있어 구속 콘크리트의 응력-변형도 모델로써 수정된 Kent와 Park의 응력-변형도 곡선(그림 5 참조)을 이용한다.

(1) $\epsilon_c < 0.002K$

$$f_c = K \cdot f'_c \cdot \left[\frac{2\epsilon_c}{0.002K} - \left(\frac{\epsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right] \quad (5)$$

(2) $\epsilon_c \geq 0.002K$

$$f_c = K \cdot f'_c \times [1 - Z_m(\epsilon_c - 0.002K)] > 0.2K \cdot f'_c \quad (6)$$

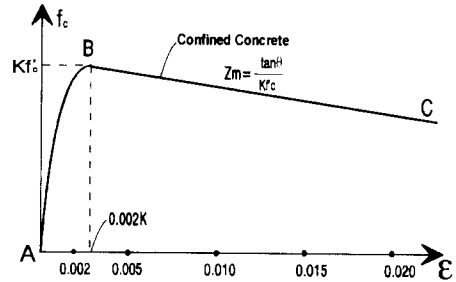


그림 5 수정된 Kent와 Park의 응력-변형도 곡선

여기서, $K = 1 + \frac{\rho_s \cdot f_{yh}}{f'_c}$

$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{(3 + 0.29f'_c)}{(145f'_c - 1000)} + \frac{3}{4} \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\frac{h}{S}} - 0.002K} \quad (7)$$

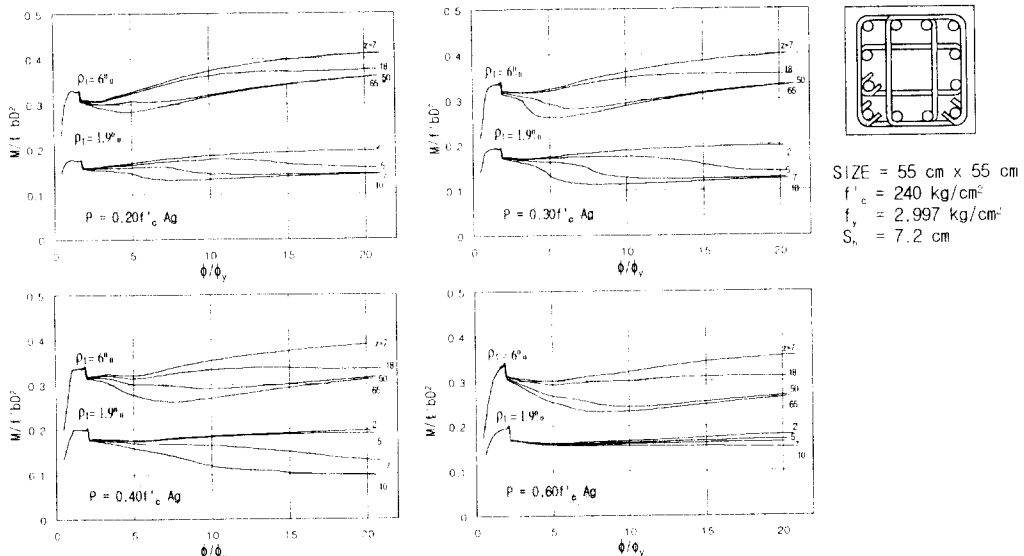


그림 6 단면의 모멘트-곡률 곡선

4.2 단면의 모멘트-곡률해석

기둥에서 요구되는 소요의 변형능력을 산정하기 위하여 단면의 곡률연성계수(ϕ_u/ϕ_s)를 이용한다. 즉, 기둥의 변형능력을 충분히 확보하기 위하여 Park가 제안한 단면의 모멘트 내력이 $\phi_u/\phi_s=16$ 일 때 최대 강도의 85%를 유지하거나 또는 Samra가 제안한 $\phi_u/\phi_s=12$ 일 때 최대 강도의 75%를 유지하도록 하는 Z_m 을 구한다(그림 6 참조).

4.3 띠철근량 산정

식 (7)을 띠철근 체적비 ρ_s 에 대하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\rho_s = \frac{\frac{0.5}{Z_m} - \frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.002}{\frac{3}{4} \sqrt{\frac{h}{s_h}} - 0.002 \frac{f_{yh}}{f'_c}} \quad (8) \quad \rho_s = \frac{A_{sh}' \cdot l}{A_{ch} \cdot s_h} \quad (9)$$

상기 식 (8)과 (9)로부터 띠철근 1개의 단면적(A_{sh}')과 총띠철근량(A_{sh})을 구하면,

$$A_{sh}' = \frac{s_h \cdot A_{ch} \cdot \left(\frac{0.5}{Z_m} - \frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.002 \right)}{l \cdot \left(\frac{3}{4} \sqrt{\frac{h}{s_h}} - 0.002 \frac{f_{yh}}{f'_c} \right)} \quad (10)$$

$$A_{sh} = k \cdot A_{sh}' \quad (11)$$

여기서, k 는 띠철근 형태 계수로써 R형=2, C형=3, D형= $2+\sqrt{2}$, RR형=4이다.

식 (11)에서 구한 띠철근량과 ACI 규준의 띠철근량을 축력비에 따라 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{A_{sh}}{A_{sh(aci)}} = \alpha \cdot \eta + \beta \quad (12) \quad (\alpha, \beta: \text{수치해석에 의한 상수}, \eta: \text{축력비})$$

이상과 같이 56개의 시험체에 대하여 축력의 크기, 주근비, 띠철근비, 띠철근 배근형태를 변수로 하여 단면의 모멘트-곡률곡선을 해석한 결과, 기둥에 작용하는 축력이 $0.3 f'_c A_g$ 이하인 저축력일 경우에는 ACI 규준에 의한 띠철근량과 거의 비슷하였고, $0.3 f'_c A_g$ 이상의 고축력일 경우에는 $A_{sh}/A_{sh(aci)}$ 의 값이 축력비에 비례하는 것으로 나타났다. 해석결과를 정리하면 표 1과 같다.(그림 7 참조).

표 1 띠철근량에 대한 해석결과

ϕ_u/ϕ_s	$A_{sh} / A_{sh(식3)}$		$A_{sh} / A_{sh(식3)}$	
	$\eta \leq 0.3$	$\eta > 0.3$	$\eta \leq 0.3$	$\eta > 0.3$
16	1	$4.878 \eta - 1.463$	1	$6.948 \eta - 1.459$
12	1	$1.732 \eta + 0.520$	1	$4.351 \eta - 1.305$

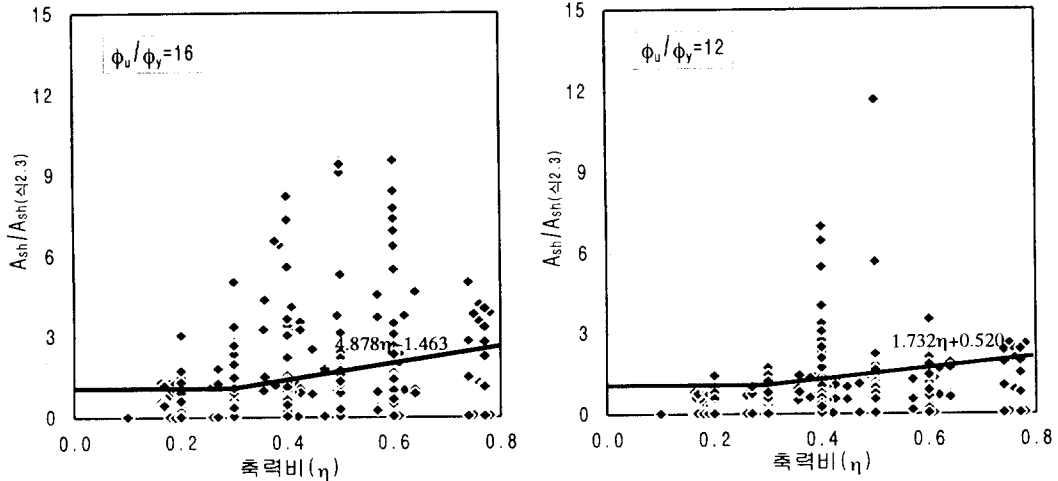


그림 7 축력비에 따른 띠철근량

5. 결 론

ACI 규준에서 띠철근량 산정시 띠철근 형태, 축력크기, 기둥의 거동 등은 고려하지 않고 있기 때문에 높은 변형능력을 요구할 시, 규준식을 그대로 적용하기에 의문이 제기된다. 따라서 장방향 기둥의 띠철근 설계에 있어서 충분한 연성을 확보하기 위해서는 기둥에 작용하는 축력의 크기를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 특히, 기둥에 $0.3 f'_c A_c$ 이상의 고축력이 작용할 경우에는 본 연구의 축력비를 고려하여 제한한 띠철근을 산정하면 현재의 ACI 설계 규준보다 합리적일 것으로 사료된다.

● 참고문헌 ●

1. 이리형 외 2인, "철근콘크리트 기둥의 탄소성 거동에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제 5 권 제 3 호, 1989. 6., pp. 215~226
2. Park, R., and Sampson, Richard A., "Ductility of Reinforced Concrete Column Sections in Seismic Design", ACI Journal, Proceedings V. 69, No. 9, Sept. 1972., pp.543~551
3. Park, R., Priestley, M. J. Nigel, and Gill, W.D., "Ductility of Square-Cocfined Concrete Columns", Proceedings, ASCE, V.108, ST4, Apr. 1982, pp. 929~950.
4. Priestley, M.J.N., and Park, R., "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading", ACI Structural Journal V.84, No.1, Jan.~Feb. 1987, pp.69~76
5. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)", ACI Committee 318, American Concrete Institute, 1989.
6. M. Samra, "Ductility Analysis of Confined Columns", ASCE, V.108, No.11, Nov. 1990, pp.3148~3161