

# 주철근비에 따른 고강도 콘크리트 보의 휨거동

## The Effect of Longitudinal Steel Ratio on Flexural Behavior of Reinforced High Strength Concrete Beams

김진근\*, 박찬규\*\*  
Kim, Jin Keun, Park, Chan Kyu

### ABSTRACT

Eight singly reinforced high strength concrete beams were tested to investigate their flexural behavior. The variable is tensile steel ratio. The test results are presented in terms of load-deformation behavior, ductility indexes, and cracking patterns.

The flexural strengths obtained experimentally are compared to the analytical results, and good agreements are obtained. The flexural design provisions of the ACI Building Code are found to be adequate to predict the strength of reinforced high-strength concrete beams.

### 1. 서론

콘크리트의 재료역학적인 특성과 철근콘크리트 부재의 단면특성을 정의하는 기존의 모델식 및 계산식은 대부분 보통강도(압축강도 41.3MPa 이하) 수준에서 제시된 것으로서, 고강도 범위에서 이러한 식들을 사용할 경우에 기존의 식을 단순히 확장하여 사용하는 경우가 많다. 최근 철근콘크리트 구조물에 압축강도가 41.4MPa에서 82.8MPa의 범위에 있는 고강도 콘크리트가 많이 사용되고 있어서 기존의 모델식에 대한 재검토가 활발히 이루어지고 있다.

ACI Building Code<sup>1)</sup>에 제시되어 있는 등가구형응력분포 또한 이와 같은 경우이며, 이를 구성하는 계수에는 압축강도( $f_c'$ ), 압축연단에서의 극한변형도( $\epsilon_{cu}$ ), 등가응력분포 깊이와 실제 중립축 깊이의 비( $\beta_1$ ) 등이 있다.  $\beta_1$ 은 콘크리트 압축강도가 56MPa

이상일 경우 0.65로 제한하는 것으로 강도 증가에 따른 변화를 어느 정도 반영하고 있다. 그러나  $\epsilon_{cu}$ 는 0.003으로 전강도 범위에서 동일하다. Leslie, Rajagoplan 및 Everard<sup>2)</sup>는 고강도 콘크리트(특히 압축강도 56MPa 이상)의 응력-변형도 관계는 상승부에서 보통강도 콘크리트보다 선형적인 관계를 갖는 것에 착안하여 삼각형 응력분포를 제시하였다. 그 이후 재료 모델링에 의한 해석적인 방법<sup>3)</sup>, 보통중량 콘크리트<sup>4)</sup>와 경량 콘크리트 보의 휨 실험<sup>5-6)</sup> 및 응력분포에 대한 다각적인 검토<sup>7)</sup>에 의하여 등가구형응력분포의 사용이 고강도 콘크리트에서도 타당한 것으로 나타났다. 그러나  $\epsilon_{cu}$ 는 0.003 이하의 값이 실험적으로 나타나 이에 대한 재검토의 필요성이 제기되고 있다<sup>8)</sup>.

본 연구는 고강도 콘크리트 보의 휨거동에 대한 연구로서, ACI 휨강도 예측식의 타당성 검토, 콘크리트와 철근의 재료역학적 성질을 이용한 철근콘크리트 부재의 휨강도를 예측하는 해석적인 방법을 제시하는데 그 목적이 있다.

\* 한국과학기술원 토목공학과 부교수

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

표 1 시험체 상세

specimen (type)	compressive strength at test, $f_c'$ , MPa	$f_c$ #	test region dimensions			tensile steel				
			h, mm	b, mm	d, mm	detail	$A_s$ , mm <sup>2</sup>	$\rho$	$\rho_b$ (ACI)	$\rho/\rho_b$
B-1-1(A)	95.0	90.25	300	200	237.1	6D25	3040.2	0.0641	0.0722	0.888
B-1-2(A)	95.0	90.25								
B-2-1(B)	95.0	90.25	300	200	243.0	6D22	2322.6	0.0475	0.0761	0.624
B-2-2(B)	95.0	90.25								
B-3-1(B)	95.0	90.25	300	200	246.0	6D19	1719.0	0.0349	0.110	0.317
B-3-2(B)	95.0	90.25								
B-4-1(B)	95.0	90.25	300	200	253.7	3D13(2nd)	975.9	0.0192	0.0742'	0.259
B-4-2(B)	95.0	90.25				3D16(1st)				

\* Based on 100×200mm cylinder strength. +  $f_y$ ,  $E_s$  : average value of D13 and D16

# Using equivalent 150×300mm, assumed to be 95 percent of 100×200mm cylinder strength<sup>5)</sup>

The stirrups used were D10 bars.

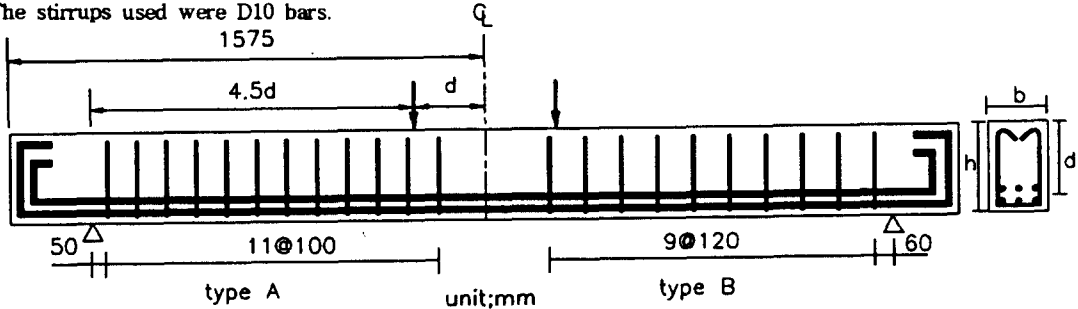


그림 1 시험체 상세

## 2. 실험

### 2.1 시험체 계획

본 연구에서는 총 8개의 보 시험체를 제작하였고, 주요변수는 주철근비이며, 콘크리트의 압축강도는 일정하게 하였다. 모든 단면에 대해서 2단 배근으로 철근을 배근하였고, 전단 스펠비(a/d)는 4.5로 고정하였다. 첫번째 인장철근까지 피복두께와 압축연단에서 스테럽까지의 피복 두께는 25mm이다. 휨과피를 유도하기 위하여 전단력이 작용하는 구간에서는 스테럽을 배근하여 보강하였다. 스테럽은 135°, 내부지름 4d<sub>b</sub>로 구부린 다음 6d<sub>b</sub>만큼 확장하였다. 시험체 상세는 표 1과 그림 1에 나타낸 바와 같다.

### 2.2 실험재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 일반 강모래를 사용하였고, 굵은골재는 최대크기 13mm의 색석을 사용하였다. 고강도 콘크리트의 작업성을 확보하기 위하여 naphthalene계 고성능 감수

제인 super-20을 사용하였다. 콘크리트는 실험실에서 강제식 믹서를 사용하여 제조하였으며, 그 배합비는 표 2와 같다. 보 시험체는 엄격한 재료 관리하에 주철근비에 따라 각각 제작하였으며, 콘크리트 타설 도중 대표적인 시료를 채취하여  $\phi 100 \times 200$ mm의 압축강도용 공시체를 제작하였다.

철근의 인장강도 시험결과는 표 3에 나타낸 바와 같다.

### 2.3 실험방법

모든 실험은 INSTRON 시험기를 사용하여 수행하였다. 하중은 그림 1에 나타낸 바와 같이 보의 중앙으로부터 각각 d 만큼 떨어진 지점에서 2점 가력하였으며, 가력방식은 변위제어 방법으로 하였다. 하중이 재하되는 동안 보의 중앙부 처짐, 순수 휨구간에서의 콘크리트 압축변형도 및 인장철근의 변형도를 측정하였다. 실험이 진행되는 동안에 보에 발생하는 주균열을 기록하였다.

표 2 콘크리트의 배합표 및 재료적 특성

material		quantity(kg/m <sup>3</sup> )	
type I cement		522.5	
coarse aggregate(granite)		1046.7	
sand(river)		614.7	
silica fume		27.5	
superplasticizer		8.25	
water		165.0	
f <sub>c</sub> ' , MPa	E <sub>c</sub> , MPa	ε <sub>o</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	f <sub>t</sub> , MPa
95.0	34513.0	3174	7.4

표 3 철근의 재료적 성질

type of steel	f <sub>y</sub> (MPa)	ε <sub>y</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	E <sub>s</sub> (×10 <sup>5</sup> ) (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)
D10	398.3	2105	2.046	576.6
D13	399.9	2040	1.955	539.4
D16	398.4	2053	1.938	543.8
D19	296.9	1592	1.864	373.5
D22	394.5	2033	1.988	596.0
D25	406.8	2250	1.942	586.8

표 4. 실험 결과의 요약

specimen	yield			ultimate			ductility index, μ <sub>o</sub>
	load <sup>#</sup> , kN	ε <sub>c</sub> <sup>*</sup> (×10 <sup>-6</sup> )	Δ <sub>y</sub> , mm	load, kN	ε <sub>c</sub> <sup>*</sup> (×10 <sup>-6</sup> )	Δ <sub>o</sub> , mm	
B-1-1	355.91	2244	12.15	449.00	3518	18.94	1.559
B-1-2	359.73	2270	12.13	469.41	3683	19.24	1.586
B-2-1	301.07	2018	12.44	362.28	3970	23.53	1.891
B-2-2	299.79	1955	11.63	389.06	4033	23.66	2.034
B-3-1	162.16	1170	7.36	197.77	3892	34.07	4.629
B-3-2	168.54	1174	7.50	207.97	3009	34.84	4.645
B-4-1	135.38	1112	8.98	164.71	3468	53.08	5.911
B-4-2	140.48	1121	9.29	162.16	3400	42.83	4.610

# first row yield

\* extreme compression fiber

### 3. 실험 고찰

철근의 항복 및 보의 파괴시점에서의 실험결과 요약이 표 4에 나타나 있다. 표 4에서 ultimate 상태라 함은 부재가 최대하중을 받을 때를 일컫는다. 실험결과에 대한 고찰은 하중-처짐의 관계, 부재의 연성, 균열 형태 및 ACI 휨강도 설계에 대한 검토 등으로 나누어 기술하였다.

#### 3.1 하중-처짐관계

하중-처짐의 관계는 그림 2 및 그림 3에 나타나 있다. 균열 발생이전과 균열발생이후에 있어서 인장철근비(ρ)가 증가함에 따라 큰 강성을 나타내었다. 이것은 인장철근비가 증가함에 따라 단면 2차 모멘트가 증가하기 때문이다. 인장철근비가 증가할수록 첫번째 인장철근이 항복한 이후에도 거의 선형적인 하중-처짐관계를 나타내었으며, 모든 인장철근이 항복한 이후에는 하중-처

짐 곡선은 큰 기울기의 변화를 나타내는데 인장철근비가 낮을수록 급격한 강성의 감소를 나타낸다. 최대하중 이후에는 인장철근비가 높을수록 급격한 하강곡선을 나타내는 취성적인 파괴형태를 나타내었다. 낮은 철근비에서도 하강부분에서 갑작스런 파괴현상이 나타났는데 이는 콘크리트의 압축영역이 작아서 발생하는 구조적인 불안정성에 기인한 것으로 사료된다. 모든 경우에 최대하중이 작용하는 시점은 순수 휨구간에서 콘크리트 압축연단의 파괴가 일어나는 때와 일치하였다. 콘크리트 압축연단의 파괴는 폭발적인 파괴형태로 나타났다.

인장철근의 항복시점에서 철근비가 증가할수록 압축연단에서의 콘크리트 변형도와 처짐이 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 3.2 연성(Ductility)

ACI Committee 363<sup>9)</sup>에 따르면 부재의 연성을 부재 처짐의 함수로서 표현하고 있

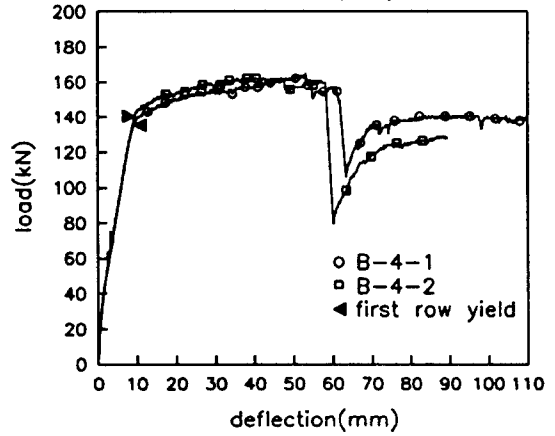
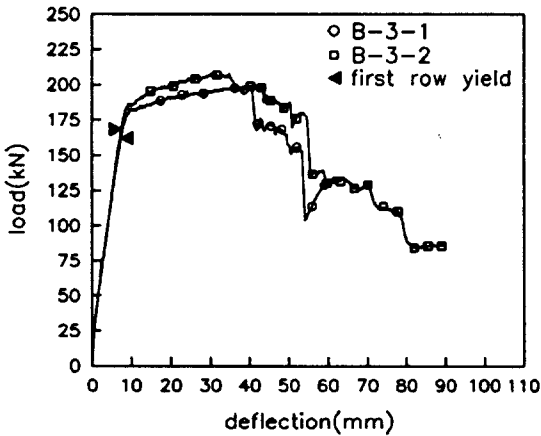
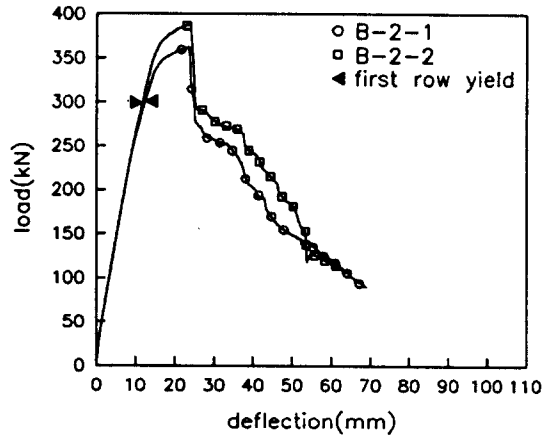
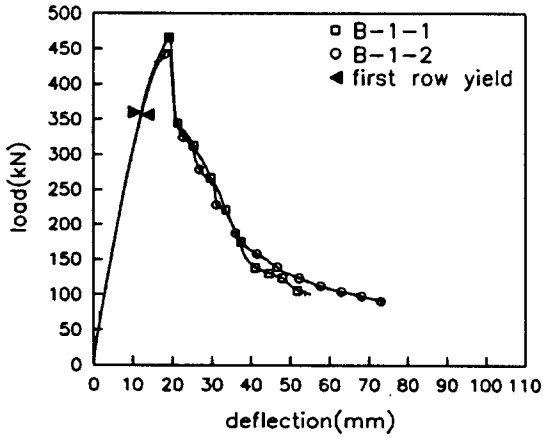


그림 2 하중과 보의 중앙에서의 처짐 곡선

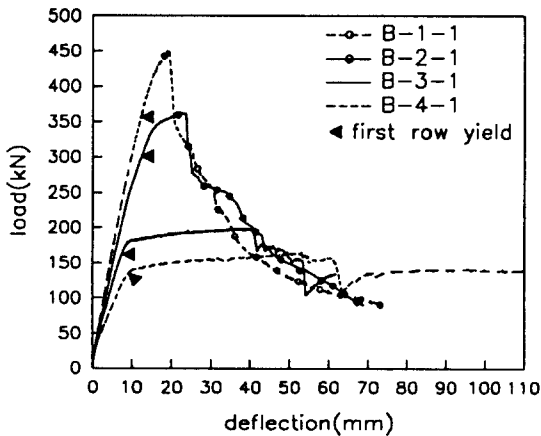


그림 3 인장철근비에 따른 하중-처짐 곡선

는데 다음 식과 같다.

$$\mu_{cu} = \Delta_{cu} / \Delta_y \quad (1)$$

여기서,  $\Delta_{cu}$ 는 파괴시의 부재의 처짐,  $\Delta_y$ 는 인장철근이 항복할 때 처짐이다.

신성우 등<sup>4)</sup>은 부재의 연성지수를 정의함에 있어서 부재의 파괴시점을 두가지로 구분하여 제안하였다. 부재가 최대하중을 받을 때의 처짐과 부재의 하중-처짐 곡선의 하강부분에서 최대하중의 80%에 해당하는 처짐으로 연성지수를 계산하는 방법을 제시하였다.

표 4에 있는 연성지수는 앞에서 언급한 첫번째 방법으로 산정한 것이며, 그림 4에 나타나 있는 모든 데이터 역시 이와 같다. 그림 4에서 알 수 있듯이 인장철근비와 평형철근비의 비가 증가할수록 연성지수가 급격히 감소함을 알 수 있다. Ahmad 등<sup>6)</sup>은 고강도 경량 콘크리트 보에서  $\rho/\rho_b$  값이 0.5 이상일 경우  $\rho/\rho_b$ 와 처짐연성지수는 콘크리

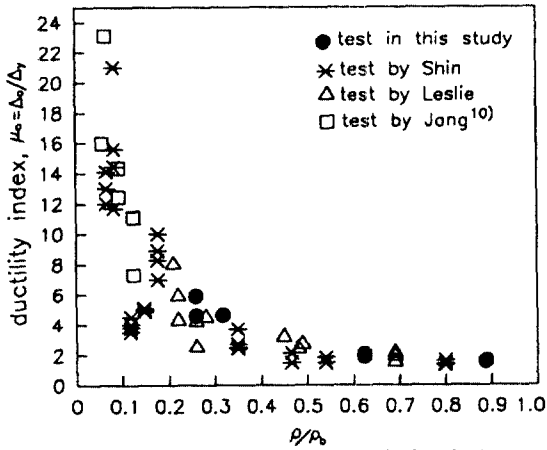


그림 4 연성지수와  $\rho/\rho_b$  와의 관계

트의 압축강도와 무관하다고 보고하였다. 그림 4에서  $\rho/\rho_b$  값이 0.8인 데이터의 압축강도는 27.6MPa,  $\rho/\rho_b$  값이 0.69인 Leslie 등의 데이터는 압축강도는 약 80.0MPa 이다. 이들 데이터와 본 연구에서 제시한 값들과 비교해 볼 때  $\rho/\rho_b$  값이 0.5이상인 경우에 부재의 연성지수는 콘크리트의 압축강도에 영향을 받지 않는 것으로 사료되며 Ahmad 등의 보고와 일치하고 있다.

$\rho/\rho_b$  값이 0.5이하인 경우 이 값이 작아질수록 부재의 연성지수는 기하급수적으로 커짐을 알 수 있다.

### 3.3 균열 형태

보 시험체의 파괴 직전의 균열형태가 그림 5에 나타나 있다. 순수 휨구간에서 인장철근비가 낮을수록 중립축이 상승함을 알 수 있으며, 주균열이 수직방향으로 진행하지 못하고 찢어지는 형태를 나타내었다. 이는 아치 작용으로 인하여 압축부분으로 더 이상 균열이 진행하지 못해서 발생한 현상으로 사료된다.

휨-전단구간에서 인장철근비에 관계없이 낮은 하중 단계에서 주균열은 수직방향으로 발생하였다. 그 이후 뚜렷한 사인장 균열이 발생하였으며, 주철근비가 커질수록 보다 넓은 영역에서 전단균열이 발생하였다. 또한 주철근비가 커질수록 휨-전단구간에서의 균열진행 깊이는 순수 휨구간보다 깊었지만

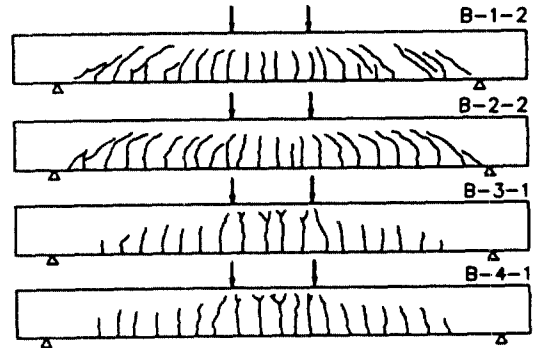


그림 5 최대하중에서의 균열진전형태

스터립의 보강에 의하여 더이상의 사인장 균열 진행은 일어나지 않았다. 그 이후 추가 하중에 의한 순수 휨구간에서의 콘크리트 압축파괴가 발생하였다.

### 3.4 ACI Code의 검증

ACI Code의 휨강도 예측식과 실험결과와의 비교가 표 5에 나타나 있다. 또한 콘크리트 및 철근의 역학적인 특성을 이용하여 부재 단면의 휨강도를 계산하였다. 콘크리트의 응력-변형도 관계는 모든 강도 수준에서 비교적 거동을 잘 예측하는 모델식<sup>11)</sup>을 사용하였다. 철근은 탄성-완전소성 형태를 갖는 응력-변형도 관계로 모델링하였다.

표 5에서 알 수 있듯이 ACI 예측식은 고강도 콘크리트 보의 휨강도를 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 사용한 콘크리트 및 철근의 재료역학적인 특성을 이용하여 휨강도를 정확히 예측할 수 있으며, 해석값은 ACI 예측식 값보다 조금 크게 산정되는 경향을 나타내었다.

### 4. 결론

주철근비에 따른 고강도 콘크리트 보의 휨에 대한 실험적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ACI 등가구형응력블럭은 단철근 고강도 콘크리트 보의 휨강도를 정확히 예측하는 것으로 나타났다.

표 5 극한모멘트의 비교

specimen	Mn(test), kN-m	Mn(ACI), kN-m	Mn(test)	Mn(theo.), kN-m	Mn(test)	strain at ultimate (theo.)
			Mn(ACI)		Mn(theo.)	
B-1-1	239.53	243.39	0.98	244.77	0.98	0.0032
B-1-2	250.42		1.03		1.02	
B-2-1	198.08	195.29	1.01	195.93	1.01	0.0032
B-2-2	212.72		1.09		1.09	
B-3-1	109.47	117.06	0.94	117.31	0.93	0.0033
B-3-2	115.11		0.98		0.98	
B-4-1	94.02	93.88	1.00	94.01	1.00	0.0033
B-4-2	92.56		0.99		0.98	

- 2)보의 압축연단에서 콘크리트 변형도는 0.003 이상으로 나타나 ACI Code에서 가 정하는 극한변형도(0.003)은 고강도 콘크 리트 보에서도 타당하다고 판단된다.
- 3)본 연구에서 제안한 해석적인 방법은 철 근콘크리트 부재의 휨강도를 잘 예측하는 것으로 나타났다.
- 4) $p/p_b$ 의 값이 0.5 이상인 경우 처짐연성지 수에 콘크리트의 압축강도는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1993년도 과학재단 목적기초 연구의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이 에 감사드립니다.

참고문헌

1)ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp.

2)Leslie, K. E., Rajagopalan, K. S.,and Everard, N. J., "Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams," ACI Journal, V. 75, No. 8, 1976, pp.517-521.

3)Wang, P. T., Shah, S. P., "High -Strength Concrete in Ultimate Strength Design," ASCE, V.104, ST11, 1978, pp. 1761-1773.

4)Shin, S. W., Ghosh, S. K., and Moreno, J., "Flexural Ductility of Ultra-High-Strength Concrete Members," ACI

Structural Journal, V. 86, No. 4, 1989, pp. 394-400.

5)Ahmad, S. H., Batts, J., "Flexural Behavior of Doubly Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams with Web Reinforcement," ACI Structural Journal, V. 88, No. 3, 1991, pp. 351-358.

6)Ahmad, S. H., Barker, R., "Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams," ACI Structural Journal, V. 88, No. 1, 1991, pp. 69-77.

7)신성우, "고강도 콘크리트 부재의 응력블 러에 관한 검토," 한국콘크리트학회지, 제 2권 2호, 1990, pp. 93-99.

8)Swartz, S. E., Nikaeen, A., Narayan Babu, H. D., Periyakaruppan, N., and Refai,T.M.,"Structural Bending Prop- erties of Higher Strength Concrete," ACI SP-87, 1985, pp. 147-178.

9)ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete," (ACI 363R-84), American Concrete Institute, Detroit, 1984, 48 pp.

10)장일영, 이호범, 변근주, "초고강도 콘크 리트의 재료특성 및 휨 거동에 관한 실험 적 연구," 한국콘크리트학회지, 제 4권 2 호, 1992, pp. 111-118.

11)이태규, "철근콘크리트 보와 골조의 비 선형 파괴거동 해석," 박사학위논문, 한국 과학기술원, 1993, 142 pp.