

고성능 철근콘크리트 보의 휨강도 및 연성능력에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Flexural Strength and Ductility Capacity
of Reinforced High Performance Concrete Beams

김용부* 고만영** 김상우***
Kim, Yong-Boo Ko, Man-Young Kim, Sang-Woo

ABSTRACT

This paper is an experimental study on the flexural strength and ductility capacity of reinforced high performance concrete beams with the concrete which has compressive strength of $600\sim 700\text{kg/cm}^2$, slump value of $20\sim 25\text{cm}$ and slump-flow value of $60\sim 70\text{cm}$. Total 8 beams with different tensile reinforcement ratio and pattern of loading were tested. From the results of reinforced high performance concrete beams, the equivalent stress block parameters proposed by MacGregor et al. or New Zealand code are recommended to use. Also, an extreme fiber concrete compressive strain of reinforced high performance concrete beams are distributed $0.0033\sim 0.0048$. In reinforced high performance concrete beams, reinforcement ratio in order to insure curvature ductility index 2 and 4 proposed by ACI code should be less than those of reinforced normal strength concrete beams

Keywords : Equivalent stress block parameter, extreme fiber concrete compressive strain, curvature ductility index

1. 서론

일반적으로 고성능 콘크리트라 함은 고강도, 고내구성, 고유동성을 가지는 콘크리트를 말하는데, 본 연구에서는 고강도와 고유동성을 가지는 콘크리트를 고성능 콘크리트라 정의한다. 고성능 콘크리트는 고강도, 고유동성으로 인하여 유리한 면이 많지만, 압축강도가 증가함에 따라 그 거동이 취성적으로 되기에 연성의 확보에 많은 문제를 가지고 있다. 현재 ACI 기준 및 국내 기준에서는 콘크리트 휨 부재 단면에서 발생하는 압축 응력 분포를 등가의 직사각형으로 단순화시켜 휨강도를 평가하고 있다. 그러나 이는 압축강도 550kg/cm^2 이하인 경우에는 적절하지만 그 이상인 경우에는 새로운 등가응력블록 변수가 필요하다.^{1,3,7)}

본 연구에서는 콘크리트 압축강도 $600\sim 700\text{kg/cm}^2$, 슬럼프 $20\sim 25\text{cm}$, 슬럼프 플로우 $60\sim 70\text{cm}$ 의

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 교수, 공박
** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 박사과정
*** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

고강도 및 고유동성을 가지는 고성능 철근콘크리트 보를 제작하여 (1) 인장철근비와 하중재하형태에 따른 휨강도 및 연성능력을 실험적으로 평가하고, (2) 고강도 콘크리트에 적용 가능한 새로운 등가응력블록 변수의 선택과 실제 구조물에 적용할 수 있는 기초적인 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실험

2.1 재료 실험

본 실험에서 사용한 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트이다. 굵은 골재는 최대직경 13mm로서 화강암 쇄석을 사용하였고, 모래는 사교천 강모래를 사용하였다. 고강도 콘크리트를 발현하기 위하여 혼화제는 입경 $0.1\mu\text{m}$ 인 실리카흄을 사용하였고, 고강도 콘크리트의 낮은 물결합재비로 인한 시공성 저하를 막고 고유동성을 확보하기 위하여 고성능 감수제는 멜라민계를 사용하였다. 고성능 콘크리트의 배합설계표는 Table 1에 나타내었다.

본 실험에 사용된 공시체는 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 실린더형 몰드를 사용하여 제작하였다. 압축강도와 인장강도(조깅 강도), 탄성계수는 KS F 2405 규정에 의하여 측정하였으며 고성능 콘크리트의 역학적 특성은 Table 2에 나타내었다. 철근은 SD40 (이형철근)이며 철근의 인장강도 실험은 KS B 0802 규정에 의하여 실시하였다. 실험결과는 Table 3에 나타내었다.

2.2 실험 계획

실험변수는 인장철근비와 하중재하형태이고, 보의 개수는 총 8개이다. 인장철근비는 최대 인장철근비 이하인 $0.30\rho_b$, $0.50\rho_b$, $0.65\rho_b$, $0.75\rho_b$ 로 하였다. 단, ρ_b 는 MacGregor 등이 제안한 등가응력블록과 철근의 재료실험 결과로부터 구하였다. 하중재하형태는 a/d(전단스팬비)와 모멘트도의 영향을 살펴보기 위하여 인장철근비에 대하여 각각 1점가력 및 2점가력으로 하였다.

Table 1 Mix proportion of high performance concrete (unit : kg/m^3)

W/(C+S)	S/A	Water	Cement	Sand	Coarse aggregate	Silica fume	Super-plasticizer
30%	38%	167	530	629	1026	26.5(5%)	21.2(4%)

Table 2 Material properties of high performance concrete

Compressive strength	Split strength (kg/cm^2)	Elastic modulus (kg/cm^2)	Ultimate strain	Slump (cm)	Slump-flow (cm)
679 kg/cm^2	52.0	3.18×10^5	0.0024	23.0	65.0

Table 3 Material properties of reinforcement

Rebars	Yield strength (kg/cm^2)	Tensile strength (kg/cm^2)	Elongation ratio (%)	Elastic modulus (kg/cm^2)
D10	4140.8	6197.2	18.6	1.63×10^6
D13	4015.7	5905.5	21.0	2.04×10^6
D16	4522.6	6532.7	16.8	1.75×10^6
D19	4277.0	6271.8	17.8	1.77×10^6
D22	3927.7	5994.8	16.0	1.75×10^6

Table 4 Properties of test beams

Beams	Arrangement of tensile rebar	Tensile rebar ratio	Pattern of loading	Clear span length
600-30-1	2-D13, 1-D10	$0.333 \rho_b$	1 point loading	140 cm
600-50-1	2-D16, 1-D13	$0.539 \rho_b$		
600-65-1	2-D19, 1-D10	$0.662 \rho_b$		
600-75-1	2-D19, 1-D16	$0.793 \rho_b$	2 point loading	
600-30-2	2-D13, 1-D10	$0.333 \rho_b$		
600-50-2	2-D16, 1-D13	$0.539 \rho_b$		
600-65-2	2-D19, 1-D10	$0.662 \rho_b$		
600-75-2	2-D19, 1-D16	$0.793 \rho_b$		

Compressive reinforcement : 2-D10
Shear reinforcement : D10 @60

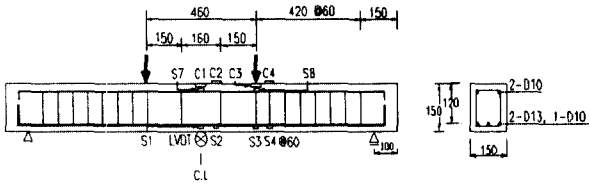


Fig. 1 Details of test beam

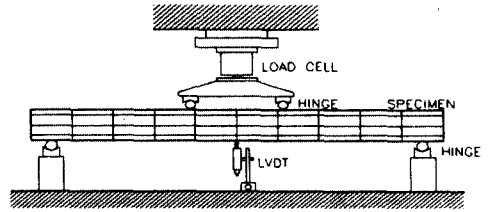


Fig. 2 Test set up of beam

보의 계획은 전단파괴를 방지하기 위하여 녹근을 $d/2$ 이하의 간격으로 충분히 배근하였으며, 휨거동이 지배적으로 나타나도록 전단스팬비를 4.0, 5.8로 계획하였다. 보의 단면은 $15 \times 15\text{cm}$ 이고 길이는 1.60m이다. 보의 특성은 Table 4에 나타내었고 배근상세는 Fig. 1에 나타내었다.

보의 설치 현황 및 가력방법은 Fig. 2에 나타내었다. 보의 변형을 측정하기 위하여 인장철근과 압축철근에 게이지를 부착하였고, 콘크리트는 압축연단에 콘크리트용 게이지를 부착하였다. 보의 중앙부에는 처짐을 측정하기 위하여 LVDT 1개를 설치하였다.

3. 실험결과 및 분석

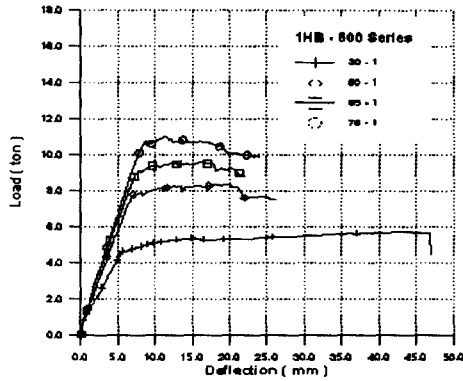
3.1 보의 변형

인장철근비에 따른 고성능 철근콘크리트 보의 하중-처짐 곡선은 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3과 Table 5에서 보아 알 수 있듯이 철근비가 증가할수록 항복시 하중과 처짐 및 최대하중은 증가하지만, 최대하중시 처짐은 감소함으로써 연성능력이 떨어지는 것으로 나타났다.

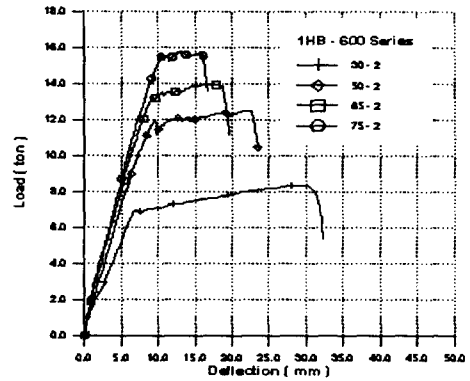
Table 5는 보의 변형 특성에 대하여 나타낸 것이다. 보의 휨실험 결과 콘크리트의 압축연단과 인장철근, 압축철근의 변형률 분포가 일직선으로 나타나지 않아서 곡률의 실험값은 콘크리트의 압축연단 변형도와 인장철근 변형도의 비례관계에 의하여 구하였다. 항복시 곡률의 이론값[식 (1)]은 선형탄성이론으로 구하였고, 극한시 곡률의 이론값[식 (2)]은 보의 휨실험 결과 콘크리트 압축연단의 극한 변형도

Table 5 Deformation properties of beams

Beams	Δ_y (mm)	$\varphi_y (\times 10^{-4})$			Δ_u (mm)	$\varphi_u (\times 10^{-4})$			ϵ_{cu}	$\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\varphi_u}{\varphi_y}$
		Exp.	Cal.	Exp. Cal.		Exp.	Cal.	Exp. Cal.			
600-30-1	5.9	3.48	3.75	0.93	15.3	16.27	18.7	0.87	0.0046	2.59	4.68
600-50-1	7.2	4.60	4.02	1.14	19.6	15.94	9.81	1.62	0.0037	2.72	3.47
600-65-1	8.1	4.56	3.56	1.28	16.7	13.47	8.13	1.66	0.0033	2.06	2.95
600-75-1	8.5	4.95	4.19	1.18	11.5	12.62	8.92	1.41	0.0044	1.35	2.55
600-30-2	6.8	3.33	3.67	0.91	30.3	15.29	18.82	0.81	0.0048	4.46	4.59
600-50-2	9.0	4.49	4.22	1.06	22.5	14.11	12.43	1.14	0.0045	2.34	3.14
600-65-2	9.2	4.44	3.82	1.16	17.7	13.20	10.80	1.22	0.0043	1.92	2.76
600-75-2	10.6	4.88	4.44	1.10	12.9	9.51	7.99	1.19	0.0039	1.22	1.95
AVE.				1.10				1.24			



(a) 1 Point Loading



(b) 2 Point Loading

Fig. 3 Load-Deflection Curve

를 사용하여 구하였다. Table 5에서 언급되어 있듯이, 고성능 철근콘크리트 보 압축연단의 극한 변형도는 0.0033~0.0048 사이에 분포하였다.

$$\varphi_y = (F_y/E_s)/(d-kd) \quad (1)$$

$$\varphi_u = \varepsilon_{cu}/c \quad (2)$$

여기서, c는 Table 6과 식 (3)에서 나타낸 MacGregor 등에 의해 제안된 ‘고강도 콘크리트 ACI 등가응력블록 수정’(이하 MacGregor 블록이라 칭한다)을 사용하여 구하였다.

3.2 휨강도

현재 일반적으로 사용되는 등가응력블록 변수의 적용 범위는 콘크리트 압축강도 550kg/cm^2 이하이다. 따라서, 본 실험결과와 550kg/cm^2 이상의 콘크리트 압축강도를 가지는 고성능 콘크리트의 등가응

Table 6 Test results of yield moment and comparison of max. moment between experimental results and code equations for the equivalent stress block

Beams	M_y			M_u				
	Exp.	cal.	Exp. Cal.	Exp.	Exp. / Codes			
					MacGregor Block	CEB-FIP Code	Triangular Stress Block	Newzealand Code
600-30-1	1.62	1.51	1.07	1.88	1.17	1.20	1.18	1.17
600-50-1	2.73	2.56	1.07	2.90	1.10	1.13	1.10	1.09
600-65-1	3.17	2.74	1.16	3.34	1.19	1.23	1.19	1.18
600-75-1	3.71	3.33	1.11	3.86	1.16	1.21	1.16	1.15
600-30-2	1.62	1.54	1.05	1.96	1.19	1.22	1.20	1.20
600-50-2	2.73	2.46	1.11	2.93	1.16	1.20	1.16	1.16
600-65-2	3.12	2.67	1.17	3.27	1.20	1.24	1.20	1.19
600-75-2	3.64	3.27	1.11	3.69	1.13	1.18	1.13	1.12
AVE.			1.11		1.17	1.21	1.17	1.17

력블록 변수에 대하여 4가지의 기준 및 제안식에서 구한 이론값과 비교·분석함으로써 고성능 콘크리트에서 사용 가능한 등가응력블록 변수를 제안하고자 한다.

Table 6에는 고성능 철근콘크리트 보의 휨강도를 제안된 4가지 식을 이용하여 구한 모멘트와 실험에 의해 구해진 모멘트의 비(실험/이론)로 나타내었다. MacGregor 블록과 삼각형 응력블록 및 New Zealand 기준에 의한 응력블록을 이용하여 구한 모멘트비가 우연히 같게 나왔다. 하지만, MacGregor 블록은 응력블록 설정시 안전 측면에서 실험결과보다 10.8% 낮은 값을 취하고 있고, New Zealand 기준에서도 응력블록을 설정할 때 얼마인지 정확히 언급되어 있지 않으나 실험결과에 대해 안전치를 두고 있다. 그러나, 삼각형 응력블록은 안전치를 고려하지 않은 것이므로 고성능 콘크리트를 사용할 경우 콘크리트 압축응력 계산을 위한 등가응력블록 변수는 MacGregor 블록과 New Zealand 기준을 사용하는 것이 합당하다고 사료된다.^{5,7,8)}

MacGregor 블록 변수[식 (3)]와 New Zealand 기준에 의한 응력블록 변수[식 (4)]는 아래식과 같다.

$$\alpha_1 = 0.85 - f'_c / 8000 \geq 0.725 \qquad \beta_1 = 0.95 - f'_c / 4000 \geq 0.70 \qquad (3)$$

$$\alpha = 0.85 - 0.004(f'_c - 550) / 10 \geq 0.75 \qquad \gamma = 0.85 - 0.008(f'_c - 300) / 10 \geq 0.65 \qquad (4)$$

단, f'_c 는 kg/cm^2 이다. 삼각형 응력블록은 $1/2 (f'_c \cdot cb)$ 로 구하였다. 여기서, c 는 극한시 중립축 층이고 b 는 부재의 폭이다.

3.3 연성

연성이란 부재가 휨 능력에 큰 감소 없이 변형을 일으킬 수 있는 능력을 말하며, 연성을 나타내는 지표로는 변위 연성지수[식 (5)]와 곡률 연성지수[식 (6)]가 있다.

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \qquad (5)$$

$$\mu = \varphi_u / \varphi_y \qquad (6)$$

여기서, Δ_y 는 인장철근의 최초 항복시의 변위, Δ_u 는 최대하중시의 변위, φ_y 는 인장철근의 최초항복

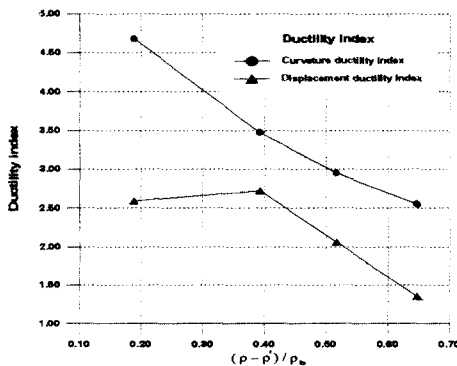


Fig. 4 Comparison of displacement and curvature ductility index for 1 point loading beams

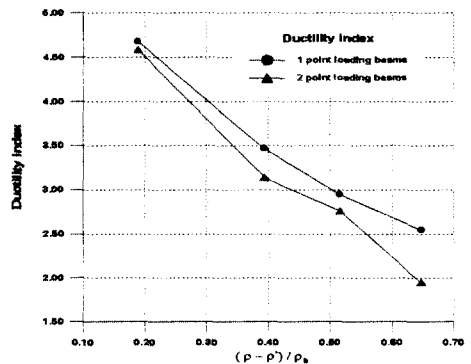


Fig. 5 Curvature ductility index with different reinforcement ratio

시의 곡률, ϕ_u 는 최대하중시의 곡률이다.

고성능 철근콘크리트 보의 두 가지 연성지수에 대한 비교는 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보아 알 수 있듯이 곡률 연성지수가 변위 연성지수보다 약 48% 크게 나타났다. 이는 휨 부재의 경우 항복이후의 변형이 소성힌지에서 집중되어 일어나기 때문이다.

인장철근비에 따른 각 보의 곡률 연성지수는 Fig. 5에 나타내었고 인장철근비가 증가할수록 연성은 감소하였다. 본 실험의 경우 고성능 철근콘크리트 보 부재가 정적하중 상태에서 현재 ACI 기준의 최대철근비 $0.75 \rho_b$ 일 때 허용 곡률 연성지수 2 이상을 확보하기 위해서는 $\rho - \rho' \leq 0.63 \rho_b$ 이하로 낮추어야 할 것으로 나타났다. 또한, 휨 부재의 모멘트 재분배를 위해 현 기준의 철근비에서 허용하는 곡률 연성지수 4 이상을 확보하기 위해서는 $\rho - \rho' \leq 0.27 \rho_b$ 이하로 낮추어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 콘크리트 압축강도가 $600 \sim 700 \text{kg/cm}^2$, 슬럼프 20~25cm, 슬럼프 플로우 60~70cm인 고성능 철근콘크리트 보의 휨실험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 고성능 철근콘크리트 보의 압축연단의 극한 변형도는 0.0033~0.0048 사이에 분포하였다.
2. 고성능 콘크리트의 등가응력블록 변수는 MacGregor 블록이나 New Zealand 기준에 의한 응력블록을 사용함이 합당한 것으로 사료된다.
3. 고성능 철근콘크리트 휨 부재가 정적하중 상태에서 현재 ACI 기준의 철근비에서 허용하는 연성지수 2 이상을 확보하기 위한 철근비는 $\rho - \rho' \leq 0.63 \rho_b$ 에서 가능한 것으로 판단된다. 또한, 휨 부재의 모멘트 재분배를 위한 현재 ACI 기준의 철근비에서 허용하는 연성지수 4 이상을 확보하기 위한 철근비는 $\rho - \rho' \leq 0.27 \rho_b$ 이하로 낮추어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 오명석, 고만영, 김용부, "고성능 철근콘크리트 보의 연성능력에 관한 실험적 연구," *콘크리트학회지*, 제10권 3호, 1998. 6, pp. 117-112.
2. 김형만, 고만영, 김용부, "고성능 철근콘크리트 보의 휨거동에 대한 실험적 연구," *대한건축학회 논문집*, 제13권 4호, 1997. 4, pp. 381-388.
3. 유석형, 안종문, 이광수, 신성우, "고강도 철근 콘크리트 보의 휨 설계 및 연성능력," *콘크리트학회지*, 제8권 6호, 1996. 12, pp. 141-149.
4. R. Park and D. Ruitong, "Ductility of Doubly Reinforced Concrete Beam Sections," *ACI Structural Journal*, March-April 1988, pp. 217-225.
5. H. H. H. Ibrahim and J. G. MacGregor, "Modification of the ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 1, January-February 1997, pp. 40-48.
6. Park, R., and Pauley, T., "Ultimate Deformation and Ductility of Members with Flexure," *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons Inc., 1975, pp. 195-269
7. B. V. Rangan and R. F. Warner, "Applications of High-Strength Concrete (HSC)," *Large Concrete Buildings*, Longman Group Limited, 1996, pp. 158-182
8. Comité Euro-International du Béton, *CEB-FIP MODEL CODE 1990*.