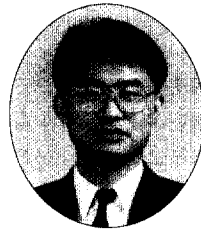


고성능 철근콘크리트 보의 휨강성 및 소성힌지의 회전능력에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Flexural Stiffness and Plastic Hinge Rotation Capacity of Reinforced High Performance Concrete Beams



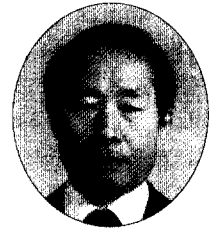
고만영*

Ko, Man-Young



김상우**

Kim, Sang-Woo



김용부***

Kim, Yong-Boo

ABSTRACT

This paper presents a study on the flexural stiffness, plastic hinge length and plastic hinge rotation capacity of reinforced high performance concrete beams. 15 beams with different strength of concrete, reinforcement ratio and the pattern of loadings were tested. From the test results of reinforced normal strength concrete beams and reinforced high performance concrete beams with the concrete which has cylinder compressive strength of 700kg/cm^2 , slump value of 20~25cm and slump-flow value of 60~70cm, it is found that an extreme fiber concrete compressive strain of $\epsilon_{cu}=0.0047$ may be used in ultimate curvature computations of reinforced high performance concrete beams. An empirical equation is proposed to estimate the effective moment of inertia, length and rotation capacity of plastic hinge of simply supported reinforced high performance concrete beams. The estimated deflections using this equation agree well with the experimental values.

Keywords : reinforced high performance concrete, ultimate curvature, effective moment of inertia, plastic hinge length, plastic hinge rotation capacity

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

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 1999년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

고성능 콘크리트는 고강도, 고내구성, 및 고유동성의 콘크리트로 정의할 수 있으나, 그 나라의 건설환경에 따라 다르게 발전하고 있다. 본 연구에서 고성능 콘크리트는 실린더 공시체의 콘크리트 압축강도가 700 kg/cm², 슬럼프 20~25 cm, 슬럼프-플로우가 60~70 cm인 고강도와 고유동성의 콘크리트로 정의한다.

이러한 고성능 콘크리트를 사용하여 만든 철근콘크리트 보(이하 고성능 철근콘크리트보라 칭한다.)의 휨거동에 대한 연구를 수행하는 중요한 목적은 극한 휨강도와 연성능력 및 하중-처짐 거동을 예측하는 것이다. 그런데 사용하중 범위에서 고성능 철근콘크리트 보의 휨강성에 대해서는 비교적 연구가 부족한 상태이다. 현재 장, 단기 하중에 대한 철근 콘크리트 휨 부재의 처짐 계산을 위해 몇몇 방법들이 제안되어 있다. 그러나, 이러한 방법들은 보통 강도의 철근콘크리트를 주로 다룬 것이므로, 고성능 철근콘크리트보와는 어느 정도 차이가 있을 수 있다.

보의 처짐을 결정하기 위해서는 먼저 단면 2차 모멘트(I)를 구하여야 한다. 단면 2차 모멘트는 부재 내에 발생하는 균열의 양에 의존한다. 즉 균열 발생 후 부재 길이를 따라 곡률의 변화가 일어나고 균열 사이에서 중립축이 변화하며, 단면의 휨 강성은 감소한다. 단면 2차 모멘트는 전체 단면 2차 모멘트(I_g)에서부터 균열 단면 2차 모멘트(I_{cr})까지 보 길이를 따라 변화하며, 이러한 현상에 의해 처짐의 계산이 복잡해지고 $M-\phi$ 관계로부터 변형을 정확하게 결정하기가 어려워진다. 따라서, 균열이 생긴 부재에서 균열 단면과 비균열 단면 사이의 값을 가지는 유효 단면 2차 모멘트(I_e)를 선택하는 것이 바람직하다.

1971년 이래 ACI Building Code에서 단순보의 전체 길이에 대하여 유효 단면 2차 모멘트(I_e)는 아래와 같은 Branson이 유도한 식을 사용하고 있다.^{2,4,8)}

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (1)$$

여기서, M_a 는 처짐이 계산된 곳에서 부재의 최대

모멘트이고, M_{cr} 은 보의 균열 모멘트이다. I_e 는 $M_{cr} < M_a < M_y$ 일 때 식 (1)을 이용하여 구한다.

실험 및 이론적인 연구 노력의 결과, 휨거동하에서 보통 철근콘크리트 구조물의 완전한 모멘트 재분배를 위한 소성 회전능력의 평가는 어느 정도 이루어져 있다. 그러나 고성능 철근콘크리트 보에서 모멘트-회전 특성, 안전한 소성 회전능력, 완전 모멘트 재분배에 관해서는 아직도 좀 더 많은 연구가 필요한 상태에 있다. 그러므로 고성능 철근콘크리트 구조물의 한계설계 이론에서 소성 힌지영역의 회전 변형을 상세히 고려하는 것이 필요하다.

본 연구의 목적은 고성능 철근콘크리트 단순보의 휨강성(EI), 소성 회전능력(θ_p), 소성힌지 길이(l_p)를 실험적으로 평가하고 철근콘크리트에 대한 ACI 규준에 근거한 기존의 이론식과 비교, 분석함으로써 설계 기초자료를 제공하는 데 있다.

2. 실험

2.1 재료실험

2.1.1 고성능 콘크리트의 재료실험

본 실험에서는 콘크리트의 특성을 알아보기 위하여 $\phi 10 \times 20$ cm의 실린더 공시체를 총 15개 제작하여 재령 28일에 압축 및 인장실험은 각각 KS F 2405와 KS F 2423 규정에 의하여 실시하였다. 그리고 탄성계수 측정은 ASTM C 469-65의 규정에 따라서 실시하였다. 실험결과는 표 1에 나타내었다.

응력-변형도 곡선은 강도가 높아질수록 최대응력 이전의 거동이 선형화되는 경향이 있으며 최대응력 이후에는 응력이 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 최대응력에서의 변형도는 강도가 높아질수록 조금씩 증가하였다.¹⁾

2.1.2 철근의 재료실험

실험에 사용된 철근은 이형철근으로 SD40이다. 철근의 인장강도 실험은 KS B 0802 규정에 따라 실시하였으며, 실험결과는 그림 1에 나타내었다.

2.2 실험 계획

본 실험에서 실험체 계획은 그림 2와 같이 전단

Table 1 Material properties of concrete

Concrete	Slump Flow (Slump) (cm)	Compressive strength (kg/cm^2)	Split strength (kg/cm^2)	Elastic modulus (kg/cm^2)	Ultimate strain
HPC	62.5 (24.2)	710	38	3.27×10^7	0.0032
NSC	18.7	370	27.8	2.1×10^7	0.003

HPC : High Performance Concrete
 NSC : Normal Strength Concrete

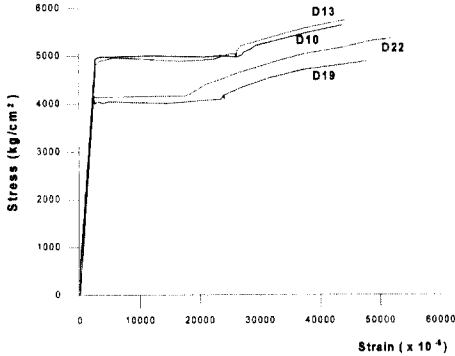


Fig. 1 Stress-strain curve of rebar

스팬 구간($a/d = 4.5, 6.0$)에서 전단파괴를 방지하기 위하여 늑근을 배근하였다. 인장철근은 $\rho = 0.38 \rho_b, 0.62 \rho_b, 0.92 \rho_b, 1.39 \rho_b$ 로 계획하여 휨거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 또한 각각에 대해 복근비를 0, 0.15, 0.3으로 달리하여 총 15개의 철근콘크리트 보를 제작하였다. 보의 단면은 20×18 cm, 길이는 200 cm로 하였다.

각 보는 그림 3과 같이 설치하였고, 가력 방법은 1점 및 2점에 집중하중을 가하였다. 보 중앙부에는 LVDT를 1개 설치하여 중앙부의 처짐을 측정하였다. 보의 소성구간은 일반적으로 가력점에서 d 이내 범위에서 형성된다. 따라서 보의 변형의 대칭을 예상하여 그림 2와 같이 중앙에서 한쪽 방향으로 인장철근과 압축측 콘크리트의 같은 위치에 게이지를 설치하여 변형도를 측정함으로써 보의 소성현저 길이 및 회전능력을 평가할 수 있도록 하였다. 또한 곡률 및 콘크리트의 극한 변형도를 측정할 수 있도록 하였다. 보의 상세는 표 2에 나타내었다.

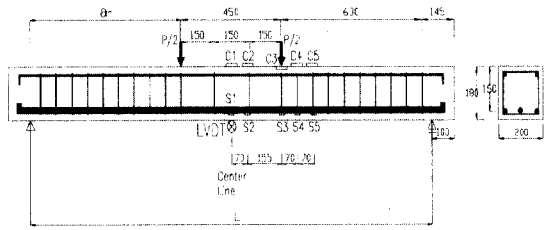


Fig. 2 Details of test beams

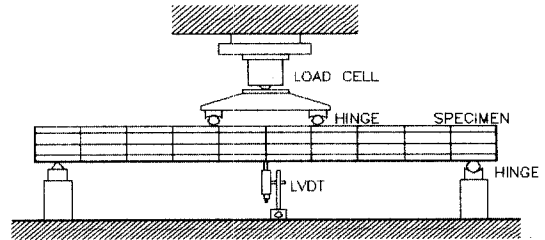


Fig. 3 Test set up of beams

Table 2 Properties of test beams

Beams	Compressive strength (kg/cm^2)	Tensile rebar		Compressive rebar		ρ' / ρ	Clear span length (L - 2a) (cm)
		Arrangement	Ratio (ρ)	Arrangement	Ratio (ρ')		
HO-00	710	5-D22	0.0717	0	0	0	180 (45)
HO-15				1-D19	0.0096	0.15	
HO-30				4-D13 1-D10	0.0193	0.30	
HB-00	710	3-D22 2-D13	0.0472	0	0	0	180 (45)
HB-15				3-D10	0.00715	0.15	
HB-30				1-D22	0.0129	0.27	
HU-00	710	1-D22 2-D19	0.0320	0	0	0	180 (45)
HU-15				2-D10	0.0048	0.15	
HU-30				1-D19	0.0096	0.30	
NU-00	370	3-D13	0.0127	0	0	0	180 (45)
NU-15				1-D10	0.0024	0.19	
NU-30				1-D13	0.0042	0.33	
HU ^o -00	710	1-D22 2-D19	0.0320	0	0	0	180 (0)
HU ^o -15				2-D10	0.0048	0.15	
HU ^o -30				1-D19	0.0096	0.30	

보의 의미는 다음과 같다.

H U - 15

① ② ③

① : 콘크리트의 강도 (H:high, N:normal)

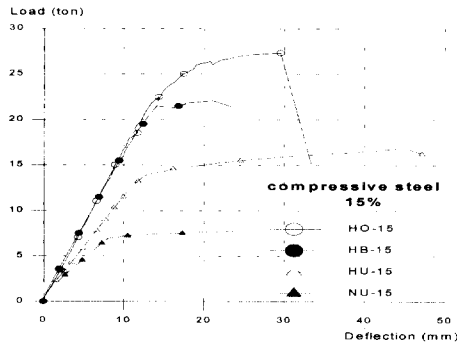
② : 인장철근비 (O:over, B:balanced, U:under)

③ : 복근비 (0:0, 15:0.15, 30:0.30)

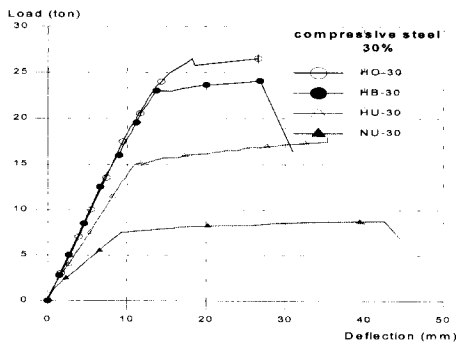
Table 3 Moment deformation characteristic of tested beams

Beams	Rebar ratio (ρ)	Rebar ratio ($\rho - \rho'$)	M_{cr} (tm)	M_y (tm)	Δ_y (mm)			φ_y ($\times 10^{-4}$)	M_u (tm)	Δ_u (mm)	φ_u ($\times 10^{-4}$)		ϵ_{cu}	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\varphi_u}{\varphi_y}$
					Exp	Cal	$\frac{Exp}{Cal}$				Exp	Cal				
HO-00	1.39	$1.39 \rho_b$	0.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HO-15		$1.18 \rho_b$	0.43	7.94	15.31	17.94	0.85	4.44	9.23	29.53	16.67	6.58	0.0053	1.16	1.93	3.75
HO-30		$0.97 \rho_b$	0.81	8.11	14.29	18.32	0.78	4.59	8.95	18.18	10.49	6.33	0.0042	1.10	1.27	2.29
HB-00	0.92	$0.92 \rho_b$	0.58	7.59	15.21	15.71	0.97	3.34	7.93	21.24	3.92	5.34	0.0037	1.04	1.40	1.17
HB-15		$0.78 \rho_b$	0.73	7.19	14.07	14.87	0.95	3.59	7.43	20.11	10.48	8.66	0.0051	1.03	1.28	2.92
HB-30		$0.64 \rho_b$	1.62	7.78	13.68	16.05	0.85	3.81	7.97	19.30	14.18	8.64	0.0044	1.02	1.41	3.72
HU-00	0.62	$0.62 \rho_b$	1.24	5.07	11.69	13.17	0.89	3.64	5.57	24.60	16.78	9.77	0.0046	1.10	2.10	4.60
HU-15		$0.53 \rho_b$	1.20	4.59	12.27	11.90	1.02	3.39	5.38	29.97	15.58	10.93	0.0046	1.17	2.44	4.59
HU-30		$0.43 \rho_b$	1.03	5.07	11.01	13.24	0.83	2.93	6.20	32.18	20.05	16.10	0.0062	1.22	2.92	6.84
NU-00	0.38	$0.38 \rho_b$	0.86	2.47	8.70	8.50	1.02	2.98	2.85	26.18	15.08	4.79	0.0037	1.15	3.01	5.06
NU-15		$0.32 \rho_b$	0.59	2.34	8.10	8.32	0.97	2.73	2.44	25.47	11.66	5.78	0.0042	1.04	3.14	4.27
NU-30		$0.27 \rho_b$	1.36	2.53	9.24	7.71	1.20	2.75	2.95	39.40	18.35	6.17	0.0050	1.17	4.26	6.67
HU ⁰ -00	0.62	$0.62 \rho_b$	1.40	5.47	10.42	11.64	0.90	3.18	5.85	20.08	13.96	9.77	0.0046	1.07	1.93	4.39
HU ⁰ -15		$0.53 \rho_b$	0.90	5.31	10.24	11.39	0.90	3.22	5.85	18.11	13.31	9.50	0.0040	1.10	1.77	4.13
HU ⁰ -30		$0.43 \rho_b$	1.38	5.40	9.14	11.54	0.79	3.17	6.12	18.27	14.73	12.47	0.0048	1.13	2.98	4.65

$\Delta_{y,Cal}$: 본 논문에서 제시한 유효단면 2차 모멘트를 이용하여 식(4)로 구한 항복시 변위. 단, 보통 강도 철근콘크리트보의 경우는 기존식의 유효단면 2차 모멘트를 이용하여 식(4)로 구한 항복시 변위



(a) Beams of $\rho'/\rho = 0.15$



(b) Beams of $\rho'/\rho = 0.30$

Fig. 4 Load-Deflection curve of tested beams

3. 실험 결과 및 분석

3.1 모멘트 - 변형

전체 처짐은 탄성 처짐과 비탄성 처짐으로 나눌 수 있다. 비탄성 처짐(Δ_u / Δ_y) 및 연성(φ_u / φ_y)은 철근비가 감소할수록 증가하는 경향으로 나타났다. 파대 철근 단면의 거동은 인장 철근의 최초 항복후 하중-처짐 관계가 콘크리트의 응력-변형도 관계와 유사한 곡선을 이루며 최대 하중에 도달하는 콘크리트의 특성이 지배적으로 나타났다. 평형 철근 단면의 거동은 거의 동시에 인장철근의 항복응력과 콘크리트의 최대응력에 도달하여 파괴되는 양상을 보였고, 파소 철근 단면의 거동은 주로 철근의 특성이 지배적으로 나타나는 연성파괴 형태를 관찰할 수 있었다 (표 3, 그림 4 참조).

곡률의 실험값은 콘크리트 압축연단의 변형도와 인장철근 변형도의 비례관계로 구하였다. 그리고 극한 곡률(φ_u)의 이론값은 $\varphi_u = \epsilon_{cu} / c$ 로 구하였고, 여기서 ϵ_{cu} 는 보의 휨실험 결과 콘크리트 압축연단의 극한 변형도이고 c 는 Macgregor 응력블록을 사용하여 힘의 평형조건으로 구한 극한 상태에서의 중

Table 4 Comparison between measured and predicted flexural rigidity of tested beams (HU-30)

Load (ton)	M_a/M_{cr}	Δ (mm)	I_{exp} (cm ⁴)	I_e (cm ⁴)	I_{ef} (cm ⁴)	I_{exp}/I_e	I_{exp}/I_{ef}	Remarks
3.99	1.31	2.62	5172.21	7650.57	4913.21	0.68	1.05	
4.99	1.64	3.36	5043.89	6831.40	4387.14	0.74	1.15	
6.49	2.13	4.55	4884.37	6364.03	4086.99	0.76	1.19	
7.53	2.47	5.34	4789.15	6223.92	3997.02	0.77	1.20	
9.02	2.96	6.38	4801.65	6119.64	3930.05	0.78	1.22	
10.52	3.45	7.45	4795.83	6066.02	3895.61	0.79	1.23	
11.48	3.76	8.11	4807.57	6044.94	3882.07	0.80	1.24	
12.64	4.14	9.01	4764.60	6027.29	3870.74	0.79	1.23	
14.00	4.59	10.01	4707.73	6013.37	3861.80	0.78	1.22	
15.03	4.93	11.01	4636.35	6005.93	3857.02	0.77	1.20	Yield Load

립축 춤이다. 극한 곡률의 실험값은 이론값보다 약 45% 크게 나타났는데, 이는 철근콘크리트보에서 중립축의 위치는 균열사이에서 변화하고 실험결과 곡률의 최대값은 이론값에 의한 중립축 위치보다 균열이 더 위쪽까지 진전되는 부분에서 나타나기 때문이다. 그리고 균열이 이론에 의한 중립축위로 얼마만큼 진전되는지는 이론적으로 구하기 어려우므로 콘크리트 압축연단의 극한 변형도를 적절히 평가하여 실험값과 이론값의 차이가 좁혀져야 할 것으로 사료된다. 본 실험결과 콘크리트의 극한 변형도는 0.0037~0.0062 사이에 나타났는데, 참고문헌 3, 6, 7의 연구에서도 비슷한 결과를 나타내고 있다. 따라서 본 실험의 경우에 극한 곡률을 계산할 때 콘크리트의 극한 변형도는 실험결과를 만족하면서 극한곡률을 적절히 평가할 수 있는 평균값으로 $\epsilon_{cu} = 0.0047$ 를 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2 휨 강성

2점 하중을 받는 고성능 철근콘크리트 단순보의 실험에 입각한 단면 2차 모멘트는 탄성처짐 방정식을 이용하여 다음과 같이 평가할 수 있다⁴⁾.

$$I_{exp} = \frac{p \cdot a}{48 E_c \Delta_{exp}} (3L^2 - 4a^2) \quad (2)$$

하중단계별 I_e 및 I_{exp} 값은 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산하여 비교하였고 표 4와 그림 5에 나타났다. 식 (2)에 사용된 탄성계수(E_c)는 고성능 철근콘크리트 보의 경우는 $3.27 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 보통 강도 철근콘크리트 보의 경우는 $2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 으로

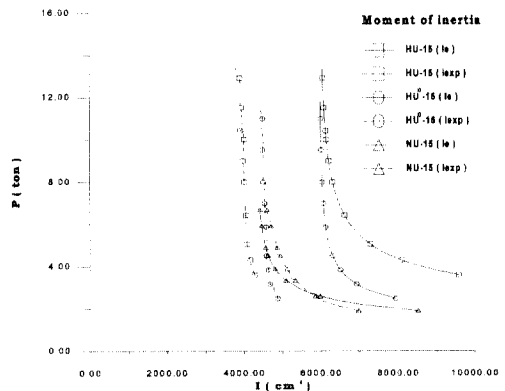


Fig. 5 Variation of I_e , I_{exp} with loading level for tested beams

공시체의 압축실험 결과를 사용하였다. 보통 강도의 철근콘크리트보에서 I_{exp} 와 I_e 는 거의 일치하게 나타났다으나, 고성능 철근콘크리트보에서 I_{exp} 는 I_e 보다 약 20~35% 작게 나타났다(그림 5).

결국, 기존 식(1)으로 구한 I_e 는 고성능 철근콘크리트 보의 I_{exp} 보다 과대평가됨으로써 처짐을 과소 평가 하였다. 그러므로 ACI 규준의 식(1)은 I_e 의 과대 평가량에 대한 보정이 필요하다. 따라서 본 실험의 경우에 고성능 철근콘크리트 단순보의 유효 단면 2차 모멘트 (I_{ef})는 I_{exp} 보다 1~20% 정도 작게 하여 다음과 같이 나타내 보았다.

$$I_{ef} = m \left(\left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \right) \quad (3)$$

여기서, $m = E_{cn}/E_{ch}$ 이고 E_{ch} 는 고성능 콘크리트의 탄성계수이고 E_{cn} 은 $2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이다.

Table 5 Comparison between experimental results and existing and proposed equation for the length of equivalent plastic hinge

Beams	$l_{p,cur}$	$l_{p,Baker}$	$l_{p,Mattock}$	$l_{p,Sawyer}$	$\Delta_{u,cur}$	$\frac{\Delta_{u,cur}}{\Delta_{u,LVDT}}$	$l_{p,pro}$	$\Delta_{u,pro}$	$\frac{\Delta_{u,pro}}{\Delta_{u,LVDT}}$
HO-00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HO-15	15.85	18.01	10.50	9.75	2.56	0.87	9.93	1.23	0.42
HO-30	8.98	14.84	10.50	9.75	1.76	0.97	13.51	1.66	0.91
HB-00	32.78	13.94	12.00	10.50	1.24	0.58	16.27	1.57	0.74
HB-15	15.13	11.32	12.00	10.50	1.90	0.95	18.37	1.73	0.86
HB-30	24.54	10.24	12.00	10.50	2.84	1.47	19.98	1.75	0.91
HU-00	17.29	9.50	12.00	10.50	2.81	1.14	20.74	2.13	0.87
HU-15	22.85	8.49	12.00	10.50	3.11	1.04	21.75	2.40	0.80
HU-30	27.81	7.76	12.00	10.50	4.13	1.28	22.48	2.57	0.80
NU-00	19.02	15.55	12.00	10.50	2.41	0.92	-	-	-
NU-15	13.21	14.62	12.00	10.50	1.76	0.69	-	-	-
NU-30	27.32	13.70	12.00	10.50	4.06	0.95	-	-	-
HU ⁰ -00	11.16	9.50	12.00	10.50	1.86	0.93	10.5	1.48	0.74
HU ⁰ -15	10.28	8.49	12.00	10.50	1.74	0.96	10.5	1.62	0.90
HU ⁰ -30	10.26	7.76	12.00	10.50	1.80	0.93	10.5	1.69	0.92

$l_{p,cur}$: 측정된 곡률 다이어그램의 면적으로 구한 등가 소성힌지 길이.

$\Delta_{u,cur}$: 측정된 곡률 다이어그램의 모멘트로 구한 극한시 변위. $l_{p,pro}$: 식(5)로 구한 등가 소성힌지 길이.

$\Delta_{u,LVDT}$: LVDT로 측정된 극한시 변위. $\Delta_{u,pro}$: 식(8)로 구한 극한시 변위. 여기서 단위는 cm이다.

표 4에서 볼 수 있듯이, 본 실험의 경우에 I_{ef} 에 대한 I_{exp} 의 비는 대부분의 경우 $M_a/M_{cr} \leq 2.0$ 일 때 변화하고 있으나 $2.0 < M_a/M_{cr} < M_y/M_{cr}$ 일 때 거의 일정하고 항복하중에서 다시 약간의 변화가 나타나기 시작함을 관찰할 수 있었다.

사용하중 범위내에서 고성능 철근콘크리트 단순보의 치짐은 식(2)와 (3)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta = \frac{p \cdot a}{48 E_c I_{ef}} (3L^2 - 4a^2) \quad (4)$$

표 3에서 보는 바와같이 항복하중에서 서로 다른 a/d 값에 대한 고성능 철근콘크리트 보의 실험결과 치짐과 식(4)로 구한 예상치짐이 서로 잘 일치함을 볼 수 있다 (평균의 실험/이론 = 0.88, 표준편차 = 0.071).

3.3 등가 소성힌지 길이

그림 6에 나타난 바와같이, 비탄성 회전은 $M_y \leq M \leq M_u$ 인 소성힌지 길이라고 부르는 구간에서 집중적으로 나타난다. 소성힌지 길이는 극한시 휨모멘트 다이어그램의 형태, 인계 단면으로부터 변곡점

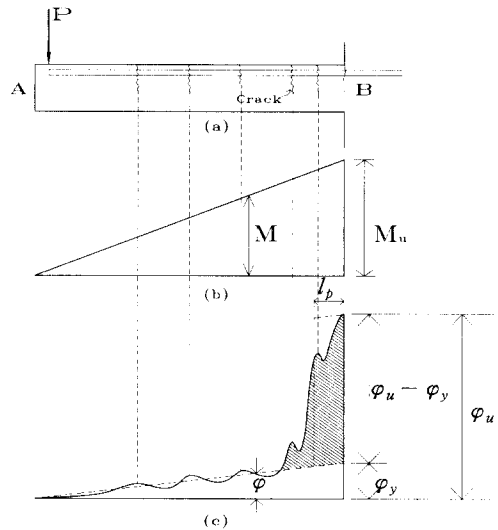


Fig. 6 Curvature distribution along beam at ultimate moment²⁾. (a) Beam. (b) Bending moment diagram. (c) Curvature diagram.

까지의 거리, 철근비, 콘크리트 강도 등에 영향을 받는다^{2,5)}.

비탄성 구간에서 곡률의 실험값은 대부분이 보의 중앙부에서 하중이 증가하면서 점점 커지다가 최대 하중에 근접해서 2점가력의 경우는 가력점 부근으로, 1점가력의 경우는 휨-전단 균열이 발생하는 부근으로 응력이 재분배되므로써 보의 중앙 부분의 인장철

근의 변형도가 감소하면서 최대하중에서는 곡률의 크기가 감소하는 경향으로 나타났다(그림 7 참조). 그런데, 곡률이 가장 클 때 모멘트는 극한 모멘트의 95~99%로 극한 모멘트와 거의 차이가 없으므로 극한 곡률과 극한 모멘트는 안전측에서 곡률이 가장 클 때로 평가하였다.

보의 휨실험에서 측정된 곡률 다이어그램의 모멘트에 의한 보의 극한시 처짐²⁾은 실험결과와 거의 일치하게 나타났다(표 5 참조). 등가 소성힌지 길이는 항복후 극한시까지 비탄성 구간에서 측정된 곡률 다이어그램의 면적과 같은 즉, 높이가 극한과 항복 곡률의 차이($\phi_u - \phi_y$)인 사각형의 폭을 결정함으로써 평가할 수 있다. 등가 소성힌지 길이에 대한 실험결과와 보통 콘크리트의 경우 다른 연구자들에 의해 제안된값^{2,5)}은 표 5에 나타났다. 고성능 철근콘크리트보의 실험 결과 1점 하중을 가하는 경우 등가 소성힌지 길이의 실험값은 Sawyer의 식과 거의 일치하게 나타났으나, 2점 하중을 가하는 경우는 등가 소성힌지 길이의 실험값은 기존의 제안식과 차이가 많이 나타났다. 따라서, 본 실험의 경우에 고성능 철근콘크리트 보의 등가 소성힌지 길이는 1점 하중을 가하는 경우 Sawyer의 식을 사용하고, 2점 하중을 가하는 경우 등가 소성힌지 길이는 Baker의 제안식을 근거로 압축철근비가 증가할수록 소성힌지 길이가 증가하는 경향을 반영하여 다음의 식(5)와 같이 나타내었다.

$$l_p, \text{Sawyer} = 0.25d + 0.075z$$

$$l_p = 0.48k_1 \left(\frac{z}{d}\right)(d - c) \quad (5)$$

여기서, k_1 은 연강의 경우 0.7이고 냉간 압연강의 경우 0.9이다. 그리고 z 는 임계단면으로 부터 변곡점까지의 거리이며, d 는 유효층이고 c 는 극한 모멘트에 서 중립축 층이다.

3.4 소성힌지의 회전능력

모든 비탄성 회전은 그림 6에 나타낸 것처럼 소성힌지에 집중된다고 가정하면, 등가 소성힌지 길이, 항복 및 극한시 곡률을 이용하여 소성힌지의 회전 θ_p 를 표현하는 것이 가능하다.

$$\theta_p = l_p(\phi_u - \phi_y) \quad (6)$$

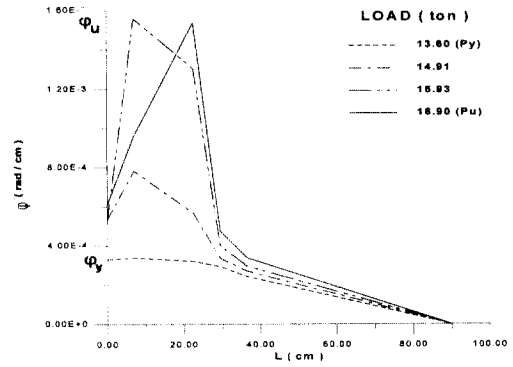


Fig. 7 Variation of curvature with loading level after yielding of tested beams(HU-15).

여기서, l_p 는 식(5)에 의한 등가 소성힌지 길이이고 극한 곡률 ϕ_u 는 콘크리트의 극한 변형도가 0.0047일 때 값($\phi_u = \epsilon_{cu}/c$)이다.

부재의 극한시 회전 및 처짐은 탄소성 범위의 합으로써 다음과 같이 구할 수 있다²⁾.

$$\theta_u = \theta_e + \theta_p \quad (7)$$

$$= \phi_y \frac{l}{2} + (\phi_u - \phi_y) l_p$$

$$\Delta_u = \left(\frac{\phi_y l}{2} \frac{2l}{3}\right) + (\phi_u - \phi_y) l_p \left(l - \frac{l_p}{2}\right) \quad (8)$$

본 실험의 경우에 식(8)에 식(5)와 식(6)을 대입하여 구한 부재의 처짐은 실험결과 LVDT로 측정된 처짐값의 평균 81%, 표준편차 13.8%로 나타남을 관찰할 수 있었다(표 5). 여기서 편차가 다소 나타났는데, 이는 보의 변형의 대칭을 예상하여 보의 중앙에 대해 한쪽에서만 변형도를 측정하였기 때문이라고 생각된다.

4. 결론

콘크리트 실린더 압축강도가 700 kg/cm^2 , 슬럼프 20~25 cm, 슬럼프 플로우 60~70 cm인 고성능 철근콘크리트 및 보통강도 철근콘크리트 단순보의 휨실험 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 본 실험의 경우에 콘크리트 실린더 압축강도가 700 kg/cm^2 인 고성능 철근콘크리트 보의 극한곡률을 구할 때 콘크리트 압축연단의 극한변형도는 $\epsilon_{cu} = 0.0047$ 의 값을 사용할 수 있는 것으로 나타났

다.

2) 유효단면 2차 모멘트를 구하는 기존 식(1)은 고성능 철근콘크리트 단순보의 휨강성을 과대 평가하고 있으므로 이러한 과대 평가량을 보정하기 위하여 본 실험의 경우에 나타낸 고성능 철근콘크리트 단순보의 유효단면 2차 모멘트(I_{ef})는 $2.0 < M_a/M_{cr} < M_y/M_{cr}$ 일 때 실험결과와 약 80~99(평균 82%)로 나타났다.

$$I_{ef} = m \left(\left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \right)$$

3) 본 실험의 경우에 고성능 철근콘크리트 단순보의 등가 소성힌지 길이는 1점 하중을 가하는 경우 Sawyer의 식을 사용할 수 있으나, 2점 하중을 가하는 경우에 등가 소성힌지 길이의 실험값과 기존의 이론값이 차이가 많이 생기므로 등가 소성힌지 길이는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$l_p = 0.48k_1 \left(\frac{z}{d} \right) (d - c)$$

4) 고성능 철근콘크리트 단순보의 소성힌지의 회전능력은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\theta_p = l_p (\phi_u - \phi_y)$$

5) 본 실험의 경우에 참고로 제시한 위의 결론 1, 3, 4의 식을 이용하여 구한 처짐은 실험결과에 의해 얻어진 처짐값의 약 80%로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김형만, 고만영, 김용부, "고성능 철근콘크리트 보의 휨거동에 대한 실험적 연구," *대한건축학회논문집*, 제13권 4호, 1997. 4, pp. 381-388
2. Park, R., and Pauley, T., "Ultimate Deformation and Ductility of Members with Flexure," *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons Inc., 1975, pp. 195-269
3. P. T. Wang, S. P. Shah, and A. E. Naaman, "Stress-Strain Curves of normal and Lightweight Concrete in Compression," *ACI Journal*, November, 1978, pp. 603-611
4. Samir A. Ashour and Faisal F. Wafa, "Flexural Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 90, May-June, 1993, pp. 279-287
5. S. K. Kaushik, L. N. Ramamurthy, and C. B. Kukreja, "Plasticity in Reinforced Concrete Continuous Beams with Parabolic Soffits," *ACI Journal*, Vol. 77, Sep.-Oct., 1980, pp. 369-377
6. Edward G. Nawy and Benxian Chen, "Deformational Behavior of High Performance Concrete Continuous Composite Beam Reinforced with Prestressed Prisms and Instrumented with Bragg Grating Fiber Optic Sensors," *ACI Structural Journal*, V. 95, NO. 1, Jan.-Feb., 1998, pp. 51-60
7. R. N. Swamy and Sa'ad A. Al-Ta'an, "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete," *ACI Journal*, Sep.-Oct., 1981, pp. 395-405
8. ACI Committee 318, "Deflections," *ACI 318-95*, 1995, pp.

요 약

본 논문은 고성능 철근콘크리트 보의 휨강성, 소성힌지 길이 및 소성힌지의 회전능력에 관한 연구이다. 실험은 철근비, 콘크리트 강도 및 하중 재하형태(1점가력과 2점가력)를 변수로 하여 총 15개의 철근콘크리트 단순보에 대하여 행하여 졌다. 콘크리트의 실린더 압축강도가 700 kg/cm², 슬럼프 20~25 cm 및 슬럼프 플로우가 60~70 cm인 고성능 철근콘크리트 및 보통 강도 철근콘크리트 단순보의 휨실험 결과, 본 실험의 경우에 고성능 철근콘크리트 보의 극한 곡률을 구할 때는 $\epsilon_{cu} = 0.0047$ 의 값을 사용할 수 있는 것으로 나타났다. 고성능 철근콘크리트 단순보의 휨강성을 평가하기 위해 유효단면 2차 모멘트를 구하는 식과 고성능 철근콘크리트 단순보에 2점 하중을 가하는 경우 등가 소성힌지 길이를 구하는 식이 본 실험의 경우에 대해서 제시되었다. 극한 모멘트 상태에서 이러한 식을 사용하여 구한 처짐값은 실험값과 비교적 일치하게 나타났다.

(접수일자 : 1998. 4. 27)