

# 고강도 철근콘크리트 띠철근 기둥의 구속모델

## Confined Model of High-Strength Reinforced Concrete Tied Columns

이 희 수\*    한 범 석\*\*    신 성 우\*\*\*    반 병 렬\*\*\*\*    이 광 수\*\*\*\*\*  
Lee, Hee Su    Han, Beom Seok    Shin, Sung Woo    Bahn, Byong Youl    Lee, Kwang Soo

### ABSTRACT

Experimental and analytical study were conducted to develop the confined model of reinforced high strength concrete tied columns subjected to monotonically increasing concentric axial compression. Twenty-one large-scale columns(260×260×1200mm) used high strength concrete of 50 and 85MPa were fabricated to simulate an actual structural members size. Test results indicated that gains of strength and ductility of high strength concrete columns could be increased, if efficient arrangements and volumetric ratios of transverse reinforcements were provided.

The proposed model satisfactorily predicted the experimental stress-strain curves for high strength concrete up to 100MPa.

### 1. 서 론

횡보강근에 의해 구속된 콘크리트의 강도와 연성증진에 관한 연구는 Small Scale이나 보통강도 콘크리트 실험체를 대상으로 한 연구에서 Large Scale이나 고강도 콘크리트를 대상으로 하는 연구로 발전되고 있다. 고강도 콘크리트는 큰 하중지지 능력, 부재단면의 축소, 높은 탄성계수, 높은 물리적 및 화학적 저항성 등, 재료적, 구조적 장점을 가지고 있다. 그러나 취성적이라는 단점도 동시에 지니고 있다. 따라서 부재의 연성적인 거동을 확보하기 위해서 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트 부재에 비하여 보다 더 복잡하다고 할 수 있다. 따라서 고강도 콘크리트 부재의 연성적인 거동을 확보하기 위한 많은 연구가 필요하다. 특히, 기둥의 경우 Large Scale의 실험체에 대한 연구는 부족한 실정이라서 더욱더 필요하다 하겠다. 그러나 불행하게도 각 국의 규정은 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 안전성에 대한 사전 주의 없이 사용되는 실정으로 현재 규정(ACI Code)의 횡구속의 대한 조항을 정의하는 변수들이 콘크리트 압축강도 400kgf/cm<sup>2</sup> 이하의 철근콘크리트 부재에 대한 실험연구로부터 얻어진 결과이다. (ACI Committee 318, 1999)

### 2. 실험계획 및 방법

본 연구는 띠철근으로 구속된 정방형의 고강도 철근콘크리트 기둥의 중심축력에 대한 거동을 제시하고 있다. 일축 중심축력을 받는 구조실험을 위해 실제 크기와 유사한 21개의 기둥 실험체를 제작하였다. 실험체는 260mm×260mm×1200mm로서 각 실험체의 중앙부 800mm를 실험구간으로 하였으며, 실험체 양끝단 200mm부분에는 단부효과에 따른 국부파괴를 막고 실험구간에서 파괴를 유도하기 위해 횡보강근을 실험구간의 2배이상으로 배근하였다. 콘크리트 피복두께는 20mm로 기둥 전체 단면적에 대한 코아 단면적 비( $A_c/A_g$ ) 모두 0.72로 하였다. 횡보강근의 배근은 A, B, C, D, E 및 F 등 6개 형태를 가지고 있으며, 콘크리트강도 평가를 위하여 무근 콘크리트 기둥도 동시에 계획하였다. 모든 실험체의 횡보강근은 135°의 구부림각도를 가지고 6d<sub>b</sub>의 여장길이를 코아 콘크리트에 정착시켰다.

\* 정회원, 한양대학교 대학원 석사과정

\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축학부 교수

\*\*\*\*\* 정회원, 여주대학 건축과 부교수

\*\* 정회원, 한양대학교 대학원 박사수료

\*\*\*\* 정회원, 대전대학교 건축공학과 부교수

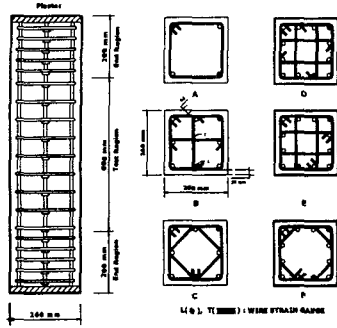


Fig. 1 Details of Column Specimens & Tie Configurations

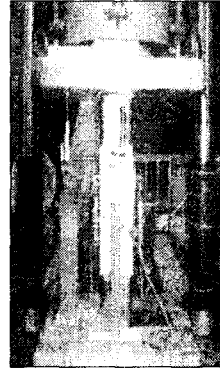


Fig. 2 Set-up of Column Specimens

Table 1 Column Properties

Specimens	$f_{ck}$ (MPa)	Longitudinal Reinforcement			Transverse Reinforcement				
		Diameter (mm)	Ratio (%)	$f_y$ (MPa)	Diameter (mm)	Spacing (mm)	Volumetric Ratio, $\rho_s$ (%)	Area Ratio, $\rho_c$ (%)	$f_{yh}$ (MPa)
HSC-A-08	44.5	4-D22	2.29	360	8	50	1.736	0.917	500
HSC-E-08	49.5	12-D13	2.25	390	8	115	1.761	0.931	500
USC-B-08	87.5	8-D16	2.36	360	10	65	3.204	1.647	440
USC-C-08	87.0	8-D16	2.36	360	10	75	3.160	1.622	440
USC-E-08	86.7	12-D13	2.25	390	8	75	2.70	1.428	500
USC-F-08	86.5	12-D13	2.25	390	8	55	2.847	1.510	500
HSC-A-10	44.5	4-D22	2.29	360	8	40	2.169	1.147	500
HSC-E-10	45.0	12-D13	2.25	390	8	90	2.250	1.190	500
USC-B-10	86.0	8-D16	2.36	360	10	50	4.165	2.141	440
USC-B-10*	86.9	8-D16	2.36	360	0.95	50	3.697	1.941	330
USC-C-10	87.5	8-D16	2.36	360	10	60	3.950	2.028	440
USC-C-10*	86.3	8-D16	2.36	360	0.95	60	3.506	1.838	330
USC-E-10	86.8	12-D13	2.25	390	10	80	4.049	2.083	440
USC-E-10**	86.5	12-D13	2.25	390	8	60	3.375	1.785	500
USC-F-10	85.9	12-D13	2.25	390	10	60	4.176	2.153	440
HSC-A-12	47.0	4-D22	2.29	360	10	45	3.085	1.586	440
HSC-E-12	50.0	12-D13	2.25	390	8	75	2.70	1.428	500
USC-B-12	86.3	8-D16	2.36	360	10	45	4.628	2.379	440
USC-C-12	85.8	8-D16	2.36	360	10	50	4.740	2.434	440
USC-E-12	86.0	12-D13	2.25	390	10	65	4.983	2.564	440
USC-F-12	86.7	12-D13	2.25	390	10	50	5.012	2.583	440

주근과 횡보강근의 변형률을 측정하기 위해 그림 1에 보인바와 같이 와이어 스트레인 게이지(Wire Strain Gage, WSG)를 기둥 실험체의 중앙부에 각각 미리 부착하였다.(그림 1) 실험구간에서 코아 콘크리트의 축방향 변형률을 측정하기 위해서 타설 전에 미리 매립된 4면의 매립봉에 LVDT를 설치하여 측정하였고, 서로 마주보는 LVDT의 값으로부터 편심을 조절하였다. 코아 콘크리트의 파괴가 시작되는 시점에서 실험구간의 코아 콘크리트의 축변형률을 측정하기 위하여 실험체의 전체 길이에 걸쳐 2면에 LVDT를 설치하였다. 실험은 6,860kN용량의 유압 만능시험기(U.T.M)를 사용하여 변위제어 방식으로 중심압축가력하였으며, 제어속도는 실험체별로 합리적으로 데이터를 취득할 수 있도록 3단계로 계획하여,  $4 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ /sec의 속도로 가력하였다.

### 3. 파괴상황 및 실험결과

#### 3.1 파괴상황

최초 길이방향의 수직균열발생과 균열 진전 후 피복 콘크리트의 박리 및 코아 콘크리트의 파괴로 이어지는 파괴양상은 대부분의 실험체에서 유사하게 발생하였다. 대부분의 기둥 실험체는 최종 파괴까지 다음과 같은 단계를 순차적으로 보여주었다. ① 초기 수직균열의 발생, ② 피복 콘크리트의 박리,

③ 주근의 항복, ④ 최대하중에 도달, ⑤ 횡보강근의 항복, ⑥ 주근의 좌굴 또는 횡보강근 후크의 벌어짐, ⑦ 횡보강근의 파단. 피복 콘크리트의 박리와 주근의 항복은 최대 하중 직전 또는 최대하중과 동시에 발생하였으며, ②, ③ 및 ④의 현상은 횡보강근의 량에 따라 변화되는 경향으로 일정한 순서를 보이지 않았다. 또한 피복 콘크리트의 박리는 콘크리트 강도가 높을수록, 횡보강근의 간격이 조밀할수록 갑작스럽게 발생되었다. 이는 기존 연구에서 보고되었듯이 조밀한 철근배근으로 인해 형성된 피복 콘크리트와 코아 콘크리트사이의 약한 경계면(Weakness Planes)에 의한 것으로 콘크리트강도가 높아질수록 명백하게 나타났다. 따라서 고강도 콘크리트일수록 또한 간격이 조밀할수록 약한 경계면으로 인하여 피복 콘크리트의 구조적 효과는 거의 없는 것으로 볼 수 있다.

### 3.2 실험결과

콘크리트의 하중지지 능력( $P_c$ )은 기동 실험체가 지지한 전하중( $P_{test}$ )에서 주근이 지지한 하중( $P_{st}$ )을 제외함으로써 (식 1)과 같이 계산하였고, 이로부터 코아 콘크리트만의 하중지지능력  $P_{cc}$ 를 구하였다.

$$P_c = P_{test} - P_{st} \quad (식 1)$$

$P_{test}$ ,  $P_c$ ,  $P_{cc}$ 를 ACI Code에 의한  $P_o$ , 콘크리트 전단면적에 의한  $P_{oc}$ , 코아 콘크리트 단면적에 의한  $P_{occ}$  등으로 무차원화하여 구속효과를 비교하였다.(그림 3, 표 2)

$$P_o = 0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (식 2)$$

$$P_{oc} = 0.85f_{ck}A_c \quad (식 3)$$

$$P_{occ} = 0.85f_{ck}A_{cc} \quad (식 4)$$

(식 2, 3, 4)에서 ACI Code의 콘크리트의 강도저감계수 0.85를 사용하였으나, 표 2의  $P/P_{oc}$ 값에서 알 수 있듯이 HSC 실험체에서는 1.0이상의 값을 보인 반면, USC 실험체에서는 1.0미만의 값을 보였다. 또  $P_c/P_{cc}$ 는 1.19에서 1.49로써 피복 콘크리트 박리 후에도 하중지지 능력이 증가함을 보여주고 있다.  $P_c$ 에 해당하는 변형률  $\epsilon_c$ 는 0.002에서 0.0037로써  $\epsilon_{co}$ 보다 약간 크게 나타났으며,  $\epsilon_c$ 는 횡보강근량이 많고 복잡한 형태(E, F-Type)일수록 비교적 높게 나타났다.  $P_{cc}$ 에 해당하는 변형률  $\epsilon_{cc}$ 는 0.0033에서 0.0091로써  $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ 는 1.22에서 3.33으로 나타났다. 이는 명백히 콘크리트 박리 후에도 코아 콘크리트만으로도 하중을 지지함으로써 변형능력을 가지고 있음을 보여주고 있다.

Table 2 Test Results

Specimens	Axial Loads						Axial Strains					
	$P_{max}$ kN	$P_{max}/P_o$	$P_c$ kN	$P_c/P_{oc}$	$P_{cc}$ kN	$P_{cc}/P_{occ}$	$\epsilon_c$	$\epsilon_c/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{c50\%}$	$\epsilon_{c50\%}/\epsilon_{co}$
HSC-A-08	2952	1.01	2452	1.01	2089	1.22	0.0022	0.94	0.0039	1.65	0.0091	3.84
HSC-E-08	3189	1.05	2602	1.06	2243	1.29	0.0027	1.14	0.0042	1.77	0.0126	5.29
USC-B-08	4804	0.90	4208	0.87	4185	1.22	0.0025	0.93	0.0049	1.78	0.0157	5.74
USC-C-08	5817	1.09	5208	1.09	4293	1.25	0.0034	1.26	0.0046	1.69	0.0109	3.99
USC-E-08	5150	0.96	4561	0.96	4019	1.19	0.0034	1.25	0.0048	1.76	0.0135	4.95
USC-F-08	4987	0.93	4399	0.92	4163	1.23	0.0029	1.08	0.0049	1.78	0.0185	6.79
HSC-A-10	2880	0.98	2380	0.97	2290	1.32	0.0020	0.84	0.0037	1.55	0.0155	6.51
HSC-E-10	3444	1.13	2857	1.15	2530	1.44	0.0028	1.15	0.0046	1.93	0.0214	8.95
USC-B-10	5242	0.99	4639	0.98	4431	1.32	0.0028	1.03	0.0044	1.62	0.0164	6.01
USC-B-10'	5276	0.99	4680	0.98	4195	1.24	0.0026	0.96	0.0045	1.65	0.0160	5.86
USC-C-10	5363	1.02	4758	0.98	4455	1.29	0.0029	1.06	0.0048	1.74	0.0118	4.32
USC-C-10'	5344	1.01	4747	1.00	4336	1.29	0.0026	0.96	0.0033	1.22	0.0128	4.69
USC-E-10	5320	0.99	4733	0.98	4472	1.30	0.0028	1.01	0.0049	1.81	0.0148	5.44
USC-E-10**	4905	0.93	4310	0.90	4310	1.28	0.0026	0.94	0.0059	2.16	0.0152	5.57
USC-F-10	5000	0.95	4404	0.93	4397	1.31	0.0027	1.00	0.0069	2.52	0.0165	6.03
HSC-A-12	3094	1.00	2790	1.08	2587	1.41	0.0027	1.10	0.0048	1.99	0.0231	9.52
HSC-E-12	3495	1.05	2905	1.05	2903	1.49	0.0037	1.50	0.0058	2.35	0.0346	14.00
USC-B-12	5426	1.01	4818	1.01	4548	1.35	0.0032	1.17	0.0065	2.38	0.0217	7.93
USC-C-12	5222	0.98	4623	0.98	4457	1.33	0.0026	0.94	0.0072	2.64	0.0224	8.19
USC-E-12	5167	0.98	4580	0.97	4506	1.34	0.0025	0.91	0.0091	3.33	0.0265	9.71
USC-F-12	5096	0.96	4508	0.94	4426	1.31	0.0030	1.08	0.0079	2.88	0.0228	8.35

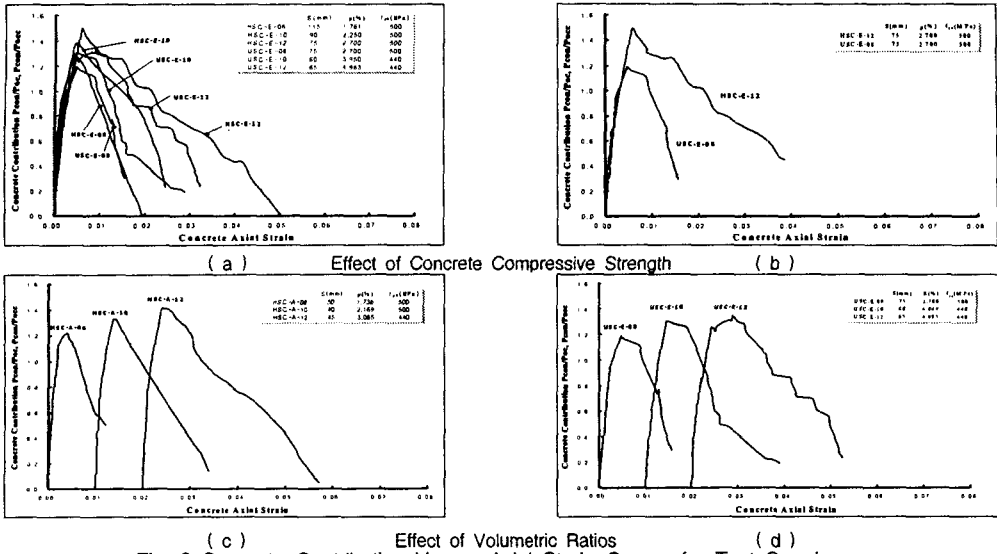


Fig. 3 Concrete Contribution Versus Axial Strain Curves for Test Specimens

#### 4. 구속된 고강도 콘크리트의 해석모델

실험결과에 대한 구속 콘크리트의 응력-변형률곡선과 Sheikh-Uzumeri, Kent-Park, Saatcioglu-Razvi 등이 제안한 모델과 비교한 결과 최대응력( $f'_{cc}$ ), 최대응력에서의 변형률( $\epsilon_{cc}$ ) 및 연성 등을 잘 예측하고 있는 모델은 없었다.(기존발표 논문) 따라서 본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계를 예측할 수 있는 새로운 모델을 개발하였다. 모델은 상승부분과 하강부분으로 구성되어 있으며, 상승부분은 최초 Popovics(1973년)에 의해 제안된 후 많은 연구자들에 의해 수정 사용되었던 식을 사용하였고, 하강부분은 실험결과로부터 회귀분석하여 제안하였다.

i)  $0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cc}$  일 때

$$f_c = \frac{f'_{cc} \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^r}{r - 1 + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^r} \quad (\text{식 } 5)$$

여기서,  $r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$ ,  $E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}}$  이다.

ii)  $\epsilon_{cc} < \epsilon_c$  일 때

$$f_c = f'_{cc} \left[ 1 - 0.5 \frac{\epsilon_c - \epsilon_{cc}}{\epsilon_{50c} - \epsilon_{cc}} \right] \geq 0.3f'_{cc} \quad (\text{식 } 6)$$

여기서,  $f_c$ =콘크리트의 길이방향 압축응력(MPa),  $f'_{cc}$ =구속 콘크리트의 최대응력(MPa) (식 9)  
 $\epsilon_c$ =콘크리트의 길이방향 압축변형률,  $\epsilon_{cc}$ =구속 콘크리트의 최대응력에서의 변형률 (식 10)  
 $E_c$  = 무근 콘크리트의 접선탄성계수,  $\epsilon_{50c} = 0.5f'_{cc}$ 에서의 변형률 (식 11)

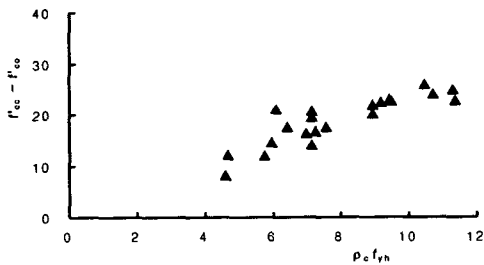


Fig. 4(a) Stress Gain of Confined Concrete versus Capacity of Lateral Reinforcement

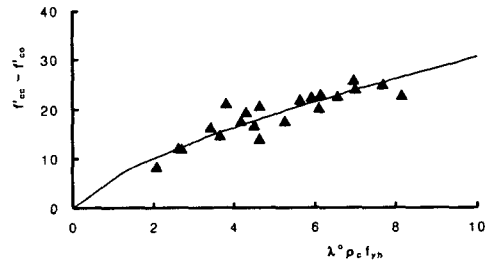


Fig. 4(b) Stress Gain of Confined Concrete versus Effective Capacity of Lateral Reinforcement

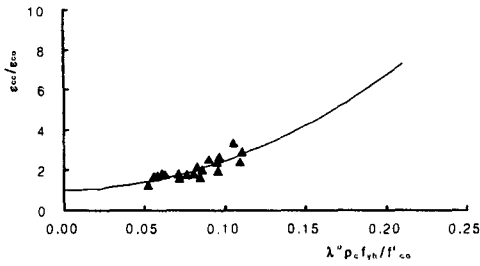


Fig. 5 Effect of Effective Capacity of Lateral Reinforcement and Concrete Strength at Max. Strength

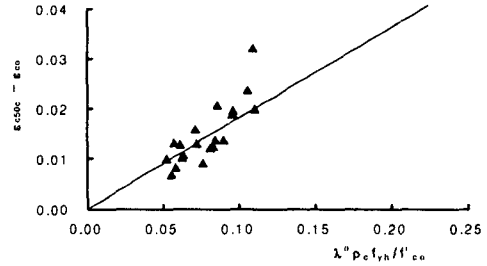


Fig. 6 Evaluation of Compression Ductility

Table 3 Comparison of Experimental Results from Present Study with Predictions of Proposed Model

Specimens	$f'_{cc}$			$\epsilon_{cc}$			$\epsilon_{c50c}$		
	Exp.	Mod.*	Exp./Mod.	Exp.	Mod.	Exp./Mod.	Exp.	Mod.	Exp./Mod.
HSC-A-08	46.08	48.07	0.96	0.0039	0.0034	1.14	0.0091	0.0125	0.73
HSC-E-08	54.27	54.05	1.00	0.0042	0.0037	1.14	0.0126	0.0137	0.92
USC-B-08	91.03	91.90	0.99	0.0049	0.0042	1.16	0.0157	0.0138	1.14
USC-C-08	93.39	90.89	1.03	0.0046	0.0041	1.14	0.0109	0.0133	0.82
USC-E-08	87.70	91.55	0.96	0.0048	0.0043	1.12	0.0135	0.0142	0.95
USC-F-08	91.03	92.99	0.98	0.0049	0.0047	1.03	0.0185	0.0157	1.18
HSC-A-10	49.78	50.09	0.99	0.0037	0.0041	0.90	0.0155	0.0154	1.00
HSC-E-10	52.87	53.40	0.99	0.0046	0.0055	0.83	0.0214	0.0198	1.08
USC-B-10	96.06	94.90	1.01	0.0044	0.0055	0.80	0.0164	0.0181	0.91
USC-B-10*	91.39	90.45	1.01	0.0045	0.0040	1.13	0.0160	0.0130	1.23
USC-C-10	96.22	94.89	1.01	0.0048	0.0050	0.95	0.0118	0.0166	0.71
USC-C-10*	94.46	88.96	1.06	0.0033	0.0038	0.88	0.0128	0.0122	1.05
USC-E-10	96.18	95.01	1.01	0.0049	0.0053	0.94	0.0148	0.0174	0.85
USC-E-10**	93.75	95.16	0.99	0.0059	0.0054	1.09	0.0152	0.0178	0.85
USC-F-10	95.65	95.80	1.00	0.0069	0.0059	1.17	0.0165	0.0191	0.86
HSC-A-12	56.31	54.38	1.04	0.0048	0.0050	0.97	0.0231	0.0180	1.28
HSC-E-12	63.19	60.36	1.05	0.0058	0.0067	0.87	0.0346	0.0223	1.55
USC-B-12	99.31	97.10	1.02	0.0065	0.0063	1.04	0.0217	0.0200	1.08
USC-C-12	97.09	96.87	1.00	0.0072	0.0063	1.14	0.0224	0.0202	1.11
USC-E-12	98.02	98.54	0.99	0.0091	0.0071	1.29	0.0265	0.0219	1.21
USC-F-12	96.45	100.18	0.96	0.0079	0.0075	1.05	0.0228	0.0229	1.00

\* Mod. : Proposed Confinement Model

#### 4.1 구속된 콘크리트의 압축응력, 최대 압축응력에서의 변형률 및 연성, $f'_{cc}$ , $\epsilon_{cc}$ , $\epsilon_{c50c}$

그림 4(a)는 구속효과에 의한 강도증진( $f'_{cc}-f'_{cc0}$ )과 횡보강근능력( $\rho_c \cdot f_{yh}$ )과의 관계를 보여주고 있다. 또한 그림 4(b) 그래프에서는 횡보강근의 간격, 형태를 효과적으로 반영하기 위하여 Sheikh와 Uzumeri가 제안하여 사용하였던 유효구속면적에 대한 감소계수(식 7)를 식 8과 같이 단순화하여 사용하여 강도증진( $f'_{cc}-f'_{cc0}$ )과 유효 횡보강근능력( $\lambda^\circ \cdot \rho_c \cdot f_{yh}$ )과의 관계를 보여주고 있다.

$$\lambda^\circ = \left(1 - \frac{n C^2}{\alpha B^2}\right) \left(1 - \frac{s \tan \theta}{2 B}\right)^2 \quad (\text{식 7})$$

여기서,  $\alpha=6$ ,  $\theta=30^\circ$  로 유효구속면적에 대한 감소계수를 다음과 같이 단순화하였다.

$$\lambda^\circ = \left(1 - \frac{n C^2}{6 B^2}\right) \left(1 - \frac{s}{3 B}\right)^2 \quad (\text{식 8})$$

여기서  $C$  = 주근과 주근사이의 중심간 간격,  $B$  = 코아폭(외곽 타이의 중심간 간격),  $s$  = 타이의 간격이다. 그림 4(b)로부터 실험결과를 가장 잘 표현하는 다음과 같은 관계를 찾아내었다.

$$f'_{cc} = f'_{cc0} + 6.1(\lambda^\circ \rho_c f_{yh})^{0.7} \quad (\text{식 9})$$

또한, 비구속 콘크리트의 최대 응력에서 변형률에 대한 구속 콘크리트의 최대 응력에서 변형률의 비( $\epsilon_{cc}/\epsilon_{cc0}$ )와 콘크리트강도로 무차원화된 유효 횡보강근능력과의 관계를 나타낸 그림 5로부터 다음과 같은 관계식을 찾아내었다.

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 143(\lambda^0 \rho_s f_{yh} / f'_{co})^2 + 1 \quad (\text{식 } 10)$$

횡구속된 고강도 콘크리트기둥의 연성을 평가하기 위하여 구속된 콘크리트의 최대 응력의 50%에 해당하는 변형률( $\epsilon_{c50c}$ )에 대하여 연성을 평가하였다. 표 3과 그림 6에서 알 수 있듯이 연성은 유효 횡구속압력의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 구속 콘크리트의 응력-변형률곡선의 하강부분을 결정하기 위하여  $\epsilon_{c50c}$ 의 변형률을 선택하여 그림 6과 같이 회귀분석하여 다음과 같은 관계식을 찾았다.

$$\epsilon_{c50c} = \epsilon_{co} + 0.182(\lambda^0 \rho_s f_{yh} / f'_{co}) \quad (\text{식 } 11)$$

#### 4.2 해석과 실험결과의 비교

제안된 모델에 의한 결과와 실험결과를 다음의 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 모델이 구속된 고강도 콘크리트의 기둥의 거동을 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 최대응력( $f'_{cc}$ )과 이때의 변형률( $\epsilon_{cc}$ )을 포함한 상승부분의 5%이내의 정확성을 보여주고 있다.

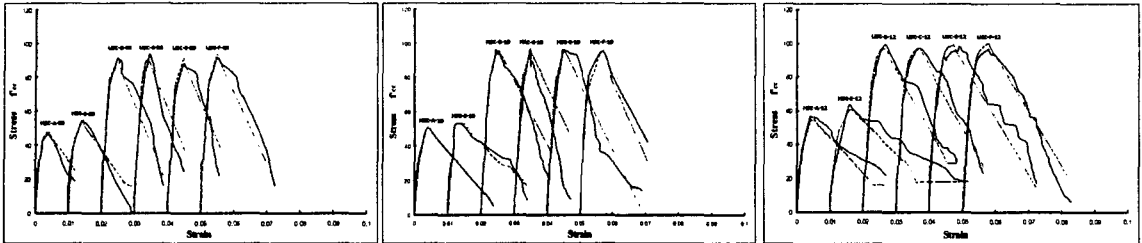


Fig. 7 Comparison of Measured Stress-Strain Curves and Analytical Models

#### 5. 결론

- 1) 중심축력을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥은 충분한 횡구속압력으로 구속되지 않는다면 매우 취약적인 거동을 보이며, 콘크리트강도가 증가할수록 기둥의 변형능력은 감소하는 경향을 보였다.
- 2) 고강도 콘크리트기둥의 유효구속압력을 증가시키는 방법에는 횡보강근량과 횡보강근의 강도를 증가시키는 것이다. 그러나 구속 철근으로써 고강도 철근의 효과는 횡보강근의 체적비와 배근의 효율성에 달려있다. 이는 횡보강근의 강도가 반드시 기둥의 강도증진에 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주고 있다.
- 3) 구속된 콘크리트의 최대응력은 유효 구속압력과  $6.1(\lambda^0 \rho_s f_{yh})^{0.7}$ 의 관계가 있는 것으로 나타났다.
- 4) 콘크리트의 연성은 횡보강근 능력과 비례하고 콘크리트강도와는 반비례하는 것으로 나타났다.
- 5) 구속 콘크리트에 대한 제안된 해석모델은 콘크리트강도 100MPa까지의 응력-변형률 관계를 상당히 잘 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 본 모델은 향후 고강도 콘크리트 기둥의 거동분석을 위한 해석적 연구에 많이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형구조시스템연구센터(STRESS)의 지원으로 이루어진 바, 이에 깊이 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99)," ACI Committee 318, American Concrete Institute, 1999.
2. Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M. "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns," ASCE Journal of Structural Engineering, 1079-1102, 1980.
3. Daniel Cusson and Patrick Paultre, "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.3, pp. 783-804, Mar, 1994.
4. M. Saatcioglu and S. R. Razvi, "High-Strength Concrete Columns with Square Sections under Centric Compression," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.124, No.12, pp. 1438-1447, Dec, 1998.
5. Shamim, A. Sheikh, S. M. Uzumeri, "Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.108, No. ST12, Dec, 1982.
6. T. Nagashima, S. Sugano, H. Kimura, A. Ichikawa, "Monotonic Axial Compression test on Ultra-High Strength Concrete Tied Columns," 10th World. Conf. on Earthquake Engrg., Rotterdam, Netherlands, 1992.