

# 띠철근 강도가 고강도 철근콘크리트 기둥의 휨 거동에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Flexural Behavior of High-Strength Columns Confined by High-Strength Lateral Ties

문 호 권\*                      양 근 혁\*\*                      이 영 호\*\*\*                      정 현 수\*\*\*\*  
Moon, Ho Kwon              Yang, Keun Hyeok              Lee, Young Ho              Chung, Heon Soo

### ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the behavior of high strength concrete columns confined by rectangular ties under combined axial load and lateral load. This test was carried on the twelve reinforced concrete columns with  $200 \times 200 \times 800$ mm size subjected to combined axial load and lateral load. Effects of key variables such as the axial load level, the tie yield strength, the longitudinal reinforcement ratio are studied in this research program. The results of this study show that the efficiency of high strength lateral ties increase under high axial load level over  $0.4f_{ck}A_g$ . Also we found that well confined concrete column shows second peak moment after spalling of cover concrete under high axial load level.

### 1. 서론

고강도 콘크리트를 건축구조물에 적용하면 부재단면의 소형화, 조강화에 따른 공기단축, 수밀성 향상 및 중성화 속도의 저하로 인한 유지보수 비용의 절감 등 여러 장점이 있으나 취성적인 파괴경향 및 품질확보의 어려움 등으로 국내에서는 구조물에의 적용사태가 매우 드문 실정이다. 그러나 고강도 콘크리트의 장점에 대한 인식이 확산되고 취성파괴의 보완에 대한 연구자료가 충분히 확보된다면 국내에서도 구조물에의 적용빈도는 증가될 것으로 예상되며 본 실험은 그 기초자료의 확보를 위한 과정이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 축력과 횡력을 동시에 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 휨내력 및 연성에 영향을 미치는 계 변수들 중에서 띠철근 항복강도, 축력비율 주요변수로 채택하여 실험을 행하였으며 이를 바탕으로 고강도 철근콘크리트 기둥의 재료적 특성 파악 및 연성적 거동 확보를 위한 띠철근량 산정의 합리적 설계지침 정립의 기초자료를 제시하고자 한다.

\* 정회원, 중앙대학교 대학원 석사졸, 한울구조 사무소

\*\* 정회원, 중앙대학교 대학원 박사과정

\*\*\* 정회원, 중앙대학교 건축과, 동원대학 건축과 전임강사

\*\*\*\* 정회원, 중앙대학교 건축학과 교수

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

시험체 계획 및 실험결과 일람을 그림 1과 표 1에 나타내었다. 시험체 크기는 20×20×80cm로서 각 시험체의 중앙부 40cm를 시험구간으로 하였다. 전단스팬비는 3.0, 콘크리트 피복두께는 1.7cm로 하였으며 주철근은 SD40을, 띠철근은 항복강도 5,600, 10,000kgf/cm<sup>2</sup>의 지름 6mm 보통·고강도 띠철근을 사용하여 띠철근 강도에 따른 시험체 거동을 살펴보고자 하였다. 띠철근 체적비는 전체단면적의 3.9%로 동일하게 하였으며 축력비( $N/f_{ck}A_g$ )는 0.4에서 0.65까지 변화를 주어 축력비에 따른 영향도 살펴보았다. R형은 주철근을 12-D10, RR형은 12-D13을 사용한 시험체이다.

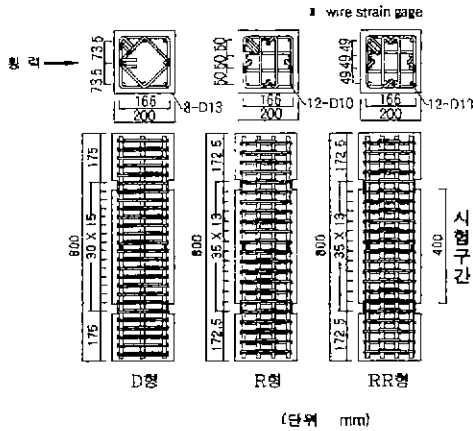


그림 1 시험체 단면상세

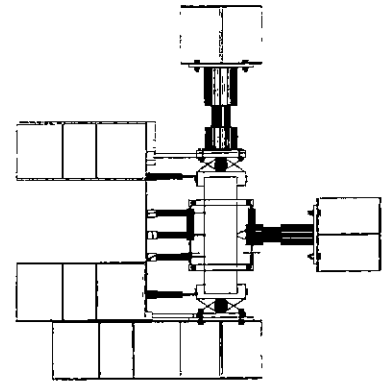


그림 2 가력장치 및 가력방법

표 1 시험체 상세 및 실험결과 일람표

| 시험체    | 콘크리트<br>압축강도<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 축력비<br>$\frac{N}{f_{ck} A_g}$ | 주근비<br>$P_g$<br>(%) | 띠철근 상세                             |             |                 | 최대 횡하중*                      |                   |                        | 최대 휨모멘트             |                           | 연성비<br>$\mu_f^{**}$ |       |
|--------|--|-------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------|-----------------|------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|-------|
|        |  |                               |                     | $f_{yk}$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $s$<br>(cm) | $\rho_f$<br>(%) | $\frac{A_{sh}}{A_{sh(ACI)}}$ | $P_{max}$<br>(tf) | $\Delta_{max}$<br>(mm) | $M_{max}$<br>(tf·m) | $\frac{M_{max}}{M_{ACI}}$ |                     |       |
| 8D40L  | 731                                    | 0.40                          | 2.54                | 5,600                              | 3.0         | 3.9             | 1.42                         | 31.3              | 5.30                   | 10.25               | 1.33                      | 8.38                |       |
| 8D40H  |  |                               |                     | 10,000                             |             |                 | 2.50                         | 31.3              | 5.89                   | 10.31               | 1.33                      | ∞                   |       |
| 8R40L  |  |                               | 2.13                | 5,600                              | 3.5         |                 | 1.42                         | 29.8              | 5.14                   | 9.77                | 1.32                      | 18.33               |       |
| 8R40H  |  |                               |                     | 10,000                             |             |                 | 2.51                         | 29.0              | 5.08                   | 9.51                | 1.28                      | ∞                   |       |
| 8D55L  |  |                               | 0.55                | 2.54                               | 5,600       |                 | 3.0                          | 1.42              | 31.2                   | 4.98                | 10.39                     | 1.40                | 8.71  |
| 8D55H  |  |                               |                     |                                    | 10,000      |                 |                              | 2.50              | 28.7                   | 4.85                | 10.06                     | 1.36                | 15.87 |
| 8R55L  |  | 2.13                          |                     | 5,600                              | 3.5         |                 | 1.42                         | 28.3              | 4.42                   | 9.80                | 1.38                      | 9.97                |       |
| 8R55H  |  |                               |                     | 10,000                             |             |                 | 2.51                         | 27.8<br>(28.5)    | 4.16<br>(7.45)         | 10.04               | 1.41                      | ∞                   |       |
| 8RR55L |  | 3.81                          |                     | 5,600                              | 3.5         |                 | 1.42                         | 31.0              | 4.27                   | 10.69               | 1.32                      | 14.61               |       |
| 8RR55H |  |                               |                     | 10,000                             |             |                 | 2.51                         | 33.0<br>(33.3)    | 5.03<br>(8.98)         | 11.69               | 1.44                      | ∞                   |       |
| 8R65L  |  | 710                           | 0.65                | 2.13                               | 5,600       |                 | 3.5                          | 1.47              | 25.9                   | 3.81                | 9.20                      | 1.48                | 8.52  |
| 8R65H  |  |                               |                     |                                    | 10,000      |                 |                              | 2.59              | 23.9<br>(25.8)         | 3.32<br>(6.75)      | 9.91                      | 1.59                | ∞     |

\* 괄호내의 값은 피복콘크리트 박리 이후의 두 번째 최대 횡하중과 그 때의 변위

\*\* 곡률연성비. Sheikh의 곡률연성비 산정법을 따랐으며 ∞표시는 실험종료시까지 모멘트 내력이  $0.8 M_{max}$  이하로 떨어지지 않은 경우임.

## 2.2 실험방법

그림2에 가력방법을 도시하였다. 실험은 200tf 유압잭을 이용해 목표 축력까지 가력한 후 50tf 유압잭으로 기둥 중앙부 단면에서 횡가력하였다. 시험구간에 수직방향으로 LVDT를 네 모서리에 설치해 시험체의 곡률을 측정하였으며 수평방향으로도 LVDT를 장착해 횡변위 및 회전각을 측정하였다. 주근 측정용 게이지는 압축철근과 인장철근에 각각 부착하였고 띠철근 변형도 측정용 게이지는 내·외부 띠철근에 1개씩 부착해 각각의 변형도를 관찰하였다. 실험은 기둥부재가 일정 축력을 유지하지 못할 때 또는 육안관찰에 따른 파괴정도가 너무 심하여 더 이상 횡하중 수용능력이 없다고 판단될 경우 종료하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 파괴 거동

전체적인 경향을 살펴보면 축력비가 증가할수록 퍼복콘크리트 박리 이전의 최대 횡하중(first peak)까지 휨크래크의 진전은 더디었는데, 축력비  $0.4f_{ck}A_g$ 의 경우 첫 번째 최대내력전까지 휨균열이 인장측 단부로부터 8~9cm정도까지 진전되었고  $0.5f_{ck}A_g$ 의 축력비에서는 6~7cm까지,  $0.55f_{ck}A_g$ 의 축력비에서는 4~5cm까지, 그리고 축력비  $0.65f_{ck}A_g$ 의 경우 약 2cm까지밖에 휨 균열이 진전되지 않는 것으로 보아 축력비가 증가함에 따라 중립축 깊이가 깊어지는 것을 확실히 관찰할 수 있었다.

그림 3에 축력비에 따른 횡하중-휨변위 관계를 나타내었다. 고강도 띠철근을 사용했을 경우에는 보통강도 띠철근을 사용한 경우보다 압축측 주근의 좌굴길이가 짧았으며 외부 띠철근의 배부름도 작게 관찰되었다. 이것은 높은 강성의 띠철근이 주근의 조기 좌굴을 효과적으로 방지해 주근의 능력이 충분히 발휘되도록 하였기 때문이라 생각되며 같은 이유로 고강도의 내부 띠철근이 중간 주근을 강력히 구속함으로써 단면의 횡팽창을 억제해 보통강도 띠철근을 사용한 경우보다 외부 띠철근의 배부름 현상이 덜한 것으로 사료된다. 보통강도 띠철근을 사용한 시험체에서는 압축측 주근의 좌굴이 D13 주근의 경우 대체로 띠철근에 의해 지지된 경간의 3배에 걸쳐 일어났으며 D10 주근의 경우는 1~2 경간에 걸쳐 발생하였다. 반면, 고강도 띠철근을 사용한 시험체에서는 D13 주근의 경우 2경간 정도에 걸쳐 좌굴이 일어났으나 보통강도 띠철근을 사용한 경우처럼 좌굴 정도가 심각하지는 않았으며 고축력일수록 고강도 띠철근을 사용한 시험체가 연성적인 거동을 보였다.

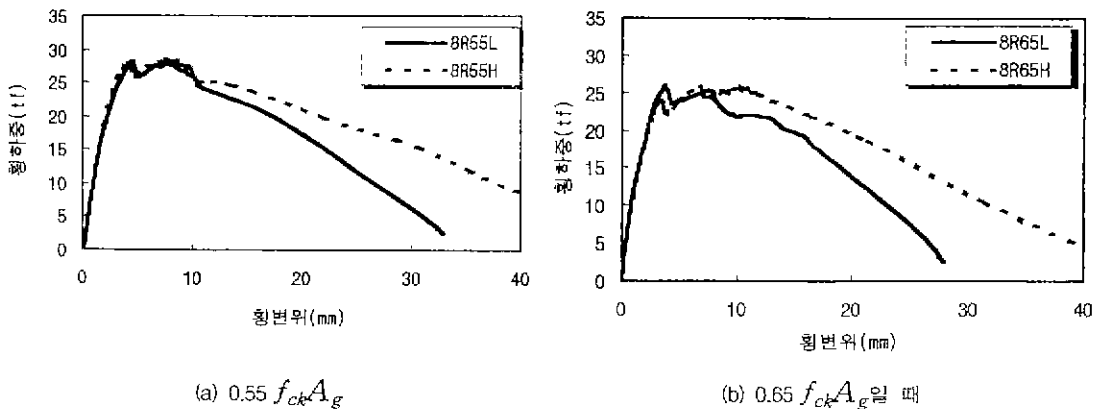


그림 3 축력비에 따른 횡하중-휨변위 관계

### 3.2 축력비의 영향

그림 4에 축력비에 따른 곡률 연성비의 변화를 나타내었다. 그림 4에서 축력비가  $0.4f_{ck}A_g$ 에서  $0.65f_{ck}A_g$ 까지 증가함에 따라 곡률연성비는 18.33에서 8.52로 감소하였으며 특히 축력비  $0.4f_{ck}A_g$ 에서  $0.55f_{ck}A_g$ 로 증가되었을 때 곡률연성비는 18.33에서 9.97로 거의 절반수준으로 감소하였다. 이를 볼 때 축력비  $0.4f_{ck}A_g$  이상에서는 기둥의 연성확보를 위한 특별한 주의가 필요하다고 하겠다. 또한 축력비  $0.55f_{ck}A_g$  이상에서는 피복 콘크리트의 박리 후 모멘트 내력이 재상승하는 경향을 보였는데 이는 피복 콘크리트 박리 이후 띠철근 응력발휘가 크게 있으면서 압축측 콘크리트를 효율적으로 구속하여 압축 콘크리트의 내력 상승과 인장측 주근의 내력상승에 따른 것으로 보인다. 즉, 그림 5에서 보여 주듯이 띠철근 보강이 양호한 경우 압축주근의 좌굴을 방지하는 동시에 콘크리트를 효과적으로 구속해 휨내력 감소가 매우 미소한 반면 인장주근은 피복박리 시점의 변형도가 항복 변형도에 훨씬 못미처므로 지속적으로 응력이 상승하게 되며 이것이 시험체 전체 휨내력 상승의 원인이 되는 것으로 보인다.

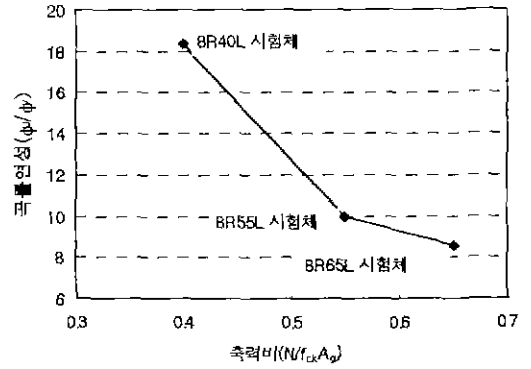
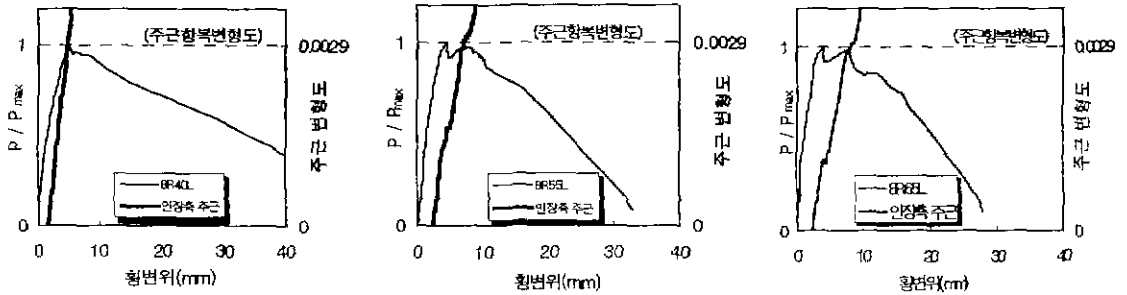


그림 4 축력비 - 곡률연성의 관계



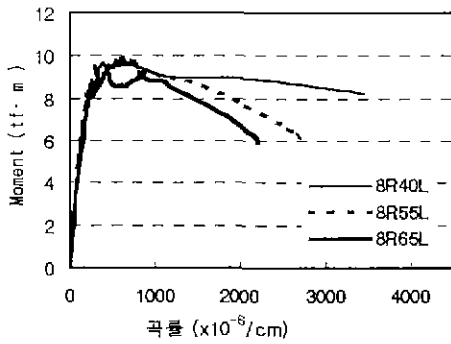
(a) 축력비  $0.4N/f_{ck}A_g$ 일 때 (b) 축력비  $0.55N/f_{ck}A_g$ 일 때 (c) 축력비  $0.65N/f_{ck}A_g$ 일 때

그림 5 축력비에 따른 시험체 거동 및 인장주근 변형도와와의 관계

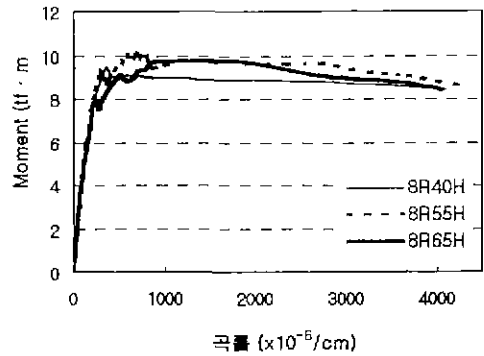
### 3.3 띠철근 강도의 영향

그림 6에 띠철근 강도에 따른 시험체 거동의 차이를 나타내었다. 본 실험의 경우처럼 띠철근 보강이 양호한 경우 축력비  $0.4f_{ck}A_g$ 에서는 모두 양호한 거동을 보였으나  $0.55f_{ck}A_g$  이상의 축력비에서는 저강도 띠철근을 사용한 시험체는 곡률연성이 급격히 감소하였고, 고강도 띠철근을 사용한 시험체는 축력에서도 매우 연성적인 거동을 보였다. 즉, 피복 콘크리트가 박리하기 이전인 첫 번째 최대내력까지는 띠철근의 응력발휘는 없었지만, 피복 콘크리트가 박리한 이후의 두 번째 최대내력부터는 띠철근 응력발휘가 급격히 증가하며 고강도 띠철근일수록 응력발휘가 크게 있어 내력 및 연성이 증가하였고 이러한 경향은 중립축 깊이가 큰 고축력일수록 뚜렷하였다.

이 결과만으로 보면 고강도 띠철근은  $0.4f_{ck}A_g$  이상의 고축력에서 그 효율성이 크다고 판단된다. 그러나 띠철근 강도의 증대가 기둥 최대 휨하중 내력 상승에는 영향을 미치지 않는 것으로 보이며 단지 고축력에서 최대 휨 내력 이후 고강도 띠철근이 응력발휘가 커 압축측 콘크리트를 효율적으로 구속하여 연성이 증가하는 것으로 판단된다.



(a) 보통강도 띠철근을 사용했을 때



(b) 고강도 띠철근을 사용했을 때

그림 6 띠철근 강도에 따른 곡률연성의 차이

### 3.4 주근비(주근지름)의 영향

그림 7에 12-D10(주근비 2.13%) 시험체와 12-D13(주근비 3.81%) 시험체의 거동을 비교한 그래프를 보인다. 두 경우를 비교한 결과 D13 주근을 사용한 시험체의 연성이 더 양호한 것으로 나타났으며 그 원인은 주근지름이 클수록 횡지지원 주근의 세장비가 크게 있어 압축주근의 조기좌굴을 방지하기 때문이라 판단된다.

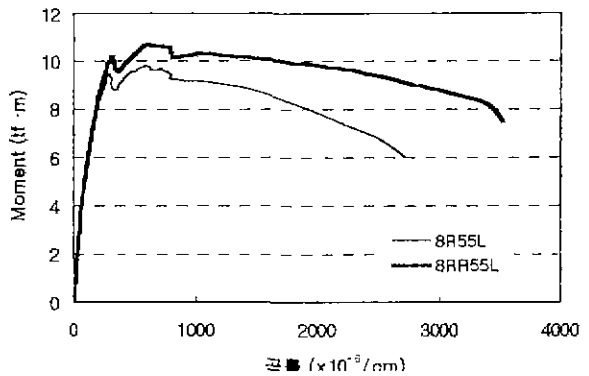


그림 7 주근비 - 휨거동 관계

### 3.5 띠철근량에 대한 설계기준과의 비교

그림 8에 본 시험체의 띠철근량과 ACI 및 NZS 규준 띠철근량과의 관계를 나타내었다. 본 시험체의 띠철근량은 ACI 규준보다 최소 1.42배 많은 양이었으며 강도감소계수( $\phi$ ) 1을 적용한 NZS 규준의 띠철근량에 대해서는 최소 1.05배였는데 4개의 시험체가 곡률연성비(Sheikh 산정법 기준) 10미만으로 나타나 곡률연성비 16 이상을 확보하지 못하였다. 이 4개의 시험체는 모두 ACI 띠철근 요구량의 1.4배 정도로 배근한 시험체였던 것으로 볼 때  $0.4f_{ck}A_g$  이상의 고축력을 받는 기둥에 대해서는 ACI 규준의 내진소요 띠철근량을 축력비의 영향을 고려해 상향조정할 필요가 있다고 사료된다. NZS 규준의 경우 실제의 기둥 단면 설계에서와 같이 1미만의 강도감소계수( $\phi$ )를 적용하게 되면  $0.4f_{ck}A_g$  이상의 고축력에서도 대체로 안정적인 것으로 보인다.

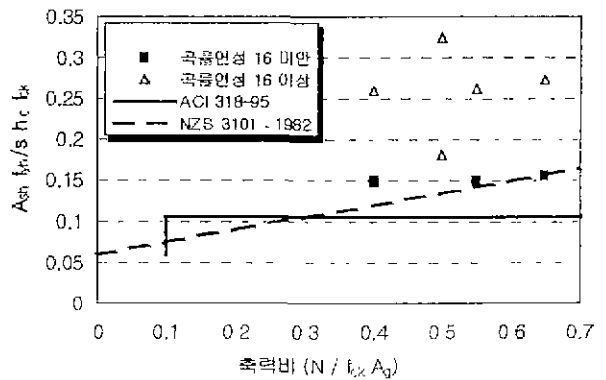


그림 8 띠철근량에 대한 설계기준과 곡률연성비의 관계

#### 4. 결 론

본 연구는 축력과 휨을 동시에 받는 고강도 RC 기둥의 휨내력 및 연성적 거동에 영향을 미치는 제 변수들 중 축력비, 띠철근 강도, 주근비를 주요 변수로 하여 실험하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고강도 띠철근에 의해 구속이 충분히 된 경우  $0.55f_{ck}A_g$  이상의 고축력에서는 피복 콘크리트가 파괴된 이후에도 고강도 띠철근의 큰 응력발휘에 의한 압축축 콘크리트 내력 상승 및 아직 항복하지 않은 인장주근의 응력발휘에 의해 휨 내력이 다시 상승하여 두 번째 최대 내력점을 나타낸다.

(2) 고강도 띠철근을 사용하더라도 기둥의 최대 횡하중 내력에는 영향이 없다. 다만 최대 내력 이후의 연성적 거동 확보에 고강도 띠철근이 효과적이며, 특히  $0.4f_{ck}A_g$  이상의 고축력에서 그 효율이 크다.

(3) 동일조건인 경우 주근비가 클수록(주근 지름이 클수록) 기둥이 더 연성적 거동을 보이며, 특히 고축력을 받는 시험체인 경우 그 경향은 뚜렷하게 나타났다.

(4) 고축력을 받는 기둥에 대해서는 ACI 규준의 내진소요 띠철근량을 축력비의 영향을 고려해 상향 조정할 필요가 있다고 사료된다. NZS 규준의 경우 실제의 기둥 단면 설계에서와 같이 1미만의 강도감소계수( $\phi$ )를 적용하게 되면  $0.4f_{ck}A_g$  이상의 고축력에서도 대체로 안정적일 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 1999년도 학술진흥재단(과제번호 : 1998-001-E02104)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 대한건축학회, "극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산규준 및 해설", 1988
2. ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95). American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1995
3. 양근혁, 정현수, "정보강근으로 구속된 철근콘크리트 기둥의 휨내력과 연성에 관한 연구", 중앙대학교 대학원 석사학위논문, 1999.2
4. 문호권, 정현수, "띠철근 강도에 따른 고강도 RC 기둥의 휨 거동에 관한 실험적 연구", 중앙대학교 대학원 석사학위논문, 1999.6
5. Sheikh, S. A., and Khoury, S. S., "A Performance-Based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns," *ACI Structural Journal*, V.94, No.4, July-Aug. 1997, pp.421-431.
6. Bayrak, O., and Sheikh, S. A., "High-Strength Concrete Columns under Simulated Earthquake Loading", *ACI Structural Journal*, V.94, No.6, Nov.-Dec.1997, pp.708-722.
7. Dimiz, S. M. C., and Frangopol, D. M., "Reliability Bases for High-Strength Concrete Columns", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.123, No.10, Oct.1997, pp.1375-1381.
8. Issa, M. A., and Tobaa, H., "Strength and Ductility Enhancement in High-Strength Confined Concrete", *Magazine of Concrete Research*, V.46, No.168, Sept.1994, pp.177-189.
9. Mau, S. T., "Effect of Tie Spacing on Inelastic Buckling of Reinforcing Bars", *ACI Structural Journal*, V.87, No.6, Nov.-Dec.1990, pp.671-677
10. Muguruma, H., and Watanabe, F., "Ductility Improvement of High-Strength Concrete Columns with Lateral Confinement", *High-Strength Concrete*, Second International Symposium, ACI Special Publication SP-121, Apr. 1990, pp.47-60.
11. Sakino, K., Sun, Y. P., and Yoshioka, T., "Flexural Behavior of High-Strength RC Columns Confined by Rectilinear Reinforcement", *J. Struct. Constr. Eng.*, AIJ, No 486, Aug 1996, pp.95-106.