횡구속된 고강도 콘크리트의 구성모델

윤성환¹⁾ · 강윤식¹⁾ · 박대효^{1)*}

¹⁾한양대학교 건설환경공학과

Constitutive Model of Laterally Confined High Strength Concrete

Sung-Hwan Yun,¹⁾ Yoon-Sig Kang,¹⁾ and Taehyo Park^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT Since existing constitutive models developed for confined normal strength concrete overestimate ductility when they are applied to confined high strength concrete, these models cannot be directly applied to confined high strength concrete. In an effort to solve this problem, an accurate stress-strain relationship of the high strength concrete needs to be formulated by examining the confinement effects due to increase of the concrete strength. In this study, a constitutive model is developed to express the stress-strain relationship of confined high strength concrete by carrying out regression analysis of the main parameters affecting strength and ductile behavior of reinforced high strength concrete columns. Twenty-five test specimens were chosen from the reported experimental studies in the literature. The experimental results of stress-strain relationships show a good agreement with results of the stress-strain relationships of suggested high strength concrete, covering a strength range between 60 and 124 MPa.

Keywords : high strength concrete, constitutive model, stress-strain relationship, equivalent confinement stress

1. 서 론

최근 건설기술의 현저한 발달에 따라 장대 교량, 초고층 빌딩과 같이 구조시설물의 대형화, 초고층화와 지하공간의 활용도 증대, 원자력 발전소와 같은 극한 안전요구의 증대로 고강도콘크리트(high strength concrete, 이하 HSC) 개발에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. HSC라 함은 ACI Committee 363에서는 압축강도 41 MPa 이상의 콘크리트를, FIP/CEB 고강도 콘크리트 위원회의 기술보고서에서는 압축강도 60 MPa에서 130 MPa까지의 콘크리트를 HSC라 정의하고 있다.^{1,2)}

HSC는 조기강도 증가, 골재와 시멘트페이스트 간 매트릭스가 밀실구조로 변화됨에 따른 수밀·기밀성으로 인한 내구성 향상, 그리고 건조수축 및 불리딩의 감소 등 역학적 특성이 개선됨에 따라 보통강도 콘크리트(normal strength concrete, 이하 NSC)에 비해 높은 압축강도가 발현되지만, 압축강도에 대한 인장강도 비는 고강도화 될수록 작아지며 취성적인 파괴특성을 나타내기 때문에 역학적 거동이 예측 가능한 구성모델식이 요구된다.^{3,4)}

Wang et al.⁵⁾은 동일한 횡구속 철근량과 축력을 받는 HSC 기둥의 연성이 NSC 기둥과 비교하여 작게 나타나

며, 같은 축력하에서 연성은 횡구속 철근비가 클수록 증가함을 보였다. Yong et al.⁶⁾과 Cusson and Paultre^{7,8)}는 기존의 횡구속된 NSC 구성모델을 HSC 기둥에 적용할 경우 연성 거동이 과대평가됨을 보였다. 특히 Cusson and Paultre^{7,8)}는 횡구속 철근의 항복강도 및 간격, 배근상세, 종방향 철근의 체적비를 고려한 횡구속된 HSC 기둥에 대한 실험적 연구를 수행한 결과, 높은 항복강도의 횡구속 철근과 종방향 철근량을 증가시키면 강도 증진의 효과에 비해 연성 증진의 효과가 커짐을 보였고 이는 동일한 철근 배근을 한 경우 NSC 기둥의 연성이 HSC 기둥보다 크다는 것을 알 수 있다. 한범석 등⁹⁾은 횡구속된 HSC 기둥의 강도와 연성 증진에 대해 각 변수별 상관성을 분석한 결과, 횡구속 철근의 간격과 체적비, 그리고 배근상세 등은 상호 연관성을 가지고 있음을 보였고, 이는 독립적인 개개 변수의 정량적 평가보다는 종합적인 평가가 필요함을 알 수 있다.

따라서 이 연구에서는 횡구속된 HSC 기둥의 강도와 연성 거동을 정확히 예측하기 위한 새로운 구성모델을 제안하고자 하며, 제안된 구성모델의 응력-변형률 관계와 기존의 실험적 연구 결과를 비교분석하여 타당성을 검토한다.

2. 횡구속된 HSC 구성모델

횡구속된 HSC 기둥의 강도와 연성은 구성 재료의 특성, 보강 철근량 및 기하학적 배열 형태, 구속응력의 분

*Corresponding author E-mail: cepark@hanyang.ac.kr

Received December 30, 2009, Revised May 31, 2010,

Accepted June 1, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

포, 그리고 유효구속면적이 고려된 횡구속 응력에 의해 결정된다. 최근 몇몇 연구자들^{7,8,10,11)}에 의해 단면 형상에 따른 횡구속 응력 계산식을 바탕으로 횡구속된 HSC 기둥의 강도와 최대 응력에서의 축방향 변형을 예측하는 구성모델이 제안되었다.

2.1 단면 형상에 따른 횡구속 응력

2.1.1 원형 단면일 때 횡구속 응력

나선철근에 의해 횡구속된 원형 단면에서의 횡구속 응력은 HSC에 연속적이고 균일하게 발생된다. 따라서 Fig. 1과 같이 나선철근을 일정한 두께로 콘크리트 표면에 균일하게 분포시켜서 얇은 튜브 해석법에 근거하여 횡구속 응력을 구할 수 있고 횡구속된 HSC가 압축력을 받을 경우에 최대응력 이전에 나선철근은 항복된다고 가정한다.

나선철근에 의한 횡구속 응력(f_l)은 Fig. 1에서 나타난 힘의 평형 조건에 의해 다음과 같이 얻는다.

$$f_l = \frac{2A_s f_{yt}}{d_c s} \quad (1)$$

여기서 A_s : 횡구속 철근의 단면적

d_c : 횡구속된 원형 단면의 중심 폭

f_{yt} : 횡구속 철근의 항복강도

s : 횡구속 철근 사이의 중심 간격

2.1.2 정사각형 및 직사각형 단면일 때 횡구속 응력

띠철근에 의해 횡구속된 정사각형 및 직사각형 단면에서의 횡구속 응력은 Fig. 2에서와 같이 띠철근의 모서리

부분에서 가장 큰 횡구속 응력이 발생된다고 가정한다. 각각의 주철근에 수직인 횡방향 철근의 횡구속력은 $A_s f_{yt}$ 이고 정사각형 단면일 때 횡구속 응력은 다음과 같이 얻는다.

$$f_l = \frac{\sum A_s f_{yt} \sin \alpha}{b_c s} \quad (2)$$

여기서 α : 횡구속 철근과 기둥의 수직축면이 이루는 각($=90^\circ$)

b_c : 횡구속된 정사각형 단면의 중심 폭

또한 직사각형 단면일 때의 횡구속 응력은 다음과 같이 얻는다.

$$f_l = \frac{f_{lx} b_{cx} + f_{ly} b_{cy}}{b_{cx} + b_{cy}} \quad (3)$$

$$f_{lx} = \frac{A_{sx} f_{yt}}{b_{cx} s} \quad (4)$$

$$f_{ly} = \frac{A_{sy} f_{yt}}{b_{cy} s} \quad (5)$$

여기서 A_{sx} : x방향의 횡구속 철근의 전체 단면적

A_{sy} : y방향의 횡구속 철근의 전체 단면적

b_{cx} : x방향의 횡구속된 직사각형 단면의 중심 폭

b_{cy} : y방향의 횡구속된 직사각형 단면의 중심 폭

f_{lx} : x방향의 횡구속 응력

f_{ly} : y방향의 횡구속 응력

2.2 Cusson and Paultre & Razvi and Saatcioglu models

Cusson and Paultre^{7,8)}는 압축강도 60~120 MPa 범위의 콘크리트가 적용된 정사각형 단면의 철근콘크리트 기둥의 실험적 연구를 수행하였다. 제안된 구성모델식은 횡구속 철근의 항복강도 및 간격, 배근상세, 종방향 철근의 체적비를 주요변수로 고려하였고, 유효구속면적의 개념을 적용한 유효구속계수(k_e)로부터 유효구속응력(f_{le})을 결정하였다. 횡구속된 콘크리트의 강도(f_{cc})와 최대응력에서의 축방향 변형률(ϵ_{cc}) 관계식은 다음과 같다.

$$f_{le} = k_e f_l = \frac{\left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6b_c^2}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right)^2}{1 - \rho_s} \quad (6)$$

$$f_{cc} = f_{co} \left[1.0 + 3.0 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{0.7} \right] \quad (7)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} + 0.21 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{1.7} \quad (8)$$

Fig. 1 Lateral stress in circular sections

Fig. 2 Lateral stress distribution in square and rectangular sections

여기서 w_i : 주철근 사이의 순 간격
 s' : 횡구속 철근 사이의 순 간격
 ρ_s : 종방향 철근의 체적비
 f_{co} : 횡구속되지 않은 콘크리트의 강도
 ε_{co} : 횡구속되지 않은 콘크리트의 최대응력에서의 변형률

제안된 구성모델의 응력-변형률 곡선 상승부는 포물선 형태, 하강부는 지수 함수로 구성되어 있고, 각 구간에서의 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$f_c = \frac{f_{cc} Xr}{r-1+X^r} : \text{상승부 } (\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \quad (9)$$

$$f_c = f_{cc} \exp[k_s(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^{k_c}] : \text{하강부 } (\varepsilon_c > \varepsilon_{cc}) \quad (10)$$

$$X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (11)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{\text{sec}}} \quad (12)$$

$$E_{\text{sec}} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{c50c} = \varepsilon_{c50o} + 0.15 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{1.1} \quad (14)$$

여기서 f_c : 콘크리트의 응력
 k_s : 하강부 곡선의 기울기를 결정하는 계수
 k_c : 하강부 곡선의 곡률을 결정하는 계수
 E_c : 콘크리트의 탄성계수
 E_{sec} : 할선탄성계수
 ε_c : 콘크리트의 변형률
 ε_{c50c} : 하강부에서 횡구속된 콘크리트 최대 응력의 50%일 때 변형률
 ε_{c50o} : 하강부에서 횡구속되지 않은 콘크리트 최대 응력의 50%일 때 변형률

Razvi and Saatcioglu^{10,11)}는 압축강도 30~130 MPa 범위의 콘크리트가 적용된 철근콘크리트 기둥의 실험적 연구를 수행하였고, 제안된 구성모델식은 단면 형태와 크기, 철근 배근상세, 횡구속 철근의 항복강도, 주철근 및 횡구속 철근 간격을 주요 변수로 고려하였다. k_1 은 콘크리트 강도 증가에 따른 횡구속 응력과의 관계, k_2 는 횡구속 철근의 효율, 그리고 k_3 는 콘크리트 강도 증가에 따른 영향을 나타내는 계수이며 횡구속된 콘크리트의 강도와 최대 응력에서의 축방향 변형률 관계식은 다음과 같다.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_{le} = f_{co} + k_1 k_2 f_l \quad (15)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5k_3 \left(\frac{k_1 f_{le}}{f_{co}} \right) \right] \quad (16)$$

제안된 구성모델의 응력-변형률 곡선의 상승부는 포물선 형태, 하강부는 선형 함수로 구성되어 있고, 각 구간에서의 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$f_c = \frac{f_{cc} Xr}{r-1+X^r} : \text{상승부 } (\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \quad (17)$$

$$f_c = f_{cc} - \beta \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) : \text{하강부 } (\varepsilon_c > \varepsilon_{cc}) \quad (18)$$

$$\beta = \frac{0.15 f_{cc}}{\varepsilon_{c85c} - \varepsilon_{cc}} \quad (19)$$

여기서 ε_{c85c} : 하강부에서 횡구속된 콘크리트 최대 응력의 85%일 때 변형률

Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의해 수행된 콘크리트 압축강도 60 MPa, 92 MPa, 그리고 124 MPa 세가지 종류에 대하여 각 폭이 250 mm의 정사각형 단면에 길이가 1,500 mm인 구속된 HSC 기둥의 실험적 연구 결과와 Cusson and Paultre^{7,8)} Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의해 제안된 구성모델을 이용하여 수치해석한 결과를 비교분석한 응력-변형률 곡선이 Figs. 3~5에 나타나 있다.

Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의해 제안된 응력-변형률 곡선에서는 콘크리트 압축강도의 증가에 따른 횡구속된 HSC의 강도가 비교적 일치하였으나, 연성거동이 실제 거동과 비교하여 과소평가되었고, Cusson and Paultre⁸⁾에 의해 제안된 응력-변형률 곡선에서는 각각 60 MPa, 92 MPa, 그리고 120 MPa의 콘크리트 압축강도일 때 횡구속된 HSC의 강도와 연성이 과소평가되었다.

2.3 횡구속된 HSC의 응력-변형률 곡선

이 연구에서는 횡구속된 HSC의 응력-변형률 곡선이

Fig. 3 Stress-strain curves for CS-26 specimen ($f'_c = 60$ MPa)

Fig. 4 Stress-strain curves for CS-14 specimen ($f'_c = 92$ MPa)

Fig. 5 Stress-strain curves for CS-3 specimen ($f'_c = 124$ MPa)

Fig. 6 Proposed stress-strain curves for confined HSC

Fig. 6에서와 같이 상승부는 포물선 형태, 하강부는 지수 함수로 제안되었다. 횡구속된 HSC의 응력-변형률 곡선은 횡구속된 콘크리트의 강도 f_{cc} 와 이 때의 변형률 ϵ_{cc} , 횡구속된 콘크리트 최대응력의 85%일 때 강도 f_{c50c} 와 이 때의 변형률 ϵ_{c50c} 로 나타낼 수 있다.

횡구속된 HSC 기둥에서 종방향 철근은 횡구속 철근에 의해 지지되어져 있고 절점에서 횡구속 응력이 증가된다. 압축력을 받는 종방향 철근은 균열 발생 이전까지 횡구속 응력을 유지하고 종방향 철근 사이의 응력분포 감소는 횡구속 철근에서의 응력분포 감소보다 크게 나타나므로 보강철근으로 인한 구속응력을 일정한 평균의 구속응력으로 구하게 되면 실제 구속응력보다 과대평가된다.

따라서 횡구속된 HSC 기둥에서는 부재 길이방향 사이의 횡구속 응력 변화가 고려된 등가구속응력(equivalent

Fig. 7 Distribution of actual, average, and equivalent lateral stress

confinement stress)을 적용하여야 한다. 횡구속된 HSC 기둥 부재의 실제, 평균, 그리고 등가구속응력은 Fig. 7에 나타나 있고, 횡구속된 HSC의 강도(f_{cc})는 구속되지 않은 HSC의 강도(f_{co})와 등가구속응력(f_{leq})의 관계식으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 얻는다.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_{leq} \quad (20)$$

$$f_{co} = 0.85 f'_c \quad (21)$$

$$f_{leq} = k_2 f_l \quad (22)$$

여기서 f'_c : 공시체의 콘크리트 압축강도

주요계수인 k_1 은 Richart et al.¹²⁾에 의해 수행된 실험 데이터의 회귀분석을 통해 등가구속응력으로부터 다음과 같이 얻는다.

$$k_1 = 6.7 (f_{leq})^{-0.17} \quad (23)$$

Razvi and Saatcioglu^{10,11)}가 제안한 횡구속 철근과 종방향 철근의 배근 형태를 고려한 주요계수 k_2 는 Table 1과 같은 고강도 콘크리트 기둥에 관한 실험 데이터를 바탕으로 회귀분석(regression analysis)을 통하여 다음과 같이 얻는다.

$$k_2 = 0.15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right)} \leq 1.0 \quad (24)$$

여기서 s_l : 주철근 사이의 중심 간격

횡구속된 HSC의 강도는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 응력-변형률 곡선에서 상승부를 나타내고 Figs. 3~5에서 알 수 있듯이 Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의해 제안된 등가구속응력(equivalent confinement stress) 개념이 적용된 응력-변형률 곡선의 상승부와 가장 잘 일치한다.

횡구속 철근 사이의 중심 간격(s)과 주철근 사이의 중

Table 1 Properties of test specimens by each researcher

Researcher	Label	Section no.	L (mm)	f'_c (MPa)	b_c^* (mm)	b_d^* (mm)	ρ_s	s (mm)	s_l (mm)	f_{yt} (MPa)	f_l (MPa)	f_{co} (MPa)	f_{cc} (MPa)		$\frac{An.}{Ex.}$
													Ex.	An.	
Nagashima et al. ¹³⁾	LH08LA	1	1,400	60	199.9	5.1	1.62	55	61.6	1386	6.92	51	70.9	69.9	0.99
	HH08LA	1		116	199.9	5.1	1.62	55	61.6	1386	7.13	98.6	122.8	118.3	0.96
	LH13LA	1		60	199.9	5.1	2.55	35	61.6	1386	11.2	51	85.7	85.6	1.00
	HH13LA	1		116	199.9	5.1	2.55	35	61.6	1386	11.2	98.6	131.5	133.2	1.01
Li et al. ¹⁴⁾	2A	2	720	71	209	6.0	4.48	20	95.5	445	10.28	60	90.0	95.5	1.06
	2B	2		85	209	6.0	4.48	20	95.5	445	10.28	72.3	107.4	107.4	1.00
	9A	4		74	204.0	6.0	1.68	50	-	445	2.47	63	74.7	77.1	1.03
	9B	4		85	204.0	6.0	1.68	50	-	445	2.47	72.3	85.0	85.6	1.01
	11A	2		71	209	6.0	1.38	65	95.5	445	3.16	60	72.4	80.3	1.11
	11B	2		85	209	6.0	1.38	65	95.5	445	3.16	72.3	81.7	68.5	0.84
Razvi and Saatcioglu ^{10,11)}	CC-2	4	1,500	60	218.7	11.3	1.35	135	-	400	2.71	51	62.3	66.3	1.06
	CC-4	4		60	223.7	6.3	0.80	70	-	660	2.63	51	67.4	66.0	0.98
	CC-8	4		124	223.7	6.3	0.80	70	-	660	2.63	105.4	122.9	119.3	0.97
	CC-9	4		124	218.7	11.3	1.35	135	-	400	2.71	105.4	134.7	120.7	0.90
	CC-10	4		124	218.7	11.3	3.05	60	-	400	6.1	105.4	135.3	134.8	1.00
	CC-15	4		92	218.7	11.3	3.05	60	-	400	6.1	78.2	105.2	108.3	1.03
	CC-21	4		92	223.7	6.3	0.80	70	-	660	2.63	78.2	93.4	93.2	1.00
	CC-22	4		92	218.7	11.3	1.35	135	-	400	2.71	78.2	89.3	93.5	1.05
	CS-3	1		124	223.5	6.5	2.16	55	67	570	6.15	105.4	129.1	123.7	0.96
	CS-4	3		124	222.5	7.5	2.17	55	99.5	1000	10.83	105.4	123.4	130.4	1.06
	CS-5	1		124	222.5	7.5	1.32	120	66.3	1000	6.62	105.4	122.5	119.6	0.98
	CS-14	1		92	223.5	6.5	2.16	55	67.0	570	6.15	78.2	94.3	96.6	1.02
	CS-15	3		81	222.5	7.5	2.17	55	99.5	1000	10.83	68.85	95.5	93.8	0.98
	CS-23	1		60	222.5	7.5	1.32	120	66.3	1000	6.62	51	71.3	65.2	0.91
	CS-26	1		60	223.5	6.5	2.16	55	67.0	570	6.15	51	76.7	69.4	0.90

* b_c is : round section, d_c , ** b_d is diameter of confined bar

심 간격(s_l)이 증가하면 k_2 는 감소하고 나선철근의 간격이 조밀하고 종방향 철근과 잘 배근된 원형 기둥인 경우 k_2 값은 1.0과 같다.

2.3.1 횡구속된 HSC의 연성 거동

횡구속된 HSC의 연성 거동은 Fig. 6에 나타난 것과 같이 응력-변형률 곡선에서 하강부의 경사를 나타내고 하강부의 경사는 횡구속된 콘크리트의 최대응력에서의 변형률 ϵ_{cc} 와 하강부에서 횡구속된 콘크리트 최대응력의 85%일 때 변형률 ϵ_{c85c} 의 함수이다.

콘크리트의 변형은 구속효과에 의해 증가하고, 횡구속된 콘크리트는 구속되지 않은 무근 콘크리트에 비해 최대응력일 때에 높은 변형률을 나타낸다.

이 연구에서는 Nagashima et al.,¹³⁾ Li et al.,¹⁴⁾ 그리고 Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의한 실험적 연구 결과의 회귀분석을 통하여 유효구속지수에 대한 변형률 비와 횡구속된 HSC의 최대응력일 때와 최대응력의 85%일 때의 변형률 비를 구하였고 이는 각각 Figs. 8과 9에 나타나 있다. 횡구속된 HSC의 연성 거동은 콘크리트 구속지수 (f_{leq}/f_{co})에 의해 결정되고 회귀분석 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[6.7334 \left(\frac{f_{leq}}{f_{co}} \right)^{0.3708} \right] \quad (25)$$

$$\epsilon_{c85c} = \epsilon_{c85o} \left[13.064 \left(\frac{f_{leq}}{f_{co}} \right)^{0.4576} \right] \quad (26)$$

횡구속되지 않은 콘크리트의 특성(ϵ_{co} , ϵ_{c85o})은 일반적으로 실험적 연구를 통하여 얻을 수 있으나 실험을 수행하지 않을 경우 Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의해 제안된 관계식으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\epsilon_{co} = 0.0028 - 0.0008 \times k_3 \quad (27)$$

$$\epsilon_{c85o} = \epsilon_{co} + 0.0018 k_3^2 \quad (28)$$

$$k_3 = \frac{40}{f_{co}} \leq 1.0 \quad (29)$$

여기서 ϵ_{c85o} : 하강부에서 횡구속되지 않은 콘크리트 최대응력의 85%일 때 변형률

Fig. 8 Effect of confinement on peak strain of HSC

Fig. 9 Effect of confinement on ductility of HSC

2.3.2 상승부 곡선에서의 응력-변형률 관계식

Fig. 6에 나타난 것과 같이 상승부 곡선(OA)에서의 응력-변형률 관계식은 Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의해 제안된 식을 적용하였고 횡구속된 콘크리트의 최대강도일 때의 변형률 ε_{cc} 는 회귀분석을 통하여 수식 (25)와 같이 수정되었으며 관계식은 다음과 같이 얻어진다.

$$f_c = \frac{f_{cc} X r}{r - 1 + X^r}; \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \quad (30)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (31)$$

$$X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (32)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (33)$$

2.3.3 하강부 곡선에서의 응력-변형률 관계식

Fig. 6에 나타난 것과 같이 하강부 곡선(AC)에서의 응력-변형률 관계식은 Cusson and Paultre^{7,8)}가 제안한 식을 수정하였고 횡구속된 콘크리트 최대응력의 85%일 때 변

형률 ε_{c85c} 는 회귀분석을 통하여 수정되었으며 다음과 같이 얻어진다.

$$f_c = f_{cc} \exp[k_4(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^{k_5}] \quad (34)$$

$$k_4 = \frac{\ln 0.85}{(\varepsilon_{c85c} - \varepsilon_{cc})^{k_5}} \quad (35)$$

$$k_5 = 0.58 + 16 \left(\frac{f_{leq}}{f_{co}} \right)^{1.4} \quad (36)$$

하강부 곡선의 기울기를 결정하는 계수 k_4 는 구속지수가 높은 콘크리트에서는 계수 값이 크고 곡선의 기울기가 완만하게 떨어지는 반면, 구속지수가 낮은 콘크리트에서는 값이 작고 곡선의 기울기가 급격히 떨어진다.

하강부 곡선의 곡률을 결정하는 계수 k_5 는 구속지수가 높은 콘크리트에서는 계수 값이 크고 곡선의 곡률이 볼록하게 떨어지는 반면, 구속지수가 낮은 콘크리트에서는 값이 작고 곡선의 곡률이 오목하게 나타난다.

3. 횡구속된 HSC 기둥의 거동 분석

Nagashima et al.¹³⁾ Li et al.¹⁴⁾ 그리고 Razvi and Saatcioglu^{10,11)}는 각각 4개, 6개, 그리고 15개의 구속된 HSC 기둥 시편에 대한 실험적 연구를 수행하였고 시편 특성과 단면 형상은 각각 Table 1과 Fig. 10에 나타나 있다.

Nagashima et al.¹³⁾에 의한 실험적 연구에서 정사각형 단면의 형상 및 크기, 주철근 사이의 간격(s_l), 횡구속 철근의 항복강도(f_{yr})는 동일한 조건에서 횡구속 철근비(ρ_s)와 콘크리트 압축강도(f'_c)를 각각 다른 조건에서 비교·분석한 결과, 횡구속 철근비 1.62, 콘크리트 압축강도 116 MPa 일 때 60 MPa와 비교하여 초기강성 및 강도가 증가되지만 취성적인 거동을 나타내며 횡구속 철근비 2.55인 경우 연성적인 거동이 나타난다. Li et al.¹⁴⁾에 의한 실험적 연구에서 정사각형 및 원형 단면을 가지는 유사한 콘크리트 압축강도에서 각각 다른 횡구속 철근비를 비교·분석한 결과, 콘크리트 압축강도 71~85 MPa, 횡구속 철근비 4.48일 때 1.38~1.68과 비교하여 연성적인 거동이 나타난다. Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의한 실험적 연구에서 원형 단면일 경우 횡구속 철근비 0.80과 1.35일 때 콘크리트 강도를 주요변수로 하여 각각 60, 92, 그리고 124 MPa에 대해 비교·분석한 결과, 고강도일수록 초기강성 및 강도가 증가되지만 취성적인 거동을 나타내고, 비교적 높

Fig. 10 Cross-sectional arrangements in the test specimens

Fig. 11 Comparison of experimental and analysis results of tested by Nagashima et al., Li et al., and Razvi and Saatcioglu

은 횡구속 철근비 3.05인 경우 연성적인 거동이 나타난다. 또한 사각형 단면일 경우 횡구속 철근비 1.32, 콘크리트 압축강도 124 MPa일 때 60 MPa와 비교하여 초기 강성 및 강도가 증가되지만 취성적인 거동을 나타내고, 이는 횡구속 철근비 2.17일 때 콘크리트 압축강도 81 MPa와 124 MPa, 횡구속 철근비 2.16일 때 콘크리트 압축강도 60 MPa와 124 MPa를 비교하여도 유사한 거동을 나타내며, 같은 콘크리트 강도 124 MPa일 때 횡구속 철근비 2.17은 1.32와 비교하여 연성적인 거동이 나타난다.

제안된 HSC의 구성모델의 관계식과 Nagashima et al.,¹³⁾ Li et al.,¹⁴⁾ Razvi and Saatcioglu^{10,11)}에 의해 수행된 실험적 연구와 비교분석한 결과는 Fig. 11과 Table 1에 나타나 있다. 정사각형 단면을 가지는 횡구속된 HSC 기둥인 경우 띠철근의 배열과 횡구속 철근의 항복강도에 따라 다소 차이가 있으나, 상승부 및 하강부 곡선은 실

험 결과와 잘 일치하였다. 원형 단면을 가지는 횡구속된 HSC 기둥인 경우 상승부 곡선은 실험결과와 잘 일치하였으나, 하강부 곡선은 동일한 조건의 단면상세, 콘크리트 강도, 횡구속 철근 항복강도일 때 횡구속 철근 사이의 중심 간격(s)이 클수록 취성적인 거동이 나타나며, 제안된 모델이 다소 과대 평가되었다.

4. 결 론

횡구속된 고강도 콘크리트 기둥의 역학적 거동을 정확히 예측하기 위해 콘크리트 강도를 주요 변수로 하는 제안된 고강도 콘크리트 구성모델은 실험적 연구와 비교분석한 결과 콘크리트 압축강도 60~124 MPa 범위에서의 응력-변형률 곡선과 잘 일치하였다.

낮은 횡구속 철근비에서는 콘크리트 강도가 높을수록

초기강성과 강도는 증가되지만 취성적인 거동을 보이는 반면 비교적 높은 횡구속 철근비에서는 연성적인 거동을 보인다.

제안된 횡구속된 고강도 콘크리트의 구성모델은 고강도 콘크리트 기둥의 역학적 거동을 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 나타났으나, 횡구속 철근의 간격변화에 따른 연성 거동이 다소 과대 평가되었다.

향후 구축된 고강도 콘크리트 기둥의 역학적 거동을 정확히 예측하기 위해서는 이 연구에서 제안된 정적하중 상태에서의 구성모델 뿐만 아니라 반복하중 상태에서의 응력-변형률 이력모델에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부 산하의 한국건설교통기술평가원에서 후원하고 콘크리트코리아 연구단(05-CCT-D11)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 363, "State-of-the Art Report on High Strength Concrete," *ACI Journal*, Vol. 82, No. 4, 1984, pp. 364~411.
2. FIP/CEB, "High Strength Concrete, State of the Art Report," *Bulletin d'Information*, No. 197, 1990, 61 pp.
3. 장일영, 박훈규, 윤영수, "국내의 실험자료를 이용한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안," 콘크리트학회 논문집, 8권, 6호, 1996, pp. 213~222.
4. 신성우, 한범석, "고강도 철근콘크리트 띠철근 기둥의 구속효과," 콘크리트학회 논문집, 14권, 4호, 2002, pp. 578~588.
5. Wang, Q., Zhao, G., and Lin, L., "Effect of Axial Load Ratio

- and Stirrups Volume Ratio on Ductility of High-Strength Concrete Columns," *High-Performance Concrete Proceeding ACI International Conference Singapore*, SP-149, 1994, pp. 433~448.
6. Yong, Y. K., Nour, M. G., and Nawy, E. G., "Behavior of Laterally Confined High-Strength Concrete under Axial Loads," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 2, 1988, pp. 332~351.
7. Cusson, D. and Paultre, P., "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 3, 1994, pp. 783~804.
8. Cusson, D. and Paultre, P., "Stress-Strain Model for Confined High-Strength Concrete," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 121, No. 3, 1995, pp. 468~477.
9. 한범석, 김종근, 신성우, "철근콘크리트 기둥에서 띠철근으로 구속된 고강도콘크리트의 구속효과 평가," 대한건축학회 논문집, 24권, 3호, 2008, pp. 3~10.
10. Razvi, S. and Saatcigglu, M., "Confinement Model for High-Strength Concrete," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 3, 1999, pp. 281~288.
11. Razvi, S. and Saatcigglu, M., "Strength and Deformability of Confined High Strength Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 6, 1994, pp. 678~687.
12. Richart, F. E., Brandzaeg, A., and Brown, R. L., "A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses," *University of Illinois, Engineering Experimental Station, Bulletin No. 185*, 1928, 104 pp.
13. Nagashima, T., Sugano, S., Kimura, H., Ichikawa, A., "Monotonic Axial Compression Test on Ultra-High-Strength Concrete Tied Columns," *Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, 1992, pp. 2599~2602.
14. Li, B. and Park, R., "Confining Reinforcement for High-Strength Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 3, 2004, pp. 314~324.

요 약 횡구속된 고강도 콘크리트의 역학적 거동을 예측하기 위해 보통강도 콘크리트의 구성모델을 적용할 경우 연성 거동이 과대평가된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 콘크리트 강도가 증가함에 따라 구속효과에 미치는 영향을 고찰하여 고강도 콘크리트에 적용 가능한 정확한 응력-변형률 관계가 요구된다. 따라서 이 연구에서는 횡구속된 고강도 콘크리트의 강도와 연성 거동에 영향을 미치는 변수들의 회귀분석을 통한 변수별 회귀식을 바탕으로 새로운 횡구속된 고강도 콘크리트의 구성모델이 제안된다. 횡구속된 고강도 콘크리트의 강도 및 초기강성을 나타내는 응력-변형률 곡선의 상승부는 제안된 구성모델과 잘 일치하였고 연성 거동을 나타내는 하강부 곡선은 원형 단면을 가지는 낮은 횡구속 철근의 항복강도 및 철근비일 때 과대평가되었다. 콘크리트 강도를 주요 변수로 하는 제안된 구성모델은 문헌분석을 통한 25개의 횡구속된 고강도 콘크리트 기둥의 실험적 연구와 비교·분석한 결과 콘크리트 압축강도 60~124 MPa 범위에서의 응력-변형률 곡선과 잘 일치되었다.

핵심용어 : 고강도 콘크리트, 구성모델, 응력-변형률 관계, 등가구속응력