

## 횡보강근에 따른 고강도 콘크리트 기둥의 휨강도와 연성

황선경<sup>1)\*</sup> · 윤현도<sup>1)</sup> · 정수영<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 건축공학과

(2001년 12월 8일 원고접수, 2002년 3월 25일 심사완료)

### Effects of Transverse Reinforcement on Flexural Strength and Ductility of High-Strength Concrete Columns

Sun-Kyoung Hwang<sup>1)\*</sup>, Hyun-Do Yun<sup>1)</sup>, and Soo-Young Chung<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

(Received December 8, 2001, Accepted March 25, 2002)

#### ABSTRACT

This experimental investigation was conducted to examine the behavior of eight a third scale columns made of high-strength concrete(HSC). The columns were subjected to constant axial load corresponding to target value of 30 percent of the column axial load capacity and a cyclic horizontal load-inducing reversed bending moment. The variables studied in this research are the volumetric ratio of transverse reinforcement( $\rho_s=1.58, 2.25\%$ ), tie configuration(hoop-type, cross-type, diagonal-type) and tie yield strength( $f_y=5,600, 7,950$  kgf/cm<sup>2</sup>).

Test results indicated that the flexural strength of all the columns did not exceed calculated flexural capacities based on the equivalent concrete stress block used in current design code. Columns with 42 percent higher amounts of transverse reinforcement than that required by seismic provisions of ACI 318-99 were shown ductile behavior. With axial load of 30 percent of the axial load capacity, the use of high-strength steel as transverse reinforcement may lead to equal or higher ductility than would be achieved with low-strength steel.

**Keywords:** high-strength concrete, tied columns, transverse reinforcement, flexural strength, ductility

#### 1. 서 론

최근 건축기술의 발전으로 건축물이 고층화 및 대형화됨에 따라 하부층 기둥에서는 풍하중이나 지진하중과 같은 횡하중에 대해 높은 층전단력과 전도 모멘트가 발생하기 때문에 고축력에 저항할 수 있는 고강도 콘크리트의 사용이 요구되고 있다. 이러한 고강도 콘크리트는 기둥의 강성 증가, 부재단면의 축소, 조기 강도 발현에 따른 공기 단축, 필요한 정착길이를 감소시키는 등 여러 이점을 가지고 있다.

그러나, 고강도 콘크리트는 높은 압축강도를 가지는 반면 취성적으로 파괴되는 성질이 있으며, 특히 높은 압축력을 받는 기둥에서는 이러한 취성파괴를 억제하고 연성을 증진하기 위한 연구가 시급히 요구되고 있다. 이러한 고강도 콘크리트의 연성을 증가시키기 위한 방안으로 횡보강근에 의한 구속방법에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행중에 있다. 이러한 횡보강근에 의한 구속력에 영향

을 미치는 주요 변수들로는 횡보강근의 형태, 체적비 및 항복강도, 콘크리트 압축강도 등이 있다.

한편, 기둥이 소정의 변형능력을 확보하도록 ACI 318 규준<sup>1)</sup>에서는 규정된 양 이상의 횡보강근으로 심부콘크리트를 구속시키도록 의무화하고 있다. 하지만, 현행 설계규준은 저강도 및 보통강도 콘크리트에 대한 실험적 연구를 근거로 하여 정립되었기 때문에 고강도 콘크리트 기둥에 대한 규준 정립의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 고강도 콘크리트의 휨강도 산정시 콘크리트의 응력분포, 횡보강근의 구속효과 등 여러 가지 의문이 제기되고 있는 실정이다<sup>2)</sup>. 그리고, 고강도 콘크리트는 부재의 취성적 성질 때문에 지진시 하부층 기둥의 소성힌지 발생은 불가피한 것으로 보고되고<sup>3)</sup> 있어 고강도 재료를 건물에 실용화하기 위해 우선적으로 고강도 철근콘크리트 기둥에 대한 역학적 특성 및 거동에 대한 연구가 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 반복하중을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥에 있어 횡보강근 형태, 체적비 및 항복강도를 변수로 하여 이러한 요인이 고강도 콘크리트 기둥의 이력 특성에 미치는 영향을 구명하고, 고강도 철근콘크리트 기둥 설계 규준작성을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

\* Corresponding author

Tel : 042-821-6281 Fax : 042-823-9467

E-mail : skh@cnu.ac.kr

## 2. 기존 등가응력블럭 제안식

축력과 모멘트를 받는 기둥 설계에는 일반적으로 등가 사각형 응력블럭이 사용되고 있다. 이 응력블럭은 Mattock et al.<sup>4)</sup>에 의해 식 (1)과 같이 최초로 제안되었으며 응력블럭을 정의하기 위해 Fig. 1과 같이 2개의 변수  $\alpha_1$ (응력블럭의 크기계수)과  $\beta_1$ (응력블럭의 깊이계수)을 사용하고 있다. 그러나 이러한 식의 적용범위로서 콘크리트 압축강도가 52.5 MPa(540 kgf/cm<sup>2</sup>) 이하인 경우로 제한하고 있다. 여기서,  $f'_c$ 는 콘크리트 압축강도(MPa 단위)이다.

$$\alpha_1 = 0.85, \beta_1 = 1.05 - 0.05(f'_c/6.9) \leq 0.85 \quad (1)$$

한편, Nedderman<sup>5)</sup>은 콘크리트 강도가 52.5 MPa를 초과하는 경우에  $\beta_1$ 의 한계값으로 0.65를 사용하도록 제안하였다. 이상의 제안들이 현행 ACI 318-99규준에 포함되어 있다.

Bing et al.<sup>6)</sup>은 고축력을 받는 기둥실험을 통하여 등가 응력블럭을 식 (2)와 같이 제안하였다. 여기서, 등가응력블럭의 평균응력은  $\alpha_1 \cdot f'_c$ 이다.

$$f'_c \leq 55 \text{ MPa}, \alpha_1 = 0.85$$

$$f'_c > 55 \text{ MPa}, \alpha_1 = 0.85 - 0.004(f'_c - 55) \geq 0.75 \quad (2)$$

Azizinamini et al.<sup>7)</sup>은 콘크리트 압축강도( $f'_c$ )가 70 MPa(720 kgf/cm<sup>2</sup>)를 초과하는 경우 등가응력블럭의 크기가 0.85에서 0.6까지 선형적으로 감소하는 것으로 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0073(f'_c - 69) \geq 0.6 \quad (3)$$

Ibrahim et al.<sup>8)</sup>은 고강도 및 보통강도 콘크리트에 모두 적용할 수 있는 새로운 등가응력블럭을 아래 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.00125f'_c \geq 0.725$$

$$\beta_1 = 0.95 - 0.00250f'_c \geq 0.70 \quad (4)$$

## 3. 실험 계획

### 3.1 시험체 제작

시험체는 총 8개를 계획하였으며 시험체 특성은 Table 1과 같다. 시험체의 상하에 고정단 효과와 가력을 위한 2개의 스테브(Stub)를 두어 제작하였으며, 기둥 단면은 Fig. 2와 같이 200 mm × 200 mm × 600 mm로 하였다.

전단경간비는 모든 시험체에 대하여 4.0으로 동일하게 하였으며, 시험체의 보강용 철근으로 사용되는 주근은 SD40의 직경 13 mm인 이형철근 8본(주근비 2.54%)을 사용하였다. 시험체의 상하단 스테브는 500 mm × 400 mm × 400 mm로 하여 기둥부재보다 충분한 강도와 연성을 갖도록 HD10 및 HD13 철근으로 충분히 보강하였다.

또한, 시험체의 스테브 부분은 상하단에 각각 6개의  $\psi$  32 mm 고력볼트로 반력 프레임에 고정하였다. 횡보강근의 후크 구부림 각도는 135°로 하였으며, 후크 길이는 모두 횡보강근 직경의 6배 이상으로 하였다. 콘크리트는 700 kgf/cm<sup>2</sup>급으로 하여 레미콘을 사용하여 타설하였으며, 진동다짐기 및 강봉을 사용하여 충분히 다짐을 실시하였다.

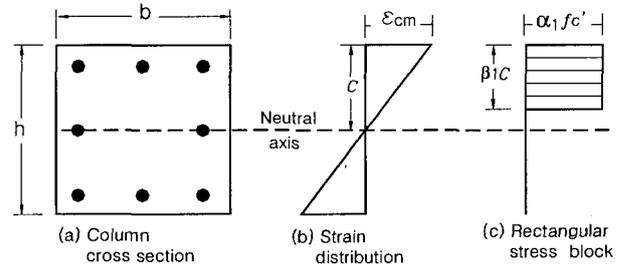


Fig. 1 Concrete equivalent stress block

Table 1 Properties of specimens

Specimen designation	Transverse reinforcement							Longitudinal bar			$f_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Set
	Bar size	Spacing (cm)	Detail <sup>1)</sup>	$\rho_s^{2)}$ (%)	$\frac{\rho_s}{\rho_{s(ACI)}}$	$f_{yh}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\frac{\rho_s \cdot f_y}{f_{ck}}$	Bar size	$f_{yh}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\rho_f$ (%)		
C-S	$\psi$ 6	5.7	C	1.58	1.00	7,950	17.94	8-D13	4,395	2.54	700	S-series
D-S	$\psi$ 6	6.5	D	1.58	1.00	7,950	17.94	8-D13	4,395	2.54	700	
H-S	$\psi$ 6	3.8	H	1.58	1.00	7,950	17.94	8-D13	4,395	2.54	700	
C-A	$\psi$ 6	4.0	C	2.25	1.42	7,950	22.55	8-D13	4,395	2.54	700	A-series
D-A	$\psi$ 6	4.6	D	2.25	1.42	7,950	22.55	8-D13	4,395	2.54	700	
H-A	$\psi$ 6	2.7	H	2.25	1.42	7,950	22.55	8-D13	4,395	2.54	700	
L-C-S	$\psi$ 6	4.0	C	2.25	1.00	5,600	18.00	8-D13	4,395	2.54	700	L-series
L-D-S	$\psi$ 6	4.6	D	2.25	1.00	5,600	18.00	8-D13	4,395	2.54	700	

1) Details of transverse reinforcements ( C ; cross-type, D ; diagonal-type, H ; hoop-type )

2) Ratio of transverse reinforcement over spacing S to core volume of concrete confined by transverse reinforcement (measure out-to-out)

### 3.2 재료실험

#### 3.2.1 콘크리트 강도실험

시험체 제작에 사용된 콘크리트 조골재의 최대직경은 19 mm, 슬럼프 21 cm, 설계기준강도는  $700 \text{ kgf/cm}^2$ 로 하였으며, KS F 2404에 준하여 제작 및 양생된 각 재령별 표준공시체에 대한 콘크리트 압축강도와 재령 28일시 탄성계수는 Table 2와 같다.

#### 3.2.2 철근의 인장강도 실험

본 연구에서는 D13,  $\psi 6$ 의 고강도 철근을 사용하였으며, 사용된 철근의 재료특성을 파악하기 위하여 KS D 0801 (금속재료 인장시험편 규정)에 따라 시험편을 제작하였으며, KS D 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 인장시험을 실시하였다. 철근의 인장실험 결과는 Table 3과 같다.

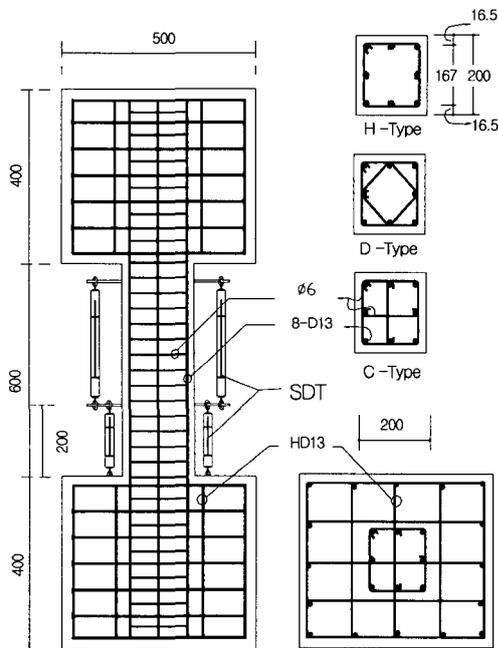


Fig. 2 Details of specimens (unit : mm)

Table 2 Compressive strengths of concrete

Age (days)	Average strength ( $\text{kgf/cm}^2$ )					$E_c(\text{kgf/cm}^2)$
	3	7	10	21	28	
Strength ( $\text{kgf/cm}^2$ )	465	522	598	647	701	$3.38 \times 10^5$

Table 3 Properties of reinforcement

	$E_s$ $\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$	$f_y$ $\text{kgf/cm}^2$	$\epsilon_y$ $\times 10^{-6}$	$f_u$ $\text{kgf/cm}^2$	Elongation (%)
D13	1.787	4,395	2,448	5,764	18
$\psi 6$	2.070	7,950	5,700	8,650	15.2
$\psi 6$	2.100	5,600	4,600	5,980	13.8

횡보강근에 따른 고강도 콘크리트 기둥의 휨강도와 연성

### 3.3 실험방법

지진하중시 저층부의 응력상태를 재현하기 위하여 Fig. 3과 같이 시험체를 가력골조내에 수직으로 설치하였고 고강도 강재로 제작한 재하보에 시험체 상하단 스티브를 고력강봉으로 연결한 후 시험체의 상부에 설치된 100tf용량의 유압잭으로 일정 축하중을 가력하였다. 수평하중은 시험체 중앙부와 같은 높이의 프레임에 설치된 100tf용량의 유압잭으로 Fig. 4와 같이 부재에 발생하는 항복변위( $\delta_y$ )까지는 하중제어를 하였고, 그 이후에는 항복변위의 배율로 점증 반복가력하였다. 재하단계별 기둥의 이력특성을 파악하기 위하여 2개의 변위계(SDT)에 의하여 횡변위 및 축변위를 측정하였다. 또한, 시험체의 곡률 및 휨변위를 측정하기 위하여 기둥의 측면에 4개의 변위계를 설치하였다. 또한, 재하단계별 주근 및 횡보강근의 변형상태를 파악하기 위하여 지정된 부위에 철근 변형을 측정 게이지(WSG)를 부착하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 균열 및 파괴상황

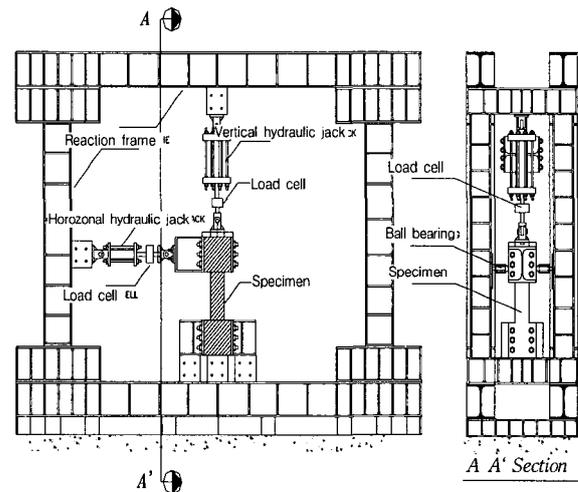


Fig. 3 Test setup and loading condition

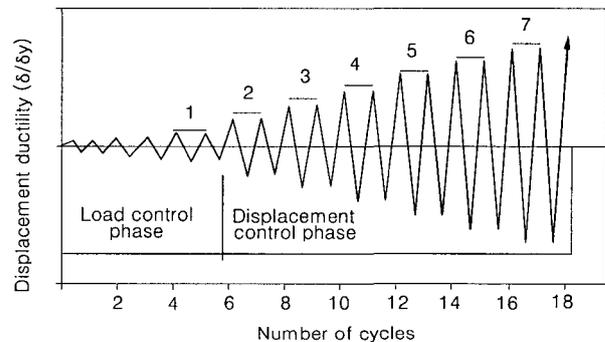


Fig. 4 Lateral displacement sequence

Fig. 5는 시험체의 재하하중에 따른 횡변위, 균열진전 및 보강근의 항복상황을 모식적으로 표현한 것으로 모든 시험체가 이와 유사한 과정을 거쳐 최종파괴되었다.

Photo 1은 H-S 시험체의 연성비에 따른 균열 및 파괴 상황을 나타낸 것으로 횡변위가 초기 항복변위에 도달하기 전 기둥 하단으로부터 5~20cm 상부의 인장측에서 초기 휨균열이 발생하였다. 주근의 항복시까지 하중이 증가됨에 따라 휨균열은 중앙부로 점차 진전되었다. 그 후, 연성비 1~2에서 최대내력을 경험하면서 균열은 휨전단균열로 발전되었으며 특히, 횡보강근 체적비를 ACI 규준에서 요구하는 양보다 42%증가시킨 A계열 시험체가 규준에 따른 S계열 시험체보다 작은 전단균열각을 보이고 있었다. 이는 A계열 시험체의 경우, 증가된 횡보강근이 전단균열을 지연 및 억제하려는 작용을 하고 있기 때문인 것으로 사료된다. 그 후 시험체는 연성비 3에 이르러 횡하중이 감소하면서 전단균열이 더욱 진전되었고 기둥 하단에서 피복콘크리트가 박리되기 시작하였으며 최종적으로 소성힌지부에서 휨전단 파괴되는 양상을 보였다.

#### 4.2 하중-변위 관계

Fig. 6은 일정축력(0.3 P<sub>0</sub>, P<sub>0</sub>는 중심축내력)하에서 횡하중을 점진 반복가력하여 얻은 하중-변위 곡선이다. 그림에서 실선으로 표현된 V<sub>if</sub>는 ACI 규준에 준하여 산정된 휨강도를 기둥의 높이(기둥 하단부에서 횡하중 가력점까지의 거리)로 나눈 계산값이며, 점선으로 표현된 V<sub>y</sub>는 횡하중 증가로 인해 주근이 최초로 항복한 시점에서의 횡하중(초기 항복하중)이다. 그림에 나타나 바와 같이 대부분 시험체의 경우, 규준에 의한 계산값 V<sub>if</sub>에 대한 각 시험체의 최대내력의 비율이 0.87~1.01 범위로 나타났다.

횡보강근 체적비에 따른 이력거동을 살펴보면, ACI 규준에서 요구하는 횡보강근 체적비보다 42%증가시킨 A계열 시험체(H-A, C-A, D-A)는 최대내력 이후 연성비 4에서의 내력감소가 17%~28%에 이른 반면, ACI 규준에 준하여 횡보강된 S계열 시험체(H-S, C-S, D-S)의 경우에는 35%~43%의 내력감소를 보이고 있었다. 이는 횡보강근비의 증가로 횡보강근이 주근의 조기좌굴을 억제하고, 주근과 콘크리트 사이의 일체성을 향상시켜 효과적으로 심부콘크리트를 구속시켰기 때문인 것으로 판단된다.

동일한 체적비로 횡보강된 시험체의 경우, 횡변위 10.5 mm(연성비 4)에서의 내력저하를 비교한 결과, 횡보강근 항복강도가 7,950 kgf/cm<sup>2</sup>인 A계열 시험체(C-A, D-A)와 횡보강근 항복강도가 5,600 kgf/cm<sup>2</sup>인 L계열 시험체(L-C-S, L-D-S)와는 큰 차이를 보이지 않았다.

#### 4.3 휨 강도

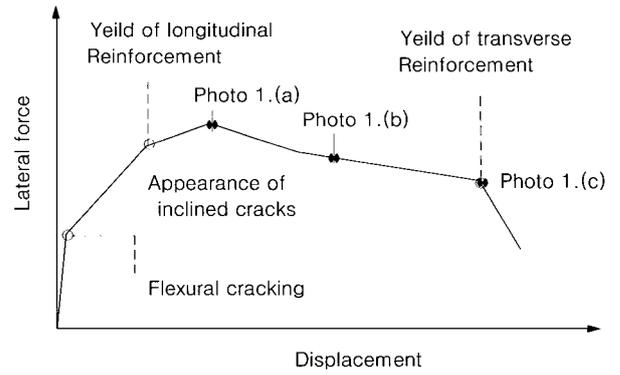
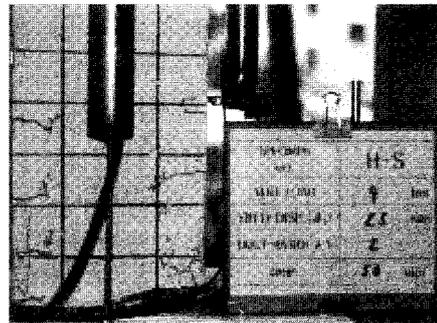
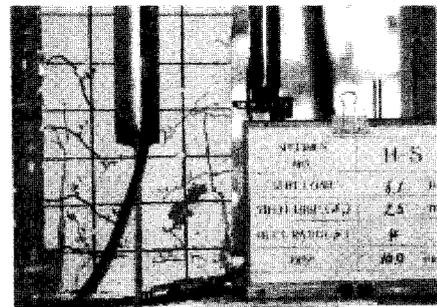


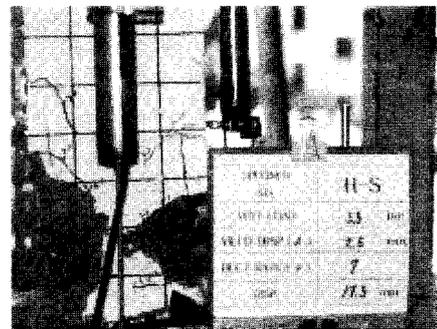
Fig. 5 Summary of observed behavior



(a) After 2 cycles to  $\mu\Delta = 2$  ( $R = 0.0083$  rad)

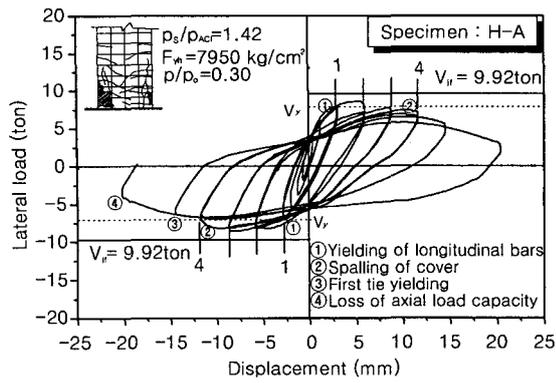


(b) After 2 cycles to  $\mu\Delta = 4$  ( $R = 0.0166$  rad)

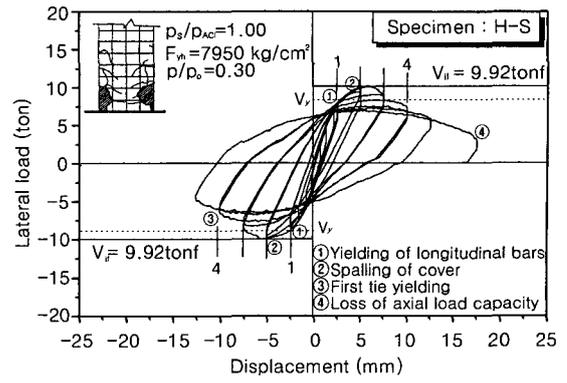


(c) At end of testing

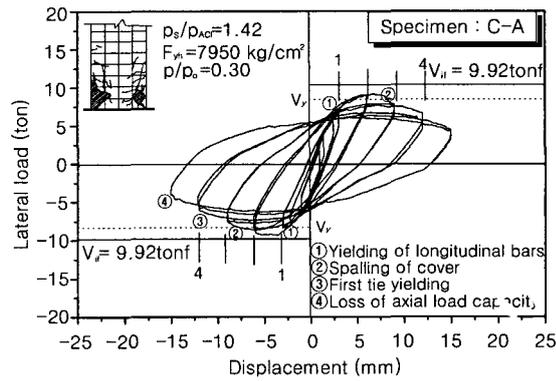
Photo 1 Column H-S at each stage of testing



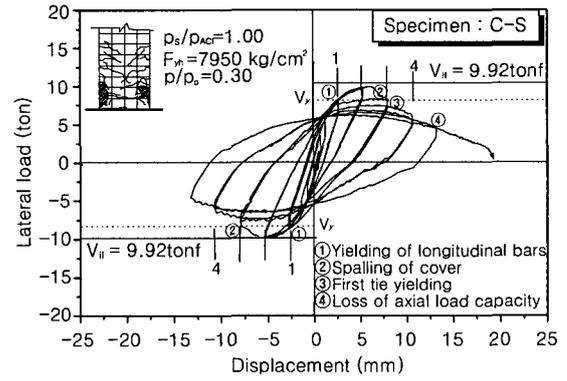
(a) Column H-A



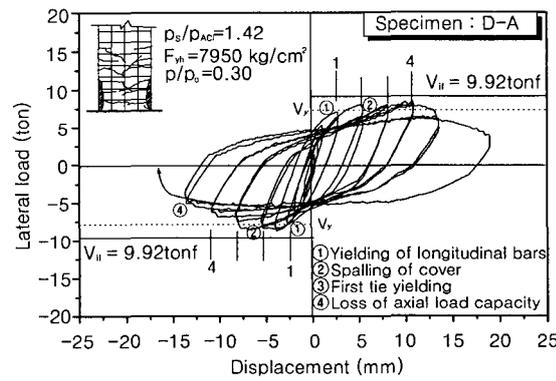
(b) Column H-S



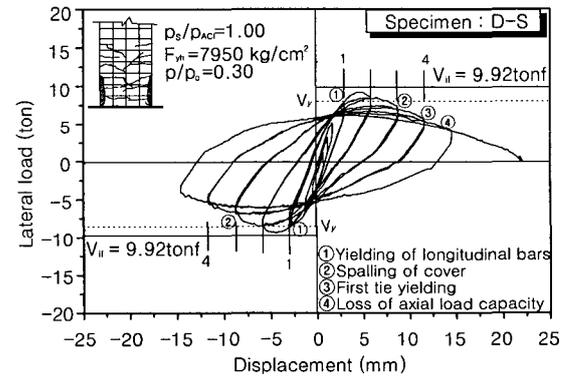
(c) Column C-A



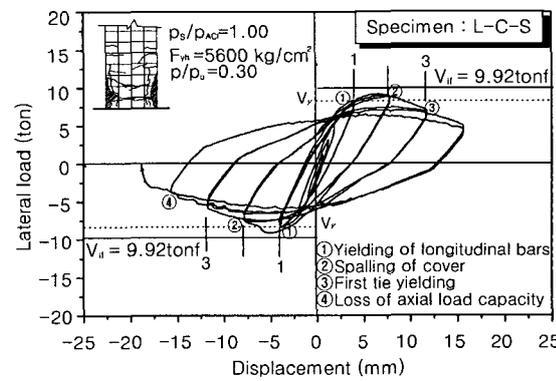
(d) Column C-S



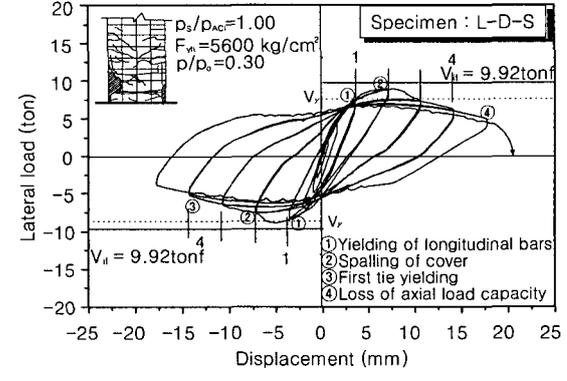
(e) Column D-A



(f) Column D-S



(g) Column L-C-S



(h) Column L-D-S

Fig. 6 Lateral load-displacement response

시험체별 휨강도는 횡하중에 의한 1차모멘트와 축하중에 의한 2차모멘트를 더하여 산정하였으며 이를 기존 제안식에 의한 계산값과 비교하여 Table 4에 나타내었다. Table에 나타난 바와 같이 실험값  $M_{exp}$ 은 변수에 따라 7.20~8.07 tf·m 범위로 나타났으며, 계산값인  $M_{ACI}$ ,  $M_{Ibrahim}$ ,  $M_{Bing}$  및  $M_{Aziz}$ 은 각각 8.11 tf·m, 7.87 tf·m, 7.70 tf·m, 7.49 tf·m으로 나타나 Azizinamini et al.의 제안식이 실험값에 가장 근접하고 있었다. 이는 Azizinamini et al.이 제안한 등가응력블럭 계수가 720 kgf/cm<sup>2</sup> 급 콘크리트에 적용가능하도록 조정되었기 때문이며 현행 ACI 규준도 고강도 콘크리트를 사용한 기둥의 휨내력 산정시 등가응력블럭 계수에 대한 검토가 요구되는 것으로 판단된다.

한편, 횡보강근 형태에 따른 비교에서는 Fig. 7~9에 나타난 바와 같이 형태 변화에 따른 휨내력 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 횡보강근 체적비에 따른 비교에서는 체적비가 증가할수록 높은 휨강도를 나타내었으며, 이는 횡보강근이 심부콘크리트를 보다 효과적으로 구속하고 주근을 구속하여 좌굴을 억제시키기 때문인 것으로 사료된다. 그리고, 횡보강근의 항복강도가 증가할 경우 5~11% 높은 휨강도를 보이고 있었다.

#### 4.4 연성

700kgf/cm<sup>2</sup>급 고강도 콘크리트 기둥에서 횡보강근 형태,

Table 4 Comparison between measured and predicted flexural strength

Specimen designation	$M_{EXP}$ (tf·m)	$\frac{M_{EXP}}{M_{ACI}}$	$\frac{M_{EXP}}{M_{Ibrahim}}$	$\frac{M_{EXP}}{M_{Bing}}$	$\frac{M_{EXP}}{M_{Aziz}}$
C-S	7.51	0.93	0.95	0.98	1.00
D-S	7.30	0.90	0.93	0.95	0.97
H-S	7.44	0.92	0.95	0.97	0.99
C-A	8.07	1.00	1.03	1.05	1.08
D-A	7.51	0.93	0.95	0.98	1.00
H-A	7.40	0.89	0.92	0.94	0.97
L-C-S	7.23	0.89	0.92	0.94	0.97
L-D-S	7.20	0.89	0.92	0.94	0.96

Table 5 Displacement ductility

Specimen	Displacement(mm)							Displacement ductility		Curvature ( $\times 10^{-4}$ rad/mm)			Curvature ductility	
	$\delta_y$	$\delta_{max}$			$\delta_{80\%}$			$\mu_{\Delta}$	$\mu_{\Delta}'$	$\psi_y$	$\psi_{max}$	$\psi_{80\%}$	$\mu_{\psi}$	$\mu_{\psi}'$
		(+)	(-)	Ave	(+)	(-)	Ave							
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)=(4)/(1)	(9)=(7)/(1)	(10)	(11)	(12)	(13)=(11)/(10)
C-S	2.64	6.39	6.03	6.21	8.46	8.73	8.68	2.35	3.25	0.17	0.42	0.85	2.47	5.0
D-S	2.70	4.64	4.90	4.77	8.71	8.35	8.53	1.76	3.16	0.16	0.35	0.75	2.19	4.7
H-S	2.50	6.25	5.50	5.88	9.08	8.69	8.89	2.35	3.55	0.17	0.40	-	2.35	-
C-A	2.68	6.67	5.73	6.20	9.48	10.28	9.88	2.31	3.69	0.15	0.35	1.50	2.33	10.0
D-A	2.75	10.05	7.05	8.55	13.97	10.16	12.07	3.11	4.38	0.20	0.45	-	2.25	-
H-A	2.67	5.22	8.7	6.96	12.4	13.55	12.98	2.61	4.85	0.15	0.40	-	2.67	-
L-C-S	2.65	6.92	5.06	5.99	10.98	8.34	9.66	2.26	3.64	0.20	0.45	-	2.25	-
L-D-S	2.75	7.83	5.05	6.44	11.20	9.00	10.10	2.36	3.70	0.21	0.40	-	1.90	-

체적비, 항복강도가 기둥의 연성증진에 끼치는 영향을 평가하기 위하여 각 변수에 따른 시험체별 연성을 비교하여 Table 5에 나타내었다.

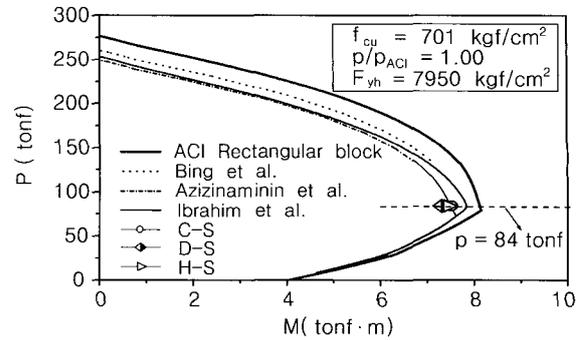


Fig. 7 Axial load-Moment curve(S-series)

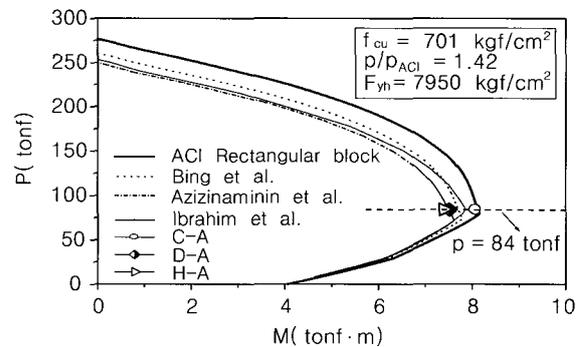


Fig. 8 Axial load-Moment curve(A-series)

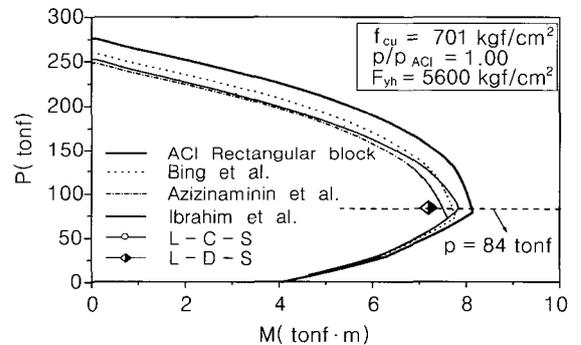


Fig. 9 Axial load-Moment curve(L-series)

Fig. 10~12는 횡보강근 형태 및 횡보강근 체적비 그리고 횡보강근 강도에 따른 시험체에 도입된 모멘트와 소성 한지부(저면 1.0D 구간, D ; 기둥의 단면폭)에서 측정된 곡률관계 곡선이다. Fig. 10~11에서와 같이 횡보강근 형태에 따른 곡률은 후프형(hoop-type)이 크로스형(cross-type)이나 다이아몬드형(diagonal-type)보다 완만한 내력저하를 보이고 있고 Table 5를 통해 후프형 시험체가 변위 및 곡률 연성비에서 보다 높은 연성비를 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 후프형 시험체가 다른 시험체보다 동일한 체적비로 횡보강할 경우 횡보강근의 간격이 상대적으로 좁아지기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 저강도 횡보강근을 사용한 시험체에서 횡보강근 형태는 곡률연성에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 13과 같이 횡보강근의 형태가 동일한 시험체에서는 횡보강근 체적비를 42%증가시킨 A계열 시험체가 ACI 규준에 준하여 횡보강한 S계열 시험체보다 높은 연성을 보이고 있다. 이는 기존 실험결과를 통해서도 알 수 있듯이 횡보강근 체적비의 증가가 심부콘크리트에 대한 구속 효과를 증가시켜 기둥의 연성을 향상시키는 것으로 판단된다.

동일한 체적비로 횡보강된 시험체에서는 Fig. 14과 같이 저강도급 횡보강근을 사용한 L계열 시험체(L-C-S, L-D-S)보다 고강도급 횡보강근을 사용한 A계열 시험체(C-A, D-A)가 다소 큰 변위연성을 보이고 있다. 그리고, Muguruma의 실험결과<sup>9)</sup>와 같이 고축력(0.6P/P<sub>o</sub>)을 받는 시험체의 경우 횡보강근의 강도증가가 기둥의 변위연성 향상에 큰 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 하지만, 축력비가 상대적으로 낮은 Azizinamini 실험결과<sup>7)</sup>에서 경우 횡보강근의 강도증가가 기둥의 연성증진에 끼치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, Azizinamini의 연구결과<sup>7)</sup>에 따르면 상대적으로 높은 축력비(0.4P/P<sub>o</sub> 이상)를 받는 경우에 고강도급 횡보강근이 기둥의 연성증진에 효과적인 것으로 이미 보고된 바 있다.

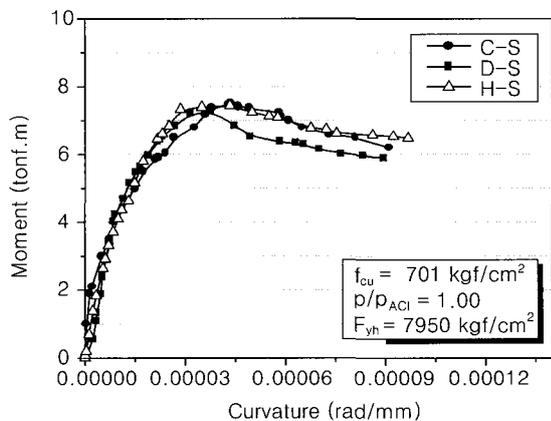


Fig. 10 Effect of steel configuration on curvature ductility(S-series)

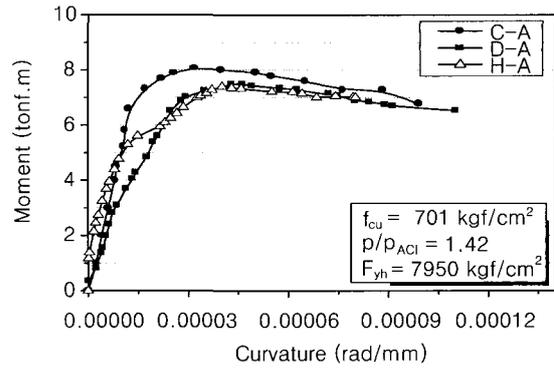


Fig. 11 Effect of steel configuration on curvature ductility(A-series)

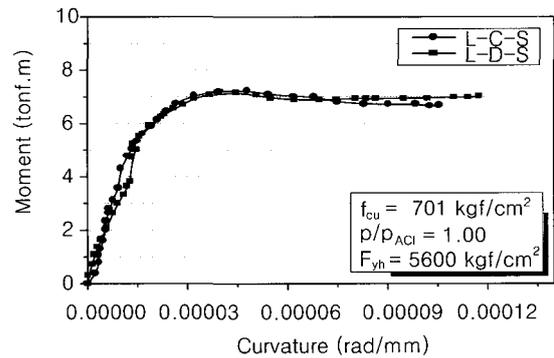


Fig. 12 Effect of steel configuration on curvature ductility(L-series)

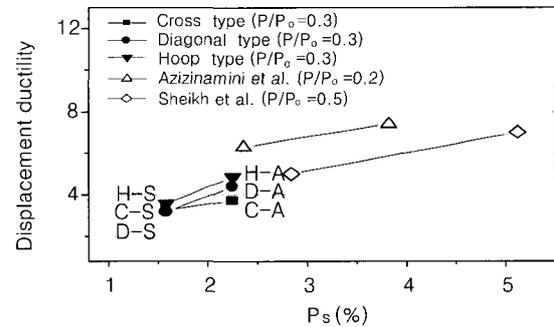


Fig. 13 Effect of volumetric ratio of transverse steel on displacement ductility

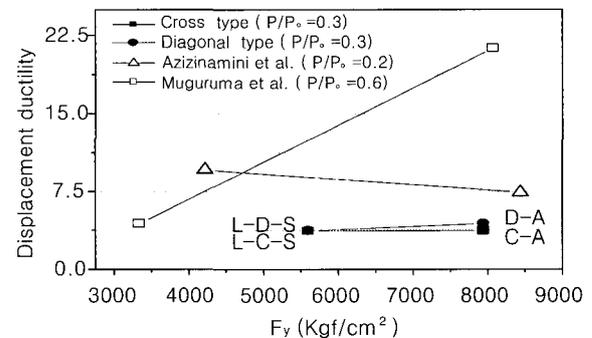


Fig. 14 Effect of yield strength of transverse steel on displacement ductility

## 5. 결 론

본 연구는 반복하중을 받는 700 kgf/cm<sup>2</sup>급 고강도 콘크리트 기둥에 있어 횡보강근의 형태, 체적비 그리고 항복강도를 변수로 하여 계획된 총 8개 기둥 시험체에 대하여 실험한 것으로서, 각 변수에 따른 시험체의 내력 및 연성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시험체의 균열은 기둥의 하단으로부터 5~20 cm 구간에서 최초로 횡균열이 발생하였으며 횡하중이 증가할수록 전단균열로 발전하여 연성비 1~2에서 최대내력에 도달한 후 연성비가 증가할수록 횡보강근의 피복이 박리되어 소성힌지 구간에서 횡전단파괴되는 양상을 보였다.

2) 하중-변위관계에서 횡보강근의 체적비를 ACI규준보다 42%증가시킨 A계열 시험체가 최대내력이후 완만한 하중저하를 보이고 있으나, ACI규준에 준하여 횡보강근한 S계열 시험체는 최대내력이후 횡보강근 박리에 의해 다소 불안정한 이력거동 양상을 나타내었다.

3) 고강도 콘크리트 기둥에 대한 실험결과 체적비가 증가할수록 높은 휨강도를 나타내었다. 한편, ACI 규준의 등가응력블럭에 근거한 휨강도에 대한 실험값의 비율이 0.89~1.00 으로 나타나 고강도 콘크리트를 사용한 기둥의 휨내력 산정시 고강도 콘크리트의 등가응력블럭 계수에 대한 세심한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4) 횡보강근 형태에 따른 고강도 콘크리트기둥의 연성을 비교한 결과 후프형 시험체가 다른 형태의 횡보강근으로 보강된 시험체보다 높은 연성을 보였으며, 횡보강근 체적비를 증가시킬수록 연성이 증가하였다. 또한, 본 연구 및 기존 연구결과에 의하면 고강도 횡보강근이 기둥의 연성효과를 발휘함에 있어 축력비가 중요한 변수로 작용할 것으로 예상되며 횡보강근량 산정시 축력비에 대한 고려가 요구된다고 할 수 있다.

## 참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirement

for Structural Concrete and Commentary(ACI 318-99)," American Concrete Institute, Detroit, 1999.

2. Setunge, S., Attard, M. M., and Darvall, P. L., "Ultimate Strength of Confined Very High-Strength Concretes," *ACI Journal*, Vol. 90, No. 6, November-December 1993, pp.632~641.

3. Sharp, P. D., "Seismic Response of Inelastic Structures," Ph. D dissertation, University of Canterbury, New Zealand, 1974.

4. Mattock, A. H., Kriz, L. B., and Hognestad, E., "Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 57, No. 8, Feb. 1961, pp.875~928.

5. Nedderman, H., "Flexural Stress Distribution in Very High Strength Concrete," MSc Thesis, University of Texas Arlington, December 1973, p.182.

6. Li, B., Park, R. and Tanka, H., "Effect of Confinement on the Behavior of High-Strength Concrete Columns Under Seismic Loading," *Proceedings of the Pacific Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, Nov.1991.

7. Azizinamini, A., Kuska, S., Brungardt, P., and Hatfeild, E., "Seismic Behavior of Square High-Strength Concrete Columns," *ACI Journal*, Vol. 91, No. 3, May-Jun. 1994, pp.336~345.

8. Hisham, I. and MacGregor, J. G., "Flexural Behavior of High-Strength Concrete Columns," Structural Engineering Report, No.196, University of Alberta, Edmonton, Alberta, March, 1994.

9. Muguruma, H. and Watanabe, F., "Ductile Behavior of High-Strength Concrete Columns Confined by High-Strength Transverse Reinforcement," SP 128-54, ACI International, 1991.

## 요 약

본 연구는 700 kgf/cm<sup>2</sup>급 고강도 콘크리트에서 횡보강근 형태, 체적비 그리고 횡보강근 항복강도에 따른 고강도 콘크리트 기둥의 거동을 규명하기 위한 실험연구이다. 기둥은 중심축내력의 30%에 해당하는 일정축력과 수평방향의 반복 휨모멘트를 받는다. 본 연구에서 사용된 변수는 횡보강근 체적비( $\rho_s=1.58, 2.25\%$ ), 횡보강근 형태(hoop-type, cross-type, diagonal-type) 그리고 횡보강근 항복강도( $f_y=5,600, 7,950$  kgf/cm<sup>2</sup>)이다.

실험결과로 모든 기둥의 휨강도는 현행규준의 등가응력블럭에 근거하여 산정된 휨강도보다 낮게 나타났다. 횡보강근을 ACI 규준 요구량보다 42%증가시킨 기둥 시험체는 연성적인 거동을 보였다. 그리고, 본 연구에서 적용한 축력비 0.3 P/PO하에서 고강도급 횡보강근을 사용한 시험체의 연성이 저강도급 횡보강근을 사용한 시험체의 경우보다 같거나 다소 큰 경향을 보이고 있었다.

**핵심용어** : 고강도 콘크리트, 횡보강된 기둥, 횡보강근, 휨강도, 연성